Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen
der energetischen Gebäudesanierung

Gutachten: Energetische Gebäudesanierung

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Prof. Dr.-Ing. Dieter Wolff

Braunschweig,
07.11.2020

Impressum

Titel des Gutachtens:
Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen der energetischen Gebäudesanierung

Geschäftszeichen:
ZR5-1133-2020-008-15-PA18

Projektausschreibung:
Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Projektfinanzierung:
Deutscher Bundestag

Projektlaufzeit:
22.01.2020 – 30.09.2020

Verantwortliche Berichtverfasser:
Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Prof. Dr.-Ing. Dieter Wolff

Datenstand:
Braunschweig, 07.11.2020

Allgemeiner Hinweis zur Schriftfassung:
Im Rahmen der schriftlichen Ausführungen dieses Gutachtens wird zur Mehrzahlbildung von Personengruppen (bei Unkenntnis der Gruppenzusammensetzung) das generische Maskulinum verwendet. Zudem nennen sich die Autorin und der Autor in diesem Sinne vereinfachend „Gutachter“ (auch in Kenntnis der Geschlechter dieser Zweiergruppe).

Quelle Titelfoto:
Kati Jagnow

Verwendungshinweise aller anderen Grafiken und Tabellen:
Für alle Grafiken, die aus fremder Literatur direkt übernommen wurden, liegen Veröffentlichungsgenehmigungen vor, für welche sich die Gutachter bei den Fachkollegen ausdrücklich bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Impressum 2
Inhaltsverzeichnis 3
Zusammenfassung 8

1 Übersichtsdarstellung – Gutachten: Energetische Gebäudesanierung 36

1.1 Einleitung 36
1.2 Klima- und energiepolitische Rahmenbedingungen 39
1.2.1 Energieträgermix – Kontroverse der Wissenschaft 39
1.2.2 CO_2-Budget 43
1.2.3 CO_2-basierte Bepreisung 46
1.2.4 Qualitätssicherung, Erfolgsnachweis und Monitoring 48
1.2.5 Best und worst case 51
1.2.6 Kreislauf der Betriebserfahrungen 53
1.2.7 Grenzkosten-Null-Gedanke 55
1.2.8 Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen 56
1.3 Ausgangslage – der Gebäudebestand, Energieverbrauch und Emissionen 58
1.3.1 Gebäudebestand 58
1.3.2 Typgebäude des Gutachtens 59
1.3.3 Energieverbrauch 62
1.3.4 Emissionen und Primärenergie 70
1.3.5 Sanierungsrate, Sanierungstiefe und Sanierungsquote 73
1.3.6 Energie- und Investitionskosten 76
1.4 Energetische Sanierung in der Mikroperspektive 81
1.4.1 Bilanzierungsmodell für Gebäude- und Anlagentypen 82
1.4.2 Maßnahmen an der Gebäudehülle 84
1.4.3 Maßnahmen an den Haupterzeugern 88
1.4.4 Maßnahmen an der Peripherie 95
1.4.5 Maßnahmen an Zusatzerzeugern 97
1.4.6 Qualitätssicherung 101
1.4.7 Pakete und Reihenfolgen 102
1.4.8 Einordnung sonstiger Technologien 107
1.4.9 Sensitivitätsanalysen 108
1.4.10 Ergebnisinterpretation für Selbstnutzer, Mieter und Vermieter, Contractoren 113
1.4.11 Ergebnisübertragung auf Neubau und Nichtwohnbau 116
1.5 Energetische Sanierung in der Makroperspektive 117
1.5.1 Mögliche bauliche Sanierung und Technologieausbreitung bis 2050 118
1.5.2 Mögliche Kostenentwicklung, Emissionsfaktoren und Energiepreise 122
1.5.3 Mögliche Entwicklung der Energie- und Emissionsbilanz aller Wohnbauten bis 2050 124
1.5.4 Mögliche Entwicklung der Kostenbilanz der Bestandswohnbauten bis 2050 133
1.5.5 Variante 1: Beschleunigtes Erreichen der Klimaneutralität 137
1.5.6 Variante 2: Alternative Energiepreise 139
1.6 Handlungsoptionen 141
1.6.1 Datengrundlagen für Entscheidungen in Politik und Wissenschaft 142
1.6.2 Erhöhung der Effizienz energetischer Sanierungen 144
1.6.3 Weitergehende Handlungsoptionen 148
1.6.4 Ausblick auf die generelle Klimaschutzstrategie 150

2 Anhang: Detaildarstellung des klima- und energiepolitischen Rahmens 153

2.1 Rückblick und Ausblick 155
2.1.1 Vor der Finanzkrise 2008 156
2.1.2 Die Zwischenzeit von 2010 bis 2020 156
2.1.3 Fridays for future und die Zeit der Corona-Krise 157
2.1.4 Wesentliche Ursachen bisheriger Zielverfehlung 159
2.2 Status Quo 160
2.2.1 Sektorenkopplung 160
2.2.2 EnEV, EEWärmeG und GEG 161
2.2.3 Europa und EPBD 163
2.2.4 Fordern und Fördern 164
2.2.5 Potential der Qualitätssicherung 167

3 Anhang: Detaildarstellung zur Untersuchung der Mikroperspektive 169

3.1 Typgebäude 171
3.1.1 Ein- und Zweifamilienhaus EZFH 171
3.1.2 Mehrfamilienhaus MFH 173
3.1.3 Grundbilanz 174
3.2 Energieeffizienz und Kosten für Maßnahmen am Baukörper 176
3.2.1 Dämmung Außenwand 176
3.2.2 Fenstertausch 182
3.2.3 Dämmung Dach und Geschossdecken 186
3.2.4 Dämmung Kellerdecke und Bodenplatten 193
3.2.5 Zwischenfazit bauliche Maßnahmen 198
3.3 Energieeffizienz und Kosten für Maßnahmen an den Haupterzeugern 202
3.3.1 Wärmepumpe 202
3.3.2 Gas- und Ölkessel 214
3.3.3 Holzkessel 226
3.3.4 Konventionelle Nah- und Fernwärmesysteme 231
3.3.5 Kalte Nah- und Fernwärme 239
3.3.6 Kraft-Wärme-Kopplung 240
3.3.7 Zwischenfazit Haupterzeuger 244
3.4 Energieeffizienz und Kosten für Maßnahmen an der Peripherie 253
3.4.1 Trinkwarmwasserzirkulation 253
3.4.2 Dezentralisierung der Trinkwassererwärmung 256
3.4.3 Wärmeabgabesysteme 259
3.4.4 Heizungsrohrnetze 263
3.4.5 Zwischenfazit Peripherie 265
3.5 Energieeffizienz und Kosten für Zusatzerzeuger 267
3.5.1 Photovoltaik 267
3.5.2 Solarthermie 277
3.5.3 Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung 282
3.5.4 Zwischenfazit Zusatzerzeuger 286
3.6 Energieeffizienz und Kosten für die Qualitätssicherung 294
3.6.1 Bauliche Qualität 295
3.6.2 Anlagentechnische Qualität 296
3.6.3 Energieeffizienz und Kosten 300
3.7 Nicht detailliert berücksichtige Maßnahmen und Technologien 304
3.8 Maßnahmenfolgen und -pakete 306
3.8.1 Kompletter Sanierungsbedarf 308
3.8.2 Sanierungsbedarf nur an der Anlagentechnik 309
3.8.3 Sanierungsbedarf nur am Baukörper 311
3.8.4 Kein Sanierungsbedarf 314
3.8.5 Fazit zur Thematik Pakete und Reihenfolgen 317
3.8.6 Entscheidungsfindung im konkreten Einzelfall 320

3.9 Sensitivitätsanalysen 324
3.9.1 Sanierungsfördernde und -hemmende Randdaten 324
3.9.2 Nutzereinfluss 326
3.9.3 Detailaspekt 1: Klimaerwärmung 330
3.9.4 Detailaspekt 2: Trinkwarmwassernutzen 335
3.9.5 Detailaspekt 3: Energiepreise 337
3.10 Einzelauswertungen 345
3.10.1 Selbstnutzung 346
3.10.2 Mieter/Vermieter-Strukturen 348
3.10.3 Contracting 352
3.11 Nichtwohnbau und Neubau 354
3.11.1 Übertragung der Erkenntnisse auf den Nichtwohnbau 354
3.11.2 Übertragung der Erkenntnisse auf den Neubau 358

4 Anhang: Detaildarstellung zur Untersuchung der Makroperspektive 360

4.1 Einordnung relevanter Quellen 360
4.1.1 Makrostudien 361
4.1.2 Metastudien 369
4.2 Hauptszenario: Zeitvariable Größen und Randdaten 371
4.2.1 Bevölkerung und Flächen 371
4.2.2 Sanierungsquoten für den Baukörper 374
4.2.3 Marktdurchdringung der Haupterzeuger 381
4.2.4 Sanierungsquoten für die Peripherie 385
4.2.5 Technologieausbauquoten für Zusatzerzeuger 388
4.2.6 Baupreise und -finanzierungszins 392
4.2.7 Energie- und CO_2-Preise 394
4.2.8 Emissions- und Primärenergiefaktoren der Energieträger 394
4.3 Hauptszenario: Ergebnisse für die Gesamtbestandsentwicklung 395
4.3.1 Endenergie 395
4.3.2 Energiekosten 399
4.3.3 Primärenergie 400
4.3.4 Emissionen 403
4.3.5 Details der Energiebilanz 405
4.3.6 Einfluss der Qualitätssicherung 408
4.3.7 Fazit zur Entwicklung des Wohnbaugesamtbestandes 410
4.3.8 Übertragung der Erkenntnisse Nichtwohnungsbau 413
4.4 Variante 1: Beschleunigtes Erreichen der Klimaneutralität 414
4.4.1 Modifikation zeitvariabler Größen 414
4.4.2 Details der Energiebilanz 418
4.4.3 Endenergie und Energiekosten 419
4.4.4 Emissionsminderung und Fazit 420
4.5 Hauptszenario: Ergebnisse für die Sanierung 421
4.5.1 Abschätzung der Investitionskosten 422
4.5.2 Endenergie 424
4.5.3 Primärenergie und Emissionen 425
4.5.4 Gesamtkosten 426
4.5.5 Fazit zur Sanierung 428
4.6 Variante 2: Alternative Energiepreise 431
4.6.1 Modifikation Energiepreise 431
4.6.2 Energie- und Gesamtkosten 432

5 Anhang: Hintergrundinformationen 435

5.1 Flächen und Belegung 435
5.1.1 Gebäude und Wohneinheiten 435
5.1.2 Wohnbauflächen 436
5.1.3 Personenbelegung 438
5.1.4 Eigentumsstruktur 439
5.1.5 Bezugsgrößen 441
5.2 Bedarf und Verbrauch 444
5.3 Energieanalyse aus dem Verbrauch 457
5.3.1 Erfassung von Energiemengen 457
5.3.2 Witterungs- und Zeitkorrektur 458
5.3.3 Energieanalyse aus dem Verbrauch 460
5.3.4 Qualitätssicherung mit Verbrauchsdaten 463
5.4 Endenergieverbrauch 468
5.4.1 Endenergieverbrauch der Gebäude 469
5.4.2 Heizungs- und Trinkwarmwasseraufwendungen sowie Haushaltsstrom 475
5.4.3 Ausgleich von Angebot und Nachfrage 482
5.5 Energieträgerbewertung 484
5.5.1 Energiepreise 484
5.5.2 Primärenergie und Primärenergiefaktoren 486
5.5.3 Emissionen und Emissionsfaktoren 490
5.5.4 Äquivalenter CO_2-Preis 493
5.6 Versorgungsstruktur und Wärmeerzeuger 497
5.6.1 Installierte Wärmeerzeuger 497
5.6.2 Bestehende Versorgungsstruktur der Wohngebäude 500
5.6.3 Bestehende Versorgungsstruktur der Nichtwohngebäude 505
5.6.4 Details einzelner Erzeuger 505
5.7 Typologie 508
5.7.1 Gebäudetypologie Wohnbau 509
5.7.2 Gebäudetypologie Nichtwohnbau 516
5.8 Kosten 519
5.8.1 Baukosten- und Baupreisindex 519
5.8.2 Investitionskosten und Kostenfunktionen 523
5.8.3 Wartungs- und andere Folgekosten 536
5.8.4 Sowieso- und energiebedingte Mehrkosten 541
5.8.5 Vorgezogene Investition 550
5.8.6 Neben- und Betriebskosten 554
5.9 Wirtschaftlichkeitsranddaten 555
5.9.1 Nutzungs- und Lebensdauer von Bauprodukten 555
5.9.2 Finanzierung und Zinsen 558
5.9.3 Steuern und Abschreibungen 559
5.10 Förderung 560
5.10.1 Geförderte Maßnahmen im Rückblick – Status Quo 560
5.10.2 Ausblick Förderprogramme 567
5.11 Sanierungsrate, Sanierungstiefe und Sanierungsquote 568
5.11.1 Sanierungsrate 568
5.11.2 Sanierungstiefe 572
5.11.3 Sanierungsquote 575

6 Anhang: Bilanzierungsmodell 576

6.1 Mikroperspektive 576
6.1.1 Berechnungsablauf 578
6.1.2 Ergebnisauswertung 582
6.1.3 Klima- und Nutzungsranddaten 586
6.1.4 Randdaten des Baukörpers 589
6.1.5 Randdaten der Wärmeversorgung 590
6.1.6 Randdaten der Elektroenergiebilanz 594
6.1.7 Ökologische Bewertung 595
6.1.8 Ökonomische Bewertung 595
6.2 Makroperspektive 596
6.2.1 Berechnungsablauf 597
6.2.2 Besondere Festlegungen 597

7 Verzeichnisse und Übersichten 599

7.1 Glossar 599
7.2 Verzeichnis wichtiger Formelzeichen und Abkürzungen 599
7.3 Literaturverzeichnis 604
7.4 Abbildungsverzeichnis 618
7.5 Tabellenverzeichnis 623

Zusammenfassung

Dem Gutachten wird eine zusammenfassende Darstellung wesentlicher Erkenntnisse vorangeschickt.

(1) Einstieg in das vorliegende Gutachten: Zentrale Fragestellung und Herangehensweise

Aus energie- und klimapolitischer Sicht kommt der Reduzierung des Energieverbrauchs im Gebäudebereich hohe Bedeutung zu. Insbesondere im Bestand von Wohn-, Büro- und Verwaltungsgebäuden werden hohe Einspareffekte gesehen. Um hier Investitionsmittel und Fördergelder effizient einzusetzen, bedarf es robuster und realistischer Daten bzgl. der erzielbaren Energieeinspar- und CO_2-Minderungspotenziale als Datengrundlage politischer Entscheidungen.

Das vorliegende Gutachten befasst sich vor diesem Hintergrund mit den gängigen Verbesserungsmaßnahmen an Gebäuden und stellt Einspareffekte (Endenergie, Treibhausgasemissionen, Primärenergie) sowie Kosten-Nutzen-Verhältnisse dar. Insbesondere die **Abweichungen zwischen errechneten und gemessenen Einspareffekten** sowie **Effekte der Qualitätssicherung** werden dabei näher beleuchtet. Es wird unterschieden zwischen rein anlagentechnischen Maßnahmen (Einbau von Wärmepumpen, Solarthermie, Photovoltaik usw.), rein baulichen Maßnahmen (Außenwanddämmung, Fenstertausch usw.) und Kombinationen aus beiden, einschließlich deren Wechselwirkungen.

Die Untersuchung verfolgt dabei für Einzel- und Paketmaßnahmen zunächst die **Mikroperspektive**, d. h. Lösungsoptionen auf Ebenen eines Gebäudes und der darin vorhandenen Technik. Das einzelne Gebäude – illustriert durch zwei Typgebäude (Ein- und Zweifamilienhaus EZFH und Mehrfamilienhaus MFH) – steht daher im Mittelpunkt. Weitgehend aus Praxis- und Feldmessungen ermittelte Kennwerte werden als Basis für real zu erwartende Energiebilanzen sowie Wirtschaftlichkeitsbewertungen der genannten Verbesserungsoptionen verwendet.

Als Fazit der Mikroanalyse ergibt sich u. a. eine Rangliste der Maßnahmen, wenn diese nach ihrem **äquivalenten CO_2-Preis** – dem Verhältnis von jährlichen Kapitalkosten zu eingesparten Emissionen bzw. nach den notwendigen Investitionen je jährlich eingesparten Emissionen – bewertet werden. Darüber hinaus lassen sich ggf. **notwendige Investitionskostenzuschüsse** zum Erreichen einer Grenzwirtschaftlichkeit bestimmen (Fördermittelaspekt). Auch potentiell **notwendige erhöhte Energieträgerpreise** (z. B. über eine zusätzliche Emissionspreiskomponente) bzw. generell andere Ansätze der Energieträgerbepreisung lassen sich hieraus ableiten.

Anschließend erfolgt in der **Makroperspektive** eine Betrachtung von Sanierungs- und Erneuerungsmaßnahmen, in aggregierter Form, für Deutschland. Basis sind der deutsche Wohnbaubestand – mit seiner inhomogenen Struktur (Gebäudetypen, baulicher Zustand, anlagentechnische Ausstattung, Nutzung) sowie die Erkenntnisse aus der Mikroperspektive. Das Ziel ist die Einhaltung der vereinbarten Klimaschutzziele. Es wird in diesem Zusammenhang auch die Frage beantwortet, wieso verschiedene Studien zu teils sehr unterschiedlichen Aussagen bei ähnlicher Fragestellung kommen.

Übergeordnet werden im Rahmen des Gutachtens Aussagen getroffen, wie **Informationsgrundlagen für wirksame und effiziente Politikentscheidungen verbessert** werden können. Es werden **Handlungsoptionen** für (bundes-)politische Akteure aufgezeigt, die nach Ansicht der Gutachtet darauf abzielen, Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen der energetischen Gebäudesanierung zu verbessern. Die für Bestandswohngebäude gewonnenen Erkenntnisse werden im Rahmen des Gutachtens qualitativ auf die Nichtwohnbauten sowie den Neubau übertragen.

Das Gutachten gliedert sich in einen **Hauptteil** (1) sowie **Anhänge** (2 bis 6) **mit Detaildarstellungen** zu den einzelnen Aspekten und Themengebieten. Es bezieht sich auf „Gebäude“, insbesondere die „bestehenden Wohngebäude“. Den Verfassern des vorliegenden Gutachtens ist bewusst, dass die Gebäudeentwicklung sehr eng an die Entwicklung der Energiewirtschaft und die anderen Verbrauchssektoren gekoppelt ist. Die relevanten Annahmen zu den gegebenen oder notwendigen Entwicklungen außerhalb des „Gebäudesektors“ werden entsprechend benannt.

(2) Der Wohngebäudebestand in Deutschland kurzgefasst in Zahlen: Typgebäude, typische Energiekennwerte und Emissionen

Das Gutachten verwendet die Erhebungen des statistischen Bundesamtes [1] als Datenbasis. In Deutschland gibt es demnach Stand Ende 2018 insgesamt 19,05 Mio. Wohngebäude, von denen 83 % Ein- und Zweifamilienhäuser sind, der Rest sind Mehrfamilienhäuser und in sehr geringer Zahl Wohnheime. Die Gebäude gliedern sich in 40,83 Mio. Wohneinheiten. Der Wohnungsbau umfasst 3,75 Mrd. Quadratmeter Wohnflächen. **Die pro Kopf verfügbare Wohnfläche steigt stetig an – seit 2010 jährlich um 0,3 m²/Person**. Sie lag Ende 2018 bei 45,9 m²/Person.

Im Bestand sind etwa 20,7 Millionen Wärmeerzeuger in Gebäuden installiert; diese Zahl hat sich in den letzten Jahren wenig geändert [2] [3] [4]. Der Markt ist dominiert von fossilen Energieträgern. Eine BDEW-Studie [5] kommt 2018 zu einem **mittleren Alter der Gebäudewärmeerzeuger von 17,0 Jahren.**

Neben den Wohnflächen und der Ausstattung mit Wärmeerzeugern lassen sich weitere Daten zu den Gebäuden erheben: Baualtersklassen, Belegungsdichten, Mengen und Qualitäten der Gebäudehülle, Vorhandensein verschiedener Zusatztechnologien (Lüftungsanlage, Solarthermie, Photovoltaik) u.v.m. Es entstehen **Typologien**, mit deren Hilfe der Gesamtenergieverbrauch, die Gesamtemissionen usw. des Sektors „Gebäude“ nachgebildet werden können. Dazu werden typische Vertreter von Gebäuden stellvertretend bilanziert.

Als Datengrundlage für die Wohnbaubewertung dieses Gutachtens dienen im Wesentlichen zwei Datenquellen: die Datenerhebungen von IWU [6] [7] und ARGE [8]. Die IWU-Typologie wird dabei genutzt, um **zwei Typgebäude** abzuleiten, siehe Tabelle 1. Weitere Eigenschaften werden im Punkt (9) der Zusammenfassung benannt.

		Ein- und Zweifamilienhaus EZFH		Mehrfamilienhaus MFH	
Stückzahl	[G]	15.837.211		3.216.005	
Grunddaten des Einzelobjektes					
Wohnfläche	[m²/G]	141,6		470,0	
Personenbelegung	[P/G]	2,74		12,18	
pro-Kopf-Wohnfläche	[m²/P]	51,6		38,6	
Gebäudehülle	[m²/G]	370,7		829,3	
Endenergiebilanz					
Qualitätssicherung		mit	ohne	mit	ohne
Wärme	kWh/(m²a)	163	189	134	156
davon Heizung …	kWh/(m²a)	137	160	102	122
… und Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	26	29	32	34
Haushaltsstrom	kWh/(m²a)	24	24	32	32

Tabelle 1 Kurzbeschreibung des Typ-EZFH und des Typ-MFH sowie Endenergiebedarf [eigene Darstellung] [eigene Bilder]

Werden alle Eigenschaften der beiden Gebäude auf ihre Durchschnittswerte festgelegt, entsteht die mittlere Energiebilanz für die Gebäude. **Unterstellt man 15 % der Gebäude mit und 85 % ohne Qualitätssicherung, ergibt sich für ein durchschnittliches EZFH ein wohnflächenbezogener Endenergiekennwert für Wärme von 183 kWh/(m²a). Das MFH weist 153 kWh/(m²a) auf, das Durchschnittsgebäude Deutschland 172 kWh/(m²a).** Dieser rechnerische Bedarf kann mit einem gemessenen Verbrauch verglichen werden.

Die Bedarfswerte decken sich gut mit realen Verbrauchsdaten aus kleineren verfügbaren Stichproben, z. B. ARGE [8] oder DENA [9] (brennwertbezogener Mittelwert aller Gebäude: EZFH ca. 173 kWh/(m²a), MFH ca. 158 kWh/(m²a)). **Die gute Übereinstimmung des berechneten Bedarfs und des gemessenen Verbrauchs war Ziel der Gutachter.** Sie tritt nicht zwangsläufig ein. Dies wird im Punkt (6) der Zusammenfassung weiter vertieft.

Der tatsächliche Gesamtverbrauch aller Gebäude ist nur näherungsweise gegeben. Eine **korrekte Mittelwertbildung aller ca. 19 Mio. Wohngebäude ist nicht möglich, weil die Verbrauchsdaten nicht flächendeckend erfasst werden**. Daher finden zwangsläufig Näherungsberechnungen statt. Maßgeblich ist die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen AGEB mit dieser Aufgabe betraut. Der Gesamtverbrauch der privaten Haushalte wird für das Jahr 2018 (ohne Witterungskorrektur, die zu einer Vergrößerung der Zahlen führen würde) mit etwa 650 TWh/a incl. etwa 125 TWh/a Haushaltsstrom beziffert, siehe Abbildung 1.

Es lässt sich feststellen, dass die AGEB-Werte für die Wohnbauten (beim Rückrechnen auf Einzelobjekte, also „Top-Down“) merklich geringer ausfallen als andere veröffentlichte Verbrauchskennwerte von Gebäuden. Eine Ursachenforschung kann im Rahmen des Gutachtens nicht erfolgen. Es bedarf nach Ansicht der Gutachter zunächst **einer breiteren Datenbasis** zur Beurteilung realer Verbrauchswerte für Wohn- und Nichtwohnbauten, mindestens unterteilt in die Anwendungssparten „Heizung“, „Warmwasser“, „Nutzerstrom“ sowie „Kälte/Raumlufttechnik“. Das setzt voraus, dass eine nennenswerte Anzahl von Gebäuden entsprechende **Energiezähler** aufweist und mindestens eine **repräsentative Stichprobe** dauerhaft erfasst wird. Diese Forderung wird z. B. von der Stiftung Energieeffizienz 2018 [10] oder dem IWU unterstützt. Ob und wie die laut BMWi [11] dafür beauftragte Bundesstelle für Energieeffizienz diesen Wunsch erfüllen kann, können die Gutachter nicht beurteilen.

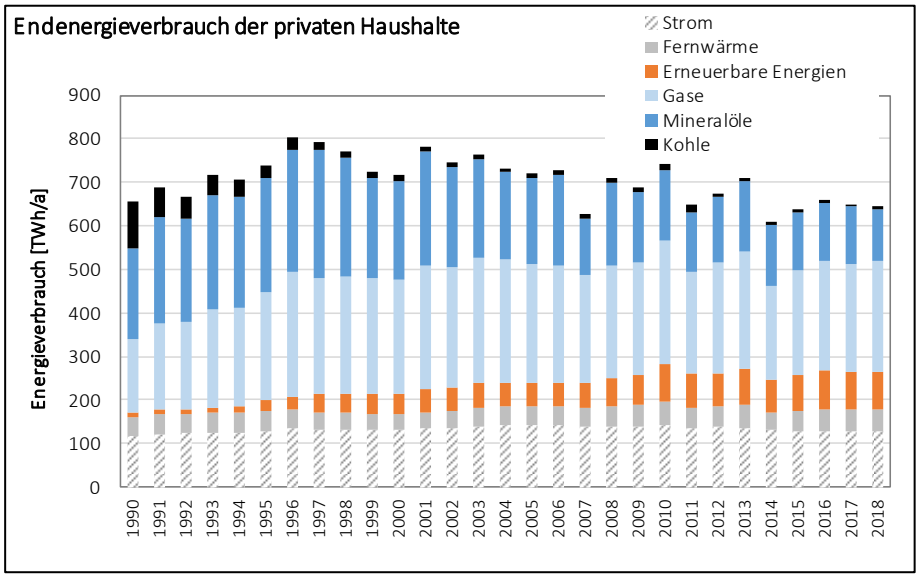


Abbildung 1 Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern nach AGEB, eigene Darstellung nach [12]

Die Endenergie lässt sich in Energiekosten, Primärenergien oder Emissionen umrechnen. Dies gilt für die definierten Typgebäude ebenso wie für den deutschen Gesamtbestand. Anhand der Verbrauchsmengen und der Herkunft der Energieträger veröffentlicht das UBA für 2019 [13] Gesamtemissionen von etwa 800 Millionen Tonnen CO_2-äquivalente Emissionen. Seit 1990 sind in Deutschland energiebedingte CO_2-Emissionen um 35,7 % reduziert worden. Der Anteil der Gebäude an den Gesamtemissionen liegt nach Angaben des UBA [14] mit 122 Mio. Tonnen $CO_{2äqu}$/a bei 15,1 % und das der Haushalte im Gebäudebereich mit 88 Mio. Tonnen $CO_{2äqu}$/a bei 10,9 %. Hierin sind Emissionen für fernwärmeversorgte oder mit Stromheizungen versorgte Gebäude nicht enthalten, da nach der Sektorenaufteilung des Klimaschutzgesetzes Strom und Fernwärmeversorgung dem Sektor „Energiewirtschaft“ und nicht dem Sektor „Gebäude“ zugeordnet werden.

An dieser Stelle sei angemerkt: zum Ausrufen von Klimazielen für einzelne Sektoren und auch zur Überprüfung der Zielerreichung wäre es hilfreich, eindeutige Sektorengrenzen zu definieren. Wird nach dem „Quellprinzip“ bilanziert, dann gehören die Emissionen für Strom und Fernwärme zur „Energiewirtschaft“. Die Autoren des vorliegenden Gutachtens haben nach dem „Verursacherprinzip“ bilanziert und den Bilanzrahmen auf jegliche Energieform erstreckt, die ein Gebäude bezieht (Fernwärme, jeglicher Strom, auch Haushaltsstrom). Dies erschien – der Aufgabenstellung nach – zweckmäßig.

Weiteren Aspekten möglicher Diskrepanzen zwischen berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch widmet sich Abschnitt (6) der Zusammenfassung.

(3) Einschätzung der Sanierungsaktivitäten der vergangenen 10 Jahre im „Gebäudesektor“ und ein Appell zur Verbesserung der Datenlage sowie der Nutzeraufklärung

Die tatsächlich erreichten Einsparungen durch Gebäudesanierung der Vergangenheit lassen sich mit den heute eingesetzten Evaluationswerkzeugen auf Bedarfsbasis kaum beurteilen. **Eine dafür notwendige Datenbasis – im Sinne real erfasster Verbrauchsdaten vor und nach Sanierung – ist nicht gegeben.** Es können daher nur Näherungsabschätzungen erfolgen. Dies gilt auch für die Bauvorhaben, welche aus Bundesfördermitteln bezuschusst wurden (BAFA, KfW).

Das Monitoring der KfW-Förderprogramme wird seit etlichen Jahren vom Institut Wohnen und Umwelt IWU sowie dem Fraunhofer IFAM in Bremen durchgeführt. Die Berichte werden dabei jährlich fortgeschrieben (z. B. [15]). Es wird u. a. beschrieben, wie geförderte Dämmdicken im Verlauf der Zeit zunehmen, welche Hauptwärmeerzeuger hauptsächlich eingesetzt werden und welche Zusatztechnologien (Solarthermie, Photovoltaik usw.) im Verlauf der Zeit und in den verschiedenen Sanierungsstandards Verwendung finden. Über die Fördersummen lassen sich ausgelöste Bauvolumina bestimmen und Beschäftigungseffekte berechnen. Alle diese Daten sind objektiv nachvollziehbar. Kritisch einzuschätzen sind die daraus bestimmten Endenergieeinsparungen, Primärenergieeinsparungen und Emissionsminderungen. **Es erfolgt bei der Datenerhebung keine Abfrage des Verbrauchs vor und nach der Sanierung.** Somit werden alle **Einsparungen** zwangsläufig **rechnerisch bestimmt**. Die errechneten Einsparungen werden somit nach kritischer Selbsteinschätzung der o.g. Verfasser tendenziell überschätzt [15].

Ein Gesamtmonitoring des „Marktanreizprogrammes“ (MAP) liegt beispielsweise mit dem Monitoringbericht von Zech et al. aus dem Jahr 2018 vor [16]. Letztlich ist die Problemlage identisch zu der Studie des IWU. Eine sehr gute Datenbasis ist gegeben hinsichtlich der Förderfälle sowie der theoretischen Effizienzen der geförderten Produkte. Eine Hochrechnung auf die realen Endenergieeinsparungen oder nutzbar gemachten regenerativen Energien kann aber nicht erfolgen, weil reale Messwerte fehlen. Daher werden im Bericht u. a. Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen theoretisch berechnet und damit auch theoretisch die nutzbar gemachte Umweltwärme ermittelt sowie Kollektorkreiserträge der Solarthermie abgeschätzt.

Es liegt nicht an den Verfassern der zitierten Studien, dass die Einsparungen, Regenerativerträge und Effizienzen nur rechnerisch wiedergegeben werden, sondern an der Struktur der Förderung selbst. **Enthielte sie ein verpflichtendes Monitoring, wäre die Transparenz gegeben.**

Deutlich kritischer an der gegebenen Datenlage ist der „**Zirkelbezug**“, der sich daraus ergibt. Dies sei am „Solarertrag“ erläutert. Die üblichen „Bottom-Up“-Bilanzierer, z. B. Ersteller von Prognoseszenarien (ISE, IFEU usw.), bilanzieren einen Solarertrag für Deutschland aus der Summe aller installierten Kollektorflächen und einem angenommenen Ertrag pro Kollektorfläche. Das Ergebnis validieren sie zumeist an den AGEB-Verbrauchs-Bilanzen – mit dem Ziel möglichst nahe an den (als richtig eingestuften) Werten zu liegen.

AGEB und andere Verbrauchsdatenauswerter nutzen für ihre „Top-Down-Bilanzen“ mangels Messwerten jedoch ebenfalls abgeschätzte Erträge je Kollektorfläche, um in der jährlichen Bilanz für Deutschland u. a. den Gesamtsolarertrag darzustellen. Streng genommen entspricht diese Vorgehensweise auch nicht einem „Top-Down“-Vorgehen, denn das setzt voraus, der Gesamtsolarertrag für Deutschland wäre messtechnisch tatsächlich bekannt (analog dem Gesamtgas- oder -kohleverbrauch) und müsste nur auf die einzelnen Sektoren usw. verteilt werden.

Sowohl die Buttom-Up-Modelle, als auch die Top-Down-Bewertung kommen bei gleicher Annahme von kollektorflächenbezogenen Erträgen zum selben Ergebnis. Ob dies der Wirklichkeit entspricht, kann durch gegenseitige Validierung weder bestätigt, noch widerlegt werden. Alle Unzulänglichkeiten, die durch Fehlannahmen in beiden Modellen vorhanden sind, können nur durch neue Messungen (neuer Dateninput von außen) gefunden werden. Dies setzt ein Monitoring voraus, siehe Punkt (2) der Zusammenfassung. Mindestens ausgewählte Stichprobenuntersuchungen zu bestimmten Themen wären daher angebracht, z. B. Detailanalysen von Verteilverlusten, Erzeugereffizienzen, Trinkwarmwasseranteilen, typische Energiekennwerte je nach Baualtersklasse und Sanierungsgrad. Hieran orientieren sich die Gutachter bei der Verwendung von Kenngrößen in diesem Gutachten, die überwiegend aus eigenen Feldstudien in den letzten zwanzig Jahren ermittelt wurden.

Eine **Verbesserung der Datenlage für den Sektor „Gebäude“** mit nur annähernd so guter Detaillierung wie für den Sektor „Energiewirtschaft“ **ist aus Sicht der Gutachter sehr erstrebenswert**. Es könnte somit eine valide messtechnische Trennung von Wohn- und Nichtwohnbau sowie Bestand und Neubau erfolgen. **Auch ergibt sich dadurch die Möglichkeit, den Informationsfluss zum Bürger zu verbessern.**

Für die privaten Endverbraucher eignen sich nach Ansicht der Gutachter permanente und unaufgefordert gelieferte Informationen zu den Themen „persönlicher CO_2-Fußabdruck“, „Erzeugereffizienzen“ und „Baustandards“. Der **eigene CO_2-Fußabdruck** kann jedem so geläufig werden, wie der PKW-Verbrauch oder das Kalorienzählen bei einer Diät und **im Grundwissen verankert** werden. Eine Verbesserung der Durchsetzung von energetischen Sanierungen dürfte somit gegeben sein, wenn Energieverbrauchern klar aufgezeigt wird, wie der eigene Verbrauch und die eigenen Emissionen sich zurzeit darstellen, welche Optionen für eine Verbesserung vorhanden sind und wer potentielle Ansprechpartner für eine Energieberatung sind.

Die Daten lassen sich aus einer **Minimalmesstechnik** generieren, auch die digitale Datenerfassung (SmartMeter) ist dabei relevant. Mögliche Informationspfade sind öffentliche Aushänge im Mietwohnbau (zukünftig modifizierter Energieausweis), Heizkosten- oder Energieabrechnungen, Informationsaufgaben der Schornsteinfeger o. ä.

(4) Sanierungsrate, -tiefe und -quote: Beeinflussbarkeit der Geschwindigkeit baulicher Sanierungen und Technologiewechsel durch Förderung und Forderung

Der Gebäudebestand entwickelt sich durch Neubau, Abriss und Sanierungstätigkeiten. Der Gesamtmodernisierungsfortschritt beim Wärmeschutz im (nicht abgerissenen) Altbau hängt dabei von der Sanierungsrate und -tiefe ab. Dabei beschreibt die „**Sanierungsrate“ die Umsetzungszahlen je Zeiteinheit und die „Sanierungstiefe“ die Qualitäten der einzelnen Sanierung**. Die **„Sanierungsquote“ ist die Kombination** beider Einflüsse. Sie lässt sich näherungsweise als Verminderung des Endenergieverbrauchs definieren.

Wie auch bei den Verbrauchsdaten ist die Datenlage mangels konsequenter Erfassung aller Gebäude oder zumindest repräsentativer Stichproben dünn. Die mit Abstand am häufigsten zitierte Primärdatenquelle ist eine Stichprobenauswertung von 7500 Gebäuden, durchgeführt vom Institut Wohnen und Umwelt und dem Bremer Energieinstitut 2010 [6] und aktualisiert 2018 [7]. Die Sanierungsrate wird in den letzten Jahren **mehrheitlich bei ca. 1 %/a vermutet**. Der Wert umfasst in den meisten Analysen gewichtet die Verbesserung der Gebäudehüllbauteile (Dach, Wand usw.). Unter Berücksichtigung aller Maßnahmen, auch der Anlagentechnik, liegt der Wert bei ca. 2 %/a [17]. Hinweis: die Maßnahmen an der Anlagentechnik sind schwieriger zu erfassen, wenn ein Energieträgerwechsel damit verbunden ist (beispielsweise von Gaskessel auf Holzkessel oder Wärmepumpe umgestellt wird, weil Veränderungen der Endenergie, Primärenergie und Emissionen nicht proportional verlaufen).

Aus dem im Punkt (2) der Zusammenfassung bereits angeregten **Langzeitmonitoring der Verbrauchsdaten – mindestens einer repräsentativen Stichprobe – von Gebäuden** ließe sich in sehr viel kürzeren Zeitintervallen (und nicht mit 8 Jahren Versatz) auch eine Aussage zu Sanierungsfortschritten ableiten. So könnte kurzfristig politisch gesteuert und es könnten Maßnahmen rechtzeitig ergriffen werden.

Zwischen der real beobachtbaren Sanierungsrate und den für die Klimazielerreichung getroffenen Annahmen sind seit Jahren **deutliche Diskrepanzen** feststellbar. Häufig wird entsprechend kommuniziert, dass der Wert auf 2 %/a verdoppelt werden muss. Gemeint ist dabei regulär die Sanierungsrate der Gebäudehülle. Daraus leitet sich in der Literatur der Begriff „**Sanierungsstau**“ ab, der kontrovers diskutiert wird. Insbesondere ist für Kellerdecken und oberste Geschossdecken strenggenommen kein Sanierungsstau gegeben. Der einzige Anlass, diese eigentlich wartungsfreien Flächen zu verändern, ist die energetische Verbesserung. Ähnliches gilt für Klinkerfassaden. Aufgrund real deutlich längerer Lebensdauern vieler Bauteile als 50 Jahre können sich „von allein“ keine Sanierungsraten von 2 %/a (für diese Bauteile) ergeben. Es ist daher vor allem ein „**energetischer Sanierungsstau**“ festzustellen.

Die Sanierungstiefe beschreibt im Allgemeinen den Grad der energetischen Verbesserungen, welcher mit einer Sanierung erreicht wird – in einer Abstufung von „keine energetischen Verbesserungen“ bis hin zur Grenze des technisch Machbaren oder sogar Denkbaren. Rückblickend ist die Qualität von Sanierungen von den jeweils geltenden gesetzlichen Randdaten (Wärmeschutzverordnung, Energieeinsparverordnung) bzw. der Fördermittellandschaft (KfW, BAFA usw.) geprägt. Bezogen auf die Anlagentechnik kommen neben verbesserten Effizienzen derselben Technologie (besserer Kessel usw.) auch noch Technologiewechsel hinzu.

Die „Sanierungsquote“ fasst die Effekte der Sanierungsraten („wie häufig“) und Sanierungstiefen („wie gut“) zusammen. In der Konsequenz kann man am abnehmenden Endenergieverbrauch – bzw. besser an der zukünftig damit erreichten Emissionsminderung – alle Maßnahmen gemeinschaftlich beurteilen. Wenn ein **Gesamtziel in Form eines Verbrauchsrückgangs oder besser Emissionsrückgangs das Ziel** ist, also eine bestimmte „Sanierungsquote“ insgesamt festliegt, sind **zwei Hebel zu Zielerreichung gegeben: entweder es wird auf eine hohe Rate bei moderater Tiefe gesetzt oder auf eine geringe Rate bei dann höherer Tiefe**.

Nach Ansicht der Gutachter **wird die „Sanierungstiefe" der Bauteile am besten so gewählt, dass über sehr lange Zeiträume keine Nachsanierung mehr erforderlich ist**. Um das zu forcieren, erscheint **eine deutlich progressive (überproportionale) Förderung nur sehr guter Standards sinnvoll** (die für 50 Jahre keinen „Anlass zur Reue" geben).

Mit Fördermitteln oder durch gesetzliche Anforderungen lassen sich beide Hebel beeinflussen. Die höhere Sanierungsrate bedeutet vorgezogene Investitionen. Die höhere Sanierungstiefe bedeutet bessere Standards. Je nachdem, ob es sich um anlagentechnische oder bauliche Maßnahmen handelt, wirken nach Einschätzung der Gutachter Förderung und Forderung unterschiedlich, siehe Tabelle 2.

	Erhöhung der Sanierungsrate		Erhöhung der Sanierungstiefe	
	Förderung	Forderung	Förderung	Forderung
Baukörper (Dämmung, Fenstertausch)	☐	■	■	☐
Anlagentechnik (Technologiewechsel)	■	☐	☐	■

Tabelle 2 Mögliche Durchsetzbarkeit erhöhter Sanierungsraten und -tiefen [eigene Darstellung]

Die vorzeitige Umsetzung baulicher Maßnahmen erscheint schwieriger durchzusetzen; denkbar wären jedoch verpflichtende Maßnahmen (Forderung, GEG) nach einer angenommenen Nutzungsdauer, z. B. 35 Jahren für Fenster. Die Umsetzung bester Standards ließe sich dann besser fördern als fordern.

Bei der Anlagentechnik ist der vorzeitige Erzeugerwechsel eher durch Förderung zu erzielen – vor allem, da Erzeuger ohnehin eine begrenzte Lebensdauer aufweisen. Der Förderanreiz, dabei den Energieträgerwechsel zu vollziehen, war in der Vergangenheit nicht stark ausgeprägt, hier bietet sich nach Ansicht der Gutachter eher eine Verpflichtung an (Stichwort: Verbot einzelner Energieträger ab einem Datum X).

(5) Einfluss der Energieträgerbepreisung auf die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen und auf Fördertatbestände sowie Erarbeitung einer Alternative

Die Preisbildung der Energieträger hat einen starken Einfluss auf das Sanierungsgeschehen. Die **Preise** der am häufigsten eingesetzten Energieträger (Gas, Heizöl) **sind derzeit vergleichsweise niedrig**. Der wirtschaftliche Anreiz für bauliche Sanierungen ist daher gering. Der Anreiz zum Energieträgerwechsel ist deshalb nur in Ausnahmefällen gegeben, da Holz und vor allem Wärmepumpenstrom regelmäßig sogar zu steigenden Energie- und damit Betriebskosten führen – was selbst mit investiven Fördermitteln nicht kompensiert werden kann. Das spricht dafür, eine **grundlegend andere Energieträgerpreisbildung** zu diskutieren. Das Problem wird im Rahmen des Gutachtens als Diskussionsvorschlag dadurch „gelöst", dass eine optionale Energieträgerbewertung auf Basis der Emissionen erarbeitet und für zukünftige Maßnahmen in den wirtschaftlichen Abschätzungen angenommen wird, siehe Tabelle 3. **Sie setzt nicht auf die Logik „künftiger Preis = heutiger Preis + Emissionspreis", sondern geht davon aus, dass gilt: „künftiger Preis = Emissionspreis".**

System	heute übliches System Energiepreise, in [€/kWh]			modifiziertes System Energiepreise, in [€/kWh]		
	2020	2035	2050	2020	2035	2050
Erdgas	0,06	0,10	0,18	0,09	0,12	0,16
Heizöl	0,06	0,12	0,24	0,12	0,17	0,22
Holz	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06
Fernwärme	0,09	0,15	0,20	0,10	0,13	0,14
Strom (Bezug, Normaltarif)	0,31	0,18	0,24	0,19	0,23	0,22
Strom (Bezug, Wärmepumpe)	0,22	0,18	0,18	0,19	0,23	0,22
Strom (Einspeisung)	0,09	0,07	0,05	0,07	0,07	0,07

Tabelle 3 Vergleich der heutigen und modifizierten Energieträgerbepreisung [eigene Darstellung]

Die für 2020 angenommen Preise des heute üblichen Systems (links) entstammen dem Preisspiegeln von AGEB und CARMEN [18] [19]. Die Festlegung für den zurückvergüteten Strom ergibt sich im Standardfall auf Basis des aktuellen EEG; der Wärmepumpentarif ergibt sich aus der neuesten Veröffentlichung des Bundesverbandes Wärmepumpen [20].

Grundlage für die modifizierten Preise (rechts) ist ein einheitlicher Emissionspreis von 418 €/t für alle Energieträger außer Holz (dieses wird mit dem heute üblichen Preis angesetzt). Der einheitliche Preis ergibt sich aus der Summe aller Energieträgerkosten der privaten Haushalte in Wohngebäuden und der Summe aller damit verbundenen Emissionen nach Veröffentlichungen von AGEB und UBA [12] [13]. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die neue Einspeisevergütung für Photovoltaik nur noch in der Höhe des heutigen Gestehungspreises liegt. **Im Falle von Erdgas wäre ein Zuschlag von gut 40 % auf den heutigen Preis (von 0,06 €/kWh$_{Hs}$ auf 0,084 €/kWh$_{Hs}$) notwendig, bei Strom ein Abschlag von 40 % bezogen auf den heutigen Preis (von 0,31 €/kWh$_{el}$ auf 0,186 €/kWh$_{el}$); dies sind ähnliche Strompreise, wie sie heute in Skandinavien für private Endverbraucher üblich sind.**

Die tabellierten Preisveränderungen 2035 und 2050 ergeben sich für beide Varianten durch eine (weitere) rein emissionsbasierte Preiserhöhung. Dabei wird für das Jahr 2035 ein zusätzlicher Emissionspreis von 180 €/Tonne und für das Jahr 2050 von 640 €/Tonne (jeweils auf die Preise von 2020) gemäß den Vorschlägen des UBA [21] zugrunde gelegt.

Hinweis: Für Industrieanwendungen und Großverbraucher elektrischer Energie wurde dieses Modell im Rahmen des vorliegenden Gutachtens nicht untersucht. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist jedoch übertragbar und führt abgeschätzt etwa zu einer Halbierung bis Viertelung der angegebenen Energiepreise.

Das modifizierte System bietet folgenden **Vorteil**: in Summe über alle Wohngebäude werden zunächst genauso hohe Energiekosten gezahlt wie heute, allerdings werden **emissionsarme Energieträger entlastet**, entsprechend **emissionslastige Energieträger belastet**. In erster Instanz werden die Gebäude mit hohen Emissionen zum Umsetzen von Maßnahmen angeregt, zuallererst baulich wenig sanierte und ölbeheizte Gebäude. Die **Notwendigkeit der Bezuschussung von Maßnahmen**, z. B. durch Förderprogramme, **sinkt**, wenn die dann erhöhten Energiepreise als Maßstab verwendet werden.

Vor allem Wärmepumpensysteme – die im heutigen Preissystem rechnerische Investitionskostenzuschüsse von teilweise deutlich über 100 % benötigen, liegen danach im „normalen" Bereich anderer geförderter Maßnahmen (max. 30 % Zuschuss auf die Investitionskosten). Aber auch Dämmmaßnahmen werden wirtschaftlicher (aufgrund steigender Energiepreise für Erdgas und Heizöl) – keine der untersuchten Dämmmaßnahmen benötigt noch eine Förderung, selbst das Nachdämmen von Außenwänden und Dächern wird dadurch ebenfalls grenzwirtschaftlich.

Aus Sicht der Gutachter **wäre das neue Preissystem auch eine sinnvolle Grundlage zur Etablierung einer neuen Förderpolitik, die auf Emissionsminderungen basiert.** Es würden dann **nur noch Maßnahmen gefördert, die trotz einer großen Emissionsminderung unwirtschaftlich sind, nicht wegen zu hoher Energiepreise**. Das System der modifizierten Energiepreise wird im Rahmen des Gutachtens auch auf den Gesamtbestand in der Makroperspektive angewendet. Es kann grundsätzlich gezeigt werden, dass eine Preisgestaltung rein nach Aspekten der Emissionen zu zukünftig realistischen Gesamtkosten führt und dass sich auch Preissteigerungen an den Emissionen festmachen lassen, ohne dass „utopische" Ergebnisse ermittelt werden.

Eine veränderte Preisbildung fossiler Energieträger und von Strom kann als wichtigste Vorbedingung für alle Handlungsoptionen zur Finanzierung der energetischen Sanierung identifiziert werden. Die Frage der langfristigen Finanzierung eines modifizierten Modells konnte im Rahmen des Gutachtens nicht endgültig gelöst werden. Hier besteht weiterer politischer Diskussionsbedarf, v. a. hinsichtlich der zukünftigen Ausgestaltung des EEG und weiterer Gesetze (KWKG, Mieterstromgesetz u. a.) und Verordnungen (Netzentgelte).

(6) Abweichungen zwischen berechnetem Energiebedarf und gemessenem Energieverbrauch, Anpassung der Berechnungsnormen und alternative Nachweisverfahren ohne Bilanzierung

Erhebungen der DENA [3], des IWU [22], aber auch eigene Untersuchungen [23] zeigen: Gebäude mit geringem Bedarf, d. h. Neubauten oder modernisierte Bestandsbauten, verbrauchen im Mittel häufig mehr als berechnet, der unsanierte Bestand jedoch weniger als berechnet. Auffällig ist die große Diskrepanz der Endenergien wenig sanierter Wohngebäude vor 1977: berechnet werden 250 kWh/(m²a), gemessen nur 180 bis 200 kWh/(m²a) oder weniger, siehe Abbildung 2. Damit geht das **Problem einher, dass für Sanierungen real gemessene Einsparungen geringer ausfallen, als berechnete**. **Die Einsparprognose kann sogar höher sein als der Energieverbrauch vor der Maßnahme.**

Dies tritt insbesondere dann auf, wenn heute eingesetzte Rechenprogramme – regulär nach den Verfahren, die auch im EnEV/GEG-Nachweis zum Einsatz kommen, d. h. die DIN V 4106/4701 oder DIN V 18599 – im „Nachweismodus“ verwendet werden (Nutzerverhalten standardisiert, Klimadaten standardisiert) sowie auf viele voreingestellte Effizienzmerkmale (typische Erzeugereffizienzen usw.) zurückgegriffen wird. Eine ähnliche Abweichung zwischen rechnerischen Bedarfs- und tatsächlichen Verbrauchswerten zeigt sich auch im Mobilitätsbereich.

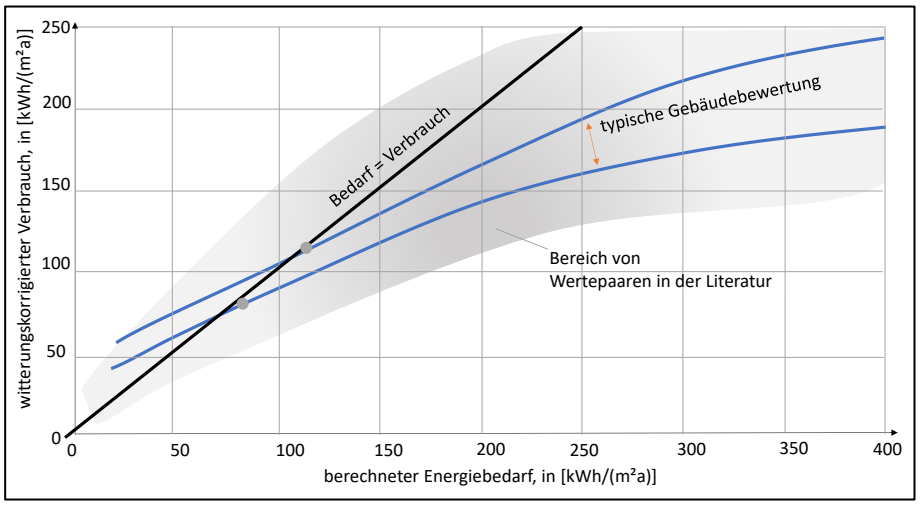


Abbildung 2 Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch, schematische Zusammenfassung aus [24] [22] [23]

Es können **zwei wesentliche Ursachen** für die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch festgestellt werden:

- das **Nutzerverhalten wird unrealistisch/praxisfern eingeschätzt** (bei guten Baustandards wird es rechnerisch sparsamer angesetzt als es tatsächlich ist; im Altbau ist dies umgekehrt),
- die angenommenen **Effizienzen der Bauprodukte entsprechen nicht den realen Gegebenheiten** (Sanierungsmaßnahmen oder Neubautechnologien erreichen in der Realität die angenommenen Effizienzen nicht; Altbautechnologien werden schlechter abgebildet als sie sind).

Das Phänomen – insbesondere des nicht gleichbleibenden Nutzerverhaltens – wird in der Literatur oft mit „Rebound-Effekt“ (Mehrverbrauch guter Gebäude) und „Prebound-Effekt“ (Minderverbrauch schlechter Gebäude) bezeichnet. Ein nennenswerter Auslöser ist das geänderte Verhalten, vorrangig gesteuert durch Kostendruck. Solange das Gebäude schlecht ist, wird eher auf die niedrige Raumtemperatur und die sparsame Belüftung geachtet, weil die Heizkosten sonst empfindlich hoch ausfallen. Ist jedoch ein geringes Heizkostenniveau gegeben (Neubau oder Sanierung), sind höhere Komfortbedingungen eher bezahlbar und werden dann auch praktiziert.

In Teilen kann das veränderte Nutzerverhalten aber auch auf die veränderte Gebäudequalität zurückzuführen sein. Eine genaue Trennung zwischen Gebäude, Technik und Nutzer kann nicht erfolgen, da einige Einflüsse sich gegenseitig bedingen. In einem gut gedämmten Gebäude mit großen Glasflächen (baulicher Einfluss) und einer trägen Fußbodenheizung (anlagentechnischer Einfluss) ergibt sich beispielsweise ein höherer Luftwechsel (Nutzereinfluss). Ob der Luftwechsel nutzerseitig tatsächlich gewünscht war oder die Raumtemperatur aufgrund der Überwärmungseffekte nur so regulierbar ist, ist nicht zu trennen.

Die zweite Ursache sind vielfach zu optimistische Effizienzannahmen, vor allem für die Bauprodukte, die in der Sanierung und im Neubau zum Einsatz kommen. Sie erreichen im Feld selten Prüfstandseffizienzen, wie auch eigene Untersuchungen und Feldstudien zeigen [23] [25] [26] [27] [28]. **Auslöser sind einerseits fehlende Qualitätssicherungsmaßnahmen im Feld (mit denen höhere Effizienzen erzielbar wären als derzeit vielfach gemessen), andererseits in der Praxis gegebene Randdaten, die nicht denen idealisierter Norm- oder Prüfstandsbedingungen entsprechen (d. h. selbst unter besten Bedingungen ist das Realgebäude kein Prüfstand).**

Die Unterschiede zwischen Bedarf und Verbrauch können ausgeglichen werden, indem zunächst nach Norm ein im Mittel praxisferner Bedarf bilanziert wird und anschließend Korrekturfaktoren eingeführt werden (vgl. [22]). Damit würde zumindest dem Empfänger der Berechnungsergebnisse ein realistischeres Ergebnis präsentiert.

Alternativ verwenden die Berechnungsgrundlagen und -normen zukünftig sofort möglichst realistische Eingangsparameter für Nutzerverhalten und Effizienzmerkmale, so dass sie – zumindest im statistischen Mittel – tatsächlich gemessene, typische Verbrauchswerte abbilden. Das im Rahmen des vorliegenden Gutachtens eingesetzte Bilanzmodell verfolgt diese Zielrichtung.

Das Festlegen realistischer Randdaten ist jedoch eine Gratwanderung für die zukünftige Energiepolitik, wie am Beispiel der Arbeitszahlen einer Erdreichwärmepumpe erläutert werden soll. Werden die Werte in einer Berechnung zu optimistisch angesetzt, z. B. auf dem Niveau der Prüfstandswerte (z. B. Jahresarbeitszahl 4,5) kommt aus der Praxis die Rückmeldung: dies sei „irreführende Werbung", solche Werte sind nicht erreichbar, egal welche Optimierungsmaßnahmen man ergreift. Wird dagegen ein typischer Durchschnittswert einer Feldmessung (z. B. 3,0 für den gesamten Querschnitt aller schlecht und gut laufenden Geräte) angesetzt, stimmt zwar im Mittel die Bilanz. Dem einzelnen Gebäudebesitzer wird somit aber suggeriert, es sei ein solcher Wert üblich – auch wenn viel mehr erreichbar wäre. Es sind somit die „best practice"-Anteile der Feldprojekte von Interesse (z. B. 4,0 für sehr gut laufende Wärmepumpen), die tatsächlich, aber eben nur mit Qualitätssicherung, erreichbar sind.

Gleiches gilt auch für alle anderen Effizienzannahmen sowie speziell auch für das Nutzerverhalten. Man könnte problemlos in einer Bedarfsberechnung 22°C als Innentemperatur für „gut sanierte Gebäude" zugrunde legen, wenn sich dies als Mittelwert vieler Messprojekte zeigt. Zwar passt dann die Bilanz, aber es steht dann auch die Aussage im Raum, es sei normal, dass diese Temperatur eintritt und im Zuge von Sanierungen das Nutzerverhalten extensiver wird.

Die Anpassung der genannten Randdaten in den Normen wäre grundsätzlich machbar und nützlich für Nutzer und Gebäudebesitzer. Allerdings wäre eine solche Normanpassung für den derzeitigen Gesetzgeber eher hinderlich: der z. B. gegenüber der EU nachzuweisende Standard „nearly zero energy buildings" von Neubauten verschlechtert sich dadurch. Auch aus Sicht von Herstellern ergäben sich negative Konsequenzen. Für die gesamte Dämmstoffbranche (Hersteller und alle nachgelagerten Instanzen der Planung und Ausführung) ist es beispielsweise nicht erstrebenswert, wenn die berechnete Einsparung für eine bauliche Sanierungsmaßnahme sinkt (weil das Nutzerverhalten mit Prebound- und Rebound-Effekt realistisch abgebildet wird). Für die gesamte Heizungsbranche (Hersteller und alle nachgelagerten Instanzen der Planung und Ausführung) schrumpften ebenfalls die Verkaufsargumente, weil die Wirtschaftlichkeit sich verschlechtert, wenn Erzeuger mit realistischeren Praxisdaten bilanziert würde.

In Hinblick auf die Nachweisführung lässt sich Folgendes aus Sicht der Gutachter festhalten: anstelle der genannten Anpassung der Normen und Berechnungsverfahren, die der EnEV bzw. dem künftigen GEG zugrunde liegen, durch einen Korrekturfaktor oder besser realistische Randdaten, ließe sich auch das Nachweisverfahren selbst ändern. Anstelle der heute üblichen Bilanzierung von End- und Primärenergie unter Normklima- und Normnutzungsdaten wäre auch ein Verfahren mit Einzelanforderungen denkbar, ohne dass der Bedarf als solches die Anforderungsgröße ist. Es wären Mindesteffizienzen für die Gebäudehülle, Mindestarbeitszahlen für Wärmepumpen usw. sowie verpflichtende Anforderungen zur Nutzung regenerativer Energie (insbesondere Photovoltaik) festzulegen. Auch in dieser Konstellation sehen die Gutachter „best practice" Effizienzen als geeignete Zielgrößen an. Dies entspricht der Vorgehensweise der „Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung – EnSanMV" von 2019 [29]. Die Energiebilanz wäre nicht Teil des Nachweises und könnte privatrechtlich unter realistischen Nutzungs- und Klimadaten erfolgen.

Ein Erfolgsnachweis durch Verbrauchsdatenmessung über einen Zeitraum von etwa 2 bis 3 Jahren (nach Neubau oder Sanierung) stellt sicher, dass die Maßnahme zum gewünschten Einsparziel führt. Wären die im konkreten Einzelfall erzielten Verbrauchswerte und Effizienzmerkmale bekannt und sind schlechter als die in den Normen angegebenen Werte, müsste gegenüber dem Endverbraucher kommuniziert werden, wieso es zu den Diskrepanzen kommt und wie Abhilfe geschaffen werden kann.

Der Erfolgsnachweis selbst könnte zukünftig durch Verbrauchsanalysen der zugeführten Endenergien und der damit verbundenen CO_2-Emissionen sowie der abgegebenen Wärmemengen geführt werden. Ein Wärmemengenzähler könnte zukünftig als selbstverständlicher Bestandteil jedes Wärmeerzeugers von den Herstellern sofort vorgesehen werden. Das Verfahren der „Energieanalyse aus dem Verbrauch" (EAV) liefert auf dieser Basis Kennwerte zur Güte der Gebäudehülle (Dämmstandard incl. Qualitätssicherung der Wärmebrücken, Luftdichtheit), die Effizienz der Erzeuger, die Erträge aus regenerativen Energien sowie das Nutzerverhalten – jeweils im Jahresverlauf einer monatlichen Auflösung. Im Misserfolgsfall, d. h. sichtbarer Abweichungen zur Planung, sind selbstverständlich detailliertere Analysen denkbar.

Ein deutlicher Vorteil des skizzierten Verfahrens von Einzelanforderungen wäre der konsequente Verzicht auf komplizierte Berechnungen für die Nachweisführung. Das Ergebnis wird ehrlicher und spiegelt die realen Bedingungen wider. Weiterhin ist eine Kontrolle schnell und einfach (auch für den Nutzer nachvollziehbar) durchführbar. Als **Hinderungsgründe für diese Vorgehensweise und somit der transparenten Offenlegung aller Daten ist das Spannungsfeld Hersteller/Planung/Handwerk/Endkunde zu nennen,** vgl. Punkt (7) dieser Zusammenfassung.

Die nächste für das Jahr 2023 vorgesehene Novellierung des ab 1. November 2020 geltenden Gebäudeenergiegesetzes (GEG) kann dazu genutzt werden, das Energieeinsparrecht in der oben geschilderten Art und Weise zu vereinfachen (Entfall komplexer Bilanzierung für die Nachweisführung) sowie für eine bessere Erfüllung der Anforderungen (verpflichtende Qualitätssicherung mit Erfolgsnachweis) zu sorgen. **Die Chancen der Akzeptanz für ein solch neues Konzept der Nachweisführung haben sich mit Einführung der neuen steuerlichen Anreizgesetzgebung** [29] **und mit den neuen Förderbedingungen der Bundesförderung (BEG)** [30] **erhöht. Endenergie- und Wärmemengenzähler für jeden geförderten neuen Wärmeerzeuger sind Fördervoraussetzung.**

(7) Verbesserung des Erfahrungsrücklaufs in die Planung, Herstellung eines Zustandes klarer Verantwortlichkeiten, Partnerschaftliche Modelle

Für die Umsetzung von Maßnahmen zur energetischen Sanierung erscheinen den Gutachtern zukünftig Ansätze einer **„Planung auf Vorrat"** sinnvoll. Dies ergibt sich aus der Sachlage, dass ein Großteil aller Maßnahmen sehr lange herausgezögert und an das Lebensende des Bauproduktes gekoppelt wird. Insbesondere für Wärmeerzeuger, Speicher und Pumpen heißt dies, dass vom Defekt bis zum notwendigen Ersatz meist keine Zeit mehr für Planung bleibt. Es liegt auf der Hand, dass diese Planung nicht Jahrzehnte im Voraus erfolgen kann, jedoch 10 Jahre vor Ende der planmäßigen Nutzungsdauer erscheint sie den Gutachtern als sinnvoll.

Eine mögliche Problemlösung wäre die Verpflichtung zur Erstellung eines individuellen Sanierungsfahrplanes (iSFP). Der iSFP ist seit 2017 ein Werkzeug für die Energieberatung von Wohngebäuden. Im Vordergrund steht die energetische Bewertung eines Gebäudes, entweder für die Schritt-für-Schritt-Sanierung oder für die Gesamtsanierung in einem Zug. **Zukünftig könnte der heute rein bedarfsorientierte iSFP zusammen mit Verfahren einer Energieanalyse aus dem Verbrauch (EAV) genutzt werden.** Somit läge im Bedarfsfall zumindest das Konzept schon vor. Statt der allgemeinen Verpflichtung könnte es auch abgemindert wenigstens eine verpflichtende Energieberatung bei Eigentümerwechsel geben (BDH /DENA [31]). Im Nichtwohnbau könnten verpflichtende kommunale Energiekonzepte (BUND 2017 [32]) die Arbeitsfähigkeit im Bedarfsfall erhöhen. Für Neubauten mit BIM-basierter Planung ließe sich das Datenmodell weiter pflegen, bis der Sanierungsfall eintritt.

In jedem Fall wäre die politische Einflussnahme auf die Gesetzeslage dahingehend zu überdenken, die Menge an schnell verfügbaren Informationen, über die ein Gebäudebesitzer verfügt, wesentlich zu steigern.

Im Gegensatz zu allen anderen Industriezweigen **werden in der Bau- und Gebäudetechnik gewonnene Betriebs- und Praxiserfahrungen kaum wieder in die Planung und Ausführungspraxis zurückgespiegelt.** Der heutige serielle Planungs- und Ausführungsablauf gemäß den seit Jahrzehnten eingeführten HOAI-Phasen führt heute immer noch zu der strikten Trennung von Planung, Ausführung und Betrieb. So besteht heute noch in vielen Büros der Zustand, dass Planer teilweise nie mit der Praxis und dem Betrieb in Kontakt gekommen sind. Die strikte Trennung führt dazu, dass einerseits im Schadensfall Streit zwischen planenden und ausführenden Unternehmen vorprogrammiert ist, andererseits ein Rückfluss von Erkenntnissen, z. B. über den Verbrauch, nicht gegeben ist (Sobek in [33]). **Dieses System ohne nennenswerte Optimierungschancen ist durch künftige, neu und digital zu schaffende Datenstrukturen zu durchbrechen und tatsächlich auch im Bauwesen ein „Kreislauf der Betriebserfahrungen" zu etablieren**.

Für die Planerschaft erscheint aus Sicht der Gutachter im ersten Schritt eine offene, digitale Datenbank mit „best case" und „worst case" Dokumentation (im Sinne einer Bauschadensdatenbank, in permanente Aktualisierung wie Baukostendatenbanken) von Projekten der energetischen Sanierung angebracht. Für verschiedene Gebäudetypen kann sie den tatsächlichen Verbrauch und bedarfsorientierte individuelle Sanierungsfahrpläne iSFP [34] gegenüberstellen. In der Praxis **immer wiederkehrende Fehler und damit verbundene Effizienzverluste ließen sich aufzeigen und künftig vermeiden**. Die Datenbasis kann auch als Grundlage zur Verbesserung der Praxistauglichkeit der Bilanzierungsnormen (vgl. Punkt (6) der Zusammenfassung) verwendet werden. Es wäre politisch eine Festlegung zu treffen, welche Institutionen (DIBt, Verbraucherzentrale, Hochschulverbund, DENA/ Landesenergieagenturen usw.) mit dieser Aufgabe betraut werden könnten und wie die Verpflichtung zur Datenlieferung aussehen könnte.

Beispielsweise können alle Forschungsnehmer über die beforschten Gebäude und Anlagen Auskunft geben, aber auch unabhängige Stichproben aus den Projekten der zukünftigen Bundesförderung (BEG) generiert werden.

Neben diesem niederschwelligen Lernen aus den Fehlern anderer steht im zweiten Schritt auch das Monitoring für jedes einzelne Bauprojekt als Werkzeug zur Verfügung. Eine Qualitätssicherung in Planung, Ausführung und v. a. im späteren Betrieb ist anhand von Verbrauchsdaten einfach möglich, z. B. mit der „Energieanalyse aus dem Verbrauch" – siehe Punkt (6) der Zusammenfassung. Die Stadt Frankfurt praktiziert auf Basis der „Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen" [35] ein Konzept von verpflichtender Verbrauchsmessung und anschließendem Monitoring zur Qualitätssicherung für den Nichtwohnbau bereits seit etlichen Jahren erfolgreich.

Planer und Handwerker wehren sich momentan häufig gegen entsprechende Maßnahmen, da aus einer Qualitätskontrolle im Betrieb erweiterte Regressansprüche bei falscher bzw. schlechter Planung und Ausführung resultieren können. Es ist daher ein Umdenken erforderlich, welches die Erfolgschancen in den Mittelpunkt rückt. Ein Planer oder Handwerker kann durch das Feedback der Betriebsanalyse Rückschlüsse auf die Qualität seiner Arbeit ziehen und sich damit weiterentwickeln. Die Qualität im eigenen Unternehmen steigt.

Eine Begrenzung des Energieverbrauchs im Neubau und auch in der Bestandssanierung setzt neben der (gleichzeitigen oder nachträglichen) Qualitätssicherung der Gebäude- und Anlagentechnik auch Nutzerschulungen voraus. Sie betreffen nicht nur das Nutzerverhalten im Betrieb, sondern – um Rechtsstreitigkeiten vorab zu begegnen – auch die Aufklärung darüber, dass die optimalen Betriebsbedingungen erst nach Inbetriebnahme gefunden werden können; dass die notwendige Optimierungsphase keinen Baumangel darstellt, sondern üblich ist.

Die größten Schwierigkeiten und Hindernisse liegen nach Ansicht der Gutachter darin zu erreichen, dass sich alle an der Modernisierung Beteiligten tatsächlich mit dem Ziel der „Energieeinsparung" identifizieren: Architekten, Fachplaner und Energieberater, Energieversorgungsunternehmen, Komponentenhersteller sowie das ausführende Handwerk und die zukünftigen Qualitätssicherer. Es wird ein verantwortliches Netzwerk benötigt, das die prognostizierten einzusparenden Energiemengen tatsächlich garantiert. Voraussetzung ist, dass sich alle Branchenakteure zukünftig einer offenen Diskussion und dem Monitoring öffnen und dabei dem Kunden gegenüber realitätsnah bilanzieren, d. h. ohne unrealistische „Bis-Zu-X-Einspar-Prozent-Versprechen".

Eine intensive Beschäftigung mit der Gebäudequalität findet somit nicht mehr nur über den Nachweis rechnerischer Normkennwerte und Qualitätssiegel statt, wenn die Abnahme der Bauleistung erfolgt, sondern verschiebt sich in die Phase der Nutzung und des Betriebs. Das verschiebt Verantwortlichkeiten und zieht eine Anpassung der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) bzw. deren veränderte Anwendung nach sich.

Die einzelnen Planungsphasen der HOAI werden dabei mit einem festgelegten Prozentsatz des berechneten Honorars vergütet. Die Phasen 1 (Grundlagenermittlung, 2 %) und 9 (Objektbetreuung 1 %) sind nach Ansicht der Gutachter unterbewertet, um ein tatsächlich energieeffizientes Gebäude zu errichten oder es auf dieses Niveau zu sanieren. Die aktualisierte HOAI sieht bereits erfolgsabhängige Komponenten in der Einhaltung des Investitionskostenrahmens vor. Es kann als Grundlage für das Architekten- und Planer-Honorar eine Bonus-Malus-Regelung bei Unterschreitung/Überschreitung vereinbart werden; dies ist jedoch noch nicht gängige Praxis, eher der Ausnahmefall. Das Ziel zukünftiger Projekte zum Erreichen von Klimaneutralität wird von Anfang an durch ein partnerschaftliches Herangehen an zukünftige Modernisierungs- und Neubauprozesse besser erreicht werden können. Zielführend wäre es, eine Vertragspartei (Planer, Ausführender usw.) zu finden, die eine Gesamtverantwortung übernimmt.

Wird der Fokus noch etwas erweitert, heißt dies, dass ein Wandel von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft erforderlich ist, so dass ein gemeinschaftliches und solidarisches Dreiecksverhältnis auf Augenhöhe entsteht. In vielen Entscheidungen zur Gesetzgebung, zu Förderprogrammen und der daraus evtl. folgenden Marktentwicklung waren in der Vergangenheit Industrie und Wirtschaft dominierend, die betroffene Gesellschaft (hier z. B. stellvertretend der Mieter) blieb weitgehend unbeteiligt. Rückblickend verdichtet sich der Eindruck, dass nicht die dringend erforderlichen Maßnahmen und Investitionen zur Erreichung von Klimaschutzzielen im Fokus stehen, sondern die Aufrechterhaltung eines wirtschaftlichen Wachstums mit weitgehender Befriedigung persönlichen und unternehmensbezogenen Wert-(Vermögens-)Zuwachses (Gewinn) des eingesetzten Kapitals für „angeblich" sinnvolle Investitionen (vgl. auch Wright [36], Göpel [37], Latif [38]). Für die zukünftigen Aufgaben des Klimaschutzes und der Energieeinsparung ist dies ungeeignet, denn Fehlentwicklungen sind dadurch vorprogrammiert.

(8) Zügige Umsetzung von „no-regret"-Maßnahmen, Abkehr von Prozentzielen und ein CO_2-Budget zur Fortschrittsbewertung

Die Entscheidungen zur nationalen Klimapolitik beruhen auf einer Reihe von – teils internationalen – Verpflichtungen und Vereinbarungen zu Minderungsquoten (Endenergie, Primärenergie) bezogen auf unterschiedliche zurückliegende Zeitpunkte (vorrangig 1990, neuerdings auch 2010) sowie Anteilsquoten bestimmter Energieträger (Regenerativanteil an der Wärme und am Strom) bezogen auf unterschiedliche zukünftige Zeitpunkte (2020, 2030, 2050). Vielfach werden Nachjustierungen einzelner Größen vorgenommen, wenn neue Klimaziele ausgerufen werden. In jedem Fall müssen die Prozentangaben immer wieder an den neuen Basiswert angepasst werden.

Diese Art der Zielvorgabe ist aus politischer Sicht nachvollziehbar, weil einfach zu kommunizieren und zu überprüfen (Kemfert et al. [39]). Allerdings geht es in der Realität nicht um **prozentuale Minderungen, sondern um eine absolute Menge an Emissionen, welche die Atmosphäre noch aufnehmen kann**, um die Pariser Ziele von 2015 noch einzuhalten.

Aus Sicht der Gutachter wäre es daher sinnvoll, alle Klimaschutzziele zu einer übergeordnete Ziel- und Kontrollgröße zusammenzufassen, **dem (absoluten) „noch verfügbaren Emissionsbudget".** Mit dieser Größe operiert auch der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderung [40] und der Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU [41]. Es ist mit ihm umzugehen wie mit einem „Kontomodell".

Zu einer maximal tolerierbaren Erderwärmung – z. B. 2°C – gehört ein verfügbares Emissionsbudget. Es wird im Sinne eines **„Anfangsguthabens"** auf das Konto gebucht. Am Ende jedes Jahres werden die **zurückliegenden registrierten Emissionen vom Guthaben „abgebucht".** Es gibt **keine Zeitachse** im eigentlichen Sinne, sondern lediglich **das Verbot, das „Konto ins Minus zu führen" (das Emissionsbudget komplett aufzubrauchen). Es ist somit unerheblich, welcher Sektor wie schnell einen Wandel vollzieht.** Ist das Konto jedoch bei null angekommen, ist das Eingangs definierte Klimaziel nicht mehr erreichbar. Eine **neue Zieldefinition** – z. B. 2,5°C – **führt zu einer erneuten „Aufbuchung" von Guthaben, also Emissionsbudget.** Anschließend beginnt der Kreislauf von neuem, **jedoch ist nun allgemein bekannt, dass das vorherige Ziel aufgegeben wurde bzw. nicht erreicht wurde.**

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen [41] benennt mit Startjahr 2018 ein weltweites Restbudget von 800 Gigatonnen CO_2, um den Temperaturanstieg (mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 %) auf 1,75°C zu begrenzen. Legt man den deutschen Anteil an der Weltbevölkerung zugrunde, beträgt das ab 2020 verbleibende CO_2-Budget für Deutschland maximal 6,7 Gigatonnen CO_2. Der CO_2-Ausstoß Deutschlands liegt derzeit je nach Berechnungsmethodik zwischen 800 und 900 Mio. t CO_2/Jahr. Damit wäre das Konto in 7 bis 8 Jahren erschöpft. Danach ist nur noch das 2,0°C-Ziel realistisch. Das Kontomodell besagt, dass dann ab 2050 vollständige Klimaneutralität erreicht sein muss.

Das Ersetzen von Prozentzielen in der politischen Diskussion durch eine Verdeutlichung der Klimaziele über das Kontomodell eines noch verbleibenden Emissionsbudgets ist nach Ansicht der Gutachter von entscheidender Bedeutung für die Kommunikation zwischen Gesellschaft, Wirtschaft und Politik. Die Ausgestaltung der Klimaschutzmaßnahmen ist davon unberührt. Es wären weiterhin Unterziele (Ausbauquoten regenerativer Energien usw.) zu definieren. Auch kann das Gesamtbudget den Sektoren zugewiesen werden, beispielsweise – wie auch im Makroteil dieses Gutachten erfolgt – dem Sektor „Gebäude" oder nur den „Wohngebäuden". Jedoch erscheint eine übergeordnete Budgetdarstellung den Gutachtern greifbarer zur kurzfristigen Überprüfung des (politischen) Handelns. **Es wäre am Ende jedes Jahres direkt (im Sinne eines „Kontoauszuges") erkennbar, ob das Budget eingehalten wurde. Anhand der „jährlichen Abbuchungen" kann auch die vorhersehbare Kontoüberziehung abgeschätzt werden – also auf welche Klimaerwärmung das (extrapolierte) Handeln zusteuert.**

Für die Klimapolitik im allgemeinen und den Gebäudesektor im speziellen bedeutet dies: es ist eine Kombination von „Energiesparen", „Effizienzverbesserung" und „Einsatz regenerativer Energien" umzusetzen. **Es sind dabei die Maßnahmen zuerst zu ergreifen, die mit dem geringsten Aufwand die notwendige CO_2-Minderung erreichen.**

Für größere Kompensationen zwischen Gebäude- und Anlagentechnik im neuen GEG ist die zur Verfügung stehende Zeit (besser das Restbudget an Emissionen) zu gering. Zu dieser Erkenntnis kommen bereits früher verschiedene Untersuchungen, zuletzt eine Studie des DIW [42] vom Juli 2020: **bis spätestens 2040 ist die Energiegewinnung vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen, um das Emissionsbudget noch einzuhalten.** Dies sind die Rahmendaten, unter denen die Ziele des European Green Deal erreicht werden können.

Benötigt wird demnach **das beschleunigte Sanieren von Gebäudehülle und Anlagentechnik auf beste Standards, verbunden mit einer Qualitätssicherung und einem verbrauchsorientierten Erfolgsnachweis. Notwendig erscheint ein kurzfristiger Ausstieg aus allen fossilen Energieträgern, zuerst im Neubau, kurz darauf in der Sanierung.** Es mehren sich daher auch Forderungen, im Gebäudebereich, wie bereits heute schon in einzelnen EU-Ländern konsequent realisiert, **Verbote seitens des Gesetzgebers für fossil mit Heizöl und Erdgas befeuerte Wärmeerzeuger durchzusetzen (z. B. Gerhardt et al.** [43]**), um die Klimaschutzziele überhaupt noch einigermaßen einhalten zu können.** Das Ausrufen von Verboten wird dabei so gestaltet und zeitlich gestaffelt, dass für Bauherren und Immobilienbesitzer eine Vorhersehbarkeit und Planbarkeit im Rahmen typischer Sanierungszyklen hergestellt wird.

Weitere Voraussetzung wäre eine **drastisch beschleunigte Umstellung auf erneuerbare Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windkraft** (in der Mittel- und Grundlast), **weil dies die einzigen Technologien sind, die den entsprechenden Reifegrad für schnellstmöglichen und großflächigen Praxiseinsatz aufweisen.** Flexible **Erdgas- und zukünftig Wasserstoff-Spitzenlastkraftwerke** mit möglichst geringen Laufzeiten würden **in Zeiten der Flaute** Residuallasten decken. **Erdgas** wäre unter diesen Umständen **als Übergangstechnologie** anzusehen (vgl. Traber, Fell [44]). Wärmepumpentechnologien und Elektromobilität würden im Sinne der Sektorkopplung parallel verstärkt ausgebaut.

Die gemeinsame Stellungnahme von Leopoldina, acatech und Union der deutschen Akademien benennt darüber hinaus weitere „no-regret"-Maßnahmen [45]. Dazu gehört auch der Aufbau stabiler Energieimportwege für Wasserstoff und dessen Folgeprodukte (z. B. PtX). Diese künstlichen Brennstoffe sind jedoch vornehmlich zur Deckung der möglichst kurzfristigen Residuallasten der Stromerzeugung, im Flugverkehr, Schiffsverkehr, dem landwirtschaftlichen Verkehr oder der Industrie vorgesehen.

Über die gemeinsamen Ziele **sind die Sektoren „Gebäude", „Verkehr", „Industrie", „Energiewirtschaft", „Landwirtschaft" und „Abfallwirtschaft/Sonstige" bereits intersektoral verbunden.** Ob auch ein **Verbund über gemeinsame Steuerungsmechanismen hergestellt wird, ist eine Frage der politischen Ausgestaltung.** Der Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung kommt 2019 [46] zu dem Schluss, dass nur **ein gemeinsamer Europäischer Emissionshandel für alle Sektoren zielführend ist.** Die CO_2-Besteuerung oder separate ETS-Zertifikate jenseits der Energiewirtschaft sind nur Übergangslösungen. Diese Lösung wird auch in anderen Studien präferiert (AGORA 2019 [47]). Alternative oder ergänzende Lösungen sind Handelsoptionen für „weiße Zertifikate" (vgl. Bürger 2012 [48]), d. h. Nachweise für getätigte Einsparmaßnahmen. Alternativ – und als **von den Gutachtern präferierte und mit CO_2-Zertifikaten kompatible Lösung – gilt eine geregelte und langfristig bekannte (planbare) Mengenbegrenzung für das Inverkehrbringen von Kohlenstoff** (vgl. Eisenbeiß [49]).

Die **Überprüfung der Zielerreichung von entweder vorher festgelegten Einsparzielen und Regenerativanteilen oder des Emissionsbudgets erfordert in jedem Fall ein Monitoring.**

Im Weiteren erscheint es den Gutachtern auch angebracht, das Klimaschutzziel – also die Emissionsminderung – erkennbar in den Fokus der Gebäudeplanung zu setzen. Über die Frage, ob die Emissionsbewertung zusätzlich zur Primärenergie (u. a. BAK 2018 [50]), mittelfristig alleinig (u. a. DV 2019 [51], GDW 2019 [52]) oder sofort (co2online / Fraunhofer ISE / Ostfalia 2015 [53], Stiftung Energieeffizienz 2018 [10]) zum Einsatz kommen soll, herrscht keine Einigkeit. Nach Ansicht der Gutachter wäre ein **schneller Umstieg auf CO_2 als Bewertungsgröße sinnvoll, um im Gleichklang mit einer Informationskampagne zum „verfügbaren Emissionsbudget" und dem „persönlichen CO_2-Fußabdruck" jedes Bürgers argumentieren zu können.**

Diese Forderung widerspricht allerdings der „Langfristigen Renovierungsstrategie nach EPBD", welche in dem Bericht des BMWi an die EU in 2020 abgegeben wurde [11]. **Die politische Einflussnahme könnte darin bestehen, das Nachweisverfahren der Planung (namentlich das GEG) in Richtung „Emissionsbewertung" zu ändern.**

(9) Qualitative Einschätzung möglicher Verbesserungsmaßnahmen an Gebäudehülle, Haupt- und Zusatzerzeugern, der Peripherie und zugehöriger Qualitätssicherung

Im Unterschied zum Punkt (10) der Zusammenfassung werden nachfolgend tabellarisch alle untersuchten Maßnahmen unter Berücksichtigung einer zukünftig veränderten Energiepreisbildung qualitativ beschrieben. Die Erkenntnisnisse der Gutachter aus der Mikro- und Makroperspektive sind dabei unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten eingeflossen.

Tabelle 4 fasst die typischen **Ausgangszustände und Zielzustände für die Gebäudehülle** zusammen und gibt eine **Einschätzung zur Umsetzbarkeit der jeweiligen Maßnahme**. Die Erkenntnisse zu Dämmmaßnahmen und Fenstersanierung lassen sich gut übertragen auf Nichtwohnbauten mit ähnlichen Innentemperaturen wie der Wohnbau, in denen jedoch keine großen internen Lasten auftreten, z. B. Bildungsbauten, Beherbergungsstätten und Heime, Büros und büroähnliche Betriebe sowie Kultureinrichtungen und Krankenhäuser.

	Istwert, Zielwert und Einschätzung der Maßnahme
Außenwand	Die Außenwände der Wohnbauten sind zu etwa 30 bis 35 % bereits gut gedämmt (U = 0,30 bis 0,34 W/(m²K)), jedoch zu etwa 50 bis 55 % noch mittelmäßig oder nicht gedämmt (U = 0,6 bis 1,0 W/(m²K)). Ein best-practice-Zielwert für die Außenwanddämmung von außen liegt bei U = 0,15 W/(m²K), für die Innendämmung bei etwa 0,3 W/(m²K). Die Außenwanddämmung auf hochwertiges Niveau (von außen) oder ein gutes Niveau (von innen bzw. bei Gebäuden mit erhaltenswerter Fassade) ist zuschussfrei wirtschaftlich, wenn ohnehin Maßnahmen an der Fassade notwendig sind und das Gebäude unsaniert ist. Auch eine Nachdämmung des Baustandards der 2. WSchV von 1984 ist mit geringen Investitionskostenzuschüssen von etwa 20 % sinnvoll.
Fenster	Etwa 45 bis 50 % aller Fenster im Wohnbau weisen eine energetisch schlechte Qualität (U = 2,7 W/(m²K)) auf. Etwa 10 % sind gut (U = 1,3 W/(m²K)) und die restlichen von mittlerer Qualität (U = 1,6 W/(m²K). Ein best-practice-Zielwert wird aus heutiger Sicht der Gutachter mit 0,9 W/(m²K) angesetzt. Eine Fenstersanierung ist kostenintensiv, so dass sie selbst bei ohnehin notwendigen Ersatzmaßnahmen nicht wirtschaftlich ist, aber mit Zuschüssen werden kann. Einen vorzeitigen Fensteraustausch konnten die Gutachter nicht wirtschaftlich nachweisen, auch nicht im Zusammenhang von Maßnahmenpaketen. Die Gutachter können feststellen, dass der Fenstertausch vor allem dann sinnvoll ist, wenn das Bestandsfenster das Ende seiner Lebensdauer – also etwa 35 Jahre – erreicht hat.
Oberste Geschossdecke und Dach	Knapp 60 % aller Dächer und oberen Geschossdecken weisen bereits einen guten Standard (U = 0,26 W/(m²K) auf. Die restlichen gut 40 % sind gering oder nicht gedämmt (U = 0,45 bis 1,0 W/(m²K)). ein best-practice-Zielwert von 0,15 W/(m²K) kann fast in jedem Objekt erreicht werden, weil nur wenige Restriktionen gegeben sind. Die Dämmung der obersten Geschossdecke ist eine wirtschaftliche Maßnahme, die auch anlasslos unter Verwendung der Vollkosten keine Bezuschussung benötigt. Dies gilt auch, wenn bereits eine Dämmung vorhanden ist, für die Aufdopplung. Erst ab einem Ausgangszustand, welcher der Wärmeschutzverordnung 1995 entspricht, ist dies nicht mehr wirtschaftlich. Die Dachsanierung hingegen weist schlechtere Ergebnisse auf. Liegt die Dachsanierung sowieso an, ist die Maßnahme wirtschaftlich. Eine Aufdopplung der Dämmung ist hingegen grenzwirtschaftlich. Anlasslos sind keine Wirtschaftlichkeiten zu erreichen. Bei einer Dachsanierung als Einzelmaßnahme ist es in jedem Fall ratsam, bereits einen ausreichenden Dachüberstand herzustellen für eine Außenwanddämmung, selbst wenn diese erst später erfolgt.
Kellerdecke und Bodenplatte	Gut die Hälfte aller unteren Gebäudeabschlüsse sind ungedämmt (U = 1,0 W/(m²K)). Nur etwa 30 % sind gut gedämmt (U = 0,38 bis 0,39 W/(m²K)), der Rest ist in mäßigem energetischen Zustand (U = 0,68 bis 0,69 W/(m²K). Ein best-practice-Zielwert liegt bei nur 0,2 W/(m²K). Es ist in vielen Gebäuden mit Restriktionen zu rechnen (fehlende Deckenhöhe, Notwendigkeit der Innendämmung). Die Dämmung der Kellerdecke ist eine wirtschaftliche Maßnahme, die auch anlasslos unter Verwendung der Vollkosten keine Bezuschussung benötigt. Eine Aufdopplung der Dämmung führt zu ca. 15 % Zuschuss, wenn eine „mittlere“ Deckenkonstruktion der 2. Wärmeschutzverordnung von 1984 zugrunde gelegt wird. Die Bodendämmung ist nicht wirtschaftlich. Es ergeben sich selbst bei ungedämmten Konstruktionen notwendige Investitionskostenzuschüsse von mindestens 15 %.
bauliche Qualitätssicherung	Die bauliche Qualitätssicherung erfolgt immer zeitgleich mit der Umsetzung der Maßnahmen im überwiegend normalen Sanierungszyklus (Dämmung, Fenstereinbau). Nur dann bietet sich problemlos die Möglichkeit, eine Luftdichtheit herzustellen oder Wärmebrücken zu minimieren. Der absolute und prozentuale Einfluss der Qualitätssicherung steigt an, je besser der erreichte Standard ist. Die im Rahmen des Gutachtens untersuchten Sanierungen auf „guten“ und „besten“ Standard erreichten ¼ bis ⅓ Emissionsminderung durch die Summe aller QS-Maßnahmen. Die punktuellen Nachweisverfahren der Gebäudedichtheitsmessung und die Thermographie können sinnvoll mit einer Energieanalyse aus dem Verbrauch ergänzt werden. Mit ihr lassen sich Auswirkungen fehlender Qualität (als Summeneinfluss „überhöhter Transmission und Lüftung“) sehr gut sichtbar machen.

Tabelle 4 Maßnahmen an der Gebäudehülle im Überblick [eigene Darstellung]

Tabelle 5 fasst die **Maßnahmen an den Hauptwärmeerzeugern** zusammen. Aus Effizienzmessungen im Feld lassen sich Jahresnutzungsgrade oder Jahresarbeitszahlen ableiten. Die Autoren dieses Gutachtens sehen es als sinnvoll an, eine Unterscheidung in die Fälle **mit und ohne Qualitätssicherung** vorzunehmen.

	Istwert, Zielwert und Einschätzung der Maßnahme
Wärmepumpen	Nur etwa 6 % der EZFH und 2 % der MFH sind heute mit einer Wärmepumpe ausgestattet. Jedoch ist der Wärmepumpenmarkt einer der derzeit am stärksten wachsenden Erzeugermärkte. Im Neubau weist bereits jede dritte Wohneinheit eine Wärmepumpe auf [54]. Eine Wärmepumpe arbeitet ineffizient im unsanierten Bestand. Es muss mindestens eine Teilsanierung des Gebäudes gegeben sein. Gebäude ab Wärmeschutzverordnung 1984 (und besser) erfüllen die Bedingung mit hoher Wahrscheinlichkeit. Für Wärmepumpen ist eine Qualitätssicherung besonders relevant. Bei Erdreichwärmepumpen ergeben sich gemessene Arbeitszahlen zwischen 3,3 und 4,4 mit QS bzw. 2,9 bis 3,8 ohne QS. Für Außenluftwärmepumpen sind 2,5 bis 3,6 mit QS zu erreichen, ohne QS nur 2,1 bis 3,0. Erstgenannter Wert gilt für Durchschnittsgebäude mit Heizkörpern, letzter für best-sanierte Gebäude mit Flächenheizung. Der Trinkwarmwasserbetrieb ist jeweils schlechter. Alle Studien zur Energiewende gehen von einer Vervielfachung des Wärmepumpenbestandes aus, wenn auch in unterschiedlicher Größenordnung. Die Gutachter können dem zustimmen und sehen Wärmepumpen als Standarderzeuger auch in der Sanierung an. Für MFH lassen sich Systeme „kalter Fernwärme“ konzipieren, bei dem der Gebäudeeigentümer oder ein Versorgungsunternehmen den Wärmequellenkreis im Erdreich betreibt. Die Untersuchungen des vorliegenden Gutachtens zeigen unter Verwendung heutiger Energiepreise keine Wirtschaftlichkeit für den Einsatz von Wärmepumpen, auch nicht unter Einbezug von Fördermitteln. Es ist eine veränderte Energieträgerbepreisung notwendig, wie im Abschnitt (5) der Zusammenfassung beschrieben. Auch in Kombination mit Photovoltaik werden Wärmepumpenlösungen wirtschaftlich, weil eine „Quersubventionierung“ stattfindet.
Erdgas- und Heizölkessel, Hybridheizung	Etwa 75 bis 80 % aller Wohnbauten werden derzeit mit einem fossil betriebenen Kessel versorgt. Es ist von typischen Effizienzen (Brennwertbezug) in der Größenordnung 88 % bis 93 % für Brennwertkessel bzw. 80 % bis 85 % für Niedertemperaturkessel auszugehen – jeweils ohne bzw. mit Qualitätssicherung. Einen 1:1 Austausch von Heizkesseln haben die Gutachter nicht untersucht. Eine präferierte Lösung für die beiden Ziele – einerseits schnell einen emissionsärmeren Zustand zu erreichen, andererseits nicht bis zum nächsten Baukörpersanierungszyklus zu warten – ist der übergangsweise Aufbau von Hybridheizungen (Bivalenz) aus Kesseln und Wärmepumpen. Die Wärmepumpe wird dabei nach der absehbar geringeren Heizlast gewählt, die sich nach der Modernisierung der Gebäudehülle ergibt. Die Wärmepumpe ist daher für eine bestimmte Zeit unterdimensioniert. Mit der nächsten Gebäudesanierung kann das Hybridsystem dann zu einem reinen Wärmepumpensystem umfunktioniert werden. Da eine Hybridlösung klar von der Logik „einfache Systeme sind einfacher zu beherrschen“ abweicht, ist eine Qualitätssicherung bei der Planung und Ausführung hier noch wichtiger als bei reinen Wärmepumpenlösungen. Die für die Wärmepumpen geschilderte Problematik der Unwirtschaftlichkeit aufgrund derzeit zu hoher Strompreise gilt ebenso.
Wärmenetze und Kraft-Wärme-Kopplung	Etwa 4 % der EZFH und knapp 20 % der MFH werden heute über Wärmenetze versorgt. Die Gutachter haben keinen Ausbau konventioneller (warmer und heißer) Nah- und Fernwärmesysteme untersucht. Da langfristig auch diese Netze überwiegend regenerativen Strom nutzen müssen, stellt sich die Frage, welche Energieträger mittel- und langfristig zum Einsatz kommen sollen. Bis auf industrielle Abwärme (Müll, Prozesswärme usw.) weisen alle anderen Optionen (Solarthermie, Wärmepumpe, KWK/Kessel mit PtX/Wasserstoff betrieben) bei einem zentralen Einsatz mit Netz die gleichen Restriktionen auf, die auch für die Direktverwendung am Gebäude gelten. Solarthermie und PV-Strom sind saisonalen Schwankungen unterworfen, künstliche Brennstoffe haben sehr stark verlustbehaftete Vorketten. Es bleibt daher die Frage: sind die zusätzlichen Netzverluste gerechtfertigt, um die sich ergebenden geringeren Investitionskosten von Großanlagen gegenüber vieler Kleinanlagen zu rechtfertigen. In Anbetracht sinkender Wärmeabnahmen, welche sich aus der notwendigen Gebäudemodernisierung ergeben, fallen Netzverluste dann deutlich mehr ins Gewicht als früher. Auch den Betrieb von KWK sehen die Gutachter langfristig nicht als weiter zu fördernden Markt an. Eine Stromproduktion in Zeiten ohne PV- oder Windstrom wird auch künftig unvermeidbar sein, daher wird es reine Kraftwerke geben. Diese zentrale Stromproduktion ist aber auf ein Minimum zu begrenzen. In diesen Phasen wird langfristig eine mit hohen Umwandlungsverlusten verbundene Rückverstromung vorher hergestellter künstlicher Brennstoffe (wahrscheinlich Wasserstoff oder erneuerbares Methan) stattfinden. Da diese Phasen aber nicht mit dem Dauerbetrieb heutiger KWK-Anlagen vergleichbar sind, sondern eher temporär stattfinden, ist künftig nicht von permanent verfügbarer Wärme aus einer KWK auszugehen. Künftig können jedoch Netze der „kalten Fernwärme“ aus Erdreichkollektoren, Erdsonden oder sonstigen „Abwärmequellen“ der Versorgung gebäudeweiser Wärmepumpen dienen.

Tabelle 5 Maßnahmen an den Haupterzeugern im Überblick [eigene Darstellung]

	Istwert, Zielwert und Einschätzung der Maßnahme
Holzkessel	Etwa 6 % der EZFH und 2 % der MFH sind heute mit einem Holzkessel ausgestattet. Die typische Effizienz von Holzkesseln liegt in der Größenordnung von 70 % (ohne QS) bis 75 % (mit QS). Da Holz ein endlicher Energieträger ist, der in seiner Verfügbarkeit begrenzt ist, können nicht alle Gebäude auf diese Art versorgt werden. Etwa ⅓ des für die Gebäudebeheizung verfügbaren Biomassebudgets ist heute schon ausgereizt. In der langfristigen Perspektive kann Holz als Brennstoff zur CO_2-Minderung beitragen, jedoch nicht in einem Massenmarkt. Eine Wirtschaftlichkeit stellt sich durch einen Wechsel von Erdgas oder Heizöl zu Holz nach Berechnungen der Gutachter nicht ein. Die notwendigen Investitionskostenzuschüsse liegen bei mindestens 70 % der Holzkesselkosten. Es erscheint daher sinnvoller, das Unwirtschaftlichkeitsproblem durch eine höhere Bepreisung von Gas und Heizöl (Emissionspreise) zu lösen – siehe Wärmepumpen. Da bei einer Holzheizung hohe Temperaturen erreichbar sind, ist es angebracht, dass sie vor allem in Gebäuden zum Einsatz kommt, die auch langfristig keinen Niedertemperaturbetrieb erlauben, z. B. Denkmale (nach Ausführung aller möglichen baulichen Maßnahmen). Für den Betrieb von Nahwärmenetzen und die damit verbundenen Verluste an das Erdreich erscheint den Gutachtern Holz als zu wertvoll, weil begrenzt.
QS der Haupterzeuger	Die Qualitätssicherung der Erzeugung hängt stark von der Peripherie ab, die relevant für die optimalen Systemtemperaturen ist. Des Weiteren ist eine passende Dimensionierung (Planung) und die Fähigkeit der Leistungsregelung (modulierende Wärmeerzeuger) relevant (Produkteigenschaft). Beides kann nur im Rahmen einer Modernisierung optimiert werden, nicht nachträglich. Jedoch sind Anpassungen der Regelparameter und Hydraulik auch nach Inbetriebnahme sinnvoll. Alle Wärmeerzeuger reagieren auf die vorgelagerten Störgrößen (anderes Nutzerverhalten, Änderungen am Baukörper, Änderungen an der Peripherie), daher ist die QS eher als Daueraufgabe zu verstehen. Eine nachträgliche anlagentechnische Qualitätssicherung als Alleinmaßnahme ist sinnvoll, wenn ein Monitoring stattgefunden hat, mit dem einzelne Probleme lokalisiert und erkannt werden. Eine gute Basis ist eine (automatisierte) Energieanalyse aus dem Verbrauch, integriert z. B. in zukünftigen Regeleinrichtungen von Kesseln und Wärmepumpen sowie in Heizkreisregelungen [53] [27] [55]. Der absolute und prozentuale Einfluss der Qualitätssicherung steigt an, je besser der erreichte bauliche Standard ist. Die im Rahmen des Gutachtens untersuchten Sanierungen auf „guten“ und „besten“ Standard erreichten ¼ bis ⅓ Emissionsminderung durch die Summe aller QS-Maßnahmen.

Tabelle 5 Maßnahmen an den Haupterzeugern im Überblick [eigene Darstellung] (Fortführung)

Auf den Nichtwohnbau lassen sich die Erkenntnisse wie folgt übertragen: für Nutzungen ohne nennenswerte Kühlung kommen Wärmepumpen bzw. übergangsweise wie im Wohnungsbau Kessel/Wärmepumpen-Hybridlösungen zum Einsatz, z. B. sind dies Bildungsbauten, Heime, Büros, Kultureinrichtungen, Sportstätten, Lager. Insbesondere für Nichtwohnbauten mit gleichzeitigem Wärme- und Kältebedarf über weite Teile des Jahres sind Wärmepumpen/Kältemaschinen-Systeme mit Doppelnutzung anzustreben, dies sind z. B. Krankenhäuser, Hotels, Küchen, Verkaufseinrichtungen.

Tabelle 6 stellt die Maßnahmen an **Zusatzerzeugern und wesentlichen Elementen der Peripherie** zusammen.

	Istwert, Zielwert und Einschätzung der Maßnahme
Lüftung mit WRG	Nur etwa 1 bis 3 % der Wohngebäude weisen eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung auf. Die Untersuchungen im Rahmen des Gutachtens zeigen, dass ein sinnvoller Einsatzbereich der Neubau sein wird. Trotz unbestrittener Vorteile ist eine Wirtschaftlichkeit nur gegeben, wenn Fördermittel von fast 100 % der Investitionssumme angesetzt werden. Im durchschnittlichen Sanierungsfall eines bestehenden Wohnbaus ist die Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit so hohen Kosten sowie baupraktischem Aufwand der Umsetzung verbunden, dass sich keine Wirtschaftlichkeit ergibt.
Photovoltaik	Etwa 6 % der MFH und 14 % der EZFH sind bereits mit Photovoltaik ausgestattet. Hinsichtlich der Zusatzerzeuger im bzw. am Gebäude spielt die Photovoltaik aus Sicht der Gutachter eine herausragende Rolle. Sie kann nicht nur nennenswert den Haushaltsstrom decken, sondern künftig auch Anteile für die Trinkwassererwärmung und Heizung beisteuern. Einfamilienhäuser schneiden wegen eines günstigeren Verhältnisses von Dachfläche zu Wohnfläche besser ab. Die dezentrale Stromproduktion kann vergleichsweise ausfallsicher erfolgen. Es ist ein typischer Jahresertrag von 200 kWh/(m²a) gegeben. Die Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit im Rahmen des vorliegenden Gutachtens zeigen, dass keine Investitionskostenzuschüsse notwendig werden, sofern eine Vergütung des eingespeisten Stroms erfolgt. Für den Mietwohnungsbau sind übergangsweise aus Sicht der heutigen Rechtslage Konzepte für den Vertrieb und/oder die Eigennutzung von Mieterstrom notwendig, z. B. in Form des Contracting [56].

Tabelle 6 Maßnahmen an Zusatzerzeugern und Peripherie im Überblick [eigene Darstellung]

	Istwert, Zielwert und Einschätzung der Maßnahme
Solarthermie	Die Durchdringung der Wohnbauten mit Solarthermie liegt bei etwa 9 % in MFH und 20 % in EZFH. Je nach erfolgter QS ist mit einem Ertrag von 320 bis 360 kWh/(m²a) zu rechnen. Im Gegensatz zu anderen Studien sehen die Gutachter die Relevanz der Solarthermie sehr eingeschränkt. Sie hat ggf. ihre Berechtigung im EZFH mit mehr als drei Bewohnern (also bei ausreichender Belegung, ohne Zirkulation). Das Maß an notwendiger Qualitätssicherung bis zu einem zufriedenstellenden Betrieb ist in MFH hoch. Zudem ist der ungünstige Umstand einer Trinkwarmwasserzirkulation kaum vermeidbar. Die Wirtschaftlichkeit ist nach den Auswertungen der Gutachter gegeben, wenn Investitionskostenzuschüsse von 55 bis 60 % angesetzt werden. Die größte Konkurrenz ergibt sich zur dezentralen Photovoltaik am Gebäude. Da mit größerer Sicherheit der vorher bestimmte Ertrag bei Photovoltaik aus eigener Monitoringerfahrung auch eintritt und die Anlagen auch ohne nennenswerte Qualitätssicherung ihre zugesicherten Eigenschaften aufweisen, wird die geringere Effizienz (Ertrag pro Fläche) gegenüber einer Solarthermie in Kauf genommen.
Qualitätssicherung der Peripherie	Zu einer qualitätsgesicherten anlagentechnischen Peripherie gehören minimierte unkontrollierte Wärmeeinträge von Rohrleitungen in den beheizen Bereich, der hydraulische Abgleich, optimale Raumregelung und Systemtemperaturen sowie passende Pumpen. Optimale Verhältnisse sind umso schwieriger zu erreichen, je besser der bauliche Wärmeschutz ist; die Problematik unkontrollierter Wärmeeinträge und lokaler Überwärmung, Nachteile träger Regelungen und Heizflächen (Fußboden- und Wandheizungen) wirkt sich in Gebäuden mit geringem Wärmebedarf entsprechend deutlich negativer aus. Ein Teil der Maßnahmen lässt sich leicht und zu jedem Zeitpunkt durchführen: die Optimierung der Systemtemperatur sowie der hydraulische Abgleich. Auch Speicher lassen sich nachdämmen. Der andere Teil – insbesondere schwer regelbare Heizflächen (Estrichfußbodenheizung, Stahlradiatoren) kann erst beim nächsten Sanierungszyklus angegangen werden. Die Möglichkeit der Nachdämmung von Rohrleitungen hängt vom Ort der Installation ab: frei zugänglich oder in der Konstruktion. Der absolute und prozentuale Einfluss der Qualitätssicherung steigt an, je besser der erreichte Standard ist. Die im Rahmen des Gutachtens untersuchten Sanierungen auf „guten“ und „besten“ Standard erreichten ¼ bis ⅓ Emissionsminderung durch die Summe aller QS-Maßnahmen.

Tabelle 6 Maßnahmen an Zusatzerzeugern und Peripherie im Überblick [eigene Darstellung] (Fortführung)

Für die Trinkwassererwärmung in Nichtwohnbauten gelten die Aussagen aus dem Wohnungsbau analog: jegliche unnötigen Leitungsnetze sind zu vermeiden; lediglich einzelne Nutzungen mit großen Trinkwarmwasserbedarfen in der Fläche werden zentralisiert ausgeführt: dies sind Netze in Krankenhäusern, Hotels, Heimen, Beherbergungseinrichtungen. Klassische dezentrale Systeme, die über die gesamte Fläche verteilt sind, i. d. R. als Elektrokleinspeicher oder Elektrodurchlauferhitzer ausgeführt, finden sich in Bildungsbauten, Büros, Kultureinrichtungen.

Die Photovoltaik lässt sich in alle Nichtwohnbaunutzungen integrieren, weil überall Strom benötigt wird. Solarthermie kann ggf. gut eingebunden werden, wenn große Trinkwarmwassermengen benötigt werden, im besten Falle täglich und ohne Sommerpause: Bäder, Sportstätten (außerhalb von Schulen), ggf. Krankenhäuser. Aus Gründen der Lufthygiene (Schadstoffe, dichte Belegung mit Personen) oder weil ggf. ohnehin ein schnell reagierendes Heizsystem auf Basis von Luft erwogen wird, ist die Verbreitung von Lüftungsanlagen im Nichtwohnungsbau schon heute größer; die Verbreitung von Anlagen mit Wärmerückgewinnung wird noch weiter zunehmen, vor allem in Bildungsbauten, Sportstätten, Krankenhäusern.

Die in Tabelle 4 bis Tabelle 6 genannten Maßnahmen der Sanierung lassen sich inhaltlich auch auf den Neubau übertragen. Dies gilt vor allem für eine **verpflichtende Qualitätssicherung, beim Bau und nach Inbetriebnahme auf Basis von Verbrauchsdaten.** Diese wäre als **obligatorische Maßnahme in einer novellierten Version des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) festzuschreiben.**

Hinsichtlich der Ausstattung schließen sich die Gutachter der umfangreichen Studie von IWU/BET aus dem Jahr 2019 [57] an. Dem Bauherrn wird im Neubau nahegelegt, **sich an den aus technischer Sicht besten Lösungen zu orientieren – sowohl beim Wärmeschutz, als auch bei der Wärmeversorgung. Konkret sehen die Gutachter das Passivhausniveau** (vgl. BUND 2017 [32]) **sowie vorgeschriebene Nutzung von Photovoltaik** (vgl. u. a. Hamburger Klimaschutzgesetz [58]) **als realistisch an.** Sofern dies rechtlich durchsetzbar ist, erscheint es den Gutachtern als zielführend, Förderung und Forderung miteinander zu verknüpfen (vgl. auch DMB 19 [59] und BAK 2018 [50]).

(10) Quantitative Zusammenfassung der Ergebnisse der Mikroperspektive: Einspareffekte, Kosten-Nutzen-Verhältnisse, Fördertatbestände oder notwendige Anpassung der Energiepreise

Für die Typgebäude, die in Abschnitt (2) der Zusammenfassung vorgestellt wurden, untersucht das vorliegende Gutachten verschiedene Maßnahmen und Maßnahmenpakete. Die Ergebnisse werden **nachfolgend tabellarisch vorgestellt. Es werden grundsätzlich zwei Fälle unterschieden: die Maßnahme erfolgt, weil sie ohnehin geplant war (im Sanierungszyklus) oder sie wird anlasslos, d. h. vorgezogen durchgeführt. Im ersten Fall sind die Mehrkosten relevant – über das ohnehin geplante Maß (Sowiesokosten) hinaus. Im zweiten Fall zählen die Vollkosten.**

Zunächst erfolgt die rein ökologische Sicht in Form der Angabe einer „Emissionsminderung" in [%], bezogen auf den Ausgangszustand. Für Maßnahmen, die auch die Strombilanz betreffen, erfolgt eine Gemeinschaftsbetrachtung „Wärme plus Strom" (z. B. mit Photovoltaik), sonst nur „Wärme". **Die Maßnahmen sind sortiert nach dem äquivalenten CO_2-Preis, also nach den Kosten je eingesparter Tonne CO_2.** Die Gutachter geben in der letzten Spalte eine Einschätzung ab, wie weiter verfahren werden kann – ob die Maßnahme sich aus wirtschaftlicher Sicht als umsetzungsgünstig erweist und entsprechend weiterverfolgt wird und mit welchem Aufwand.

Darüber hinaus liefert die ökonomische Sicht eine Gesamtkostendifferenz aus Kapital-, Wartungs- und Energiekosten der Maßnahme in [€/(m²a)], bezogen auf die beheizte Wohnfläche und verglichen mit dem Ausgangszustand. **Ein positiver Wert unter „Jahreskosten, Fehlbetrag" bedeutet eine Unwirtschaftlichkeit, ein negativer Wert stellt einen Gewinn dar.**

Im Verlustfall wird ein „notwendiger Investitionskostenzuschuss" in [%] bezogen auf die Gesamtkosten einer Maßnahme angegeben – analog einer Bezuschussung durch heutige KfW-Programme. **Der Wert ergibt sich so, dass eine Grenzwirtschaftlichkeit erreicht wird. Wird ein Wert über 100 % ermittelt, ist dies ein Indiz, dass nicht die Investitionskosten problematisch sind, sondern andere Bestandteile der Gesamtkostenrechnung (regulär steigende Energiekosten trotz Modernisierung).** Allgemein steigt die Wirtschaftlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen, wenn die Energiepreise hoch sind – es lohnt sich dann das Sparen. Energiepreise können auch steigen, wenn sie durch Emissionspreise belegt werden. **Berechnet wird die Verteuerung der Energieträger (z. B. des vor der Sanierung verwendeten Erdgases) durch einen „notwendigen zusätzlichen Emissionspreis" in [€/t]), der gegeben sein müsste, damit genau eine Grenzwirtschaftlichkeit erreicht wird.**

	Kurzbeschreibung	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
			[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
erstmalige Dämmung bzw. schlechter Ausgangszustand								
OGD	schlecht → best	V	-20 … 30	100 … 120	-1,6 … -2,5	keiner	keiner	+++
Dach	schlecht → best	M	-20 … 30	200 … 220	-1,4 … -1,9	keiner	keiner	+++
Kellerdecke	schlecht → best	V	-10 … -20	220 … 240	-0,3 … -0,4	keiner	keiner	+++
AW außen	schlecht → best	M	-30 … 40	240 … 260	-1,0 … -1,1	keiner	keiner	+++
AW innen	schlecht → gut	V	-25 … 35	310 …330	-0,1 … 0,1	max. 2	max. 10	+
AW außen	schlecht → best	V	-30 … 40	320 … 340	0,0 … 0,4	max. 7	max. 25	+
Bodenplatte	schlecht → best	V	-5 … -15	430 … 460	0,4 … 0,7	max. 30	max. 140	o
Dach	schlecht → best	V	-20 … -30	430 … 460	0,9 … 1,8	max. 30	max. 140	o
Fenster	schlecht → best	V	-10 … -20	920 … 1020	3,6 … 3,7	max. 70	max. 700	-
zusätzliche Dämmung bzw. mittlerer Ausgangszustand								
OGD	mittel → best	V	- 5 … -15	280 … 300	-0,1 … 0,0	keiner	keiner	+++
Kellerdecke	mittel → best	V	0 … -10	350 … 380	0,1 … 0,2	max. 15	max. 70	+
AW außen	mittel → best	M	-20 … -30	360 … 450	1,1 … 1,2	max. 20	max. 140	o
Dach	mittel → best	M	-5 … -15	500 … 530	0,5 … 1,0	max. 20	max. 220	o
Fenster	mittel → best	M	0 … -10	760 … 850	1,0 … 1,1	max. 20	max. 550	-
Dach	mittel → best	V	-5 … -15	1200 … 1300	2,4 … 4,2	max. 75	max. 950	-
+++ (umsetzen), ++ (ggf. umsetzen), + (anreizen/fördern), o (ggf. anreizen fördern), - (nicht anreizen/fördern)								
OGD (obere Geschossdecke), AW (Außenwand)								

Tabelle 7 Quantitative Ergebnisdarstellung der baulichen Einzelmaßnahmen [eigene Darstellung]

Die Ergebnisse der Tabelle 7 lassen sich in **Handlungsoptionen zur realen Förderpolitik** übertragen. Um den Investoren tatsächlich einen Anreiz zur Sanierung zu bieten, erscheint für die baulichen Maßnahmen – vor allem an Bauteilen mit sehr langen Nutzungsdauern, die „von allein" nicht angefasst werden würden – eine **Förderquote von 10 bis 20 %** als sinnvoll. Sie liegt etwas höher als rechnerisch notwendig und führt beim Investor dann zu realen Entlastungen, wenn ohnehin der Sanierungszyklus erreicht ist. Dieser Wert wird auch für Fenster angenommen, auch wenn die tatsächlich notwendige Förderung damit nicht erreicht wird. Lediglich für Bodenplatten erscheinen 40 % als realistisch.

Da die Effizienz der Erzeuger häufig von der Systemtemperatur abhängt, werden die Betrachtungen zum Erzeugertausch zunächst am Durchschnittsgebäude (alle Hüllbauteile sind „durchschnittlich") getestet, jedoch alternativ auch immer ein saniertes Gebäude (alle Hüllbauteile sind „gut" oder auf den Standard „best" saniert) als Alternative betrachtet.

Tabelle 8 zeigt deutlich, dass **viele der strombasierten Versorgungsvarianten beim heutigen Strompreis zwar deutlich emissionsmindernd sind, jedoch nicht wirtschaftlich. Auch Investitionskostenzuschüsse können vielfach das Problem nicht mindern, da nicht die jeweilige Investitionssumme problematisch ist, sondern da die Energiekosten im Zuge der Erzeugerwechsel ansteigen.**

	alter Erzeuger	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
			[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
heutiges Durchschnittsgebäude Deutschland								
Holzkessel	Öl-NT	M	ca. -95	100 … 160	3,2 … 6,6	80 … 90	80 … 140	++
Holzkessel	Öl-BW	V	ca. -95	120 … 190	4,4 … 8,1	ca. 110	120 … 200	++
AU-WP	Öl-NT	M	-45 … -50	130 … 200	5,1 … 7,5	110 … 140	240 … 300	+
Fernwärme	Gas-NT	V	-5 … -10	ca. 240	ca. 2,4	ca. 480	ca. 1150	-
AU-WP	Öl-BW	V	-40	240 … 380	7,3 … 10,8	160 … 200	480 … 610	+
E-WP	Öl-NT	M	ca. -55	330 … 390	8,5 … 11,8	100 … 100	330 … 390	+
AU-WP	Gas-NT	M	ca. -30	330 … 490	5,1 … 7,5	110 … 140	590 … 730	o
E-WP	Öl-BW	V	ca. -50	410 … 530	9,4 … 13,7	110 … 140	470 … 590	o
AU-WP	Fernwärme	V	ca. -20	ca. 570	ca. 4,0	ca. 110	ca. 620	o
E-WP	Gas-NT	M	ca. -40	640 … 770	8,5 … 11,8	100 … 110	640 … 770	o
E-WP	Fernwärme	V	ca. -40	ca. 730	ca. 6,2	ca. 80	ca. 560	o
AU-WP	Gas-BW	V	ca. -15	870 … 1300	7,2 … 10,8	160 … 200	1700 … 2100	-
E-WP	Gas-BW	V	ca. -30	920 … 1200	9,4 … 13,7	110 … 120	1100 … 1300	-
auf gutes Niveau saniertes Gebäude								
Holzkessel	Öl-NT	M	ca. -95	120 … 180	2,6 … 4,5	70 … 80	100 … 160	++
Holzkessel	Öl-BW	V	ca. -95	140 … 250	3,4 … 6,4	100 … 110	150 … 260	++
AU-WP	Öl-NT	M	ca. -50	150 … 170	3,5 … 3,6	70 … 130	230 … 250	+
AU-WP	Öl-BW	V	ca. -40	280 … 440	6,8 … 5,0	140 … 180	500 … 600	+
E-WP	Öl-NT	M	ca. -60	350 … 370	5,8 … 6,3	80 … 100	340 … 520	+
AU-WP	Gas-NT	M	ca. -30	370 … 380	3,5 … 3,6	70 … 130	520 … 610	+
E-WP	Öl-BW	V	-50 … -55	450 … 580	6,5 … 8,6	100 … 110	510 … 600	o
AU-WP	Fernwärme	V	ca. -25	ca. 650	ca. 3,0	ca. 110	ca. 680	o
E-WP	Gas-NT	M	ca. -45	ca. 680	5,8 … 6,3	80 … 100	630 … 670	o
E-WP	Fernwärme	V	ca. -40	ca. 790	ca. 4,5	ca. 80	ca. 610	o
AU-WP	Gas-BW	V	ca. -20	970 … 1250	5,0 … 6,8	140 … 180	ca. 1700	-
E-WP	Gas-BW	V	ca. -35	1000 … 1200	6,5 … 8,6	100 … 110	ca. 1200	-
Fernwärme	Gas-NT	V	ca. 10	k. A.	1,9	ca. 490	k. A.	--
+++ (umsetzen), ++ (ggf. umsetzen), + (anreizen/fördern), o (ggf. anreizen/fördern), - (nicht anreizen/fördern), -- (nicht umsetzen)								
WP (Wärmepumpe), E (Erdreich), AU (Außenluft), NT (Niedertemperaturkessel), BW (Brennwertkessel)								

Tabelle 8 Quantitative Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Haupterzeugern [eigene Darstellung]

Das spricht dafür, dass **eine grundlegend andere Energieträgerbepreisung angebracht ist,** wie im Punkt (5) der Zusammenfassung herausgearbeitet wird. In der heute vorhandenen Preisstruktur müsste eine Photovoltaikanlage eingebunden werden, die zumindest teilweise die Stromkosten mindert. Alternativ treten Energieträgerverteuerungen ein (Gas- und Ölpreise müssten mindestens verdoppelt, oft auch verdreifacht werden).

Tabelle 9 zeigt, dass keine Notwendigkeit besteht, die Photovoltaik separat zu bezuschussen. Sie rentiert sich durch die Einspeisevergütung. Für Solarthermie und Lüftungstechnik sind die berechneten Zuschüsse deutlich höher. **Für die reale Umsetzung in ein Förderprogramm erscheint es auch hier sinnvoller, zunächst eine grundlegend andere Energieträgerbepreisung zu etablieren,** wie im Punkt (5) der Zusammenfassung erläutert.

	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme+Strom	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
		[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
Photovoltaik + elektr. TWW	V	-10 … -15	560 … 980	-2,0 … -2,5	keiner	keiner	+++
Photovoltaik	V	-5 … -10	550 … 1300	-2,1 … -2,6	keiner	keiner	+++
Solarthermie	M	-5 … -10	900 … 930	1,5 … 1,8	55 … 60	490 … 570	-
Solarthermie	V	-5 … -10	830 … 1000	1,5 … 1,7	55 … 60	420 … 640	-
Lüftung WRG	V	ca. -5	1900 … 3000	c. 5,0	90 … 100	1700 … 2900	-
+++ (umsetzen), ++ (ggf. umsetzen), + (anreizen/fördern), o (ggf. anreizen fördern), - (nicht anreizen/fördern)							
WRG (Wärmerückgewinnung), TWW (Trinkwarmwasser)							

Tabelle 9 Quantitative Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Zusatzerzeugern [eigene Darstellung]

Eine **pauschale Bewertung, ob Maßnahmenreihenfolgen oder Pakete sinnvoller sind, lässt sich nicht abschließend treffen**. Es ist eine **Einzelfallentscheidung** – vor allem abhängig davon, welche Maßnahmen zum Zeitpunkt der Überlegung ohnehin anstehen und welche ggf. dadurch im Paket vorgezogen werden. Die Bestandteile eines Gebäudes weisen unterschiedliche Sanierungszyklen auf, so dass es im Verlaufe eines Gebäudelebens nur wenige oder auch keine Zeitpunkte gibt, zu denen viele oder gar alle Einzelelemente gleichzeitig saniert werden müssen.

Stehen alle oder mehrere Maßnahmen gleichzeitig oder fast gleichzeitig an, ist es sinnvoll im Paket zu sanieren. Stehen Maßnahmen nicht gleichzeitig an, besteht Wahlfreiheit für das Bilden von Paketen. Je **ferner der eigentlich notwendige Investitionszeitpunkt liegt, desto unwirtschaftlicher ist eine Paketsanierung mit Vorzieheffekt**. Insbesondere Fenster- und Außenwand im Paket führen jeweils zu sehr großen Verschiebungen. Würde die Wand immer im Zusammenhang mit der Fenstersanierung ertüchtigt, führte dies jedes Mal zu einem Vorziehen von etwa 10 Jahren. Es ist damit nachvollziehbar, dass – obwohl eine Gleichzeitigkeit baupraktisch auf der Hand liegen würde – häufig in der Praxis die Fenster in einem anderen Turnus und unabhängig von der Wand verbessert werden.

Da die anlagentechnischen Maßnahmen allgemein kurzlebiger sind als bauliche Maßnahmen, stellt sich insgesamt eher die Option einer vorzeitigen Anlagentechniksanierung im Zusammenhang mit einer baulichen Sanierung. Dies wird im Gutachten auch an den Typgebäuden herausgearbeitet: die **vorgezogene Verbesserung des Erzeugers ist deutlich günstiger** (im Sinne notwendiger Zuschüsse) **als der umgekehrte Fall**. Bezogen auf die untersuchten Varianten für Reihenfolgen und Pakete des EZFH und MFH ist festzustellen, dass das Vorziehen von anlagentechnischen Maßnahmen günstiger ist, wenn der Energieträger Heizöl gegeben ist. Dann lohnt sich sogar der **Aufbau übergangsweiser Hybridlösungen mit Kessel und Wärmepumpe**. Das ist bei Gaskesseln nicht der Fall. Sie können eher bis zum Lebensende betrieben werden.

Die Maßnahmenbewertung erfolgt unter festgelegten Randdaten zur Bilanzierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung. **Werden diese modifiziert, ergeben sich andere Erkenntnisse. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse könnten alle oder einzelne Varianten erneut unter anderen Randdaten durchgerechnet werden. Darauf wird im Rahmen des Gutachtens jedoch verzichtet. Das Gutachten behandelt sanierungsfördernde und -hemmende Randdaten qualitativ. Sie werden nachfolgend nur benannt:**

- **sanierungsfördernd, bessere Wirtschaftlichkeit**: hoch berechnete Endenergieeinsparung, hohe Energiepreissteigerung, geringe Investitionskosten (z. B. Weglassen der Kostengruppe 700), hoher Sowiesokostenanteil / geringe energiebedingte Mehrkosten*, Einbezug von Lernkurven für Bauprodukte, negativer Baupreisindex, geringer Finanzierungszins*, lange Nutzungsdauern der Bauprodukte*
- **sanierungshemmend, schlechtere Wirtschaftlichkeit**: gering berechnete Endenergieeinsparung*, niedrige Energiepreissteigerung*, hohe Investitionskosten (incl. Kostengruppe 700)*, Verwendung der Vollkosten*, keine Berücksichtigung von Lernkurven für die Bauprodukte*, positiver Baupreisindex, hoher Finanzierungszins, kürzere Nutzungsdauern der Bauprodukte.

Die mit Stern (*) gekennzeichneten Größen wurden im Rahmen dieser Studie verwendet. Die Einordnung zu einer der beiden Rubriken erfolgt nach Ansicht der Gutachter im Vergleich zu anderen Studien ähnlichen Auftrags.

(11) Motivation und Hemmnisse der einzelnen Akteure, Selbstnutzung und Vermieter-Mieter-Konstellationen sowie die Rolle von Betreibermodellen

Jegliche Überlegung zu einer vermehrten Marktdurchdringung von baulichen Sanierungen, Technologiewechseln, veränderter Energieträgerbepreisung usw. ruft auch politischen Klärungsbedarf zum Nachteilsausgleich hervor. Es liegen diverse Vorschläge **zur Entlastung einkommensschwacher Haushalte** vor (DMB 2019 [59], Neitzel et al. 2017 [60], Großklos et al. 2018 [61], IWU 2013 [62]): **begrenzte oder keine Umlage von Emissionspreisen der Energieträger, Warmmietenzuschüsse oder Warmmietdeckel, eine Klimakomponente im Wohngeld/ Klimawohngeld.** Aber auch Budgetansätze sind denkbar, um **energiesparendes Verhalten** (Wasser, Strom, kleinere Wohnung) zu belohnen.

Erfolgt der Umbau des Energiesystems mit abgestimmten politischen Maßnahmen zur Sektorkopplung, ergeben sich keine wesentlichen bzw. unüberwindbaren volkswirtschaftlichen Belastungen. Dies zeigt eine vom Öko-Institut für den Bundesverband der Verbraucherzentralen durchgeführte Studie, welche die Auswirkungen auf die Sozialkosten der verschiedenen Haushalte untersucht [63].

Für den Fall der S**elbstnutzung einer Immobilie durch einen Einzelnutzer** gelten die Erkenntnisse (Energieeinsparung, Gesamtkosten) zu Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpaketen wie im Punkt (10) der Zusammenfassung beschrieben. Auch die mit einer Modernisierung einhergehende Wertsteigerung der Immobilie sowie die größere Unabhängigkeit von Energiepreissteigerungen sowie der Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz sind vielfach von Bedeutung. Alle als wirtschaftlich erkannten Maßnahmen führen direkt zu einer Gesamtkostenminderung (Summe aus Kapitalkosten, Wartungs- und Unterhaltskosten, Energiekosten).

Sofern keine Wirtschaftlichkeit der Maßnahme allein aus der Energiekostenersparnis heraus bestimmt werden kann, führt der Einbezug eines „**Investitionskostenzuschusses**“ zu einer Grenzwirtschaftlichkeit. Es gilt dann: die jährlichen Kosten mit der Maßnahme (Kapital plus Energie) sind genauso groß wie die Energiekosten vorher.

Die Alternative eines „**zusätzlichen Emissionspreises**“ führt auch zu einer Grenzwirtschaftlichkeit. Allerdings steigen dabei die Gesamtausgaben. Es gilt: die jährlichen Kosten mit der Maßnahme (Kapital plus Energie) sind genauso groß wie die Energiekosten vorher – jedoch wären diese durch den zusätzlichen Emissionspreis bereits höher. Wird der „zusätzliche Emissionspreis“ als (förderpolitische) Maßnahme zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit gewählt, ergibt sich der staatliche Anteil indirekt, z. B. durch **anderweitige Entlastungsnotwendigkeiten, v. a. einkommensschwacher Verbraucher**. Dieser Ansatz führt also ebenfalls zu einer Subventionsnotwendigkeit, jedoch anderer Art.

Die o. g. Überlegungen gelten für **Wohneigentümergemeinschaften ebenfalls**. Nutzer und Investor sind grundsätzlich identisch. Für die gemeinschaftliche Nutzung von Photovoltaikstrom sind ggf. komplexere technische Strukturen aufzubauen (z. B. eine zweite Zählerebene) oder alternative vertragliche Regelungen (z. B. ein Betreibermodell).

Für den Fall der **Vermietung einer Immobilie** sind die Erkenntnisse zu modifizieren. Alle als wirtschaftlich erkannten Maßnahmen führen zu einer Gesamtkostenminderung (Summe aus Kapitalkosten, Wartungs- und Unterhaltskosten, Energiekosten). Sie sind also zuschussfrei umsetzbar, das bedeutet: es ließe sich eine **Kaltmieterhöhung** finden, bei der weder der Vermieter noch der Mieter einen Verlust verzeichnen. Ob dies tatsächlich umsetzbar ist, **ergibt sich aus der Deckelung der Mietpreiserhöhung – einerseits durch die prozentuale Umlagefähigkeit, andererseits die örtlichen Vergleichsmieten**.

Die Investitionsaufwendungen der Sanierung werden auf die Mieter umgelegt. Zu der **Art und Höhe von Umlagen gibt es diverse Vorschläge** verschiedener Akteure (Weiß et al. [64], Pehnt et al. [34], IWU 2013 [62], DMB 19 [59], AGORA 20 [65] u. a.). Beispielsweise besteht die Option Investitionen nicht kostenabhängig mit festen Quoten, sondern einsparabhängig umzulegen, die Modernisierungsumlage auf das Doppelte der einsparbaren Energiekosten zu begrenzen, nur eine Umlage bis zur Warmmietenneutralität vorzunehmen oder weitgehend Warmmieten einzuführen. Auch örtliche Vergleichsmieten (der zweite limitierende Faktor für die Umlage) könnten den energetischen Standard berücksichtigen („ökologische Mietspiegel"). Auch das **pragmatische Drittelungsmodell** steht zur Diskussion (vgl. BUND 2017 [32]) – ein Drittel der Kosten einer energetischen Sanierung trägt der Vermieter (finanziert durch Kaltmieten und deren Erhöhung), ein Drittel trägt der Mieter (Resultat sind höhere Warmmieten), ein Drittel trägt der Bund (über Förderprogramme).

Sofern keine Wirtschaftlichkeit der Maßnahme allein aus der Energiekostenersparnis heraus bestimmt werden konnte, führt der Einbezug eines „Investitionskostenzuschusses" zu einer Grenzwirtschaftlichkeit. Der Zuschuss wird an den Vermieter gezahlt, der daraus einen Teil der Investitionskosten deckt und somit die notwendigen Kaltmieterhöhung etwas geringer ausfallen lassen kann. Ein **zusätzlicher Emissionspreis** belastet zunächst einmal nur die Mieter. Würde ein solches System etabliert, braucht es **anderweitige Entlastungen der Mieter** – dies gilt analog wie für die Selbstnutzer beschrieben. Kritisch sind Haushalte mit geringem Einkommen bzw. einer hohen Mietbelastung bereits vor der Modernisierung.

(12) Pfade in die Energiezukunft: breit gefächerte Meinungen unterschiedlicher Akteure

Als Teil des Gutachtens wurden verschiedene Studien der ca. letzten 10 Jahre ähnlichen Inhalts gesichtet. Die jeweils vorliegende Datenbasis zur Beschreibung des Gebäudebestandes sowie die Kostendaten wurden auf Praxisnähe, Aktualität und notwendige Detailtiefe hin untersucht. Die von anderen Autoren gewählte Vorgehensweise bei der Bearbeitung wurde analysiert und ggf. adaptiert, insbesondere die Energiebilanzierung mit Ergebnisabgleich zum realen Verbrauch sowie die Wirtschaftlichkeitsbewertung und ihren Umgang mit ohnehin notwendigen Sanierungstatbeständen. Die Bandbreiten (Meinungsfelder der Experten) für Zukunftsprognosen wurden erfasst, z. B. die künftige Marktdurchdringung einzelner Produkte, Markthemmnisse und -restriktionen, natürliche und künstlich hervorgerufene Sanierungsgeschwindigkeiten.

Im Quervergleich kann die Frage, wieso verschiedene Autoren bei derselben Aufgabenstellung zu vergleichsweise verschiedenen Erkenntnissen kommen, wie folgt beantwortet werden.

Primär relevant ist die **Art der Zielvorgabe.** Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung [66] zielt auf eine **Emissionsminderung bis 2050 von 80 % bis 95 % ab, unabhängig davon, ob das Emissionsbudget damit eingehalten wird oder nicht.** Wird das Emissionsbudget des IPCC als Maß für die Begrenzung der Erderwärmung gewählt, spielt es dagegen keine Rolle, bis wann welche Emissionsminderung eintritt, solange das Budget insgesamt eingehalten wird, siehe auch Punkt (8) der Zusammenfassung. **Die Maßnahmen und Szenarien, die sich aus dem Budgetansatz ableiten, sind deutlich ambitionierter – was im Umkehrschluss bedeutet, dass mit den Zielen des Klimaschutzplans 2050 nicht unbedingt das 2°C-Ziel einzuhalten ist. Dies gilt vor allem, wenn lange gezögert wird und die Umsetzung erst kurz vor Ablauf der Frist erfolgt**.

Darüber hinaus sind die konkreten Vorgehensweisen und Annahmen der jeweiligen Makrostudie relevant. Grob zusammengefasst sind die Annahmen zur Energiebilanzierung (Ziel: Einsparung berechnen) und zu Energie- und Investitionskosten (Ziel: Wirtschaftlichkeit berechnen) relevant. **Vorab sei angemerkt: es bestehen extrem viele Freiheitsgrade und unbekannte Entwicklungen bei einer Modellierung der Zukunft aller (!) Gebäude in eine mindestens 30-jährige (!) Zukunft. Ein Blick zurück zeigt, dass das Problem vor 30 Jahren recht ähnlich lag.**

Bei den durch die Gutachter untersuchten Makrostudien zeigt sich, dass nur geringe Abweichungen bei der Beurteilung der Energiebilanz vorliegen. Auf Basis des Ergebnisvergleiches der Studien ist zudem zu vermuten, dass es **nicht zwangsweise notwendig ist, den Gebäudebestand mit einer großen Detailtiefe abzubilden**. Die **Simulationsverfahren** (auf Basis von Typologien mit vielen Untergruppen von Gebäudearten und Baujahren, jahresweise Prognosen, teilweise Stundensimulationen) **gelangen zu ähnlichen Erkenntnissen wie die Verfahren, die auf wenigen Typgebäuden basieren** und in 10-Jahresschritten arbeiten.

Anders sieht es bei den Annahmen zu Kosten aus. Es werden teils **sehr verschiedene Annahmen zur Zukunftsentwicklung der Energiepreise** getroffen: mit oder ohne Einbezug einer CO_2-Komponente (moderat wie von der Bundesregierung beschlossen bis ambitioniert nach Vorschlägen des UBA), mit oder ohne Umgestaltung des EEG/Entlastung der Strompreise, mit oder ohne allgemeine Energiepreissteigerungen. Auch für Energieträger, die heute nicht einmal auf dem Markt sind, z. B. Import-PtX aus Nordafrika werden zwangsläufig Preise angesetzt. Ähnliches gilt für die **Investitionskostenannahmen**, die teils ohne **Lernkurven** angesetzt werden, teils Lernkurven (also Preisdegressionen für im Markthochlauf befindliche, jüngere Produkte – insbesondere Wärmepumpen und Photovoltaik mit bis zu 50 %) berücksichtigen.

Die Gutachter gehen davon aus, dass die Annahmen zur künftigen Technikausbreitung (Art und Geschwindigkeit) sowie Baukörpersanierung (Standards und Geschwindigkeit) auch auf den persönlichen Projekterfahrungen der jeweiligen Autoren der verschiedenen Studien sowie den institutionellen Denkweisen der ausführenden und auftraggebenden Institution basieren.

In der Mehrzahl der Studien ergibt sich eine große Bandbreite von Szenarien, neben einem „business-as-usual", welches entweder die Vergangenheit einfach fortschreibt oder bereits beschlossene (in der Umsetzung sichere) Politikmaßnahmen berücksichtigt. Die Zukunftsszenarien lassen sich grob zu zwei grundsätzlichen Ansätzen bündeln (Hinweis: es sind Zwischenlösungen möglich):

- **„Elektropfade":** Schwerpunkt Ausbau gebäudenahe Photovoltaik und Wärmepumpen, vorrangig Stromdirektnutzung, eher dezentrale Speicherung, künstliche Gas und Gaskraftwerke zur Strombereitstellung in Dunkelflauten/Spitzenzeiten
- **„Technologiemixpfade":** Schwerpunkt Beibehalt üblicher Gasnetzstrukturen sowie Ausbau Fernwärme/KWK, vorrangig Nutzung künstlicher Gase (überwiegend Importe)

Wird der Fokus auf den Erhalt der stofflichen Energiewirtschaft auf Basis von PtX gesetzt (z. B. DENA-Leitstudie [67]) werden die Handlungsstränge vom Sektor „Gebäude" in die „Energiewirtschaft" verschoben. Für die Gebäude bleibt die grobe Versorgungsstruktur dann fast erhalten. Allerdings ist der notwendige Ausbau der regenerativen Energiewirtschaft dann deutlich höher, **weil die Erzeugung und Lieferung regenerativer Gase sehr viel verlustbehafteter ist als die regenerativen Stroms.** Die Gutachter sehen wie auch Fraunhofer ISE und AGORA [68] [69] **daher den „Elektropfad" als zielführender an.**

Zusammenfassend lässt sich sagen: **der Ausbau von regenerativen Energiequellen ist in allen Studien und Gutachten notwendig. Die Frage ist nur, ob diese als Teil der „Energiewirtschaft" geführt werden (überwiegend zentrale Aufbereitung der regenerativen Energien und dann Lieferung als PtX oder Fernwärme), oder als Teil des Sektors „Gebäude" (überwiegend dezentrale Aufbereitung und Nutzung). Aufgrund der Verlustvermeidung und damit geringerer notwendiger Ausbaukapazitäten von Photovoltaik und Windkraft tendieren die Verfasser dieses Gutachtens zu der zweiten Lösung**.

Unter der Prämisse des Ausstiegs aus den fossilen Energieträgern sind die künftigen Lieferanten von Energie Sonne und Wind; zwei bekanntermaßen volatile Quellen. Da Angebot und Nachfrage von Energie gegenläufigen Jahreszyklen unterworfen sind, hängt die Frage der Höhe der Investitionskosten (Umwandlung, Speicherung) an den Lastspitzen der Sektoren. Anders als im Verkehr und der Industrie verläuft die Bedarfsnachfrage des Gebäudesektors maximal antizyklisch zum gegebenen Angebot. **So ist es der Gebäudesektor, der – eine Glättung der ausgeprägten Winternachfrage vorausgesetzt – die Erzeuger- und Speicherkapazitäten drastisch zu senken vermag**.

Ein Teil des gewaltigen Finanzierungsbedarfs würden die Endverbraucher durch ihre künftigen Energieverbrauchszahlungen liefern. **Anders als früher ergäben sich die Energiekosten jedoch zum größten Teil aus Kapitalkosten.** Am Anfang steht eine Investition, z. B. in eine PV-Anlage mit einer bestimmten Leistung, abgestimmt auf die jeweilige Anwendung, z. B. auf die Belieferung einer Elektrowärmepumpe mit elektrischer Energie. Würde das Energieangebot der PV-Anlage die rechnerisch geplanten Erträge überschreiten, z. B. in einem Jahr mit erhöhtem Strahlungsangebot bei sehr gutem Wetter, wäre dieses Zusatzenergieangebot quasi kostenlos. **Jede zusätzlich gelieferte kWh wäre dann ein Geschenk; die Grenzkosten der Technik wären Null. Anbieter von Komplettlösungen, wie Versorgungsunternehmen, Contractoren oder auch Energiegenossenschaften verkauften dann nicht mehr „verbrauchte Brennstoffmengen", sondern eine Art „Flatrate für bereitgestellte und für eine bestimmte Nutzung vorgesehene Leistung".**

(13) Denkbare Politikmaßnahmen und Handlungsoptionen

Ein wirksamer Weg, um die gesteckten Klimaziele zu erfüllen, liegt darin, die materiellen Anforderungen an die Sanierung seitens der Gesetzgebung und der Förderung zu steigern. Bereits heute ist aber festzustellen: Dass jeweils das Gesamtpotenzial der umgesetzten Maßnahmen ausgeschöpft wird, darf bezweifelt werden. Das betrifft die tatsächlich erzielte Dämm-, Luftdichtheits-, Lüftungs-, Heizungs-, Beleuchtungsqualität usw. Ein erster Schritt wäre – neben der materiellen Erhöhung von Forderung und Förderung – **die Überprüfung des erreichten Erfolgs durch Monitoring und Qualitätssicherung.**

Es bietet sich deshalb an, die Umsetzung eines Monitorings zu fördern (z. B. für 2 bis 3 Jahre) und einen Teil der Fördermittel für die Verbesserung des Gebäudes bzw. der Anlagentechnik an dieses Monitoring zu knüpfen. Besser noch wäre eine erfolgsabhängige Vergütung; jedoch ist den Gutachtern die Schwierigkeit der Umsetzung solcher Maßnahmen bewusst. In einer novellierten Fassung des GEG 2023 könnte zumindest das Monitoring über eine Energieanalyse der Verbrauchsdaten (EAV) gefordert werden.

Das Monitoring könnte damit als Kontrollorgan für den Nachweis nach zukünftigem Gebäudeenergiegesetz GEG und für die Vergabe von Fördermitteln dienen. **Bisher beinhalten die Förderprogramme nur Bedarfsnachweise (z. B. individueller Sanierungsfahrplan iSFP). Bei Umstellung auf Verbrauchs- bzw. Erfolgsnachweise würde der Antragsteller nach Fertigstellung der Maßnahme (Neubau, Einzelmaßnahme oder Gesamtsanierung) die Energieeffizienz des Gebäudes über gemessene Verbrauchswerte belegen.** Damit können der Gesetzgeber oder der Fördermittelgeber nachträglich prüfen, auch wenn dies nur stichprobenweise erfolgen würde, ob die gesetzlichen Maßgaben bzw. Voraussetzungen für das Förderprogramm erfüllt wurden.

Vor einer weiteren Ausgestaltung bzw. Novellierung der künftigen Förderpolitik des BEG oder der EnSanMV, aber auch der Verordnungs- und Gesetzgebungspolitik (GEG, EEG, KWKG usw.) wäre allerdings zu entscheiden, in welche Richtung die Energiepreise sich entwickeln sollen – da Fördertatbestände direkt von den Energieträgerpreisen abhängen (bis auf reine Anreizförderung, die lediglich die Umsetzung beschleunigen sollen, aber nicht für die Wirtschaftlichkeit selbst erforderlich wären).

Ambitionierte, aber erreichbare Ziele sind nach Ansicht der Gutachter der Schwerpunkt von Forderungs- und Förderpolitik. Es würden **für Bestandsmodernisierungen nur „best practice-Technologien" eingesetzt.** Diese Option ist **gut kombinierbar mit dem Verfahren des Einzelnachweises**, wie in Punkt (6) der Zusammenfassung erläutert**.** Denn die vielfachen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der einzelnen Effizienzprodukte spielten dann zumindest im Nachweis keine Rolle. Das **Kompensationsprinzip zwischen den Maßnahmen wäre damit nur noch sehr stark eingeschränkt wirksam** (je nach Ausgestaltung der Anforderungen). Es gäbe nach Ansicht der Gutachter **zumindest keine ineffizienten Wärmeerzeuger mehr in hochwärmegedämmten Baukörpern, aber auch keine hocheffizienten Erzeuger mehr in mäßig gedämmten Gebäuden.** Aus Gründen der schon **sehr weit fortgeschrittenen Ausschöpfung des Emissionsbudgets erscheint den Gutachtern das Kompensationsprinzip nicht mehr zeitgemäß.**

Weiterführende Ideen sind die Ausweitung verpflichtender Sanierungsmaßnahmen – über die Dämmung der obersten Geschossdecke oder den Kesseltausch nach 30 Jahren hinaus. Nach Ansicht der Gutachter **ließen sich alle Maßnahmen, die in der Mikroebene** (Punkt (10) der Zusammenfassung) **als „fördermittelfrei" identifiziert wurden, verpflichtend einfordern.** Sanierungsmaßnahmen könnten zudem deutlich stärker als heute an den Eigentümerwechsel gekoppelt werden**.** Mit einem **konsequenten Monitoring** könnte anhand der Ergebnisse nicht nur der Erfolgsnachweis erbracht werden, sondern es wären auch Grundlagen für eine zusätzliche Besteuerung bei Mehrverbräuchen oder eine Belohnung für verminderte CO_2-Emissionen gegeben.

Zuletzt wäre eine politische Handlungsoption darin gegeben, auch **die Qualitätssicherung selbst verpflichtend als Teil der Planung vorzuschreiben (Aufnahme in das GEG). Dies betrifft das luftdichte und wärmebrückenarme Bauen auch im Bestand sowie den sommerlichen Wärmeschutz. Für den Gebäudebestand ergäbe sich darüber hinaus auch die Verpflichtung zur nachträglichen Umsetzung eines hydraulischen Abgleichs bzw. einer Optimierung von Heizungsanlagen.**

Auch für die **Förderung von Maßnahmen** sehen die Gutachter eine Handlungsoption darin, einen **klaren Bezug zu den Klimazielen herzustellen, d. h. die Förderung von einer Einsparung an CO_2 abhängig zu machen. Alternativ werden Einzelanforderungen etabliert, die eine konkrete Bilanzierung überflüssig machen. Dies ist bereits im Neubau für das KfW-geförderte „Effizienzhaus 55 nach Referenzwerten" der Fall.**

Für alle Maßnahmen wäre es nach Ansicht der Gutachter zielführend, die Höhe von Bundesfördermitteln nach dem äquivalenten CO_2-Preis auszurufen (also die Kapitalkosten im Verhältnis zur erzielten Emissionsminderung). Das Vorgehen ist in diesem Gutachten beschrieben, Ergebnisse sind für alle Einzelmaßnahmen verfügbar.

Letztlich ist eine politische Handlungsoption darin gegeben, die **Qualitätssicherung noch stärker in die Förderlandschaft einzubeziehen**. Dies betrifft nicht nur die konkrete Planung und Umsetzung (Gebäudedichtheitsmessung, Wärmebrückenoptimierung, hydraulischer Abgleich usw.), sondern auch die vorbereitenden Maßnahmen, z. B. der Einbau von Zählern (vgl. auch das entsprechende Förderprogramm von Bremer Energiekonsens und proKlima [70]).

Das Monitoring kann selbstverständlich auch als Daueraufgabe angesehen werden und in bundesweite Strukturen überführt werden. Die Gutachter regen eine **politische Diskussion** an, **ob und wie eine solche übergeordnete Monitoringinstanz gewünscht ist und welcher Institution diese Aufgabe übertragen werden könnte.** Die Ergebnisse wären allemal die optimale Voraussetzung für die in Punkt (3) der Zusammenfassung angesprochene „erweiterte Datengrundlage".

Monitoringergebnisse spiegeln auch das Nutzerverhalten wieder. Das Monitoring enthält daher optimalerweise eine qualifizierte Nutzeraufklärung und -schulung. Da davon ausgegangen werden kann, dass den Nutzern teilweise ein tieferes Systemverständnis fehlt, wie „Gebäude und Anlagentechnik im Zusammenspiel" funktionieren, welche Handlungen welche Folgen haben und wie sie das System optimal bzw. weniger ineffizient nutzen. Im Vergleich zum PKW – mit einer Darstellung des aktuellen Verbrauchs – kann auch digitale Ausstattung (SmartMeter, Apps usw.) genutzt werden, um das Verhalten zeitnah zurückzuspiegeln und gegebenenfalls selbständig Hinweise zu Verbesserungen liefern.

Die Gutachter sehen die in diesem Gutachten mehrfach angesprochene „Energieanalyse aus dem Verbrauch (EAV)" als geeignetes Werkzeugt für das Monitoring an. Das Verfahren bietet auf Basis einer überschaubaren Ausstattung mit Messtechnik und mit geringem personellen Aufwand eine Reihe von Erkenntnissen und Ansatzpunkte zur Qualitätssicherung. Die Verwendung der EAV mit Abschluss der energetischen Sanierung und/oder Inbetriebnahme als laufende Qualitätskontrolle kann allen Beteiligten helfen, unerkannte Fehler schnell zu entdecken und die Anlagentechnik und das Nutzerverhalten zu optimieren. Die Handlungsoption wird bekräftigt durch die Überlegungen der Stiftung Energieeffizienz 2018 [10].

(14) Blick der Gutachter in die Zukunft: Zusammenfassung der Makroperspektive in Form zweier Szenarien – ein anspruchsvolles Hauptszenario und eine zielführende Beschleunigung

Die aus der Betrachtung der Einzelgebäude gewonnenen Erkenntnisse werden auf den Gesamtbestand übertragen. Dies erfordert Annahmen, in welcher Geschwindigkeit und mit welcher Tiefe sich die baulichen Sanierungsmaßnahmen sowie die Anlagentechniken künftig im Markt ausbreiten. Für die Makroperspektive wählen die Gutachter dabei den auch in anderen Veröffentlichungen üblichen Blick bis in das Jahr 2050. Neubau und Abriss werden in diesem Zukunftsblick mit berücksichtigt.

Die eigenen Überlegungen für das „Hauptszenario" gehen strikt davon aus, dass alle energetischen Verbesserungen getätigt werden, wenn der betroffene Bestandteil der Gebäudehülle oder der Anlagentechnik ohnehin den individuellen Sanierungszyklus erreicht hat. Es wird angenommen, dass aus Kostengründen keine Sanierungen vorgezogen werden und sich daher keine größeren Sanierungsraten ergeben, als es dem Sanierungszyklus entspricht. Dieser wird – getreu den üblichen Gepflogenheiten der Gebäudebesitzer und der Investoren – vergleichsweise lang gewählt. Die Maßnahmen selbst werden im Falle der Umsetzung nach Annahme der Gutachter dann „best practice" ausgeführt, um entsprechend keine wirtschaftlichen Chancen zu vertun. Die zeitliche Sanierungsrate ist somit zwar vergleichsweise gering, weil die gewählten Nutzungsdauern lang sind. Jedoch ist die gewählte Sanierungstiefe groß, weil überwiegend „best practice"-Maßnahmen umgesetzt werden. Insgesamt ergibt sich eine Sanierungsquote für die Gebäudehülle von 1,9 %/a.

Maßnahmen, die einen großen Eingriff in die Substanz bedeuten (bis hin zur zeitweisen Unbewohnbarkeit beim nachträglichen Einbau von Flächenheizungen), werden – ebenfalls getreu der üblichen Baupraxis – mit sehr geringen Umsetzungswahrscheinlichkeiten angenommen. Gegenteilige Maßnahmen (d. h. geringer Eingriff), zudem mit guter Wirtschaftlichkeitsprognose, werden dagegen mit sehr hohen Umsetzungswahrscheinlichkeiten angenommen (z. B. die **Nachrüstung von Photovoltaik**). Hinsichtlich der Wärmeerzeugung wird ein **Umbau auf Wärmepumpen anvisiert, der jedoch realistische Markthochlaufraten berücksichtigt.**

Es wird davon ausgegangen, dass die Ölkessel (Brennwert und Niedertemperatur) schnell aus dem Markt gedrängt werden, weil nicht mehr nachinvestiert wird (außer als Hybridsystem). Alle Hybridsysteme sind als „Wärmepumpensysteme“ geführt, da diese den ausschlaggebenden Deckungsanteil im Einzelgebäude aufweisen.

Bauteil	Standard	Anteil der Ausbreitung in EZFH, in [-]			Anteil der Ausbreitung in MFH, in [-]		
		2020	2035	2050	2020	2035	2050
Außenwand	best	0,00	0,22	0,51	0,00	0,23	0,55
	gut	0,39	0,54	0,40	0,40	0,56	0,40
	mittel + schlecht	0,62	0,24	0,09	0,60	0,21	0,05
oberer Gebäudeabschluss	best	0,00	0,25	0,51	0,00	0,25	0,53
	gut	0,59	0,66	0,46	0,58	0,65	0,44
	mittel + schlecht	0,41	0,09	0,03	0,42	0,09	0,03
unterer Gebäudeabschluss	best	0,00	0,14	0,26	0,00	0,16	0,32
	gut	0,31	0,45	0,49	0,29	0,45	0,48
	mittel + schlecht	0,70	0,41	0,25	0,70	0,39	0,20
Fenster	best	0,00	0,33	0,78	0,00	0,34	0,81
	gut	0,10	0,26	0,22	0,10	0,26	0,19
	mittel + schlecht	0,90	0,42	0,00	0,90	0,40	0,00
Haupterzeuger							
Stromdirektheizung		0,033	0,018	0,011	0,034	0,018	0,010
Heizölkessel		0,288	0,101	0,037	0,174	0,058	0,020
Erdgaskessel		0,516	0,363	0,161	0,562	0,391	0,162
Fernwärme		0,040	0,022	0,013	0,192	0,195	0,170
Wärmepumpe		0,061	0,388	0,645	0,018	0,299	0,590
Holzkessel		0,061	0,107	0,132	0,021	0,039	0,049
Zusatzerzeuger							
Photovoltaik		0,14	0,40	0,65	0,06	0,36	0,65
Solarthermie		0,20	0,19	0,13	0,09	0,06	0,02
Lüftung mit Wärmerückgewinnung		0,03	0,11	0,17	0,01	0,10	0,18

Tabelle 10 Prognose des Sanierungszustandes der Gebäudehülle und der Technologieausbreitung der Erzeuger [eigene Darstellung]

Die in Tabelle 10 von den Gutachtern **angenommene Marktdurchdringung mit „guten“ und „besten“ Standards für die Gebäudehülle ist nur erreichbar, wenn entsprechend „best practice“-Sanierungen deutlich zahlreicher stattfinden als heute. Die Erreichung der gewählten Standards wäre zu fordern (GEG usw.) und/oder zu fördern (BEG). Ähnliches gilt für den Umbau der Erzeugungsanlagen in Richtung Wärmepumpen und Photovoltaik, welche neben einer Forderung und Förderung auch Entscheidungen zu einer modifizierten Energieträgerbepreisung erfordern**, siehe Punkt (5) der Zusammenfassung.

Es ergeben sich zahlenmäßig die in Tabelle 9 zusammengestellten Größen, jeweils als Eckwerte für die Jahre 2020, 2035 und 2050.

Bilanzgröße		2020	2035	2050
Endenergie Wärme und Strom	[TWh/a]	749	442	267
Energiekosten Wärme und Strom	[Mrd. €/a]	79,0	54,2	44,8
Emissionen Wärme und Strom	[Mt/a]	198	88	16
Emissionsminderung durch gebäudenah erzeugten u. genutzten Strom	[%]	0,5	7	16

Tabelle 11 Ergebnisdarstellung wichtiger Bilanzgrößen für das „Hauptszenario“ [eigene Darstellung]

Etwa ein Drittel der insgesamt erzielbaren Emissionsminderung ergibt sich aus Maßnahmen am Gebäude, die anderen zwei Drittel aus dem Umbau der Energiewirtschaft. Die Gesamteinflüsse einer durchgeführten Qualitätssicherung für Baukörper, Peripherie und Erzeuger im Vergleich zum Zustand ohne Qualitätssicherung steigen an, je besser die Gebäude werden. Während die Endenergie heute um etwa 12 bis 13 % vermindert werden kann, steigt der Einfluss bei dem Standard des Jahres 2050 auf ca. 24 bis 35 %.

Die eigene Prognose liegt im Feld der Szenarien anderer Makrostudien. **Es ist jedoch einschränkend anzumerken: die Prognose der Gutachter setzt eine konsequente und planmäßige Umsetzung der Maßnahmen „ab sofort“ voraus. Insofern ist sie vergleichbar mit anderen Studien zur Energiewende.**

Der Vergleich von Prognosen aus ähnlichen Studien vor ca. 15 [71] bis 25 Jahren [72] mit der tatsächlichen Entwicklung zeigt, dass nur in einem engen Zeitfenster von fünf bis max. zehn Jahren Voraussagen einigermaßen genau in die Praxis umgesetzt werden können. Nicht eingeplante plötzliche Ereignisse führen teilweise zu „180°-Wenden“ in politischen und wirtschaftlichen Entscheidungen. Somit sind unerwartete „Disruptionen“ oder „Schwarze Schwäne“ – wie die Finanzkrise 2008/2009, Fukushima 2011, die Flüchtlingskrise 2015, die Klimakrise mit merklich hohen Sommertemperaturen 2018/19 und seit Anfang 2020 die Corona-Krise nicht planbar.

Für das „Hauptszenario“ erfolgt auch eine Kostenschätzung, allerdings nur für die bereits 2020 vorhandenen Wohngebäude (ohne Neubau). Insgesamt werden nach Berechnung der Gutachter in den betrachteten kommenden 30 Jahren 1.604 Mrd. € als Vollkosten investiert, die zu einer energetischen Verbesserung beitragen. Die energiebedingten Mehrkosten sind gut halb so hoch wie die Vollkosten.

Aus den Energiekosten des Bestandes, den energiebedingten Mehrkosten (die zu einer energetischen Verbesserung führen) und den zugehörigen Mehraufwendungen an Wartung (z. B. für die Photovoltaik) ergeben sich Gesamtkosten. Es zeigt sich, dass eine Kostenkonstanz zumindest in den nächsten 15 Jahren realisierbar ist. Erst in der Zeit nach 2035 steigen die Gesamtkosten leicht an.

Insgesamt lässt sich für das „Hauptszenario“ dieses Gutachtens eine Prognose für das Emissionsbudget treffen, siehe Abbildung 3. Es kann näherungsweise extrapoliert werden, dass der Endwert der Kurve sich bei 3000 Mt CO_2-Äquivalent einstellt und dieser Zeitpunkt im Jahrzehnt 2050 - 2060 liegt. Erst dann ist der Wohnbaugesamtbestand klimaneutral. Für die Temperaturerhöhung der Atmosphäre ist nicht der Zeitpunkt der Zielerreichung relevant, sondern die bis dahin emittierte Menge. Das für den Wohngebäudesektor verbleibende (anteilige) Restbudget zum Einhalten des 2°C Ziels liegt jedoch nur bei näherungsweise 1800 Mt für den Zeitraum nach 2020. Die **im „Hauptszenario“ berechneten 3000 Mt überschreiten den Zielwert somit deutlich**. Die getroffenen Entwicklungsmaßnahmen – so ambitioniert sie sind – reichen nicht, um das Emissionsbudget einzuhalten. Aufgrund dieser Erkenntnis haben die Gutachter darauf verzichtet, ein „business-as-usual“-Szenario zu erstellen, welches eine ungleich größere Zielverfehlung zeigen würde.

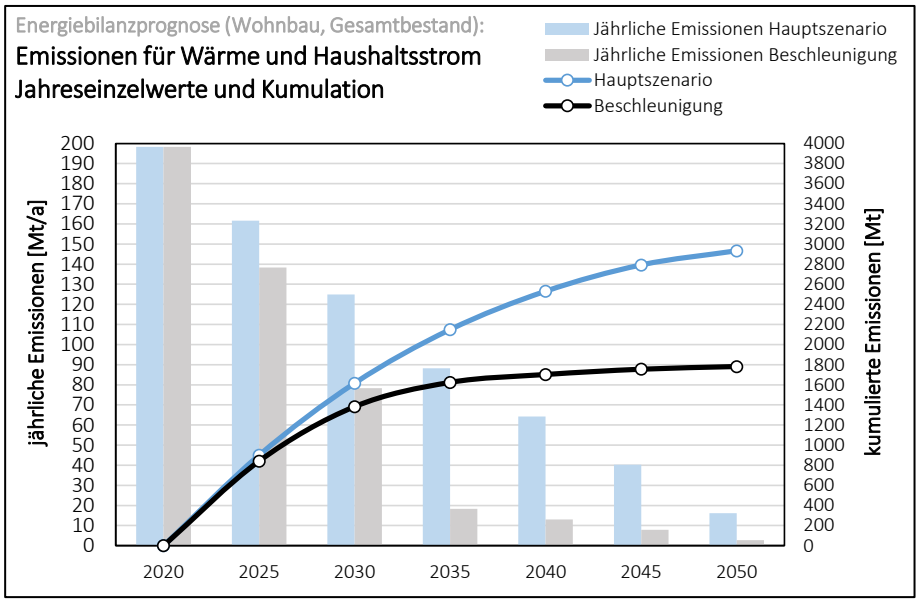


Abbildung 3 Emissionsbudget für den Gesamtwohnbau – Hauptszenario und beschleunigte Umsetzung [eigene Darstellung]

Aus diesem Grund wird in einer **Variante „Beschleunigung“** aufgezeigt, wie ein möglicher Pfad zur Budgeteinhaltung aussehen könnte. Die Variante beruht ebenfalls auf der Betrachtung des Wohnbaugesamtbestandes, einschließlich aller Neubauten und Abrissaktivitäten. Diese Überlegungen decken sich prinzipiell mit denen anderer aktueller Studien, z. B. der des Wuppertalinstitutes 2020 für Fridays for Future [73], der aktuellen Studie „Klimaneutrales Deutschland“ von AGORA und Stiftung Klimaneutralität [74] sowie der Studie „European Green Deal“ des DIW [42] von 2020.

Ab 2020 werden demnach alle Neubauten im **baulichen „best"-Standard** errichtet, was nahezu dem Passivhaus entspricht. Während bis 2035 im „Hauptszenario" etwa ⅔ aller Sanierungen den baulichen Zustand „best" erreichen, steigt dieser Anteil nun auf ca. 80 %. Auch die Ausstattung mit Hauptwärmeerzeugern setzt auf die **Vermeidung von fossilen Energieträgern**. Es sind ab 2020 keine Gas- und Ölkessel im „Eins-zu-Eins-Tausch" vorgesehen, weder im Neubau, noch in der Modernisierung. Sie werden nur noch als Teil von Hybridanlagen neu eingebaut. Jeder Neubau erhält eine **Photovoltaikanlage**. Darüber hinaus wird der Wohnbaubestand verstärkt ausgestattet. Während im Hauptszenario im Jahr 2035 etwa 38 % aller Wohnbauten eine PV-Anlage aufweisen, sind es in der Variante „Beschleunigung" bereits 48 %. Darüber hinaus werden **zwei Suffizienzmaßnahmen** berücksichtigt: ein gebremster Wohnflächenzuwachs und ein sparsameres Nutzerverhalten für den Trinkwarmwasser- und Stromverbrauch (bis 2050 Minderung 20 %).

Der Umbau der Energiewirtschaft erfolgt schneller, als für das „Hauptszenario" beschrieben. **Insbesondere für Strom und Erdgas ist eine schnelle Emissionsminderung relevant.** Der Emissionsfaktor für Erdgas halbiert sich im „Hauptszenario" zwischen 2020 und 2050. In der Variante „Beschleunigung" tritt eine Viertelung ein. Für den Strom ist die Umbaugeschwindigkeit noch prägnanter. Im „Hauptszenario" sinkt der Emissionsfaktor von 2020 bis 2050 von 444 auf 50 g/kWh, in der Variante „Beschleunigung" liegt der Endwert bei 1 g/kWh.

In der Summe der Maßnahmen kann auch mit der Variante „Beschleunigung" ab etwa 2060 von einer näherungsweisen Klimaneutralität ausgegangen werden, wobei bis dahin etwa 1800 Mt an Emissionen durch den Wohnbausektor ausgestoßen wurden. Somit kann nachgewiesen werden, dass das Emissionsbudget zum Erreichen des 2°C-Ziels einzuhalten ist.

Die investiven Anstrengungen an „allen Fronten" zu fordern und/oder fördern leitet sich als politische Handlungsoption ab.

1 Übersichtsdarstellung – Gutachten: Energetische Gebäudesanierung

1.1 Einleitung

Aus energie- und klimapolitischer Sicht kommt der Reduzierung des Energieverbrauchs im Gebäudebereich hohe Bedeutung zu. Insbesondere im Bestand von Wohn-, Büro- und Verwaltungsgebäuden werden hohe Einspareffekte gesehen.

Um hier Investitionsmittel und Fördergelder effizient einzusetzen, bedarf es robuster und realistischer Daten. Bewertet werden dabei das Energieeinspar- und CO_2-Minderungspotenzial unterschiedlicher Technologien und Maßnahmen. Auf dieser Basis können durch den Gesetzgeber konkrete und wirksame Politikmaßnahmen zur Festlegung gesetzlicher Mindestanforderungen an die Gebäude- und Technikqualität und zur Förderung der Energieeinsparung und Energieeffizienzsteigerung initiiert werden.

Fragestellung

Vor dem Hintergrund der hohen Bedeutung von Energieeinsparungen im Gebäudesektor sowie den Abweichungen zwischen errechneten und realisierten Einspareffekten der einzelnen Technologien werden die Einspareffekte und das Kosten-Nutzen-Verhältnis der für die Energiewende bedeutsamen Technologien (Schwerpunkt: Gebäudetechnik) und energetischen Sanierungsmaßnahmen (Schwerpunkt: Gebäudehülle) untersucht.

Mikroperspektive

Das Gutachten stellt Einspareffekte (Endenergie, Treibhausgasemissionen, Primärenergie) sowie Kosten-Nutzen-Verhältnisse verschiedener Verbesserungsmaßnahmen an Gebäuden dar. Es wird unterschieden zwischen rein anlagentechnischen Maßnahmen, rein baulichen Maßnahmen und Kombinationen aus beiden, einschließlich deren Wechselwirkungen. Besondere Schwerpunkte bilden Fragestellungen der Qualitätssicherung und des Monitorings mit einem möglichen Erfolgsnachweis von Maßnahmen durch unterjährige Verbrauchsmessungen von End- und Nutzenergien mittels des Werkzeugs „Energieanalyse aus dem Verbrauch“ (EAV.

Die Untersuchung verfolgt dabei für Einzel- und Paketmaßnahmen zunächst die Mikroperspektive, d. h. Lösungsoptionen auf Ebenen eines Gebäudes und der darin vorhandenen Technik. Das einzelne Gebäude – illustriert durch typische Beispielprojekte – steht daher im Mittelpunkt, z. B. durch Erstellung eines individuellen Sanierungsfahrplans (iSFP) mit Erfolgsnachweis durch eine EAV.

Folgende Heizungs- und Lüftungstechnologien werden bewertet:

- Kessel (Gas, Öl, Holz)
- Wärmepumpen (Erdreich, Außenluft)
- Wärmenetze (konventionell, kalt)
- Solarthermie und Photovoltaik
- Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung

Hinsichtlich der Gebäudehülle:

- Fassadendämmung
- Fenstertausch
- Dämmung an Dach oder oberster Geschossdecke
- Dämmung an der Bodenplatte oder Kellerdecke

In allen Gebäuden können additiv Qualitätssicherungsmaßnahmen betrieben werden:

- Heizungsoptimierung, incl. Temperaturanpassung, hydraulischer Abgleich, Pumpenersatz,
- Herstellung einer Luftdichtheit und Wärmebrückenminimierung.

Darüber hinaus sind alle Gebäude betroffen von Fragestellungen zur nachträglichen Dämmung von Rohrleitungen und Speichern, der Zentralisierung oder Dezentralisierung von Systemen, dem sinnvollen Einsatz von Systemen zur Home Automation bzw. Digitalisierung.

Weitgehend aus Praxis- und Feldmessungen ermittelte Kennwerte werden als Basis für real zu erwartende Energiebilanzen sowie Wirtschaftlichkeitsbewertungen der genannten Verbesserungsoptionen verwendet. Für die Mikroebene ergeben sich Erkenntnisse zu einzelnen Gebäuden bzw. Gebäudetypen (z. B. Einsparungen je Quadratmeter und Jahr).

Es werden die folgenden Fragen beantwortet bzw. jeweils Ergebniskorridore angegeben:

- Welche energetischen Einsparungen können in den nächsten 10 Jahren im Gebäudebestand durch moderne Technologien und zu erwartende Technologieentwicklungen bzw. Sanierungsmaßnahmen und diesbezügliche Entwicklungen erzielt werden?
- Welche Optionen der CO_2-Minderung ergeben sich und wie wirkt sich eine zusätzliche Bepreisung von CO_2 in der Mikroebene aus?
- Welche betriebswirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Relationen besitzen die anlagentechnischen Technologien und baulichen Sanierungsmaßnahmen?
- Welche Kosten je eingesparter Tonne CO_2 ergeben sich mit anlagentechnischen Maßnahmen, baulicher Sanierung und welche Schlüsse für eine sinnvolle Reihung lassen sich daraus als Handlungsoptionen für die Gesetzgebung und Förderpolitik ableiten?

Es erfolgt eine Parameteranalyse zu wichtigen Einflussgrößen auf die Ergebnisaussage, z. B., die zeitliche Reihung von Maßnahmen (erst Gebäude, dann Anlage oder anders herum).

Makroperspektive

Anschließend betrachtet die Makroperspektive, d. h. aggregierte und hochgerechnete Daten bzw. Abschätzungen, Optionslösungen für Deutschland. Basis der Betrachtungen ist der deutsche Wohnbaubestand – mit seiner inhomogenen Struktur (Gebäudetypen, baulicher Zustand, anlagentechnische Ausstattung, Nutzung) – welcher energetisch verbessert wird.

In der Makroebene lassen sich Gesamtemissionsminderungen, Gesamtkosten usw. abschätzen und hochrechnen. Entscheidendes Kriterium ist der Investitionsaufwand je jährlich eingesparter Tonne CO_2 für einen Betrachtungszeitraum von z. B. 30 Jahren (2020 bis 2050). Daraus lässt sich zur wirtschaftlichen Einordnung ein äquivalenter CO_2-Preis ableiten.

Auch ein zukünftiger Erfolgsnachweis durch Verbrauchsanalysen durchgeführter Maßnahmen in der Bestandssanierung und -modernisierung, ergänzt um Vorschläge zum Neubau, spielt dabei eine zentrale Rolle. Es werden die folgenden Fragen beantwortet bzw. jeweils Ergebniskorridore angegeben:

- Welche Einspareffekte ergeben sich für Deutschland aus den Anlagentechnologien und energetischen Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle für Wohngebäude und welche Kosten-Nutzen-Relationen ergeben sich?
- Wieso kommen verschiedene Studien zu teils unterschiedlichen Aussagen bei ähnlicher Fragestellung, welches sind die relevantesten Einflussgrößen auf der Makroebene?
- Welche End- und Primärenergie- sowie Treibhausgaseinsparungen wurden in den letzten 10 Jahren in Deutschland durch die untersuchten Technologien bzw. Sanierungsmaßnahmen erzielt?
- Welche der untersuchten Technologien und Sanierungsmaßnahmen lassen eine hohe Marktverbreitung bis 2030 in Deutschland erwarten und welche Gründe sind dafür maßgeblich?
- Welche volkswirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Relationen (hier: Kosten je eingesparter Energie bzw. Kosten der Emissionsminderung) besitzen die untersuchten Technologien und Sanierungsmaßnahmen? Welchen Einfluss hat die mittel- und langfristige Bepreisung durch CO_2-Emisssions- bzw. Kohlenstoffzertifikate?
- Wie können die Informationsgrundlagen für wirksame und effiziente Politikentscheidungen (z. B. Formulierung realistischer Zielsetzungen, Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen für energetische Sanierungen, Prioritätensetzung im Rahmen der Förderpolitik) verbessert werden?
- Welche Handlungsbedarfe bzw. -optionen lassen sich für (bundes-)politische Akteure ableiten, um Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen der energetischen Gebäudesanierung zu verbessern?

Hintergrundinformationen

Die vorhandenen Datenquellen, Statistiken und relevanten Studien werden vorab analysiert. Die in ihnen ermittelten Ergebnisse zu Energieeinsparungen und Treibhausgasemissionsreduktionen weichen zum Teil voneinander ab – entsprechend werden auch abweichende Schlussfolgerungen gezogen. Ein Grund dafür ist, dass auf unterschiedliche Daten zurückgegriffen wird bzw. verschiedene Annahmen in die jeweiligen Berechnungen einfließen, z. B. Ausgangsniveau, Umfang der Sanierungsmaßnahmen, unterschiedlicher Technologieeinsatz, Entwicklung zeitvariabler Einflüsse wie zukünftige Elektrifizierung durch erneuerbare Energien, Annahmen zu Investitionskosten usw.

Darüber hinaus ist – je nach Alter der Veröffentlichung – ein etwas anderer Datenstand zur Anzahl der Gebäude, deren Sanierungszustand, Belegungszahlen und Verbrauchsdaten zu verzeichnen.

Aufbau des Gutachtens und Abgrenzung zu anderen Studien

Im Gutachten erfolgen keine neuen Grunddatenermittlungen (Felduntersuchungen, Messungen usw.). Der Erkenntnisgewinn ergibt sich aus der Literaturrecherche, wesentlich ergänzt um die eigenen Projekterfahrungen und -ergebnisse der Gutachter.

Das Gutachten gliedert sich in eine Übersichtsdarstellung (Kapitel 1) sowie Anhängen mit Detaildarstellungen zu den einzelnen Aspekten und Themengebieten (Anhänge 2 bis 6).

In einem Einstiegskapitel zur den klima- und energiepolitischen Rahmenbedingungen (Kurzfassung Kapitel 1.2, Detaildarstellung Anhang 2) sind energie- und klimapolitische Kernthesen und Leitideen formuliert. Diese umreißen, welche Optionen zum Umgang mit dem Gebäudebestand bestehen, wie sich die Klimapolitik der letzten Jahre darstellt.

Als elementar eingeschätzte Fakten und Aussagen sind dabei gesondert farbig gekennzeichnet.

Die Mikroperspektive befasst sich anschließend anhand zweier Typgebäude mit dem einzelnen Objekt (Kurzfassung Kapitel 1.4, Detaildarstellung Anhang 3). Die Untersuchungen folgen der üblichen Logik von Energiebilanzierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung.

Auf Simulationen der Einzelgebäude wird verzichtet. Die Typgebäude werden anhand von Energiekennwerten bilanziert, basierend hinsichtlich der Methodik auf den Veröffentlichungen des IWU ([75], [76]), für die Wirtschaftlichkeitsbewertung wird der Ansatz des LEG genutzt ([77]). Die Randdaten der Berechnung und das Rechenmodell sind jeweils genannt (Detaildarstellung in Anhang 6).

Wichtige Erkenntnisse zu den Ein- und Zweifamilienhäusern sind in Textboxen separat dargestellt …

… analog gilt dies für die Mehrfamilienhäuser.

Die bilanzierten Energiemengen (Bedarfsbilanz) sind am Verbrauch orientiert, um weder zu optimistische, noch zu pessimistische Einschätzungen zu generieren. Auswirkungen der Qualitätssicherung sind berücksichtigt. Die CO_2-Äquivalente werden parallel zu den Energiemengen dargestellt. Allerdings liegt der Schwerpunkt in der Mikroperspektive bei den Gesamtkosten. Die ohnehin notwendige Instandhaltung – insbesondere der Gebäudehülle – wird berücksichtigt. Es erfolgt jedoch keine Lebenszyklusanalyse (im Sinne aller Vorketten und bis hin zum Rückbau), d. h. die Betrachtung berücksichtigt nur die Energiemengen des Betriebs. Fördermittel werden nicht einbezogen; die Ergebnisse der Untersuchung liefern im Gegenzug die Erkenntnis, wie hoch Fördermittel sein könnten, um eine Grenzwirtschaftlichkeit zu erreichen.

Die Mikroperspektive beleuchtet exemplarisch auch die Thematik der unterschiedlichen Akteure: Mieter/Vermieter sowie ggf. Energiedienstleister. Sofern erforderlich, werden Ergebnisse auch aus dem Blickwinkel einer Eigentümergemeinschaft interpretiert.

Die Makroperspektive befasst sich mit dem Ausblick auf alle Gebäude, die in Deutschland vorhanden sind (Kurzfassung Kapitel 1.5, Detaildarstellung Anhang 4). Dabei wird auch ein Fokus auf vorhandene Studien und Gutachten gelegt. Sie werden unter dem Aspekt betrachtet, wieso die unterschiedliche Sicht der jeweiligen Verfasser und Akteure zu sehr differenzierten Zukunftsperspektiven führt.

Eine sehr kleinteilige Simulation der Gebäude, noch dazu im Zeitverlauf („was passiert mit jedem Gebäude über jede Stunde wann im Zeitstrahl bis 2050") würde den Rahmen des Gutachtens übersteigen. Es werden Vereinfachungen getroffen und die sich daraus ergebenden Konsequenzen bei der Ergebnisauswertung qualitativ erläutert. Außerdem wird an entsprechender Stelle auf andere Studien und Akteure verwiesen, die eine größere Detaillierung bestimmter Aspekte erreichen. Deren Vorgehensweisen werden kommentiert und eingeschätzt.

Das Gutachten bezieht sich auf „Gebäude", insbesondere die „Wohngebäude". Den Verfassern des vorliegenden Gutachtens ist bewusst, dass die Gebäudeentwicklung an die Entwicklung der Energiewirtschaft und die anderen Verbrauchssektoren sehr eng gekoppelt ist. Die relevanten Annahmen zu den gegebenen oder notwendigen Entwicklungen außerhalb des „Gebäudesektors" werden entsprechend benannt.

Der Anhang 5 als Detaildarstellung bzw. das Kapitel 1.2 in Kurzfassung liefern die notwendigen Hintergrundinformationen der Bearbeitung, u. a. Randdaten aus der Statistik (des heutigen Verbrauchs von Gebäuden, der Kosten für Bauprodukte, Preise der Energieträger, Typologien usw.). Sofern notwendig:

> *„[…] werden treffend formulierte Zusammenfassungen und Zusammenhänge anderer Autoren dabei als direkte Zitate in den Text eingebaut."*

Wo immer erforderlich, werden eigene Praxisprojekte referenziert. Vor allem als Quellen zur Quantifizierung von Sachverhalten. Als Kernstück der textlichen Beschreibung soll an dieser einleitenden Stelle zentral auf die Veröffentlichung der Gutachter „Energie 2020 – Energiekonzepte" verwiesen werden [78]. Sie erläutert viele Sachverhalte, Thesen und Vorüberlegungen zu dem hier vorliegenden Gutachten vertiefter und noch weitreichender.

Das Kapitel 1.5 liefert abschließend eine Zusammenfassung der Handlungsoptionen.

1.2 Klima- und energiepolitische Rahmenbedingungen

Seit etwa 10 Jahren ist der CO_2-Ausstoß im Gebäudebereich fast konstant geblieben, ähnlich wie im Verkehrsbereich, während in der Energiewirtschaft der Anteil erneuerbarer Stromerzeugung stark gestiegen und die Emissionen aus der Stromerzeugung bereits vor dem geplanten Ausstieg aus Kernenergie (2022) und Kohle (2038) gesunken sind.

Ursachen sind vielfältige und untereinander in Wechselwirkung stehende Rahmenbedingungen der Klima-, Wirtschafts-, Energie- und Sozialpolitik. Diese werden einleitend von den Gutachtern analysiert und Leitideen für das Gutachten daraus abgeleitet.

1.2.1 Energieträgermix – Kontroverse der Wissenschaft

Ziele der Wärmewende zur Klimaneutralität

Im vorliegenden Gutachten wird davon ausgegangen, dass das Einhalten des CO_2-Emissionsbudgets für Deutschland in der nahen Zukunft die ausschlaggebende Rolle spielt, um der globalen Klimaerwärmung entgegenzuwirken und für Deutschland Klimaneutralität zu erreichen.

Daher wird im Gutachten ein besonderer Fokus auf die CO_2-Minderungswirkungen der Gebäudesanierung gelegt; die Energiesparwirkungen werden ebenfalls betrachtet.

In vielen Studie der letzten zehn Jahre werden auf Basis von Simulationsberechnungen sowie Annahmen zu heutigen und zukünftigen Szenarien sowie den dazu notwendigen Investitionen unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der effektiven und volkswirtschaftlich günstigen Wege zum Erreichen von 80 % bzw. 95 % CO_2-Minderung veröffentlicht (ein Auszug der verfügbaren Literatur wird vergleichend in Anhang 4.1 analysiert).

Technologiemix oder Elektropfad

Heute gilt: jede vermiedene Kilowattstunde muss nicht fossil bereitgestellt werden; künftig gilt: jede vermiedene Kilowattstunde muss nicht regenerativ bereitgestellt und ggf. zwischengespeichert werden [79].

Im vorliegenden Gutachten wird davon ausgegangen, dass der „Elektropfad“ [68] wahrscheinlich gegenüber dem „Technologiemix-Pfad“ [3] zukünftig beschleunigt umgesetzt wird, da gebäudezentrale Lösungen mit Wärmepumpen und/oder elektrischer Direktheizung wesentliche thermische Vorverluste (von Nah- und Fernwärmenetzen und von Speichern) vermeiden.

Eine quantitativ belegte Begründung dieser Annahme erfolgt als Ergebnis eigener Berechnungen im Teil Makroperspektive dieses Gutachtens.

Weiterhin wird die Bedeutung von Wasserstoff und zukünftig erneuerbaren PtX – primär Wasserstoff H_2 und daraus Methan - in zukünftigen Heizungskesseln und in der Kraft-Wärme-Kopplung zum Erreichen von Klimaneutralität in der Literatur kontrovers diskutiert und unterschiedlich bewertet. Die Gutachter teilen folgende Einschätzung: die Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit einer weiteren Verbrennung in konventionellen Wärmeerzeugern und von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Heizkraftwerken und in Blockheizkraftwerken sinken umso mehr, je energieeffizienter die Gebäude sind. Diese Technologien würden einen mittel- und langfristig um 3 bis 5-fach so hohen Ausbau von PV- und Windkraft-Kapazitäten erfordern (vgl. PER-Bewertung nach Passivhaus-Institut [80]).

Eine Abkehr von KWK ist zu Zeit nicht absehbar. Gegenwärtig gilt die sehr „wärmefreundliche“ KWK-Bewertung (Stichwort „Stromgutschriftmethode“, ausführlicher in Anhang 5.5.2) in den Berechnungsvorschriften des seit 1.11.2020 geltenden Gebäudeenergiegesetzes GEG. In vielen Studien, initiiert durch verschiedene Interessensverbände, wird eine weitere Ausbauförderung von KWK gefordert – ungeachtet der zusätzlichen Netz- und Speicherverluste. Sie nehmen jedoch zu – sowohl absolut, als auch relativ, je geringer der tatsächliche Wärmebedarf der Gebäude zukünftig sein wird.

Nah- und Fernwärme, Kraft-Wärme-Kopplung, BHKW-Technologie und einfache Brennwerttechnik verlieren ihre Bedeutung, je schneller der Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung mit Windkraft und Photovoltaik gelingt [79]. „Kalte Fernwärme“ mit unterschiedlichen Wärmequellen könnte zukünftig als Wärmequelle für Gebäude dienen. Auch dezentrale Lösungen ergeben wirtschaftliche Gesamtkonzepte.

Umbaukosten des Gesamtsystems

Während das vorliegende Gutachten den Schwerpunkt nur auf einen Teil des Sektors „Gebäude“ legt, nämlich die bestehenden Wohnbauten, ist zur Beurteilung von Wirtschaftlichkeiten das Gesamtsystem zugrunde zu legen.

Aktuelle Untersuchungen des Fraunhofer ISE [68] zeigen, dass Investitionen für den beschleunigten Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung zur Klimaneutralität bis zum Jahr 2035 wesentlich von der gesellschaftlichen Bereitschaft abhängig ist, auch einen Suffizienz-Pfad mit Einschränkungen gegenüber heutigen Wohlstandsforderungen zu beschreiten. Investitionen in den Ausbau erneuerbarer Technologien von 500 Mrd. € stünden Investitionen von 3500 Mrd. € für ein Szenario Business-As-Usual bis 2050 gegenüber.

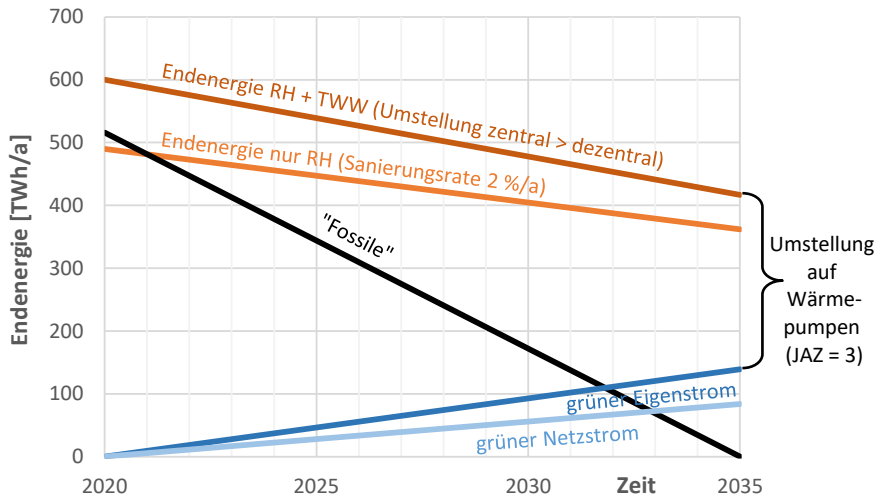
Die wissenschaftlichen Sachverständigenräte und weitere Berater der Bundesregierung ([41], [14], [81], [69], [82], [39]) empfehlen, für einen Aufschwung in und nach der Corona-Krise Konjunkturprogramme an den Anforderungen eines zukünftig zwingend verbesserten Klimaschutzes zu orientieren, um Klimaneutralität zu erreichen. Übertragen auf die Förderung der Baukonjunktur ergibt sich aus Sicht der Gutachter ein Fokus auf die Förderung hocheffizienter Maßnahmen am Gebäude und der zukünftigen Anlagentechnik (Ersatz fossiler Wärmeerzeuger, bevorzugt durch Wärmepumpen).

Ein Beispiel für die Erweiterung von Bandbreiten ergibt sich aus zwei aktuellen Studien des Fraunhofer ISE [68] [83] und einem Diskussionsvorschlag der Reiner Lemoine Stiftung [82]: „New Deal für das Erneuerbare Energiesystem“.

Die Studien der Reiner Lemoine Stiftung und des Fraunhofer ISE gehen von einem umfassenden Schritt zu vollständiger Klimaneutralität bereits bis zum Jahr 2035 aus, um das 1,5°C-Ziel des Klimaschutzes noch einzuhalten.

Der Endenergiebedarf sinkt dabei von heute (2019) 2500 TWh/a auf 1650 TWh/a im Jahr 2035. Dabei wird von einem hohen Anteil importierter erneuerbarer Gase ausgegangen.

Das Fraunhofer ISE geht je nach Szenario von einem Gesamtstromverbrauch für das Klimaneutralitätsziel 2050 zwischen 1039 und 1495 TWh_{el}/a aus, wobei weitere importierte erneuerbare Gase hinzukommen. Abbildung 4 überträgt den Ansatz der Lemoine Stiftung auf die Wärmewende für Gebäude in Richtung auf das Ziel der Klimaneutralität bis 2035 [79].



So könnte die Wärmewende zu Klimaneutralität in Anlehnung an eine Studie der Lemoine-Stiftung in Wohngebäuden bis 2035 aussehen:

- Endenergieverbrauch 2020 für Raumheizung (RH: 490 TWh/a) und Trinkwarmwasser (TWW: 110 TWh/a) incl. Aufwand für Erzeugung, Speicherung und Verteilung – davon 86 % überwiegend fossile Energien – vereinfacht lineare Degression bis 2035 auf 417 TWh/a (RH + TWW) bzw. 362 (nur RH) durch Modernisierung und Sanierung: Instandhaltungsmodernisierung.
- Sanierungs- / Modernisierungsrate bezogen auf RH: 2 %/a – Halbierung des TWW-Verbrauchs von 110 TWh/a auf 55 TWh/a durch stetige Umstellung von zentraler auf dezentrale (elektrische) TWW-Bereitung bis 2035
- Stetige Umstellung von fossilen Energieträgern auf Elektrowärmepumpen (WP) mit mittleren Arbeitszahlen von 3 inkl. elektrischer Trinkwassererwärmung.
- Deckung des gesamten (früher fossilen) Endenergieverbrauchs in 2035 für RH (362 TWh/a) und TWW (55 TWh/a) durch WP und elektrische TWW-Erwärmung, betrieben mit Grünstrom (139 TWh/a); vereinfacht hier dargestellt durch stetigen PV-Ausbau mit einer Zuwachsrate von 9 GW/a bis 2035; davon 40 % grüner Eigenstrom.

Abbildung 4 Kurzfristige Umstellung auf Grünen Strom, Grafik aus [79] in Anlehnung an [82]

Alle Vorschläge für einen beschleunigten „Deal" zum kurzfristigen Erreichen der Klimaneutralität bis 2030 bzw. bis 2035 setzen einen drastischen Ausbau der PV- und Windkraftkapazitäten und einen sofort einzuleitenden Ausstieg aus allen fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdöl, Erdgas) voraus.

Nach Fraunhofer ISE lägen die Mehrinvestitionen je nach Szenario zwischen ca. 500 Mrd. € bis zu ca. 3400 Mrd. € (frühere Klimaneutralität bis 2035).

Nachfolgende Abbildung 5 zeigt die Mehrinvestitionen für die verschiedenen Szenarien. Darin sind die Mehraufwendungen positiv dargestellt. Negative Werte beschreiben Minderaufwendungen, insbesondere durch die in allen Klimaschutzszenarien niedrigeren Kosten für den Import fossiler Energieträger. Die Differenz aus Mehr- und Minderaufwendungen, dargestellt durch eine Raute, beschreibt die Netto-Mehraufwendungen für die untersuchten Szenarien gemäß heutigen Preisen.

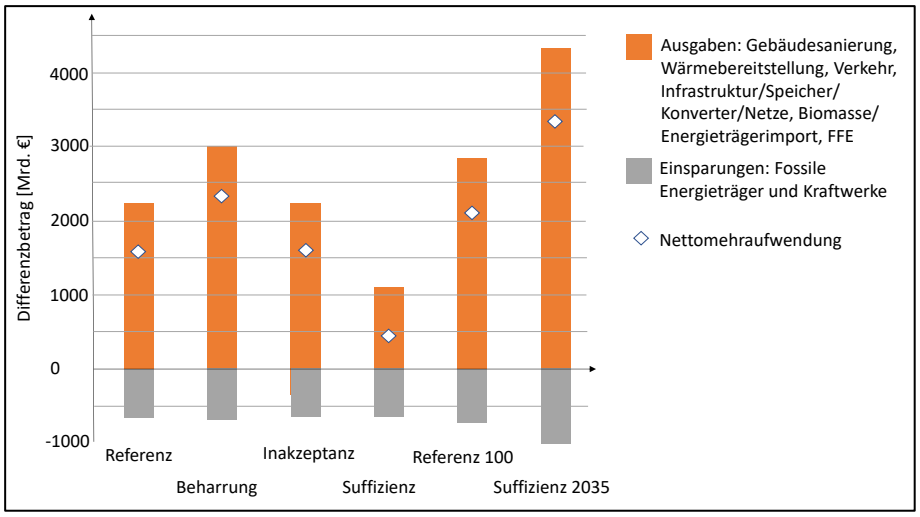


Abbildung 5 Differenzbeträge der Szenarien im Vergleich zum Business-As-Usual-Szenario, zusammengefasste Werte nach [68]

Mitfinanzierung des Umbaus der Energiesysteme durch die Endverbraucher

Ein Teil des gewaltigen Finanzierungsbedarfs liefern die Endverbraucher durch ihre künftigen Energieverbrauchszahlungen.

An dieser Stelle hilft eine einfache Berechnung, sich den zukünftigen Ersatz fossilen Brennstoffeinkaufs durch Investitionen in zukünftige erneuerbare Technologien (PV, Windkraft, Speicher, Elektrolyse, Brennstoffzellen) vorzustellen:

Der deutsche Durchschnittsbürger wird heute mit Kosten für Wärme und Strom für die private Nutzung von etwa 1000 €/a belastet. Dies sind zusammen etwas mehr als 80 Mrd. €/a mit einer Schwankungsbreite zwischen 70 und 100 Mrd. €/a, je nach aktuellen Energiepreisen. Langfristig werden die fossilen Primärenergieträger durch erneuerbaren Strom und erneuerbare Brennstoffe (Gase und synthetische Flüssigkeiten) ersetzt, deren Kosten sich allein aus notwendigen Investitionen in die Umwandlungstechnik ergeben (denn die Grundprodukte Strom aus PV und Windkraft sind – anders als heute – kostenlos). Wäre ein sofortiger Ausstieg aus fossilen Energieträgern – wenigstens theoretisch – möglich, könnten die dann eingesparten 80 Mrd. €/a in den Kapitaldienst für die Investitionen des Ausbaus von PV und Windkraft fließen. So könnten, je nach Betrachtungszeitraum die hohen in Abbildung 5 dargestellten Mehraufwendungen aus den vermiedenen Strom- und Wärmekosten z.T. oder vollständig finanziert werden.

Konsequenzen für die Wärmewende

Die Wärmewende hängt unmittelbar vom Ausbau der PV und Windkraft ab. Mit dem Primärenergieträger „regenerativer Strom“ als einzigem Ausgangsenergieträger bieten sich verschiedene Optionen der Gebäudeversorgung an.

Neben einer Direktnutzung des Stroms in den Gebäuden mit Wärmepumpen oder elektrisch beheizten Speichern werden folgende Optionen derzeit intensiv diskutiert bzw. untersucht: der Einsatz von Wärmepumpen für Fernwärmenetze, die Herstellung erneuerbarer „Brennstoffe“ (H_2, PtH, PtX, PtG, PtL) aus PV- und Windstrom, welcher dezentral in Brennwertkesseln eingesetzt wird oder in zentraler KWK über Nah- und Fernwärmesysteme. Auch der Transport von Abwärme und Umgebungs-(Erdreich-)Wärme in kalten Nah- und Fernwärmenetzen zu gebäudeweisen Wärmepumpen wurde bereits realisiert und ist daher denkbar.

Sowohl die gemeinsame Veröffentlichung von Leopoldina, acatech und der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften [84], als auch das Fraunhofer IEE [85] kommen im Mai 2020 zu ähnlichen Ergebnissen. Die Fachzeitschrift TGA-Fachplaner fasst zusammen [86]:

„Die Umstellung der Wärmeversorgung auf Wärmepumpen ist eine offenkundige technologische Notwendigkeit. Das ist keine Aussage der Wärmepumpenindustrie, sondern eine Empfehlung renommierter Wissenschaftler für die Ausgestaltung des European Green Deal.
[…]
Auf Basis der weiteren Ergebnisse hatte die Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz allerdings Maßnahmen zur Qualitätssicherung und für eine größere Marktverbreitung sowie einen umfassenden Umbau des Energieabgaben- und Steuersystems gefordert. Letzteres entwickelt sich mit der CO_2-Bepreisung von Heizöl und Erdgas ab 2021 und einer Senkung/Begrenzung der EEG-Umlage über den Bundeshaushalt in diese Richtung.
[…]
Hierfür empfehlen die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften in ihrer Ad-hoc-Stellungnahme „Energiewende 2030: Europas Weg zur Klimaneutralität" als Handreichung für den deutschen EU-Ratsvorsitz ab 1. Juli 2020 unter anderem mehr Wärmepumpen als „No-regret"-Maßnahme: Mehr Wärmepumpen ist also eine „offenkundig technologische Notwendigkeit", die man nicht bedauern wird.
[…]
Die Argumentation: Großskalig einsetzbare und ausbaubare Alternativen zu fossilen Energieträgern mit einem genügend hohen technologischen Reifegrad sind nur Photovoltaik und Windenergie. Der Ausbau dieser Energietechnologien sollte deshalb mit Nachdruck vorangetrieben werden – die bereitgestellte Energie werde in Zukunft in jedem Fall benötigt, es handelt sich damit um No-regret-Investitionen. Da der erneuerbare Strom immer mehr zur Hauptquelle der Energieversorgung in den meisten Sektoren wird, seien auch der weitere Ausbau elektrischer Anwendungen, vor allem Wärmepumpen für die Wärmeversorgung sowie die Elektromobilität inklusive der hierfür erforderlichen Infrastruktur, No-regret-Maßnahmen. So einfach ist das."

Die Studie des Fraunhofer IEE [85] kommt hinsichtlich des Einsatzes von Wasserstoff für die Gebäudewärme zu der Schlussfolgerung:

„[…] zeigt sich, dass für eine Versorgung der dezentralen Gebäudewärme der Einsatz von Wasserstoff nicht notwendig ist. Selbst in einem dicht besiedelten Land wie Deutschland besteht ein ausreichendes Potenzial von Windkraft und PV, um die hohen Nachfragepotenziale einer direkten Stromnutzung in den Bereichen Elektromobilität, Industrieprozesswärme und Gebäudewärme zu versorgen. Für die Wärmepumpentechnologie bestehen mittlerweile umfassende Lösungen, um den für einen schnellen Markthochlauf teilweise notwendigen Einsatz in unsanierten Bestandgebäuden in unsanierten Bestandsgebäuden generell und auch für Luft-WP effizient zu ermöglichen […]"

Abschließend ist festzuhalten: der Gebäudesektor ist – wie alle anderen Sektoren – auch künftig mit Energie zu versorgen. Unter der Prämisse des Ausstiegs aus den fossilen Energieträgern sind die künftigen Lieferanten von Energie Sonne und Wind; zwei bekanntermaßen volatile Quellen. Da Angebot und Nachfrage von Energie gegenläufigen Jahreszyklen unterworfen sind, hängt die Frage der Höhe der Investitionskosten (Umwandlung, Speicherung) an den Lastspitzen der Sektoren. Anders als im Verkehr und der Industrie verläuft die Bedarfsnachfrage des Gebäudesektors maximal antizyklisch zum gegebenen Angebot. So ist es der Gebäudesektor, der – eine Glättung der ausgeprägten Winternachfrage vorausgesetzt – die Erzeuger- und Speicherkapazitäten drastisch zu senken vermag.

1.2.2 CO_2-Budget

Der Anteil der Gebäudewärme an den Gesamtemissionen liegt nach aktuellen Angaben des UBA [14] mit 122 Mio. Tonnen $CO_{2äqu}$ /a bei 15,1 % und das der Haushalte im Gebäudebereich mit 88 Mio. Tonnen $CO_{2äqu}$ /a bei 10,9 %. Hierin sind Emissionen für fernwärmeversorgte oder mit Stromheizungen versorgte Gebäude nicht enthalten, da sie nach der Sektorenaufteilung im Klimaschutzgesetz dem Bereich „Energiewirtschaft" zugeordnet werden. Nach eigenen Abschätzungen (detailliert siehe Anhang 3.9.5 und 5.5) liegt dieser zusätzliche Emissionsanteil für fernwärmeversorgte oder mit Stromheizungen versorgte Gebäude bei etwa 29 bis 46 Mio. Tonnen CO_2, je nach Allokation der Emissionen bei Kraft-Wärme-Kopplung.

Durchschnittlich produzierte jeder Bürger In Deutschland im letzten Jahrzehnt jährlich 11,6 Tonnen CO_2 (Treibhausgasmengen aus [14]) – davon durchschnittlich 1,75 Tonnen durch das Heizen in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Diese Werte haben sich trotz vieler Initiativen in den Bereichen Gebäudeenergieeffizienz und Ausbau erneuerbarer Energien seit mehr als 10 Jahren kaum geändert. Best practice-Beispiele zeigen, dass die Bandbreite der dem Wärmesektor für Raumheizung und Trinkwarmwasser zugeordneten Treibhausgasemissionen zwischen fast null (Plus-Energiehäuser nach KfW-40+) bis zu 3,5 Tonnen CO_2 pro Kopf und Jahr (alte Bestandsgebäude aus den 1950er und 1960er-Jahren ohne besondere Wärmeschutzmaßnahmen) reicht.

Es helfen die Aussagen einer Studie, die für das Bundesumweltministerium Ende 2018 in Vorbereitung der Diskussionen für die Kohlekommission angefertigt wurde. Hier die wesentlichen Aussagen [39]: es besteht ein klarer Zusammenhang zwischen CO_2-Anteil in der Atmosphäre und dem Anstieg der mittleren globalen Lufttemperatur, siehe Abbildung 6.

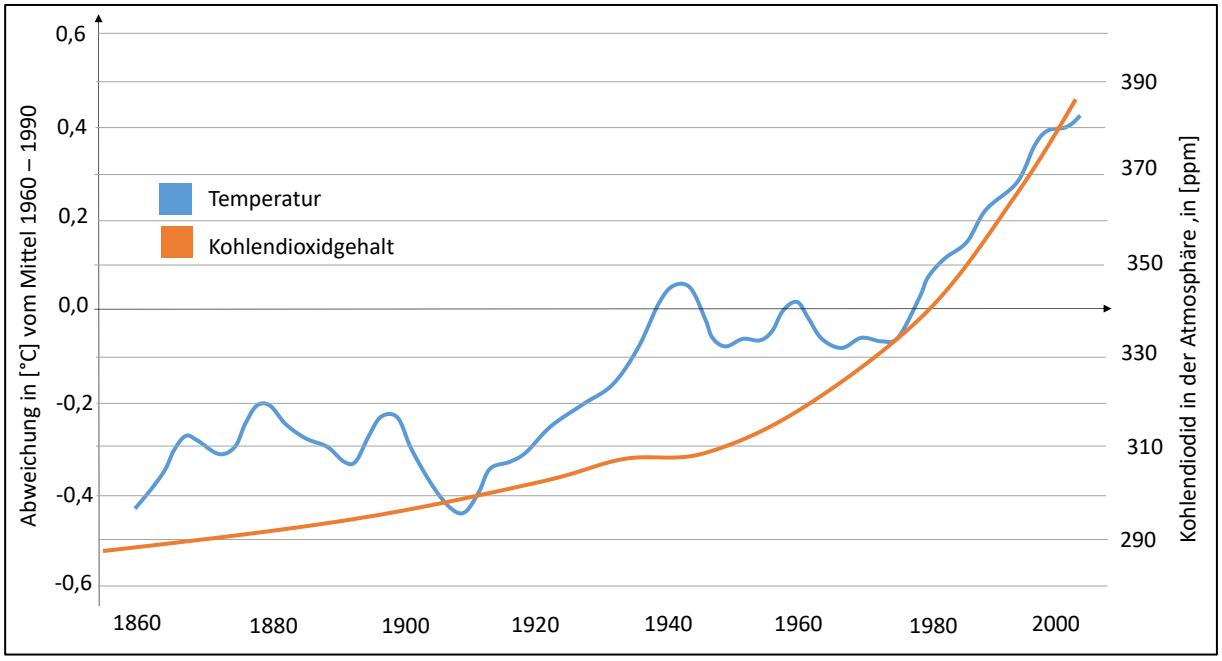


Abbildung 6 Globale Jahresmittelwerte der bodennahen Lufttemperatur 1860 bis 2005, Kurvenverläufe aus [39]

Zur Erläuterung der daraus ableitbaren Erkenntnisse werden einige Passagen der Studie zitiert [39]:

> *„Klimaschutzziele werden häufig als Minderungsziel zu einem bestimmten Zeitpunkt formuliert. So hat sich zum Beispiel Deutschland zum Ziel gesetzt, den THG-Ausstoß bis zum Jahr 2030 gegenüber 1990 um mindestens 55 % zu reduzieren. Aus politischer Sicht handelt es sich um eine nachvollziehbare Art der Zielformulierung, weil „x % Reduktion bis 20xx" sowohl einfach zu kommunizieren als auch gut zu überprüfen ist.*
>
> *Aus klimaphysikalischer Sicht ist ein solches Ziel aber nicht ausreichend. Denn für das Ausmaß der Erderwärmung sind nicht die Emissionen zu einem bestimmten Zeitpunkt entscheidend, sondern die gesamten Emissionen über einen Zeitraum. Daher sprechen viele Klimaexperten von einem maximal zur Verfügung stehenden Emissionsbudget. Zur Einhaltung der Klimaziele von Paris müssen die globalen Treibhausgasemissionen in der zweiten Jahrhunderthälfte auf null sinken. Für das Ausmaß der Erderwärmung sind nicht die Emissionen zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern die kumulierten Emissionen über einen Zeitraum entscheidend.*
>
> *Gemäß IPCC dürfen zwischen den Jahren 1870 und 2100 global maximal ca. 2.900 Gt CO_2 emittiert werden, um die Erderwärmung unter 2°C zu halten. Bis 2011 sind bereits mehr als 1.900 Gt CO_2 ausgestoßen worden (IPCC 2014) und zwischen 2012 und 2017 weitere 215 Gt (eigene Rechnung basierend auf Global Carbon Project 2017; World Bank 2018).*
>
> *Um das 2°C Ziel noch einzuhalten, müssen daher die kumulierten Emissionen zwischen den Jahren 2018 und 2100 auf unter 785 Gt CO_2 bleiben. Werden 1,5°C angestrebt, beträgt das Emissionsbudget lediglich 180 Gt CO_2 […] Vor dem Hintergrund, dass aktuell die CO_2-Emissionen weltweit ca. 35 Gt pro Jahr betragen, wird deutlich, dass eine unmittelbare Reduktion der Emissionen nötig ist."*

Übertragen auf die Situation in Deutschland heißt das: mit ca. 1 % der Weltbevölkerung (gerundet) ist für Deutschland zwischen 2019 und 2100 das Emissionsbudget auf 7850 Mt CO_2 begrenzt, um das 2°C-Ziel einzuhalten. Es ist auf 1800 Mt CO_2 begrenzt, um das 1,5°C-Ziel zu erreichen.

Bei durchschnittlichen 800 bis 900 Mt_{CO2}/a bleiben also gerade zwei Jahre und das 1,5°C-Ziel wäre bereits überschritten! Schlussfolgerung: es scheint sinnvoll, die Maßnahmen zuerst zu ergreifen, die mit dem geringsten Aufwand maximale CO_2-Minderungen erreichen:

- für die Energiewirtschaft: schnellstmöglicher Ausstieg aus Kohle- und in einem überschaubaren Zeitraum auch aus fossilen Gaskraftwerken (wovon auch der Ausbau von Nord-Stream II betroffen wäre); beschleunigter Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung, also drastisch beschleunigter Ausbau von PV und Windkraft; Erdgas als Kohle- und Öl-Ersatz in allen Bereichen reduziert zwar die Emissionen, dies reicht aber nicht mehr zur Einhaltung des noch verfügbaren Emissionsbudgets
- für den Sektor Gebäude: Erhöhung der Modernisierungsrate und oder -tiefe durch steuerliche Entlastung und/oder Ausbau der Förderprogramme; auch hier schnellstmöglicher Ausbau dezentraler erneuerbarer Energien für die Wärmeerzeugung durch Investitionszuschüsse und/oder CO_2-Bepreisung
- für den Sektor Verkehr: kurzfristige Umstellung von Individual- auf gemeinschaftlichen Nah- und Fernverkehr.

Zum Erreichen von Klimaneutralität in einem kurzen Zeitraum sind alle beteiligten Gruppen einzubeziehen: Gesellschaft, Wirtschaft und Politik. Der eigene CO_2-Fußabdruck kann nach einer Informationskampagne jedem so geläufig werden, wie das persönliche Gewicht oder das Kalorienzählen bei einer Diät. Oder das Einhalten der Beschränkungen in der derzeitigen Corona-Krise.

Nach Rifkin [87] ist ein Paradigmenwechsel erforderlich. In einem Kommentar von Heinrich Timm in der Zeitschrift TAB - Technik am Bau [88] wird zu den Vorschlägen von Rifkin wie folgt Stellung bezogen:

> *„Um den Klimawandel zu stoppen, muss ein Wechsel bei der Energieerzeugung erfolgen. Die Klimakrise ist die Rechnung dafür, dass die Menschheit mehr als 200 Jahre glaubte, fossile Brennstoffe nutzen zu müssen, um eine grenzenlose und endlose Zukunft zu gestalten. Dies ist ein Irrweg, denn die Belastungsgrenze von klimaschädigenden Treibhausgasen ist bereits heute erreicht. Rifkin hat Studien ausgewertet, in denen es bereits 2023 zum Kipppunkt kommen könnte, das heißt zum Zusammenbruch der fossil befeuerten Zivilisation […]*
>
> *Zur Schadensbegrenzung ist eine Abkehr von den fossilen Brennstoffen hin zu erneuerbaren Energie erforderlich. Daher muss zukünftig die aus erneuerbaren Energien gewonnene Elektroenergie auch zur Wärmeversorgung eingesetzt werden. Die Erzeugung erfolgt mittels Photovoltaik-, Windkraft- und Wasserkraftanlagen und kann für eine spätere Nutzung in wärme- bzw. elektrotechnischen Systemen gespeichert werden […]*
>
> *Sollte aus witterungsbedingten Gründen die notwendigen erneuerbaren Energien nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung stehen, sind für eine begrenzte Zeit fossile Brennstoffe zur Wärmeversorgung einzusetzen. Die Nutzung von erneuerbaren Energien ist kostenlos, daher reduzieren sich die Energiekosten in gesellschaftlichen Bereichen bis auf den Grenzwert von fast Null. Auf die Nutzer wären dann nur die Investitionskosten für die Erzeuger- und Verteilungssysteme sowie die Wartungskosten umzulegen. Das Fazit o.g. Überlegungen ist, dass die klassische Wärmeversorgung mittels fossiler Brennstoffe nur ein Auslaufmodell sein kann, das möglichst bald durch eine elektrische Wärmeversorgung abgelöst werden sollte“*

Zu vergleichbaren Schlussfolgerungen kommen die Studien von Fraunhofer ISE [68], AGORA [69] [89] sowie von Schulze-Darup für die DBU [90], die aber noch von den Klimazielen der Bundesregierung bis 2050 ausgehen:

> *„Die Klimaschutzziele der Bundesregierung sehen bis zum Jahr 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand vor. Zum Erreichen dieses Ziels gibt es zahlreiche Studien […], die im Wesentlichen davon ausgehen, dass ein Zusammenwirken von Effizienzmaßnahmen und Erneuerbaren Energien auf Best Practice Niveau notwendig ist, um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen. Die aktuelle Umsetzung der Wärmewende ist mangelhaft, das Erreichen des Gebäudesektor-Zieles 2030 ist stark gefährdet. Um die Emissionen von heute 130 Millionen Tonnen CO_2 auf 70 bis 72 Millionen Tonnen in den nächsten elf Jahren zu senken, brauchen wir ein flächendeckendes Hochskalieren aller verfügbaren Technologieoptionen: Dämmung, Wärmepumpen, Wärmenetze, dezentrale Erneuerbare und Power-to-Gas. Die Zeit des Entweder-oder beim Einsatz verschiedener Gebäudetechnologien ist angesichts der Versäumnisse der Vergangenheit vorbei.“ [89]*
>
> *„Hohe Energieeffizienz bildet dabei die Voraussetzung für hohe Technologieoffenheit und den betriebs- und volkswirtschaftlich sinnvollen Einsatz erneuerbarer Energien. Insbesondere der Gebäudebereich besitzt das technische Potenzial, dass bis 2050 in etwa 50 Prozent Endenergieeinsparung erzielt werden muss. Hohe Effizienz ermöglicht es, den verbleibenden Bedarf mit wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erneuerbar zu decken. Wird der Blickwinkel auf die gesamte Wirtschaft der BRD gerichtet, verfügt der Gebäudebereich bereits über die erforderlichen Techniken. Demgegenüber stellen insbesondere Sektoren wie die Industrie, Landwirtschaft und Mobilität Herausforderungen dar, bei denen eine dritte Säule nahezu unabdingbar ist – das Verhalten der Menschen.“ [90]*

1.2.3 CO_2-basierte Bepreisung

Die Tatsache, dass die strombasierten Versorgungsvarianten beim zukünftig beschleunigten Ausbau regenerativer Stromerzeugung mit Photovoltaik und Windkraft zwar deutlich emissionsmindernd, jedoch z.Z. noch nicht wirtschaftlich sind, wird als Ergebnis dieses Gutachtens für die Mikroperspektive mehrfach herausgearbeitet. Es wird für reine Wärmepumpensysteme, für dezentrale elektrische Trinkwassererwärmung und für übergangsweise Hybridsysteme Kessel / Wärmepumpe mit zusätzlicher Photovoltaik thematisiert.

Investitionskostenzuschüsse können vielfach das Problem nicht lösen, da nicht die jeweilige Investitionssumme kritisch (also zu hoch) ist, sondern die Tatsache, dass bei den heute sehr hohen Strompreisen für Allgemein- und für Wärmepumpenstrom die Energiekosten nach Umstellung auf Wärmepumpen und/oder elektrische Trinkwassererwärmung z.T. angestiegen sind.

Das spricht dafür, dass eine grundlegend andere Energieträgerbepreisung angebracht ist. Das Problem wird im Rahmen des Gutachtens theoretisch „gelöst", indem eine optionale Energieträgerbewertung auf Basis der Emissionen erarbeitet und angenommen wird.

Alternative Bepreisung

Grundlage der Überlegungen sind die Energiemengen, welche an die privaten Haushalte 2019 abgegeben wurden, sortiert nach Energieträgern – auf Basis der Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen AGEB. Darüber hinaus werden die heutigen Endverbraucherenergiepreise verwendet, wie sie vom BMWi für 2019 bekannt gegeben wurden. Der dritte Eingangsdatenpunkt sind die heute typischen Emissionsfaktoren der einzelnen Energieträger, wie von IWU und UBA kommuniziert.

Die Energieträgerpreise werden in Zielrichtung auf die Makroperspektive so festgelegt, dass in Summe dieselben Energiekosten im Bereich Wohngebäude, bezogen auf den heutigen Preisstand 2020 entstehen, zunächst also weder die Verbraucher noch die Versorger insgesamt anders belastet werden (Prinzip „Umverteilung").

Die Summe aller Energieträger – jeder multipliziert mit seinem heutigen Preis – ergibt Gesamtenergiekosten – Stand 2020 - aller Haushalte von 74,3 Mrd. €/a. Dabei werden insgesamt 168 Mio. t CO_2-Äquivalent emittiert. Es zeigt sich eine deutliche Ungleichbewertung der Anteile an den Kosten und Emissionen. Jedoch kann nach diesem Ansatz ein gemittelter Emissionspreis über alle Energieträger von – zunächst – **442 €/t CO_2** bestimmt werden.

Anhand des bestimmten CO_2-Preises wurden neue Energiepreise ermittelt. Jeder Energieträger wird proportional zu seiner Emissionsmenge bepreist. Die Werte sind plausibel, jedoch ergibt sich ein sehr geringer Pelletpreis (wegen der sehr geringen Emissionen). Der Wert ist mit 1 Cent/kWh unrealistisch klein. Es ist davon auszugehen, dass dies unter dem Herstellungspreis liegt. Daher wurde der Pelletpreis von der Betrachtung ausgeschlossen und auf seinen heutigen Preis festgesetzt.

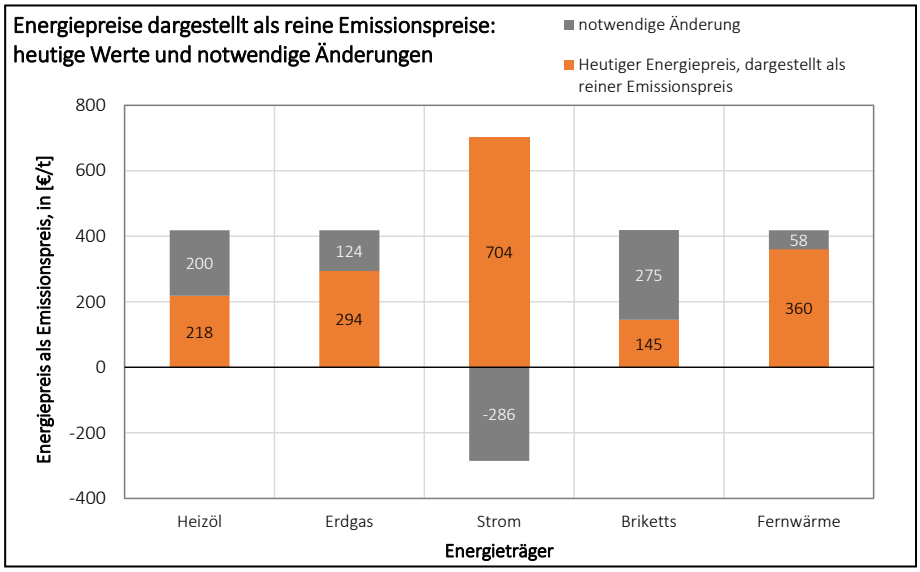


Abbildung 7 Energiepreise auf Basis der reinen Emissionspreise [eigene Darstellung]

Anschließend wurde die Preisermittlung analog wiederholt, jedoch ohne Holz. Für die restlichen Energieträger liegt der sich dann ergebende Emissionspreis bei **418 €/t $_{CO2}$**, siehe Abbildung 7. Dies ist das gewichtete Mittel aller Energieträgerkosten und aller Emissionen. Dies wäre als Ziellinie für den Preis anzusehen. Für jeden Energieträger ist nun in Form des grauen Balkens erkennbar, wie weit er vom Zielwert einer einheitlichen Bepreisung entfernt ist. Im Falle von Erdgas wäre ein Zuschlag von gut 40 % auf den heutigen Preis notwendig, bei Strom ein Abschlag von 40 % bezogen auf den Preis.

Die einzelnen Energiepreise, die sich daraus ergeben, zeigt Abbildung 8 (graue Säulen). Pellets sind – weil so festgelegt – genauso teuer wie heute. Ähnliches gilt für Fernwärme. Briketts sind fast 3 x teurer, Strom dafür mehr als ⅓ günstiger. Erdgas und Heizöl sind entsprechend ca. ⅓ bzw. Faktor 2 teurer.

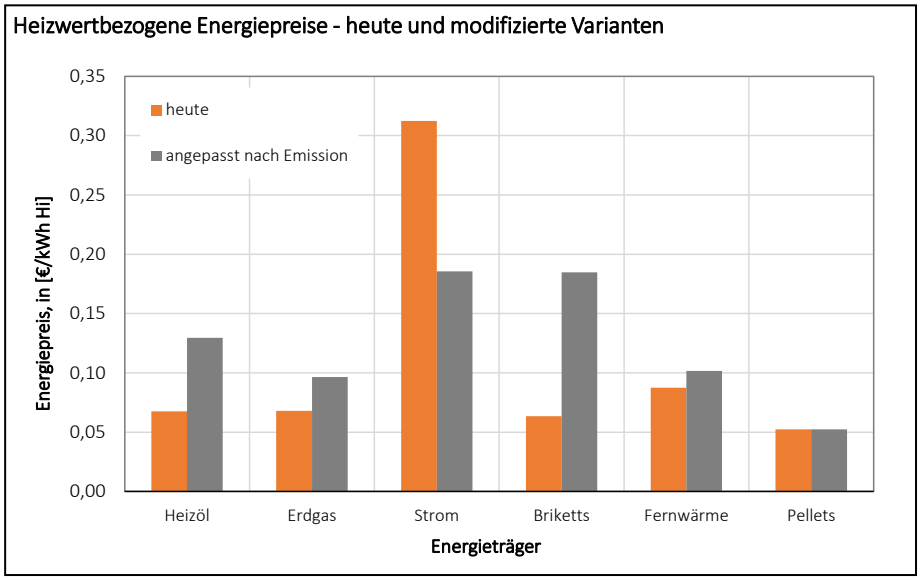


Abbildung 8 Heizwertbezogene Energiepreise – heute und modifizierte Werte [eigene Darstellung]

Hinweis: Für Industrieanwendungen und Großverbraucher elektrischer Energie wurde dieses Modell im Rahmen dieses Gutachtens nicht untersucht. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist jedoch übertragbar.

Das modifizierte Preissystem der Energieträger – hier zunächst für Wohngebäude – ist angelehnt an die Emissionen und erscheint den Gutachtern daher praktikabler zur Durchsetzung von Verbesserungen. In Summe unter heutigen Randdaten werden genauso viele Energiekosten gezahlt wie heute. Allerdings werden in erster Instanz die Gebäude mit hohen Emissionen zum Umsetzen von Maßnahmen angeregt, zuallererst die ölbeheizten Gebäude. Die Notwendigkeit der Bezuschussung von Maßnahmen sinkt, wenn die dann erhöhten Energiepreise als Maßstab verwendet werden. Wenn mit dem Zustand der derzeitigen Bepreisung verglichen wird, liegen sie immer noch geringer als berechnet.

Vor allem Wärmepumpensysteme – die im heutigen Preissystem rechnerische Investitionskostenzuschüsse von teilweise deutlich über 100 % benötigen, liegen danach im „normalen“ Bereich anderer Maßnahmen (max. 30 % Zuschuss auf die Investitionskosten).

Aus Sicht der Gutachter wäre das neue Preissystem auch eine sinnvolle und damit notwendige Grundlage zur Etablierung einer neuen Förderpolitik, die auf Emissionsminderungen basiert. Es würden dann nur noch Maßnahmen gefördert, die trotz einer hohen Emissionsminderung unwirtschaftlich sind, nicht wegen zu hoher Energiepreise.

Das Modell der alternativen Bepreisung wird in der Mikroperspektive exemplarisch eingesetzt, um die Konsequenzen auf Modernisierungsempfehlungen herauszufinden. Die Ergebnisse zeigt Kapitel 1.4.9.

1.2.4 Qualitätssicherung, Erfolgsnachweis und Monitoring

Etliche Feldstudien zeigen, dass Wärmepumpen, Anlagen zur kontrollierten Wohnungslüftung, Solaranlagen oder Brennwertkessel nicht so effizient sind, wie es Normnutzungsgrade in Herstellerprospekten und Zertifizierungsbescheinigungen verschiedener Prüfinstitute erwarten lassen; eine ähnliche Entwicklung wie aktuell im Mobilitätsbereich [55]. Auch die neu eingeführten Energielabel für Wärmeerzeugungsanlagen oder die WLTP-Werte im Mobilitätsbereich geben keine Auskunft über die Effizienz der Anlage im Realbetrieb. In der Praxis wirken andere Mechanismen als auf dem Prüfstand und in den angenommenen Berechnungsalgorithmen der Bedarfs- bzw. Prüfstandsnormen.

Bereitschafts- und Anfahrverluste im durchschnittlichen Teillastbereich heutiger Kessel von nur 9 bis 15 % bezogen auf die Kesselnennleistung und auch das Teillastverhalten von Wärmepumpen gewinnen an Bedeutung. Die Leistungsanpassung (Modulation) der Wärmeerzeuger ist meist nicht ausreichend, Heizkurven von Reglern werden nicht eingestellt, ein hydraulischer Abgleich wird nicht durchgeführt, einzelne Heizkörper werden unterversorgt. Falsche Gegenmaßnahme: die Heizkurve und/oder Pumpenleistung werden höher eingestellt; Konsequenz: erhöhtes Takten der Wärmeerzeuger, verminderte Brennwertnutzung oder niedrige Arbeitszahlen der Wärmepumpen und erhöhte Endenergie- und Stromverbrauchswerte, verbunden mit erhöhten CO_2-Emissionen.

All diese Abweichungen zwischen Prüfstandbedingungen und realem Betrieb werden in den heutigen EnEV- und EEWärmeG-Nachweisverfahren nicht aufgedeckt. Sie führen in vielen Fällen wegen fehlender Qualitätssicherung und -kontrolle zu erheblichen Abweichungen zwischen Norm- und Realwerten der Endenergie.

Mögliche Verbesserungsansätze und Hinderungsgründe

Es gibt mindestens drei grundsätzliche Verbesserungsansätze, diesen Missstand zu mindern:

1. die Normen und Berechnungsverfahren, die der EnEV bzw. dem künftigen GEG zugrunde liegen, verwenden künftig realistische Annahmen zum Nutzerverhalten
2. die Normen und Berechnungsverfahren, die der EnEV bzw. dem künftigen GEG zugrunde liegen, verwenden künftig typische, praxisgerechte Effizienzkennwerte für Bauprodukte
3. die Verbrauchswerte und Praxiseffizienzen werden zunächst erfasst und danach durch eine Qualitätssicherung verbessert und mindestens an die typischen (best case) Effizienzen und Bedarfswerte herangeführt.

Die Anpassung des Nutzerverhaltens in den Normen bedeutet für effiziente Gebäude u. a. eine Erhöhung der zu niedrigen Innentemperaturen, für Bestandsgebäude eine Absenkung der zu hoch angenommenen Innentemperaturen. Die Erkenntnisse zu möglichen realistischen Werten sind vorhanden, vgl. Studie des IWU [22]. Jedoch ist die Frage, wem diese Änderungen nützen (zumeist dem Endverbraucher) oder für wen sie hinderlich sind.

Steigt die rechnerische Innentemperatur im Neubau oder im sanierten Gebäude (exemplarische Größe, dies gilt auch für andere Nutzereinflüsse sinngemäß), wird der berechnete Energiebedarf größer. Für den Gesetzgeber wäre dies eher hinderlich: der z. B. gegenüber der EU nachzuweisende Standard „nearly zero energy buildings“ von Neubauten verschlechtert sich.

Sinkt gleichzeitig die rechnerische Innentemperatur im unsanierten Bestand, wird der berechnete Energiebedarf kleiner und die Differenz zwischen Altbau und Sanierung sinkt. Für beispielsweise die gesamte Dämmstoffbranche (Hersteller und alle nachgelagerten Instanzen der Planung und Ausführung) ist dies nicht erstrebenswert, da vor allem hohe berechnete Einsparungen für die Sanierung sprechen.

Sinken die in Normen und Regelwerken angegebenen Effizienzmerkmale der Technik (Nutzungsgrade von Kesseln, Arbeitszahlen von Wärmepumpen, Solarerträge usw.) auf realistische, typische Werte, die wenigstens im Mittel erreicht werden, erhöht sich die Diskrepanz zwischen Prüfstand/Prospekt und Realität teils dramatisch. Für den Gesetzgeber entsteht oben genanntes Problem im Nachweis der „nearly zero energy buildings“ identisch. Für die gesamte Heizungsbranche (Hersteller und alle nachgelagerten Instanzen der Planung und Ausführung) schrumpfen die Verkaufsargumente, weil die Wirtschaftlichkeit sich verschlechtert.

Wären die im konkreten Einzelfall erzielten Verbrauchswerte und Effizienzmerkmale bekannt und sind schlechter als die in den Normen kommunizierten Werte (heute teils unerreichbar hohe Standards, wünschenswert wären realistische Mittelwerte), müsste gegenüber dem Endverbraucher kommuniziert werden, wieso es zu den Diskrepanzen kommt und wie Abhilfe geschaffen werden kann.

Als Hinderungsgründe für eine transparente Offenlegung sind die dann nicht eindeutig zu identifizierenden Verursacher zu nennen (Spannungsfeld Hersteller/Planung/Handwerk/Endkunde).

Beide Gutachter sind seit Jahrzehnten in der Normung zur EnEV/GEG sowie beratend für Hersteller (u. a. Kesselhersteller) aktiv und haben die Diskussionen mehrfach geführt. So wurde der Gutachter Prof. Wolff als Obmann des Normenausschusses zur DIN V 4701-10 von 1996 -2004 durch einen Industrievertreter ersetzt, als nach Einführung der EnEV in verschiedenen Studien und Veröffentlichungen der Gutachter die großen Differenzen zwischen genormten Bedarfs- und realen Verbrauchs- bzw. Effizienzkennwerten thematisiert und publiziert wurden.

Der Effizienznachweis kann zukünftig durch monatliche Verbrauchsanalysen der zugeführten Endenergien und der damit verbundenen CO_2-Emissionen sowie der abgegebenen Wärmemengen geführt werden. Ein Wärmemengenzähler könnte zukünftig als selbstverständlicher Bestandteil jedes Wärmeerzeugers von den Herstellern sofort mit eingebaut werden. So kann für einen zukünftigen Erfüllungsnachweis die Messung von Strom, Endenergie und Wärme spätestens zwei bis drei Jahre nach Inbetriebnahme - wie von DGNB, BAK und GDW vorgeschlagen - als Ersatzmaßnahme mit einer Öffnungsklausel im zukünftigen Gebäudeenergiegesetz alternativ eingesetzt werden.

Die nächste für das Jahr 2023 vorgesehene Novellierung des ab 1. November 2020 geltenden Gebäudeenergiegesetzes (GEG) kann dazu genutzt werden, das Energieeinsparrecht drastisch zu vereinfachen und an den tatsächlichen Zielen auszurichten sowie für eine bessere Erfüllung der Anforderungen zu sorgen.

Monitoring und Qualitätssicherung

Befragungen zur Wohnzufriedenheit und Technikakzeptanz [22] belegen, dass Bewohner hocheffizienter Gebäude mit ihrer Wohnsituation zumeist sehr zufrieden sind. Dennoch entspricht der erzielte Qualitätsstandard nicht immer dem erreichbaren Minimum an Endenergieeinsatz.

Für die Gesamtergebnisse der „guten“ und „besten“ Standards (welche künftig zu erreichen sind) ergibt sich: die Endenergie und damit auch die Emissionen können nach Auswertungen der Gutachter mit einer umfassenden Qualitätssicherung um mehr als ein Viertel vermindert werden [27].

Als Mittelwert für den Gesamtbestand wird aus heutiger Sicht davon ausgegangen – dass im Schnitt – ein Gebäude mit Qualitätssicherung zu 14 % weniger Emissionen führt als eines ohne. Die Gutachter gehen in der Hochrechnung eigener Stichproben davon aus, dass nur etwa 15 % der Gebäude heute qualitätsgesichert sind. Es bleibt demnach ein großes Potential für weitere Einsparungen. Die weitere Herleitung der Werte sowie beispielhafte Energiebilanzen sind in Anhang 3.6 zu finden.

Bei Sanierungen im Bestand wäre nach Ansicht der Gutachter eine obligatorische Qualitätssicherung notwendig. Fehlt sie, ergeben sich viele der Abweichungen zwischen prognostizierter und tatsächlich erzielter Einsparung (vgl. Ergebnisse Kapitel 1.4.6). Im Falle von Fördertatbeständen könnten etwas höhere Fördersätze für die eigentliche Maßnahme mit verpflichtender Umsetzung der Qualitätssicherung vorgesehen werden. Daher haben die Gutachter alle Berechnungen mit „auskömmlichen“ Investitionskosten incl. Planungskosten versehen, sind damit aber auch grundsätzlich von einer Umsetzung der Qualitätssicherung ausgegangen.

Da auch jeder Neubau mit der Inbetriebnahme zum Bestand wird, gilt diese Einschätzung auch für den Neubau. Die verpflichtende Qualitätssicherung wäre als obligatorische Maßnahme in einer novellierten Version des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) festzuschreiben.

Die bauliche Qualitätssicherung erfolgt immer zeitgleich mit der Umsetzung der Maßnahmen (Dämmung, Fenstereinbau). Nur dann bietet sich problemlos die Möglichkeit, eine Luftdichtheit herzustellen oder Wärmebrücken zu minimieren.

Die anlagentechnische Qualitätssicherung ist differenziert zu sehen. Ein hydraulischer Abgleich mit Temperaturoptimierung wird sinnvoll dann durchgeführt, wenn der bauliche Wärmeschutz auf mindestens die nächsten 10 Jahre hin keine weitere Änderung mehr erfahren wird; also nach der absehbar letzten baulichen Verbesserung (einschließlich Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung). Darüber hinaus führt er zu höheren Einsparungen in gedämmten Gebäuden, dies zeigen messtechnische Untersuchungen der Gutachter [23]. Daher ist anlagentechnische Qualitätssicherung dann vorteilhaft, wenn das Gebäude mindestens den Standard nach Wärmeschutzverordnung 1995 erreicht hat. Auch die KfW hat aufgrund dessen entsprechende Regelungen in ihre Förderprogramme eingeführt.

Da Wärmepumpen sehr temperatursensibel sind, stellt das Gebäude mit Wärmepumpe eine Ausnahme dar. Hier erscheint unabhängig vom derzeitigen Dämmzustand immer eine Optimierung sinnvoll. Außerdem ist empfehlenswert, bei jeder nennenswerten baulichen Verbesserung (einschließlich Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) die Optimierung zu wiederholen, weil die Systemtemperatur voraussichtlich immer weiter gesenkt und damit die Effizienz erhöht werden kann.

Eine nachträgliche anlagentechnische Qualitätssicherung als Alleinmaßnahme ist sinnvoll, wenn ein Monitoring stattgefunden hat, mit dem einzelne Probleme lokalisiert und erkannt wurden. Eine gute Basis ist eine zukünftig (automatisierte) Energieanalyse aus dem Verbrauch „EAV", integriert z. B. in zukünftigen Regeleinrichtungen von Kesseln und Wärmepumpen sowie in Heizkreisregelungen [53] [27] [55].

Es bietet sich deshalb an, die Umsetzung eines Monitorings zu fördern (z. B. für 2 bis 3 Jahre) und einen Teil der Fördermittel für die anlagentechnische Verbesserung an dieses Monitoring zu knüpfen. Besser noch wäre eine erfolgsabhängige Vergütung; jedoch ist den Gutachtern die Schwierigkeit der Umsetzung solcher Maßnahmen bewusst. In einer novellierten Fassung des GEG 2023 könnte das Monitoring der EAV als Erfüllungsnachweis zukünftig gefordert werden.

Das Monitoring könnte damit als Kontrollorgan für den Nachweis nach zukünftigem Gebäudeenergiegesetz GEG und für die Vergabe von Fördermitteln dienen. Bisher beinhalten die Förderprogramme nur Bedarfsnachweise (siehe nachfolgend: individueller Sanierungsfahrplan iSFP). Bei Umstellung auf Verbrauchs- bzw. Erfolgsnachweise würde der Antragsteller nach Fertigstellung der Maßnahme (Neubau, Einzelmaßnahme oder Gesamtsanierung) die Energieeffizienz des Gebäudes über gemessene Verbrauchswerte belegen. Damit können der Gesetzgeber oder der Fördermittelgeber nachträglich prüfen, auch wenn dies nur stichprobenweise erfolgen würde, ob die gesetzlichen Maßgaben bzw. Voraussetzungen für das Förderprogramm erfüllt wurden.

Aus Sicht der Gutachter kann der Gesetz- bzw. Fördergeber so die Erfolge der Energiewende mit dem Ziel „Klimaneutralität" realistisch nachweisen und rechtzeitig Fehlentwicklungen vorbeugen.

Basis für zukünftige Bewertungen von Neubauten und von Objekten des Gebäudebestands und Grundlage zur Quantifizierung der Erfolge realisierter Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen könnten somit immer reale Verbrauchsauswertungen und Verbrauchsanalysen sein.

Die Stadt Frankfurt hat mit den „Richtlinien zum wirtschaftlichen Bauen" vom Januar 2014 als erste Stadt in Deutschland eine rechtliche Grundlage bei Neubau und Sanierungsmaßnahmen geschaffen, um ein verpflichtendes Verbrauchszählerkonzept für Strom, Heizenergie, Wasser und Warmwasser in der Planung umzusetzen. Gleichzeitig wird die begleitende Verbrauchserfassung zur Überprüfung der Gebäudequalität gefordert. Das Zählerkonzept wird zudem von der Abteilung Energiemanagement der Stadt Frankfurt freigegeben und nach Ausführung überprüft [35]. Damit hat die Stadt Frankfurt eine Vorbildfunktion im Bereich der Qualitätssicherung erreicht.

An den Kriterien dieser Leitlinien orientiert sich dieses Gutachten. Ein Verfahren mit Auswertung und Analyse monatlicher Verbrauchswerte wurde von den Gutachtern bereits vor mehr als einem Jahrzehnt als Ersatz für die Bedarfsbilanz im Nachweis vorgeschlagen [91] [92].

Auch die aktualisierte Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) ließe sich in dieses Modell integrieren. Sie sieht erfolgsabhängige Komponenten in der Einhaltung des Investitionskostenrahmens vor; es kann als Grundlage für das Architekten- und Planer-Honorar eine Bonus-Malus-Regelung bei Unterschreitung / Überschreitung vereinbart werden; dies ist jedoch noch nicht gängige Praxis, eher der Ausnahmefall.

Sanierungsfahrplan iSFP für Gebäude und Anlagentypen

Der individuelle Sanierungsfahrplan (iSFP) [34] ist seit 2017 ein Werkzeug für die Energieberatung von Wohngebäuden. Im Vordergrund steht die energetische Bewertung eines Gebäudes, entweder für die Schritt-für-Schritt-Sanierung oder für die Gesamtsanierung in einem Zug.

Der iSFP wurde vom BMWi in Zusammenarbeit mit der Bundesstelle für Energieeffizienz im Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und einem externen Konsortium aus der Deutschen Energie Agentur (DENA), dem Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) und dem Passivhaus Institut (PHI) ins Leben gerufen, um Energieberatern und Bauherrn ein Instrument zur Vereinfachung der Energieberatung zur Verfügung zu stellen.

Energieeinsparpotenziale, Einsatzmöglichkeiten für erneuerbare Energien sowie die dafür notwendigen Investitionen und die Heizkosten- und CO_2-Einsparungen werden im iSFP ausgewiesen. Für die Ergebnisse und Empfehlungen dienen zwei Dokumente („Mein Sanierungsfahrplan“ und „Umsetzungshilfe für meine Maßnahme“). Diese erhält der Bauherr zum Abschluss der Beratung. Sie sind so aufgebaut, dass sie für den Bauherrn leicht verständlich sind und einen langfristigen Überblick über den energetischen Zustand des Gebäudes und dessen Sanierungsmöglichkeiten geben.

Zukünftig könnte der heute bereits angebotene, bedarfsorientierte iSFP zusammen mit dem von den Gutachtern entwickelten Verfahren einer Energieanalyse aus dem Verbrauch EAV zur CO_2-Vermeidungsförderung und damit zu einer Erfolgsnachweisführung für geförderte Bestandmodernisierungen genutzt werden.

Anwendung findet der iSFP bei Ein- und Mehrfamilienhäusern. Die Thematik wird im Makro-Teil des Gutachtens vertieft mit dem Vorschlag, auf Basis der Ergebnisse dieses Gutachtens die Wirtschaftlichkeit von Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen und ihre effektivste zeitliche Reihenfolge zur schnellst möglichen Zielerreichung von Klimaneutralität, d. h. zum Einhalten des Emissionsrestbudgets, zu optimieren.

1.2.5 Best und worst case

Die im vorangehenden Kapitel genannten Rahmenbedingungen lassen den verstärkten Einsatz von best Practice-Technologien evtl. sogar kurzfristig wahrscheinlicher werden. Auszüge aus einer früheren Veröffentlichung der Gutachter werden nachfolgend gekürzt und mit geringfügigen Anpassungen bzw. Kommentaren zusammengefasst [93]:

Würde die Zielsetzung: „maximal mögliche Energieeinsparung und CO_2-Minderung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten durch umfassende Modernisierung im Gebäude- und Anlagenbestand“ von allen Beteiligten akzeptiert, könnten viele Diskussionen über nur teilweise Instandsetzungen (alleiniger Fensteraustausch) oder einzelne Modernisierungsmaßnahmen (nur Wärmepumpe) entfallen.

Für eine wirtschaftliche und kombinierte Instandsetzung und Modernisierung bietet sich primär der Gebäudebestand mit Baujahr vor der 1. WSchV 1977 an. Zusatzkosten zur „Sowieso-Instandsetzung“ auf den derzeitig geforderten, nicht sehr anspruchsvollen EnEV-Neubaustandard liegen heute bei typisch 250 bis 400 €/m². Schulze-Darup zeigt [94], dass ein wirtschaftlich und technisch realisierbarer bestmöglicher Standard (30 bis 50 % unter den EnEV-Neubau-Anforderungen oder sogar auf Passivhausniveau) weitere Zusatzkosten von typisch 120 bis 150 €/m² erfordert.

Weitere, den Wert der Immobilie erhöhende, aber energetisch nicht notwendige Maßnahmen liegen je nach Umfang noch einmal in der gleichen Größenordnung, so dass die Gesamtkosten einer umfassenden Instandsetzungsmodernisierung durchaus in der Größenordnung von 1000 bis 1500 €/m² liegen können. Also etwa bei der Hälfte der Kosten von Neubauten. Wichtigste Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist eine langfristig weitere Nutzung von geplanten 30 bis 60 Jahren.

Die größten Schwierigkeiten und Hindernisse liegen nach Ansicht der Gutachter darin, dass sich alle an der Modernisierung Beteiligten tatsächlich mit diesem Ziel identifizieren: Architekten, Anlagentechnik-Fachplaner und Energieberater, v. a. auch die Energieversorgungsunternehmen, die Komponentenhersteller sowie das ausführende Handwerk und die zukünftigen Qualitätssicherer, ohne die es nicht gehen wird.

Alle am Bau Beteiligten könnten sich zu einem verantwortlichen Netzwerk zusammenschließen, das die prognostizierten einzusparenden Energiemengen – nicht die eingesparten Energiekosten(!) - tatsächlich garantiert. Hindernisse für dieses Vorgehen liegen in der typisch deutschen Neigung zu komplizierter Bürokratie in der Steuer-, Miet- und Eigentumsgesetzgebung und den damit verbundenen Verordnungen; auch die Fördergesetzgebung und ihre Programme sind nicht immer hilfreich.

Das mit der EnEV eingeführte Kompensationsprinzip der gegenseitigen Verrechnung bau- und anlagentechnischer Maßnahmen ist aufgrund der durch die CO_2-Bepreisung zukünftig steigenden Energiepreise und der anerkannten Notwendigkeit der Reduzierung von klimaschädigenden Gasen nicht mehr zielführend. Wirtschaftlich und technisch bestmöglichste Standards nach dem z. B. in Japan bewährten Top-Runner-Prinzip erfüllen die zukünftigen Anforderungen! Eine oben beschriebene „Interessensgemeinschaft" aller Beteiligten, in der sich v. a. auch die Energieversorger zu Energiedienstleistungsunternehmen wandeln, könnten diese Aufgaben sicherlich sehr gut bewältigen.

Vielfach werden diese Rahmenbedingungen einer integrierten Planung bei der Aufstellung energetischer und wirtschaftlicher Gesamtbilanzen nicht ausreichend sachgemäß behandelt oder einer Lösung zugeführt; zu viele Einzelinteressen verschiedener Teilbranchen sind betroffen, als dass man sich auf einheitliche Aussagen bisher verständigt hätte. Die Koppelung und Wechselwirkungen der Einflüsse von Gebäude, Anlagentechnik und Nutzung werden nicht oder nur unzureichend gesehen.

In diesem Gutachten werden diese Einflüsse und Wechselwirkungen aus den eigenen Felduntersuchungen quantitativ in einzelnen bzw. zusammengefassten Kennwerten berücksichtigt. In Kapitel 1.4 werden daraus systematisch Kennwerte für energetische Einzel- und Paketmaßnahmen für Neubau und Modernisierung gebildet.

Welche Schlussfolgerungen aus den beschriebenen Feldstudien gezogen werden können, welche Planungsschritte und welche Verbesserungspotentiale für eine ganzheitliche Optimierung des Gebäude- und Anlagenbestands möglich sind, wird nachfolgend aus Sicht der Gutachter zusammengefasst.

Energieberatung mit Verbrauchs-Bedarfs-Abgleich

Die Analyse des Ist-Zustandes ist durch eine seriöse und interessensunabhängige Vor-Ort-Energieberatung sicherzustellen. Ein damit verbundener Verbrauchs-Bedarfs-Abgleich liefert weitere Aufschlüsse über die Einzelverluste und ihre Verursacher.

Planungstools zur Gesamtbilanzierung

Als Planungsinstrument für technisch und wirtschaftlich sinnvolle Modernisierungsmaßnahmen werden heute verschiedene praxistaugliche Rechen-Tools angeboten und in der Energieberaterpraxis angewendet. Für eine erste Kalkulation ist eine vom IWU [76] angebotene Planungshilfe für Niedrigenergie- und Passivhäuser zu empfehlen.

Wirtschaftlichkeitsnachweis

Letztlich sind für verschiedene Einzelmaßnahmen oder für Maßnahmenpakete Wirtschaftlichkeitsnachweise mit Variation der wichtigsten Parameter (Annahmen zu Investitionskosten, Zinsen, Preissteigerungsraten, Betrachtungszeiträume) durchzuführen. Für erste Vergleiche hat sich das Instrument des äquivalenten Energiepreises bewährt, Hintergrundinformationen siehe Anhang 5.5.3.

Wertanalyse als Planungsinstrument

Für Modernisierungsalternativen, die nicht direkt wirtschaftlich zu bewerten sind, sondern auch zu einer Verbesserung des Standards oder des Komforts und der Hygiene dienen – bestes Beispiel ist die Komfortlüftung – bietet sich als Entscheidungshilfe die Wertanalyse an.

Eine effiziente und wirksame Optimierung des Gebäude- und Anlagenbestandes folgt der Maxime: es sind die Modernisierungsinvestitionen bevorzugt zu tätigen, bei denen mit dem investierten Kapital die langfristig größten Einsparungen erzielt werden können.

Voraussetzung ist, dass sich alle Branchenakteure zukünftig einer offenen Diskussion dem Monitoring öffnen und dabei (wieder) lernen, „ehrlich" zu bilanzieren; energetisch und wirtschaftlich und ohne unrealistische „Bis-Zu-X-Einspar-Prozent-Versprechen".

Wirtschaftlichkeitsvergleiche in der Mikroperspektive (überwiegend betriebswirtschaftlicher Blick) erfolgen am besten mit dem Werkzeug: „Kosten je eingesparter kWh Energie“ bzw. „Äquivalenter Energiepreis“, für die Makroperspektive (überwiegend volkswirtschaftlicher bzw. umweltpolitischer Blick) lautet der Kennwert: „Kosten je vermiedener Tonne CO_2“ bzw. „äquivalenter CO_2-Preis“. Voraussetzung der Methode „Äquivalenter Energiepreis“ ist, dass der Endenergieträger nicht gewechselt wird. Mit einem äquivalenten CO_2-Preis wird dieser Nachteil aufgehoben.

Datenbank zu best und worst-Practice

Eine Begrenzung des Energieverbrauchs im Neubau und auch in der Bestandssanierung kann nur durch Nutzerschulungen und (gleichzeitige oder teilweise nachträgliche) Qualitätssicherung mit Monitoring der Gebäude- und Anlagentechnik erfolgen. Die Ergebnisse der von den Gutachtern untersuchten Objekte bestätigen die Notwendigkeit einer integrierten, also gemeinschaftlichen Planung von baulicher und anlagentechnischer Seite.

Vor allem im Bereich der Planung der Anlagentechnik ist eine vertiefte Zusammenarbeit zwischen Anlagentechnikplaner und Architekt notwendig. Die bereits auf der baulichen Seite vorhandene Qualifizierung und Qualitätssicherung (Wärmebrücken, Luftdichtheit) sind nach Ansicht der Gutachter konsequent auch auf die Heizungs-, Lüftungs- und Regelungstechnik auszudehnen. Die Dokumentation der wichtigsten Planungsdaten und eine überprüfte und dokumentierte Heizflächendimensionierung, Einstellung von Thermostatventilen, Reglern, Pumpen- und Ventilatorantrieben sind hierfür eine unabdingbare Leistung der ausführenden Firmen.

Durch die unterjährige Erfassung der Verbrauchswerte eines oder mehrerer Jahre kann der „energetische Fingerabdruck des Gebäudes und der Anlagentechnik“ ermittelt werden. Daraus kann der Wärmeerzeuger hinsichtlich des Brennstoffverbrauchs, des Betriebsverhaltens und der Strom- und Wasserverbrauchswerte analysiert werden. Ebenfalls ist es möglich, Rückschlüsse auf die maximale Heizlast, die Grundlast im Sommer, die Heizgrenztemperatur und auf mögliche Energiemehrverbräuche durch Verschwendung zu ziehen.

Hieraus lassen sich dann langfristig Datenbanken für die verschiedensten Gebäudetypen als best und worst Practice-Fälle für die Allgemeinheit zugänglich erstellen und mit den vorher erstellten, bedarfsorientierten individuellen Sanierungsfahrplänen iSFP vergleichen.

1.2.6 Kreislauf der Betriebserfahrungen

In vielen Studien haben sich die Gutachter mit der mangelnden Rückkopplung und Berücksichtigung des Einfließens von Praxiserfahrungen in die Verbesserung der baulichen und anlagentechnischen Systeme beschäftigt:

- Qualitäten in Passiv- und Niedrigenergiehäusern (Luftdichtheit, Wärmebrücken),
- reale Effizienz von Wärmeerzeugern wie Brennwertkessel, Wärmepumpen und Solarthermie,
- Heizungsoptimierung mit hydraulischem Abgleich,
- Speicher- und Verteilverluste.

Es zeigt sich, dass in den Regelwerken (z. B. Normen) zur Berechnung des Energiebedarfs vielfach zu optimistische Annahmen hinsichtlich des bei einer Modernisierung zu erwartenden Einsparpotenzials getroffen werden. Qualitäten der Gebäudehülle im Bestand werden zu schlecht, der tatsächliche Luftwechsel bei freier Lüftung zu hoch und Nutzungsgrade der Verteilung und Speicherung nach der Modernisierung zu optimistisch eingestuft.

Eine Qualitätssicherung in Planung, Ausführung und v. a. im späteren Betrieb mit einem Monitoring durch eine „Energieanalyse aus dem Verbrauch“ wurde nach Kenntnis der Gutachter bisher nur in den eigenen Feldstudien durchgeführt [91] [23] [25] [26] [27] [28]. Dadurch werden erzielbare, zusätzliche Einsparungen in einer Größenordnung von 20 bis 30 kWh/(m²a) Endenergie in der Praxis nicht gehoben. Die Hintergründe hierzu werden detailliert in Anhang 3 erläutert.

Im Gegensatz zu allen anderen Industriezweigen werden in der Bau- und Gebäudetechnik gewonnene Betriebs- und Praxiserfahrungen kaum wieder in die Planung und Ausführungspraxis zurückgespiegelt. Darauf weist auch ein Interview in den VDI-Nachrichten mit dem bekannten Architekten Sobek hin [33]:

„Unser Bauwesen ist die einzige Industrie signifikanter Größenordnung, in der Planung, Produktion und Betrieb systematisch voneinander getrennt werden. Ich habe schon als Student nicht verstanden, warum die Branche darauf so stolz ist. Insbesondere auf Ihre Ausschreibungs- und Vergabeverfahren, durch die der spätere Streit zwischen planenden und ausführenden Unternehmen vorprogrammiert ist.

Abgesehen davon, dass durch diese Strukturen ein Rückfluss von Know-how aus der Nutzung in die Produktion und in die Planung völlig blockiert wird. Erkenntnisse, die in der Nutzungsphase entstehen, wie Energieverbrauch, Reparaturfreundlichkeit oder akustische Qualitäten, werden ebenso wenig zurückgespielt wie die bei Umbau, Abbau und Recycling gesammelten Informationen. Hat man diese Rückkopplungseffekte nicht, gibt es auch keine Optimierungschancen."

Diese Praxis ist durch künftige Datenstrukturen zu durchbrechen und tatsächlich auch im Bauwesen ein „Kreislauf der Betriebserfahrungen" zu etablieren.

Partnerschaftliche Modelle

Das Ziel zukünftiger Projekte zum Erreichen von Klimaneutralität wird von Anfang an durch ein partnerschaftliches Herangehen an zukünftige Modernisierungs- und Neubauprozesse besser erreicht werden können.

Diese Prozesse wurden von den Autoren in zwei von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU geförderten Projekten in den letzten 15 Jahren begleitet und ausgewertet. Mit Erfolgen („Neuerkerode 2050" [26]), aber auch mit vielen Misserfolgen („Alliance Contracting" [95]), die aus Sicht der Autoren wesentlich auf die wirtschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen zurückzuführen sind.

Im Projekt „Neuerkerode 2050" gab es für die Umsetzung einer relevanten energetischen Optimierungsmaßnahme nur zwei Vertragsparteien: eine Stiftung (vertreten durch Ihren Direktor) und ein ausführendes Unternehmen – mit nur einem Ansprechpartner für Planung, Ausführung und Betrieb, damit alles aus einer Hand. Dies waren ideale Voraussetzungen für ein Partnerschaftsmodell: es gab nur zwei verantwortliche Parteien. Der geschlossene Vertrag enthielt eine Gewinnbeteiligung für den Planer im Erfolgsfall, war jedoch nicht auf eine Langzeitverbindung beider Partner ausgerichtet (wie das bei Contracting der Fall ist), sondern auf 2 Jahre. Die durchgeführte Maßnahme war erfolgreich; erbrachte der Stiftung deutlich verringerte Energiekosten und dem Büro ein auskömmliches Honorar.

Das Ziel des Nachfolgeprojektes „Alliance Contracting" war, den erbrachten Nachweis, dass es im Rahmen eines Partnerschaftsmodells zu einer Win-Win-Situation für alle beteiligten Partner kommen kann, auf konkrete Modernisierungsprojekte in der Wohnungswirtschaft zu übertragen. Zu den Schritten einer solchen „Integralen Projektumsetzung" zählen:

- eine systematische Bestandserfassung unter Berücksichtigung aller bisherigen Kosten,
- eine nachfolgende ausführliche Vorkonzepterstellung in einem frühen Planungsstadium, mit einem Team aus Architekten, Fachplanern TGA und Auftraggeber (möglichst mit Fachkompetenz im eigenen Hause),
- eine qualitätsgesicherte Ausschreibungs- und Ausführungsplanung,
- eine qualitätsgesicherte Ausführung sowie
- ein kontinuierliches Monitoring der Kosten und Energieverbräuche im nachfolgenden Betrieb.

Die eigene Reflexion dieses wohnungswirtschaftlichen Projektes führt zu folgender Erkenntnis: der aktuelle Rechtsrahmen für Bauvorhaben in der Wohnungswirtschaft ist sehr komplex. Es gelten EnEG, EnEV, EEWärme oder GEG, EEG, KWKG, HeizKoV, Mieterstromgesetz, VOB, HOAI, WärmeLV sowie mietrechtliche Bestimmungen. Darüber hinaus gelten Randdaten verschiedener Förderprogramme. Jeweils mit diversen komplexen und nicht unbedingt aufeinander abgestimmten Wechselbeziehungen.

Es ergeben sich teilweise wiedersprechende Anforderungen. Technologien, die aus fachplanerischer Sicht sinnvoll sind, erfüllen die EnEV nicht. Sinnvolle Mehrausgaben, um ein Energiekonzept optimal auszugestalten, sind ggf. mit der Umlagesystematik unvereinbar. Außerdem kann keine Vertragspartei gefunden werden (Planer, Ausführender), die eine Gesamtverantwortung übernimmt.

Die Notwendigkeit, den hohen Einfluss politischer, rechtlicher, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen auf den Prozess eines partnerschaftlichen Projektes rechtzeitig einzubeziehen, wurde von der Forschergruppe zu spät erkannt. Angestrebte Veränderungsprozesse dauern sehr viel länger als geplant.

Zusammengefasst stehen der Realisierung partnerschaftlicher Modelle durch den politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Rahmen, der sich in der heutigen Struktur und Abwicklung größerer Projekte an verschiedenen Stellen deutlich niederschlägt, so viele Hemmnisse durch Konkurrenzdenken und Wettbewerb entgegen, dass von einer Umsetzung in der Wohnungswirtschaft bei den sehr vielen beteiligten Akteuren in absehbarer Zukunft nicht ausgegangen werden kann.

Erst nach einer gesellschaftlichen Ermächtigung auch der betroffenen Gesellschaft in Anlehnung an Wrights „Reale Utopien" [36] kann der Ansatz von Partnerschaftsmodellen wieder aufgegriffen werden. Bis dahin werden die Werkzeuge für eine transparente Qualitätssicherung von der Ist-Zustandsanalyse bei Sanierungsprojekten, über die Konzepterstellung, über Planung und Ausführung bis hin zum Betrieb mit einem mindestens zweijährigen Monitoring erprobt und ausgebaut.

1.2.7 Grenzkosten-Null-Gedanke

Von 1970 bis 2007 sind Endenergiepreise für Erdgas und Heizöl im Mittel um jährlich 7 % gestiegen; dies mit einer langen Pause zwischen 1984 bis 2004. Diese Preisentwicklung entsprach einer Verdoppelung der Energiepreise etwa alle 10 Jahre. Mit der Finanzkrise 2008/09 wurde dieser Trend bis heute gedämpft. Die Energiepreise – mit Ausnahme des Strompreises – stagnierten bis heute.

Modernisierungsmaßnahmen lassen sich wirtschaftlich sehr anschaulich mit dem äquivalenten Energiepreis bzw. den sogenannten Kosten der eingesparten Energie bewerten. Zukünftig ist der äquivalente CO_2-Preis zu errechnen. Voraussetzung der Methode „äquivalenter Energiepreis" ist, dass der Endenergieträger nicht gewechselt wird. Mit einem äquivalenten CO_2-Preis wird dieser Nachteil aufgehoben.

Diese Art der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird durch zukünftig veränderte Rahmenbedingungen anzupassen sein. Durch eine zukünftige CO_2-Bepreisung, ab 2026 mit einem marktwirtschaftlichen Zertifikate-Handel sind die zukünftigen Preise fossiler Brennstoffe nicht oder nur schwer vorhersehbar [96].

Anders sieht die Kostenabschätzung für zukünftige Elektrolösungen aus, z. B. mit Elektrowärmepumpen, die wesentlich aus von den Betreibern selbst angeschafften PV-Anlagen gespeist werden, evtl. ergänzt durch einen Batteriespeicher. Hier sind allein die Investitionskosten und der Betrachtungszeitraum bzw. die Lebensdauer der eingesetzten Komponenten von Bedeutung.

Anbieter von Komplettlösungen, wie Versorgungsunternehmen, Contractoren oder auch Energiegenossenschaften verkaufen dann nicht mehr „verbrauchte Brennstoffmengen", sondern eine Art „Flatrate für bereitgestellte und für eine bestimmte Nutzung vorgesehene Leistung".

Am Anfang steht eine Investition, z. B. in eine PV-Anlage mit einer bestimmten Leistung, abgestimmt auf die jeweilige Anwendung, z. B. auf die Belieferung einer Elektrowärmepumpe mit elektrischer Energie. Überschreitet das Energieangebot der PV-Anlage die rechnerisch geplanten Erträge, z. B. in einem Jahr mit erhöhtem Strahlungsangebot bei sehr gutem Wetter, ist dieses Zusatzenergieangebot quasi kostenlos. Jede zusätzlich gelieferte kWh ist dann ein Geschenk. Die Grenzkosten der Technik sind Null.

Bereits heute hat ein Netzbetreiber die Möglichkeit, Überangebote aus PV- oder Windkraftanlagen abzuregeln. Zukünftig können diese Überschüsse zum Erreichen weitgehender Klimaneutralität für Power-to-Heat oder Power-to-X-Anlagen genutzt werden. Denn sie sind kostenlos vorhanden.

Rifkin hat in seinem bekannten und wegweisenden Werk: „Die Null-Grenzkosten-Gesellschaft" [97] und in seinem aktuellen Werk „Der Globale Green New Deal" [87] diesen „gesellschaftlich solidarischen" Weg anschaulich beschrieben. Ein Umdenken, einschließlich gesellschaftlicher Änderungen (Wertewandel) ist erforderlich. So steht es jedem Bürger frei, sich persönlich um seinen eigenen CO_2-Fußabdruck und seine eigene Energiebilanz verstärkt zu kümmern.

1.2.8 Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen

Im Folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse für eine zukünftige Modernisierungsstrategie aus der Studie zur „Sanierungswirkung“, eines Gutachtens des BMU [27], zusammengefasst:

Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle werden mit erster Priorität für bisher nicht modernisierte Wohngebäude mit einer Baualtersklasse vor 1978 als sinnvoll erachtet. Maßnahmen an der Gebäudehülle und Erneuerungen älterer Standard-, Niedertemperatur- und auch Brennwertkessel gegen neue, optimiert ausgelegte Wärmepumpen gegebenenfalls in Bivalenz mit Brennwertkesseln zusammen liefern mit der Zielsetzung „Klimaneutralität“ emissionsarme und bei steigender CO_2-Bepreisung zukünftig auch wirtschaftliche Ergebnisse.

Das mittel- bis langfristige Gesamteinsparpotenzial (2035 bis 2050) mit dem Ziel einer vollständigen Klimaneutralität (Vergleiche Kapitel 1.2.1) ergibt sich durch die beschleunigte Umstellung auf Wärmepumpen, unterstützt durch teilweise Vergrößerung von Heizkörperflächen, durch gezielt ausgewählte Maßnahmen an der Gebäudehülle und durch zusätzliche Qualitätssicherungsmaßnahmen, möglichst in der Betriebsphase unterstützt durch ein kontinuierliches Monitoring mit EAV-Auswertung (vergleiche Kapitel 1.2.4).

Unter optimalen Randbedingungen bzw. mit unterstützenden politischen Maßnahmen könnte das Potenzial einer Qualitätssicherung kurzfristig verdoppelt werden. Wenn zusätzlich alle neueren Gebäude ab der Baualtersklasse 1978 (etwa 35 % der Wohnflächen in Deutschland) durch eine nachträgliche Qualitätssicherung mit Heizungsoptimierung und hydraulischem Abgleich verbessert werden, ergeben sich Einsparpotenziale von rund 18 bis 24 TWh/a bzw. 4,7 bis 6,2 Mio. t CO_2/a [27].

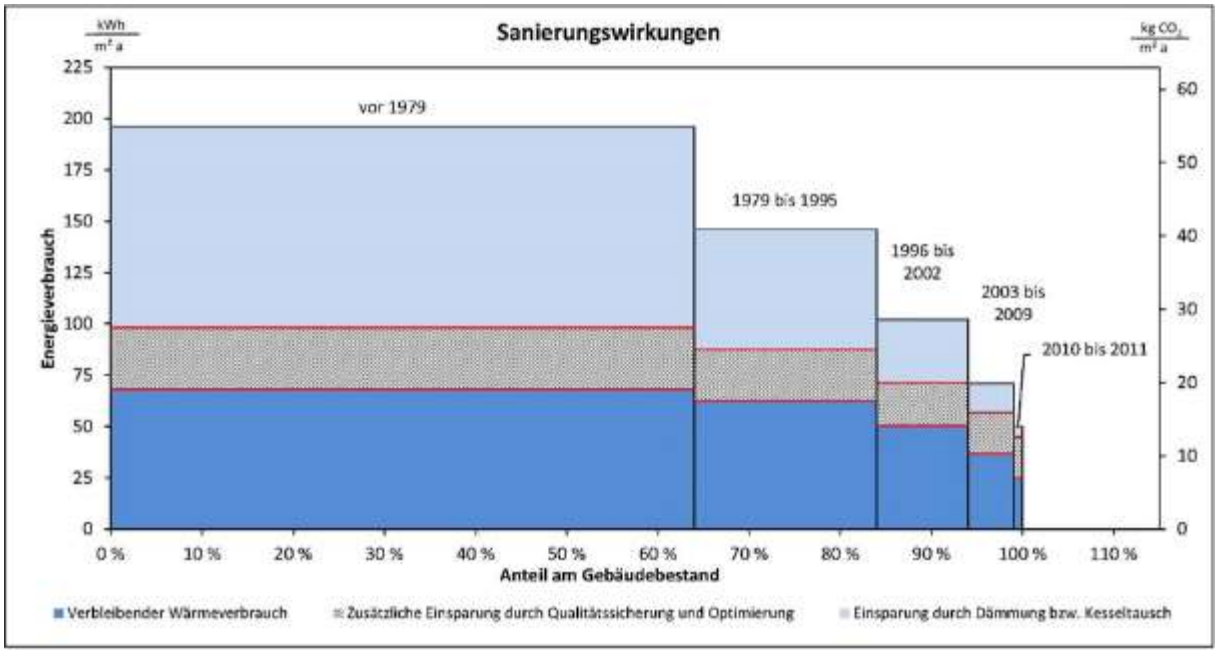


Abbildung 9 Einfluss von Sanierungsmaßnahmen auf den Energieverbrauch [eigene Darstellung] aus [27]

Ausgehend von einem durchschnittlichen Energieverbrauch für Raumheizung und Warmwasser von 169 kWh/(m²a) als Mittelwert über alle Baualtersklassen der Wohngebäude in Deutschland kann ein zweistufiges Energieeinsparpotenzial identifiziert werden.

Einerseits kann durch Sanierungsmaßnahmen ein wesentlicher Anteil des bisherigen Energieverbrauchs eingespart werden (hellblau in Abbildung 9). Dieser ist in Abhängigkeit der vorliegenden Baualtersklasse unterschiedlich hoch. Der Energieverbrauch lässt sich durch konsequente Qualitätssicherung mit Optimierungsmaßnahmen wie beispielsweise die Durchführung des hydraulischen Abgleichs (hellgrau in Abbildung 9) weiter reduzieren.

Langfristig kann über alle Bestandswohngebäude ein durchschnittlicher Nutzenergieverbrauch für Raumheizung und Trinkwarmwasser von etwa 85 bis 100 kWh/(m²a) ohne bzw. von 60 kWh/(m²a) mit zusätzlicher Qualitätssicherung und Optimierung erreicht werden.

Wird die Differenz zwischen heutigem durchschnittlichen Energieverbrauchskennwert und dem durch energetische Modernisierung mit Qualitätssicherung erreichbaren Wert mit der insgesamt zu sanierenden Fläche multipliziert, ergibt sich ein Einsparpotenzial von 380 TWh/a bzw. 64 % gegenüber dem heutigen Endenergieverbrauch auf Basis heute überwiegend eingesetzter Energieträger bzw. etwa 130 TWh/ elektrischer Energie mit Wärmepumpen aus vollständig erneuerbarer Stromerzeugung (Vergleiche Kapitel 1.2.1).

Die Erkenntnisse der BMU-Studie [27] – an der auch die Gutachter beteiligt waren – zu Kesseln, Wärmepumpen, Solarthermie und zugehöriger Qualitätssicherung sind auch in die Bearbeitung des vorliegenden Gutachtens eingeflossen.

Verschiebung des Fokus‘ von der Heizung zur Trinkwassererwärmung

Neuere Auswertungen des realen Trinkwarmwasserverbrauchs lassen zukünftige Systeme der Warmwasserbereitung in einem vollständig veränderten Rahmen sinnvoll erscheinen. In einer aktuellen eigenen Auswertung des Trinkwarmwasser-Nutzens in Mehrfamilienhäusern [98] ergaben sich aus einer Fallzahl von 34 Personen in 14 Wohnungen durchschnittliche personenbezogene Nutzwärmeverbrauchswerte von 314 kWh/(P a) bei einer Spannbreite: von 101 kWh/(P a) bis 823 kWh/(P a)] bzw. von 12 kWh/(m²a), d. h. wohnflächenbezogen mit einer Spannbreite: von 6 kWh/(m²a) bis 20 kWh/(m²a). Diese real gemessenen Werte liegen bei etwa der Hälfte bisher veröffentlichter typischer Kennwerte für den Wohnungsbau, z. B. des IWU [99], [78].

In einer umfangreichen Feldstudie eines Neubauquartiers in Landshut bestätigen die Ergebnisse von Stockinger [100] den hohen Einfluss des Nutzerverhaltens und die relativ niedrigen mittleren Nutzenergien für Trinkwarmwasser von 456 kWh/(P a) bei einer Spannbreite: von 150 kWh/(P a) bis 1040 kWh/(P a)] bzw. von 10 kWh/(m²a) mit einer Spannbreite: von 2,5 kWh/(m²a) bis 22 kWh/(m²a).

Bestätigen sich diese Ergebnisse auch in anderen zukünftig durchzuführenden Feldstudien, wären die Rahmenbedingungen zukünftiger Systeme im Vergleich zu heutigen Systemen der zentralen Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung vollständig anders. Eine wohnungsweise und dezentrale Trinkwarmwasserbereitung – entweder elektrisch direkt, mit Kleinspeicher oder z. B. mit einer Abluftwärmepumpe wäre die sinnvolle Konsequenz.

Das veränderte Nutzerverhalten (nicht immer tägliches Duschen mit Wasserspararmaturen, Duschen nach dem Sport oder im Fitnessstudio und nicht mehr in der eigenen Wohnung) führt zu veränderten Rahmendaten, vor allem für Mehrfamilienhäuser. Dies wird in Anhang 3.9.4 vertieft.

Standards für die Zukunft

Von den vielen, bei System- und Technologieoffenheit derzeit am Markt angebotenen Systemen, wollen die Gutachter nachfolgend diejenigen ausschließen, die nach derzeitigem Wissensstand mittel- und langfristig keine wesentlichen CO_2-Minderungen zur Erreichung des Ziels der Klimaneutralität erzielen werden. Deshalb kann das Beschreiten des Elektropfades wesentliche Investitionen vermindern (Vergleiche Kapitel 1.2.1).

In den Kapiteln zur Mikro- und Makroperspektive wird dieses „Ausschlussverfahren“ begründet. Dazu zählen:

- Bei Ersatz bestehender Wärmeerzeuger kein weiterer Einsatz allein von Öl- oder Gasbrennwertkesseln. Und wenn, dann nur in Ausnahmefällen oder als Hybridanlagen, wenn keine ausreichenden Voraussetzungen für einen reinen Wärmepumpenbetrieb gegeben sind.
- Trinkwarmwasserbereitung kurz-, mittel- und langfristig direkt elektrisch oder elektrisch mit verschiedenen Wärmepumpenlösungen: Abluft, gebäudeweise mit wohnungsweisen Übergabestationen; kein Ausbau von Solarthermie im Mehrfamilienhausbereich bzw. Geschosswohnungsbau (aufgrund der damit verbundenen Netz- und Speicherverluste sowie der entgangenen Flächenpotentiale für Photovoltaik)
- Kein weiterer Ausbau von konventionellen Nah- und Fernwärmesystemen, auch nicht in dicht besiedelten Gebieten, da eine langfristig regenerative Versorgung dieser Netze absehbar nicht gesehen wird – Stichwort „Fernwärme 4.0“ – und der dazu notwendige Einsatz erneuerbarer Energiequellen wie PV und Windkraft in keinem ökologisch und ökonomisch vertretbaren Verhältnis zum eigentlichen Nutzen für die vorrangige Trinkwarmwasserbereitung im Sommer und der Heizwärmeerzeugung mittel- und langfristig weitgehend gedämmter Gebäude im Winter steht. Hier wird das Prinzip gelten: „erst dämmen – dann Einsatz dezentraler Wärmepumpenlösungen mit PV, möglichst auf dem eigenen Dach“

- Kein weiterer Ausbau von KWK, von dezentralen kleinen BHKWs bis hin zu größeren erdgasbefeuerten Heizkraftwerken zur Nah- und Fernwärmeversorgung. Zentrale heute mit Erdgas, zukünftig mit Wasserstoff oder synthetischem Methan befeuerte reine Gaskraftwerke zur Stromerzeugung (auch des Stroms für Elektrowärmepumpen in Zeiten der Wind- oder PV-Flaute) erfordern einen geringeren Ausbau von PV-Flächen und Windkraftanlagen als zentrale Nah- und Fernwärmesysteme.
- Zukünftige Nutzung von Dach- und Gebäudeflächen für vorrangigen PV-Ausbau
- Einsatz von Luft als Wärmequelle für Wärmepumpen oder von Erdreichflächen – wenn vorhanden; aber auch von Gebäudeflächen oder naheliegender weiterer Wärmequellen zum forcierten Ausbau von Wärmepumpentechnologie; auch „Kalte Fernwärme“ aus Abwärme, Flächenkollektoren oder Erdsonden als Wärmequelle für gebäudeweise Wärmpumpen, getrennt für Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung sind effiziente Lösungen
- Biomasse als Energiequelle wird nur geringe Anteile einnehmen, da das Biomassebudget begrenzt ist, wie bereits Untersuchungen des IWU [57] nachgewiesen haben.

1.3 Ausgangslage – der Gebäudebestand, Energieverbrauch und Emissionen

Das nachfolgende Kapitel erläutert die Datenlage, welche dem Bericht und den Berechnungen zugrunde liegt. Dies ist primär der Gebäudebestand der Wohn- und Nichtwohnbauten im heutigen Zustand mit Flächen, baulichen und anlagentechnischen Qualitäten sowie Verbrauchsdaten. Es lassen sich Typgebäude ableiten, die vorgestellt werden. Außerdem werden das Rechenmodell sowie die wesentlichen Auswerteroutinen vorgestellt.

1.3.1 Gebäudebestand

In Deutschland gibt es Stand Ende 2018 insgesamt 19,05 Mio. Wohngebäude, von denen 83 % Ein- und Zweifamilienhäuser sind, der Rest sind Mehrfamilienhäuser und in sehr geringer Zahl Wohnheime. Die Gebäude gliedern sich in 40,83 Mio. Wohneinheiten, von denen 46 % in Ein- und Zweifamilienhäusern, der Rest in Mehrfamilienhäusern und Heimen zu finden sind. Der Wohnungsbau umfasst 3,75 Mrd. Quadratmeter Wohnflächen. Knapp 60 % aller Flächen sind den Ein- und Zweifamilienhäusern zuzuordnen.

Die Daten entstammen den Erhebungen des statistischen Bundesamtes [1]. Eine detaillierte Darstellung, auch der zeitlichen Zuwächse für Gebäude, Wohneinheiten und Flächen seit 1995 ist Anhang 5.1 zu entnehmen. Aus den Daten lassen sich durchschnittliche Gebäude hinsichtlich der Größe ableiten. Auch die Personenzahl wird dabei einbezogen.

Die pro Kopf verfügbare Wohnfläche steigt stetig an – seit 2010 jährlich um 0,3 m²/Person. Sie lag Ende 2018 bei 45,9 m²/Person [1]. In Einfamilienhäusern stehen jeder Person deutlich mehr Flächen zur Verfügung als im Mehrfamilienhaus, siehe auch Definition der Typgebäude in 1.3.2. Weitere Einflussmerkmale sind u. a. die Lage im urbanen oder ländlichen Raum und die Eigentümerstruktur, siehe ausführliche Beschreibung in Anhang 5.1.3 und 5.1.4.

Die Wohnfläche dient in diesem Gutachten als Bezugsfläche aller Betrachtungen. Allerdings werden die Personenbelegungen zur Abschätzung des Haushaltsstrombedarfs sowie der Trinkwarmwassermengen herangezogen.

In Deutschland gibt es darüber hinaus etwa 2,7 Mio. Nichtwohnbauten mit 1,35 Mrd. m² Nettogrundflächen [3]. Sie stehen nicht im Fokus des Gutachtens; eine detaillierte Beschreibung zu Flächen, zum energetischen Zustand und der Versorgung ist Anhang 5.7.2 zu entnehmen.

Wärmeerzeuger

Im Bestand sind etwa 20,7 Millionen Wärmeerzeuger in Gebäuden installiert; diese Zahl hat sich in den letzten Jahren wenig geändert [2] [3] [4], allerdings hat sich die Zusammensetzung der Gesamtmenge in Richtung Brennwerttechnik verschoben. Der Markt ist dominiert von fossilen Energieträgern.

Eine BDEW-Studie [5] kommt auf Basis der Zahlen bis zum Jahr 2018 zu einem mittleren Alter der Gebäudewärmeerzeuger von 17,0 Jahren. In Mehrfamilienhäusern liegt der Wert (17,8 Jahre) noch etwas über dem Wert für Einfamilienhäuser (16,3 Jahre). Die Modernisierungsrate von Hauptwärmeerzeugern wird im Datenbasisprojekt des IWU [7] mit ca. 3 %/a festgestellt – das spricht für eine durchschnittliche Betriebsdauer von 33 Jahren. Der Wert deckt sich mit der Erkenntnis des BDEW.

Der Energieträgerwechsel – zumeist im Rahmen einer ohnehin anstehenden Modernisierung – ist insgesamt nicht stark verbreitet. Die größten Änderungen ergeben sich durch Abwanderung von Heizöl zu Erdgas oder Fernwärme. Ausgehend von der Einschätzung der Nutzer und deren Zufriedenheit mit dem Status Quo besteht kein Handlungsbedarf, den Energieträger oder das Heizungssystem zu wechseln.

Weitere grafische Aufbereitungen zu den Erzeugern sind Anhang 5.6.1 zu entnehmen. Eine Zuordnung typisch vorkommender Erzeuger und Systeme zu Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Mehrfamilienhäusern erfolgt in Kapitel 1.3.2.

Typologie

Das Mengengerüst einer Typologie dient in einer Modellierung (Buttom-Up-Modell) dazu, den Gesamtenergieverbrauch, die Gesamtemissionen usw. des Sektors „Gebäude“ nachzubilden. Dazu werden typische Vertreter von Gebäuden stellvertretend bilanziert und anschließend mit einer Stückzahl ähnlicher Objekte hochgerechnet.

Als Datengrundlage für die Wohnbaubewertung dienen im Wesentlichen zwei Datenquellen: die Datenerhebungen von IWU [6] [7] und ARGE [8].

Das IWU verfeinerte über Jahrzehnte die theoretische Datenbasis zu „Typgebäuden“ als Mengengerüst (typische Wohnflächen, Hüllflächen, Eigenschaften der Gebäudehülle, Ausstattung mit technischen Anlagen) – also Eigenschaften, auf deren Basis eine Bedarfsenergiebilanz der Typgebäude erfolgen kann. Anhand von Häufigkeitsverteilungen verschiedener Merkmale (Sanierungsgrad der Hülle, Ausstattung mit Wärmeerzeugern usw.) ergibt sich eine große Kombinatorik von berechneten Energiemengen der Einzelgebäude. Letztlich werden zum Hochrechnen die statistisch erfassten Gesamtwohnflächen bzw. Gebäude- und Wohneinheitenzahlen benötigt. Es resultiert eine theoretisch berechnete Gesamtenergiemenge für den gesamten deutschen Wohngebäudebestand. Die Problematik, dass berechneter Bedarf und gemessener Verbrauch von Gebäuden nicht zwangsläufig identisch sind (vgl. auch Detailausführungen in Anhang 5.2), ist dabei bekannt und erkannt, jedoch noch nicht gelöst.

Die Datenerhebung von ARGE geht daher den umgekehrten Weg: unabhängig von einzelnen Gebäudehüllflächen, einzelnen wärmetechnischen Qualitäten der Hülle und verschiedenen Erzeugern wird in der Statistik der tatsächliche Verbrauch von Gebäuden erhoben. Durch identische Typologisierung wie das IWU liegen somit zusätzlich die tatsächlichen mittleren Verbräuche vor. Damit kann eine direkte Validierung der theoretischen Annahmen erfolgen. Zumindest im statistischen Mittel und mit den üblichen Unsicherheiten sollten die vom IWU erfassten Randdaten in einer Bedarfsenergiebilanz zu den von ARGE erfassten Verbräuchen passen. Die Gutachter sehen aus Erfahrung mit Projekten (z. B. [26]) eine Annäherung auf ± 10 % als realistisch an.

Eine weitere Vertiefung zu beiden Ansätzen ist in Anhang 5.7.1 zu finden. Innerhalb des vorliegenden Gutachtens wird die IWU-Typologie genutzt, um zwei Typgebäude abzuleiten. Die berechneten Bedarfswerte werden anhand der real gemessenen Verbrauchswerte von ARGE validiert.

1.3.2 Typgebäude des Gutachtens

Zur Veranschaulichung möglicher Energie- und Emissionseinsparungen sowie der zugehörigen Wirtschaftlichkeit wird auf zwei Beispielgebäude zurückgegriffen. Die Gebäudetypen (EZFH und MFH) sind aus den Beispielgebäuden der Studie „Zielerreichungsszenario 2013“ von Diefenbach et al. [62] erzeugt worden. Eine Anpassung an die aktuellen Zahlen des statistischen Bundesamtes zur Entwicklung des Gebäudebestandes [101] hat stattgefunden. Das konkrete Verfahren ist in Anhang 3.1 beschrieben.

Ein- und Zweifamilienhaus

Das durchschnittliche Ein- und Zweifamilienhaus weist 1,2 Wohneinheiten und eine Wohnfläche von knapp 142 m² auf. Es ist etwa 15,8 Millionen Mal in Deutschland vorhanden. Hinsichtlich der Alterstypologie könnte es ein Objekt aus der Altersklasse F „1969-1978“ nach IWU [102] sein, weil Gebäude dieser Altersklasse die größte Einzelgruppe unter den Ein- und Zweifamilienhäusern sind. Eine beispielhafte Visualisierung zeigt Abbildung 10.

Abbildung 10 Beispielhaftes Ein- und Zweifamilienhaus [eigenes Bild]

Mehrfamilienhaus

Das durchschnittliche Mehrfamilienhaus weist 6,8 Wohneinheiten und eine Wohnfläche von etwa 470 m² auf. Es ist etwa 3,2 Millionen Mal in Deutschland vorhanden.

Hinsichtlich der Alterstypologie könnte es ein Objekt aus der Altersklasse E „1958-1968“ nach IWU [102] sein, weil Gebäude dieser Altersklasse die größte Einzelgruppe unter den Mehrfamilienhäusern sind. Eine beispielhafte Visualisierung zeigt Abbildung 11.

Abbildung 11 Beispielhaftes Mehrfamilienhaus [eigenes Bild]

Bilanzranddaten und Eigenschaften der Typgebäude

Die zugehörigen Daten der Belegung, Größe, Gebäudehülle und Anlagentechnik sind Tabelle 12 zu entnehmen. Die zugehörigen Datenquellen sind im Detail in Anhang 3.1 benannt.

Weitere Eigenschaften, z. B. die Qualitäten der Hülle und die Effizienzen der Erzeuger werden im Zusammenhang mit der Ergebnisauswertung der einzelnen Sanierungsüberlegungen benannt.

		EZFH		MFH	
Gesamtfläche	[m²]	2.242.305.000		1.511.410.000	
Wohneinheiten	[WE]	18.966.444		21.862.273	
Stückzahl	[G]	15.837.211		3.216.005	
Grunddaten des Einzelobjektes					
Wohnfläche	[m²/G]	141,6		470,0	
Wohneinheiten	[WE/G]	1,2		6,8	
Personenbelegung	[P/G]	2,74		12,18	
pro-Kopf-Wohnfläche	[m²/P]	51,6		38,6	
Gebäudehülle des Einzelobjektes					
Wand	[m²/G]	145,3		343,5	
Dach/Obere Geschossdecke	[m²/G]	108,2		208,7	
Boden/Kellerdecke	[m²/G]	88,7		180,7	
Fenster	[m²/G]	28,5		96,4	
Häufigkeiten für den oberen Gebäudeabschluss					
Dach	[-]	0,53		0,40	
Obere Geschossdecke	[-]	0,47		0,60	
Häufigkeiten für den unteren Gebäudeabschluss					
Bodenplatte	[-]	0,48		0,14	
Kellerdecke	[-]	0,52		0,86	
Haupterzeuger für Heizung (H) und Trinkwarmwasser (TWW)					
		H	TWW	H	TWW
Holzkessel	[-]	0,061	0,061	0,021	0,021
Erdgas NT	[-]	0,275	0,247	0,301	0,242
Heizöl NT	[-]	0,249	0,224	0,151	0,121
Erdgas Brennwert-Kessel	[-]	0,241	0,217	0,261	0,210
Heizöl Brennwert-Kessel	[-]	0,039	0,035	0,023	0,018
Fernwärme	[-]	0,040	0,040	0,192	0,192
Strom	[-]	0,033	0,120	0,034	0,180
Außenluft Wärmepumpe	[-]	0,038	0,034	0,011	0,009
Erdreich Wärmepumpe	[-]	0,023	0,023	0,007	0,007
Häufigkeiten für die Übergabesysteme					
Heizkörper	[-]	0,80		0,90	
Fußbodenheizung	[-]	0,20		0,10	
Häufigkeiten für den Verlegeort der zentralen Heizleitungen					
beheizter Bereich	[-]	0,30		0,10	
Keller	[-]	0,70		0,90	
Häufigkeiten für die Art der Trinkwassererwärmung					
zentral	[-]	0,88		0,82	
dezentral elektrisch	[-]	0,12		0,18	
Häufigkeiten für das Vorhandensein von Zirkulation bei zentraler Versorgung					
mit	[-]	0,50		0,80	
ohne	[-]	0,50		0,20	
Häufigkeiten für das Vorhandensein von Zusatzerzeugern					
Solarthermie	[-]	0,20		0,09	
Photovoltaik	[-]	0,14		0,06	
Lüftung Wärmerückgewinnung	[-]	0,03		0,01	

Tabelle 12 Beschreibung des Typ-EZFH und des Typ-MFH [eigene Darstellung]

Grundbilanz

Werden alle Eigenschaften der beiden Gebäude auf ihre jeweiligen Durchschnittswerte festgelegt, entsteht die mittlere Energiebilanz für die Gebäude. Die komplette Grundbilanz mit allen Größen ist Anhang 3.1.3 zu entnehmen. Eine gekürzte Version zeigt Tabelle 13.

	Typgebäude		EZFH		MFH	
	Qualitätssicherung		mit	ohne	mit	ohne
Hülle	Güte der Hülle H_T'	W/(m²K)	0,67	0,69	0,74	0,76
	Baustandard/ Fingerabdruck h	W/(m²K)	2,01	2,15	1,61	1,73
Heizenergie	Heizwärme	kWh/(m²a)	115	125	84	93
	Endenergie Heizung	kWh/(m²a)	137	160	102	122
Trinkwarmwasse-renergie	Trinkwarmwassernutzen	kWh/(m²a)	11	11	15	15
	Endenergie Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	26	29	32	34
Strombilanz	Haushaltsstrom	kWh/(m²a)	24	24	32	32
PV-Bilanz	PV Strom selbst genutzt	kWh/(m²a)	1	1	0	0
	PV Strom rückgespeist	kWh/(m²a)	7	7	2	2
	PV Strom gesamt	kWh/(m²a)	8	8	2	2
Endenergie	Wärme (ohne PV-Nutzung)	kWh/(m²a)	163	189	134	156
	Haushaltsstrom (ohne PV-Nutzung)	kWh/(m²a)	24	24	32	32
	gesamt (incl. PV-Nutzung)	kWh/(m²a)	180	206	165	187
Primärenergie	Wärme (ohne PV-Nutzung)	kWh/(m²a)	174	202	144	167
	Haushaltsstrom (ohne PV-Nutzung)	kWh/(m²a)	44	44	58	58
	gesamt (incl. PV-Nutzung)	kWh/(m²a)	216	245	202	225
Emissionen	Wärme (ohne PV-Nutzung)	kg/(m²a)	38	45	32	37
	Haushaltsstrom (ohne PV-Nutzung)	kg/(m²a)	11	11	14	14
	gesamt (incl. PV-Nutzung)	kg/(m²a)	49	55	47	52
Energiekosten	Wärme (ohne PV-Nutzung)	€/a	1708	1974	5134	5864
	Haushaltsstrom (ohne PV-Nutzung)	€/a	1066	1066	4721	4721
	gesamt (incl. PV-Nutzung)	€/a	2651	2917	9754	10484
	Wärme (ohne PV-Nutzung)	€/(m²a)	12,1	13,9	10,9	12,5
	Haushaltsstrom (ohne PV-Nutzung)	€/(m²a)	7,5	7,5	10,0	10,0
	gesamt (incl. PV-Nutzung)	€/(m²a)	18,7	20,6	20,8	22,3

Tabelle 13 Grundbilanz für durchschnittliche EZFH und MFH mit und ohne Qualitätssicherung [eigene Darstellung]

Unterstellt man Stand 2020 eine Gewichtung von 15 % der Gebäude mit und 85 % ohne Qualitätssicherung, ergibt sich für ein durchschnittliches EZFH ein wohnflächenbezogener Endenergiekennwert für Wärme von 185 kWh/(m²a). Das MFH weist 153 kWh/(m²a) auf, das Durchschnittsgebäude Deutschland 172 kWh/(m²a). Diese Werte decken sich gut mit den Verbrauchsdaten aus der Statistik, z. B. ARGE [8]. Die Gesamtendenergie für Wärme (Heizung plus Warmwasser, ohne Haushaltsstrom) ergibt sich aus dem gewählten Ansatz zu 647 TWh/a.

1.3.3 Energieverbrauch

Gesamtverbrauch für Wärme und Strom

Der Verbrauch der privaten Haushalte machte im Jahr 2018 (aktuellstes verfügbares Jahr) 18 % des Gesamtenergieeinsatzes aus. Aus Sicht der vier als Abnehmer der Endenergie genannten Sektoren liegt der Anteil bei 28 %, siehe Abbildung 12. Die Differenz zwischen dem Endenergieverbrauch der 4 Sektoren und der Zufuhr sind einerseits Umwandlungsverluste, aber auch nicht energetischer Verbrauch.

Die Werte sind nicht witterungskorrigiert, daher fallen einzelne warme Jahre (z. B. 2007, 2014) auf. Der Trend des Gebäudeverbrauchs – über die letzten 2 Jahrzehnte betrachtet – ist leicht rückläufig. Da die Darstellung auch regenerative Energien enthält (Addition aus Gas, Heizöl usw., aber auch Solarthermie und Umweltwärme), sind die Veränderungen bei der Beheizung nur bedingt erkennbar, aber die tatsächliche Einsparung von Energie (z. B. durch Dämmung).

Die Vorverluste von Strom und Fernwärme sind im Gesamtwert enthalten (sie sind nicht Teil der „Endenergie Haushalte“). Ein Wechsel zu diesen beiden Energieträgern vermindert die sektoralen Anteile (und suggeriert optisch eine Einsparung), jedoch nicht zwangsläufig die Gesamtmenge an Aufwand.

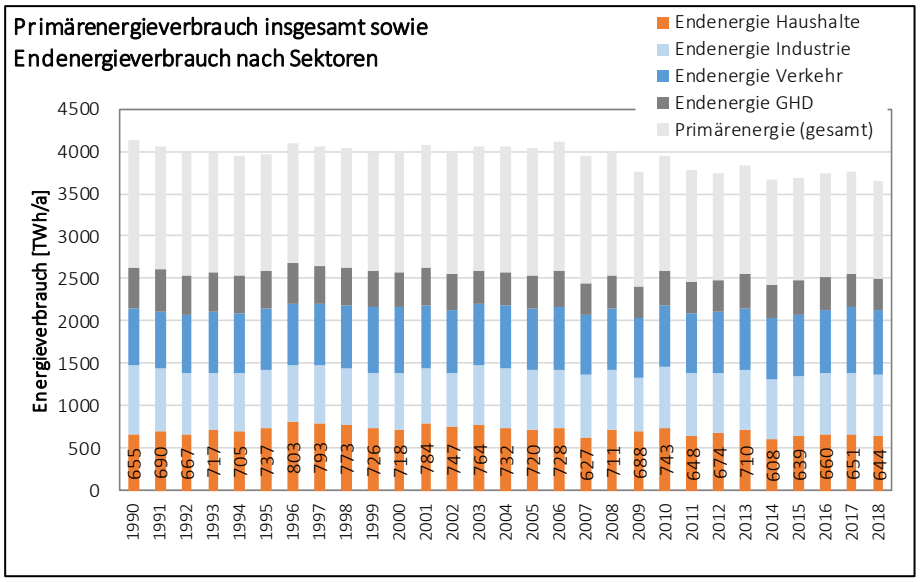


Abbildung 12 Primärenergieverbrauch sowie Endenergieverbrauch nach Sektoren, eigene Darstellung nach [12]

Betrachtet man allein die privaten Haushalte, deren Belegung mit Personen und Wohnflächen, ergeben sich die Kennwerte in Abbildung 13. Der Verbrauch ist nicht witterungskorrigiert und enthält alle Anteile elektrischen Stroms (unabhängig für welche Anwendung). Der wohnflächenbezogene Mittelwert der letzten Jahre liegt bei ca. 170 kWh/(m²a) Endenergie bzw. personenbezogen bei 7800 kWh/(Pa). Während der flächenbezogene Kennwert erkennbar sinkt (vor allen da die Flächen steigen), stagniert der personenbezogene Wert fast bzw. sinkt nur leicht.

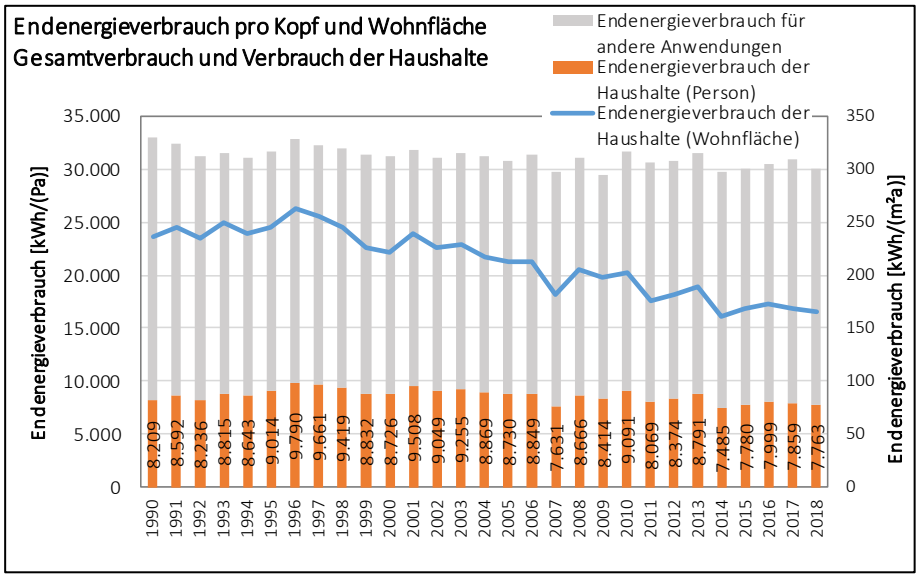


Abbildung 13 Endenergieverbrauch pro Kopf und Wohnfläche, eigene Darstellung nach [12]

Die privaten Haushalte beziehen Brennstoffe oder erneuerbare Energien direkt an der Gebäudegrenze. Für diesen Verbrauchsanteil fallen innerhalb des Gebäudes Verluste bei der Umwandlung, Verteilung und Speicherung an. Eine Zusammensetzung sowie Veränderungstrends zeigt Abbildung 14.

Der erneuerbare Anteil steigt über die Zeit, dennoch machen die fossilen Energieträger noch immer den größten Anteil aus. Darüber hinaus werden vorverlustbehaftete Energieträger – Strom und Fernwärme – geliefert, die ihrerseits selbst aus einem Mix von Energieträgern bestehen.

Weitere Ausführungen, u. a. auch zu der Zusammensetzung der Fernwärme und des Stroms sind in Anhang 5.4.1 zu finden.

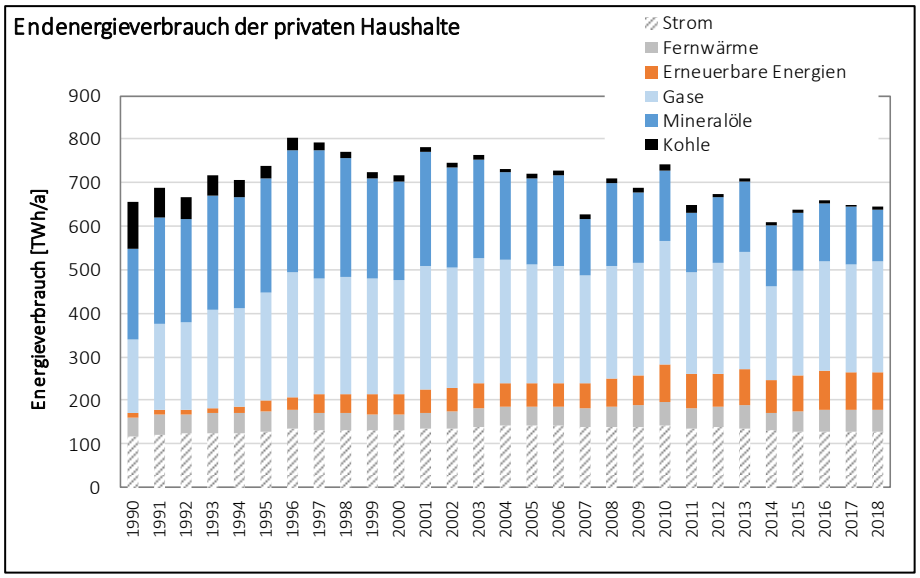


Abbildung 14 Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern, eigene Darstellung nach [12]

Verbrauch nach Gebäudealter

Das Ergebnis einer Stichprobenuntersuchung der DENA zeigt Abbildung 15. Die Daten sind Energieausweisen entnommen und entsprechend witterungskorrigiert (mittlerer Standort Deutschland). Da die Originaldaten bezogen auf die EnEV-Fläche A_N waren, erfolgte nachträglich für das vorliegende Gutachten eine Umrechnung auf die Wohnfläche anhand typischer Umrechnungsfaktoren (ausführlich siehe Anhang 5.1.5). In der Mehrzahl der Gebäude ist ein Anteil für die zentrale Trinkwarmwasserbereitung enthalten. Die dezentrale Trinkwarmwasserbereitung ist entweder pauschal enthalten (neuere Energieausweise) oder nicht enthalten. Die Kennwerte sind daher mit Unsicherheiten behaftet. Vor allem in den Baualtersklassen, die nennenswerte Anteile an elektrischer Warmwasserbereitung aufweisen (eher Altbau). Die Werte sind heizwertbezogen.

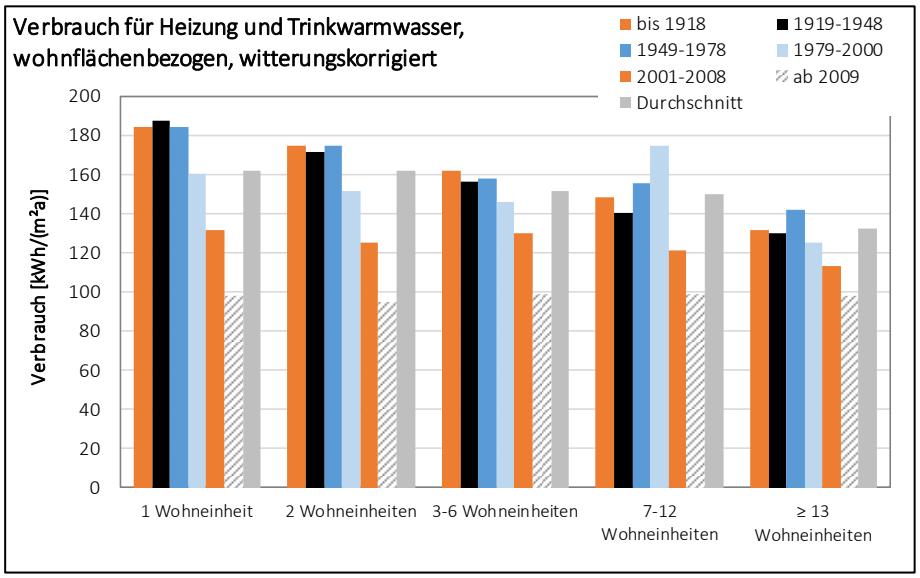


Abbildung 15 Verbrauch Heizung und Trinkwarmwasser nach Gebäudeklassen, Werte nach [9] umgerechnet

Die Auswertung zeigt, dass im Neubau kaum eine Abhängigkeit des Verbrauchs von der Gebäudegröße gegeben ist. Im Bestand ist dies deutlicher ausgeprägt. Vor allem die Mehrfamilienhäuser, die noch vor einer größeren Sanierung stehen (Baujahre 1979 - 2000) schneiden vergleichsweise schlecht ab.

Der Durchschnittsverbrauch über alle Altersklassen liegt bei ca. 162 kWh/(m²a) (EZFH) und 147 kWh/(m²a) (MFH). Die brennwertbezogenen Werte liegen etwa 7 % höher bei 173 kWh/(m²a) (EZFH) und 158 kWh/(m²a) (MFH). Unter anderem dienen diese Werte der Validierung des eigenen Rechenmodells, ebenso wie Daten von TECHEM [103] [104] sowie statistische Erhebungen von IWU [22] und ARGE [8].

Verbrauch für Trinkwarmwasser

Anhand eigener Untersuchungen [23] [105] [95] zeigt sich, dass die Aufwendungen für die Trinkwassererwärmung sehr deutlich von Verlusten geprägt sind, siehe auch Hintergrundinformationen in Anhang 5.4.2.

Aus einer Feldstudie der Gutachter leiten sich folgende Werte für die dort untersuchten Einfamilienhäuser ab [23]: im typischen EFH kommen zum flächenbezogenen Nutzen von etwa 12 kWh/(m²a) noch einmal Verteilverluste (mit Speicher) von etwa 6 kWh/(m²a) in Netzen ohne Zirkulation oder 17 kWh/(m²a) in Netzen mit Zirkulation hinzu. Der Verteilungsnutzungsgrad liegt entsprechend bei 67 bis 42 %.

Auch TECHEM ermittelt in den Beständen der Wohnungswirtschaft ähnliche Zahlen [104]: in typischen mit Erdgas oder Fernwärme versorgten MFH stellt TECHEM eine Nutzwärmemenge von 14 bis 15 kWh/(m²a) fest, jedoch Verteil- und Speicherverluste von 15 bis 17 kWh/(m²a). Diese Netze mit Zirkulation haben also Verteilungsnutzungsgrade im Bereich 46 bis 49 %.

Aufgrund der großen Verlustketten und gleichermaßen der abnehmenden Belegungsdichten in den Gebäuden rückt die Trinkwassererwärmung – und ggf. eine Dezentralisierung – in den Fokus der Betrachtungen eines Energiekonzeptes. Damit stehen auch für die Heizung andere Optionen offen.

Im Rahmen der Untersuchungen zu diesem Gutachten wurde ein besonderes Augenmerk auf diese Thematik gelegt.

Aggregation von Einzel- zu Gesamtdaten

Der Endenergieverbrauch der Gebäude könnte aus Einzelmessungen aller Gebäude addiert werden (Buttom-Up-Modell). Da die Messung bzw. die Archivierung der Messwerte nicht flächendeckend gegeben sind, finden real Näherungsberechnungen statt. Aus dem Gesamtverbrauch wird durch Sektorenaufteilung der Gebäudeverbrauch bestimmt, welcher dann auf Wohn- und Nichtwohngebäude verteilt wird, dann auf die Wohngebäude unterschiedlicher Größe, auf Heizung und Trinkwarmwasseranwendungen usw. (Top-Down-Modell). Maßgeblich ist die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen AGEB mit dieser Aufgabe betraut (Ergebnisse siehe [18]).

Eckwerte des AGEB-Modells sind unter anderem gegeben durch Einzelmessungen kleiner Stichproben sowie aus der statistischen Erhebung zu Wohneinheitenzahlen, Wohnungsgrößen, Versorgungs- und Erzeugerstrukturen, Umsatz an zentralen Wärmeerzeugern und anderen Branchendaten, die u. a. das Statistische Bundesamt erhebt (Ergebnisse siehe [101]). Außerdem sind die gehandelten Energiemengen (Einkauf, Verkauf) bekannt.

Die AGEB-Verbrauchsanalyse (Top-Down) des bundesdeutschen Gesamtverbrauchs nutzt in weiten Teilen die gleichen statistischen Eingangsdaten wie Bedarfsprognosen (Buttom-Up), welche mit Hilfe von Typologien den Gesamtbestand aus einer Summe von Einzelgebäuden nachbilden. Die beiden grundsätzlichen Modelle und deren Ergebnisse nähern sich über die Zeit zwangsläufig aneinander an. Das ist über die letzten 20 Jahre zu beobachten und als positiv zu bewerten. Allerdings kann eine Validierung der beiden Modelle nur noch bedingt erfolgen. Alle Fehler, die durch Fehlannahmen in beiden Modellen vorhanden sind, können nicht ohne neue Messungen (neuer Dateninput von außen) gefunden werden.

Das betrifft insbesondere Inputgrößen, die sich schwer messen lassen (Luftwechsel, realer Einfluss von Wärmebrücken). Aber auch Größen, die messbar wären, jedoch zu einer sehr kleinteiligen Messung führen würden (einzelne Stromverbraucher, einzelne Erzeuger).

Die Nutzung regenerativer Wärmemengen fällt auch in diesen Themenkreis. Sie wird größtenteils nicht gemessen. Allerdings treffen die AGEB-Energiebilanzen hierzu Aussagen in jedem Jahresbericht. Hier erfolgt zwangsläufig eine reine Berechnung, z. B. über die bei den Fördermittelgebern oder im Rahmen von Bauanträgen registrierten Erzeugerzahlen an Wärmepumpen oder Kollektorflächen. Für die Kollektorflächen werden allenfalls Stichprobeneffizienzmessungen gemacht; in der Masse erfolgt eine Hochrechnung auf Basis angenommener kollektorflächenbezogener Erträge. Es handelt sich um dieselben Annahmen, die auch in Typologien zu finden sind. Bei den Wärmepumpen werden Arbeitszahlen angenommen, ggf. durch kleine Stichproben plausibilisiert, um die nutzbar gemachte Umweltwärme abzuschätzen.

Sowohl die Buttom-Up-Modelle, als auch die Top-Down-Bewertung müssen - bei gleicher Annahme von kollektorflächenbezogenen Erträgen und Arbeitszahlen - zum selben Ergebnis kommen. Ob dies der Wirklichkeit entspricht, kann weder bestätigt, noch widerlegt werden. Viele Praxisuntersuchungen der Gutachter lassen vermuten, dass eine Reihe von Fehlannahmen bestehen, da die reale Qualität schlechter ist als die angenommene.

Mindestens ausgewählte Stichprobenuntersuchungen zu bestimmten Themen wären daher angebracht, z. B. Detailanalysen von gemessenen Verlusten bei der Verteilung von Energie – so dass die Notwendigkeit entfällt, theoretisch/rechnerischen Annahmen zu treffen. Notwendig erscheinen auch Effizienzuntersuchungen aller Erzeuger (auch der regenerativen!) sowie eine statistische Auswertung und Aufbereitung der Daten.

Bedarf und Verbrauch

Für Energiemengen, z. B. Endenergien, gelten in Normen und Regelwerken seit etwa 20 Jahren innerhalb des deutschen Sprachraums folgende flächendeckend zur Anwendung kommenden Definitionen:

- Energiebedarf: ist eine rechnerisch bestimmte Energiemenge unter Annahme von geometrischen und physikalischen (energetischen) Eigenschaften des Baukörpers, der Nutzung und Anlagentechnik
- Energieverbrauch: ist eine gemessene Energiemenge.

Sofern die angenommenen Nutzungsranddaten (z. B. Raumtemperaturen bei der Bewertung eines Gebäudes), aber auch die Effizienzmerkmale der Gebäudehülle und Anlagentechnik, die dem rechnerischen Energiebedarf zugrunde liegen, auch den realen Randdaten entsprechen, können Bedarf und Verbrauch zahlenmäßig gleich sein. Gleiches gilt für andere äußere Randdaten (z. B. Außentemperaturen, Solarstrahlung für die Gebäudebewertung).

Nach Erhebungen der Deutschen Energieagentur [3], des IWU [22], aber auch eigenen Untersuchungen [23] liegt jedoch der Unterschied zwischen Bedarfs- und realen Verbrauchswerten für die Endenergie von wenig sanierten Wohngebäuden vor 1977 in der Größenordnung von 50 bis 70 kWh/(m²a) – berechnet werden 250 kWh/(m²a), gemessen nur 180 bis 200 kWh/(m²a). Im Bereich der teilsanierten Gebäude und Neubauten bis ca. EnEV 2009 gleichen sich Bedarf und Verbrauch an. Jedoch im Bereich der hohen baulichen Standards (nach 2008 bzw. unter ca. 100 kWh/(m²a)) dreht sich das Verhältnis um, siehe kreisförmige Markierung in Abbildung 16. Hier werden Energiebedarfswerte von 50 kWh/(m²a) prognostiziert, aber 60 … 70 kWh/(m²a) tatsächlich gemessen.

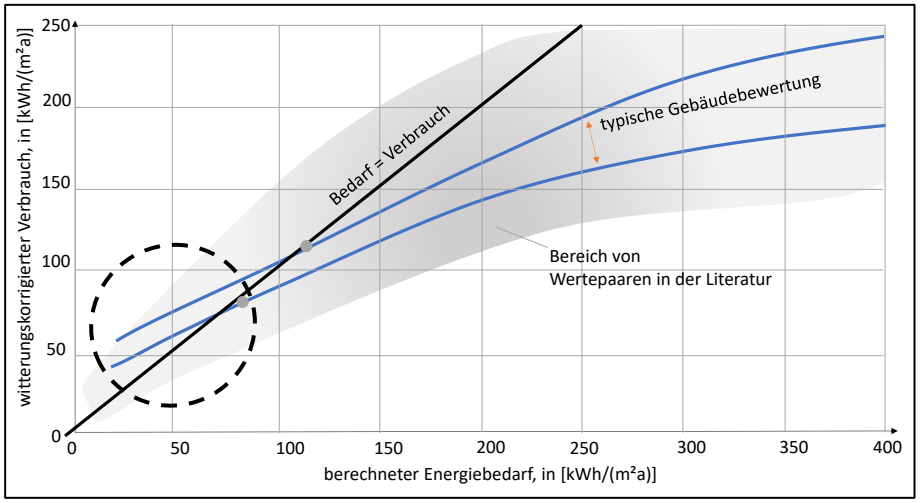


Abbildung 16 Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch, schematische Zusammenfassung aus [24] [22] [23]

Einflüsse auf die Energiebilanz

Ein Teil der Erklärung sind zu gute oder schlechte Effizienzannahmen bei der Berechnung. Aber auch die Fehleinschätzung des Nutzerverhaltens kann eine Ursache sein. In der Konsequenz wird häufig der Bestand schlechter abgebildet als er ist, aber der Neubau oder die Sanierung besser, siehe Abbildung 17.

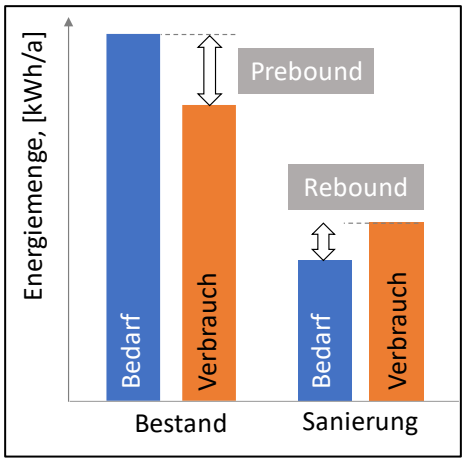


Abbildung 17 Schematische Erläuterung der Begriffe „Prebound“ und „Rebound“ [eigene Darstellung]

Gebäude mit geringem Bedarf, d. h. Neubauten oder modernisierte Bestandsbauten, verbrauchen mehr als berechnet (Rebound-Effekt), aber der unsanierte Bestand verbraucht weniger als berechnet (Prebound-Effekt). Das damit einhergehende Problem, dass die rechnerische Einsparung zu groß ausfällt, ist in der Grafik offensichtlich. Bezogen auf die schematische Skizze ist die Differenz der beiden blauen Balken gut doppelt so hoch wie die der orangenen.

Eine genaue Trennung zwischen Gebäude, Technik und Nutzer kann kaum erfolgen. Einige Einflüsse bedingen sich gegenseitig. In einem Gebäude mit großen Glasflächen (baulicher Einfluss) und einer trägen Fußbodenheizung (anlagentechnischer Einfluss) ergibt sich beispielsweise ein höherer Luftwechsel (Nutzereinfluss). Ob der Luftwechsel nutzerseitig tatsächlich gewünscht war oder die Raumtemperatur aufgrund der Überwärmungseffekte nur so regulierbar, ist nicht zu trennen.

Die Hauptursachen für die Differenzen zwischen rechnerischen und realen Energiebilanzen – im Wesentlichen abgeleitet aus eigenen Feldstudien [91] [23] [25] [26] [27] [28] – werden nachfolgend aufgezählt:

- Innentemperatur (incl. räumliche und zeitliche Teilbeheizung des Gebäudes; also Mittelwertbildung über alle Räume sowie Tag/Nacht-Mittel), im ungedämmten Bestand zu hoch angesetzt (z. B. als Mittelwert 20°C statt real 18°C), aber im Neubau zu gering angenommen (z. B. 20°C statt real 21°C),
- wärmetechnische Qualität der Regelbauteile (U-Werte) und Wärmebrücken, vor allem zu hoch angesetzte Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) für Außenbauteile im Gebäudebestand, z. B. U-Wert der Außenwand 1,2 W/(m²K) anstatt realistischen 0,9 W/(m²K)
- Erzeugereffizienz, zu schlechte Bewertung von Alterzeugern (z. B. 70 % statt real 77 % für einen Konstanttemperaturkessel), aber zu optimistische Einschätzung der Wärmeerzeugereffizienzkennwerte im sanierten Zustand, z. B. neuer Brennwertkessel (z. B. heizwertbezogen 103 % statt real 95 %) mit in der Differenz Einsparpotentialen von real 5 bis 20 kWh/(m²a) anstatt berechneten 20 bis 60 kWh/(m²a)
- das vorher Genannte gilt auch für BHKWs, Elektrowärmepumpen, usw.
- Fehleinschätzung von Leitungslängen und Temperaturen der Wärmeverteilnetze für Heizung und Trinkwarmwasser; realer Einfluss 20 bis 40 kWh/(m²a) anstatt 10 bis 20 kWh/(m²a)
- Unterschätzung der Verteilnetzverluste von Nah- und Fernwärmesystemen, theoretisch 5 bis 15 kWh/(m²a) anstatt real 15 bis 40 kWh/(m²a)
- zu optimistische Einschätzung des Beitrags von solarthermischen Anlagen unter Vernachlässigung der Netz- und Speicherverluste sowie der ungenügenden Regelung von Anlagen mit verschiedenen Systemherstellern; theoretisch 20 bis 25 kWh/(m²a) anstatt real 10 bis 12 kWh/(m²a) in Einfamilienhäusern, theoretisch 15 bis 25 kWh/(m²a) anstatt real 7 bis 15 kWh/(m²a) in Mehrfamilienhäusern
- falsch angenommener Warmwasserbedarf, z. B. aufgrund unbekannter Belegung
- Einflüsse des Luftwechsels (incl. räumliche und zeitliche Teilbelüftung des Gebäudes), der aufgrund geringer Belegung geringer ausfällt als angenommen; auch Überschätzung des Einsparpotenzials von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, v. a. in Mehrfamilienhäusern; Einsparpotenzial 15 anstatt 25 kWh/(m²a)
- Einflüsse des Mikroklimas.

Rechnerische Angleichung von Bedarf und Verbrauch

Die Praxis zeigt Unterschiede zwischen berechneten Energiebedarfen und gemessenen Energieverbräuchen (vgl. z. B. Studien von DENA, IWU und eigene Auswertungen [9] [22] [23]).

Dies tritt insbesondere dann auf, wenn verwendete Rechenprogramme – regulär die gleichen Verfahren, die auch im EnEV/GEG-Nachweis verwendet werden, d. h. die DIN V 4106/4701 oder DIN V 18599 – im „Nachweismodus" betrieben werden (Nutzerverhalten standardisiert, Klimadaten standardisiert) sowie auf viele voreingestellte Effizienzmerkmale (typische Erzeugereffizienzen usw.) zurückgegriffen wird.

Die Angleichung der Bedarfsberechnung an die Verbrauchsmessung im Einzelfall (Mikrountersuchung) setzt eine genaue Auseinandersetzung mit der gegebenen Nutzung. Bausubstanz und Technik voraus. Für die Berechnung hieße dies: Verwendung des Rechenprogrammes, aber unter Berücksichtigung der tatsächlichen Randdaten.

Für Makrountersuchungen ist dies nicht leistbar. Dennoch besteht der Anspruch, dass zumindest im statistischen Mittel die Bedarfsprognosen mit den Verbrauchswerten übereinstimmen. Die Unterschiede zwischen Bedarf und Verbrauch können ausgeglichen werden, indem Korrekturfaktoren eingeführt werden. Anhang 5.2 stellt unterschiedlich detaillierte Verfahren des IWU vor.

Die Gutachter nutzen für die Belange dieses Gutachtens stattdessen das in Anhang 6 dargelegte Bilanzierungsverfahren für den Energiebedarf. Es verwendet möglichst realistische Eingangsparameter für Nutzerverhalten und Effizienzmerkmale, so dass es im statistischen Mittel tatsächlich gemessene, typische Verbrauchswerte abbildet (vgl. Ausführungen in Anhang 5.4.1). Die einzelnen Bestandteile der Bilanz sind aus Mess- und Monitoringprojekten abgeleitet.

Energieanalyse aus dem Verbrauch EAV

Auf Basis von Jahresverbrauchswerten der Endenergie lassen sich (grobe) Klassifizierungen und Einstufungen für Energieverbraucher vornehmen. Das betrifft Einzelverbraucher und Geräte, aber auch Gebäude bis hin zu komplexen Liegenschaften. Voraussetzung ist eine gemeinsame Vergleichsbasis: Flächen- oder Personenbezug, gleicher Zeitraum, ähnliche Klimabedingungen, bei Brennstoffen die Festlegung von Heiz- oder Brennwert. Nachfolgend werden Auswerte- und Korrekturverfahren, auch für unterjährige Messwerte beschrieben.

Erfasst werden in einem Gebäude alle Energieträger über Zähler oder Einkaufsbelege. Um mehr als einen Gesamtkennwert je Untersuchungsobjekt zu erhalten, empfiehlt sich die in Abbildung 18 beispielhaft an einem Wohngebäude (mit Heizung und Trinkwassererwärmung) dargestellte Ausstattung mit Zählern. Dies ist auch auf andere Medien (Strom, Kälte) und Erzeuger übertragbar.

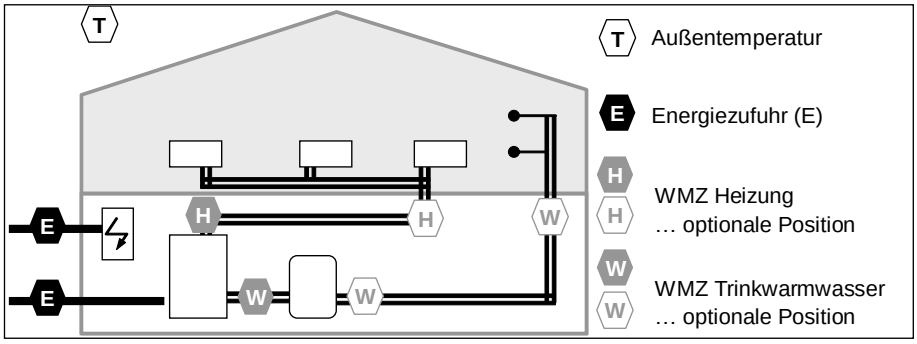


Abbildung 18 Positionierung von Zählern am Beispiel eines Wohngebäudes [eigene Darstellung] aus [78]

Neben einem Primärzähler gibt es zwei Unterzähler für die vom Erzeuger abgegebenen Wärmemengen für Trinkwarmwasser und Heizung. Mit dem Unterzähler für Heizung kann in erster Näherung die dem beheizten Bereich zugeführte Wärmemenge bestimmt werden. Je nach Lage inklusiv oder exklusiv der Leitungsverluste im Keller. Analoges gilt für die Trinkwarmwasserbereitung. Aus der Differenzbildung zwischen Primärzähler und Unterzählern ergeben sich die Wärmeverluste des Erzeugers.

Ein witterungsabhängiger Verbraucher kann problemlos mit einem witterungsunabhängigen Verbraucher gemeinsam gezählt werden, z. B. ein Heizkreis und die Trinkwassererwärmung.

Jahresverbrauchswerte führen zu einer Gesamtbewertung von Gebäuden und Liegenschaften. Detailliertere Informationen liefern Messwerte aus kürzeren Zeiträumen, z. B. aus wochen- oder monatsweisen Intervallen. Solche Verfahren werden „Energieanalyse aus dem Verbrauch“ (EAV) oder „Energiesignatur“ genannt. Die Verbrauchswerte sind dabei in Korrelation mit der zugehörigen Belastung (Außentemperatur, mittlere Kesselbelastung usw.) zu bringen.

Zwei Detailverfahren sind vor allem für die Qualitätssicherung von Energieeinsparkonzepten und das Monitoring geeignet:

- die EAV des Gebäudes mit Auswertung des Wärmeverbrauchs über der Außentemperatur; zur Beurteilung der Heizgrenze, lastabhängiger und lastunabhängiger Energiekennwerte, siehe auch [92],
- die EAV des Erzeugers mit Auswertung der Erzeugernutzwärmeabgabe und zugeführter Endenergie; zur Gewinnung lastunabhängiger Verluste sowie der Effizienz der Energieumwandlung; siehe auch [25].

Wichtig ist: für Erzeuger sind Input- und Outputzähler notwendig, wobei letzterer gleichzeitig der Inputzähler für das Gebäude ist. Die Ausstattung entspricht somit auch dem Konzept, welches in der „Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung“ (EnSanMV) [106] für Wärmepumpen bereits vorgesehen sowie im Entwurf für die künftige „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ [107] im Falle von Einzelmaßnahmen für alle Erzeuger vorgeschrieben wird.

Die Energiemengen werden in mittlere Leistungen umgerechnet und anschließend grafisch aufbereitet, siehe Abbildung 19. Das konkrete Verfahren ist in mehreren Regelwerken beschrieben, z. B. in der VDI 3807-5 [108], aber auch im Beiblatt 1 zur DIN V 18599 [109]. In diesem Gutachten finden sich weitere Ausführungen in Anhang 5.3.

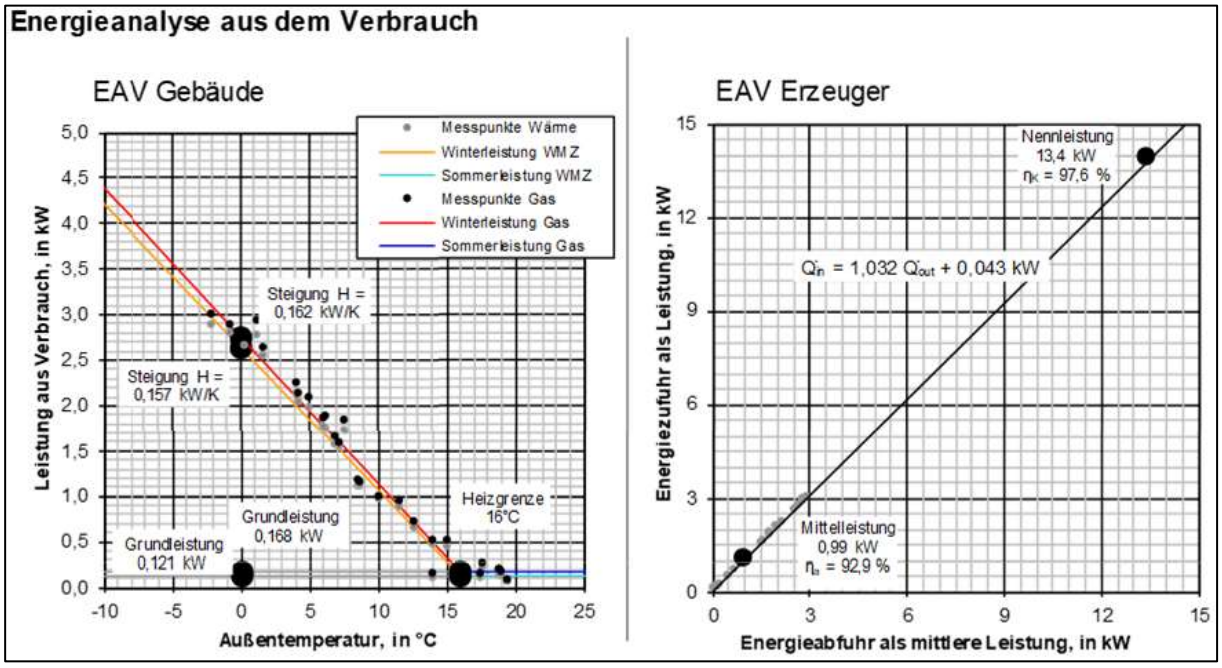


Abbildung 19 Beispielhafte Energieanalyse aus dem Verbrauch [eigene Darstellung] aus [78]

Aus der Grundleistung ergibt sich der Anteil witterungsunabhängigen Verbrauches (bezogen auf den Jahresverbrauch). Der witterungsabhängige Heizungsverbrauch kann als Differenz zum Gesamtverbrauch bestimmt werden. Es können folgende Einzelaspekte interpretiert und analysiert werden:

1. EAV Gebäude – Steigung: sie ist in erster Linie ein Maß für die Güte des Gebäudes; niedrigere Werte ergeben sich bei guten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) der Gebäudehülle, kompakter und luftdichter Bauweise sowie bei höherer Teilbeheizung und damit sparsamerer Lüftung;
2. EAV Gebäude – Heizgrenze: sie ist ein Maß für den baulichen Wärmeschutz in Kombination mit dem Nutzerverhalten; niedrige Werte ergeben sich bei geringen Innentemperaturen und geringer nutzungsbezogener Lüftung sowie gleichzeitig gutem Wärmeschutz; höhere Werte können auch ein Indiz für fehlende Wärmegewinne (z. B. aufgrund von Verschattung) sein;

3. EAV Gebäude – Sockelleistung: sie ist in erster Linie ein Maß für die Trinkwassererwärmung (Nutzen plus Netz/Speicherverlust); niedrige Werte ergeben sich mit sparsamem Nutzerverhalten und optimierten Verteilnetzen; ein niedriger flächenbezogener Wert ergibt sich ebenfalls bei einer geringen Personenbelegung, eine bessere Einordnung liefert daher der Personenbezug; wenn gleichzeitig auch noch der Wasserverbrauch (für Warmwasser) bekannt ist, kann der Messwert in Nutzen und Verluste (Verteilnetz, Speicher) aufgeteilt werden;
4. EAV Erzeuger – Steigung: die Steigung der Geraden ist ein Maß für die Effizienz der Umwandlung von Energie im Betrieb (der Wirkungsgrad kann daran abgelesen werden);
5. EAV Erzeuger – Achsenabschnitt: Er ist ein Maß für die Betriebsbereitschaftsverluste im Stillstand.

Anhand der beiden EAVs kann für ein Gebäude eine Qualitätssicherung erfolgen, z. B. nach einer Modernisierung. Auffälliges (nicht der Witterung entsprechendes) Nutzerverhalten lässt sich ebenso erkennen wie von der Theorie abweichende Gebäude- und Anlageneffizienzen. Die EAV ist damit eine Option, einzuschätzen, ob der vor einer Modernisierung prognostizierte Nutzen (Energieeinsparung als Basis einer Emissions- oder Kostenminderung) auch eingetreten ist. Ist dies nicht der Fall, kann die Gewährleistungszeit genutzt werden, den Sollzustand herzustellen oder zumindest ihm nahezukommen.

Detaillierte Erläuterungen hierzu siehe Anhang 5.3.4.

1.3.4 Emissionen und Primärenergie

Die eingesetzten Energieträger werden in Mikro- und Makrobetrachtungen üblicherweise zunächst als Energiemengen bilanziert. Anschließend kann eine Umrechnung erfolgen:

- mit Heiz- und Brennwerten, um stoffliche Mengen zu bestimmen,
- mit Preisen in Energiekosten zur wirtschaftlichen Bewertung bzw. ggf. Lebenszyklusanalyse,
- mit Primärenergiefaktoren oder CO_2-Äquivalenten zur Umweltbewertung des Energiekonsums.

Den genannten Bewertungsgrößen gemein ist regulär der Bezug auf eine Kilowattstunde Endenergie des betreffenden Energieträgers. Die Verwendung von heiz- und brennwertbezogenen Größen ist zu beachten. Im Rahmen der Berechnungen des Gutachtens wird der Brennwert als Bezugsgröße gewählt.

Gesamtemissionen

Abbildung 20 zeigt die Treibhausgasemissionen in Deutschland seit 1990. Etwa ⅔ der Emissionen für den Sektor „Gebäude“ des Jahres 2019 entfallen auf die privaten Haushalte. Das verbleibende Drittel sind Gebäude für Gewerbe, Handel und Dienstleistung sowie Militär (ohne Gebäude der Industrie und Landwirtschaft) [13].

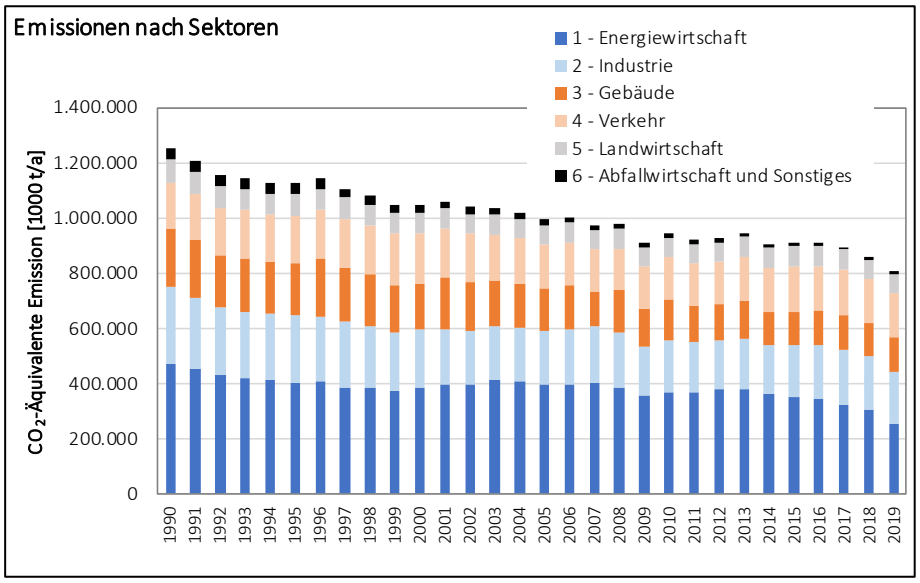


Abbildung 20 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren, eigene Darstellung nach [13]

Werden lineare Trends unterstellt, ergeben sich folgende Erkenntnisse: die Energiewirtschaft reduziert ihre Emissionen um 10,8 Mio. t/a, der Gebäudesektor um 9,1 Mio. t/a, die Industrie um 7,2 Mio. t/a, die Abfallwirtschaft und sonstige um 3,4 Mio. t/a, der Verkehr um 1,8 Mio. t/a und die Landwirtschaft um 0,9 Mio. t/a.

Ausgehend vom ersten und letzten Dreijahresmittelwert im Gesamtzeitraum 1990 bis 2019: Die Emissionen des Verkehrssektors stagnieren dabei auf hohem Niveau; die Landwirtschaft hat ihre Emissionen um 15 % reduziert, die Industrie um 27 %, die Energiewirtschaft um 34 %, der Gebäudesektor um 41 %, die Abfallwirtschaft und sonstige um 76 %.

Wird extrapoliert („Business-As-Usual“) kann eine Erreichung oder Nichterreichung der gesteckten Klimaziele mit einigermaßen Sicherheit prognostiziert werden – abgesehen von den Auswirkungen einschneidender Einzelereignisse wie Fukushima, die Finanzkrise oder die Corona-Pandemie. Die DENA schätzt die Fehlmenge zu den gesteckten Klimazielen des Jahres 2030 mit bis zu 28 Mio. Tonnen ab [3].

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens ist die Treibhausgasemission das primäre Werkzeug zur Einschätzung der Umweltwirksamkeit von Gebäudesanierungen. Die Primärenergie wird informativ angegeben.

Der Primärenergieeinsatz für Deutschland ist in Abbildung 12 auf S. 63 im Zeitverlauf dargestellt. Allerdings definiert die Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen AGEB „Primärenergieverbrauch“ ohne Vorketten der Energieträger. Sie meint die Summe aus Import und Eigenförderung von Energieträgern.

Abweichend davon kann zusätzlich auch der Aufwand für die Förderung und den Transport außerhalb der Landesgrenzen berücksichtigt werden. Dieser Logik folgt die Datenbereitstellung in dem Modell „GEMIS“ [110]. Die Größe heißt dann strenggenommen nicht mehr „Primärenergie“, sondern „kumulierter Energieverbrauch (KEV)“.

Die abweichenden Begrifflichkeiten für die Primärenergie (nach AGEB oder „GEMIS“) und die zugehörigen Umrechnungsfaktoren (KEV, Primärenergiefaktor) existieren parallel nebeneinander. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens verwenden den „KEV“ stellvertretend als „Primärenergiefaktor“ analog wie IWU dies für die Bilanzierung vorschlägt [76].

Primärenergie- und Emissionsfaktoren

Abbildung 21 zeigt die Entwicklung der Primärenergiefaktoren, welche das IWU aus der Datenbank „GEMIS“ abgeleitet hat. Die Aufstellung ist grundsätzlich chronologisch, jedoch sind nicht alle veröffentlichten Zwischenwerte genannt, sondern nur die für die Gutachter aus den letzten Jahrzehnten verfügbaren. Dargestellt ist der gesamte kumulierte Energieaufwand, d. h. die Summe aller eingesetzten Energiemengen (regenerativ und fossil).

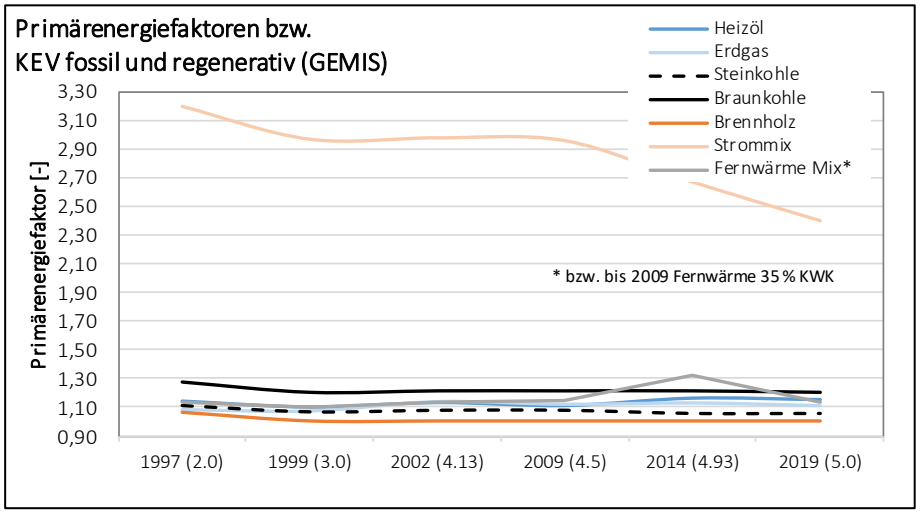


Abbildung 21 Primärenergiefaktoren (gesamt) aus Daten von „GEMIS“ [eigene Darstellung] nach [75] [76] [111]

Bei den fossilen Energieträgern (Erdgas, Heizöl, Steinkohle, Braunkohle) sind im Laufe der Jahre kaum Änderungen festzustellen. Minimale Schwankungen ergeben sich, weil die Herkunftsländer der Stoffe in ihrer Zusammensetzung leicht variieren. Der Regenerativanteil der genannten Energieträger ist nahezu null. Für Brennholz ist ebenfalls kaum eine Änderung festzustellen. Der dargestellte Gesamtfaktor besteht fast vollständig aus einem regenerativem Anteil. Der fossile Anteil ergibt sich aus der Aufbereitung und dem Transport.

Strom und Fernwärme sind die veränderlichen Energieträger, welche einerseits aus diversen Ausgangsprodukten hergestellt werden (deren Zusammensetzung schwankt), andererseits werden sie auch gekoppelt erzeugt. Für Strom ist zu sehen, dass der Gesamtaufwand für die Produktion einer Kilowattstunde in den letzten 20 Jahren deutlich gesunken ist. War 1997 noch ein Faktor von 3,2 festzustellen, liegt er 2019 bei 2,4. Das Absinken ist begründet durch eine verbesserte Kraftwerkstechnik, aber auch durch einen höheren Regenerativanteil. Dieser geht nach dem Wirkungsgradprinzip mit 100 % Wirkungsgrad in die Bilanz ein.

Abbildung 22 zeigt die Entwicklung der Emissionsfaktoren, welche das IWU aus der Datenbank „GEMIS“ abgeleitet hat. Dargestellt ist der „Gesamtfaktor“, d. h. die Vorketten bei der Rohstoffgewinnung, dem Transport und ggf. die Umwandlung sind enthalten, einschließlich aller Hilfsenergien.

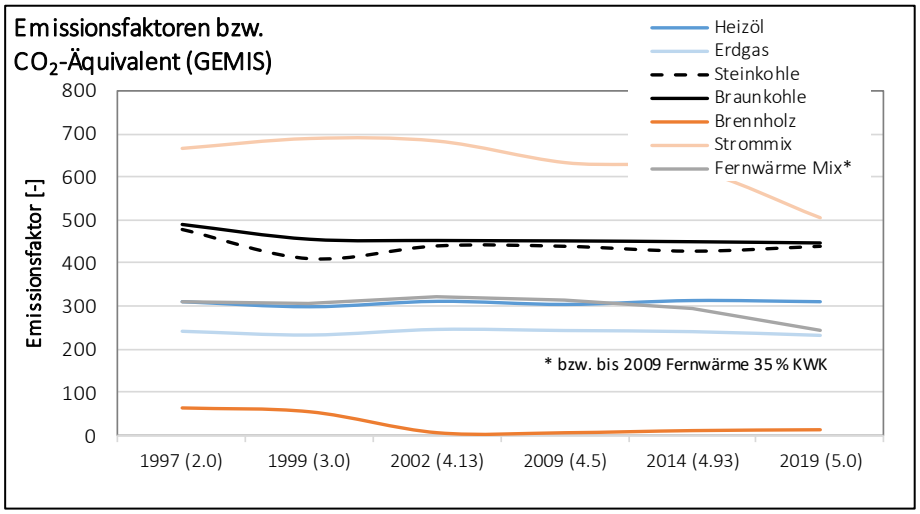


Abbildung 22 Emissionsfaktoren bzw. CO_2-Äquivalent aus Daten von „GEMIS“, eigene Darstellung nach [75] [76] [111]

Bei den fossilen Energieträgern (Erdgas, Heizöl, Steinkohle, Braunkohle) sind im Laufe der Jahre kaum Änderungen festzustellen. Minimale Schwankungen ergeben sich, weil die Herkunftsländer der Stoffe in ihrer Zusammensetzung leicht variieren. Strom und Fernwärme sind die veränderlichen Energieträger. Im Zeitverlauf ändert sich die Mixzusammensetzung der primären Energieträger.

Tabelle 14 legt die Werte für die Berechnung fest. Sie sind heiz- und brennwertbezogen angegeben, wobei im Rahmen des vorliegenden Gutachtens die brennwertbezogenen Werte zum Einsatz kommen. Zur Umrechnung zwischen beiden Größen wird auf die Erläuterungen im Anhang 5.4.1 verwiesen.

Energieträger		Emissionsfaktor, in [g/kWh]		Primärenergiefaktoren	
		heizwertbezogen	brennwertbezogen	insgesamt	nicht erneuerbar
Fossile Brennstoffe	Erdgas	231	208	1,1	1,1
	Heizöl	310	292	1,1	1,1
	Steinkohle	438	429	1,1	1,1
	Braunkohle	446	421	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Holz	16	15	1,2	0,2
Strom	allgemeiner Strommix	444		2,8	1,8
Fernwärme	allgemeiner Fernwärmemix	243		1,1	0,8
Umweltwärme, Solarthermie, Photovoltaik		0		1,0	0,0

Tabelle 14 Emissionsfaktoren und Primärenergiefaktoren, eigene Zusammenstellung (unter Berücksichtigung von [111] [112] [113])

Der Wert für Strom ist eine Mittelwertbildung der beiden vom UBA 2020 [113] angegebenen Werte für die Jahre 2018 und 2019 (beide noch vorläufig, daher ist eine Pressemitteilung referenziert). Der Wert ist konservativ gewählt, da der Wert für 2019 deutlich besser ist als für 2018.

Abweichend zu den Annahmen des UBA [114] wird für die gebäudenahe oder gebäudeintegrierte Solarthermie sowie die Photovoltaik im Rahmen des vorliegenden Gutachtens kein Emissionsfaktor angenommen.

Eine separate Betrachtung von Biogas entfällt aus Gründen der Komplexität. Das Wuppertalinstitut hat anhand der Zahlen aus dem Bilanzjahr 2013 festgestellt, dass sich der Primärenergiefaktor des Erdgas/Biogas-Mixes nur im 1 %-Bereich ändern würde. Das meiste Biogas wird – der Qualität halber – direkt verstromt und ist entsprechend im Primärenergiefaktor für Strom enthalten [115].

Für Holz gilt der vom IWU vorgeschlagene aktualisierte [57], wohnflächenbezogene Budgetansatz von gerundet 20 kWh/(m²a). Energiemengen oberhalb dieses Wertes werden mit dem „Gesamtfaktor" bewertet, bis dahin gilt der „nicht erneuerbare Anteil".

Allokation bei gekoppelten Prozessen

Bei gekoppelten Prozessen – ein Aufwand und mehrere Nutzen – ist eine Festlegung zu treffen, welcher Anteil des Aufwandes den jeweiligen Nutzen zuzuordnen ist. Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit ihren beiden Nutzenergien Wärme (häufig als Nah- und Fernwärme) und Strom fällt unter diese Problematik der „Allokation".

Die eigene Beschäftigung mit der Problematik im Rahmen der Quartierssanierung führte 2014 zu der Erkenntnis, dass die „energetische Allokation" am geeignetsten ist, jedoch wenn möglich überhaupt keine Allokationen vorgenommen werden, sondern eine Gesamtbilanz des Systems „Wärme + Strom" erfolgt [116]. Eine detaillierte Auseinandersetzung mit der Thematik ist Anhang 5.5.2 zu entnehmen.

1.3.5 Sanierungsrate, Sanierungstiefe und Sanierungsquote

Der Gebäudebestand entwickelt sich durch Neubau, Abriss und Sanierungstätigkeiten. Der Gesamtmodernisierungsfortschritt beim Wärmeschutz im (nicht abgerissenen) Altbau hängt dabei von der Sanierungsrate und -tiefe ab. In der Fachwelt wird jedoch ein Mangel an Hintergrundinformationen zum Thema beklagt; die Deutsche Immobilien-Akademie Freiburg DIA stellt 2012 beispielsweise fest [117]:

> *„Die aktuelle Sanierungsrate ist leider keineswegs so eindeutig bekannt, wie es für eine saubere Analyse nötig wäre. Denn die durchgeführten energetischen Sanierungen werden weder in ihrer Zahl noch in ihrer Tiefe erfasst."*

Dabei beschreibt die „Sanierungsrate" die Umsetzungszahlen je Zeiteinheit und die „Sanierungstiefe" die Qualitäten der Sanierung. Die „Sanierungsquote" ist die Kombination beider Einflüsse. Sie lässt sich näherungsweise als Verminderung des Energieverbrauchs (oder besser der Emissionen) definieren.

Sanierungsrate

Die Primärliteratur zum Thema „Sanierungsrate" ist äußerst überschaubar. Die diesen Primärauswertungen zugrundeliegende Datenbasis ebenfalls. Die mit Abstand am häufigsten zitierte Primärdatenquelle ist eine Stichprobenauswertung von 7500 Gebäuden aus dem Jahr 2010, durchgeführt vom Institut Wohnen und Umwelt und dem Bremer Energieinstitut [6].

Aus dem Baujahr der untersuchten Gebäude und dem Anteil der energetischen Sanierung zum Untersuchungszeitpunkt lässt sich eine jährliche Zuwachsrate an energetischer Sanierung rückwärts berechnen. Die mittlere jährliche Sanierungsrate wird aus den Einzelmaßnahmen berechnet (Dämmung Außenwand, Dämmung Dach bzw. Obergeschossdecke, Dämmung Fußboden bzw. Kellerdecke, Fenstererneuerung). Die Maßnahmen werden im Verhältnis der Heizwärmeeinsparungen gewichtet. Teilsanierungen werden somit entsprechend berücksichtigt.

So heißt eine Sanierungsrate von 1 %/a, dass statistisch nach 100 Jahren alle Hüllflächen an allen Gebäuden einmal energetisch modernisiert wurden. Insbesondere die Flächen, die kaum natürlichen Instandhaltungsbedarf aufweisen oder nicht zugänglich sind, drücken den Schnitt daher nach unten.

Die gegebene Primärdaten werden beispielsweise durch den DENA Gebäudereport 2012 komprimiert, siehe Abbildung 23.

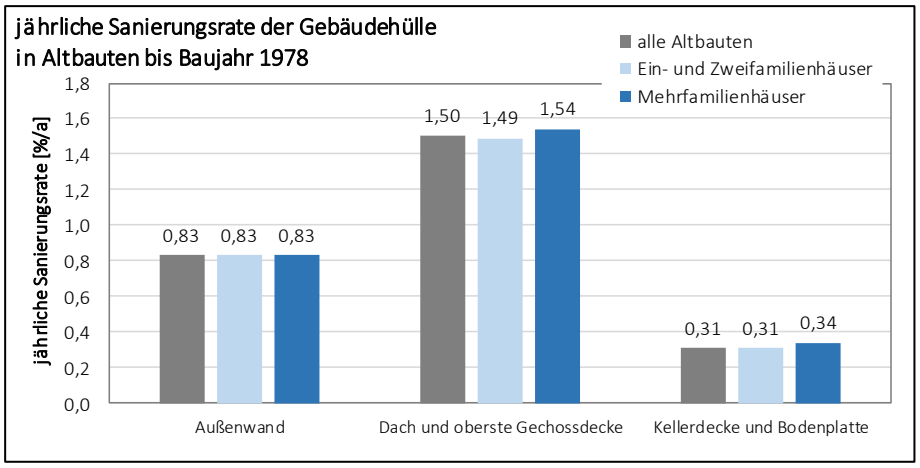


Abbildung 23 Sanierungsraten für die Gebäudehülle von Altbauten bis 1978 im Zeitraum 2005 bis 2008, eigene Darstellung nach [118]

Der Istzustand der Sanierungsrate wird in den letzten Jahren mehrheitlich bei ca. 1 %/a vermutet. Der Wert umfasst gewichtet die Gebäudehüllbauteile (Dach, Wand usw.). Unter Berücksichtigung aller verbrauchsmindernden Maßnahmen, auch der Anlagentechnik, liegt der Wert bei ca. 2 %/a [17].

Sämtliche konzeptionellen Studien zur Entwicklung des Verbrauchs der Gebäude nutzen die „Sanierungsrate" als Instrument zur Modellierung der Zukunft. Dabei wird vom Ziel aus gedacht: welcher Verbrauch soll zum Zeitpunkt x (2020, 2035, 2050) zu verzeichnen sein und wie ist dieser Wert erreichbar.

Häufig wird kommuniziert, dass der Wert auf 2 %/a verdoppelt werden muss. Gemeint ist dabei regulär die Wärmeschutz-Modernisierungsrate (der Gebäudehülle). Je später der Herausgabezeitpunkt der Prognosestudie, desto größer ist die kommunizierte Steigerungsnotwendigkeit, weil die Spanne bis zum Endpunkt der Überlegungen jeweils knapper wird.

Die 2017 berechneten durchschnittlichen Sanierungsraten aus der Studie der Beuth-Hochschule und IFEU [119] betragen im Wohnungsbau:

- Szenario konventionelle Effizienz: 1,12 % (2011) über 1,38 % (2020) bis 1,55 % (2040)
- Szenario maximale Effizienz: 1,91 % (2011) über 2,77 % (2020) bis 2,40 %(2040)

Aus den real beobachtbaren Ergebnissen der Minderung des Endenergieverbrauchs lässt sich schlussfolgern, dass tendenziell der erste Pfad der Realität entspricht.

Zwischen der real beobachtbare Sanierungsrate und den für die Klimazielerreichung getroffenen Annahmen sind seit Jahren deutliche Diskrepanzen feststellbar.

Aus der Diskrepanz zwischen notwendiger und beobachtbarer energetischer Sanierung leitet sich in der Literatur der Begriff „Sanierungsstau" ab. In Reaktion und aus dem Blickwinkel der Gebäudeeigentümer schreibt Simon 2012 [120]:

> *„Vor diesem Hintergrund ist die aktuell beobachtbare Gesamtmodernisierungsrate nur niedrig im Vergleich zu den politischen Zielen, nicht aber im Vergleich zum Verhalten der Eigentümer und dem Zustand der Gebäude. Kurz: Eine energetische Gesamtmodernisierungsrate von 1 % ist schlicht nicht niedrig. […] Ein politischer Vorwurf eines Sanierungs-Attentismus dürfte bei der Mehrheit der Eigentümer auf Unverständnis stoßen oder sie in dem Glauben wiegen, dass damit ja nur die anderen Eigentümer gemeint sein können, schließlich hat man ja selbst erst letztes Jahr drei neue Wärmeschutzfenster eingebaut und vor fünf Jahren die Heizungsanlage ausgetauscht."*

Insbesondere ist für Kellerdecken und oberste Geschossdecken kein Sanierungsstau gegeben. Der einzige Anlass diese eigentlich wartungsfreie Fläche zu verändern ist die energetische Verbesserung. Ähnliches gilt für Klinkerfassaden. Aufgrund real deutlich längerer Lebensdauern vieler Bauteile als 50 Jahre können sich „von allein" keine Sanierungsraten von 2 %/a (für diese Bauteile) ergeben Es ist vor allem ein „energetischer Sanierungsstau" festzustellen.

Diefenbach et al. stellen 2019 fest [57]:

> *„Allerdings muss […] die Modernisierungsrate deutlich erhöht werden – und zwar zum Teil über die typischen Sanierungszyklen der Bauteile hinaus. Das gilt - neben der vom Sanierungszyklus unabhängigen Obergeschoss- und Kellerdeckendämmung – vor allem für die Wanddämmung. Bei der Dachdämmung und Fenstererneuerung sind dagegen bereits heute relativ hohe Raten zu beobachten. […] Auch hier ist allerdings nicht sicher, ob in jedem Fall eine Kopplung an ohnehin notwendige Sanierungen stattfindet."*

Eine über 1,1 %/a deutlich erhöhte Sanierungsrate ist nur erzielbar, wenn (neben den Energieersparnissen) dauerhaft Anreize zur Investition geschaffen bzw. aufrechterhalten oder ausgebaut werden.

Die DENA stellt in ihren Gebäudereports 2012 und 2016 [118] [9] unverändert fest:

> *„Trotz der großen politischen Bedeutung des Themas ‚Energetische Gebäudesanierung' gibt es derzeit keine Quelle, die jährlich aktuell eine energetische Sanierungsrate für den deutschen Gebäudebestand aufzeigt."*

Als Monitoring-Instrument ist die Erfassung der Sanierungsrate sinnvoll. Es handelt sich dabei um eine Daueraufgabe. Dies kann über kleine Stichproben (Mikrozensus o. ä.) oder über eine Breitenerfassung (Energieausweis, Fördermittel) erfolgen. Sofern man die Förderung an einen Erfolgsnachweis koppeln würde, wäre eine bessere Datenlage schnell erzielbar.

Sanierungstiefe

Die Sanierungstiefe beschreibt im Allgemeinen den Grad der energetischen Verbesserungen, welcher mit einer Sanierung erreicht wird – in einer Abstufung von „keine energetischen Verbesserung" bis hin zur Grenze des technisch Machbaren oder sogar Denkbaren. Sie lässt sich auch als Sanierungsqualität beschreiben.

Rückblickend ist die Qualität von Sanierungen von den jeweils geltenden gesetzlichen Randdaten (Wärmeschutzverordnung, Energieeinsparverordnung) bzw. der Fördermittellandschaft (KfW, BAFA usw.) geprägt. In der Vorausschau wird die Sanierungstiefe jedoch auch bei der Modellbildung benutzt – vor allem zur Abbildung der künftigen Entwicklung der Gebäudehüllen.

Vor- und Nachteile von zu setzenden Standards werden u. a. in [117] diskutiert. Höhere Standards mindern – weil sie preiserhöhend wirken – zunächst die Investitionsbereitschaft von Eigentümern, v. a. im Mietwohnungsbau. Andererseits verschiebt eine Lockerung der Standards das Problem nur in die Zukunft. Nach anfänglich schnellen Erfolgen („billige Teilsanierungen"), schließt sich eine Phase der notwendigen Nachsanierungen an, die noch unwirtschaftlicher sind.

Kopplung von Sanierungsrate und -tiefe zur Sanierungsquote

Neben einer Datenanalyse diverser Primärquellen (u. a. auch die IWU Datenerhebung des IWU von 2010 [6]) wertet die Deutsche Immobilien-Akademie die Minderung des tatsächlichen Energieverbrauchs der Haushalte aus und errechnet rückwärts eine Gesamtsanierungsquote, welche zu dieser Einsparung geführt haben muss. Hierin sind alle Maßnahmen enthalten – an der Gebäudehülle und der Anlagentechnik. Die finale Feststellung ist [117]:

> *„Keinesfalls würde allerdings eine Sanierungsrate von 1 % der ineffizientesten Gebäude dazu ausgereicht haben, eine jährliche Energiemengenreduktion um 3 % oder mehr zu bewirken."*

Die „Sanierungsquote" fasst die Effekte der Sanierungsraten („wie häufig") und Sanierungstiefen („wie gut") zusammen. In der Konsequenz kann man am abnehmenden Endenergieverbrauch alle Maßnahmen gemeinschaftlich beurteilen.

Wenn ein Gesamtziel in Form eines Verbrauchsrückgangs das Ziel ist, also eine bestimmte „Sanierungsquote" insgesamt festliegt, sind zwei Hebel zu Zielerreichung gegeben: entweder es wird auf eine hohe Rate bei moderater Tiefe gesetzt oder auf eine geringe Rate bei dann höherer Tiefe. Mit Fördermitteln oder durch gesetzliche Anforderungen lassen sich beide Hebel beeinflussen. Die höhere Sanierungsrate bedeutet vorgezogene Investitionen. Die höhere Sanierungstiefe bedeutet bessere Standards.

Ausgehend vom typischen Verhalten von Investoren erscheint den Gutachtern der zweite Weg als zielführender. Nach Ansicht der Gutachter, wird daher die „Sanierungstiefe“ der Bauteile am besten so gewählt, dass über sehr lange Zeiträume keine Nachsanierung mehr erforderlich ist. Um das zu forcieren, erscheint eine deutlich progressive (überproportionale) Förderung nur sehr guter Standards sinnvoll (die für 50 Jahre keinen „Anlass zur Reue“ geben).

Hinweis: die Maßnahmen an der Anlagentechnik sind schwieriger zu erfassen, wenn ein Energieträgerwechsel damit verbunden ist (beispielsweise von Gaskessel auf Holzkessel oder Wärmepumpe umgestellt wird, weil Veränderungen der Endenergie, Primärenergie und Emissionen nicht proportional verlaufen).

1.3.6 Energie- und Investitionskosten

Mit der energetischen Verbesserung von Gebäuden sind Investitionskosten und deren Folgekosten, insbesondere Wartungs- und Instandhaltungskosten, verbunden. Nachfolgend werden schwerpunktmäßig typische Investitionskosten sowie Wartungsansätze für Bauprodukte zum heutigen Zeitpunkt (bzw. nach Datenlage der jüngsten Vergangenheit) zusammengestellt. Baupreis- und Baukostenindex beschreiben die zurückliegenden Veränderungen der Kosten.

Darüber ist die Frage zu beantworten, welche Kostenanteile der energetischen Verbesserung zuzuschreiben sind und welche ohnehin im Zuge der laufenden Bauunterhaltung angefallen wären. Nur erstere werden regulär in die Wirtschaftlichkeitsbewertung einbezogen.

Energiepreise

In vielen Studien, welche sich der Makroperspektive widmen, sind keine Endverbraucherpreise genannt (z. B. [68], [57], [121]) – die Untersuchungen befassen sich entsprechend mit dem insgesamt notwendigen Energieimport bzw. der innerdeutschen Produktion und nicht mit den Kosten für das einzelne Objekt.

Für die Mikroperspektive ist – auch aus eigener Projektarbeit der Gutachter – festzustellen, dass Annahmen zum Energiepreis sich teils an der aktuellen Marktlage, teils auch an den rückliegenden zwei bis 5 Jahren orientieren. Es findet in gewisser Weise eine „Glättung“ des aktuellen Marktgeschehens statt. In Jahren mit sehr niedrigen Energiepreisen wird eher aufgerundet, in Hochpreisphasen eher abgerundet. Insgesamt wird dieses Vorgehen in Anbetracht der nicht Vorhersehbarkeit künftiger Entwicklungen als gute Vorgehensweise angesehen.

Vom Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Gutachtens aus lässt sich ggf. 5 Jahre in die Zukunft blicken. Insbesondere ein starker Preisverfall eines Energieträgers ist kaum vorhersehbar, z. B. der des Heizöls in den Jahren 2009 und 2016 und aktuell 2020. Generell betrifft dies – auf lange Sicht gesehen – alle Energieträger; nur zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Für den Umbau des Energiesystems ist es wichtig, dass langfristig einigermaßen treffsicher die Relation der Preise der Realität nahekommt.

Eine (ggf. auch nur geringfügige) Verschiebung der Energiepreise zwischen den Energieträgern verschiebt die Aussage von Konzepten. Die entsprechend kostengünstigeren Energieträger dominieren das Konzept, insbesondere wenn die Energieträger im Verlauf der Zeit Preissteigerungen erfahren.

Tabelle 158 zeigt die Festlegungen für die Energieträgerpreise aus heutiger Sicht – einerseits die Standardwerte in der linken Spalte, andererseits modifizierte Werte, die im Rahmen einer Parametervariation (vgl. Kapitel 1.2.3) entwickelt wurden. Die Daten sind brennwertbezogen; heizwertbezogene Werte sowie die Beschreibung des Umrechnungsverfahrens sind in Anhang 5.5.1 nachzulesen.

Energieträger	Energiepreis, Standardfall [€/kWh]	Energiepreis, Variante [€/kWh]
Erdgas	0,06	0,087
Heizöl	0,06	0,122
Holz	0,05	0,050
Fernwärme	0,09	0,102
Strom (Bezug, Normaltarif)	0,31	0,186
Strom (Bezug, Wärmepumpe)	0,22	0,186
Strom (Einspeisung)	0,09	0,066

Tabelle 15 Energieträgerpreise, brennwertbezogen [eigene Darstellung] [18] [19]

Die Festlegung für den zurückvergüteten Strom ergibt sich im Standardfall auf Basis des aktuellen EEG; der Wärmepumpentarif ergibt sich aus der neuesten Veröffentlichung des Bundesverbandes Wärmepumpen [20].

In der Variante werden keine gesonderten Wärmepumpentarife mehr berechnet. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die neue Einspeisevergütung für Photovoltaik nur noch in der Höhe des Gestehungspreises liegt (Details siehe Anhang 3.5.1). Der Stromproduzent macht dann mit der Einspeisung weder Gewinn, noch Verlust. Jedoch ist die Selbstnutzung vorteilhafter als die Rückspeisung.

Investitionskostenansätze

Für die Auswertung des konkreten Einzelfalls ist das Einholen von Angeboten am angebrachtesten, um eine aussagekräftige Wirtschaftlichkeitsbewertung zu erzielen. Aufgrund des gegebenen Aufwandes wird jedoch bereits für diese Mikroperspektive häufig auf Kostenfunktionen bzw. standardisierte Kostenansätze zurückgegriffen. Eine Vereinfachungsnotwendigkeit besteht in jedem Fall für Betrachtungen der Makroperspektive.

Üblicherweise werden in der Literatur Kosten als Bruttokosten der Kostengruppen 300 und 400 (DIN 276) angegeben, siehe auch Ausführungen in Anhang 5.9.3.

Ein detaillierter Vergleich von Kostenansätzen verschiedener Studien ist in Anhang 5.8.2 zu finden. Die tabellierten Werte sind grafisch in Abbildung 301 bis Abbildung 317 des Anhangs 5.8.2 dargestellt.

Vollkosten oder Mehrkosten

Bei der Bewertung von Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen ist zu unterscheiden, welcher Anteil der Kosten ohnehin angefallen wäre („Sowiesokosten“ bzw. „Ohnehinkosten“) und welcher zur energetischen Verbesserung führt („energiebedingte Mehrkosten“). Die Summe beider Kostenanteile sind die Vollkosten.

Über die Frage des korrekten Einbezugs der Sowiesokosten in Energiekonzepte herrscht keine Einigkeit. Seltener wird mit Vollkosten gerechnet (z. B. in [34]). Regulär ist in Makrostudien bzw. Konzeptstudien zur Energiewende nur der Anteil der „energiebedingten Mehrkosten“ enthalten (z. B. in [43]) oder zumindest für die Wirtschaftlichkeitsbewertung entscheidungsrelevant. Dieser Ansatz folgt dem „Kopplungsprinzip“. Es geht davon aus, dass energetische Maßnahmen nur dann ergriffen werden, wenn an der betreffenden Komponente ohnehin aus anderen Gründen (Instandhaltung, Wohnwertverbesserung) eine Änderung angestrebt wird. Die darüber hinaus gehenden Kosten werden entweder nicht thematisiert oder nur indirekt benannt – beispielsweise unter den „von Förderung ausgelösten Gesamtinvestitionen“.

Henger und Voigtländer fassen die Diskussion über die Verwendung des einen oder anderen Kostenansatzes treffend zusammen [122]:

> *„Der Mehrertragsansatz und das Kopplungsprinzip sind für jene Fälle richtig, in denen der Anlass der Sanierung nicht vorrangig energetisch motiviert ist […] Davon ist jedoch nicht immer auszugehen, da zur Erreichung der Klimaschutzziele auch energetische Maßnahmen vorgezogen werden müssen, obwohl die einzelnen Bauteile noch über eine ausreichende technische und/oder wirtschaftliche Restlebensdauer verfügen. Es wird daher vielfach argumentiert, dass Vollkostenbetrachtungen besser geeignet sind, um eine wirtschaftliche Bewertung von energetischen Sanierungsmaßnahmen vorzunehmen. Die Vollkosten entsprechen schließlich denjenigen Kosten, die insgesamt für eine Maßnahme – unabhängig von deren individuell festzustellendem Instandhaltungs- oder Modernisierungsanteil – aufzubringen sind.*
>
> *Die meisten Studien die sich mit Wirtschaftlichkeitsberechnungen von energetischen Modernisierungen beschäftigen, setzen jedoch voraus, dass die energetische Modernisierung zeitgleich mit den notwendigen Instandsetzungen einhergeht (Kopplungsprinzip) und kalkulieren daher mit den energiebedingten Mehrkosten. Die hier geführte Diskussion hat jedoch gezeigt, dass dieses Vorgehen zwar für eine Vielzahl von Modernisierungen angemessen erscheint, jedoch eine Gesamtbetrachtung und -bewertung von Sanierungsprojekten nicht zulässt. Schließlich werden zum Teil auch Modernisierungen vorgezogen, obwohl die Bauteile zu diesem Zeitpunkt noch eine wirtschaftliche oder technische Restlaufzeit aufweisen. Da darüber hinaus auch Abgrenzungsschwierigkeiten […] zwischen Instandhaltungskosten und energetischen Mehrkosten bestehen, ist daher zu empfehlen, bei den Wirtschaftlichkeitsanalysen mit beiden Kostenpositionen zu arbeiten.“*

Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens handhaben den Umgang mit Sowiesokosten bei der Erstellung von Einzelkonzepten (Mikroebene) wie folgt:

Keine Sowiesokosten für Maßnahmen, die sonst nicht getätigt werden (z. B. Solarthermie). Keine Sowiesokosten, wenn Bauteile ersetzt werden, die ≤ 25 % der zu erwartenden maximalen Lebensdauer aufweisen (z. B. Dämmung einer erst 10 Jahre alten Fassade). Keine Sowiesokosten, wenn auch mit Verwendung der Vollkosten eine Wirtschaftlichkeit im Einzelfall gegeben ist (dafür Hinweis an den Leser: auch die ohnehin erforderlichen Instandhaltungskosten werden mit erwirtschaftet). In allen anderen Fällen plausible Abschätzung der Sowiesokosten.

Darüber hinaus ist die Thematik der „Sowiesokosten" eng mit der Frage der Instandhaltungskosten (siehe Anhang 5.8.4) und der Lebensdauer (siehe Anhang 5.9.1) von Bauteilen und Bauprodukten verbunden. Wird an Instandhaltungskosten gespart, erhöhen sich die Investitionskosten – auf lange Zeiträume betrachtet. Weitere Ausführungen zur Thematik liefert Anhang 5.8.4

Einbezug der Kostengruppe 700 und weitere Kosten

Da die Vollkosten häufig nur Positionen der Kostengruppen 300 und 400 (nach DIN 276) umfassen, ist dies auch für die sich daraus ergebenden „Sowiesokosten" und „energiebedingten Mehrkosten" gegeben. Der Aufwand der Planung – Kostengruppe 700 – fehlt. Allerdings führt dies dazu, dass insbesondere private Bauherren den Investitionsaufwand unterschätzen. Eine Begründung kann sein: diese Position ist ohnehin – auch ohne energetische Verbesserungen – notwendig und fällt damit im weiteren Verlauf der Betrachtungen heraus (z. B. beim Vergleich zweier Konzepte).

Die Praxiserfahrung zeigt, dass zum einen energetische Verbesserungen einen höheren Planungsaufwand haben als reine Instandhaltungen und zum zweiten, dass aufwändige Energiekonzepte einen erhöhten Planungsaufwand haben als Standardkonzepte.

Zur transparenten Offenlegung aller Kosten ist die Kostengruppe 700 in die Betrachtungen einzubeziehen. Zumindest die Mehrkosten für die Planung, welche sich aus einem erhöhten Standard ergeben, sind in die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Maßnahmen zu überführen. Auch bietet sich dadurch die Chance, Kosten für das Monitoring und die Qualitätssicherung im laufenden Betrieb hierin zu berücksichtigen.

Ein Aufschlag von 30 % wird daher als realistisch angesehen und in den Berechnungen zu diesem Gutachten berücksichtigt. Dies hat Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen (es erfolgt eine Verschlechterung). Allerdings ist es nach Ansicht der Gutachter nicht gerechtfertigt, diese Position nicht einzubeziehen, da ansonsten eine Unterschätzung der Kosten stattfindet. Sie sind in großen Projekten vorhanden und sollten nach Ansicht der Gutachter – zur Sicherstellung einer Planungs- und Ausführungsqualität – künftig in allen Projekten genutzt oder sogar vorgeschrieben werden.

Ohne dass die Gutachter dafür Belege haben, lässt sich vermuten, dass auch Gebäudebesitzer im Zuge von konkreten Sanierungen die real höheren Kosten als Grund ansehen, eine Maßnahme als nicht erfolgreich oder weniger erfolgreich anzusehen. Genauere Erkenntnisse ließen sich durch Forschung zu diesem Thema generieren.

Da eine Modernisierung oft mehrere Aspekte der Gebäudeverbesserung koppelt, lässt sich auch untersuchen, welche Kosten neben der energetischen Sanierung (mit ihren Vollkosten der KG 300 und 400) sonst noch typischerweise in Praxisprojekten zu verzeichnen sind.

Schulze Darup und Neitzel untersuchen dafür die Gesamtinvestitionskosten für Mehrfamilienhäuser verschiedener Baualtersklassen [123]. Der Anteil energetisch bedingter Kosten sowie zugehöriger Sowiesokosten machen für die häufig vorkommenden Mehrfamilienhäuser der 1960er und 1970er Jahre nur etwa ⅓ der Gesamtkosten aus. Der Rest fließt in Balkone, Grundrissänderungen, Badsanierungen und andere Maßnahmen, die mit der Energieeinsparung nicht zusammenhängen, sondern zu einer Wertsteigerung der Immobilie führen.

Die typischen Gesamtkosten von Investitionen werden sinnvoll (mindestens näherungsweise) dreigeteilt angegeben, um den Investor umfassend aufzuklären: energiebedingte Mehrkosten, zu den energetisch bedingten Maßnahmen gehörige Sowiesokosten, alle anderen Kosten.

Im Rahmen dieses Gutachtens werden die „anderen Kosten" nicht näher betrachtet.

Nutzungsdauern und Wartungsansätze

Neben den energetischen Einsparungen und Investitionskosten der Bauprodukte beeinflussen eine Reihe weiterer Daten die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Modernisierungsmaßnahmen. Allen voran die angenommene Nutzungsdauer der Bauprodukte. Tabelle 16 zeigt die getroffenen Annahmen für das vorliegende Gutachten. Eine detaillierte Analyse der Literatur zu diesem Thema ist Anhang 5.9.1 zu entnehmen.

Nutzungsdauer und Sanierungsrate hängen unmittelbar zusammen. Je geringer die Nutzungsdauern der Bauprodukte im Mittel insgesamt angesehen werden, desto unwirtschaftlicher sind alle Maßnahmen der energetischen Sanierung. Allerdings weisen sowohl der Bestand an Wärmeerzeugern und deren Baualter (Anhang 5.6.1) als auch die geringe Sanierungsrate der thermischen Hülle (Anhang 5.11) darauf hin, dass Bauprodukte aller Art eher langlebig sind.

Für dieses Gutachten werden aus diesem Grund eher lange Nutzungsdauern verwendet. Damit kann auch der berechtigten Kritik von Simon [120] und anderen begegnet werden:

> *„Die Nutzungsdauer wird oder soll aus den tatsächlichen Sanierungsraten abgeleitet werden. Entsprechen die umgerechneten Sanierungsraten nicht den Angaben zur Nutzungsdauer, so müssen die Angaben zu Nutzungsdauer angepasst und nicht andersherum die Sanierungsraten erhöht werden."*

Die Konsequenz zahlenmäßig hoch veranschlagter Nutzungsdauern ist die Umsetzbarkeit besserer Standards, die dann (ggf. auf Jahrzehnte) nicht noch einmal nachgebessert werden müssen – nach der Devise „einmal, aber richtig modernisieren". Eine Wartung der Bauteile mit entsprechendem Bedarf ist dabei selbstverständlich. Damit gleichen sich künftig auch die tatsächlich notwendigen Sanierungsraten an die (politisch oder konzeptionell) geforderten an.

	Instandhaltung bzw. Instandsetzung	Nutzungsdauer
	in [%/a] der Investitionssumme	in [a]
Bauliche Maßnahmen/Bauteile		
Außenwände	1,0	45
Decken	0,0	60
Dächer	1,0	45
Fenster	1,0	35
Bodenplatte	0,0	75
Wärmeerzeuger		
(elektrische) Wärmepumpe	2,0	25
Pellets/Holzkessel	5,0	25
Fernwärmeanschluss	1,5	40
Gas/Ölkessel	2,0	25
additive Anlagentechnik		
Photovoltaik	2,0	25
Solarthermie	1,5	25
Lüftung mit WRG	5,0	25

Tabelle 16 Instandhaltungskostenansätze von Bauprodukten und Nutzungsdauern [eigene Darstellung]

In der Tabelle sind auch Ansätze für die Kosten der Instandhaltung- und Wartung zu finden. Angegeben sind prozentuale Werte, die sich auf die Erstinvestitionssumme beziehen. Die eigenen Annahmen korrespondieren mit den Lebensdauern. Ein ausführlicher Literaturvergleich findet sich in Anhang 5.8.3. Auch eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Problematik der Abgrenzung zwischen Investitionskosten (dort die „ohnehin notwendigen Anteile") und laufenden Wartungs- und Instandhaltungskosten ist dort zu finden.

Weitere Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsbewertung

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung folgt dem Leitfaden für energiebewusste Gebäudeplanung LEG [77]. Ermittelt werden Jahresgesamtkosten aus der Addition von Kapitalkosten, Wartungs- und Unterhaltskosten sowie Energiekosten. Es ist ein Zeitraum zu definieren, für den die Berechnung gilt. Im Rahmen des Gutachtens wird dieser Betrachtungszeitraum auf 30 Jahre festgelegt. Alle Investitionen mit einer längeren Nutzungsdauer haben einen Restwert, die kürzerlebigen werden entsprechend (anteilig) mehrfach benötigt.

Die Modernisierung von Gebäuden muss finanziert werden. Aus Sicht potentieller Investoren kommen zwei Szenarien in Betracht:

- das Geld ist prinzipiell verfügbar, könnte jedoch alternativ angelegt werden bzw. ist bereits angelegt; wird modernisiert, entgeht dem Investor der Anlagezins (von Aktien, Tagesgeld, Bundeswertpapieren usw.),
- das Geld ist nicht verfügbar, wird daher aufgenommen; es gilt der Hypothekenzins.

In beiden Fällen wird der Zins um die Inflation bereinigt, so dass der Realzins entsteht. In allen Studien mit dem Ziel einer Mikro- oder Makrokonzepterstellung des Bestandes wird auf den Zins zurückgegriffen bzw. dieser grundsätzlich definiert. Zahlenmäßig folgt der Wert dem aktuellen Zinsniveau bzw. der jeweils kürzeren Vergangenheit (zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie). Im Rahmen der Berechnungen dieses Gutachtens wird der Wert auf 2 %/a festgelegt. Eine Erläuterung ist Anhang 5.9.2 zu entnehmen.

Preisentwicklung

Zuletzt ist eine Festlegung zur Preisentwicklung zu treffen.

Aus der Entwicklung der Energiepreise ergibt sich eine nominale Energiepreissteigerung von etwa 3,0 bis 3,5 %/a für alle Energieträger gleichermaßen, siehe grafische Übersicht in Anhang 5.5.1. Auf die Einberechnung einer Energiepreisverteuerung wird im Rahmen dieses Gutachtens dennoch verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass künftige Energiepreisverteuerungen (wie sie in den zurückliegenden Jahren und Jahrzehnten zu verzeichnen waren) künftig ebenso zu verzeichnen sind. Aber dass sich – politisch gesteuert – entsprechend die Verteuerung aus dem in diesem Gutachten berechneten Emissionspreis ergibt. Notwendige Effekte der Verteuerung oder Verbilligung einzelner Energieträger sind Ergebnisse der Untersuchung.

Die Wartungs- und Unterhaltskosten werden ebenfalls mit dem heutigen Wert berücksichtigt. Es wird keine Preissteigerung angesetzt. Zur weiteren Vertiefung mit der Materie wird auf Anhang 5.8.3 verwiesen.

Der einzelne Wartungsvertrag für eine Technik weist keine überproportionalen Steigerungen auf, sondern folgt in seiner Preisgestaltung der allgemeinen Inflation. Allerdings führt die rein zahlenmäßige Zunahme von wartungsrelevanten Komponenten zu einem Kostenanstieg.

Für künftige Entwicklungen der Wartungskosten ist von einem Gleichlauf mit der Inflation auszugehen, d. h. es werden keine realen (inflationsbereinigten) Preissteigerungen angesetzt. Der absolute Anstieg für das einzelne Gebäude, aber auch die Gesamtheit des Wohnbaubestandes ergibt sich aus der höheren Marktdurchdringung von wartungsintensiveren Bauprodukten, insbesondere im Bereich der TGA. Diese Vorgehensweise verfolgen auch andere Studien, z. B. [124] [68].

Auch für die Bauprodukte wird von heutigen Investitionskosten ausgegangen. Es lässt sich aus der Datenlage vieler Technologien keine allgemeine Lernkurve für Effizienztechnologien ableiten. Für aus heutiger Sicht bereits lange am Markt etablierte Produkte (Wärmedämmstoffe, Brennwertkessel, Solarthermie) kann eher von steigenden Kosten (Baupreisindex) ausgegangen werden bei gleichzeitig nur noch schwach steigender oder konstanter Effizienz.

Für die – bezüglich der Marktdurchdringung – etwas neueren Technologien der Wärmepumpe sind zwar momentan steigende Kosten (ggf. künftig auch konstante) festzustellen, wobei die Effizienz sich gleichzeitig verbessert, da die Technologien herstellerseitig technisch noch optimiert werden. Nur für sehr „junge" Technologien bezüglich der Marktdurchdringung (Photovoltaik) sind gleichzeitig Kostendegressionen und technische Verbesserungen zu beobachten.

Für keines der untersuchten Bauprodukte wird im Rahmen der Berechnungen eine Verteuerung oder eine Kostendegression angenommen. Der Preisindex aller Investitionskosten liegt bei 1,0. Dies spiegelt – bis auf Wärmepumpen und Photovoltaik – gut das Marktgeschehen der letzten Jahre wieder, siehe detaillierte Ausführungen in Anhang 5.8.1.

1.4 Energetische Sanierung in der Mikroperspektive

In der Summe aller deutschen Gebäude liegen die CO_2-Emissionen für Wärme (Heizung und Warmwasser) bei 153 Mt/a, einschließlich des Haushaltsstroms bei 198 Mt/a. Hinweis: diese Werte entsprechen nicht den Emissionen, die im Klimaschutzplan der Bundesregierung dem Sektor Gebäudebereich zugeordnet werden. Die Abweichung ergibt sich, weil die Emissionen für Fernwärme und mit Strom beheizte Gebäude dort dem Sektor „Energiewirtschaft" zugeordnet werden.

Das Einhalten des Emissionsbudgets spielt in der nahen Zukunft die ausschlaggebende Rolle, um der Klimaerwärmung entgegenzuwirken und Klimaneutralität zu erreichen. Es sind Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpakete vor allem im Gebäudebestand umzusetzen, die unterschiedliche Emissionsminderungen bewirken – je nach Ausgangslage der Gebäude (baulich saniert oder unsaniert) und Art der Maßnahme (bauliche Verbesserung, Wechsel der Anlagentechnik). In der Mikroperspektive werden verschiedene Maßnahmen beispielhaft berechnet, um sie hinsichtlich

- der erreichbaren Emissionsminderungen,
- den äquivalenten CO_2-Preisen (Verhältnis von Kapitalkosten zu erzielter Emissionsminderung),
- der sich ergebenden Gesamtkosten mit Gewinn- und Verlustausweisung,
- evtl. notwendiger Fördertatbestände in Form von Zuschüssen auf die Investitionskosten,
- evtl. notwendiger zusätzlicher Preiserhöhungen der Energieträger durch Emissionskosten

zu vergleichen. Im vorliegenden Gutachten werden die zwei in Kapitel 1.3.2 vorgestellten Typgebäude (Ein- und Zweifamilienhaus EZFH und Mehrfamilienhaus MFH) verwendet, an denen exemplarische Berechnungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Gebäudemodelle sind anhand realer Verbrauchsdaten validiert, um möglichst realistische Ergebnisse zu liefern.

Zum Erfolg von Neubau- und Modernisierungsmaßnahmen spielt die Qualitätssicherung von Planung, Ausführung und Betrieb eine entscheidende Rolle, sie wird daher bei der Berechnung berücksichtigt.

Als wichtiges Ergebnis der wirtschaftlichen Analyse der Mikroperspektive hat sich der einem Endenergieträger (Gas, Heizöl, Strom, Fernwärme, Holz) zugeordnete zukünftige Emissionspreis in €/t CO_2 herausgestellt. Grundlage – auch für die nachfolgende Makroperspektive – sind zunächst die heutigen Gesamtausgaben der deutschen Haushalte für alle Wärme- und Stromanwendungen (Stand 2020). Zusammen mit den Investitionen und Bauunterhaltungskosten dient er zur wirtschaftlichen Optimierung der untersuchten Sanierungsmaßnahmen.

Die Gutachter haben zunächst darauf verzichtet, eine Energiepreissteigerung in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einzurechnen, sondern sind bei allen Einzelmaßnahmen und Konzepten von heutigen Preisen ausgegangen. Es zeigt sich dann vielfach eine Unwirtschaftlichkeit. Aus dieser Unwirtschaftlichkeit heraus wird ein notwendiger zusätzlicher Emissionspreis berechnet, der auf die heutigen Energiepreise aufzuschlagen wäre, um eine Grenzwirtschaftlichkeit zu bestimmen. Die Energiepreissteigerung ist in diesem Gutachten daher keine Annahme, sondern ein Ergebnis. Für alle untersuchten Maßnahmen wird der zusätzliche Emissionspreis angegeben.

Die Tatsache, dass viele der strombasierten Versorgungsvarianten zwar deutlich emissionsmindernd sind, jedoch nicht wirtschaftlich, wird im Gutachten deutlich herausgearbeitet. Auch Investitionskostenzuschüsse konnten vielfach das Problem nicht mindern, da nicht die jeweilige Investitionssumme problematisch war, sondern die Tatsache, dass die Energiekosten angestiegen waren. Das spricht dafür, dass eine grundlegend andere Energieträgerbepreisung angebracht ist.

Alternativ wird daher ein neues Preissystem für die Energiepreise verwendet, siehe Kapitel 1.2.3. Der Energiepreis wird als reiner Emissionspreis angegeben, vergleichbar mit der Umwandlung unterschiedlicher Währungen in eine weltweit einheitliche Währung, z. B. in Bitcoins oder in der Goldwährung, die sich heute auf den Dollar bezieht. Es setzt nicht auf die Logik „künftiger Preis = heutiger Preis + Emissionspreis", sondern geht davon aus, dass gilt „künftiger Preis = Emissionspreis". In diesem System steigen die Preise aller emissionslastigen Energieträger (Erdgas, Heizöl) stark an – verglichen mit dem heutigen Niveau, aber andere Preise (im wesentlichen Strom) sinken im Sinne der Umverteilung.

1.4.1 Bilanzierungsmodell für Gebäude- und Anlagentypen

Im Rahmen der Gutachtenbearbeitung erfolgt die Energiebilanzierung, die ökologische und ökonomische Bewertung nach dem Verfahren, welches in Anhang 6 ausführlich beschrieben ist. Berechnet werden exemplarisch zwei Typgebäude, das mittlere Ein- und Zweifamilienhaus EZFH sowie ein Mehrfamilienhaus MFH – wie in Kapitel 1.3.2 vorgestellt.

Das Verfahren dient als Grundlage für die Ausführungen zur Mikroebene in Kapitel 1.4 (sowie Anhang 3) zum einzelnen Objekt sowie durch Hochrechnen auf alle 19 Millionen Wohngebäude auch für die Makroperspektive in Kapitel 1.5 (sowie Anhang 4).

Feste und variable Parameter für die Gebäude

Grundsätzlich sind die Typgebäude mit ihren materiellen Eigenschaften hinterlegt, z. B. den Hüllflächen und Volumina sowie der Belegung mit Personen, welche nicht modifiziert werden. Darüber hinaus wird das Außenklima zunächst als nicht veränderlich angesetzt. Für andere Eigenschaften gibt es einen Katalog von Optionen, aus denen gewählt wird.

Darüber hinaus gibt es variable Eigenschaften für das einzelne Typgebäude, zwischen denen gewählt werden kann. Im Detail sind dies 11 Merkmale. Eine Option ist jeweils der Durchschnittswert für den vorhandenen Gebäudebestand, wobei dann eine mittlere Eigenschaft aller Gebäude unterstellt wird (mittlere Wandqualität, mittlere Solarausstattung, gemischt gewichtete Erzeugung usw.). Die Optionen im Einzelnen:

- Qualität der Außenwand: Ø, schlecht, mittel, gut, best
- Qualität der Fenster: Ø, schlecht, mittel, gut, best
- Qualität des oberen Gebäudeabschlusses: Ø, schlecht, mittel, gut, best
- Qualität des unteren Gebäudeabschlusses: Ø, schlecht, mittel, gut, best

- Art des Heizungssystems: Ø, Heizkörper, Fußbodenheizung, dezentral
- Art des Trinkwarmwassersystems: Ø, dezentral, zentral mit Zirkulation, zentral ohne Zirkulation
- Heizungserzeugung: Ø, Holzkessel, Gas-Niedertemperatur (NT)-Kessel, Heizöl-NT-Kessel, Gas-Brennwert-Kessel, Heizöl-Brennwert-Kessel, Fernwärme, Stromdirektversorgung, Außenluftwärmepumpe mit Spitzenlaststrom, Erdreichwärmepumpe
- Trinkwarmwassererzeugung: analog

- Photovoltaik: Ø, mit, ohne
- Solarthermie: Ø, mit, ohne
- Lüftung: Ø, mechanisch mit Wärmerückgewinnung, Fensterlüftung/Abluftanlage

Werden jeweils immer die Durchschnittswerte dieser Eigenschaften gewählt, entstehen das „Durchschnitts-EZFH“ und das „Durchschnitts-MFH“.

Für das einzelne Objekt (also auch für die „Durchschnittsgebäude“) kann neben dem aktuellen Zustand auch eine Verbesserung bilanziert werden, wobei dann die oben genannten 11 Punkte jeweils modifiziert werden – einzeln oder in Paketen. Im Einzelnen werden die materiellen Qualitäten (Dicke der Dämmung, Nutzungsgrad des Kessels usw.) dabei nicht abgefragt, sondern nur aus dem vorgegebenen Katalog der Optionen eine andere gewählt.

Andere als die genannten Verbesserungen lassen sich standardmäßig nicht berechnen. Allerdings werden im Sinne von Parametervariationen exemplarisch zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, indem die Bilanzranddaten überschrieben werden. Beispielsweise wird testhalber ein anderer Klimadatensatz gewählt oder ein sehr sparsames Nutzerverhalten bei der Trinkwarmwasserverwendung.

Verknüpfte Parameter

Die Bilanzierung folgt im Grundsatz den Rechenmodellen der EnEV-Normen [112] bzw. des IWU-Verfahrens „Energiepass Heizung/Warmwasser“ [75]. Jedoch wurde darauf geachtet, dass die Bilanzgrößen möglichst realistisch angenommen werden, so dass keine große Diskrepanz zwischen Energiebedarf und -verbrauch auftritt (detailliert erläutert in Anhang 5.2). Dies hat das Ziel, die berechnete Einsparung möglichst realistisch zu bestimmen, wie in Kapitel 1.3.3 erläutert.

In diesem Zusammenhang wurden auch Größen weggelassen, deren Einfluss nicht wesentlich ergebnisrelevant ist (vgl. auch das Beiblatt 1 zur DIN V 18599 zum Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich [109], welches diese Größen explizit benennt). In der Berechnung wurden jedoch die nach Ansicht der Gutachter relevanten Verknüpfungen der Einflussgrößen auf den Energiebedarf abgebildet. Die einzelnen Abhängigkeiten werden detailliert in den Anhängen 6.1.3 bis 6.1.8 erläutert.

Berechnungsablauf

Unabhängig, ob Betrachtungen in der Mikro- oder Makroebene erfolgen, wird zunächst ein einzelnes Gebäude berechnet. Dies kann das EZFH oder das MFH sein. Der Gesamtbestand wird anhand von Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten der Eigenschaften konzipiert. Die Bilanzierungsmethodik ist jedoch immer identisch. Sie wird in Anhang 6.1 detailliert erläutert. Berechnet werden:

- der Heizwärmebedarf abhängig von der Güte der Hüllflächen,
- der Trinkwarmwasserbedarf je nach Personenzahl,
- die Endenergie unter Berücksichtigung von Verteil- und Speicherverlusten sowie des Jahresnutzungsgrades bzw. der Jahresarbeitszahl des Erzeugers,
- der Haushaltstrombedarf,
- die gesamte End- und Primärenergie sowie die Emissionen,
- der gebäudenah erzeugte Strom durch PV, seine Selbstnutzung und Rückspeisung.

Jahreskosten

Für das Einzelgebäude, welches einer Berechnung unterzogen wird, wird zunächst eine Verbesserungsmaßnahme durchgerechnet. Die Energiekosten werden aus Endenergien und Energiepreisen bestimmt.

Die Kapitalkosten werden mit einer Annuität aus den Investitionskosten berechnet. Alle Bestandteile einer Modernisierung, welche nicht genauso langlebig sind wie der Betrachtungszeitraum, werden entweder mehrfach benötigt oder haben einen Restwert. Für eine Verbesserungsmaßnahme gibt es die Vollkosten sowie die energiebedingten Mehrkosten, die unterstellen, dass ohnehin eine Instandhaltungsmaßnahme angestanden hat. Wenn „Vollkosten“ berechnet werden, wird entsprechend für die Investition I der gesamte ermittelte Betrag eingesetzt. Werden „Mehrkosten“ gerechnet, wird er gekürzt um die ohnehin erforderlichen Kosten und nur die energetisch bedingten Kosten sind relevant.

Die Wartungs- und Unterhaltskosten werden standardmäßig aus der Investition berechnet. Es gilt ein prozentualer Ansatz der Anschaffungskosten, der jährlich aufzuwenden ist.

Durch Addition der drei Kostenanteile „Energie“, „Kapital“ und „Wartung/Unterhalt“ ergeben sich die Jahreskosten. Sofern sich keine geringeren Gesamtkosten einstellen, ergibt sich ein Fehlbetrag, der anderweitig kompensiert werden muss.

Ergebnisinterpretation 1: notwendiger Investitionskostenzuschuss

Abbildung 24 zeigt die erste Option zur Kompensation des Fehlbetrags: eine Bezuschussung der Investition bis zur rechnerischen Kostengleichheit. Die Kapitalkosten vermindern sich entsprechend. Die Berechnung in diesem Gutachten zielt darauf ab, den notwendigen Prozentsatz an Zuschuss (bezogen auf die Gesamtkosten der Investition zu bestimmen). Dieser kann beispielsweise mit heutigen Zuschüssen von KfW oder BAFA verglichen und interpretiert werden.

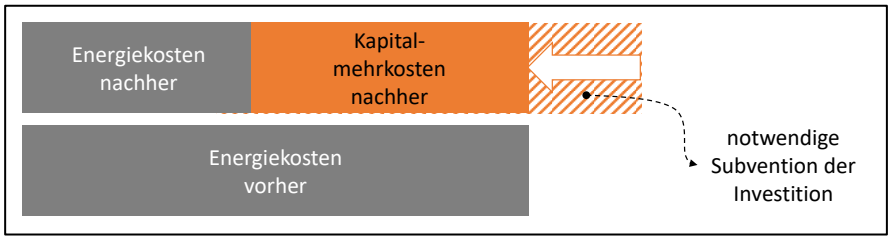


Abbildung 24 Ausgleich der Fehlkosten durch Investitionskostenzuschüsse [eigene Darstellung]

Der formale Ansatz wird – auch anhand von Beispielzahlen – detailliert in Anhang 6.1.2 erläutert.

Ergebnisinterpretation 2: notwendiger zusätzlicher Emissionspreis

Abbildung 25 zeigt die zweite Option zur Kompensation des Fehlbetrags: eine Erhöhung der Energiekosten bis zu einer rechnerischen Kostengleichheit. Diese Maßnahme betrifft beide Zustände, d. h. die Energiekosten vor und nach der Modernisierung. Die Berechnung in diesem Gutachten zielt darauf ab, den notwendigen Emissionspreis zu finden, der zu einer Gleichheit führt. Dieser kann beispielsweise mit heute bekannten (geplanten oder geltenden) Energieträgerbesteuerungen o. ä. (Emissionszertifikate) verglichen und interpretiert werden.

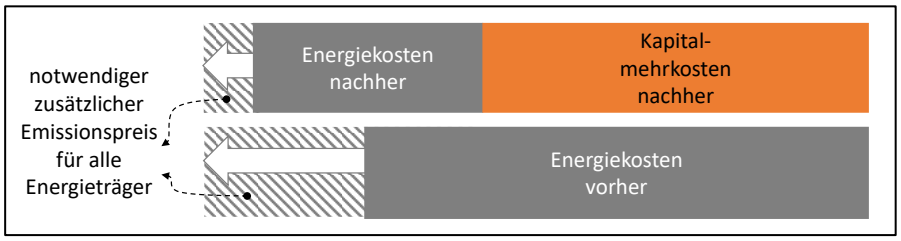


Abbildung 25 Ausgleich der Fehlkosten durch zusätzliche Emissionspreise [eigene Darstellung]

Der formale Ansatz wird – auch anhand von Beispielzahlen – detailliert in Anhang 6.1.2 erläutert.

Ergebnisinterpretation 3: äquivalenter CO_2-Preis

Im Rahmen der energetischen Bewertung von Gebäuden und zugehöriger betriebswirtschaftlicher Untersuchungen hat sich der „äquivalente Energiepreis $k_{äqu}$“ etabliert [78] [125] [126]. Er wird auch unter dem Begriff „spezifische Gestehungskosten“ der Sanierung geführt. Nach derselben Methodik lässt sich auch eine Emissionsbewertung durchführen.

Der „äquivalente CO_2-Preis k_{CO2}“ lässt sich unmittelbar aus den Überlegungen zum äquivalenten Energiepreis ableiten. Für die zu bewertende Energieeinsparmaßnahme wird ermittelt, wie teuer es ist, eine Tonne CO_2 (bzw. korrekt CO_2-Äquivalent) zu vermeiden.

Für die untersuchte Verbesserungsmaßnahme wird abschließend bestimmt, welcher äquivalente CO_2-Preis sich ergibt. Dazu werden die Mehrkosten für Kapital sowie Wartung/Unterhalt den erzielten Emissionsminderungen gegenübergestellt.

Eine detaillierte Erläuterung des Rechenansatzes findet sich in Anhang 5.5.4.

1.4.2 Maßnahmen an der Gebäudehülle

Nachfolgend werden Maßnahmen an der Außenwand, den Fenstern sowie dem oberen und unteren Gebäudeabschluss als Einzelmaßnahmen untersucht. Dazu wird auf die beiden Typgebäude EZFH und MFH zurückgegriffen, wobei alle anderen Hüllbauteile – außer das jeweils untersuchte – mit einem mittleren Zustand angenommen werden, ebenfalls die gesamte Technik.

Wenn absehbar ist, dass sich gänzlich andere Aussagen ergeben, wenn auch andere Merkmale abweichen – insbesondere die Art der Wärmeerzeugung – wird dieser Fall gesondert untersucht. Allerdings wird darauf verzichtet, nur selten vorkommende Konstellationen von Baukörper/Technik-Ausstattung auszuwerten.

Bei allen Maßnahmen am Baukörper werden grundsätzlich zwei Fälle unterschieden: die Maßnahme erfolgt, weil sie ohnehin geplant war (im Sanierungszyklus) oder sie wird anlasslos durchgeführt. Im ersten Fall sind die Mehrkosten relevant – über das ohnehin geplante Maß hinaus. Im zweiten Fall zählen die Vollkosten.

Bestands- und Zielzustand

Tabelle 17 zeigt die Qualitäten der Gebäudehülle und die Häufigkeit des Vorkommens im Bestand. Grundlage sind die Daten zweier IWU-Studien [62] [7]. Eine detaillierte Erläuterung der Vorgehensweise bei der Fortschreibung des Sanierungsgeschehens liefern die Anhänge 3.2.1 bis 3.2.4.

	Ein- und Zweifamilienhaus				Mehrfamilienhaus			
	Außen-wand	Fenster	Dach/ obere Ge-schossde-cke	Kellerde-cke/ Bo-denplatte	Außen-wand	Fenster	Dach/ obere Ge-schossde-cke	Kellerde-cke/ Bo-denplatte
Bestand	U-Wert, in [W/(m²K)]							
gut	0,31	1,30	0,26	0,38	0,34	1,30	0,26	0,39
mittel	0,60	1,60	0,44	0,68	0,68	1,60	0,45	0,69
schlecht	1,00	2,70	1,00	1,00	1,00	2,70	1,00	1,00
alle	0,68	2,12	0,49	0,76	0,69	2,06	0,49	0,77
Bestand	Anteile, in [-]							
gut	0,39	0,10	0,59	0,30	0,40	0,10	0,58	0,29
mittel	0,15	0,40	0,13	0,17	0,15	0,46	0,14	0,18
schlecht	0,47	0,50	0,28	0,53	0,45	0,44	0,27	0,52
Ziel	U-Wert, in [W/(m²K)]							
best	0,15	0,90	0,15	0,20	0,15	0,90	0,15	0,20

Tabelle 17 Sanierungszustand und Qualitäten der Gebäudehülle im Bestand sowie Zielzustand [eigene Darstellung]

Die in Tabelle 17 ebenfalls vermerkten Zielzustände ergeben sich unter Berücksichtigung der Empfehlungen des Passivhausinstitutes und der Einzelmaßnahmenförderung der KfW bzw. der EnSanMV [29]. Ein Abgleich mit anderen Studien ist ebenso erfolgt, z. B. mit der „Tabula"-Studie des IWU [102], der Studie zum Dämmpotential von Jochum et al. [127] und der Studie zur Sektorenkopplung von AGORA [128]. Eine detaillierte Erläuterung findet sich in den Anhängen 3.2.1 bis 3.2.4.

Es handelt sich somit um best practice-Zielwerte. Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese in allen Gebäuden umgesetzt werden können (Stichwort: erhaltenswerte Fassade, Innendämmung, begrenzte Höhe von Kellern usw.). Bei der Betrachtung in der Makroebene wird dies berücksichtigt.

Ergebnisse für die Maßnahmen

Verwendet werden die beiden Typgebäude, wie in Kapitel 1.3.2 beschrieben. Variiert wird nur jeweils eine Eigenschaft: die Qualität des betrachteten Bauteils. Die restlichen Eigenschaften (alle anderen Bauteile sowie die gesamte Technik) sind bei dieser Betrachtung zunächst durchschnittlich.

Tabelle 18 und Tabelle 19 zeigen die Ergebnisse getrennt nach den beiden Gebäudetypen. Außerdem wird unterschieden, ob der Ausgangszustand schlecht ist oder ob schon energetische Maßnahmen erfolgten.

Die Maßnahmen sind sortiert nach dem äquivalenten CO_2-Preis, also nach der Frage der Kosten je eingesparter Tonne CO_2. Die Gutachter geben in der letzten Spalte eine Einschätzung ab, wie weiter verfahren werden kann – ob die Maßnahme sich aus wirtschaftlicher Sicht als umsetzungsgünstig erweist und entsprechend weiterverfolgt wird und mit welchem Aufwand. Zu den Fenstern ist anzumerken: Fenster mit einem Zustand schlechter als 2,7 W/(m²K) sind nicht untersucht worden; hier kann eine Anreizförderung erfolgen, um diese aus dem Markt zu verdrängen.

Für die in der Tabelle dokumentierten Daten gilt: je geringer der äquivalente CO_2-Preis, desto günstiger lässt sich mit dem eingesetzten Kapital eine Emissionsminderung erreichen. Ein positiver Wert unter „Jahreskosten, Fehlbetrag" bedeutet eine Unwirtschaftlichkeit, die zu den genannten notwendigen Investitionskostenzuschüssen oder zusätzlichen Emissionspreisen führt. Ein negativer Wert stellt einen Gewinn dar, so dass keine der beiden genannten Ausgleichsmaßnahmen erforderlich ist.

Eine detaillierte Erläuterung der Datenermittlung, weiterer Bilanzergebnisse, z. B. der Endenergie, der Investitionskosten usw. liefern die Anhänge 3.2.1 bis 3.2.4. Eine grafische Aufbereitung ist in Anhang 3.2.5 zu finden.

	Kurzbeschreibung	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
			[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
erstmalige Dämmung bzw. schlechter Ausgangszustand								
OGD	schlecht → best	V	-29	121	-2,51	keiner	keiner	+++
Dach	schlecht → best	M	-29	214	-1,93	keiner	keiner	+++
Kellerdecke	schlecht → best	V	-13	241	-0,37	keiner	keiner	+++
AW außen	schlecht → best	M	-40	254	-1,05	keiner	keiner	+++
AW innen	schlecht → gut	V	-32	322	0,10	2	7	+
AW außen	schlecht → best	V	-40	340	0,43	7	25	+
Bodenplatte	schlecht → best	V	-13	456	0,70	31	141	o
Dach	schlecht → best	V	-29	457	1,82	31	142	o
Fenster	schlecht → best	V	-13	1019	3,71	69	703	-
zusätzliche Dämmung bzw. mittlerer Ausgangszustand								
OGD	mittel → best	V	-12	302	-0,06	keiner	keiner	+++
Kellerdecke	mittel → best	V	-8	383	0,20	18	69	+
AW außen	mittel → best	M	-26	448	1,23	22	134	o
Dach	mittel → best	M	-12	533	0,96	17	218	o
Fenster	mittel → best	M	-6	857	1,12	21	542	-
Dach	mittel → best	V	-12	1263	4,17	75	948	-
+++ (umsetzen), ++ (ggf. umsetzen), + (anreizen/fördern), o (ggf. anreizen fördern), - (nicht anreizen/fördern)								
OGD (obere Geschossdecke), AW (Außenwand)								

Tabelle 18 Ergebnisdarstellung der baulichen Einzelmaßnahmen für das Ein- und Zweifamilienhaus [eigene Darstellung]

	Kurzbeschreibung	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
			[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
erstmalige Dämmung bzw. schlechter Ausgangszustand								
OGD	schlecht → best	V	-22	113	-1,63	keiner	keiner	+++
Dach	schlecht → best	M	-22	201	-1,38	keiner	keiner	+++
Kellerdecke	schlecht → best	V	-10	227	-0,29	keiner	keiner	+++
AW außen	schlecht → best	M	-36	240	-1,01	keiner	keiner	+++
AW innen	schlecht → gut	V	-28	309	-0,09	keiner	keiner	+++
AW außen	schlecht → best	V	-36	321	0,04	1	3	+
Dach	schlecht → best	V	-22	429	0,89	26	111	+
Bodenplatte	schlecht → best	V	-10	430	0,36	26	112	+
Fenster	schlecht → best	V	-18	925	3,60	66	607	-
zusätzliche Dämmung bzw. mittlerer Ausgangszustand								
OGD	mittel → best	V	-9	285	-0,09	keiner	keiner	+++
Kellerdecke	mittel → best	V	-6	354	0,07	10	37	+
AW außen	mittel → best	M	-26	361	1,17	9	143	+
Dach	mittel → best	M	-9	503	0,52	16	185	o
Fenster	mittel → best	M	-8	764	1,08	20	466	-
Dach	mittel → best	V	-9	1166	2,38	73	849	-
+++ (umsetzen), ++ (ggf. umsetzen), + (anreizen/fördern), o (ggf. anreizen fördern), - (nicht anreizen/fördern)								
OGD (obere Geschossdecke), AW (Außenwand)								

Tabelle 19 Ergebnisdarstellung der baulichen Einzelmaßnahmen für das Mehrfamilienhaus [eigene Darstellung]

Fazit zur Außenwanddämmung

An erster Stelle für Modernisierungsmaßnahmen im Bestand stehen Verbesserungsmaßnahmen an der Gebäudehülle mit der Außenwanddämmung als „größtem Hebel“. Die Außenwanddämmung auf hochwertiges Niveau (von außen) oder ein gutes Niveau (von innen) ist wirtschaftlich unter zwei Bedingungen: es wird nicht mit Holz geheizt und es sind ohnehin Maßnahmen an der Fassade notwendig.

Ist keine Maßnahme geplant und Vollkosten werden wirksam, so ist ein nur geringer Investitionskostenzuschuss von maximal 5 % der Vollkosten erforderlich, um eine Grenzwirtschaftlichkeit zu erreichen. Alternativ würde ein zusätzlicher Emissionspreis von maximal 25 €/t und die damit einhergehende Verteuerung der Energieträger denselben Effekt haben.

Die Außenwand mit Dämmung ist auf Basis der Vollkosten (anlasslos) nicht ohne Förderung nachzudämmen, jedoch sind im Rahmen ohnehin fälliger Maßnahmen an der Dämmung geringe Investitionskostenzuschüsse (in der Größenordnung 20 %) ausreichend, um eine Grenzwirtschaftlichkeit zu erzielen; Voraussetzung ist eine „mittlere“ Wand eines Standards vor der 2. Wärmeschutzverordnung von 1984 ($U \geq 0{,}6$ W/(m²K)).

Fazit zum Fenstertausch

Eine Fenstersanierung ist hingegen sehr kostenintensiv, so dass sie selbst bei ohnehin notwendigen Ersatzmaßnahmen nicht wirtschaftlich ist, aber mit Zuschüssen werden kann. Einen vorzeitigen Fensteraustausch konnten die Gutachter nicht wirtschaftlich nachweisen, auch nicht im Zusammenhang von Maßnahmenpaketen.

Die Gutachter können feststellen, dass der Fenstertausch vor allem dann sinnvoll ist, wenn das Bestandsfenster das Ende seiner Lebensdauer – also etwa 35 Jahre – erreicht hat. Der Empfehlung, u. a. der Herstellerverbände [129], den Austausch zunächst auf Fenster mit schlechteren Werten als $U = 2{,}7$ W/(m²K) (bzw. neutral gesprochen Zweischeiben-Isolierverglasung oder schlechter) zu beschränken, erscheint anhand der Kosten sinnvoll.

Die schnelle Umsetzung eines Standards von $U \leq 1{,}0$ W/(m²K) ist aus Sicht der Emissionsminderung erstrebenswert. Die notwendige Förderung beläuft sich auf ca. 20 % der Gesamtkosten (incl. KG 700, sonst entsprechend weniger).

Darüber hinaus führt eine Fenstersanierung – da im Wohnungsbau alle relevanten Räume ähnlich davon profitieren – dazu, dass die Systemtemperaturen der Heizung abgesenkt werden können. Dies wirkt sich zukünftig positiv auf die Effizienz insbesondere von Wärmepumpen aus.

Fazit zur Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses

Die Dämmung der obersten Geschossdecke ist eine wirtschaftliche Maßnahme, die auch anlasslos unter Verwendung der Vollkosten keine Bezuschussung benötigt. Sie führt zu sehr geringen äquivalenten CO_2-Preisen. Dies gilt auch, wenn bereits eine Dämmung vorhanden ist, für die Aufdopplung. Erst ab einem Ausgangszustand, welcher der Wärmeschutzverordnung 1995 entspricht, ist dies nicht mehr wirtschaftlich.

Die Dachsanierung hingegen weist schlechtere Ergebnisse auf. Auf Basis der Vollkosten ergibt sich keine Wirtschaftlichkeit. Es sind entweder Investitionskostenzuschüsse von etwa 30 % notwendig oder eine künstliche Energiepreiserhöhung tritt ein (Emissionspreis). Liegt die Dachsanierung aber sowieso an, ist die Maßnahme wirtschaftlich. Eine Aufdopplung der Dämmung ist hingegen grenzwirtschaftlich.

Bei einer Dachsanierung als Einzelmaßnahme ist es in jedem Fall ratsam, bereits einen ausreichenden Dachüberstand herzustellen für eine Außenwanddämmung, selbst wenn diese erst später erfolgt.

Fazit zur Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses

Die Dämmung der Kellerdecke ist eine wirtschaftliche Maßnahme, die auch anlasslos unter Verwendung der Vollkosten keine Bezuschussung benötigt. Sie führt zu geringen äquivalenten CO_2-Preisen. Auf Basis der Vollkosten ergibt sich eine sinnvolle Aufdopplung der Dämmung mit ca. 15 % Zuschuss, wenn eine „mittlere“ Deckenkonstruktion vor der 2. Wärmeschutzverordnung von 1984 zugrunde gelegt wird ($U \geq 0{,}7$ W/(m²K)).

Die – praktisch nie „ohnehin“ anzutreffende – Bodendämmung ist nicht wirtschaftlich. Es ergeben sich Fehlbeträge bei der Wirtschaftlichkeit. Diese wären durch Investitionskostenzuschüsse von etwa 15 % auszugleichen. Alternativ würde die Energiepreiserhöhung zu einer Grenzwirtschaftlichkeit führen. Mit den notwendigen Emissionspreisen von 112 bis 141 €/t ergäben sich beispielsweise Gaspreise in der Größenordnung 8 bis 9 Cent/kWh.

Insgesamt ist die Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses im Mehrfamilienhaus deutlich einfacher umzusetzen als im Ein- und Zweifamilienhaus, da in großer Zahl unbeheizte Keller vorhanden sind.

Einfluss der vorhandenen Anlagentechnik

Die Ergebnisse in Tabelle 18 und Tabelle 19 wurden auf Basis einer mittleren Anlagentechnik ermittelt. Diese ist zu großen Teilen durch Gas- und Heizölkessel sowie Fernwärme geprägt. Für die drei genannten Versorgungssysteme ergeben sich Ergebnisse mit marginalen Abweichungen zu den tabellierten Werten.

Sind Wärmepumpen vorhanden, aber die genannten Hüllbauteile noch ungedämmt, so ergeben sich günstigere Ergebnisse (bessere Wirtschaftlichkeit, geringere notwendige Förderung usw.).

Einzig der Holzkessel führt zu nennenswert anderen Ergebnissen, da sein Energiepreis geringer als der von Gas und Heizöl ist. Hier würde zum Erzielen einer Wirtschaftlichkeit der notwendige Investitionskostenzuschuss steigen. Alternativ wären die Emissionen zu bepreisen – was bei Holz jedoch zu keinem sinnvollen Ergebnis führt. Daher ist festzuhalten, dass Gebäude mit einem Holzkessel unter den ermittelten Ergebnissen nicht animiert werden, eine Gebäudeverbesserung zu erreichen. Andererseits sind deren Beiträge zu den Gesamtemissionen ohnehin gering (geringer Anteil in der Beheizungsstruktur und geringe Einzelemissionen).

Einschränkungen

Sind Gebäude deutlich unterdurchschnittlich mit Personen belegt (z. B. das EZFH mit 2,0 Personen) verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit. In allen Gebäuden mit dichterer Personenbelegung sind die Werte besser.

1.4.3 Maßnahmen an den Haupterzeugern

Die Mehrzahl der Gebäude in Deutschland ist derzeit mit Kesseln ausgestattet, dies zeigt auch die tabellarische Beschreibung der Typgebäude in Kapitel 1.3.2. Die Erzeuger unterliegen einer üblichen Altersstruktur siehe Abbildung 26.

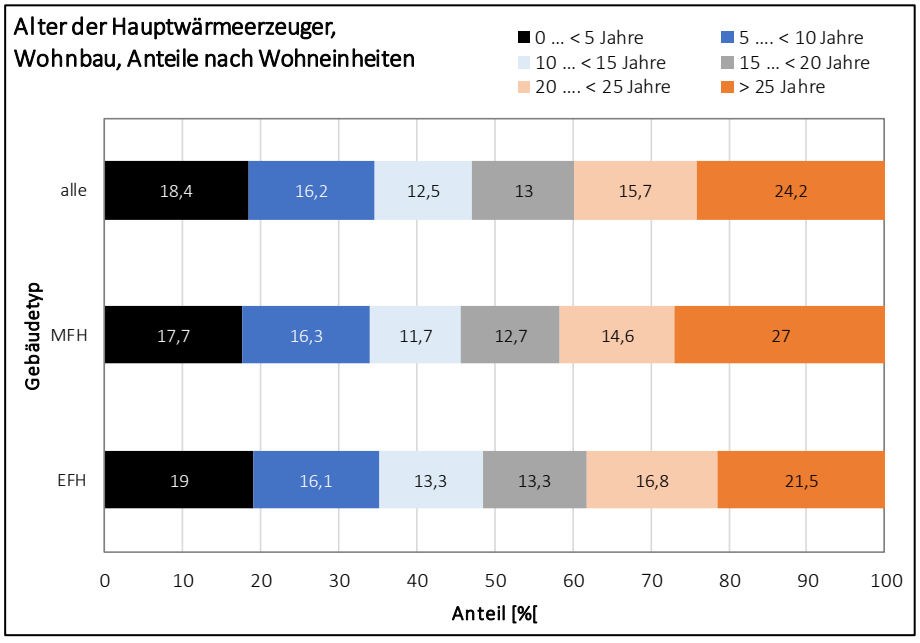


Abbildung 26 Altersstruktur der zentralen Erzeuger, eigene Darstellung nach [5]

Eine BDEW-Studie kommt [5] auf Basis der Zahlen bis zum Jahr 2018 zu einem mittleren Alter der Gebäudewärmeerzeuger von 17,0 Jahren. Knapp 40 % aller Erzeuger sind älter als 20 Jahre, ein Viertel ist sogar älter als

25 Jahre. Fernwärmeanschlüsse in Gebäuden wurden dabei nicht erfasst; ebenso keine Einzelheizungen, wie Kachelöfen oder Elektrospeicherheizungen.
Der Umstieg auf andere Energieträger als die fossilen ist unbestritten, um die Emissionen zu senken. Daher schließen die Gutachter einen Beibehalt des Status-Quo aus. Nachfolgend werden Maßnahmen an den Hauptwärmeerzeugern als Einzelmaßnahmen untersucht. Dies sind Wärmepumpen, Gas- und Ölkessel, Holzkessel sowie verschiedene Wärmenetzlösungen. Dazu wird auf die beiden Typgebäude EZFH und MFH zurückgegriffen.

Da die Effizienz der Erzeuger häufig von der Systemtemperatur abhängt, werden die Betrachtungen zum Erzeugertausch zunächst am Durchschnittsgebäude (alle Hüllbauteile sind „durchschnittlich“) getestet, jedoch alternativ auch immer ein saniertes Gebäude (alle Hüllbauteile sind „gut“ oder auf den Standard „best“ saniert) als Alternative betrachtet. In beiden Sanierungsgraden ergeben sich deutlich unterschiedliche Systemtemperaturen.

Wird ein Erzeuger ausgetauscht, ist für die Emissionsminderung auch relevant, welcher Energieträger vorher zum Einsatz kam. Daher ergeben sich viele verschiedene Varianten. Diese werden nachfolgend tabellarisch, in der Detaildarstellung des Anhangs 3.3.7 auch grafisch ausgewertet.

Bei allen Wärmeerzeugerwechseln werden grundsätzlich zwei Fälle unterschieden: die Maßnahme erfolgt, weil sie ohnehin geplant war (im Sanierungszyklus) oder sie wird anlasslos durchgeführt. Im ersten Fall sind die Mehrkosten relevant – über das ohnehin geplante Maß hinaus. Im zweiten Fall zählen die Vollkosten.

Effizienzen mit und ohne Qualitätssicherung

Aus Effizienzmessungen im Feld lassen sich Jahresnutzungsgrade oder Jahresarbeitszahlen ableiten. Es werden dazu die erzeugten Wärmemengen und die aufgewendeten Energien ins Verhältnis gesetzt. Detaillierte Bandbreiten für Praxiswerte sind den Anhängen 3.3.1 bis 3.3.4 zu entnehmen.

Nachfolgende Tabelle 20 fasst die Annahmen zusammen, die für das Gutachten gewählt wurden. Die Autoren dieses Gutachtens sehen es als sinnvoll an, eine Unterscheidung bei der Berechnung vorzunehmen: mit und ohne Qualitätssicherung.

Effizienzangaben für die Hauptwärmeerzeuger, ggf. brennwertbezogen, in [-]			
	Qualitätssicherung:	mit	ohne
Erdreichwärmepumpe*	Durchschnittsgebäude mit Heizkörpern … best-saniertes Gebäude mit Flächenheizung	3,3 … 4,4	2,9 … 3,8
Erdreichwärmepumpe*	Trinkwarmwasserbetrieb	2,5	2,4
Außenluftwärmepumpe*	Durchschnittsgebäude mit Heizkörpern … best-saniertes Gebäude mit Flächenheizung	2,5 … 3,6	2,1 … 3,0
Außenluftwärmepumpe*	Trinkwarmwasserbetrieb	2,0	1,8
Brennwertkessel Gas/Heizöl		0,93	0,88
Niedertemperaturkessel Gas/Heizöl		0,85	0,80
Holzkessel		0,75	0,70
Fernwärmeübergabestation		0,99	0,98

Tabelle 20 Effizienzen der Haupterzeuger mit und ohne Qualitätssicherung [eigene Darstellung]

* Die Jahresarbeitszahlen werden im Rahmen der Berechnungen zu diesem Gutachten abhängig von der Vorlauftemperatur bestimmt, daher sind die tabellierten Angaben nur Bandbreiten aus den durchgerechneten Projekten.

Eine detaillierte Erläuterung weiterer Bilanzergebnisse, z. B. der Endenergie, der Investitionskosten usw. liefern die Anhänge 3.3.1 bis 3.3.4. Eine grafische Aufbereitung ist in Anhang 3.3.7 zu finden.

Ergebnisse für die Maßnahmen

Verwendet werden die beiden Typgebäude, wie in Kapitel 1.3.2 beschrieben. Variiert wird nur jeweils eine Eigenschaft: der Erzeuger. Die restlichen Eigenschaften (alle anderen technischen Merkmale sowie die gesamte bauliche Qualität) sind bei dieser Betrachtung zunächst durchschnittlich.

Tabelle 21 und Tabelle 22 zeigen die Ergebnisse getrennt nach den beiden Gebäudetypen. Außerdem wird unterschieden, ob der Ausgangszustand durchschnittlich ist oder ob schon energetische Maßnahmen an der Hülle erfolgten.

Die Maßnahmen sind sortiert nach dem äquivalenten CO_2-Preis, also nach der Frage der Kosten je eingesparter Tonne CO_2. In der Spalte „Fazit“ ist eine Einschätzung der Gutachter zur möglichen Weiterverfolgung der Maßnahme zu finden.

	alter Erzeuger	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
			[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
heutiges Durchschnittsgebäude Deutschland								
Holzkessel	Öl-NT	M	-94	158	6,63	86	137	ggf. umsetzen
Holzkessel	Öl-BW	V	-94	186	8,14	106	197	ggf. umsetzen
AU-WP	Öl-NT	M	-49	198	7,46	109	298	anreizen/fördern
AU-WP	Öl-BW	V	-40	384	10,82	158	607	anreizen/fördern
E-WP	Öl-NT	M	-59	394	11,82	96	391	anreizen/fördern
AU-WP	Gas-NT	M	-28	485	7,46	109	729	ggf. anreizen/fördern
E-WP	Öl-BW	V	-52	533	13,67	111	594	ggf. anreizen/fördern
E-WP	Gas-NT	M	-42	771	11,82	96	766	ggf. anreizen/fördern
E-WP	Gas-BW	V	-33	1190	13,67	111	1326	nicht anreizen/fördern
AU-WP	Gas-BW	V	-16	1337	10,82	158	2115	nicht anreizen/fördern
auf gutes Niveau saniertes Gebäude								
AU-WP	Öl-NT	M	-52	171	3,61	72	231	anreizen/fördern
Holzkessel	Öl-NT	M	-94	180	4,49	73	159	ggf. umsetzen
Holzkessel	Öl-BW	V	-94	254	6,36	104	264	ggf. umsetzen
E-WP	Öl-NT	M	-62	369	6,32	76	340	anreizen/fördern
AU-WP	Gas-NT	M	-33	381	3,61	72	517	anreizen/fördern
AU-WP	Öl-BW	V	-44	439	6,82	136	597	anreizen/fördern
E-WP	Öl-BW	V	-56	576	8,62	104	599	ggf. anreizen/fördern
E-WP	Gas-NT	M	-47	686	6,32	76	633	ggf. anreizen/fördern
E-WP	Gas-BW	V	-38	1185	8,62	104	1232	nicht anreizen/fördern
AU-WP	Gas-BW	V	-22	1250	6,82	136	1700	nicht anreizen/fördern
WP: Wärmepumpe, E: Erdreich, AU: Außenluft, NT: Niedertemperaturkessel, BW: Brennwertkessel								

Tabelle 21 Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Haupterzeugern für das Ein- und Zweifamilienhaus [eigene Darstellung]

Für alle untersuchten Erzeuger ist festzustellen, dass sich deutliche Emissionsminderungen erzielen lassen. Es werden beim Ersatz von Heizöl durch Wärmepumpen typischerweise 45 bis 55 % Emissionsminderung (Wärme) erreicht, beim Ersatz von Gaskesseln etwa 25 bis 35 %. Zum Vergleich: nur die Außenwand- und Dachverbesserung erreichen diesen Wert, alle anderen baulichen Maßnahmen liegen in der Größenordnung von 10 bis 15 %.

Auch die erzielten äquivalenten CO_2-Preise, d. h. die Frage wie sinnvoll das investierte Kapital die Emissionen mindert – ist in Teilen vergleichbar. Ein typischer Wert vieler baulicher Maßnahmen liegt bei 200 bis 400 €/t. Das ist mit Wärmepumpen erreichbar, wenn Erzeuger getauscht werden, die ohnehin zur Sanierung anstanden. Aus Sicht der Emissionsvermeidung ist jeweils der Ersatz von Heizöl günstiger als der von Erdgas, da es emissionsintensiver ist. Darüber hinaus ist der Ersatz von NT-Kesseln günstiger als der von Brennwertkesseln.

Die Berechnungen zum Ersatz von Heizkesseln oder Fernwärme durch Wärmepumpen ist jedoch durch alle Varianten hinweg unwirtschaftlich – saniertes Gebäude oder durchschnittliches, EZFH oder MFH.

Während die baulichen Maßnahmen mit Investitionskostenzuschüssen von größtenteils maximal 20 % in die Grenzwirtschaftlichkeit zu befördern sind (außer Fenster), ergeben sich bei den Erzeugern im besten Falle Werte knapp unter 100 %. Häufig sind die Energiekosten nachher höher als vorher, so dass selbst bei einer „geschenkten“ Wärmepumpe keine Wirtschaftlichkeit eintritt.

	alter Erzeuger	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
			[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
heutiges Durchschnittsgebäude Deutschland								
Holzkessel	Öl-NT	M	-94	100	3,22	79	77	ggf. umsetzen
Holzkessel	Öl-BW	V	-94	114	4,39	108	123	ggf. umsetzen
AU-WP	Öl-NT	M	-48	134	5,12	138	239	anreizen/fördern
Fernwärme	Gas-NT	V	-7	238	2,44	480	1143	nicht anreizen/fördern
AU-WP	Öl-BW	V	-40	244	7,23	195	475	anreizen/fördern
E-WP	Öl-NT	M	-58	325	8,45	105	326	anreizen/fördern
AU-WP	Gas-NT	M	-27	331	5,12	138	590	anreizen/fördern
E-WP	Öl-BW	V	-52	409	9,36	116	474	anreizen/fördern
AU-WP	Fernwärme	V	-22	568	4,02	108	615	ggf. anreizen/fördern
E-WP	Gas-NT	M	-42	640	8,45	105	641	ggf. anreizen/fördern
E-WP	Fernwärme	V	-38	731	6,15	76	556	ggf. anreizen/fördern
AU-WP	Gas-BW	V	-16	872	7,23	195	1700	nicht anreizen/fördern
E-WP	Gas-BW	V	-32	921	9,36	116	1067	nicht anreizen/fördern
auf gutes Niveau saniertes Gebäude								
Holzkessel	Öl-NT	M	-94	119	2,62	83	97	ggf. umsetzen
Holzkessel	Öl-BW	V	-94	137	3,36	106	145	ggf. umsetzen
AU-WP	Öl-NT	M	-49	153	3,52	125	251	anreizen/fördern
AU-WP	Öl-BW	V	-40	282	5,02	178	503	anreizen/fördern
E-WP	Öl-NT	M	-59	348	5,82	101	345	anreizen/fördern
AU-WP	Gas-NT	M	-28	372	3,52	125	612	anreizen/fördern
E-WP	Öl-BW	V	-52	446	6,52	113	506	anreizen/fördern
AU-WP	Fernwärme	V	-23	645	2,95	105	675	ggf. anreizen/fördern
E-WP	Gas-NT	M	-42	680	5,82	101	673	ggf. anreizen/fördern
E-WP	Fernwärme	V	-38	791	4,45	77	612	ggf. anreizen/fördern
AU-WP	Gas-BW	V	-16	974	5,02	178	1737	nicht anreizen/fördern
E-WP	Gas-BW	V	-33	993	6,52	113	1125	nicht anreizen/fördern
Fernwärme	Gas-NT	V	8	k. A.	1,89	486	k. A.	nicht umsetzen
WP: Wärmepumpe, E: Erdreich, AU: Außenluft, NT: Niedertemperaturkessel, BW: Brennwertkessel								

Tabelle 22 Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Haupterzeugern für das Mehrfamilienhaus [eigene Darstellung]

Dieses Ergebnis kann mit dem hohen Strompreis (auch beim Wärmepumpentarif) begründet werden, der gegenüber dem vorherigen Energieträger kaum zu Kostenreduktionen führt. Etwas besser schneidet Fernwärmeersatz ab, jedoch auch kaum wirtschaftlich. In der heute vorhandenen Preisstruktur müsste eine Photovoltaikanlage eingebunden werden, die zumindest teilweise die Strompreise mindert (siehe Kapitel 1.4.4).

Alternativ treten Energieträgerverteuerungen ein (Gas- und Ölpreise müssten mindestens verdoppelt, oft auch verdreifacht werden, damit sich die anlagentechnischen Maßnahmen rechnen) oder das System der Energieträgerbepreisung modifiziert werden, wie in Kapitel 1.2.3 beschrieben.

Fazit Wärmepumpen

Alle Studien zur Energiewende gehen von einer Vervielfachung des Wärmepumpenbestandes aus, wenn auch in unterschiedlicher Größenordnung (detailliert siehe Anhang 3.3.1). Die Gutachter können dem zustimmen.

Der Wärmepumpenmarkt ist einer der am stärksten wachsenden Erzeugermärkte für die Gebäudebeheizung und Trinkwassererwärmung. Obwohl die heute feststellbaren Anteile am Gesamterzeugerbestand mit etwa 5 % noch gering sind, hat im Neubau schon fast jede dritte Wohneinheit eine Wärmepumpe, vgl. Hintergrundinformationen in Anhang 5.6.

Eine Wärmepumpe kann aus technischer Sicht nur schlecht im unsanierten Bestand eingesetzt werden. Mit einer Fußbodenheizung könnte die erforderliche Leistungsdichte kaum oder gar nicht erreicht werden (die Oberflächentemperaturen würden zu hoch). Werden Heizkörper gewählt bzw. die üblicherweise vorhandenen Heizkörper genutzt, ergäben sich unrealistisch hohe Vorlauftemperaturen. Es muss mindestens eine Teilsanierung des Gebäudes gegeben sein. Das in diesem Gutachten verwendete Durchschnittsgebäude entspricht nur knapp dieser Anforderung. Ein etwas besserer Zustand, der zu einer maximalen Vorlauftemperatur von 60°C führt, ist sinnvoller. Gebäude ab Wärmeschutzverordnung 1984 (und besser) erfüllen die Bedingung mit hoher Wahrscheinlichkeit.

Die Verwendung von Erdreichwärmepumpen im Geschosswohnungsbau ist limitiert durch die verfügbaren Grundstücksgrößen sowie Grenzabstände von Tiefenbohrungen. Dies betrifft die Innenstadtbebauung sowie Hochhäuser gleichermaßen.

Die bedeutendste Restriktion ist durch die Begrenzungen des Marktes (Verfügbarkeit von Geräten und ausführenden Firmen) gegeben. Jochum et al. [119]. gehen nach Auswertungen von Branchendaten einer Steigerung der jährlich installierten Wärmepumpen aus. Während 2020 Kapazität für maximal 100.000 neue Geräte vorhanden ist, ließe sich der Wert auf maximal 650.000 Geräte/Jahr bis 2050 steigern.

Für Wärmepumpen ist eine Qualitätssicherung besonders relevant. Aus einem Betriebstest in der Wohnungswirtschaft leiten Orthjohann und Streckenberg 2015 einen Einfluss der Qualitätssicherung von 54 % auf die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe ab. Der „übliche Pool“ von Anlagen (hier 11 Stück) weist eine Arbeitszahl von 2,21 auf, die qualitätsgesicherten Anlagen (hier 2 Stück) erreichen 3,41 [130]. Wegen des geringen Stichprobenumfangs ist diese Aussage nicht unmittelbar auf den Gesamtbestand hochzurechnen, aber der Trend bestätigt die für Holzkessel und Solarthermie gefundenen Ergebnisse.

Die EnSanMV [29] definiert wie bislang das BAFA Mindesteffizienzen, die nur rechnerisch im Zusammenhang mit der Förderung nachgewiesen werden (Erdreich 3,8 – Außenluft 3,5 – keine Abhängigkeit von der Art des Heizsystems und vom Vorhandensein einer Trinkwassererwärmung). Es werden zwar Zähler vorgeschrieben, die der Effizienzmessung dienen können, jedoch ist keine Abhängigkeit der Förderung vom erzielten Ergebnis gegeben.

Die in Förderprogrammen oder den Bewertungsnormen für das EEWärmeG/GEG anvisierten Jahresarbeitszahlen werden nach Ansicht der Gutachter und im Abgleich mit den Feldergebnissen nicht erreicht, auch wenn dies mit Qualitätssicherung möglich wäre.

Fazit Kessel und Hybridsysteme

Die Gutachter halten es für sinnvoll, dass es zur Vermeidung von CO_2-Emissionen künftig keinen 1:1 Austausch von Kesseln mehr gibt, sondern dass Kessel nur als Hybrid-Lösungen eingesetzt werden. (Die entsprechenden Überlegungen werden weiter unten erläutert). Eine detaillierte Argumentationskette ist im Anhang 3.3.2 zu finden.

Eine gute Lösung für die beiden Ziele – einerseits schnell die Gebäude in einen emissionsärmeren Zustand zu versetzen, andererseits nicht bis zum nächsten Baukörpersanierungszyklus warten zu wollen – ist der übergangsweise Aufbau von Hybridheizungen aus Kesseln und Wärmepumpen. Die Wärmepumpe wird dabei nach der absehbar geringeren Heizlast gewählt, die sich nach der Modernisierung ergibt. Sie ist daher für eine bestimmte Zeit unterdimensioniert. Mit der nächsten Gebäudesanierung kann das Hybridsystem dann zu einem reinen Wärmepumpensystem umfunktioniert werden.

Anhang 3.3.2 enthält tabellarische Untersuchungen zum Aufbau von Hybridsystemen: ausgehend vom Durchschnittsgebäude, jeweils mit Gas- oder Ölkessel versorgt, werden entweder Außenluft- oder Erdreichwärmepumpe eingesetzt. Wirksam sind Vollkosten (Ersatz eines neuen Brennwertkessels) oder Mehrkosten (Ersatz eines abgängigen NT-Kessels). Auf die detaillierte Wiedergabe der Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet. Eine grafische Auswertung findet sich in Anhang 3.3.7.

Die Ergebnisse zu den erzielbaren Emissionsminderungen und der äquivalenten CO_2-Preise, der Gesamtkosten und daraus ableitbaren notwendigen Investitionskostenzuschüsse oder notwendigen zusätzlichen Emissionspreise sind vergleichbar mit denen der Wärmepumpenlösungen aus Tabelle 21, S. 86. Die dort getroffenen Fazits können entsprechend übernommen werden.

Aus Sicht der Gutachter erfolgt im Zuge von reinen Sanierungen, z. B. bei einem nicht geplanten Ausfall des alten Kessels, möglichst kein Einbau von reinen (monovalenten) Gas- oder Ölheizungen mehr, um das Erreichen der Klimaziele nicht unnötig zu erschweren. Sofern die baulichen Randdaten in dem Objekt noch keinen reinen Wärmepumpenbetrieb ermöglichen (Gebäude vor Wärmeschutzverordnung 1984), kann ein Hybrid-System mit Wärmepumpen aufgebaut werden bzw. eine für zukünftige Erweiterungen offene Kessellösung, die bereits auf eine Hybridlösungserweiterung regelungs- und systemtechnisch vorbereitet ist.

Der Hybridgedanke lohnt sich, wenn die geplante Gebäudemodernisierung innerhalb eines Zeitfensters der nächsten 7 bis 10 Jahre liegt. Findet sie in der noch näheren Zukunft statt, ist zu überlegen, ob nicht bei noch funktionierender Altkesselanlage bis dahin gewartet wird und dann sofort eine Wärmepumpenlösung gewählt wird. Ist sie nicht in dem Zeitfenster oder nie möglich – z. B. bei denkmalgeschützten Gebäuden, ist eher über eine Neudimensionierung der Heizflächen nachzudenken, so dass das Gebäude auch ungedämmt wärmepumpentauglich wird.

Es zeigt sich auch hier das bereits bekannte Problem: die Strompreise sind unverhältnismäßig hoch verglichen mit den fossilen Energieträgern Gas und Heizöl – zumindest wenn es um das Verhältnis von Emissionen und Preis geht. Eine Lösung ist ein modifiziertes System der Energieträgerbepreisung, wie in Kapitel 1.2.3 beschrieben.

Da eine Hybridlösung klar von der Logik „einfache Systeme sind einfacher zu beherrschen" abweicht, ist eine Qualitätssicherung bei der Planung und Ausführung hier noch wichtiger als bei reinen Wärmepumpenlösungen. Daher ist ein kritisches niederschwelliges Monitoring der Verbrauchswerte (vgl. Anhang 5.3.4) für mindestens zwei Heizperioden angemessen.

Zur Begründung: die Gutachter gehen davon aus, dass die verwendeten Wärmepumpen so bemessen werden, dass sie nach der absehbar erfolgenden Gebäudesanierung zum dann erforderlichen Leistungsbedarf passen. Bis dieser Zustand eintritt, sind die Wärmepumpen allein zu klein zur Alleinversorgung, aber die verfügbare summierte Erzeugerleistung des Paketes „Kessel und Wärmepumpe" übersteigt vielfach den Leistungsbedarf des Gebäudes. Diese Konstellation tritt vor allen dann ein, wenn die Wärmepumpe nur zugekauft wird und der vorherige Erzeuger weiterbenutzt wird. Auch in kleinen Gebäuden ist der Fall absehbar, weil Kessel sehr kleiner Leistungen nicht verfügbar sind.

Ein Überangebot aus Leistung ist der ideale Nährboden für (unbeabsichtigte) Verschwendung. Die Problematik ist aus dem Betrieb von Solarthermieanlagen hinreichend bekannt, vgl. auch eigene Studien hierzu [131].

Fazit Holzkessel

Da Holz ein endlicher Energieträger ist, der in seiner Verfügbarkeit begrenzt ist, können nicht alle Gebäude auf diese Art versorgt werden. Das verfügbare Biomasse-Budget ist limitiert auf 20 kWh/(m²a) bezogen auf den heutigen mittleren Endenergiekennwert aller Wohngebäude von 167 kWh/(m²a) (wohnflächenbezogen und als Mittelwert für den Gesamtbestand zu verstehen), siehe Anhang 5.5.2.

Legt man die Durchschnittsgebäude dieses Gutachtens zugrunde, so ergibt sich bereits anhand der heute installierten Holzkessel eine flächenbezogene Endenergie von 8 kWh/(m²a) als Mittelwert des Gesamtbestandes. Genauere Auswertungen zu der Frage, ob überwiegend gute oder eher schlechtere Gebäude einen Holzkessel nutzen, führen an dieser Stelle zu weit. Die grundsätzliche Aussage lässt sich auch ohne weitere Detaillierung grob abschätzen.

Etwa ⅓ des für die Gebäudebeheizung verfügbaren Biomassebudgets ist heute schon ausgereizt. In der langfristigen Perspektive kann Holz als Brennstoff zur CO_2-Minderung beitragen, jedoch nicht in einem Massenmarkt. Realistisch lässt sich ein sinnvoller Anteil von Holzkesseln noch maximal verdreifachen.

Da bei einer Holzheizung hohe Temperaturen erreichbar sind, ist es angebracht, dass sie vor allem in Gebäuden zum Einsatz kommt, die auch langfristig keinen Niedertemperaturbetrieb erlauben, z. B. Denkmale (nach Ausführung aller möglichen baulichen Maßnahmen). Für den Betrieb von Nahwärmenetzen und die damit verbundenen Verluste an das Erdreich erscheint den Gutachtern Holz als zu wertvoll, weil begrenzt.

Eine finanzielle Förderung – vor allen in der berechneten Höhe – erscheint in Anbetracht des noch verfügbaren Biomassebudgets nicht angebracht. Aufgrund der günstigen Emissionsbilanz scheint eine Bepreisung der anderen Energieträger sinnvoller.

Aus dem Betriebstest für 100 Anlagen von 10 Betreibern leiten Orthjohann und Streckenberg 2015 einen Einfluss der Qualitätssicherung von 19 % ab. Der „übliche Pool" von Anlagen (hier 11 Stück) weist einen Jahresnutzungsgrad von 72 % auf, die qualitätsgesicherten Anlagen (hier 4 Stück) erreichen 86 % [130]. Die brennwertbezogenen Jahresnutzungsgrade betragen $\eta_{a,HS}$ = 68 % bzw. 81 %.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Jahresnutzungsgrade von Holzfeuerungen bei weitem nicht die Werte von gas- oder ölbefeuerten Kesseln erreichen. Allerdings ist der Einfluss der Qualitätssicherung hoch.

Eine Vertiefung mit der Thematik „Holzkessel und -kamine als Zusatzheizung" ist Anhang 3.3.3 zu entnehmen.

Fazit Fernwärme und Kraft-Wärme-Kopplung

Der sinnvolle Einsatz von Netzlösungen sollte mit Hilfe wirtschaftlicher und ökologischer Analysen gefunden werden. In Anbetracht sinkender Wärmeabnahmen, welche sich aus der notwendigen Gebäudemodernisierung ergeben, fallen Netzverluste deutlich mehr ins Gewicht als früher. Künftig ist vorrangig die gänzliche Vermeidung des Netzes zu untersuchen. Ein Wärmenetz außerhalb von Gebäuden führt zu einem Wärmeverlust an die Umwelt, den es ohne dieses Netz nicht gäbe.

Eine detaillierte Auseinandersetzung mit Fragestellungen heute typischer Dämmung der Leitungstrassen, den sich daraus ergebenden Wärmeverlusten je Trassenmeter und je Fläche abhängig von der Siedlungsstruktur sowie typische Nutzungsgrade ist in Anhang 3.3.4 zu finden. Eine Zusammenfassung wichtiger Zahlen liefert Tabelle 23. Es kann einfach abgeschätzt werden, dass die Erschließung von Siedlungen geringer Dichte zu großen relativen Verlusten führt.

Siedlungstyp	bezogene Trassenlänge [m/Wohneinheit]	jährlicher Wärmeverlust [%]	Verteilverlust bezogen auf die beheizte Fläche [kWh/(m²a)]
Einfamilienhaussiedlung niedriger Dichte	14 … 25	12 … 17	25 … 45
EFH-Siedlung hoher Dichte und Reihenhäuser	6 … 14	9 … 12	15 … 30
Mehrfamilienhäuser in mittlerer Dichte (3-5 Geschosse)	6 … 14	7 … 9	5 … 15
Mehrfamilienhäuser in hoher Dichte (Zeilenbebauung, Hochhäuser)	2 … 6	5 … 7	2 … 10

Tabelle 23 Netzlänge nach Siedlungsstruktur [eigene Darstellung] nach [78]

Stehen nur noch PV und Windkraft als Energiequellen zur Verfügung, stellt sich die Frage, welcher Energieträger bzw. welche Technologie die Basis einer künftigen Fernwärme ist. In Frage kommen:

- zentrale Solarthermie,
- zentrale Kessel oder KWK-Anlagen, betrieben mit Brennstoffen, die auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellt wurden,
- zentrale Wärmepumpen, die mit regenerativem Strom angetrieben werden,
- jegliche Form industrieller Abwärme (Müll, Prozesswärme usw.).

Bis auf die zuletzt genannte Quelle weisen alle anderen bei einem zentralen Einsatz mit Netz die gleichen Restriktionen auf, die auch für die Direktverwendung am Gebäude gelten. Solarthermie und PV-Strom sind saisonalen Schwankungen unterworfen, synthetische Brennstoffe haben verlustbehaftete Vorketten.

Es bleibt daher die Frage: sind die zusätzlichen Netzverluste gerechtfertigt, um die sich ergebenden geringeren Investitionskosten von Großanlagen gegenüber vieler Kleinanlagen zu rechtfertigen. Nach Ansicht der Gutachter ist der Ausbau von Nah- und Fernwärme in Frage zu stellen. Der Anschluss an bestehende Nah- und Fernwärmesysteme ist zumindest in jedem Einzelfall zu prüfen.

Für „kalte Fernwärme“ ergibt sich in naher Zukunft aus Sicht der Gutachter ein weiterer, aber begrenzter Forschungsbedarf, um die Vorteile gegenüber „warmen bzw. heißen Netzen“ grundsätzlich zu belegen. In diesem Gutachten wird deshalb kalte Nah- und Fernwärme nicht gesondert behandelt, sondern es wird für Erdreich-Wärmepumpen vorausgesetzt, dass entsprechende Quellen zur Verfügung stehen.

Für die Autoren dieses Gutachtens ist die ausführlich dargestellte Argumentationskette zur Thematik Fernwärme und Kraft-Wärme-Kopplung von Kuck [132] sehr plausibel. Sie wird in Anhang 3.3.6 ausführlich dargestellt. Es lässt sich schlussfolgern: Die KWK ist eine Übergangstechnologie, zunächst noch im Wohnbau, später ggf. auch noch im Nichtwohnbau.

Eine Stromproduktion in Zeiten ohne PV- oder Windstrom wird auch künftig unvermeidbar sein, daher wird es Kraftwerke geben. Diese zentrale Stromproduktion ist aber auf ein Minimum zu begrenzen. In diesen Phasen wird eine mit hohen Umwandlungsverlusten verbundene Rückverstromung vorher hergestellter synthetischer Brennstoffe (H_2 bzw. PtX) stattfinden.

Da diese Phasen aber nicht mit dem Dauerbetrieb heutiger KWK-Anlagen vergleichbar sind, sondern eher temporär stattfinden, ist künftig nicht von permanent verfügbarer Wärme aus einer KWK auszugehen. Verbleibende Residuallasten im zukünftig volatilen Stromerzeugungssektor aus überwiegend PV und Windkraft lassen sich wirtschaftlicher und verlustärmer in reinen Gaskraftwerken abdecken. Damit verschlechtern sich alle Ausgangsbedingungen für den Aufbau von Wärmenetzen mit KWK massiv. Aufgegriffen wird das Thema im Makro-Teil (Kapitel 1.5, detailliert in Anhang 4) dieses Gutachtens.

Einschränkungen

Sind Gebäude noch geringer mit Personen belegt (z. B. das EZFH mit 2,0 statt den durchschnittlichen 2,7 Personen) verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit.

1.4.4 Maßnahmen an der Peripherie

Als „Peripherie“ werden im Rahmen dieses Gutachtens vor allem die Rohrnetze – für die Trinkwarmwasserverteilung zentral oder dezentral, mit oder ohne Zirkulation sowie für die Heizung – verstanden. Die Netze sind aus zwei Aspekten interessant im Rahmen der energetischen Sanierung. Werden sie weggelassen, sinken die Verteilverluste und damit auch der Endenergiebedarf. Lagen die Rohre vorher im unbeheizten Bereich, gilt dies noch viel mehr als für die Leitungsteile im beheizten Bereich. Jedoch sind auch diese maßgeblich: solange das Gebäude ungedämmt ist, tragen sie nennenswert zur Beheizung bei (als interne Wärmegewinne). Ist der Baustandard aber gut oder sehr gut, können sie die betreffenden Räume auch überwärmen. Insbesondere gilt dies für das Sommerhalbjahr. Darüber hinaus werden die Heizflächen – Heizkörper und Fußbodenheizung – mit ihren wesentlichen Einflüssen auf die Energiebilanz sanierter Bestandsbauten besprochen.

Ergebnisse zu Energieeffizienz und Kosten – Trinkwarmwassersysteme

Das Thema „zentrale oder dezentrale Trinkwassererwärmung“ wird im Anhang 3.4.2 detailliert untersucht; auch anhand von Zahlenbeispielen. Langfristig halten die Gutachter den Verzicht klassischer Zirkulationssysteme in Mehrfamilienhäusern für angebracht, um die Gesamtemissionen zu vermindern und Überwärmung der Räume durch Leitungsabwärme zu mindern.

Je nach Kubatur von Mehrfamilienhäusern sind folgende Systeme als Ersatz sinnvoll: für langgestreckte flache MFH erscheint die komplette Dezentralisierung als beste Option; für Gebäude mit ohnehin vorhandenen Abluftanlagen und nicht mehr als 3 Etagen die Teildezentralisierung (mehrere lokale Speicher mit Abluftwärmepumpe). Andere MFH erhalten ein geregeltes Zweileitersystem mit elektrischer Nachheizung. So lässt sich in jedem Fall das Problem einer sommerlichen Überwärmung minimieren und dennoch regenerative Energie einbinden.

Darüber hinaus sehen die Gutachter den Verzicht von Zirkulation in den EZFH als sinnvoll und zielführend an. Sofern sich – aufgrund großer Entfernungen – einzelne Zapfstellen im Gebäude nicht sinnvoll versorgen lassen, werden sie dezentral (elektrisch) versorgt, z. B. für ein Gäste-WC, wenn überhaupt erforderlich. Die Verfasser dieses Gutachtens gehen davon aus, dass in Ein- und Zweifamilienhäusern im Zuge der anstehenden Sanierungszyklen alle Systeme mit Zirkulation nach und nach durch solche ohne Zirkulation ersetzt werden. Ein kleinerer Anteil wird in diesem Zuge hin zu dezentralen Systemen umgebaut. Alle Leitungsteile, die im Gebäude installiert sind, haben eine Dämmung in Stärke des Durchmessers – egal wo sie liegen siehe Anhang 3.4.1.

Ergebnisse zu Energieeffizienz und Kosten – Wärmeabgabesysteme

Das Thema Wärmeabgabesysteme „Heizkörper vs. Flächenheizung" wird in Anhang 3.4.3 dieses Gutachtens analysiert. Da nach einer umfassenden Gebäudedämmung die Systemtemperaturen auch in Heizkörpernetzen herabgesetzt werden können, spricht aus energetisch/wirtschaftlicher Sicht nichts gegen den Beibehalt der Heizkörper. Ein anlassloser Umbau von Heizkörpern auf Flächenheizungen ist nicht sinnvoll, wenn auch sich unbestreitbar geringere Verteilverluste und bessere Wärmeerzeugereffizienzen ergeben.

Jegliche Änderung – findet sie dennoch statt – ist an den Sanierungszyklus zu koppeln. Ist die dann gewählte Flächenheizung schnell regelbar, kann sie im effizient sanierten Gebäude gut auf die eintreffende Fremdwärme reagieren. Die klassischen dickschichtigen Estrichverlegungen sind aus dieser Überlegung her nicht sinnvoll.

Da der Einbau von Flächenheizungen einen rohbauähnlichen Gebäudezustand erforderlich macht (zumindest als Fußbodenheizung), ist die Marktdurchdringung eher vom Neubaugeschehen abhängig als von der Sanierung. Die Gutachter gehen davon aus, dass – im nennenswerten Stil – nur in den EZFH das System gewechselt wird. Im Zusammenhang mit Komplettumbauten, Anbauten, Ausbauten usw. Der Motivationsgrund dürfte jenseits der Energieeffizienz liegen. Der Geschosswohnungsbau wird weniger von Systemwechseln betroffen sein, schon aus Sicht der damit unvermeidlichen längeren Leerstände während der Umbauphasen.

Da die Kosten eines Systemumbaus sehr hoch, die Vorteile aus Sicht der Emissionsvermeidung eher gering sind – selbst bei Wärmepumpen – sehen die Gutachter keinen Anlass einer Anreizförderung.

Eine insgesamt größere Marktdurchdringung – bezogen auf den Gesamtbestand – ist vor allem durch den Neubau (mit gleichzeitigem Rückbau von heizkörperbeheizten Gebäuden des Bestandes) zu erwarten. These: „Bei gleichem Baukörper mit hohem Dämmstandard und gleichem Nutzerverhalten verbrauchen mit konventionellen Flächenheizungen ausgestattete Gebäude mehr Energie, als wenn sie mit Heizkörpern oder mit Luftheizung (kontrollierte Wohnungslüftung mit WRG – ursprünglicher Gedanke des Passivhauses) konzipiert werden."

Dieses für die Heizungsindustrie sensible Thema wird mit wenigen Ausnahmen in der Fachdiskussion wenig bis gar nicht angesprochen. Obwohl auch die Gutachter aus verschiedenen eigenen Feldstudien, aus einer skandinavischen Feldstudie [133] und auch durch die Ergebnisse des Passivhaus-Instituts [134] in früheren Veröffentlichungen einen Mehrverbrauch von Fußbodenheizungen gegenüber Heizkörperheizungen bestätigen.

Die Tatsache, dass die Förderung von Wärmepumpen an den Einbau von Flächenheizsystemen gebunden wird und daraus ein wesentlicher Mehrverbrauch zukünftiger Effizienzhäuser resultieren könnte, zeigt hier einen notwendigen und wichtigen zukünftigen Forschungsbedarf.

Ergebnisse zu Energieeffizienz und Kosten – Verteilnetze im Gebäude

Rohrnetze für Heizung und Trinkwassererwärmung spielen in Gebäuden eine entscheidende Rolle zum Erreichen geringer Endenergieverbräuche und damit geringer Emissionen. Die Wärmeabgabe ungedämmter Heizungsleitungen im beheizten Bereich ist nicht immer nutzbar.

In kritischen Räumen mit großer Leitungsverlegedichte je Wohnfläche (je nach Art der Verteilung sind diese an anderen Stellen im Gebäude zu finden) kann es zu einer ganzjährigen oder zumindest teilweisen Überwärmung der Räume kommen. Überschusswärme wird ungenutzt abgelüftet.

Verschärft wird die Problematik bei der Verwendung von Einrohrheizungen (größere Rohrdurchmesser, kaum Temperaturregelung, ständige Durchströmung). Hier haben die Gutachter nach Bestandssanierungen der Gebäudehülle Objekte messtechnisch untersucht, bei denen mehr als 80 % der gesamten Heizwärme über das Rohrnetz und die restlichen 20 % über die Heizkörper abgegeben wurden. Wegen der massiven unerwünschten und nicht regulierbaren Wärmeeinträge bestand „Zwangswärmekonsum". Neben Behaglichkeitsproblemen und Mehrverbrauch ist dies problematisch für die Heizkostenabrechnung. Empfohlen wird bei anstehenden Sanierungen der Umstieg auf ein Zweileitersystem.

Eine Nachdämmung ungedämmter Leitungen im unbeheizten Bereich, bei guter Gebäudequalität auch im beheizten Bereich ist nach Ansicht der Gutachter sinnvoll und wirtschaftlich. Weitere Zahlenbeispiele zur Thematik sind Anhang 3.4.4 zu entnehmen.

1.4.5 Maßnahmen an Zusatzerzeugern

Die nachfolgende Untersuchung betrifft den Einsatz ergänzender Anlagentechnik. Ein Gebäude kann auch ohne diese Erzeuger betrieben werden, jedoch können sie eingesetzt werden, um den Bedarf an Endenergie zu mindern. Betrachtet werden Solarthermie, Photovoltaik und Wohnungslüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung.

Ergebnisse für die Einzelmaßnahmen

Eingangs werden die Ergebnisse dargestellt, siehe Tabelle 24. Eine grafische Aufbereitung ist Anhang 3.5.4 zu entnehmen. Verwendet werden die beiden Typgebäude, wie in Kapitel 1.3.2 beschrieben.

Variiert wird nur jeweils eine Eigenschaft: die Nachrüstung der genannten Anlage. Die restlichen Eigenschaften (alle anderen Bauteile sowie die gesamte Technik) sind bei dieser Betrachtung zunächst durchschnittlich.

	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme+Strom	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
		[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
EZFH - heutiges Durchschnittsgebäude Deutschland							
Solarthermie	M	-5	934	1,46	57	571	nicht anreizen/ fördern
Photovoltaik und elektr. Trinkwassererwärmung	V	-12	981	-2,02	keiner	keiner	umsetzen
Solarthermie	V	-5	1005	1,65	64	642	nicht anreizen/ fördern
Photovoltaik	V	-7	1340	-2,06	keiner	keiner	umsetzen
Lüftung mit Wärmerückgewinnung	V	-4	3048	5,04	96	2940	nicht anreizen/ fördern
MFH - heutiges Durchschnittsgebäude Deutschland							
Photovoltaik	V	-10	554	-2,60	keiner	keiner	umsetzen
Photovoltaik und elektr. Trinkwassererwärmung	V	-13	555	-2,51	keiner	keiner	umsetzen
Solarthermie	V	-8	827	1,54	51	419	nicht anreizen/ fördern
Solarthermie	M	-8	900	1,81	60	492	nicht anreizen/ fördern
Lüftung mit Wärmerückgewinnung	V	-6	1917	4,97	91	1745	nicht anreizen/ fördern

Tabelle 24 Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Zusatzerzeugern [eigene Darstellung]

Da der Bedarf von Wärme und Strom bei der Lüftungsanlage geändert wird, werden Wärme und Strom in diesem Fall gemeinsam betrachtet. Es wird daher die Änderung der Gesamtemission für Wärme und Strom angegeben – für alle Maßnahmen.

Die Photovoltaikanlage führt zu äquivalenten CO_2-Preisen von 554 bis 1340 €/t. Das MFH schneidet deutlich besser ab, weil die Anlage hier passender zum Haushaltsstromverbrauch dimensioniert ist. Es ist anzumerken, dass der Vorteil, den die Rückspeisung von Strom in das Netz ergibt (= Sinken des Emissionsfaktors des Strommix') in dieser Betrachtung nicht positiv berücksichtigt wird. Eine Wirtschaftlichkeit ist in beiden Fällen gegeben. Es ergibt sich jeweils ein Überschuss. Die Maßnahme benötigt keinen weiteren Investitionskostenzuschuss, wobei die Vergütung des Überschussstroms mit der heute geltenden EEG-Umlage (vgl. detaillierte Ausführungen in Anhang 5.5.1) angerechnet wird.

Deutlich besser werden die Ergebnisse, wenn das Gebäude bereits eine elektrische Trinkwassererwärmung aufweist, da der Strombedarf von vornherein größer ist.

Fazit Photovoltaik

Hinsichtlich der Zusatzerzeuger im bzw. am Gebäude spielt die Photovoltaik aus Sicht der Gutachter eine herausragende Rolle. Sie kann nicht nur nennenswert den Haushaltsstrom decken, sondern künftig auch Anteile für die Trinkwassererwärmung und Heizung beisteuern. Einfamilienhäuser schneiden wegen des günstigeren Verhältnisses von Dachfläche zu Wohnfläche besser ab – konkrete Zahlenbeispiele siehe Anhang 3.5.1.

Die Gutachter schließen sich der Erkenntnis von Schulze-Darup auch für Quartiere an [90]:

> *„Das größte Potenzial für zukünftige regenerative Techniken innerhalb von Siedlungsstrukturen weist die Photovoltaik auf. Daraus ergeben sich Paradigmenwechsel bei der Wahl der Versorgungssysteme. […] Technisch-physikalisch sprechen viele Argumente für die strombasierte Variante. Unterstützt wird diese deutliche Tendenz auch durch die Langfristbetrachtungen und Wirtschaftlichkeitsberechnungen hinsichtlich der Entwicklung der Primärenergiebilanz […] und der Kosten für die Brennstoffe […] Versorgungskonzepte stellen eine langfristige Investition dar, sodass vor Systementscheidungen Risiken und Chancen abgeschätzt werden müssen, die aufgrund der Energiewende entstehen."*

Die dezentrale Stromproduktion kann vergleichsweise ausfallsicher erfolgen. Für den Mietwohnungsbau sind übergangsweise aus Sicht der heutigen Rechtslage Konzepte für den Vertrieb und/oder die Eigennutzung von Mieterstrom notwendig, z. B. in Form des Contracting [56].

Die Erzeugung von Photovoltaikstrom bewirkt unvermeidbar im Verlaufe eines Jahres Überschüsse, die nicht unmittelbar im Gebäude genutzt werden. Diese werden zurückgespeist, ggf. umgewandelt und bis zur späteren Nutzung gespeichert (z. B. in Pumpspeicherkraftwerken, als Wasserstoff oder anderer künstlicher Brennstoff). Später erfolgt eine erneute Umwandlung, um wieder Strom zu erzeugen. Die gesamten Umwandlungsketten sind verlustbehaftet.

Diese Zusammenhänge gelten jedoch unabhängig davon, ob die PV-Anlage auf dem Gebäude angeordnet oder als Freiflächenanlage aufgestellt ist. Die lokale Anordnung am Gebäude bewirkt zumindest, dass der maximal mögliche Momentanbedarf ohne Hin- und Rückumwandlung sowie Netzverluste der Stromtrassen sofort gedeckt werden kann. Außerdem kann eine lokal eingebaute Regelung vor Ort (autark) entscheiden, ob vorhandene Speicher (Trinkwarmwasser, Heizung) noch Aufnahmekapazität für Überschüsse aufweisen.

Die weitere Alternative einer Komplettumwandlung von Photovoltaikstrom in ein künstliches Gas bei dann 100 % Versorgung der Gebäude mit ebendiesem (und einem Kessel) wäre ebenfalls denkbar. Dieses Konzept führt aber dazu, dass für jegliche Kilowattstunde des Energieträgers immer beide Verluste der Hin- und Rückumwandlung gelten. Überhaupt kein Strom würde direkt nutzbar, was unweigerlich zu einer größeren notwendigen Gesamtfläche an Photovoltaik führt.

Aus genannten Gründen sehen die Gutachter die vorrangige Direkterzeugung und -nutzung in Form von Strom vor Ort als sinnvoll an.

Fazit Solarthermie

Im Gegensatz zu anderen Studien sehen die Gutachter die Relevanz der Solarthermie sehr eingeschränkt. Sie hat ggf. ihre Berechtigung im EZFH – unter der Voraussetzung einer ausreichenden Belegung und nicht vorhandener Zirkulation. Auch die Kombination von Holzheizung ist praktikabel, wenn auch weder besonders emissionsmindernd (weil Holz selbst schon kaum Emissionen auslöst), noch wirtschaftlich (weil Holz ein vergleichsweise preiswerter Energieträger ist). Dokumentierte Zahlenbeispiele sind Anhang 3.5.2 zu entnehmen.

Für das MFH sind die hydraulischen und regelungstechnischen Probleme komplexer Anlagen mit Einbindung von Solarthermie in den letzten 30 Jahren nicht merklich zurückgegangen. Das Maß an notwendiger Qualitätssicherung bis zu einem zufriedenstellenden Betrieb ist so hoch, dass davon in der Regel Abstand genommen wird. Zudem ist der ungünstige Umstand einer Trinkwarmwasserzirkulation in Mehrfamilienhäusern kaum vermeidbar. Die Gutachter sehen für Solarthermie in MFH keine langfristige Relevanz [28].

Der Einsatz von Solarthermie in Nahwärmesystemen ist – wegen der Netzverluste – fragwürdig. Die größte Konkurrenz ergibt sich zur dezentralen Photovoltaik am Gebäude. Da mit größerer Sicherheit der vorher bestimmte Ertrag bei Photovoltaik aus eigener Monitoringerfahrung auch eintritt und die Anlagen auch ohne nennenswerte Qualitätssicherung ihre zugesicherten Eigenschaften aufweisen, wird die geringere Effizienz (Ertrag pro Fläche) gegenüber einer Solarthermie in Kauf genommen. Zumal der Energieträger Strom einerseits hochwertiger (universeller einsetzbar) ist und zu geringeren Gestehungskosten als Wärme aus Solarthermie produziert werden kann.

Da in allen Gebäuden ein nennenswerter Haushaltsstromverbrauch zu verzeichnen ist, welcher größenordnungsmäßig beim Doppelten des Trinkwasserwärmebedarfs liegt und immer Strom als Energieträger benötigt, ist der PV gegenüber der Solarthermie auf dem Dach der Vorrang zu gewähren. Dem steht entgegen, dass Netzbetreiber bzw. Versorgungsunternehmen z.Z. ab etwa 70 % der Peakleistung einer PV-Kleinanlage und seit langem schon auch bei Windkraft-Groß-Anlagen die Einspeisung abregeln.

Fazit Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung

Auch das Thema Wohnungslüftung wird im Gutachten ausführlich bewertet, siehe Anhang 3.5.3. Dort finden sich auch zahlenmäßige Bewertungen für die Nachrüstung in den Typgebäuden. Es zeigt sich: ein sinnvoller Einsatzbereich von Lüftungsanlagen ist auf absehbare Zeit der Neubau.

Die Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist im Geschosswohnungsbau vor allem dann interessant, wenn eine Wärmepumpe eingesetzt wird. Der Einsatz von Lüftung mit Wärmerückgewinnung bietet einen Doppelnutzen. Da sie in der Regel in allen Räumen zu einer Heizlastverminderung führt (sogar in fensterlosen Räumen), ist sie eine gute Voraussetzung zum Erreichen eines niedrigeren Temperaturniveaus in einer Wärmepumpenheizungsanlage. Dies ergibt im Verlauf des Jahres einen effizienteren Betrieb. Die Verminderung der Heizlast führt zum anderen dazu, dass die Auslegungsleistung der Wärmepumpe geringer ausfallen kann, was zu geringeren Investitionskosten führt. Zudem entlastet diese Maßnahme die Notwendigkeit eines zukünftig notwendigen Zubaus von Spitzenlastkraftwerken bzw. -leistung in Flauten der PV- und Windkraftstromerzeugung.

In der Sanierung wird die Wohnungslüftung ein Nischenprodukt bleiben – begründet durch die hohen Nachrüstungskosten zumindest zentraler Anlagen. Ob sich dezentrale Anlagen mit Wärmerückgewinnung bei der Sanierung durchsetzen, bleibt abzuwarten. Der erhöhten Schallschutzproblematik von dezentral direkt am Ort der Nutzung befindlichen Ventilatoren stehen die Vorteile der Kosteneffizienz und des geringeren Planungsaufwandes (v. a. Brandschutz) gegenüber. Im durchschnittlichen Sanierungsfall eines bestehenden Wohnbaus ist die Nachrüstung einer zentralen Lüftungsanlage mit so hohen Kosten verbunden, dass sich keine Wirtschaftlichkeit ergibt.

Ergebnisse für die Kombination von Photovoltaik und Wärmepumpen

Eine detaillierte Untersuchung verschiedener Konstellationen von Wärmepumpen und Photovoltaik erfolgt im Anhang 3.5.1. Die Ergebnisse sind grafisch im Anhang 3.5.4 zusammengefasst. Nachfolgende Tabelle 25 zeigt die Ergebnisse für eine Auswahl an Kombinationssystemen. Zum Vergleich sind die Ergebnisse für den Fall „ohne Photovoltaik“ zusätzlich mit angegeben.

In den EZFH-Lösungen lassen sich höhere Emissionsminderungen erzielen, weil die PV-Anlage größer dimensioniert ist und damit ein größerer Anteil des Stroms für die Wärmepumpe aus der PV stammt.

Die Lösungen mit Photovoltaik führen im Bestand dazu, dass ein Zuschuss von unter 40 %, im gut sanierten Objekt unter 35 % ausreicht, um eine Wirtschaftlichkeit herzustellen. Unter allen untersuchten Anlagentechnikvarianten konnten somit Lösungen gefunden werden, die eine ähnliche Subvention wie die baulichen Lösungen voraussetzen.

Alternativ ließen sich die Unwirtschaftlichkeiten ausgleichen, indem die eingesetzten Energieträger teurer sind. Bei den Außenluftwärmepumpen ergeben sich notwendige zusätzliche Emissionspreise von etwa 100 €/t, bei den Erdreichwärmepumpen maximal 200 €/t. Diese Werte sind vergleichsweise niedrig. Das entspräche einem etwa 1,5 bis 2-fach höheren Gaspreis als heute.

	alter Erzeuger	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
			[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
EZFH - heutiges Durchschnittsgebäude Deutschland								
AU-WP	Öl-NT	M	-40 %	198	7,46	109 %	298	
AU-WP & PV	Öl-NT	M	-67 %	275	3,35	29 %	80	anreizen/fördern
E-WP	Gas-NT	M	-33 %	771	11,82	96 %	766	
E-WP & PV	Gas-NT	M	-66 %	541	6,46	38 %	207	anreizen/fördern
EZFH - auf gutes Niveau saniertes Gebäude								
AU-WP	Gas-BW	V	-14 %	1250	6,82	136 %	1700	
AU-WP & PV	Gas-B	V	-61 %	540	1,65	17 %	93	anreizen/fördern
E-WP	Öl-NT	V	-39 %	576	8,62	104 %	599	
E-WP & PV	Öl-NT	V	-74 %	475	3,77	29 %	139	anreizen/fördern
MFH - heutiges Durchschnittsgebäude Deutschland								
AU-WP	Öl-NT	M	-36 %	134	5,12	138 %	239	
AU-WP & PV	Öl-NT	M	-59 %	185	1,09	17 %	32	anreizen/fördern
E-WP	Gas-NT	M	-29 %	640	8,45	105 %	641	
E-WP & PV	Gas-NT	M	-56 %	416	3,33	31 %	129	anreizen/fördern
MFH - auf gutes Niveau saniertes Gebäude								
AU-WP	Gas-BW	V	-9 %	974	5,02	178 %	1737	
AU-WP & PV	Gas-B	V	-46 %	373	0,53	10 %	36	anreizen/fördern
E-WP	Öl-NT	V	-33 %	446	6,52	113 %	506	
E-WP & PV	Öl-NT	V	-62 %	349	2,17	26 %	90	anreizen/fördern
WP: Wärmepumpe, E: Erdreich, AU: Außenluft, NT: Niedertemperaturkessel, BW: Brennwertkessel								

Tabelle 25 Ergebnisdarstellung der Kombimaßnahmen Wärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung]

Insgesamt ist festzustellen, dass in Kombination mit Photovoltaik viele Wärmepumpenlösungen wirtschaftlich werden, weil eine „Quersubventionierung“ stattfindet. Der Bezug teuren Netzstroms wird vermieden. Diese Maßnahmen sind vor allem dann interessant, wenn keine generelle Umstrukturierung der Strompreisbildung erfolgt (vgl. Kapitel 1.2.3), also hohe Netzstrompreise zu verzeichnen sind.

Zusatzerzeuger: Einschränkungen

Sind Gebäude mit sehr vielen Personen belegt, steigt der Warmwasserverbrauch und Solarthermie kann sich lohnen. Dies gilt für alle Gebäudetypen. Da die Berechnung des EZFH von etwa 50 m²/Person ausgeht, ist dies als obere Grenze anzusehen. Leben die Personen deutlich dichter (mindestens so wie in dem MFH, also auf ≤ 38 m²/Person), sind Einzelfallprüfungen vorzunehmen. Bei dünnerer Belegung verschlechtern sich die Ergebnisse.

Bei der Photovoltaikanlage ist der Einfluss der Belegung nicht so ausschlaggebend. Selbstverständlich sinken die Emissionsminderung und auch die Wirtschaftlichkeit, da die Eigenstromnutzung abnimmt. Kompensiert wird dies in Teilen dann durch die Einspeisevergütung.

Die Lüftungsanlage mit WRG führt in der Sanierung zu so hohen Investitionskosten, dass allenfalls dezentrale Lösungen zu einer Wirtschaftlichkeit führen, was im Rahmen dieses Gutachtens nicht getestet wurde. Selbst bei einem Zehntel der Investitionskosten ist noch keine Wirtschaftlichkeit zu erkennen. Diese Technologie ist voraussichtlich dem Neubau vorbehalten. Lüftungsanlagen können selbstverständlich aus anderen Gründen, z. B. dem Schutz vor Außenlärm oder Allergenen etc. installiert werden.

1.4.6 Qualitätssicherung

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens werden drei Aspekte der Qualitätssicherung betrachtet, die sich jedoch nur schwer bzw. gar nicht voneinander trennen lassen:

1. die qualitätsgesicherte Gebäudehülle – luftdicht und wärmebrückenarm – deren Umsetzung zusammen mit den baulichen Maßnahmen erfolgt (detailliert in Anhang 3.2); jedoch kann bei einer Teilsanierung der Hülle jeweils auch nur ein Teil des Problems gelöst werden, weshalb es schwierig ist, den einzelnen Maßnahmen (z. B. der Kellerdeckendämmung) einen Anteil der Vorzüge der Qualitätssicherung zuzuschlagen,
2. die qualitätsgesicherte anlagentechnische Peripherie – minimierte unkontrollierte Wärmeeinträge von Rohrleitungen in den beheizen Bereich (detailliert in Anhang 3.4), hydraulischer Abgleich, optimale Raumregelung und Systemtemperaturen, passende Pumpen usw.; wobei optimale Verhältnisse umso schwieriger zu erreichen sind, je besser der bauliche Wärmeschutz ist; die Problematik unkontrollierter Wärmeeinträge und lokaler Überwärmung, Nachteile träger Regelungen und Heizflächen wirkt sich in Gebäuden mit geringem Wärmebedarf entsprechend deutlich negativer aus,
3. die qualitätsgesicherte Erzeugung von Wärme durch die Haupterzeuger (detailliert in Anhang 3.3) und Zusatzerzeuger (detailliert in Anhang 3.5); dabei hängt die Frage der optimalen Systemtemperaturen von der Peripherie und deren Qualität ab.

Bezogen auf den Gesamtbestand Deutschland wird für den heutigen Zustand der Gebäude von einer Durchdringungsrate der Qualitätssicherung von 15 % im Wohnungsbau angenommen. Für die Anlagentechnik entstammt die Erkenntnis eigenen Untersuchungen [23] bzw. auch den statistischen Erhebungen der Verbraucherzentralen [135]; für den baulichen Wärmeschutz wird sie aus den Neubau- und Sanierungsaktivitäten seit Einführung der EnEV 2002 abgeschätzt.

Tabelle 26 zeigt die kombinierte Berechnung der Qualitätssicherung für den Baukörper, die Peripherie (Übergabe, Verteilung, Speicherung) sowie die Erzeugung für das EZFH und das MFH. Aus der vielfältigen Kombinatorik wurden neben den mittleren Gebäuden und Anlagentechniken auch jeweils drei Varianten berechnet. Hinsichtlich des Baukörpers: eine schlechte Ausführung, eine gute (etwa heutiger Neubau) und eine optimale. Bei der Anlagentechnik: eine konventionelle, eine Version mit Solareinbindung sowie eine Wärmepumpenlösung.

Es zeigt sich ein Minderungspotential an Emissionen von insgesamt 10 bis 35 %. Im verbesserten Standard sinken zwar die absoluten Einsparungen, aber die prozentualen nehmen zu. Eine auch zahlenmäßige Detailanalyse der drei Einzeleinflüsse (QS Baukörper, QS Peripherie, QS Erzeuger) ist Anhang 3.6 zu entnehmen.

			Gebäude			
Baustandard			Ø	schlecht	gut	best
Anlagentechnik			Ø	Ölbrenn-wertkessel	Ölbrenn-wertkessel + Solar	Außenluft-wärme-pumpe
Maßnahmenbeschreibung						
bauliche und anlagentechnische Qualitätssicherung						
Gesamtergebnisse EZFH						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	190	248	106	31
	nachher	kWh/(m²a)	163	224	80	20
		%	**-14 %**	**-10 %**	**-22 %**	**-35 %**
Emissionen, Wärme	vorher	kg/(m²a)	44,6	72,7	30,1	14,0
	nachher	kg/(m²a)	38,4	65,5	23,5	9,1
		%	**-14 %**	**-10 %**	**-22 %**	**-35 %**
Gesamtergebnisse MFH						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	156	205	96	32
	nachher	kWh/(m²a)	134	184	72	24
Emissionen, Wärme	vorher	kg/(m²a)	37,3	59,9	28,1	14,4
	nachher	kg/(m²a)	32,2	53,6	20,9	10,7
		%	**-14 %**	**-11 %**	**-26 %**	**-26 %**

Tabelle 26 Auswertung Qualitätssicherung im EZFH und MFH [eigene Darstellung]

Die Endenergie für das „gute“ MFH mit Kessel und Solarthermie könnte – unter Ausschöpfung aller Maßnahmen – von 96 kWh/(m²a) auf 72 kWh/(m²a) verbessert werden. Die heute noch nicht oder nur teilweise vorhandene Qualitätssicherung dürfte somit auch einen Teil der Diskrepanzen zwischen Normbedarf und realem Verbrauch erklären, weitere Ausführungen siehe Anhang 5.2.

Für den Gesamtbestand wird aus heutiger Sicht davon ausgegangen – dass im Schnitt – ein Gebäude mit Qualitätssicherung zu 14 % weniger Emissionen führt als eines ohne. Ausgehend von der Eingangsfestlegung, dass bereits nur etwa 15 % der Gebäude qualitätsgesichert sind, bleibt demnach ein großes Potential, was es zu heben gilt.

1.4.7 Pakete und Reihenfolgen

Aus den Einzelmaßnahmen der Kapitel 1.4.2 bis 1.4.6 werden Pakete oder Maßnahmenreihenfolgen gebildet. Es stellt sich die Frage, ob es günstiger ist, nacheinander in einer Reihenfolge zu investieren oder ein Paket von Maßnahmen zu bilden.

Ergebnisse zu Energieeffizienz und Kosten – Maßnahmenreihenfolgen und -pakete

Die Thematik Maßnahmenfolgen und -pakete, d. h. vereinfacht erst der Erzeuger, dann der Baukörper oder umgekehrt oder beides sofort gleichzeitig, bedeutet die Beantwortung der Frage, welchen Zustand die zu sanierenden Komponenten im Moment der Entscheidungsnotwendigkeit aufweisen.

Das Gutachten analysiert vier typische Fälle, jeweils für das EZFH und für das MFH. Abbildung 27 zeigt die Zusammenhänge. Die Zeitachse beginnt mit einer Errichtung des Gebäudes, alle Einzelelemente haben einen Wert, von dem aus abgeschrieben wird, bis das Ende der Nutzungsdauer erreicht ist. Dann erfolgt eine Maßnahme. Die Bauteile weisen unterschiedliche Lebenszyklen auf, so dass es in Zukunft nur noch wenige Zeitpunkte gibt, zu denen alle Einzelelemente gleichzeitig saniert werden müssen. Als Bauteil sind hier vereinfacht nur „Baukörper“ und „Anlagentechnik“ exemplarisch zusammengefasst dargestellt.

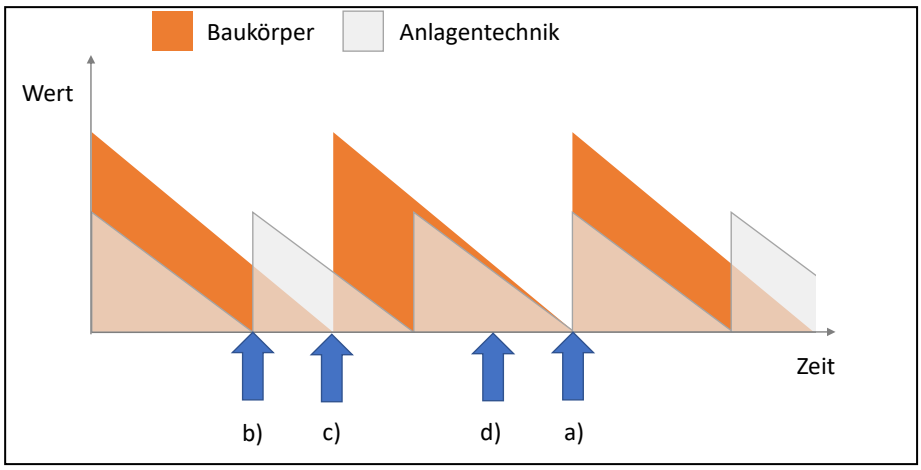


Abbildung 27 Schematische Darstellung von Investitionszeitpunkten und Restwerten der vorhandenen Bauteile [eigene Darstellung]

Abbildung 27 a): Zu einem Zeitpunkt, an dem sowohl die Anlage, als auch der Baukörper den natürlichen Sanierungszyklus erreicht haben, besteht nur eine Option: es ist ein Maßnahmenpaket auszuführen. Es gelten für Baukörper und Anlagentechnik die Mehrkosten, weil ohnehin ein Sanierungsbedarf bestand.

Abbildung 27 b): Betrachtet wird ein Zeitpunkt, in dem die Anlagentechnik zwangsläufig erneuert wird, weil sie das Lebensende erreicht hat. Für die Anlagentechnik sind in jedem Fall Mehrkosten anzusetzen. Es kann überlegt werden, ob eine Maßnahmenreihenfolge durchgeführt wird: „Anlage → Baukörper“, d. h. mit der Investition in den Baukörper noch gewartet wird, bis er kurze Zeit später ohnehin zu verbessern ist, so dass dann auch für den Baukörper nur die Mehrkosten gelten. Alternativ wird sofort ein Paket ausgeführt. Die baulichen Investitionen werden entsprechend vorgezogen, es gelten für sie die Vollkosten (für einige Jahre, bis ohnehin Sanierungsbedarf bestanden hätte, ab dann Mehrkosten).

Abbildung 27 c): Analog b), jedoch wird nun entweder eine Reihung „Baukörper → Anlage“ durchgeführt oder ein Paket, in dem die Anlagentechnik vorgezogen (dann zunächst Vollkosten) erneuert wird.

Abbildung 27 d): Es gibt Zeitpunkte, zu denen grundsätzlich kein Sanierungsbedarf besteht. Jede Investition, die dann erfolgt, ist vorgezogen. Bei dem oben gewählten Zeitpunkt kann überlegt werden, ob die Reihenfolge „Anlage → Baukörper“ durchgeführt wird (Anlage sofort: Vollkosten, Baukörper später zum ohnehin fälligen Zeitpunkt: Mehrkosten) oder die umgekehrte Reihenfolge: „Baukörper → Anlage“ (Baukörper: Vollkosten, Anlage: Mehrkosten). In diesem Fall kann auch ein Paket ausgeführt werden, wobei dann Baukörper und Anlagentechnik vorgezogen werden. Alternativ wartet man und führt beides erst später aus, was dann zum Fall c) führt.

Sofern die Technik das Ende der Lebensdauer erreicht hat, stellt sich die Frage, ob der Baukörper – vorgezogen – sofort mitsaniert wird. Gleiches gilt umgekehrt für die Gebäudehülle auch. Sind jedoch weder Baukörper noch die Anlagentechnik unmittelbar zu sanieren, bleiben deutlich mehr Optionen, Maßnahmen vorzuziehen. Jede vorgezogene Maßnahme erhöht die Investitionskosten (über das ohnehin notwendige Maß), vermindert aber auch die Energiekosten vorzeitig und spart vor allem vorzeitig Emissionen, die sonst erst später gesunken wären.

Die nachfolgende Auswertung beschränkt sich auf den Fall a) und d), um die Anzahl tabellierter Werte zu minimieren. Die Aussage der Untersuchung ist auch mit dieser eingeschränkten Anzahl von Fällen möglich. Für den kompletten Untersuchungsumfang wird auf Anhang 3.8 verwiesen, dort sind die Ergebnisse auch grafisch dargestellt.

Untersuchte Beispielsanierungen

Die Vielzahl von Optionen werden nachfolgend anhand eines EZFH- und eines MFH-Beispiels exemplarisch erläutert, die unterschiedliche Ausgangszustände aufweisen und auch unterschiedlichen Sanierungsbedarf, siehe Tabelle 27.

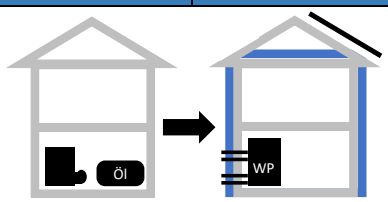
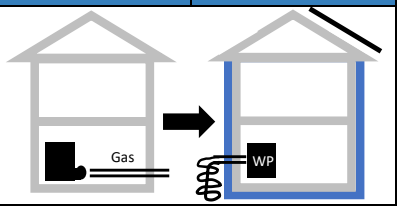
Bauteil		EZFH		MFH	
		vorher	saniert	vorher	saniert
					
Gebäudehülle	Außenwand	„schlecht“	„best“	„schlecht“	„best“
	Dach/Obere Geschossdecke	„mittel“	„best“	„mittel“	-
	Boden/Kellerdecke	„mittel“	-	„schlecht“	„best“
	Fenster	„schlecht“	„best“	„gut“	-
	Lüftung	Fenster	-	Fenster	-
Peripherie	Übergabe	Heizkörper	-	Heizkörper	-
	Trinkwarmwasser	zentral	-	zentral	-
	Zirkulation	nein	-	ja	-
Haupterzeuger		Heizöl-NT-Kessel	Außenluft-Wärmepumpe	Gas-NT-Kessel	Erdreich-Wärmepumpe
Zusatzerzeuger	Solar	nein	-	nein	-
	Photovoltaik	nein	ja	nein	ja

Tabelle 27 Beschreibung der Maßnahmen für Pakete und Reihenfolgen im EZFH und MFH [eigene Darstellung]

Bei dem EZFH wird ein bauliches Paket aus Außenwanddämmung, Nachdämmung des Daches sowie Fenstertausch vorgesehen. Außerdem wird ein Öl-Niedertemperaturkessel durch eine Außenluftwärmepumpe ersetzt, wobei gleichzeitig Photovoltaik eingebaut wird.

Im MFH werden die Außenwand und die Kellerdecke erstmalig gedämmt, die anderen Bauteile wurden bereits früher ertüchtigt. Im Bereich der Anlagentechnik wird ein Gas-Niedertemperaturkessel durch eine Erdreichwärmepumpe ersetzt. Gleichzeitig wird Photovoltaik eingebaut.

Pakete und Reihen im Ein- und Zweifamilienhaus

Tabelle 28 fasst die Ergebnisse der Betrachtungen für das Ein- und Zweifamilienhaus zusammen. Ausführliche Datentabellen sind in den Anhängen 3.8.1 bis 3.8.4 zu finden.

Paket 1: Wenn sowohl der Baukörper als auch die Anlagentechnik das jeweilige Nutzungsende erreicht haben, werden sie saniert. Es gelten die Mehrkosten. Dieser Fall stellt gewissermaßen die Referenz dar. Er ist in der ersten Zeile eingetragen. Seine Wirtschaftlichkeit ist die beste, der äquivalente CO_2-Preis am niedrigsten. Es bedarf keiner Förderung.

In der Alternative weisen weder der Baukörper, noch die Anlage derzeit einen Sanierungsbedarf auf. Es wird angenommen, dass sie beide erst in 10 Jahren zur Sanierung anstehen. Es ergeben sich die weiteren 4 Optionen: es wird noch 10 Jahre abgewartet (und es gelten dann die Mehrkosten). Es erfolgt jetzt sofort eine Umsetzung des Paketes (und es gelten für die ersten 10 Jahre der Betrachtung die Vollkosten, erst danach die Mehrkosten). Darüber hinaus sind die Optionen einer vorgezogenen Anlagentechniksanierung denkbar oder einer vorgezogenen Baukörpersanierung möglich. Es entsteht eine gemischte Mehr-/Vollkostenbetrachtung.

Die Bilanzierung erfolgt weiterhin über 30 Jahre. Es werden gemittelte Kennwerte aus Mehrkosten und Vollkosten gebildet. Auch die Energiemengen und Emissionen werden bei den Reihenfolgen gewichtet angegeben.

Paket 2: Wird die Maßnahme verschoben auf den Zeitpunkt, wo sie ohnehin fällig gewesen wäre, ist eine Wirtschaftlichkeit gegeben. Es bedarf keiner Förderung. Über den Zeitraum der nächsten 30 Jahre wird allerdings im Mittel drei Mal so viel CO_2 emittiert, als wenn das Paket vorgezogen umgesetzt wird. Zur Nachverfolgung dieser Rechnung wird auf Anhang 3.8.4 verwiesen.

Paket 3: Die Option, alles auf einmal vorzuziehen, ist über den Gesamtzeitraum betrachtet wirtschaftlich. Jedoch während des ersten Jahrzehntes nicht. Eine Förderung würde dieses Problem beheben.

	Anmerkung	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme+Strom	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
			[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
Paket 1		M	-86 %	203	-3,53	keiner	keiner	umsetzen
Paket 2	beides später	M	-58 %	203	-2,35	keiner	keiner	umsetzen
Paket 3	beides vorgezogen	V	-86 %	260	0,06	0 %	1	anreizen/ fördern
Reihe 1	Bau vorgezogen	M/V	-75 %	246	-0,06	0 %	-1	anreizen/ fördern
Reihe 2	Technik vorgezogen	M/V	-74 %	271	0,50	3 %	9	anreizen/ fördern

Tabelle 28 Ergebnisdarstellung der Paketmaßnahmen und Reihen im Ein- und Zweifamilienhaus [eigene Darstellung]

Was in der zusammengefassten Darstellung nicht mehr ersichtlich ist, sind die unterschiedlichen Wirtschaftlichkeiten der beiden Zeiträume: der ersten 10 Jahre (Zeit vorgezogener Maßnahmen) und der weiteren 20 Jahre. In der Detailauswertung (Anhang 3.8.4) sind auch dafür Zahlen verfügbar.

Reihe 1: Werden die baulichen Investitionen vorgezogen und die Anlage dann erst in 10 Jahren modernisiert, ergibt sich ein großes Defizit an Kosten in den ersten 10 Jahren. Es fehlen fast 1000 €/a, die mit einer Förderung von fast 50 % der Investition auszugleichen wären. Ab dem Jahr 11 wird ein Gewinn von fast 1500 €/a erzielt. Es bedarf dann keines Zuschusses mehr, so dass am Ende eine ausgeglichene Bilanz entsteht. Diese Kombination ist aus Sicht von Bauherren und potentiellem Fördermittelgeber jedoch ungünstig.

Reihe 2: Im Umkehrfall, erst die Anlage zu wechseln und die Baukörpersanierung auf den Zeitpunkt zu verschieben, wo sie ohnehin fällig ist, führt zu etwas besseren Ergebnissen. In den ersten Jahren ergibt sich ein Verlust von ca. 360 €/a, jedoch könnte dieser durch Förderung von 21 % ausgeglichen werden – ein mittlerer Wert. Der zweite Schritt ist in sich wirtschaftlich und bedarf keiner Förderung. Da damit nur etwa genauso hohe Emissionen im 30-Jahres-Mittel erreicht werden, würde diese der vorherigen Variante vorgezogen.

Von den untersuchten Varianten erscheint den Gutachtern nur die Option der vorgezogenen Techniksanierung sinnvoll – auch sinnvoller als nichts zu tun. Hierbei können die Emissionen deutlich vermindert werden und es bedarf eines Zuschusses von etwa 20 % der Investitionskosten. Die vorgezogene Baukörperverbesserung ohne Technik ist vergleichsweise teuer (es sind Fenster darin enthalten!) und wird – wenn überhaupt – nur mit der Anlage zusammen im Paket umgesetzt.

Pakete und Reihen im Mehrfamilienhaus

Tabelle 29 fasst die Ergebnisse der Betrachtungen für das Mehrfamilienhaus zusammen. Ausführliche Datentabellen sind in den Anhängen 3.8.1 bis 3.8.4 zu finden.

Die grundsätzlichen Erkenntnisse sind für die **Pakete 1** bis **3** identisch wie für das EZFH.

Reihe 1: Werden die baulichen Investitionen vorgezogen und die Anlage dann erst in 10 Jahren modernisiert, ergibt sich ein überschaubares Defizit an Kosten in den ersten 10 Jahren. Es fehlen etwa 100 €/a, die mit einer Förderung von etwa 5 % der Investition auszugleichen wären. Dies erscheint sinnvoll. Ab dem Jahr 11 wird ein Gewinn von fast 700 €/a erzielt. Es bedarf keines Zuschusses.

Reihe 2: Im Umkehrfall, erst die Anlage zu wechseln und die Baukörpersanierung auf den Zeitpunkt zu verschieben, wo sie ohnehin fällig ist, führt zu schlechteren Ergebnissen. In den ersten Jahren ergibt sich ein Verlust von ca. 830 €/a, jedoch könnte dieser durch Förderung von 35 % ausgeglichen werden – ein eher hoher Wert. Der zweite Schritt ist in sich wirtschaftlich und bedarf keiner Förderung. Da damit nur geringfügig weniger Emission im 30-Jahres-Mittel erreicht werden, würde stattdessen der vorherigen Variante der vorgezogenen Baukörperverbesserung, der Vorzug gegeben.

	Anmerkung	Vollkosten/ Mehrkosten	Emissionsminderung, Wärme+Strom	Äquivalenter CO_2-Preis	Jahreskosten, Fehlbetrag	notwendiger Investitionskostenzuschuss	notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	Fazit
			[%]	[€/t]	[€/(m²a)]	[%]	[€/t]	
Paket 1		M	-70 %	302	-1,05	keiner	keiner	umsetzen
Paket 2	beides später	M	-47 %	302	-0,70	keiner	keiner	umsetzen
Paket 3	beides vorgezogen	V	-70 %	328	-0,15	keiner	keiner	umsetzen
Reihe 1	Bau vorgezogen	M/V	-57 %	304	-0,56	keiner	keiner	umsetzen
Reihe 2	Technik vorgezogen	M/V	-64 %	329	0,34	3 %	11	anreizen/fördern

Tabelle 29 Ergebnisdarstellung der Paketmaßnahmen und Reihen im Mehrfamilienhaus [eigene Darstellung]

Das Vorziehen der Baukörperverbesserung erscheint den Gutachtern am sinnvollsten, vor allem da keine Fenstersanierung enthalten ist. Der Gaskessel würde dann erst verbessert werden, wenn er ohnehin zur Sanierung ansteht. Das Vorziehen allein der TGA ist eine schlechtere Option, weil der Gaskessel ohnehin keine so hohen Verluste hat – und es könnte dann ein Hybridsystem errichtet werden. Mit einer Förderung von etwa 23 % ist das Paket ebenfalls eine denkbare Option.

Fazit zu Reihenfolgen und Paketen

Sofern die Technik das Ende der Lebensdauer erreicht hat, stellt sich die Frage, ob der Baukörper – vorgezogen – sofort zeitgleich mitsaniert wird. Gleiches gilt umgekehrt für die Gebäudehülle auch. Sind jedoch weder Baukörper noch die Anlagentechnik unmittelbar zu sanieren, bleiben deutlich mehr Optionen, Maßnahmen vorzuziehen. Jede vorgezogene Maßnahme erhöht die Investitionskosten (über das ohnehin notwendige Maß), vermindert aber auch die Energiekosten vorzeitig und spart vor allem vorzeitig Emissionen, die sonst erst später gesunken wären.

Für den Betreiber des Gebäudes stellt sich die Frage, wie wirtschaftlich ist das Vorziehen von Maßnahmen. Ist dies allein aus der Einsparung an Energie heraus zu finanzieren. Aus übergeordneter Sicht, z. B. eines Fördermittelgebers stellt sich die Frage, ob die Zuschüsse es wert sind, die zusätzlich erzielten Einsparungen an Emissionen zu rechtfertigen.

Im Vergleich der Varianten „kein Sanierungsbedarf“ ist festzustellen:

- für das MFH erscheint die Lösung „Bau vorgezogen – Technik später“ vorteilhafter als die anderen
- für das EZFH ist das Paket „beides vorgezogen“ vorteilhafter als die anderen; es ist fast genauso teuer wie die Lösung „Bau vorgezogen – Technik später“, führt aber zu größeren Emissionsminderungen
- für das EZFH ist es mit Betrachtung der ersten 10 Jahre am günstigsten, die Anlage vorzuziehen (Zuschuss des ersten Schrittes 21 %), die zweitbeste Lösung ist das Paket (Zuschuss 31 %), die drittbeste ist das Vorziehen des Baukörpers (Zuschuss 47 %)
- für das MFH ist es mit Betrachtung der ersten 10 Jahre am günstigsten, den Baukörper vorzuziehen (Zuschuss des ersten Schrittes 5 %), die zweitbeste Lösung ist das Paket (Zuschuss 23 %), die drittbeste ist das Vorziehen der Anlagentechnik (Zuschuss 35 %)

Eine abschließende pauschale Bewertung, ob Maßnahmenreihenfolgen oder Pakete sinnvoller sind, lässt sich nicht treffen. Es ist eine Einzelfallentscheidung – vor allem abhängig davon, welche Maßnahmen zum Zeitpunkt der Überlegung ohnehin anstehen und welche ggf. dadurch im Paket vorgezogen werden.

Stehen alle oder mehrere Maßnahmen gleichzeitig an, ist im Paket zu sanieren. Allerdings ist dieser Zustand aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsdauer der einzelnen Bauteile nicht oft im Lebenszyklus eines Gebäudes gegeben.

Stehen Maßnahmen nicht gleichzeitig an, besteht Wahlfreiheit für das Bilden von Paketen. Je ferner der eigentlich notwendige Investitionszeitpunkt liegt, desto unwirtschaftlicher ist eine Paketsanierung mit Vorzieheffekt. Insbesondere Fenster- und Außenwand im Paket führen jeweils zu sehr großen Verschiebungen. Würde die Wand immer im Zusammenhang mit der Fenstersanierung ertüchtigt, führte dies jedes Mal zu einer Verschiebung von 10 Jahren. Es ist damit nachvollziehbar, dass – obwohl dies baupraktisch auf der Hand liegen würde – häufig in der Praxis die Fenster in einem anderen Turnus und unabhängig von der Wand verbessert werden.

Da die anlagentechnischen Maßnahmen allgemein kurzlebiger sind als bauliche Maßnahmen, stellt sich insgesamt eher die Option einer vorzeitigen Anlagentechniksanierung im Zusammenhang mit einer baulichen Sanierung. Dies konnte auch mit den Typgebäuden herausgearbeitet werden: die vorgezogene Verbesserung des Erzeugers ist deutlich günstiger (im Sinne notwendiger Zuschüsse) als der umgekehrte Fall. Beispielsweise wäre es sinnvoll, mit der 3. Fenstergeneration (nach 70 Jahren) auch den dann 3. Wärmeerzeuger vorzeitig auszutauschen, weil dieser ohnehin nur noch 5 Jahre Nutzungsdauer aufweist.

Bezogen auf die untersuchten Varianten für Reihenfolgen und Pakete des EZFH und MFH ist festzustellen, dass das Vorziehen von anlagentechnischen Maßnahmen günstiger ist, wenn der Energieträger Heizöl gegeben ist. Dann lohnt sich sogar der Aufbau übergangsweiser Hybridlösungen mit Kessel und Wärmepumpe. Das ist bei Gaskesseln nicht der Fall. Sie können eher bis zum Lebensende betrieben werden.

Das Vorziehen baulicher Maßnahmen ist vor allem interessant, wenn in dem Maßnahmenpaket keine Fenster enthalten sind, weil diese vergleichsweise teuer sind und damit hohe Förderquoten erforderlich machen.

Vorgehensweise im Einzelfall

Ob der konkrete Handlungsbedarf im Einzelfall eher die Erzeugung, die Gebäudehülle, den Trinkwarmwasserbedarf, das Nutzerverhalten oder die Qualitätssicherung betrifft, kann mit einem groben Mess- und Auswertekonzept als Grundlage für eine Energieanalyse aus dem Verbrauch EAV – möglichst schon ein Jahr vor Umsetzung von geplanten Modernisierungsmaßnahmen erfolgen. Das konkrete Vorgehen wird in Anhang 3.8.6 erläutert.

Die notwendigen Vergleichskennzahlen können der Literatur entnommen werden, z. B. diesem Gutachten. Die dann installierte Messtechnik kann genutzt werden, um die Qualitätssicherung der umgesetzten Modernisierung zu leisten.

Auf jeden Fall ist es nach Ansicht der Gutachter sinnvoll, die Entscheidung verbrauchsbasiert zu treffen, nicht allein auf Basis des berechneten Energiebedarfs. Die Meinung der VdZ, alle Gebäude verpflichtend mit einem Bedarfsausweis zu versehen und diesen als Grundlage für einen Sanierungsfahrplan zu verwenden [136], teilen die Gutachter nicht.

> *„Energieverbrauchsausweise werden auf Grundlage des tatsächlichen Verbrauchs (Messung/Ablesung) erstellt. Sie spiegeln daher die tatsächliche Verbrauchssituation eines Gebäudes bei der real auftretenden Nutzung sehr gut wider. Da das Ergebnis naturgemäß sehr stark durch individuelle Gegebenheiten, insbesondere das Nutzerverhalten, beeinflusst wird, lassen Energieverbrauchsausweise nur sehr bedingt Schlüsse auf die energetische Qualität eines Gebäudes und seiner Anlagentechnik zu.*
> *[…]*
> *Energiebedarfsausweise beschreiben die energetische Qualität eines Gebäudes und seiner Anlagentechnik auf Basis einer Energiebedarfsberechnung unter Annahme einer weitgehend standardisierten Nutzungsweise. Damit sind Schlüsse auf reale Energieverbräuche nur bedingt möglich. Hinsichtlich der energetischen Qualität von Gebäuden/Anlagen durch zeitgemäße Sanierungsmaßnahmen und -technik kann durch die exakte Definition bauphysikalischer, anlagentechnischer und nutzungsseitiger Randbedingungen jedoch ein sehr hoher Grad an Vergleichbarkeit erzielt werden. Der Energiebedarfsausweis stellt damit prinzipiell eine sehr gut geeignete Bewertungsgrundlage im Rahmen eines Gebäudesanierungsfahrplans dar.“*

Insbesondere an der exakten Definition von Randdaten bei einer Bedarfsbilanz scheitert es im Einzelfall, siehe auch Ausführungen zur Thematik „Bedarf und Verbrauch“ in Anhang 5.2.

1.4.8 Einordnung sonstiger Technologien

In diesem Gutachten werden folgende Technologien nicht quantitativ bewertet bzw. nicht vertieft behandelt:

- **Abluftanlagen:** Die Thematik der Abluftanlagen wird im Rahmen dieses Gutachtens nicht vertieft. Sie werden vor allem aus Gründen des Bautenschutzes (Feuchteschutz, Schimmelprävention) oder zur Entkopplung der Wohnung vom Außenraum (Schallschutz, Pollenvermeidung) eingesetzt. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass insbesondere im Geschosswohnungsbau die Marktdurchdringung der Abluftanlagen weiter steigt. Aus Sicht der Gutachter kann die sich ergebende Wärmequelle (Abluft) anstelle von Außenluft zum Betrieb einer Wärmepumpe genutzt werden. Vereinfachend werden in diesem Gutachten Abluftwärmepumpen zur Trinkwarmwassererwärmung nicht separat betrachtet, sondern als energetisch schlechtere Außenluftwärmepumpen bilanziert.

- **Wohngebäudekühlung:** Etwa 2 % der Fläche im deutschen Wohnungsbau sind mit einer Anlage zur Raumkühlung ausgestattet. Zudem werden die Anlagen in einem zeitlich nur sehr geringen Umfang betrieben, so dass sich sehr geringe Endenergieaufwendungen von 1 bis 5 kWh/(m²a) für die Kühlung ergeben. Auf die Bilanzierung der Kühlung im Wohnungsbau wird daher in diesem Gutachten verzichtet. Für künftige Aspekte besser gedämmter Gebäude wird das Thema immer relevanter. Zur Minimierung der Kühlenergie im Wohnungsbau sind die bereits seit Jahren mit der EnEV geltenden Anforderungen an den Nachweis zum „sommerlicher Wärmeschutz“ zu beachten und konsequent (sowie qualitätsgesichert) zu planen und auszuführen. Dennoch ist mit dem Klimawandel einerseits und dem besseren Wärmeschutz andererseits eine Erhöhung von Energiemengen für Kühlung absehbar. Sie fallen vor allem an Tagen an, an denen hohe solare Gewinne zu verzeichnen sind. Sofern der Ausbau dezentraler Photovoltaik entsprechend voranschreitet, kann eine Kühlung im Sommer mit der gebäudenah produzierten Energiemenge erfolgen. Beispielsweise könnten die heute noch abgeregelten Energiemengen der Photovoltaik zur Kühlung verwendet werden (in Kombination mit Wärmepumpen oder separaten Kühlsystemen).

- Smart-Home-Systeme: die seit ca. zehn bis fünfzehn Jahren von verschiedenen Herstellern angebotenen „Smart-Home-Systeme und -Komponenten“ werden zwar von vielen als Systeme der Zukunft gesehen [137], ihr Einsparpotenzial hinsichtlich des Heizwärmeverbrauchs sinkt jedoch mit zunehmender Qualität der Gebäudehülle und aktivem sparsamen Nutzerverhalten. In diesem Gutachten wird deshalb nicht auf zusätzliche Einspareffekte durch Digitalisierung eingegangen bzw. Effekte werden durch den Einfluss der Qualitätssicherung quantitativ berücksichtigt.

- Gaswärmepumpen: Nach der Gemeinschaftsstudie Dynamis von Wagner et al. [137] wird der Einsatz von Gaswärmepumpen, also Gaskompressionswärmepumpen, Gasadsorptionswärmepumpen und Gasabsorptionswärmepumpen sowohl für das Jahr 2035 als auch für 2050 mit 4000 Stück als vernachlässigbar gering eingestuft. Die Gutachter schließen sich dieser Einschätzung an.

- Abwasserwärmenutzung: Abwasser hat ganzjährig eine Temperatur von 10 bis 15°C. Die Nutzung der im Abwasser enthaltenen Wärme durch den Einbau von Wärmetauschern in ausreichend großen Kanälen und bei Bedarf die nachgeschaltete Temperaturerhöhung mittels einer Wärmepumpe ist Stand der Technik und wird in der Schweiz in vielen Projekten angewandt. In diesem Gutachten wird Abwasserwärmenutzung nicht gesondert berücksichtigt. Eine wirtschaftliche Bewertung der Wärmerückgewinnung aus Duschwasser findet sich in der Veröffentlichung von Krick zu Versorgungskonzepten für das Niedrigenergie- und Passivhaus [138]. Das System liegt nahe der Grenzwirtschaftlichkeit. Insbesondere die Kopplung dieser Technik an Varianten dezentraler elektrischer Trinkwassererwärmung sind daher interessant.

- Batteriespeicher: heutige PV-Anlagen können mit oder ohne elektrische Batteriespeicher in Wohngebäuden installiert werden. In diesem Gutachten mit der dazugehörigen Berechnung (Anhang 6) werden Batteriespeicher nicht berücksichtigt. Die Gutachter begründen dies zurzeit mit der unklaren ökologischen Bewertung der Ausgangsprodukte für Batteriespeicher. Zudem sind die Betriebserfahrungen noch sehr weit von einer Wirtschaftlichkeit entfernt. Sofern sich das Preisgefüge ändert, wird voraussichtlich die Mobilität vorrangig bedient. Falls solche Speicher eingesetzt werden, verbessert sich die Stromselbstnutzung über das berechnete Maß hinaus. In den Berechnungen zum Gutachten wird davon ausgegangen, dass Überschussstrom in Wärme- oder Trinkwarmwasserspeichern gelagert wird. Für Haushaltsstrom wird ohne Zwischenspeicherung von PV eine geringere Eigenstromnutzung gerechnet, als sie sich mit Batterie erreichen ließe.

- Ultramembranfiltertechnologie in Trinkwarmwassernetzen: Durch Ultrafiltrationsmodule werden in Trinkwarmwasserzirkulationsnetzen mikrobiologische Bestandteile, wie z. B. Legionellen und weitere biologische Bestandteile entfernt. Diese Systeme befinden sich derzeit noch in der Erprobungsphase und erlauben eine Temperaturabsenkung im Netz bis unter 50°C. Da noch keine ausreichenden Erfahrungen mit ausreichender Anzahl von Feldanlagen vorliegen, wird in diesem Gutachten diese Technologie nicht mitberücksichtigt. Die bisherigen Projekterfahrungen der Gutachter zeigen sehr gute Effekte in der Sanierung bei Legionellenbefall.

1.4.9 Sensitivitätsanalysen

Die Maßnahmenbewertung erfolgt unter den in Anhang 6 festgelegten Randdaten zur Bilanzierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung. Werden diese modifiziert, ergeben sich andere Erkenntnisse. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse könnten alle oder einzelne Varianten erneut unter anderen Randdaten durchgerechnet werden. Darauf wird im Rahmen dieses Gutachtens jedoch verzichtet. Die auch den Gutachtern aus eigenen Konzepten bekannten Einflussgrößen werden stattdessen nachfolgend kommentiert und sanierungsfördernde und hemmende Randdaten benannt. Anschließend wird der Einfluss des Nutzerverhaltens gesondert besprochen.

Das Kapitel widmet sich in seinem zweiten Teil dreier Sensitivitätsanalysen im Detail, d. h. auch rechnerisch: der Frage der Klimaerwärmung und ihrem Einfluss auf den Rückgang der Verbräuche und Emissionen, der Frage einer sparsameren Trinkwarmwassernutzung und der Gestaltung von Netzen sowie der Frage einer Umgestaltung der Energieträgerbepreisung.

Sanierungsfördernde und -hemmende Randdaten

- Endenergiedifferenz größer bestimmt → wirtschaftlicher
- Endenergiedifferenz kleiner bestimmt → unwirtschaftlicher

Relevant ist die berechnete Endenergie vor und nach einer Maßnahme bzw. deren Differenz, die Endenergieeinsparung. Sie wird benötigt, um die getätigten Investitionen zumindest teilweise zu refinanzieren. Folgende Tendenzen ergeben sich:

Ein Grund für zu groß bestimmt Endenergiedifferenzen sind zu optimistische Annahmen hinsichtlich der Effizienzmerkmale der Bauprodukte nach der Verbesserung und zu schlechte vorher. Darüber hinaus ist das Ignorieren des Reboundeffektes bzw. zumindest teilweise angepassten Nutzerverhaltens problematisch. Die Gutachter haben – zumindest rechnerisch – versucht, alle genannten Einflussgrößen realistisch anzusetzen, so dass weder eine Über- noch Unterschätzung der Einsparung eintritt.

- hohe Energiepreissteigerung → wirtschaftlicher
- niedrige Energiepreissteigerung → unwirtschaftlicher

Den relevantesten Einzeleinfluss auf das Ergebnis haben die Energiepreise bzw. vor allem die Annahmen zu deren zukünftiger Steigerung, v. a. auch mit der geplanten CO_2-Bepreisung. Dies zeigt sich auch in anderen Studien, auch der Gutachter (z. B. [26]).

Die Gutachter haben zunächst darauf verzichtet, eine Energiepreissteigerung in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einzurechnen, sondern sind bei allen Einzelmaßnahmen und Konzepten von heutigen Preisen ausgegangen.

Es zeigt sich dann vielfach eine Unwirtschaftlichkeit. Aus dieser Unwirtschaftlichkeit heraus wird ein notwendiger zusätzlicher Emissionspreis zum Einhalten des Emissionsbudgets und zum Erreichen von Klimaneutralität berechnet, der auf die heutigen Energiepreise aufgeschlagen würde, um eine Grenzwirtschaftlichkeit zu bestimmen. Die Energiepreissteigerung ist in diesem Gutachten daher keine Annahme, sondern ein Ergebnis. Für alle untersuchten Maßnahmen ist der zusätzliche Emissionspreis angegeben.

Alternativ wird ein neues Preissystem für die Energiepreise erarbeitet (siehe Kapitel 1.2.3). Es setzt nicht auf die Logik „künftiger Preis = heutiger Preis + Emissionspreis“, sondern geht davon aus, dass gilt „künftiger Preis = Emissionspreis“. In diesem System steigen die Preise aller emissionslastigen Energieträger stark an – verglichen mit dem heutigen Niveau, aber andere Preise (Strom) sinken im Sinne der Umverteilung. Weitere Ergebnisse zu dieser Überlegung folgen separat.

- Investitionskosten kleiner bestimmt → wirtschaftlicher
- Investitionskosten größer bestimmt → unwirtschaftlicher

Relevant sind die Investitionskosten der Maßnahme. Sie bestimmen die Kapitalkosten, die den Haushalt anstelle der Energiekosten belasten. Folgende Tendenzen ergeben sich:

Im Rahmen dieses Gutachtens wurde auf selbst erstellte Kostenfunktionen zurückgegriffen, um die Investitionssummen abzuschätzen. Basis sind die Literatur und eigene Projekterfahrungen. Die Kostenfunktionen wurden möglichst realistisch angenommen. Um eine ausreichende rechnerische Sicherheit für die Umsetzung von qualitätssichernden Maßnahmen zu erzielen, wurde anschließend – konservativ – ein Preisaufschlag für die Kostengruppe 700 auf alle Maßnahmen von 30 % angesetzt. Es ist davon auszugehen, dass die energetische Sanierung zu den genannten Summen umsetzbar ist.

- großer Sowiesokostenanteil / kleine energiebedingte Mehrkosten → wirtschaftlicher
- Vollkosten → unwirtschaftlicher

Darüber hinaus ist wesentlich, welche Kosten überhaupt einbezogen werden: die Gesamtkosten oder nur die energiebedingten Mehrkosten, weil ohnehin eine Maßnahme geplant ist.

Die Gutachter haben – sofern immer dies notwendig erschien – jeweils vergleichend zwei Fälle berechnet (Vollkosten“ und „Mehrkosten“), um die Konsequenzen dieser Unterscheidung deutlich zu machen. Entsprechend ergeben sich häufig geringere oder gar keine Fördertatbestände, wenn eine Maßnahme ohnehin geplant ist. Andererseits sind größere Unwirtschaftlichkeiten und somit Zuschussnotwendigkeiten zu ermitteln, wenn Maßnahmen vorgezogen erfolgen, obwohl noch keine Sanierungsnotwendigkeit gegeben ist.

- positive Lernkurve, negativer Baupreisindex → wirtschaftlicher
- negative Lernkurve, positiver Baupreisindex → unwirtschaftlicher

Auf eine Berücksichtigung sowohl von Baupreisindex (Verteuerung der Bauprodukte) als auch auf Lernkurven (Vergünstigung der Bauprodukte) wurde im Rahmen dieses Gutachtens im ersten Schritt verzichtet. Es würden sich folgende Tendenzen zeigen:

Der aus der Rückschau positiv festgestellte Baupreisindex (also im Mittel steigende Baupreise) wurde vernachlässigt, weil er in etwa der Inflation folgt. Somit ist davon auszugehen, dass die Bauprodukte langfristig teurer werden, jedoch die Einkommen in etwa der gleichen Geschwindigkeit steigen (oder fallen). Damit ist – inflationsbereinigt – dieser Effekt zu vernachlässigen.

- geringer Zins → wirtschaftlicher
- hoher Zins → unwirtschaftlicher

Der Kalkulationszins wird im Rahmen der Berechnungen dieses Gutachtens mit 2 %/a angesetzt. Das ist aus heutiger Sicht ein typischer Wert, jedoch ist er insgesamt – rückblickend betrachtet – gering.

- längere Nutzungsdauer → wirtschaftlicher
- kürzere Nutzungsdauer → unwirtschaftlicher

Als letzte relevante Größe ist die Nutzungsdauer der Bauprodukte zu nennen. Die Gutachter sind – der gelebten Praxis vieler Gebäudebesitzer folgend – von vergleichsweise langen Lebensdauern ausgegangen, bis der nächste Sanierungszyklus ansteht. Zum Ausgleich werden die Wartungs- und Instandhaltungskosten in die Wirtschaftlichkeitsbewertung einbezogen, was die Gesamtkosten erhöht. Auf der anderen Seite gehen die Gutachter davon aus, dass – wenn nach langer Zeit – eine Maßnahme angegangen wird, sie auch mit einem anspruchsvollen Standard realisiert wird.

Nutzereinfluss

Schwerpunkte einer Verbesserung des Standards der Wärmedämmung der Gebäudehülle sind verbesserte Behaglichkeit durch höhere Umgebungsflächentemperaturen auf der Innenseite der Außenwandflächen und höhere Dichtheit sowie geringerer Kaltluftabfall an verbesserten Fensterqualitäten. Auch können energetische Modernisierungen zu einer Verbesserung der sommerlichen Behaglichkeit und auch des Schallschutzes führen. Für den selbstnutzenden Eigentümer in EZFH und in Eigentumswohnungen sind auch die mit einer Modernisierung einhergehende Wertsteigerung der Immobilie sowie die größere Unabhängigkeit von Energiepreissteigerungen sowie der Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz von Bedeutung.

Ob dieser Nutzen sich in gleicher Weise als entsprechend hohe Verminderung des Raumheizwärme- und des Endenergieverbrauchs niederschlägt, hängt wesentlich vom Nutzerverhalten in Anpassung an den neuen Gebäudestandard ab. Hier wird in der Fachwelt mit einer großen Zahl von theoretischen Studien darüber diskutiert, inwieweit ein sogenannter Rebound-Effekt zu Mehrverbräuchen gegenüber den Plandaten führt. Es wird untersucht, ob dieser Effekt naturgegeben hingenommen oder durch Nutzeranpassung bzw. unterstützt durch technische Maßnahmen reduziert werden kann, um die Plandaten tatsächlich zu erreichen.

Das Thema „Nutzerverhalten und seine Rückwirkung auf den Verbrauch“ ist nicht neu. Bereits 1999 publizierten Deutscher et al. in der damaligen „IKARUS“-Forschungsreihe des BMU dazu [139]. Sie variieren Raumtemperaturen, Luftwechselraten, die räumliche und zeitliche Teilbeheizung – einzeln und summiert. Bezogen auf einen mittleren Fall des Heizwärmebedarfs ergeben sich folgende Einflüsse:

- Einfluss nur der Raumtemperatur: -21 % … +43 %
- Einfluss nur der Lüftung: -17 % … + 25 %
- Einfluss nur der Teilbeheizung: 0 % … -13 %
- Gesamtbandbreite aller Einflüsse: -35 % … +79 %

Eine weitere Quantifizierung des Nutzereinflusses ist Anhang 3.9.2 zu entnehmen. Auch sozioökonomische und sozialpsychologische Aspekte werden angerissen.

Gegen den Reboundeffekt hilft ein Monitoring nach Abschluss der Modernisierungsmaßnahmen über einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren, um im Dialog zwischen Nutzer und Energieanalyse aus dem Verbrauch EAV den Erfolgsnachweis durch mögliche Anpassungen des Nutzerverhaltens tatsächlich zu erbringen. Diese zukünftig zu kommunizierende Vorgehensweise wird in diesem Gutachten vorausgesetzt, ohne den Nutzereinfluss im Berechnungsverfahren besonders zu berücksichtigen. Ueno et al. stellen in ihrer japanischen Studie heraus, dass der Einfluss einer Verbrauchsanzeige, die auch unterjährige Verbräuche anzeigt, den Verbrauch um etwa 12 % verminderte – verglichen mit Haushalten ohne eine solche Anzeige [140].

Sensitivitätsanalyse 1: Klimaerwärmung

Im Rahmen der Gutachtenerstellung wurden anhand der frei verfügbaren Außentemperaturen des Deutschen Wetterdienstes eine Abschätzung zur Außentemperaturerhöhung vorgenommen.

Aus dem Vergleich der Temperaturen der Zeiträume 1980 - 2009 sowie 1990 - 2019 ergibt sich eine Temperaturerhöhung. Während die Jahresmitteltemperatur für 1980 - 2009 bei 9,2°C lag, beträgt sie im Zeitraum 1990 - 2019 bereits 9,6°C. Eine lineare Fortschreibung zweier Jahrzehnte in die Zukunft ergäbe für 2020 - 2049 eine Jahresmitteltemperatur von 10,9°C. Hinsichtlich der sehr kalten Tage ist ebenfalls festzustellen, dass diese wegfallen, damit sinken Heizlasten und Kosten für die zu installierenden Wärmeerzeuger.

Wird die Klimaerwärmung (hier: Außentemperatur- und Erdreichtemperaturerhöhung) in den Energie- und Emissionsbilanzen sowie bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen berücksichtigt, sinken die Emissionen um 6 bis 8 %. Dies ist als positiver Beitrag zur anvisierten Emissionsminderung bis 2050 zu verbuchen, jedoch nicht so zu verstehen, dass andere Maßnahmen dafür entfallen könnten.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeiten, die für einzelne Maßnahmen oder Pakete bestimmt werden, sind negative Auswirkungen festzustellen. Da der Verbrauch sinkt, sinken erzielbare Energieeinsparungen und somit Energiekosteneinsparungen, die zum Refinanzieren von Investitionen eigentlich benötigt würden. Da die Klimaerwärmung vor allem zu veränderten Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten führt, sind Dämmmaßnahmen stärker betroffen als Maßnahmen an der Heizungsanlagentechnik. Nahezu unberührt von der Klimaerwärmung sind die Trinkwassererwärmung sowie die Haushaltsstromnutzung, die daher weiter in den Fokus des Interesses rücken. Die zahlenmäßige Darstellung der Berechnungen ist der Detaildarstellung des Anhangs 3.9.3 zu entnehmen.

Um Maßnahmenpakete nicht unwirtschaftlicher werden zu lassen, könnten beispielsweise Förderprogramme an die künftig geänderten Rahmendaten angepasst werden (anteilig größere Förderquote).

Die Gutachter plädieren in diesem Fall jedoch für einen Ausgleich über eine zusätzliche steigende Emissionsbepreisung der Energieträger. Dies hat eine erkennbare Lenkungswirkung – je wärmer es langfristig wird, desto höher die Bepreisung. Für die untersuchten Paketsanierungen von EZFH und MFH reicht unter den heutigen Randdaten eine jährliche zusätzliche Bepreisung von 0,5 bis 1,0 €/(t a) aus.

Sensitivitätsanalyse 2: Trinkwarmwassernutzen

Ausgehend von einem Tagesverbrauch von 30 l/(d·P) ergibt sich als heute typischer Wert für den Trinkwarmwassernutzen für das gezapfte Warmwasser eine jährliche Energiemenge von etwa 560 kWh/(P·a). Mit diesem Wert werden standardmäßig die Berechnungen für dieses Gutachten erstellt.

Neuere Messungen zeigen vermehrt eine fallende Tendenz für den Kennwert, beispielsweise eigene Untersuchungen in Gebäuden der Wohnungswirtschaft [95]. Es besteht Forschungsbedarf, vor allem im Sektor Single-Haushalt sowie Einfamilienhaus. Da belastbare Ergebnisse noch nicht vorliegen, wird als alternativer Kennwert 400 kWh/(P·a) angesetzt. Dieser Wert liegt in der Bandbreite von Verbrauchswerten, welche von TECHEM [141], aber auch von co2online, ECOFYS und dem Messdienstleister ISTA [142] festgestellt werden können.

Die Ergebnisse für die Komplettsanierung eines Mehrfamilienhauses mit Wärmepumpe und zentraler bzw. als Variante direkt dezentraler elektrischer Trinkwassererwärmung zeigen Folgendes:

Mit der Wärmepumpe beträgt der Wert für den Systemnutzungsgrad der zentralen Trinkwassererwärmung 100 %. Das bedeutet, dass trotz der Umweltwärmenutzung der Wärmepumpe der Einsatz von Strom für die Wärmepumpe und die am Wasserhahn gezapfte Wärmemenge gleich groß sind. Der Systemnutzungsgrad beträgt jedoch nur 80 %, wenn wenig Trinkwarmwasser benötigt wird – trotz des Einsatzes einer Wärmepumpe. Die Zirkulationsverluste sind dann so hoch, dass sie auch mit Umweltwärmenutzung nicht ausgeglichen werden. Am Ende ist mehr Strom aufzuwenden als bei dezentraler Trinkwassererwärmung. Das ist energetisch nicht optimal und kann deshalb vermieden werden.

Mit dem Durchlauferhitzer ist das System energetisch fast gleichwertig oder sogar besser als die Wärmepumpe. Es hat einen Nutzungsgrad von 91 % (normale Trinkwarmwassernutzung) bzw. 88 % (geringe Trinkwarmwassernutzung). Es zeigt sich, dass bei geringem Trinkwarmwasserbedarf das dezentrale System in der Sanierung praktisch zu gleichen Emissionen führt wie das zentrale. Der Einsatzbereich dezentraler Trinkwassererwärmung ist in Gebäuden gegeben, deren Systemnutzungsgrade unter 100 % – trotz Einsatz einer Wärmepumpe liegen. So lässt sich auch die sommerliche Überwärmung der Räume durch Leitungsabwärme minimieren.

Eine weitere Vertiefung zu diesem Thema sowie auch die zahlenmäßige Darstellung des obigen Beispiels ist Anhang 3.9.4 zu entnehmen.

Sensitivitätsanalyse 3: Energiepreise

Das in Kapitel 1.2.3 vorgestellte System modifizierter Energiepreise wird näher untersucht. Zunächst wird das Durchschnittsgebäude betrachtet. Es zeigt sich, dass – bis auf statistische Abweichungen – die Energiekosten für Wärme und Strom in etwa gleichbleiben. Das war die Ausgangsvoraussetzung der modifizierten Preisfestlegung. Während die Wärmepreise gestiegen sind, sind die Strompreise gefallen. Es wird für die weiteren Auswertungen davon ausgegangen, dass die neuen Preise hinreichend genau in das Bilanzierungsmodell passen.

Die bisherigen Berechnungen zu Energieeffizienz und Kosten ausgewählter Einzelmaßnahmen und Pakete werden wiederholt und können wie folgt zusammengefasst werden:

- Insgesamt lässt sich feststellen, dass die modifizierten Energiepreise die Zuschussnotwendigkeiten bei den Dämmmaßnahmen, die an eine Sanierung anknüpfen, auf null herabsetzen. Das Nachdämmen von Außenwänden und Dächern wird dadurch ebenfalls grenzwirtschaftlich. Das Dämmen der Decken wird noch wirtschaftlicher als vorher schon. Das gilt auch, wenn das Gebäude mit einer Wärmepumpe versorgt wird.
- Fenstersanierungen werden wirtschaftlicher, erreichen aber keine Grenzwirtschaftlichkeit. Hier wäre tatsächlich eine Bezuschussung von etwa 15 % – bei einer ohnehin erforderlichen Verbesserung – notwendig.

- Wärmepumpenlösungen im Durchschnittsgebäude werden teilweise auch ohne Betrieb einer eigenen PV-Anlage wirtschaftlich. Dies ist bei Ersatz von Ölkesseln gegeben, die ohnehin getauscht werden. Erdgaskessel, die ohnehin getauscht werden, benötigten einer Förderung in der Größenordnung von max. 20 %. Dieser Zuschuss reicht auch aus, um Ölkessel zu tauschen, die noch nicht für eine Modernisierung vorgesehen sind.
- Wärmepumpenlösungen im guten Gebäude weisen etwas schlechtere Wirtschaftlichkeiten auf, vor allem mit Gaskessel – hier ergeben sich Fördertatbestände von 40 % und mehr. Allerdings der Tausch von defekten Ölkesseln benötigt keine Förderung mehr, der von intakten Ölkessel (vorzeitig) nur eine geringe Förderung.

- Die modifizierten Energiepreise ändern das Bild für Solarthermie kaum; sie kann mit PV nicht konkurrieren. PV lohnt sich dagegen immer noch, aber mehr, wenn eine Wärmepumpe oder eine elektrische Trinkwassererwärmung im Gebäude betrieben wird. Es sind keine Zuschüsse notwendig.

- Die Dezentralisierung der Trinkwassererwärmung wird weder bevorzugt, noch benachteiligt. Sie ist weiterhin empfohlen für Objekte mit unterdurchschnittlichem Trinkwarmwasserbedarf und ungünstigen Verteilnetzgeometrien.

- Bei Maßnahmenpaketen mitteln sich die Vor- und Nachteile der Varianten. Vor allem die Projekte, bei denen Heizöl eingesetzt wird, würden aufgrund der stark steigenden Energiepreise zur Modernisierung angeregt. Eine Förderungsnotwendigkeit kann immer noch gegeben sein, vor allem wenn Ölkessel vorfristig ersetzt werden. Die exemplarisch bestimmten Fördertatbestände liegen unter denjenigen, die sich im heutigen Energiepreissystem ergeben.

Aus Sicht der Gutachter wäre das neue Preissystem eine notwendige Grundlage zur Etablierung einer neuen Förderpolitik, die auf Emissionsminderungen basiert. Es würden dann nur noch Maßnahmen gefördert, die trotz einer großen Emissionsminderung unwirtschaftlich sind, nicht wegen zu hoher Energiepreise.

Die Frage der langfristigen Finanzierung eines modifizierten Modells wird an dieser Stelle noch nicht diskutiert. Es ist klar, dass – wenn die Anreizfunktion tatsächlich Wirkung zeigt – die Gesamteinnahmen in diesem Modell sinken. Die Energieträger mit den hohen Preisen werden vermieden, die günstigen bevorzugt.

Es ist entsprechend nachzusteuern, beispielsweise durch eine Verteuerung auch der emissionsgünstigen Energieträger (Strom, Holz). Vor allem die Investitionskosten (in Windkraft, Photovoltaik, Energiespeicher) bilden einen Sockel aus, den es zu bezahlen gilt. Diese Infrastrukturkosten ähneln aber eher einem Leistungspreis als einem tatsächlichen Energiepreis, siehe auch „Grenzkosten-Null-Gedanke“ in Kapitel 1.2.7.

Eine weitere Vertiefung zu diesem Thema sowie auch die zahlenmäßige Darstellung der obigen Beispiele ist Anhang 3.9.5 zu entnehmen.

1.4.10 Ergebnisinterpretation für Selbstnutzer, Mieter und Vermieter, Contractoren

Selbstnutzung

Für den Fall der Selbstnutzung einer Immobilie durch einen Einzelnutzer gelten die Erkenntnisse (Energieeinsparung, Gesamtkosten) zu Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpaketen wie jeweils beschrieben. Alle als wirtschaftlich erkannten Maßnahmen führen direkt zu einer Gesamtkostenminderung (Summe aus Kapitalkosten, Wartungs- und Unterhaltskosten, Energiekosten).

Sofern keine Wirtschaftlichkeit der Maßnahme allein aus der Energiekostenersparnis heraus bestimmt werden konnte, führt der Einbezug eines „Investitionskostenzuschusses“ zu einer Grenzwirtschaftlichkeit. Es gilt dann: die jährlichen Kosten mit der Maßnahme (Kapital plus Energie) sind genauso groß wie die Energiekosten vorher.

Wird der „Investitionskostenzuschuss“ als (förderpolitische) Maßnahme zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit gewählt, ändern sich die jährlichen Ausgaben für den Investor nicht; sie entsprechen dem heutigen Niveau. Der staatliche Anteil liegt in der Bereitstellung der Investitionskostenzuschüsse.

Die alternativ berechnete Version eines „zusätzlichen Emissionspreises“ führt auch zu einer Grenzwirtschaftlichkeit. Allerdings steigen die Gesamtausgaben. Es gilt dann: die jährlichen Kosten mit der Maßnahme (Kapital plus Energie) sind genauso groß wie die Energiekosten vorher – jedoch wären diese bereits vorher höher.

Wird der „zusätzliche Emissionspreis“ als (förderpolitische) Maßnahme zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit gewählt, ändern sich die jährlichen Ausgaben für den Investor; sie liegen über dem heutigen Niveau. Der staatliche Anteil ergibt sich indirekt, z. B. durch anderweitige Entlastungsnotwendigkeiten, v. a. einkommensschwacher Verbraucher.

Dieser Ansatz führt also ebenfalls zu einer Subventionsnotwendigkeit, jedoch anderer Art. Insbesondere einkommensschwache Haushalte werden in einem solchen System ansonsten nicht investieren (können). Diese Subvention kann beispielsweise generiert werden aus den Einnahmen der zusätzlichen Emissionsbepreisung.

Für beide Varianten gibt Anhang 3.10.1 am Zahlenbeispiel einer Dachsanierung vertiefte Erläuterungen.

In der Realität kann eine Zwischenlösung hilfreich sein – der Fehlbetrag wird über einen zusätzlichen Emissionspreis und einen Investitionskostenzuschuss anteilig ausgeglichen. Die Emissionsbepreisung wird entsprechend etwas geringer gewählt. Damit steigen die Energiekosten, jedoch nicht um so große Beträge. Da sie nun aber etwas höher sind, können bei einer Modernisierung auch etwas größere Einsparungen erzielt werden. Damit reichen geringere Investitionskostenzuschüsse zum Erreichen der Grenzwirtschaftlichkeit aus.

Beide Werte können so gewählt werden, dass insgesamt betrachtet die Mehreinnahmen der zusätzlichen Emissionsbepreisung die Mehrausgaben der Investitionskostenzuschüsse abdecken. Auch in diesem System steht am Ende der Fehlbetrag der Wirtschaftlichkeitsberechnung im Raum, der eingangs ermittelt wurde. Er lässt sich nicht durch Umverteilung ausräumen. Es lässt sich nur darüber entscheiden, wer zu welchen Anteilen diesen Betrag trägt.

Alternativ wird eine alternative Bepreisungsart für die Energieträger gewählt, wie in Kapitel 1.2.3 vorgestellt.

Die o. g. Überlegungen gelten für Wohneigentümergemeinschaften ebenfalls. Nutzer und Investor sind grundsätzlich identisch. Für die gemeinschaftliche Nutzung von Photovoltaikstrom sind ggf. komplexere technische Strukturen aufzubauen (z. B. eine zweite Zählerebene) oder alternative vertragliche Regelungen (z. B. ein Betreibermodell). Dennoch ließen sich die im Gutachten untersuchten Maßnahmen und Maßnahmenpakete analog einer „Selbstnutzung mit Einzelnutzer“ konzipieren und umsetzen – mit den üblichen Schwierigkeiten, die sich immer im Zusammenhang von Wohneigentümergemeinschaften ergeben.

Mieter/Vermieter-Strukturen

Für den Fall der Vermietung einer Immobilie sind die Erkenntnisse (Energieeinsparung, Gesamtkosten) zu Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpaketen aus den Kapiteln 1.4.2 bis 1.4.7 zu modifizieren.

Vom Vermieter sind die (größten Anteile) der Wartungs- und Unterhaltskosten sowie die nicht energetisch bedingten Anteile der Kapitalkosten (also die Sowiesokosten) zu tragen. Der Mieter übernimmt die Energiekosten sowie die energetisch bedingten Anteile der Kapitalkosten – als Kaltmieterhöhung (also die Mehrkosten).

Alle als wirtschaftlich erkannten Maßnahmen führen zu einer Gesamtkostenminderung (Summe aus Kapitalkosten, Wartungs- und Unterhaltskosten, Energiekosten). Sie sind also zuschussfrei umsetzbar, das bedeutet: es ließe sich eine Kaltmieterhöhung finden, bei der weder der Vermieter noch der Mieter einen Verlust verzeichnen. Ob dies tatsächlich umsetzbar ist, ergibt sich aus der Deckelung der Mietpreiserhöhung – einerseits durch die prozentuale Umlagefähigkeit, andererseits die örtlichen Vergleichsmieten.

Sofern keine Wirtschaftlichkeit der Maßnahme allein aus der Energiekostenersparnis heraus bestimmt werden konnte, führt der Einbezug eines „Investitionskostenzuschusses“ zu einer Grenzwirtschaftlichkeit. Der Zuschuss wird an den Vermieter gezahlt, der daraus einen Teil der Investitionskosten deckt und somit die notwendigen Kaltmieterhöhung etwas geringer ausfallen lassen kann.

Streng genommen dürften in dem Mieter/Vermieter-Modell die Investitionskostenzuschüsse von Maßnahmen, die nicht vorgezogen werden, nicht größer ausfallen als die energetisch bedingten Mehrkosten. Die ohnehin erforderlichen Sowiesokosten sind über die früher gezahlten Kaltmieten bereits abgegolten.

Dieses Kriterium halten die baulichen Maßnahmen ein, jedoch nicht die Wärmepumpen und auch nicht die Holzkessel. Hier sind – unabhängig davon, ob als Mehrkosten oder Vollkosten gerechnet – jeweils notwendige Investitionskostenzuschüsse von mehr als 75 % bestimmt worden. Häufig liegen die Werte sogar über 100 %.

In der Mieter/Vermieter-Konstellation hieße dies: wenn der Vermieter einen Zuschuss von z. B. 110 % der Investitionssumme für den Einbau einer Erdreich-Wärmepumpe erhielte, könnte damit eine Grenzwirtschaftlichkeit hergestellt werden. Jedoch müsste der Vermieter zunächst mit dem Geld alle energetisch bedingten Mehrkosten subventionieren, so dass sich keine Mieterhöhung ergibt. Darüber hinaus müsste sogar eine Kaltmietabsenkung aus dem Zuschuss finanziert werden, damit beim Mieter eine Warmmietneutralität erzielt wird. Dies ist praxisfern.

Wie bereits für den Selbstnutzer festgestellt, bestätigt sich die Problematik in der Mieter/Vermieter-Konstellation noch stärker: für alle Energieträger, deren Einsatz zu einer Energiekostenerhöhung führt, obwohl es zu einer Emissionsminderung kommt – also vor allem beim neuen Energieträger Strom – führen Investitionskostenzuschüsse nicht zu einer sinnvollen Herstellung ausgeglichener Kostenbilanzen. Wäre der Zuschuss gedeckelt, beispielsweise auf den Betrag der Mehrkosten (über die ohne erforderlichen Kesselkosten), würde der Mieter Verlust machen – aus den erhöhten Energiekosten. Für den Vermieter käme ein ausgeglichener Haushalt heraus, er müsste – weil subventioniert – auch keine Mieterhöhung veranlassen.

Das bedeutet: alle Maßnahmen und Pakete, für die Zuschüsse bestimmt wurden, die oberhalb der Investitionskosten liegen, braucht es eine alternative Energieträgerbepreisung. Die Gutachter schlagen ein System nach Kapitel 1.2.3 vor.

Unter den heutigen Randdaten verlangen die Verbände der Wohnungswirtschaft und der Mietervertretungen eine Erhöhung der Förderung energetischer Maßnahmen an Gebäuden, um so die Differenz zwischen der notwendigen Umlage von Modernisierungsinvestitionen und maximal erlaubter Kaltmietenerhöhung (Größenordnung 2 bis 3 €/(m²Monat)) zu finanzieren [143].

Ein zusätzlicher Emissionspreis belastet zunächst einmal nur die Mieter. Würde ein solches System etabliert, braucht es anderweitige Entlastungen der Mieter – dies gilt analog wie für die Selbstnutzer beschrieben.

Kritisch sind Haushalte mit geringem Einkommen bzw. einer Mietbelastung bereits vor der Modernisierung von 40 % oder höher. Vogler fasst wie folgt zusammen [144]:

> *„Während bei den Energiekosten üblicherweise 0,40 bis 0,80 EUR/m² eingespart werden können, betragen vollständige Mieterhöhungen bis über 3 EUR/m². Der hohe Wohnkostensprung führt zu einer deutlichen Erhöhung der Wohnkostenbelastung, die angesichts der erheblichen Komfortverbesserung vermutlich dann getragen wird, wenn die Wohnkostenbelastung nicht zu sehr über 30 % hinausgeht.*
>
> *Energetische Modernisierung ist bei überdurchschnittlichen Anfangswohnkostenbelastungen keine Lösung gegen steigende Wohnkostenbelastungen durch steigende Energiepreise, wenn nicht Wege gefunden werden, den Sprung in der Wohnkostenbelastung durch energetische Modernisierung für diese Haushalte sehr stark zu vermindern, ohne den Gebäudeeigentümer in wirtschaftliche Schwierigkeiten zu bringen."*

Abgesehen von den absoluten Zahlen, die sich aus der Datenlage von 2010 bis 2013 ergeben, ist die Thematik heute unverändert. Sofern die Kaltmietsteigerungen deutlich über den Steigerungen der Realeinkommen liegen, kann keine energetische Sanierung dieses Problem nennenswert begrenzen.

Contracting

Eine Lösung, v. a. zur Finanzierung von anlagentechnischen Modernisierungsmaßnahmen besteht in der Möglichkeit eines Liefer- oder eines Energieeinspar-Contractings. Die Gutachter haben sich mit dem Thema „Umstellung von zentraler Wärmeerzeugung auf Wärmelieferung durch einen Contractor" intensiv auseinandergesetzt [145].

Sie plädieren in diesem Zusammenhang für eine verbrauchsbasierte unterjährige Energieanalyse aus dem Verbrauch EAV (Vertiefung in Anhang 5.3.3), um die vorherige Effizienz des Erzeugers festzustellen. Dies führt zu einer gerechten Herstellung einer Warmmietenneutralität. Werden theoretische Effizienzen der Wärmeerzeugung angenommen, können für jeweils einen der Vertragspartner Ungerechtigkeiten zu verzeichnen sein.

Eine transparente und den Realitäten entsprechende Kostenneutralität kann sicher nur durch Messung des realen Jahresnutzungsgrads des alten Heizkessels mit Gas- (Brennstoff-) und Wärmemengenzählern erfolgen. Bei der Verwendung von Pauschalwerten für den Jahresnutzungsgrad einer Altanlage sind Streitfälle bei der Umstellung auf Wärmelieferung vorprogrammiert, weil eine Kostenneutralität nicht gewährleistet werden kann. Dabei ist es unerheblich, ob die pauschalen Nutzungsgrade aus der neuen EBZ-Studie [146], aus den offiziellen BBSR-Veröffentlichungen oder einer anderen Quelle stammen.

Für eine seriöse Betrachtung und als Grundlage für einen Wärmeliefervertrag ist nicht der Mittelwert einer großen Stichprobe von Bedeutung, sondern der konkrete Einzelfall [145].

Wenn im Vorfeld einer Umstellung auf Wärmelieferung / Contracting kein Wärmemengenzähler nach dem alten Heizkessel vorhanden war, lässt sich das oben aufgezeigte Dilemma nur so auflösen, dass der Wärmepreis erst dann (kostenneutral) festgelegt wird, wenn nach dem sowieso erforderlichen Einbau eines Wärmemengenzählers beim Übergang zu Wärmelieferung durch eine Energieanalyse aus dem Verbrauch der Jahresnutzungsgrad des weiter betriebenen (Betriebsoptimierung) oder eines neuen Heizkessels vorhanden ist und damit messbare Werte für die tatsächliche Nutzwärme und die tatsächlichen Kesselverluste vorliegen. Das Risiko des Nachweises der Kostenneutralität liegt dann korrekt bei den Vertragsparteien Vermieter und Wärmelieferant. Der Wärmepreis kann dann erst ca. ein Jahr nach Übergang auf Wärmelieferung genau kalkuliert werden. Da Kostenneutralität aber die Mindestanforderung ist (im BGB heißt es „nicht übersteigen"), ist es der juristischen Klärung vorbehalten, ob eine nachträgliche „Punktlandung" dem Gesetz entspricht.

Besser ist es, wenn bereits in der Altanlage ein Wärmemengenzähler mindestens über eine Sommer- und eine Heizperiode installiert wird, um die Chancen und die Einsparpotenziale eines Übergangs zu Wärmelieferung für alle Seiten transparent und frühzeitig sichtbar zu machen.

1.4.11 Ergebnisübertragung auf Neubau und Nichtwohnbau

Das Energieeffizienzpotenzial von Gebäuden im Nichtwohnbau und im Neubau ist trotz umfassender Regelwerke noch nicht ausgeschöpft. Viele der für den Wohnungsbaubestand erarbeiteten Ergebnisse zur Gebäude- und Anlagentechnik lassen sich zumindest qualitativ übertragen.

Übertragung der Ergebnisse auf den Neubau

In einer umfangreichen Studie haben IWU/BET 2019 [57] Vorschläge für zukunftsfähige Neubauten als Bausteine für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand bis 2050 erarbeitet. In diesem Gutachten wird zum Vergleich für die Anforderungen an ein neues Gebäude der „Zweite Lösungsansatz" des IWU herangezogen.

Der Neubau ist ein „bestmöglicher" Neubau, der auf die Erstellung einer Energiebilanz völlig verzichtet. Es wird angenommen, dass sich ein vorbildlicher Neubau auch aufgrund seiner Einzelkomponenten begründen lässt – unter Umgehung aller mit Energiebilanzen zusammenhängenden Bewertungsprobleme und somit für viele Bauherren möglicherweise sogar besser verständlich. Dem Bauherrn wird im Neubau nahegelegt, sich an den aus technischer Sicht besten Lösungen zu orientieren - sowohl beim Wärmeschutz als auch bei der Wärmeversorgung. Die Gutachter stimmen diesem Ansatz – wie auch schon in früheren eigenen Veröffentlichungen gefordert - ausdrücklich zu [147] [148] [149].

Weiterhin werden in der Studie von IWU/BET [57] Randbedingungen für die Anlagentechnik formuliert, damit das Einzelgebäude mit dem Gesamtsystem interagieren kann und dadurch die maximal zur Verfügung stehenden Potenziale nicht überschritten werden. Diese können folgendermaßen zusammengefasst werden:

> *„Jedes zukunftsfähige Gebäude muss in der Lage sein, Sonnenenergie zu nutzen – bevorzugt in Form von Photovoltaikanlagen (PV) – da die effiziente Nutzung von regenerativer elektrischer Energie ein wichtiger Baustein auf dem Weg zur Klimaneutralität ist. Dazu ist auch ein deutlicher Ausbau bei der PV-Stromerzeugung erforderlich. Flächen von Neubauten sind aus diesem Grund weitgehend zur Ausschöpfung des Flächenpotenzials zu nutzen.*
>
> *Als Wärmeerzeuger in zukunftsfähigen Gebäuden sind Wärmepumpen besonders geeignet, aber auch mit anderen Systemen können die Klimaziele im Einzelgebäude erreicht werden. In der Fläche werden gegenwärtig keine Alternativen zur Wärmepumpe gesehen.*
>
> *Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung werden empfohlen, Gebäude mit Fensterlüftung können grundsätzlich aber auch gebaut werden; das führt in der Regel aber zu strengeren Anforderungen an den Wärmeschutz und die übrige Anlagentechnik."*

Übertragung der Ergebnisse auf den Nichtwohnbau

Auch für den Nichtwohnbau zeichnet sich ein verstärkter – sogar heute bereits politisch geforderter - Einsatz von Photovoltaik am Gebäude ab. So wird nach den Klimaschutzgesetzen der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Hamburg zukünftig eine Pflicht für die PV-Nutzung der Dächer von zunächst Nichtwohngebäuden ausgesprochen.

Das Thema Kühlung im Sommer aufgrund zunehmender Kühllasttage gewinnt besonders in Nichtwohngebäuden zunehmend an Bedeutung. Stand August 2020 wird im Entwurf des Hamburgischen Klimaschutzgesetzes eine Nachweispflicht für den Einbau von Klimaanlagen mit Kühlfunktion gefordert.

Die baulich sinnvolle Begrenzung von Fensterflächen in Büroneubauten ohne Gewährleistung eines ausreichenden sommerlichen Wärmeschutzes ohne Kühlerfordernis könnte damit wieder mehr in die Neubaupraxis Eingang finden.

Weitere Aspekte, die für den Wohnungsbau detailliert in diesem Gutachten untersucht wurden, werden in Anhang 3.11.1 qualitativ auf den Nichtwohnungsbau übertragen. Die Gutachter wählen für die Reihenfolge der Beschreibung die auch im Wohnungsbau etablierte Vorgehensweise: Gebäudehülle, Haupterzeuger, Peripherie, Zusatzerzeuger.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- die Erkenntnisse zu Dämmmaßnahmen und Fenstersanierung lassen sich gut übertragen auf Nichtwohnbauten mit ähnlichen Innentemperaturen wie der Wohnbau, in denen jedoch keine großen internen Lasten auftreten, z. B. Bildungsbauten, Beherbergungsstätten und Heime, Büros und büroähnliche Betriebe sowie Kultureinrichtungen und Krankenhäuser,
- insbesondere für Nichtwohnbauten mit gleichzeitigem Wärme- und Kältebedarf über weite Teile des Jahres sind Wärmepumpen/Kältemaschinen-Systeme mit Doppelnutzung anzustreben, dies sind z. B. Krankenhäuser, Hotels, Küchen, Verkaufseinrichtungen,
- für Nutzungen ohne nennenswerte Kühlung kommen Wärmepumpen bzw. übergangsweise wie im Wohnungsbau Kessel/Wärmepumpen-Hybridlösungen zum Einsatz, z. B. sind dies Bildungsbauten, Heime, Büros, Kultureinrichtungen, Sportstätten, Lager,
- für die Trinkwassererwärmung gelten die Aussagen aus dem Wohnungsbau analog: jegliche unnötigen Leitungsnetze sind zu vermeiden; lediglich einzelne Nutzungen mit großen Trinkwasserbedarfen in der Fläche werden zentralisiert ausgeführt: dies sind Netze in Krankenhäusern, Hotels, Heimen, Beherbergungseinrichtungen,
- klassische dezentrale Systeme, die über die gesamte Fläche verteilt sind, i. d. R. als Elektrokleinspeicher oder Elektrodurchlauferhitzer ausgeführt finden sich in Bildungsbauten, Büros, Kultureinrichtungen,
- die Photovoltaik lässt sich in alle Nichtwohnbaunutzungen integrieren, weil überall Strom benötigt wird,
- die Solarthermie kann ggf. gut eingebunden werden, wenn große Trinkwarmwassermengen benötigt werden, im besten Falle täglich und ohne Sommerpause: Sportstätten (außerhalb von Schulen), ggf. Krankenhäuser,
- aus Gründen der Lufthygiene (Schadstoffe, dichte Belegung mit Personen) oder weil ggf. ohnehin ein schnell reagierendes Heizsystem auf Basis von Luft erwogen wird, ist die Verbreitung von Lüftungsanlagen im Nichtwohnungsbau schon heute größer; die Verbreitung von Anlagen mit Wärmerückgewinnung wird noch weiter zunehmen, vor allem in Bildungsbauten, Sportstätten, Krankenhäusern.

1.5 Energetische Sanierung in der Makroperspektive

Die aus der Betrachtung der Einzelgebäude gewonnenen Erkenntnisse werden nachfolgend auf den Gesamtbestand übertragen. Dies erfordert Annahmen, in welcher Geschwindigkeit und mit welcher Tiefe sich die baulichen Sanierungsmaßnahmen sowie die Anlagentechniken künftig im Markt ausbreiten. Die im Rahmen dieses Gutachtens getroffenen Annahmen werden komprimiert in Kapitel 1.5.1 (detailliert in Anhang 4.2) erläutert und anhand der verfügbaren Literatur eingeordnet.

Anschließend wird in Kapitel 1.5.2 dargestellt, wie sich Endenergie, Primärenergie und Emissionen des gesamten Wohnbaubestandes – einschließlich des Neu- bzw. Zubaus – im Zeitverlauf ändern. Für den Gebäudebestand ergeben sich Modernisierungskosten, die den erzielten Einsparungen gegenübergestellt werden können. (Eine Detaildarstellung dieser beiden Aspekte Neubau - Bestand findet sich in den Anhängen 4.3 und 4.5).

Für die Makroperspektive wählen die Gutachter den auch in anderen Veröffentlichungen üblichen Blick bis in das Jahr 2050.

Die vorliegenden Überlegungen beschränken sich dabei auf EIN mögliches Zukunftsszenario. Da jegliche Prognose über den Zeitraum von 5 Jahren hinaus mit sehr großen Unsicherheiten verbunden ist, stellt dieses den nach Ansicht der Gutachter besten Pfad zum Erreichen der Klimaziele dar, wenn auch selbstverständlich ist, dass es alternative Wege gibt. Dies zeigt die Analyse vorhandener Studien aus der Literatur (detailliert in Anhang 4.1).

Die eigenen Überlegungen gehen strikt davon aus, dass alle energetischen Verbesserungen getätigt werden, wenn der betroffene Bestandteil der Gebäudehülle oder der Anlagentechnik ohnehin den individuellen Sanierungszyklus erreicht haben. Es wird angenommen, dass aus Kostengründen keine Sanierungen vorgezogen werden und sich daher keine größeren Sanierungsraten ergeben, als es dem Sanierungszyklus entspricht. Dieser wird – getreu den üblichen Gepflogenheiten der Gebäudebesitzer – vergleichsweise lang gewählt. Die Maßnahmen selbst werden im Falle der Umsetzung nach Ansicht der Gutachter dann „best practice" ausgeführt, um entsprechend keine wirtschaftlichen Chancen zu vertun.

Maßnahmen, die einen großen Eingriff in die Substanz bedeuten (bis hin zur zeitweisen Unbewohnbarkeit beim Einbau von Flächenheizungen), werden – ebenfalls getreu der üblichen Baupraxis – mit sehr geringen Umsetzungswahrscheinlichkeiten angenommen. Gegenteilige Maßnahmen (d. h. geringer Eingriff), zudem mit guter Wirtschaftlichkeitsprognose, werden dagegen mit sehr hohen Umsetzungswahrscheinlichkeiten angenommen (z. B. die Nachrüstung von Photovoltaik).

Durch die Orientierung der angenommenen energetischen Verbesserungen am Sanierungszyklus aller erforderlichen bzw. ohnehin vorhandenen Bestandteile des Gebäudes vermindern sich die Freiheitsgrade für die Zielerreichung. Letztlich sind es nur die zusätzlichen Erzeuger – namentlich Photovoltaik – deren Einbaugeschwindigkeit gänzlich variabel ist. Diese wird so gewählt, dass das Klimaziel möglichst erreicht werden kann.

Vorbehalte

Nicht eingeplante plötzliche Ereignisse führen teilweise zu „180°-Wenden" in politischen und wirtschaftlichen Entscheidungen. Somit sind unerwartete „Disruptionen" oder „Schwarze Schwäne" – wie die Finanzkrise 2008/2009, Fukushima 2011, die Flüchtlingskrise 2015, die Klimakrise mit merklich hohen Sommertemperaturen 2018/19 und seit Anfang 2020 die Corona-Krise nicht planbar.

Viele Studien zur zukünftigen Energiewende, die ausführlicher in Anhang 4.1 dieses Gutachtens bewertet werden, geben einen ersten und möglichen Rahmen. Setzen aber voraus, dass alle Maßnahmen planmäßig umgesetzt werden. Der Vergleich von Prognosen aus ähnlichen Studien vor ca. 15 [71] bis 25 Jahren [72] mit der tatsächlichen Entwicklung zeigt, dass nur in einem engen Zeitfenster von fünf bis max. zehn Jahren Voraussagen einigermaßen genau in die Praxis umgesetzt werden können.

1.5.1 Mögliche bauliche Sanierung und Technologieausbreitung bis 2050

Nachfolgendes Kapitel gibt einen Überblick der getroffenen Annahmen zur zeitlichen Ausbreitung von Maßnahmen der Gebäudesanierung und Technologieausbreitung verbesserter Anlagentechnik. Sie gelten für das „Hauptszenario" des Gutachtens (für zwei betrachtete Varianten notwendige Modifikationen werden separat erläutert). Darüber hinaus werden auch die veränderten Rahmendaten – die Bevölkerungsentwicklung sowie der zur Einhaltung des Emissionsbudgets notwendige Umbau des Energieträgermixes – beschrieben.

Die Prognose wird in zwei Zeitetappen unterteilt: die Periode (I) deckt den Zeitraum zwischen 2020 und 2035 ab, die Periode (II) den Zeitraum von 2035 bis 2050. Innerhalb dieser beiden 15-Jahreszeiträume wird vereinfachend keine weitere Unterscheidung von Randdaten vorgenommen.

Bevölkerung und Wohnflächen

Für die Entwicklung des Endenergiebedarfs der Haushalte sind einerseits die Bevölkerungsentwicklung, andererseits die Wohnflächenentwicklung maßgeblich – wobei letztere von ersterer abhängt und umgekehrt.

Eine treffsichere Bevölkerungsprognose bis 2050 ist kaum möglich, da z. B. Effekte der Zuwanderung aufgrund von Naturkatastrophen und Kriegen als Migrationsauslöser (siehe 2015) kaum vorhersehbar sind. Ebenfalls ist die Binnenmigration in die Städte (Urbanisierung) oder aus den Kernstädten ins Umland zahlreichen Einflüssen unterworfen, die sich nach der aktuellen Corona-Pandemie durchaus drastisch ändern können. Damit sind typische Wohnungsgrößen verbunden, die in Ballungszentren kleiner ausfallen als auf dem Land. Nicht zuletzt die angesprochene Corona-Krise zeigt, dass auch der nicht vorhersehbare Einfluss dieser Pandemie die Heimarbeit stark erhöht und damit die Entfernung zwischen Wohnort und Arbeitsort weniger relevant werden könnte. Übertragen auf langfristige Strömungen ist dies ein Faktor, der die Urbanisierung abflachen lassen könnte.

Das statistische Bundesamt prognostiziert in 30 verschiedenen Szenarien die Bevölkerungsentwicklung bis 2050 [101]. Die Gutachter wählen den Mittelwert; die konkreten Zahlen sind Tabelle 30 zu entnehmen.

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass in jedem Jahr die pro-Kopf-Wohnfläche um 0,3 m²/Person zunimmt. Dies deckt sich mit den Beobachtungen des statistischen Bundesamtes. Eine weitere Einordnung dieser beiden Prognosewerte – auch im Abgleich zu anderen Studien – ist in Anhang 4.2.1 zu finden.

Der Nettowohnflächenzuwachs ergibt sich rechnerisch aus der Bevölkerungsentwicklung sowie dem pro-Kopf-Flächenbedarf. Er spiegelt sich auch im Neubau- und Abrissgeschehen wieder. Die gewählte Abrissquote liegt bei 0,1 %/a für EZFH und 0,2 %/a für MFH. Da die in der DENA Leitstudie „Integrierte Energiewende“ [67] dargelegte Argumentationskette plausibel ist, werden die Werte in dieses Gutachten übernommen. Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse.

Gebäudeart	Einzelgröße		2020	2035	2050
EZFH	Personen	[Mio. P]	43,445	44,020	42,639
	pro-Kopf-WF	[m²/P]	51,6	56,1	60,6
	Gesamtfläche	[Mio. m²]	2.242,3	2.470,1	2.584,5
	Abriss	[Mio. m²]	↳ -33,6 ⮥	↳ -45,3 ⮥	
	Neubau	[Mio. m²]	+261,4	+209,7	
MFH	Personen	[Mio. P]	38,372	38,880	37,661
	pro-Kopf-WF	[m²/P]	38,6	43,1	47,6
	Gesamtfläche	[Mio. m²]	1.511,4	1.675,7	1.792,6
	Abriss	[Mio. m²]	↳ -37,1 ⮥	↳ -50,3 ⮥	
	Neubau	[Mio. m²]	+151,5	+167,2	

Tabelle 30 Prognose der Personenzahlen und Wohnflächen im Zeitverlauf [eigene Darstellung]

Die sich ergebenden absoluten Wohnflächenzuwächse – grafisch siehe Anhang 4.2.1 – sind Basis aller weiteren Überlegungen. Mit den Neubauflächen lassen sich problemlos neue Technologien und Standards in den Gesamtbestand einbringen, mit den Abrissen nicht zukunftsfähige Eigenschaften von Gebäuden aus dem Markt ausräumen.

Sanierung des Baukörpers

Die Qualität der Außenhülle wird – analog der Betrachtungen in der Mikroebene – in vier Klassen geteilt, deren konkrete Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) in Anhang 3.2 nachzulesen sind. Die derzeit im Markt befindlichen Gebäude weisen eine definierte Verteilung dieser Standards auf.

Bauteil	Standard	Anteil der Ausbreitung in EZFH, in [-]			Anteil der Ausbreitung in MFH, in [-]		
		2020	2035	2050	2020	2035	2050
Außenwand	best	0,00	0,22	0,51	0,00	0,23	0,55
	gut	0,39	0,54	0,40	0,40	0,56	0,40
	mittel	0,15	0,06	0,02	0,15	0,05	0,01
	schlecht	0,47	0,18	0,07	0,45	0,16	0,04
oberer Gebäudeabschluss	best	0,00	0,25	0,51	0,00	0,25	0,53
	gut	0,59	0,66	0,46	0,58	0,65	0,44
	mittel	0,13	0,03	0,01	0,14	0,03	0,01
	schlecht	0,28	0,06	0,02	0,28	0,06	0,02
unterer Gebäudeabschluss	best	0,00	0,14	0,26	0,00	0,16	0,32
	gut	0,31	0,45	0,49	0,29	0,45	0,48
	mittel	0,17	0,10	0,06	0,18	0,10	0,05
	schlecht	0,53	0,31	0,19	0,52	0,29	0,15
Fenster	best	0,00	0,33	0,78	0,00	0,34	0,81
	gut	0,10	0,26	0,22	0,10	0,26	0,19
	mittel	0,40	0,36	0,00	0,46	0,40	0,00
	schlecht	0,50	0,06	0,00	0,44	0,00	0,00

Tabelle 31 Prognose des anteiligen Sanierungszustandes der Gebäudehülle [eigene Darstellung]

Die künftige Verteilung auf die vier Klassen wird beeinflusst durch die Frage, welche Qualität mit dem Abriss aus dem Markt entnommen wird und welche Qualität mit den Neubauten hinzukommt. Außerdem erfolgt eine Sanierung (in unterschiedlichen angenommenen Zyklen von 35 Jahren bei Fenstern bis zu 75 Jahren bei Bodenplatten), welche die Qualität verbessert. Für jedes Bauteil werden die jeweils getroffenen Annahmen in Anhang 4.2.2 separat erläutert und auch grafisch dargestellt.

Tabelle 31 fasst die anteiligen Sanierungszustände der Hüllbauteile zusammen. Dabei sind die Werte für oberste Geschossdecken und Dächer nach Häufigkeit des Auftretens gewichtet. Gleiches gilt für die Bodenplatten und Kellerdecken. Die schnellere Verbesserung ergibt sich bei den kürzerlebigen Komponenten (Fenster, Außenwand, Dach) sowie bei Bauteilen ohne oder mit geringen Restriktionen (oberer Gebäudeabschluss, Fenster).

Das in diesem Gutachten angenommene Modell geht im Regelfall nicht davon aus, dass Maßnahmen vorzeitig umgesetzt (vorgezogen) werden; im Gegensatz zu etlichen anderen Studien und Gutachten. Dennoch ist die Marktdurchdringung mit „guten“ und „besten“ Standards nach dem obigen Modell nur erreichbar, wenn entsprechend „best practice“ Sanierungen deutlich zahlreicher stattfinden. Die Erreichung der gewählten Standards wäre zu fordern (GEG usw.) und/oder zu fördern (BEG).

Die Annahmen zum Gebäudezustand 2050 sind etwas ambitionierter als die Werte der IWU-Studie zum Zielerreichungsszenario aus dem Jahr 2013 [62]. Dabei werden von Diefenbach et al. sehr ähnliche Zielstandards definiert, jedoch geringere Sanierungsraten angenommen. Die gewählten Annahmen passen dagegen gut zu dem mittleren Pfad („Effizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“) aus der Studie von Pehnt et al. von 2015 [34]. Dies betrifft die angenommene Sanierungsgeschwindigkeit als auch die erreichten Standards. Auch die Annahmen von Jochum et al. in der Studie „Dämmpotential“ fallen ähnlich aus [127].

Eine zeitliche Ungleichgewichtung von baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen, wie z. B. in der Studie des IEK Jülich [150] vorgeschlagen, verfolgen die Gutachter nicht. Die von Robinius et al. beschriebene Idee: zuerst verstärkt bauliche Maßnahmen (solange die Energiewirtschaft noch umgebaut wird) und danach verstärkt anlagentechnische (insbesondere der Einbau von Wärmepumpen) ist grundsätzlich nachvollziehbar. Jedoch halten die Autoren des vorliegenden Gutachtens es für schlüssiger, den Sanierungszyklus der Bauteile zugrunde zu legen. Eine gezielte Ungleichgewichtung bedeutet letztlich immer, dass es vorgezogene Sanierungen gibt, die zwangsläufig insgesamt teurer sind.

Technologieausbreitung: Haupterzeuger

Die derzeit im Markt befindlichen Gebäude weisen eine definierte Verteilung von Erzeugern auf; vgl. die Beschreibung der Typgebäude in Kapitel 1.3.2. Im Rahmen dieses Gutachtens werden die möglichen Erzeugerkonstellationen zu insgesamt 9 Gruppen zusammengefasst. Die künftige Verteilung wird beeinflusst durch die Frage, welche Erzeuger mit dem Abriss von Gebäuden aus dem Markt entnommen werden und welche Erzeuger mit den Neubauten hinzukommen. Außerdem erfolgt eine Sanierung (hier regulär alle 25 Jahre, bei Fernwärme und Stromdirektheizung alle 40 Jahre), ggf. mit Systemwechsel. Die im Detail getroffenen Annahmen beschreibt Anhang 4.2.3.

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 28 (tabellarisch weiter unten in Tabelle 32). Der absolute Wohnflächenzuwachs wird dabei berücksichtigt. Dargestellt sind die Wohnflächen, die mit der genannten Technologie ausgestattet sind.

Es wird davon ausgegangen, dass die Ölkessel (Brennwert und Niedertemperatur) schnell aus dem Markt gedrängt werden, weil nicht mehr nachinvestiert wird (außer als Hybridsystem, was nicht separat dargestellt wird). Auch die Erdgas-Niedertemperatur-Kessel sind schneller ersetzt, weil sie durch die effizientere Brennwerttechnik ersetzt werden.

Der größte Zuwachs wird für Wärmepumpen angenommen – in beiden Zeitperioden. Die maximale Einzeldurchdringung weisen die Gasbrennwertkessel 2035 auf, vor allem, weil zunächst noch sehr viele NT-Kessel in der Sanierung mit Brennwertkesseln ersetzt werden, bis der Wärmepumpenhochlauf sein Maximum erreicht hat. Alle Hybridsysteme sind in der obigen Darstellung als „Wärmepumpensysteme“ geführt, da diese den ausschlaggebenden Deckungsanteil im Einzelgebäude aufweisen.

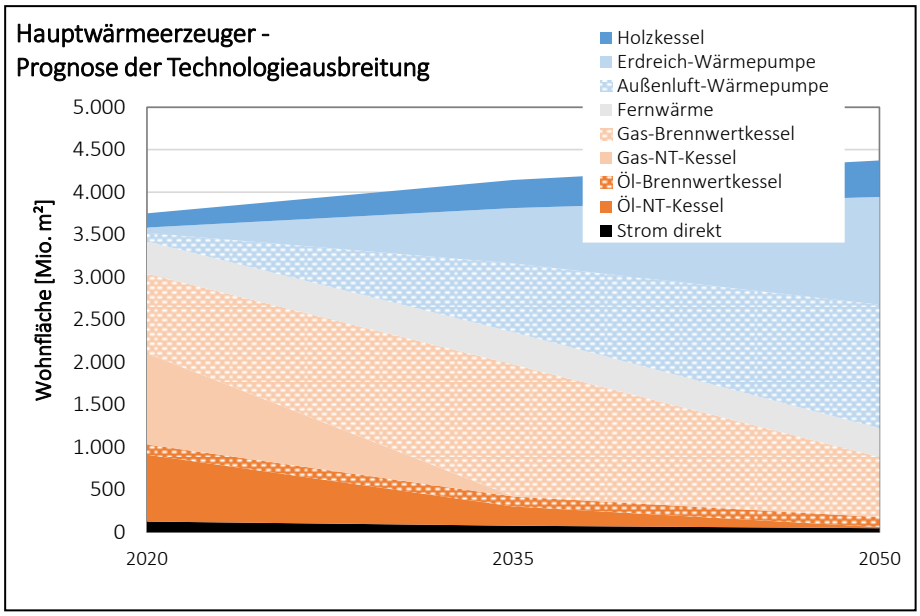


Abbildung 28 Prognose – Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung]

Eine detaillierte Einordnung der eigenen Annahmen im Vergleich zu anderen Studien liefert Anhang 4.2.3. Im Quervergleich der verfügbaren Literatur mit unzähligen Prognoseszenarien liegen die Annahmen im Mittelfeld der Studien, die einen „Elektropfad" (hoher Wärmepumpenzuwachs) anvisieren.

Peripherie und Zusatzerzeuger

Tabelle 32 fasst die Anteile der Technologieausbreitung zusammen. Die grafische Aufbereitung der Ergebnisse sowie die detaillierten Annahmen sind in Anhang 4.2.4 und 4.2.5 zu finden.

System		Anteil der Ausbreitung in EZFH, in [-]			Anteil der Ausbreitung in MFH, in [-]		
		2020	2035	2050	2020	2035	2050
Haupterzeuger							
Stromdirektheizung		0,033	0,018	0,011	0,034	0,018	0,010
Heizölkessel	NT	0,249	0,066	0,004	0,151	0,038	0,002
	Brennwert	0,039	0,035	0,033	0,023	0,020	0,018
Erdgaskessel	NT	0,275	0,000	0,000	0,301	0,000	0,000
	Brennwert	0,241	0,363	0,161	0,261	0,391	0,162
Fernwärme		0,040	0,022	0,013	0,192	0,195	0,170
Wärmepumpe	Außenluft	0,038	0,256	0,424	0,011	0,104	0,201
	Erdreich	0,023	0,132	0,221	0,007	0,195	0,389
Holzkessel		0,061	0,107	0,132	0,021	0,039	0,049
Zusatzerzeuger							
Photovoltaik		0,14	0,40	0,65	0,06	0,36	0,65
Solarthermie		0,20	0,19	0,13	0,09	0,06	0,02
Lüftung mit Wärmerückgewinnung		0,03	0,11	0,17	0,01	0,10	0,18
Peripherie							
Trinkwasser-erwärmung	dezentral elektrisch	0,12	0,16	0,19	0,18	0,29	0,41
	zentral	0,88	0,84	0,81	0,82	0,71	0,59
	mit Zirkulation	0,50	0,30	0,15	0,80	0,63	0,43
	ohne Zirkulation	0,50	0,70	0,85	0,20	0,37	0,57
Heizung	Fußbodenheizung	0,20	0,26	0,30	0,10	0,15	0,19
	Heizkörper	0,80	0,74	0,70	0,90	0,85	0,81
Heizung	Keller	0,70	0,59	0,52	0,90	0,79	0,72
	beheizter Bereich	0,30	0,41	0,48	0,10	0,21	0,28

Tabelle 32 Prognose der anteiligen Technologieausbreitung der Haupt- und Zusatzerzeuger sowie Peripherie [eigene Darstellung]

Für die Lüftungsanlagen kommt die eigene Schätzung durchaus auf die Werte anderer Studien, z. B. des Zielerreichungsszenario von IWU 2013 [62] – dort wird von 20 % ausgegangen. Die Durchdringung des Marktes mit Lüftungsanlagen vermuten Mellwig et al. [128] im Jahr 2050 je nach Szenario bei ca. 14 bis ca. 37 %. Die ebenfalls unter IFEU-Beteiligung bearbeitete Studie von Pehnt et al. [124] geht in allen Szenarien von 50 bis 75 % aus. Die letztgenannten Werte setzen eine deutlich höhere Umsetzungsrate voraus als die Praxis der letzten Jahrzehnte dies zeigte. Die Gutachter halten höhere Werte als maximal 30 % für unrealistisch.

Eine detaillierte Einordnung der eigenen Annahmen im Vergleich zu anderen Studien liefert Anhang 4.2.5. Im Quervergleich der verfügbaren Makrostudien zeigt sich, dass bei den Annahmen zur Verbreitung von Photovoltaik und Solarthermie Unterschiede bestehen. Die Mehrzahl der Studien geht von einer größeren Verbreitung der Solarthermie aus, behandelt häufig das Thema „Photovoltaik“ nicht separat.

Diefenbach et al. sehen bereits 2013 in ihrem Kurzgutachten zum Sanierungsfahrplan in der PV eine Alternative für Solarthermie. Sie empfehlen für 2020 und Folgejahre die jährliche Installation von Solarthermie in 2,0 bis 2,5 % der Gebäude und merken an, dass auch Photovoltaik ersatzweise in Betracht kommen kann [151]. Die Autoren des vorliegenden Gutachtens sehen die Haupt- und Ersatzlösung aus heutiger Sicht in ihrer Bedeutung vertauscht und gehen selbst von einer jährlichen Zuwachsrate von 1,8 %/a der Photovoltaik aus, während die Nutzung von Solarthermie ein sinkender Markt ist.

Allerdings kann sich Solarthermie in klassischen Fernwärmesystemen ggf. übergangsweise als Großflächensolarthermie etablieren, um fossile Energieträger zu ersetzen. Außerdem sehen die Gutachter die Solarthermienutzung auch als evtl. ergänzende Wärmequelle für Wärmepumpen, wie in Anhang 3.5.2 detailliert beschrieben (Fassadenkollektor, Einspeisung in „kalte Nahwärme“).

Mit Detailfragen der Peripherie beschäftigen sich nur wenige Makrostudien. Den von Jochum et al. [119] genannten Anteil von 80 % aller Gebäude mit einem Temperaturniveau „35/28°C“ im Jahr 2050 halten die Autoren für unrealistisch. Dies wäre erzielbar, wenn in 80 % aller Wohnungen entweder eine Flächenheizung nachträglich verlegt wird, was ein sehr großer baulicher Aufwand ist (fast rohbauähnliche Verhältnisse) oder das betreffende Gebäude auf Passivhausniveau gedämmt wird (incl. Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG), so dass extrem geringen Temperaturen für die Heizkörper ausreichen.

Der Umbau der Übergabesysteme im Bereich Heizung sowie die Veränderung der Lage von Rohrnetzen (aus dem Keller in den beheizten Bereich) ist – baupraktisch gesehen – komplex, so dass der Systemumbau eher aus dem Neubau heraus erfolgt. Die Verbesserung energetisch günstigerer Systeme bzw. Verteilsysteme für die Trinkwassererwärmung wird nach Ansicht der Gutachter schneller möglich sein – vor allem der Zirkulationsverzicht im EZFH oder ein Wechsel auf 2-Leiter-Systeme im MFH sind einfach umzusetzende Optionen.

Ein verstärkter Ausbau dezentraler elektrischer Systeme mit Kleinspeichern in jeder Wohnung bzw. jedem EZFH hängt von politischen Entscheidungen zum EEG bzw. zu Netznutzungsentgelten ab. Die Anteile nach Abbildung 168 (S. 386) könnten sich dann wesentlich verschieben. Auch Seefeld sieht in der Prognos-Studie von 2011 eine mittelfristige Verschiebung hin zu dezentraler Trinkwassererwärmung auf Basis von Strom [152].

1.5.2 Mögliche Kostenentwicklung, Emissionsfaktoren und Energiepreise

Zur Überführung der Energiebilanz in eine Emissions- und Kostenbilanz sind weitere Festlegungen zur Kostenentwicklung sowie zur Entwicklung der Emissionsfaktoren notwendig. Eine Kurzfassung folgt, die ausführliche Darstellung ist den Anhängen 4.2.6 bis 4.2.8 zu entnehmen.

Energiepreise

Die Preisentwicklungen lehnen sich an die Vorschläge zur zukünftigen CO_2-Bepreisung (siehe Kapitel 1.2.3) an. Dabei wird für das Jahr 2035 ein zusätzlicher Emissionspreis von 180 €/Tonne und für das Jahr 2050 von maximal 640 €/Tonne gemäß den Vorschlägen des UBA [21] zugrunde gelegt und unter Anpassungen der Gutachter in den zukünftigen Energiepreisen in Tabelle 33 berücksichtigt. Vorschläge finden sich in einer Kurzstudie der DENA [153] und in Gäthke [154] sowie in einer Veröffentlichung der Verbraucherzentrale Bundesverband zur Netzentgeltreform [155].

System	Energiepreis, brennwertbezogen, in [€/kWh]		
	2020	2035	2050
Erdgas	0,06	0,10	0,18
Heizöl	0,06	0,12	0,24
Holz	0,05	0,06	0,07
Fernwärme	0,09	0,15	0,20
Strom (Bezug, Normaltarif)	0,31	0,18	0,24
Strom (Bezug, Wärmepumpe)	0,22	0,18	0,18
Strom (Einspeisung)	0,09	0,07	0,05

Tabelle 33 Prognose der brennwertbezogenen Energiepreise [eigene Darstellung]

Bekräftigt werden diese Abschätzungen zusammen mit den Prognosen dieses Gutachtens auch durch die Vorschläge von Gerhardt in der AGORA-Studie zur Wärmewende 2030 [156] sowie auch von Sterchele et al. in der Fraunhofer ISE-Studie [68]. Hingegen vertritt die DENA eine technologieoffene Prognose [157] [67] mit einem Technologiemix bei überwiegendem Bezug synthetisch erzeugter Brennstoffe durch Import. In diesem Fall ergeben sich deutlich andere Energiepreise.

Die größten Unsicherheiten – in den vorliegenden Studien ebenso wie im Gutachten – bestehen in der Abschätzung der Energiepreisentwicklung für Fernwärme und Strom. Ausschlaggebend für die zukünftige Entwicklung der Preise für elektrische Energie sind die politischen Entscheidungen im Winter 2020/21 zum zukünftigen EEG sowie zum Umbau der bzw. zu den geplanten Subventionen auch für die regional sehr unterschiedlichen Netznutzungsentgelte im Stromsektor [158].

Emissions- und Primärenergiefaktoren

Die Abschätzung der Emissions- und Primärenergie-Faktoren orientiert sich an den aktuellen Daten des UBA [14], an der Kurzstudie von Fritsche für die HEA [159] sowie an den Makro-Prognosen des DIW von 07/2020 [42]. Weiterhin werden eigene Vorschläge der Ostfalia von Schünemann et al. aus dem Jahre 2014 aufgegriffen [160], um den Umstieg vom Primärenergiebezug auf eine CO_2-Bewertung zu begründen.

Die größten Unsicherheiten bestehen auch hier in der Abschätzung der Ausbaugeschwindigkeit erneuerbaren Stroms. Eine weitgehende Umstellung auf erneuerbare Stromerzeugung aus PV und Windkraft sowie ein beschleunigter Ausbau von Elektrowärmepumpen anstelle konventioneller Verbrennungstechniken wird in dem hier vorliegenden Gutachten vorausgesetzt.

Energieträger		Emissionsfaktor, brennwertbezogen, in [g/kWh]			Primärenergiefaktoren, nicht erneuerbarer Anteil		
		2020	2035	2050	2020	2035	2050
Fossile Brennstoffe	Erdgas	208	190	110	1,1	1,00	0,60
	Heizöl	292	275	160	1,1	1,05	0,75
	Steinkohle	429	429	429	1,1	1,1	1,1
	Braunkohle	421	421	421	1,2	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Holz	15	15	15	0,2	0,10	0,00
Strom	allgemeiner Strommix	444	250	50	1,8	1,00	0,20
Fernwärme	allgemeiner Fernwärmemix	243	150	60	0,8	0,50	0,20
Umweltwärme, Solarthermie, Photovoltaik		0	0	0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 34 Prognose der Emissions- und Primärenergiefaktoren [eigene Darstellung]

Aktuell wird diese Sichtweise auch durch Lüking und Karg in Sonnenenergie „Wärme ohne Feuer“ nachvollziehbar dargestellt [161]. Dies entspricht der gleichen nachvollziehbaren Argumentation wie von Kuck [132] (siehe auch Anhang 3.3.6). Auch Schulze-Darup fordert einen bevorzugten Elektropfad [90]. Demgegenüber setzt die DENA-Gebäudestudie auf technologieoffenen Lösungen mit erhöhtem Import synthetisch erzeugter Brennstoffe PtX [67].

Investitionskostenentwicklung und Lernkurven

Aus der zeitlichen und anteiligen Technologieausbreitung bzw. Umsetzung baulicher Sanierungen kann ein Mengengerüst für den Gesamtbestand ermittelt werden. Es ist die Basis der Investitionskostenschätzung. Daneben sind Festlegungen zur Preisentwicklung der Bauprodukte sowie der Finanzierung zu treffen. Beide Größen sind kaum prognostizierbar, zumal von Zeithorizonten bis 2050 ausgegangen wird.

Für die Betrachtungen in der Makroebene gelten die in Anhang 5.8.2 festgesetzten Kostenfunktionen. Sie werden identisch angenommen wie bei der Mikrobetrachtung. Es wurde von allgemeinen Kostensteigerungen für Bauprodukte ausgegangen, wie in Anhang 5.8.1 für „Baupreisindex“ und „Baukostenindex“ angezeigt. Allerdings wird im Rahmen dieses Gutachtens darauf verzichtet, diese explizit einzurechnen – dies gilt für alle Steigerungsraten (Kapital, Energie, Wartung). Es wird davon ausgegangen, dass die Steigerung näherungsweise mit der Inflation gleichläuft und entsprechend im Zuge einer Inflationsbereinigung entfällt. Analoge Überlegungen gelten für die Wartungs- und Instandhaltungskosten. Die in Anhang 5.8.3 getroffenen Ansätze gelten gleichermaßen auch für die Makrountersuchung.

Die Gutachter verzichten für alle Technologien und Maßnahmen auf einen Degressionsansatz der Kosten (Lernkurve) – zum einen, weil eine Schätzung insbesondere für die Periode 2035 bis 2050 aus heutiger Sicht extrem unsicher ist, zum anderen aufgrund des allgemeinen marktwirtschaftlichen Gedankens, dass mit steigender Nachfrage die Preise steigen. Eine weitere Auseinandersetzung mit der Fragestellung liefert Anhang 4.2.6.

Zeigt die künftige Marktbeobachtung, dass insbesondere Wärmepumpen und Photovoltaik langfristig tatsächlich nennenswert günstiger werden – was nachfragebedingt nicht unbedingt eintreten wird – kann dies ausgeglichen bzw. nachgesteuert werden durch zuerst die Minderung oder den Verzicht auf Fördermittel, danach durch die verpflichtende Vorgabe, diese Technologien einzusetzen (GEG o. ä.).

Auch in der Makroperspektive wird der für die Mikroperspektive gewählte Zins von 2 %/a (Erläuterungen siehe Anhang 5.9.2) verwendet.

Weitere Überlegungen zu Kapazitäten im Baugewerbe sowie Beschäftigungseffekten finden sich in Anhang 4.2.6

1.5.3 Mögliche Entwicklung der Energie- und Emissionsbilanz aller Wohnbauten bis 2050

Anhand der Annahmen zur Entwicklung der Gebäude durch Sanierung und Technologiewechsel sowie Neubau und Abriss wurde eine Energiebilanzprognose – hier „Hauptszenario“ genannt – vorgenommen. Dabei wird zunächst die Gesamtbestandsentwicklung einschließlich aller Neubauten betrachtet, nicht nur die Sanierungsobjekte, um eine Aussage zum Erreichen der Klimaziele geben zu können.

Aus der Endenergie – als wichtigster Eingangsgröße – ergeben sich die Primärenergie und die Emissionen. Diese werden nachfolgend vorgestellt und erläutert. Dabei sind die drei Zeitpunkte: 2020, 2035 und 2050 die Eckwerte der Betrachtung.

Endenergie

Der Endenergieaufwand sinkt in diesem Szenario von 757 TWh/a im Jahr 2020 auf 322 TWh/a im Jahr 2050. Dabei bleibt der Haushaltsstrom nahezu konstant. Die erzielte Verringerung ergibt sich aus einer Verringerung des Bedarfs an Heizwärme (Dämmung, Fenstertausch) sowie der Verwendung effizienterer Erzeuger (größtenteils Wärmepumpen).

Werden die Endenergien nach Erzeugern aufgeschlüsselt, ergibt sich die Darstellung nach Abbildung 29.

Der Einsatz von Niedertemperaturkesseln mindert sich stark. Bis auf Restbestände von Heizölkesseln, sind diese Erzeuger bereits größtenteils 2035 aus dem Markt verschwunden. Die Brennwertkessel sind dagegen noch im Markt verfügbar. Ihr Endenergieeinsatz ist zunächst konstant, sinkt erst nach 2035 auf ein Drittel des heutigen Wertes. Der Energieeinsatz in Holzkessel steigt zwischen heute und 2050 in diesem Szenario um ca. 25 % an. Das Biomassebudget ist damit noch gut erfüllt.

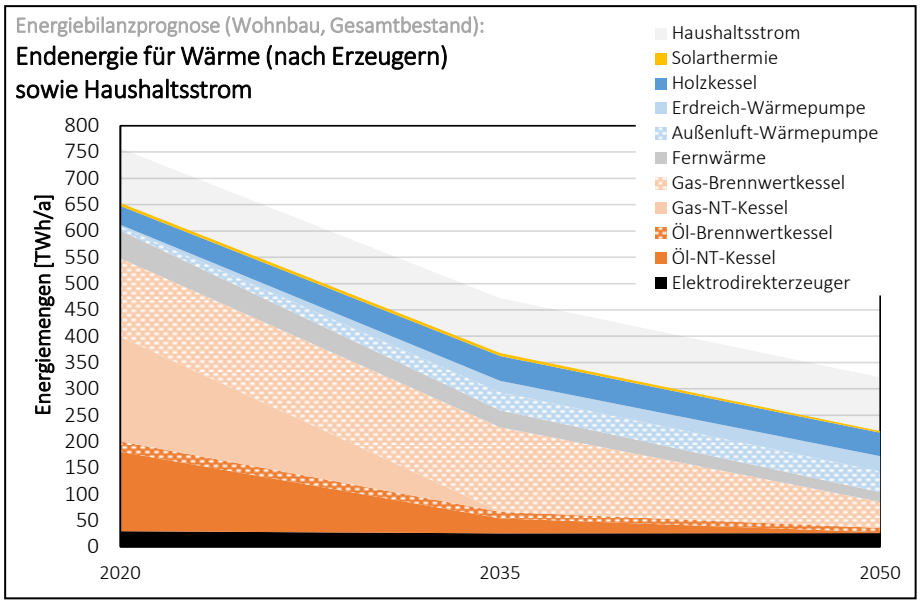


Abbildung 29 Prognose Gesamtbestand – Endenergie nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung]

Der klassische Fernwärmeeinsatz sinkt auf etwa ein Drittel des heutigen Wertes. Einerseits, weil „kalte Fernwärme“ zum Einsatz kommt (dann wird das Gebäude unter „Erdreichwärmepumpe“ geführt), andererseits, weil die zu versorgenden Gebäude baulich verbessert werden und somit ihr Bedarf sinkt.

Die Elektrodirekterzeugung ist fast konstant. Es wird zwar Elektroheizung zurückgebaut, jedoch im gleichen Zuge die direkt elektrische Warmwassererzeugung ausgebaut (in den Gebäuden mit ungünstigen Verteilnetzen). Der Einsatz der Solarthermie ist separat erkennbar (er ist allerdings gering).

Den größten Zuwachs erfahren Wärmepumpen (Faktor 5 bis 8 des heutigen Endenergieeinsatzes). Einerseits als gebäudezentrale Geräte mit lokaler Erdwärme und Außenluftnutzung, andererseits – wie geschildert – als Teil eines Systems aus „kalter Fernwärme“.

Die obige Grafik zeigten noch nicht, welche elektrischen Energiemengen durch PV-Anlagen gebäudenah erzeugt und verbraucht werden und demzufolge nicht eingekauft werden. Mit dieser Betrachtung wird der Blick auf die Endenergie abgeschlossen. Die Nutzung von Solarthermie und Photovoltaikstrom vermindert den notwendigen Bezug von Energieträgern entsprechend, siehe Abbildung 30. (Informativ ist auch der überschüssige Photovoltaikstrom gestrichelt eingezeichnet, um die Größenordnung zu verdeutlichen).

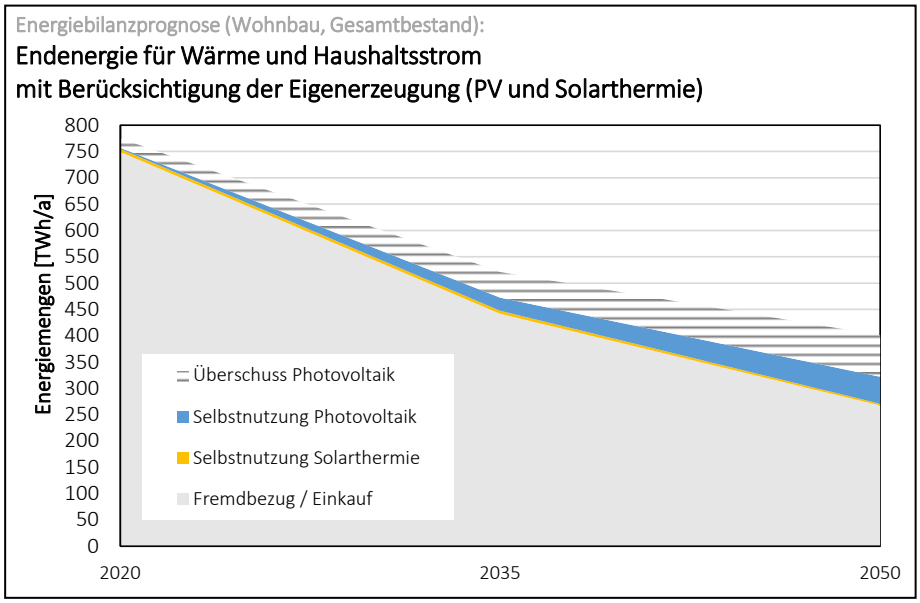


Abbildung 30 Prognose Gesamtbestand – Endenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

Die insgesamt gebäudenah erzeugte Energiemenge aus Photovoltaik steigt zwischen 2020 und 2050 von 20 auf 130 TWh/a in diesem Szenario an (Faktor 6,5). Allerdings kann – solange die lokale Stromspeicherung über Batterien nicht abschließend technisch und ökologisch ausgereift ist – dieser Strom vor Ort nur anteilig verbraucht werden. Mit steigender Durchdringung der Wärmepumpentechnologie steigt die Selbstnutzung von 10 % (heute) auf knapp 40 % (2050).

Über den Gesamtzeitraum betrachtet, kann von den insgesamt erzeugten 2235 TWh PV-Strom dann immerhin ein prognostizierter Anteil von 774 TWh (ca. ⅓) gebäudenah genutzt werden, die restliche Menge von 1461 TWh (ca. ⅔) wird ins Netz zurückgespeist. Im Sinne des vorliegenden Gutachtens wird diese Energiemenge dem Gebäudesektor nicht gutgeschrieben. Sie verbessert den „Strommix" der Energiewirtschaft.

Es ergeben sich zahlenmäßig folgende Verhältnisse: heute wird der Gesamtbedarf von 757 TWh/a anteilig zu 99 % aus Energieeinkäufen gedeckt (749 TWh/a). Im Jahr 2035 ergibt sich aus der getroffenen Prognose bereits eine Eigenversorgung zu 6 % (442 TWh/a werden fremdbezogen bei einem Gesamtbedarf von 472 TWh/a). Am Ende des Prognosezeitraumes 2050 wird von einem Gesamtbedarf von 322 TWh/a bereits eine Selbstversorgung von 17 % erreicht, d. h. nur noch 267 TWh/a aus dem Netz bezogen.

Weitere Auswertungen, z. B. die Aufteilung der Endenergie nach den Anwendungsbereichen (Heizung, Trinkwassererwärmung, Haushaltsstrom) sowie eine Zusammenfassung nach Energieträgern sind in Anhang 4.3.1 zu finden.

Die eigene Prognose liegt im Feld der Szenarien anderer Makrostudien (vgl. Anhang 4.1.1). Dies ist durch die gesetzlichen Einsparverpflichtungen (Endenergie) sowie Ausbauziele der regenerativen Energien begründet, die allen Studienautoren als Grundlage und Eingangsparameter dienen. Das eigene Szenario ähnelt – bezogen auf die Bandbreite aller verfügbaren Szenarien – in der Zusammensetzung der Energieträger eher einem der „Elektropfade" als einem „Technologiemixpfad".

Energiekosten

Anhang 4.3.2 stellt detailliert, auch mit grafischer Aufbereitung die Energiekosten aller Wohngebäude dar (nach Erzeugern, nach Energieträgern). In der Zusammenfassung ist Folgendes festzustellen:

Im Jahr 2020 ergäben sich Kosten von 81,2 Mrd. €/a für den Fremdbezug von Energie für Wärme und Haushaltsstrom. Gleichzeitig können aus der Selbstnutzung von PV-Strom Kosten vermieden werden sowie aus der vergüteten Rückspeisung von PV-Überschüssen Erträge erzielt werden (in Summe 2,9 Mrd. €/a). Damit liegen die resultierenden Nettoenergiekosten im Jahr 2020 bei 79,0 Mrd. €/a. Dies deckt sich gut mit den realen Werten (2018: ca. 75 Mrd. €, siehe Anhang 3.9.5)

Die Energiekosten vermindern sich im Zeitverlauf. Für das Jahr 2035 ergibt die Prognose eine Minderung der Bruttokosten von 62,1 Mrd. €/a, die sich ohne Photovoltaik einstellen würden – auf netto 54,2 Mrd. €/a. Im Jahr 2050 können mit insgesamt 16,2 Mrd. €/a an Einnahmen bzw. vermiedenen Ausgaben die Nettoenergiekosten auf 44,8 Mrd. €/a minimiert werden.

Primärenergie und Emissionen

Abbildung 31 zeigt die Prognosen des Gutachtens zum Primärenergieeinsatz. Einerseits sinken die Endenergiemengen (siehe Anhang 4.3.1), andererseits ändert sich die Herkunft der Energieträger und damit verbessert sich für alle Energieträger der zugehörige Primärenergiefaktor (siehe Anhang 4.2.8). Dies betrifft auch die heute noch fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl, die künftig als Mischprodukte von natürlich-fossilem Brennstoff und künstlich-regenerativem PtX sind.

Die Mengen des Haushaltsstroms sinken kaum, die Verbesserung ergibt sich praktisch ausschließlich durch die zukünftig wachsende regenerative Stromproduktion. Der geringe Primärenergieeinsatz der Holzkessel heute ist begründet durch die fossilen Zusatzaufwendungen für die Holzaufbereitung und den Transport. Es wird davon ausgegangen, dass dies bis 2050 vollständig regenerativ möglich ist, so dass der Primärenergieaufwand dann null ist.

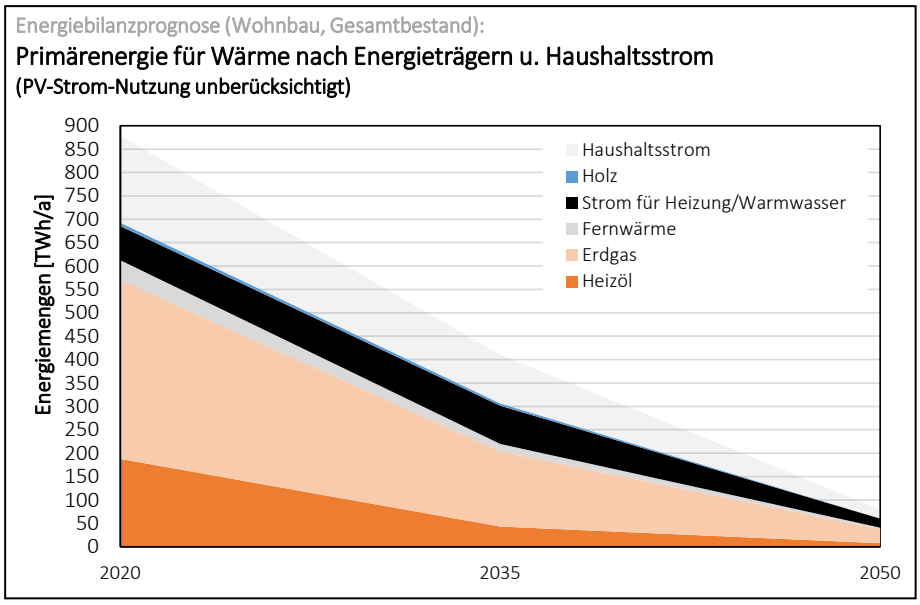


Abbildung 31 Prognose Gesamtbestand – Primärenergie nach Energieträgern [eigene Darstellung]

Niedertemperaturkessel sind gemäß den Annahmen komplett aus dem Markt verschwunden. Die sonstigen Gas- und Ölkessel sind Brennwertkessel, deren Beitrag zur Primärenergiebilanz sinkt, weil hauptsächlich die eingesetzten Stückzahlen abnehmen, aber andererseits sich in geringerem Ausmaß auch die Brennstoffe verbessern (und künftig teilweise PtX enthalten).

Die Primärenergie für Fernwärme sinkt auf 9 % des heutigen Wertes. Neben der Verringerung der Endenergiemenge wirkt auch hier eine günstigere Herkunft der Fernwärme.

Die Stromanwendungen für Heizung und Trinkwarmwasser steigen im Umfang teils deutlich an, jedoch bei zunehmend günstigerem Primärenergiefaktor. Nach einem zwischenzeitlichen Anstieg der Primärenergie im Jahr 2035 nimmt sie dann wieder ab. Hier zeigt sich ein Ungleichhochlauf der Wärmepumpeninstallation und des Ausbaus der regenerativen Energieerzeugung.

Werden alle Energieträger betrachtet, sinkt die Primärenergie von 878 TWh/a insgesamt (davon 692 TWh/a für Heizung und Trinkwarmwasser) auf 80 TWh/a (60 TWh/a für H & TWW), also auf 9 % des heutigen Niveaus ab. Eine Drittelung ergibt sich in etwa aufgrund der Gebäudeverbesserung sowie des Technologiewechsels in den Gebäuden (vgl. Endenergie in Anhang 4.3.1), grob die weitere Drittelung liegt in der veränderten Energieträgerbereitstellung (Strom und PtX).

Anhang 4.3.3 liefert weitere Auswertungen, z. B. die Primärenergie nach Energieträgern sowie eine Darstellung unter Berücksichtigung der Eigenstromnutzung aus Photovoltaik.

Für die Emissionen gelten sehr ähnliche Tendenzen wie für die Primärenergie. Abbildung 32 zeigt die Auswertung aus Sicht der eingesetzten Erzeuger. Der Haushaltsstrom ist ebenfalls mit ausgewertet. Insgesamt vermindern sich die Emissionen auf etwa 9 % des heutigen Wertes in diesem Prognosemodell (unabhängig ob mit oder ohne Einbezug des Haushaltsstroms). Sie sinken von heute 199 Mt/a auf 19 Mt/a im Jahr 2050.

Selbst erzeugte Solarwärme mindert die zu produzierende Wärme der Erzeuger. Selbst erzeugter und genutzter Photovoltaikstrom reduziert entsprechend den Fremdbezug von Energie. Die Ergebnisse der Emissionsminderung unter Berücksichtigung dieser Effekte im Zeitverlauf zeigt Abbildung 33.

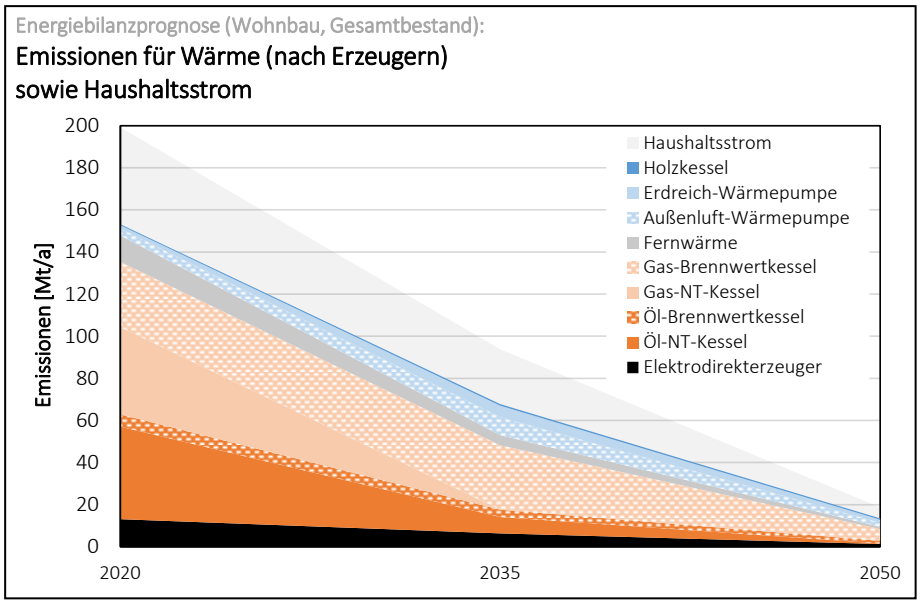


Abbildung 32 Prognose Gesamtbestand – Emissionen nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung]

Aus heutiger Sicht (2020) werden etwa 1 % der Emissionen durch gebäudenah erzeugten und genutzten Strom vermieden (ca. 0,9 Mt/a). Für das Jahr 2020 ergibt sich daher eine Gesamtemission für Fremdbezug von 198 Mt/a (davon etwa ¼ Haushaltsstrom und ¾ Wärme). Am Ende des Prognosezeitraumes 2050 liegt die Emissionsvermeidung aufgrund von Eigenproduktion und Selbstnutzung bereits bei 23 %.

Es werden nur noch etwa 16 Mt/a emittiert (ca. ⅓ Haushaltsstrom und ⅔ Wärme). Das weitere Vermeidungspotential des überschüssigen Photovoltaikstrom wird dem Gebäudesektor auf Ebene der Emissionen nicht gutgeschrieben, daher taucht es in der Abbildung 33 nicht auf.

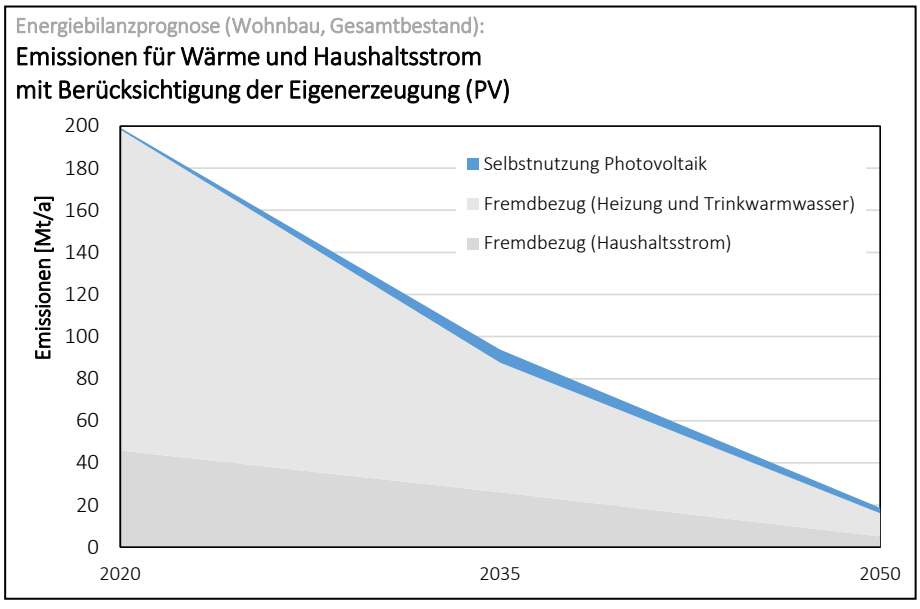


Abbildung 33 Prognose Gesamtbestand – Emissionen mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

In Anhang 4.3.4 sind weitere Auswertungen zu den Emissionen verfügbar, u. a. eine Zusammenfassung nach Energieträgern.

Die eigene Prognose liegt im Feld der Szenarien anderer Makrostudien (vgl. Anhang 4.1.1). Dies ist durch die gesetzlichen Einsparverpflichtungen sowie Ausbauziele der regenerativen Energien begründet, die allen Studienautoren als Grundlage und Eingangsparameter dienen. Da der „Haushaltsstrom“ in diesem Szenario integriert ist (was nicht in allen anderen Makrostudien gegeben ist), weichen die Absolutzahlen etwas ab, jedoch die Emissionsminderung ist vergleichbar.

Details der Energiebilanz

Ergänzend zu den Hauptergebnissen der Bilanzierung – Endenergie, Emissionen, Kosten – gibt Anhang 4.3.5 einzelne Detailaspekte der Bilanzierung wieder. Dies erfolgt nachfolgend auszugsweise.

Werden separat nur die Verluste der Gebäudehülle betrachtet, ergibt sich die Grafik nach Abbildung 34. Sie sinken von insgesamt 581 TWh/a im Jahr 2020 auf 348 TWh/a im Jahr 2050. Die Summe aller baulichen Maßnahmen sowie in geringem Umfang auch der Einfluss von Lüftungsanlagen für Wärmerückgewinnung führt somit zu einer Minimierung der Verluste um 40 %. Die größten Minderungen lassen sich bei den Außenwänden erzielen. Der Verlust halbiert sich. Bei den Kellerdecken und Bodenplatten ergibt sich 2050 ein zusammengefasster Verlust, der bei etwa ⅔ des heutigen Wertes liegt. Für eine Detailanalyse der Wärmegewinne wird auf Anhang 4.3.5 verwiesen.

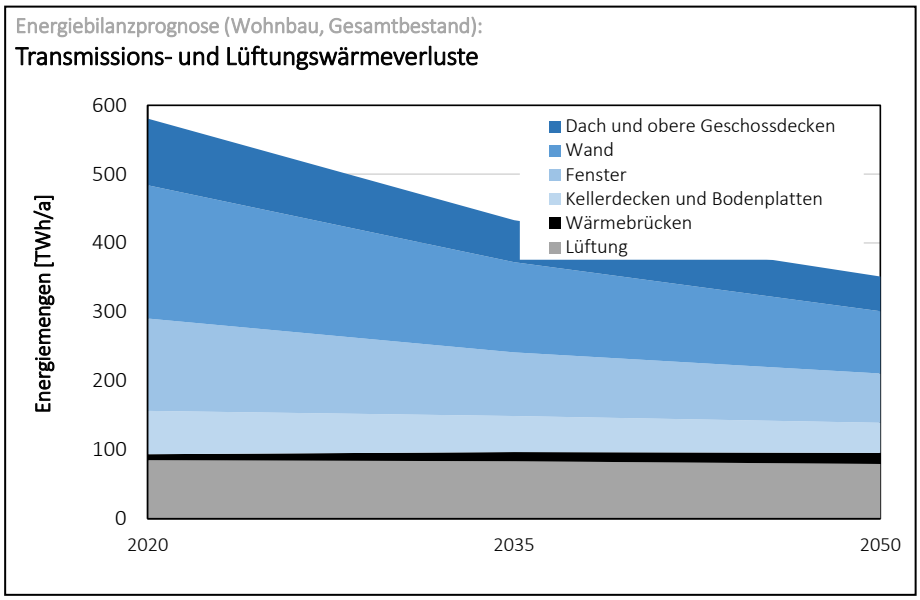


Abbildung 34 Prognose Gesamtbestand – Zusammensetzung der Transmissions- und Lüftungsverluste [eigene Darstellung]

Aus der Bilanz der Verluste und Gewinne der beheizten Räume ergibt sich der Heizwärmebedarf (orangene Fläche in Abbildung 35). Er kann von 2020 bis 2050 mehr als halbiert werden: von 385 TWh/a auf 183 TWh/a. Dagegen bleibt der Nutzwärmebedarf für Trinkwarmwasser (gezapftes Warmwasser, hellblaue Farbe) nahezu konstant. Er hängt mit der Bevölkerungsentwicklung zusammen. Insgesamt verschiebt sich der Fokus in Richtung „Trinkwarmwasser", aber auch 2050 liegt der Fokus auf der Heizwärme – sofern der Gesamtbestand betrachtet wird.

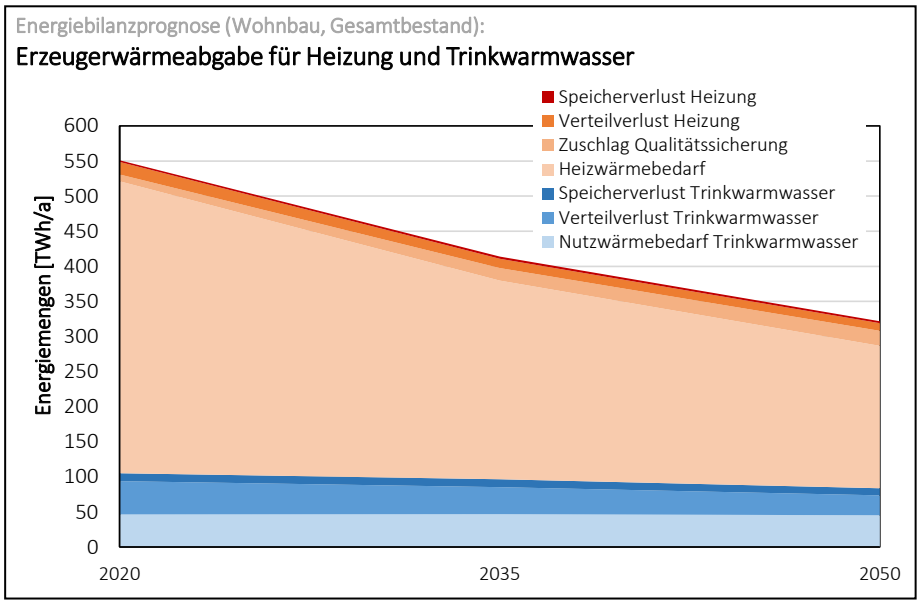


Abbildung 35 Prognose Gesamtbestand – Verwendung der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung]

Den Verbleib der Nutzwärmemengen und der weiteren produzierten Wärmemengen zeigt Abbildung 35. Heute werden etwa 80 % aller Wärmemengen dem Heizsystem zugeführt, die restlichen 20 % dienen der Trinkwassererwärmung. Diese Verhältnisse verschieben sich leicht: im Jahr 2050 beträgt das Verhältnis etwa 75 % zu 25 %.

Die Trinkwassererwärmung selbst ist sehr stark von Verlustgrößen geprägt. So nimmt die Nutzwärme heute nur etwa 44 % der eingesetzten Wärmemengen ein. Die restlichen 56 % sind den Verlusten zuzuschreiben. Bis 2050 lässt sich dies in etwa umkehren – durch konsequenten Rückbau ungünstiger Leitungsnetze. Die weitere Auswertung der Herkunft der erzeugten Wärme nach Erzeugern liefert Anhang 4.3.5.

Einfluss der Qualitätssicherung

Anhang 4.3.5 erläutert den Einfluss der Qualitätssicherung – mit ihren drei Anteilen: Baukörper, Peripherie, Erzeuger – anhand von Grafiken getrennt für Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Mehrfamilienhäuser.

Für den Gesamtbestand und alle vorherigen Auswertungen galt: es wurden gemittelte Kennwerte bestimmt. Dabei nehmen die Gebäude mit Qualitätssicherung nach den Abschätzungen dieses Gutachtens 15 % Anteil (2020, heute), 30 % Anteil (2035) bzw. 60 % Anteil (2050, künftig) ein. Entsprechend wird der Vorteil einer umgesetzten Qualitätssicherung im Verlaufe der Zeit immer höher angesetzt.

Die Gesamteinflüsse einer durchgeführten Qualitätssicherung im Vergleich zum Zustand ohne Qualitätssicherung steigen an. Sie können wie folgt bewertet werden:

- Einfluss der baulichen Qualitätssicherung (Wärmebrücken, Luftdichtheit) auf den „Fingerabdruck des Gebäudes“, d. h. die wohnflächenbezogenen Transmissions- und Lüftungswärmeverluste: heute -6 bis -7 %, künftig -13 bis -14 %
- Einfluss aller Qualitätssicherungsmaßnahmen auf die Endenergie: heute -12 bis -13 %, künftig -24 bis -35 %

Das Potential steigt an, je besser die Gebäude werden. Letztlich kann dies gleichzeitig als Indikator für die Energiekosten angesehen werden.

Fazit und Einordnung der Ergebnisse

Mit den vorgeschlagenen Maßnahmen zur baulichen Sanierung sowie zum Umbau der Anlagentechnik ist das „Hauptszenario“ für die künftige Gebäudeentwicklung gegeben. Es ist dadurch charakterisiert, jeden Anlass einer Sanierung zu nutzen und dann jeweils sehr ambitionierte Maßnahmen umzusetzen. Es werden keine Maßnahmen vorgezogen und die Sanierungszyklen sind vergleichsweise lang gewählt – an den Gepflogenheiten der Gebäudebesitzer angelehnt. Hinsichtlich der Wärmeerzeugung wird ein Umbau auf Wärmepumpen anvisiert, der jedoch realistische Markthochlaufraten berücksichtigt.

Das finale Ergebnis – d. h. der Rückgang der Emissionen – ist vergleichbar mit praktisch allen anderen Studien ähnlichen Auftrags (insbesondere die in Anhang 4.1 besprochenen). Dies ist dadurch begründet, dass der Zielwert für das Jahr 2050 weitgehend vorgegeben ist.

Allerdings sind die Wege dorthin vielfältig, weil es sich um Maßnahmenkombinationen handelt, die aus vielen Einzelmaßnahmen in unterschiedlicher Gewichtung kombinierbar sind. Zudem lässt sich der Sektor „Gebäude“ nur gekoppelt mit der „Energiewirtschaft“ betrachten. Im Resultat bedeutet dies, dass – grob zusammengefasst – folgende Maßnahmen (es sind bereits Pakete gebildet, um die Übersichtlichkeit zu wahren) umzusetzen wären:

Sektor „Gebäude“
1. Verminderung des Gebäudewärmebedarfs durch Dämmung und Wärmerückgewinnung
2. Erhöhung der Gebäudeeffizienz durch angepasste Peripherie (Verteilnetze, Pumpen, Regelung usw.)
3. Ausbau der regenerativen Energien am Gebäude
4. Wahl effizienter Erzeuger für Gebäude
5. Suffizienzmaßnahmen des Nutzerverhaltens einschließlich Flächeneffizienz

Sektor „Energiewirtschaft“

6. Umbau der Stromwirtschaft hin zu einem System von zunächst teil- dann vollregenerativem Strom
7. Umbau der stofflichen Energiewirtschaft hin zu einem System von zunächst teil- und später vollregenerativen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen
8. Umbau von der wärmenetzbasierten Energiewirtschaft hin zu Systemen mit Abwärme und Umweltwärme als Primärquellen

Die genannten 8 Punkte weisen gegenseitige Abhängigkeiten auf. Vor allem Mengenabhängigkeiten sind festzustellen. Sinkt beispielsweise der Gebäudewärmebedarf weniger, muss die Energiewirtschaft regenerativer sein (und umgekehrt), um das Emissionsziel einzuhalten. In gewisser Weise herrscht also ein Kompensationsprinzip zwischen den Maßnahmen.

Allerdings ist auch festzustellen, dass – je weiter die Zeit fortschreitet – die Anzahl der Kompensationsmöglichkeiten schwindet. Außerdem müssen immer mehr Maßnahmen gleichzeitig und nicht alternativ durchgeführt werden. Vor allem zeitaufwendige Maßnahmen, z. B. der schnelle Aufbau einer teil- oder vollregenerativen Brennstoffwirtschaft werden unrealistischer. Zudem ist der Handlungsdruck unterdessen so groß, dass auch Suffizienzmaßnahmen diskutiert werden (z. B. Sterchele et al. 2020 [68]), weil alle anderen Maßnahmen aufgrund des fast aufgebrauchten Budgets unrealistisch teuer werden.

Sehr große Differenzen zwischen den für dieses Gutachten genutzten Studien ergeben sich für die im Sektor „Gebäude“ umzusetzenden Maßnahmen, wenn komplett andere Handlungspfade für die „Energiewirtschaft“ vorausgesetzt werden – dies sehen die Autoren dieses Gutachtens als den größten Einzeleinfluss.

Wird beispielsweise der Erhalt der stofflichen Energiewirtschaft in den Mittelpunkt der Betrachtungen gerückt (Einführung von PtX), ergeben sich entsprechend mehr Kessel als Wärmeerzeuger (z. B. DENA-Leitstudie [67]). Der Fokus der Handlungsstränge wird vom Sektor „Gebäude“ in die „Energiewirtschaft“ verschoben. Für die Gebäude bleibt die grobe Versorgungsstruktur dann fast erhalten. Allerdings ist der notwendige Ausbau der regenerativen Energiewirtschaft dann höher, weil die Erzeugung und Lieferung regenerativer Gase sehr viel verlustbehafteter ist als die regenerativen Stroms. Wird eine strombasierte Energiewirtschaft vorausgesetzt, stehen Wärmepumpen im Fokus (z. B. Robinius et al. 2019 [150]).

Wird auf netzbasierte Wärmelieferung gesetzt, erhalten die Gebäude lediglich einen Netzanschluss. Außerdem sind geringere Ausbauquoten gebäudeweiser regenerativer Energien möglich. Die Erzeugung über z. B. Wärmepumpen, Photovoltaik oder Solarthermie ist in diesem Fall nicht mehr dem Sektor „Gebäude“ zugeordnet. Sie findet aber dennoch statt – nun aber als Teil der „Energiewirtschaft“. Es ergeben sich Kostenvorteile aufgrund von Skaleneffekten. Allerdings sind dann Netzverluste zu beklagen, die es sonst nicht gäbe.

Zusammenfassend lässt sich sagen: der Ausbau von regenerativen Energiequellen ist in allen Studien und Gutachten notwendig. Die Frage ist nur, ob diese als Teil der „Energiewirtschaft“ geführt werden (überwiegend zentrale Aufbereitung der regenerativen Energien und dann Lieferung als PtX oder Fernwärme), oder als Teil des Sektors „Gebäude“ (überwiegend dezentrale Aufbereitung und Nutzung). Aufgrund der Verlustvermeidung und damit geringerer notwendiger Ausbaukapazitäten von Photovoltaik und Windkraft tendieren die Verfasser dieses Gutachtens zu der zweiten Lösung.

Hinsichtlich der notwendigen Gebäudedämmung gibt es weniger Diskrepanz in den Empfehlungen der verschiedenen Studien und Gutachten. Die bauliche Sanierungstätigkeit und ihr Erfolg sollen gesteigert werden. Es ist nicht immer eindeutig, ob „Sanierungsrate“ oder die „Sanierungstiefe“ oder eine Kombination aus beidem – hier „Sanierungsquote“ genannt – gemeint ist.

Lediglich die Frage, ob an vielen Gebäuden geringe Dämmdicken (große „Sanierungsrate“ bei geringer „Sanierungstiefe“) oder an wenigen Gebäuden eine dickere Dämmung (geringe „Sanierungsrate“ bei hoher „Sanierungstiefe“) hilfreicher ist, steht dann zur Diskussion. Für erstere spricht, dass die Durchdringung schneller geht, weil die Bauabläufe unkomplizierter sind. Für letzteres spricht, dass keine erneute Dämmung notwendig wird (die unwirtschaftlicher wäre als die erste) und am Ende „mit einem Durchlauf“ ein geringerer Wärmebedarf erzielbar ist. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens tendieren zu dieser letzteren Variante.

Insgesamt lässt sich für das „Hauptszenario“ dieses Gutachtens eine Prognose für das Emissionsbudget treffen. Werden die jährlichen Emissionen kumuliert, entsteht die sich abflachende Kurve nach Abbildung 36. Es kann näherungsweise extrapoliert werden, dass der Endwert der Kurve sich bei 3000 Mt einstellt und dieser Zeitpunkt im Jahrzehnt 2050 - 2060 liegt. Erst dann ist der Wohnbaugesamtbestand klimaneutral.

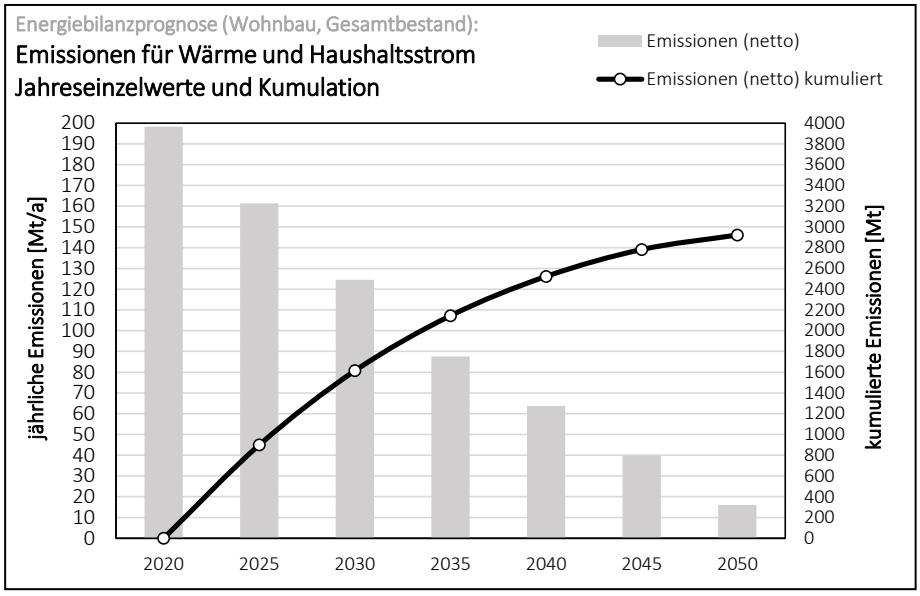


Abbildung 36 Prognose Gesamtbestand – Emissionsbudget [eigene Darstellung]

Für die Temperaturerhöhung der Atmosphäre ist nicht in erster Linie der Zeitpunkt der Zielerreichung relevant, sondern die bis dahin emittierte Menge. Das für den Wohngebäudesektor verbleibende Restbudget zum Einhalten des 2°C Ziels liegt bei näherungsweise 1800 Mt für den Zeitraum nach 2020 (Ableitung des Wertes siehe Anhang 4.4). Die im „Hauptszenario“ berechneten 3000 Mt überschreiten den Zielwert deutlich. Die in Kapitel 1.5.2 getroffenen Entwicklungsmaßnahmen – so ambitioniert sie sind – reichen nicht, um das Emissionsbudget einzuhalten.

Aus diesem Grund wird in einer Variante 1 „Beschleunigung“ (Kapitel 1.5.5 bzw. detailliert in Anhang 4.4) aufgezeigt, wie ein möglicher Pfad aussehen könnte.

Hinweise für den Neubau und Nichtwohnbau

Der Neubau ist in dem beschriebenen „Hauptszenario“ eingeschlossen. Grob zusammengefasst sieht er so aus:

- bis 2035: Übergang vom heutigen Niveau auf das ab 2035 geschilderte Niveau; in MFH noch 20 % konventionelle Fernwärme
- ab 2035: Hülle in Passivhausniveau; etwa ⅔ der Gebäude mit Lüftung mit Wärmerückgewinnung; Trinkwassererwärmung im EZFH zentral, aber nur in Ausnahmefällen mit Zirkulation; im MFH etwa ⅓ dezentral, ⅓ zentral mit Zirkulation, ⅓ zentral ohne Zirkulation; überwiegend Wärmepumpen, wenige Holzkessel, keine fossilen Erzeuger mehr; keine konventionelle Fernwärme mehr (nur noch „kalte Fernwärme“); PV für alle Gebäude, Solarthermie nur im EZFH und überwiegend zusammen mit Holz

In den Einzelaspekten ähnelt der Standard dem heutigen Effizienzhausniveau 40 bis 55. Die beschriebenen Technologien sind insgesamt erprobt. Es ist nur eine systematische Umsetzung in allen Neubauprojekten erforderlich. Zudem ist – ebenfalls flächendeckend – ein durchgehendes System der Qualitätssicherung zu etablieren, um die Effizienzstandards auch nachweislich einzuhalten.

Qualitative Hinweise zur Ergebnisübertragung auf den Nichtwohnbau gibt Anhang 4.3.8.

1.5.4 Mögliche Entwicklung der Kostenbilanz der Bestandswohnbauten bis 2050

Im Rahmen der Erstellung des „Hauptszenario“ erfolgt auch eine Kostenschätzung. Anders als vorher erfolgt jedoch eine separate Betrachtung nur der Bestandsgebäude – ohne Einbezug der neu erstellten Gebäude. Die Betrachtung bezieht sich somit nicht auf die gesamte Wohnfläche, sondern nur einen Teil davon. Es werden einerseits die Investitionskosten der Sanierung geschätzt, andererseits die Einsparungen für Energiekosten nur an den Bestandsgebäuden (ohne Neubau) berechnet.

Investitionskostenschätzung

Eine detaillierte Aufschlüsselung der Investitionskosten – als Vollkosten und energiebedingte Mehrkosten sowie bauteilscharf aufgeschlüsselt (gegliedert in 13 Maßnahmen) – ist Anhang 4.5.1 zu entnehmen. Nachfolgend erfolgt eine Zusammenfassung.

Es wird vereinfachend bei der Berechnung davon ausgegangen, dass innerhalb der beiden 15-jährigen Perioden (2020 - 2035 und 2035 - 2050) die Höhe der Investition jedes Jahr identisch ist. Es sind nur diejenigen Maßnahmen relevant, die zu einer Verbesserung des energetischen Standards oder eine Minderung der Emissionen führen.

Insgesamt werden nach Berechnung der Gutachter in den betrachteten 30 Jahren 1604 Mrd. € als Vollkosten investiert, die zu einer energetischen Verbesserung der Gebäude beitragen. Das sind jedes Jahr durchschnittlich 53 Mrd. € über den Gesamtzeitraum von 30 Jahren. Die Kosten der baulichen Verbesserung betragen dabei 69 % der genannten Summe, die Hauptwärmeerzeuger führen zu 22 % der Kosten, die Investition in die Zusatzerzeuger führt zu den restlichen 9 % der angegebenen Kosten. Darüber hinaus sind – in diesem Gutachten nicht näher bestimmt – weitere Kosten zu erwarten, die zum üblichen Bestandserhalt eingesetzt werden, z. B. der Sanierung von Rohrleitungen usw., aber nicht zu einer energetischen Verbesserung führen.

Die energiebedingten Mehrkosten sind in Abbildung 37 dargestellt. Sie sind gut halb so hoch wie die Vollkosten. Über die 30 Jahre werden 859 Mrd. an energiebedingten Mehrkosten berechnet, d. h. durchschnittlich 29 Mrd. €/a (im ersten Zeitintervall mit 32 Mrd./a etwas mehr als im zweiten Zeitintervall mit 25 Mrd./a).

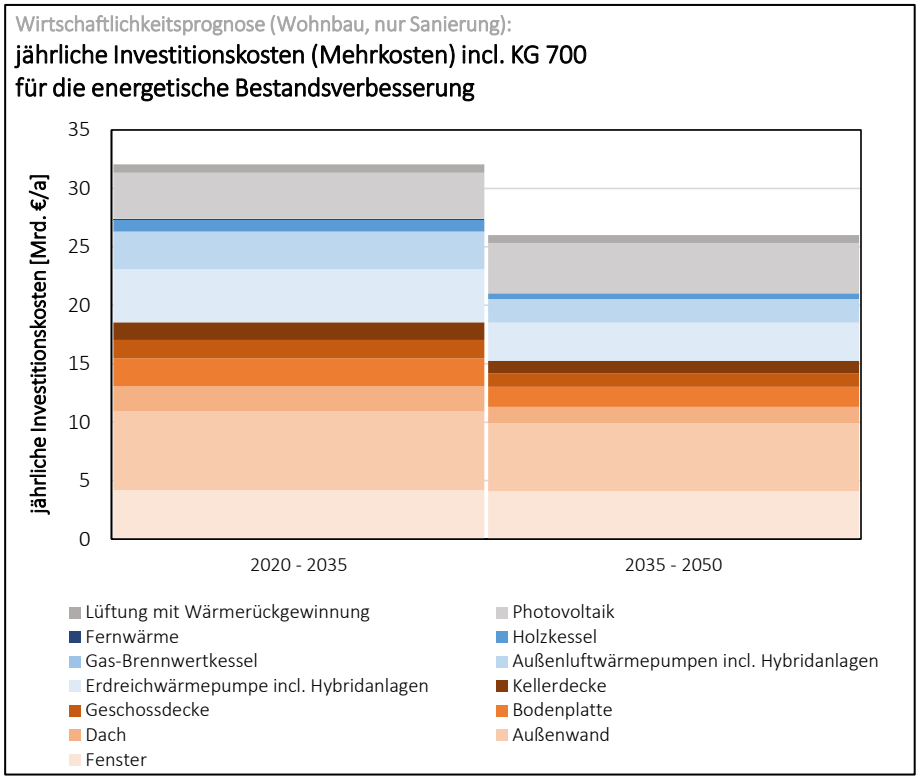


Abbildung 37 Prognose Sanierungsobjekte – Jährliche Investitionskosten: Anteil der energiebedingte Mehrkosten [eigene Darstellung]

Ein Vergleich der Kosten mit anderen Studien gestaltet sich als schwierig. Nicht in jeder Studie sind überhaupt Gesamtkosten enthalten (vgl. [119]). Häufig werden sektorenübergreifende Summationen gemacht oder nur die Mehrkosten gegenüber einem „business-as-usual“ angegeben (wobei auch dieses bereits Sanierungskosten aufweisen wird). Darüber ist nicht klar, ob der PV-Ausbau dem Sektor „Gebäude“ oder „Energiewirtschaft“ zugeschlagen wird. Auch werden regulär alle Gebäude betrachtet, nicht nur in erster Priorität die Wohnbauten (wie im vorliegenden Fall) und sowohl Neubau als auch Bestand addiert (nicht nur die Sanierungskosten, wie im vorliegenden Fall).

Gesamtkostenschätzung

Nur für die Bestandsobjekte – ohne Einbezug des Neubaus – kann eine separate Bestimmung der Endenergie und daraus der Energiekosten erfolgen, siehe Anhang 4.5.2 und 4.5.4.

Aus den Investitionskosten werden Jahreskapitalkosten ermittelt, siehe Anhang 4.5.4. Da jeweils nur ohnehin erforderliche Sanierungsanlässe als Investitionszeitpunkte gewählt werden, gelten die energiebedingten Mehrkosten. Das Verfahren ist in Anhang 6.1.8 beschrieben (es ist identisch wie für die Mikroperspektive). Berücksichtigt werden die unterschiedlichen Nutzungsdauern der einzelnen Bauprodukte sowie der Finanzierungszins. Da in diesem Gutachten keine Lernkurven berücksichtigt werden, gibt es keine veränderlichen Investitionskosten.

Die Ermittlung der Wartungskosten folgt der Beschreibung aus der Mikroperspektive. Es werden prozentuale Ansätze der Investitionskosten geltend gemacht. Allerdings sind nur die Mehrkosten relevant, die sich aus der energetischen Verbesserung ergeben.

Aus den Energiekosten des Bestandes, den energiebedingten Mehrkosten (die zu einer energetischen Verbesserung geführt haben) und den zugehörigen Mehraufwendungen an Wartung (z. B. für die Photovoltaik) ergeben sich Gesamtkosten. Sie sind in Abbildung 38 dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Kostenkonstanz zumindest in den nächsten 15 Jahren realisierbar ist. Erst in der Zeit nach 2035 steigen die Gesamtkosten leicht an. Dies ließe sich auffangen, wenn die Energiepreise nach 2035 nicht mehr steigen würden.

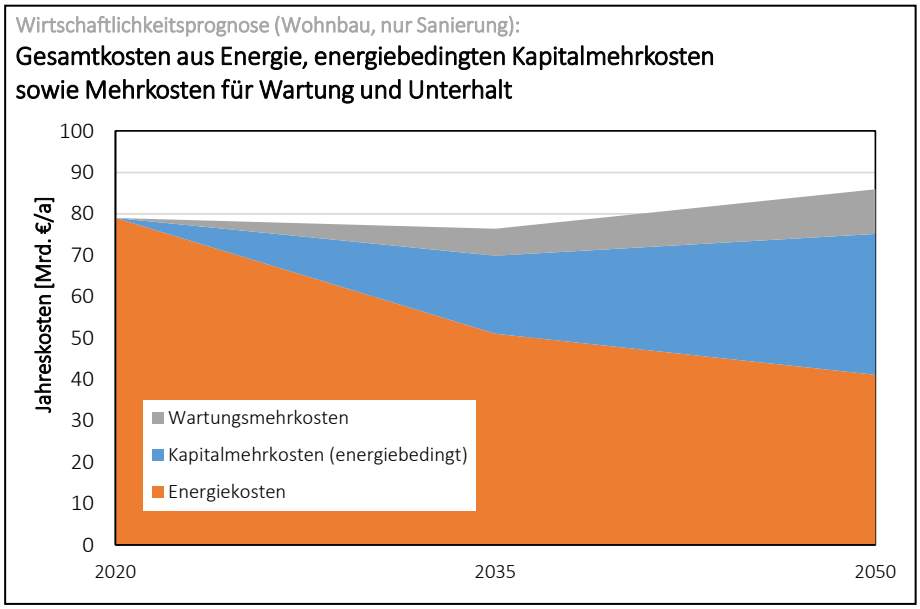


Abbildung 38 Prognose Sanierungsobjekte – Gesamtkosten der energetischen Modernisierung [eigene Darstellung]

Abbildung 38 zeigt die Energiekosten für die Bestandsgebäude mit Baujahr bis 2020 (orange Fläche). Die Nettoenergiekosten ergeben sich aus den Kosten für Wärme und Strom (Ausgaben), die es ohne gebäudenahe Stromerzeugung geben würde, abzüglich der Einnahmen aus dem Verkauf von PV-Überschüssen und abzüglich der vermiedenen Kosten durch die Selbstnutzung von PV-Strom. Für den Bestand belaufen sich die Nettoenergiekosten heute auf 79,0 Mrd. €/a. Sie sinken über 51,0 Mrd. €/a im Jahr 2035 auf 41,1 Mrd. €/a am Ende des Prognosezeitraumes.

Für ein typisches Jahr der Periode (I) 2020 - 2035 sind energiebedingte Investitionsmehrkosten von 31,9 Mrd. € relevant. Sie werden kapitalisiert und führen zu Kapitalkosten von 1,25 Mrd. €/a. Da im Folgejahr gleiches erneut passiert, summieren sich die Ausgaben jeweils, siehe Abbildung 38 (blaue Fläche). Für die Periode (II) von 2035 bis 2050 ist dies vergleichbar, jedoch mit etwas geringeren Investitionssummen. Es kommen dann jährlich 1,01 Mrd. €/a an Kapitalkosten auf den Vorjahreswert hinzu. Am Ende des Prognosezeitraumes liegen die jährlichen Kapitalkosten bei 34,0 Mrd. €/a.

In den ersten 15 Jahren kommen jährlich jeweils 0,35 Mrd. €/a an Wartungskosten hinzu, in den weiteren 15 Jahren 0,28 Mrd. €/a, siehe Abbildung 38 (graue Fläche). Auch diese Werte summieren sich über die Zeit – analog den Kapitalkosten.

Sanierungsrate

Werden die Transmissions- und Lüftungsverluste des Baukörpers insgesamt betrachtet, kann die bauliche Sanierung bewertet werden. Anhand des Kennwertes für den „Baustandard h“, der auch einfach messtechnisch zu bestimmen ist (vgl. Anhang 5.3.3) kann auch ein Monitoringziel für die Überprüfung der Sanierungsziele abgeleitet werden. Es bündelt die beiden Aspekte der „Sanierungsrate“ und „Sanierungstiefe“ (vgl. Anhang 5.11.1 und 5.11.2) in einer Größe.

Die Verminderung von 2,13 auf 1,19 W/(m²K) bei den EZFH bzw. von 1,71 auf 0,97 W/(m²K) bei den MFH entspricht einer Sanierungsrate/-tiefe von 1,9 %/a.

Die zeitliche Sanierungsrate ist zwar vergleichsweise gering, weil die gewählten Nutzungsdauern lang sind. Jedoch ist die gewählte Sanierungstiefe groß, weil überwiegend „best practice“-Maßnahmen umgesetzt werden.

Äquivalenter CO_2-Preis aller Maßnahmen

Die bis 2050 insgesamt erzielten Emissionsminderungen des Bestandes betragen kumuliert über den Zeitraum von 30 Jahren 3115 Mt (10^6 t). Referenz ist die Annahme, dass der Wert von 2020 unverändert (konstant) erhalten bliebe. Im gleichen Zeitraum von 30 Jahren ergeben sich kumulierte Kapitalkosten für die energiebedingten Investitionen von 540 Mrd. € sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten, die daraus erwachsen, von 180 Mrd. € (10^9 €).

Der äquivalente CO_2-Preis wird berechnet, wie in Anhang 6.1.2 für die Mikroperspektive erläutert. Er ist das Verhältnis von jährlichen Mehrkosten zu jährlichen Emissionsminderungen einer Maßnahme oder Maßnahmenkombination. Dabei sind alle Kosten und Emissionen vollständig zu erfassen.

Mit obigen Zahlen liegt der gemittelte CO_2-Preis aller Maßnahmen bei 259 €/t. Dieser Wert ist allerdings nicht regelkonform bestimmt. Denn die berücksichtigten Kosten im Zähler sind nicht vollständig. Es fehlen die Kosten für den Umbau der Energiewirtschaft (Minderung der Emissionsfaktoren des gelieferten Stroms oder der gelieferten Wärme), deren Emissionsvorteil aber im Nenner enthalten ist. Der korrekte Wert ist im Rahmen dieses Gutachtens nicht bestimmbar; es wird auf andere Makrountersuchungen, z. B. die Studie von Sterchele et al. verwiesen [68].

Eine Abschätzung des CO_2-Preises nur für die Maßnahmen am Gebäude und der Technik im Gebäude – ohne den Einfluss veränderter Energieträger – könnte näherungsweise erfolgen. Die Emissionsfaktoren der gelieferten Energieträger werden dafür konstant gehalten. (Allerdings ist dieses Vorgehen nur akademischer Natur, da das Einhalten der Klimaziele mit den Energieträgern von heute unmöglich ist.)

Es kann abgeschätzt werden, dass der sich ergebende gemittelte CO_2-Preis aller Maßnahmen etwa 50 % höher liegt als oben angegebener, d. h. in der Größenordnung von 350 bis 400 €/t. Denn aus den Untersuchungen wurde bereits deutlich, dass ein Drittel der insgesamt erzielbaren Emissionsminderung sich aus Maßnahmen am Gebäude ergibt, die anderen zwei Drittel aus dem Umbau der Energiewirtschaft.

Mögliche Investitionskostenzuschüsse

Für die bis 2050 zu sanierenden Gebäude wird nachfolgend ein Investitionskostenzuschuss abgeschätzt. Basis der weiteren Überlegungen ist, dass Maßnahmen immer dann umgesetzt werden, wenn ohnehin eine Sanierung nach der Nutzungsdauer ansteht, daher gelten „Mehrkostenbetrachtungen".

Anhaltswerte zu einer quantitativen Abschätzung notwendiger Investitionskosten liefern die Betrachtungen in der Mikroebene. Eine detaillierte Darstellung der Vorüberlegungen ist in Anhang 4.5.4 zu finden. Im Ergebnis zeigt sich Folgendes:

Um tatsächlich einen Anreiz zu bieten, erscheint für die baulichen Maßnahmen – vor allem an Bauteilen mit sehr langen Nutzungsdauern, die „von allein" nicht angefasst werden würden – eine Förderquote von 10 bis 20 % als sinnvoll (Annahme: 15 %). Dieser Wert wird auch für Fenster angenommen, auch wenn die tatsächlich notwendige Förderung nicht erreicht wird (aufgrund der gegebenen Begründung). Lediglich für Bodenplatten liegt der Wert mit 40 % deutlich höher.

Bei den Haupterzeugern könnte ein Zuschuss bei etwa 50 % liegen (für die Kostenschätzung relevant). Damit ist zwar noch keine Wirtschaftlichkeit erreicht, aber der Wert erscheint den Gutachtern als Umsetzungsanreiz hoch genug. Alternativ wird beim Aufbau des Hybridsystems die Wärmepumpe bezuschusst, wenn der Bauherr den Kessel zahlt, was einen Zuschuss von 60 bis 75 % der Gesamtinvestition bedeutet (hier nicht weiterverfolgt).

Es besteht keine Notwendigkeit, die Photovoltaik separat zu bezuschussen. Solarthermie und Lüftungsanlagen könnten im Rahmen eines Maßnahmenpaketes bezuschusst werden (daher gelten etwa 25 % Zuschuss).

Für Maßnahmenpakete mit dem Ziel einer Vollmodernisierung ergeben sich Mischkalkulationen analog der bisherigen KfW-Effizienzhaus-Förderung. Für die in diesem Gutachten definierten Maßnahmen (die einem der besseren Effizienzhausniveaus von etwa EH55 entsprechend dürften) werden etwa 20 bis 30 % als realistisch angesehen (Annahme 25 %).

Aus den Investitionskosten (incl. der Kostengruppe 700, damit sicher eine Qualitätssicherung finanzierbar ist), ergeben sich unter Berücksichtigung der genannten Einzelförderquoten und als Summe von Einzelmaßnahmen jährlich erforderliche Gesamtzuschüsse von:

- 2020 - 2035: Investition 59,5 Mrd. €/a → Zuschuss 12,8 Mrd. €/a (mittlere Förderquote 22 %)
- 2035 - 2050: Investition 48,1 Mrd. €/a → Zuschuss 10,0 Mrd. €/a (mittlere Förderquote 21 %)

Würden alle Maßnahmen Teil von Maßnahmenpaketen sein, lägen bei dem angenommenen Fördersatz von 25 % die jährlichen Gesamtausgaben bei:

- 2020 - 2035: Investition 59,5 Mrd. €/a → Zuschuss 14,9Mrd. €/a (mittlere Förderquote 25 %)
- 2035 - 2050: Investition 48,1 Mrd. €/a → Zuschuss 12,0 Mrd. €/a (mittlere Förderquote 25 %)

Hinzu kommt evtl. eine Neubauförderung – die hier nicht näher spezifiziert werden kann, weil keine Kostenschätzung für die Neubauten erfolgt. Alternativ werden die Neubauanforderungen vorgeschrieben und keine Förderung ausgeschüttet. Eine eventuell sich ergebende Unwirtschaftlichkeit könnte der Bauherr durch Suffizienzmaßnahmen (Wahl einer geringeren Wohnfläche) ausgleichen.

Darüber hinaus fällt die Vergütung des überschüssigen Photovoltaik-Stroms an, siehe Anhang 4.3.2. Es handelt sich um jährlich weitere ca. 4,2 Mrd. €/a in Periode (I) und 9,2 Mrd. €/a in Periode (II). Außerdem wird der Umbau der Energiewirtschaft anteilig zu subventionieren sein, wobei eine Kostenschätzung nicht Umfang des vorliegenden Gutachtens ist.

Die Fördermittelquote ist vor allem deshalb so hoch, weil die heute gegebene Energieträgerbepreisung nicht dazu anreizt, in emissionsärmere Energieträger zu investieren. Diese Problematik führt in der Mikroperspektive zu den Überlegungen einer „alternativen Bepreisung", die auch in der Makroperspektive fortgeführt wird. Die entstehende Variante 2 wird in Kapitel 1.5.6 vorgestellt.

1.5.5 Variante 1: Beschleunigtes Erreichen der Klimaneutralität

Die Variante 1 „Beschleunigung“ zeigt auf, welche zusätzliche Anstrengungen materieller Art (mehr Dämmung, bessere Fenster, größere PV-Flächen usw.) zu unternehmen sind und wie die zeitliche Umsetzung zu beschleunigen wäre, um das Emissionsbudget für das 2°C-Ziel einzuhalten. Die Variante beruht wie beim „Hauptszenario“ auf der Betrachtung des Wohnbaugesamtbestandes, einschließlich aller Neubauten und Abrissaktivitäten.

Modifizierung der Neubau- und Sanierungsaktivitäten der Gebäude

Die erste berücksichtigte Suffizienzmaßnahme ist ein künftig gebremster Wohnflächenzuwachs. Die Beschreibung der Wohnflächenermittlung für 2035 und 2050 folgt grundsätzlich dem Bevölkerungswachstum. Der Anstieg der pro-Kopf-Wohnfläche wird jedoch mit 0,1 m²/(P · a) festgelegt. Im Hauptszenario waren es 0,3 m²/(P · a). Die Wohnflächen nehmen im Gesamtzeitraum nur um 4 % zu, nicht um 17 %.

Insbesondere in der betrachteten Periode (I) von 2020 bis 2035 ist der Unterschied erheblich. In diesem Zeitraum weisen sowohl die Gebäude einen noch vergleichsweise hohen Verbrauch auf, die Erzeuger befinden sich noch in der Umstellungsphase und auch die gelieferten Energieträger (v. a. Strom) weisen noch höhere Emissionsfaktoren auf. Daher ist diese Maßnahme – unter Budgetgesichtspunkten – effektiv.

Darüber hinaus wird ein sparsameres Nutzerverhalten angenommen als im Anhang 6.1.3 beschrieben. Es wird angenommen, dass der pro-Kopf-Verbrauch für Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom sinkt (bis 2050 um 20 %).

Der Neubau wird in allen baulichen Merkmalen und bereits ab 2020 in der Version „best“ ausgeführt. Das war im Hauptszenario erst ab 2035 vorgesehen (bis dahin ⅔ „best“ und ⅓ „gut“), siehe Anhang 4.2.2. Die Nutzungsdauern für die bauliche Sanierung sind identisch zum Hauptszenario, so dass die Sanierungsraten identisch sind (Häufigkeiten). Jedoch werden die Sanierungstiefen erhöht. Während bis 2035 im „Hauptszenario“ etwa ⅔ aller Sanierungen den Zustand „best“ erreichen (die anderen „gut“), steigt dieser Anteil nun auf ca. 80 %.

Auch die Ausstattung mit Hauptwärmeerzeugern setzt rigoros auf die Vermeidung von fossilen Energieträgern. Es sind insgesamt keine Gas- und Ölkessel im „Eins-zu-Eins-Tausch“ – nur noch als Hybrid mit Wärmepumpen - ab 2020 vorgesehen, weder im Neubau, noch in der Modernisierung. Sie werden nur noch in der Modernisierung als Teil von Wärmepumpen-Hybridanlagen neu eingebaut.

Insgesamt findet eine Erhöhung des Holzkesseleinsatzes statt (unter Wahrung des Biomassebudgets), was u. a. deshalb möglich ist, weil die Gebäude in dieser Variante weniger Bedarf haben. Das Resultat der Technologieausbreitung zeigt Abbildung 39. Es ist direkt vergleichbar mit Abbildung 28 aus Kapitel 1.5.1.

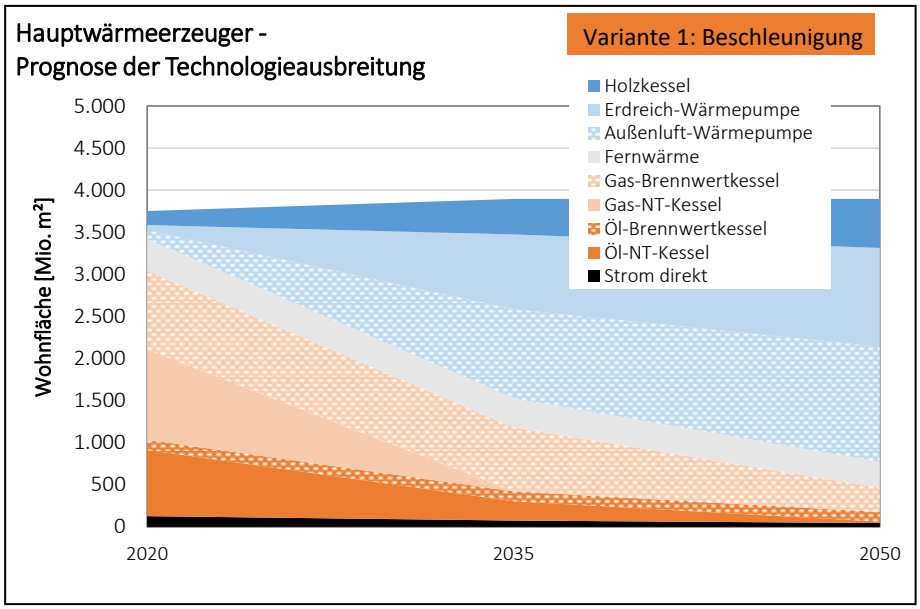


Abbildung 39 Variante 1 Gesamtbestand – Prognose der Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung]

Während im Hauptszenario im Jahr 2035 noch 46 % der Gebäudeflächen mit einem Gas- oder Ölkessel versorgt werden, sind es in der Variante nur noch 28 %. Im Jahr 2050 werden aus 19 % in der Variante 11 %. Der Wärmepumpenanteil beträgt im Jahr 2035 nicht mehr 35 %, sondern 50 %. Im Jahr 2050 liegt sie bei 65 % statt 62 %. Der veränderte Systemumbau findet also vor allem in der Zeit bis 2035 statt.

Darüber hinaus wird der Ausbau der Photovoltaik gegenüber dem Hauptszenario beschleunigt, jedoch nur in der Zeitperiode (I) von 2020 bis 2035. Jeder Neubau erhält eine Photovoltaikanlage. Darüber hinaus wird der Bestand ausgestattet. Während im Hauptszenario im Jahr 2035 etwa 38 % aller Wohnbauten eine PV-Anlage aufweisen, sind es in Variante 1 bereits 48 %. Am Ende sind die Werte nur geringfügig verschieden (69 % statt 65 %).

Für die Solarthermie gelten fast identische Annahmen wie im Hauptszenario. Lediglich der Rückbau von Solarthermie bei der Sanierung der EZFH entfällt (alle EZFH-Besitzer, die eine Solarthermieanlage haben, behalten diese auch).

Die Einbauwahrscheinlichkeit einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung wird im Neubau identisch angenommen wie im Hauptszenario. Allerdings entscheiden sich in der Variante 1 „Beschleunigung“ 3-mal mehr Gebäudebesitzer bei einer Sanierung für eine Lüftungsanlage. Im Jahr 2050 haben somit 23 % aller Wohnflächen eine solche Anlage (anstelle von 17 %).

Modifizierung der Emissionsfaktoren der Energieträger

Der Umbau der Energiewirtschaft erfolgt schneller, als für das „Hauptszenario“ beschrieben. Insbesondere für Strom und Erdgas ist eine schnelle Emissionsminderung im Zeitraum 2020 - 2035 relevant. Da in der Zeitperiode (I) noch viele Erdgaskessel in Betrieb sind, aber auch schon ein deutlicher Zuwachs an Wärmepumpen zu verzeichnen ist.

Der Emissionsfaktor für Erdgas halbiert sich im „Hauptszenario“ zwischen 2020 und 2050. In der Variante 1 „Beschleunigung“ tritt eine Viertelung ein. Für den Strom ist die Umbaugeschwindigkeit noch prägnanter. Im „Hauptszenario“ sinkt der Emissionsfaktor von 2020 bis 2050 von 444 auf 50 g/kWh, in Variante 1 liegt der Endwert bei 1 g/kWh. Die weiteren Zahlenwerte und Annahmen sind Anhang 4.4.1 zu entnehmen.

Modifizierte Energiebilanz

Anhang 4.4.2 und 4.4.3 geben die Details der modifizierten Energiebilanz und die Einsparungen gegenüber dem „Hauptszenario“ wieder, auch in grafischer Form. Kurzfassung:

- die veränderten Transmissions- und Lüftungsverluste (erhöhte bauliche Sanierung sowie Flächensuffizienz),
- die veränderte Wärmeproduktion der Erzeuger (erhöhte bauliche Sanierung, Flächensuffizienz, verminderte Trinkwarmwassernutzung),
- die veränderte Zusammensetzung des Erzeugerparks in den Gebäuden,
- die insgesamt verminderte Endenergie; es ergibt sich eine Einsparung von 14 %,
- die insgesamt verminderten Energiekosten; es ergibt sich eine Einsparung von 20 %.

Emissionsbudget

Die Emissionen sinken vor allem in der ersten Zeitperiode 2020 bis 2035 sehr viel stärker. Das lässt sich nur erreichen durch die Annahmen zum beschleunigten Umbau der Energiewirtschaft (PV und Windkraft). Abbildung 40 zeigt die daraus ableitbare kumulierte Darstellung der Emissionen für die Variante 1 „Beschleunigung“. Das Gegenstück ist Abbildung 36 für das „Hauptszenario“ in Kapitel 1.5.3.

Der alte und neue Verlauf der Budgetausschöpfung sind vergleichend in dem Bild eingetragen. In der Summe der Maßnahmen kann auch mit Variante 1 ab etwa 2060 von einer „näherungsweisen Klimaneutralität“ ausgegangen werden, wobei bis dahin etwa 1800 Mt an Emissionen durch den Wohnbausektor ausgestoßen wurden.

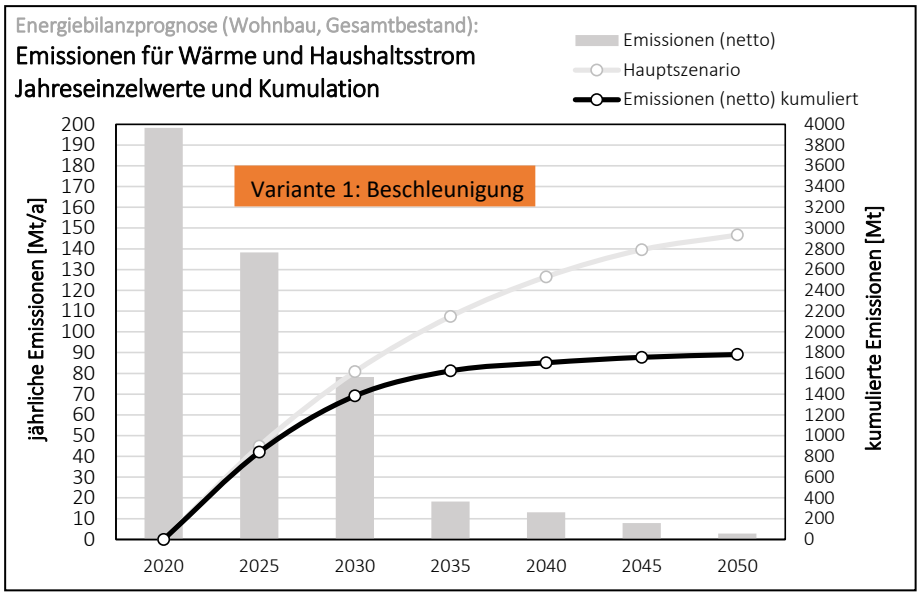


Abbildung 40 Variante 1 Gesamtbestand – Emissionsbudget [eigene Darstellung]

Mit der Variante 1 „Beschleunigung" konnte nachgewiesen werden, dass das Emissionsbudget zum Erreichen des 2°C-Ziels einzuhalten ist, wenn:

- ab sofort Maßnahmen zur Suffizienz umgesetzt werden (stark gebremstes Wachstum der pro-Kopf-Wohnfläche, moderate Einsparungen des pro-Kopf-Wasser- und Haushaltsstromverbrauchs),
- ab sofort praktisch alle Neubauten etwa (bauliches) Passivhausniveau aufweisen, keinen fossil befeuerten Kessel aufweisen sowie mit Photovoltaik ausgestattet werden,
- ab sofort die Sanierungen der Gebäudehülle zu etwa 80 % dem Passivhausniveau entsprechen (nur, wenn Restriktionen gegeben sind, werden Abstriche gemacht), fossil befeuerte Kessel nur noch eingebaut werden, wenn eine Hybridanlage mit Wärmepumpe aufgebaut wird, jedes Jahr 2 % aller Wohnbauten mit einer PV-Anlage ausgestattet werden,
- ab sofort Maßnahmen umgesetzt werden, die in den nächsten 15 Jahren die Emissionsfaktoren für Erdgas und Heizöl halbieren (etwa 50 % Beimischung von PtX) und den darauffolgenden 15 Jahren erneut eine Halbierung bewirken,
- ab sofort Maßnahmen umgesetzt werden, die in den nächsten 15 Jahren den Emissionsfaktor für Strom um den Faktor 20 dezimieren, so dass er bereits 2035 fast regenerativ ist,
- ab sofort Maßnahmen umgesetzt werden, die in den nächsten 15 Jahren den Emissionsfaktor für Fernwärme vierteln und in den darauffolgenden 15 Jahren noch einmal eine Viertelung bewirken.

Werden diese Maßnahmen (oder alternative mit vergleichbarer Wirkung für den Wohnungsbau) nicht umgesetzt, ist das 2°C-Ziel nicht zu halten. Es ist zumindest jetzt schon erkennbar, dass es nicht darum geht, die eine ODER andere Maßnahme zu ergreifen, sondern dass es ein UND ist.

1.5.6 Variante 2: Alternative Energiepreise

Bereits das „Hauptszenario" geht von einer künftig veränderten Energieträgerbepreisung aus, siehe Kapitel 1.5.2. Der Energieträger Strom ist dabei um die EEG-Umlage entlastet und langfristig werden alle Energieträger mit zusätzlichen Emissionspreisen versehen.

Die nachfolgende Variante 2 „Alternative Energiepreise" geht einen Schritt weiter. Sie greift die Idee des rein emissionsbasierten Energiepreises aus der Mikroperspektive (Kapitel 1.2.3) wieder auf.

Modifizierte Energiepreise

Die Energiebilanz sowie Investitionskostenermittlung erfolgt komplett wie im „Hauptszenario". Lediglich die Energiepreise werden geändert. Sie werden ersetzt durch die in Tabelle 35 zusammengestellten Werte.

System	Energiepreis, in [€/kWh]		
	2020	2035	2050
Erdgas	0,087	0,121	0,157
Heizöl	0,122	0,172	0,224
Holz	0,050	0,053	0,060
Fernwärme	0,102	0,129	0,140
Strom (Bezug, Normaltarif)	0,186	0,231	0,218
Strom (Bezug, Wärmepumpe)	0,186	0,231	0,218
Strom (Einspeisung)	0,066	0,066	0,066

Tabelle 35 Prognose der Energiepreise für das Szenario 2 „Alternative Energiepreise“ [eigene Darstellung]

Die Preise für das Jahr 2020 werden bereits modifiziert. Sie basieren – außer bei dem Energieträger Holz – auf einem für alle Energieträger gleichen Emissionspreis von derzeit 418 €/t. Ebenfalls für alle Energieträger gleichermaßen (auch den Energieträger Holz) werden künftige Preissteigerungen angesetzt. Sie sind rein emissionsbasiert. Dabei wird für das Jahr 2035 ein zusätzlicher Emissionspreis von 180 €/Tonne und für das Jahr 2050 von 640 €/Tonne (jeweils auf die Preise von 2020) gemäß den Vorschlägen des UBA [21] zugrunde gelegt.

Der Strom für die Einspeisung wird konstant belassen, da der Wert sich nicht am geltenden EEG orientiert, sondern an den Gestehungskosten für den Strom – welche sich rein an den Investitionskosten in die PV orientieren. Da keine Lernkurve für PV angesetzt wird, bleibt dieser Preis konstant. Bei näherer Betrachtung der Werte fällt auf, dass der Netzstrom zunächst teurer, aber dann wieder günstiger wird. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die – bis dahin sehr regenerative Stromherkunft zu einem so geringen Emissionsfaktor führt, dass ein Abschlag berechnet wird.

Modifizierte Gesamtkosten und Fazit

Mit den alternativen Energiepreisen ergeben sich die Energiekosten, wie sie in Abbildung 41 (orange Fläche) dargestellt sind. Eine direkte Vergleichbarkeit ist mit Abbildung 38 aus Kapitel 1.5.4 gegeben.

Der Startwert für das Jahr 2020 liegt leicht über dem des „Hauptszenarios“ (81,2 Mrd. €/a). Der Wert für das Jahr 2035 liegt deutlich über dem Wert des „Hauptszenarios“ (70,6 Mrd. €/a). Am Ende des Prognosezeitraumes sind beide Werte wieder sehr ähnlich (Hauptszenario: 53,7 Mrd. €/a).

Die Kapital- und Wartungskosten sind identisch zu denen des „Hauptszenarios“ aus Kapitel 1.5.4. Werden sie zu den Energiekosten der Variante 2 „Alternative Energiepreise“ addiert, ergibt sich der Verlauf nach Abbildung 41.

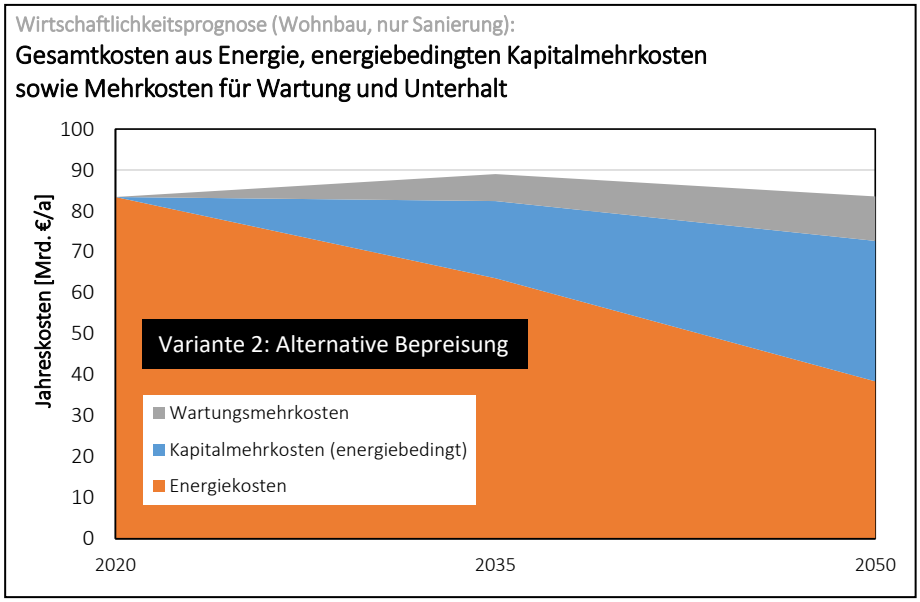


Abbildung 41 Variante 2 Sanierungsobjekte – Gesamtkosten der energetischen Modernisierung [eigene Darstellung]

Die „künstliche“ Verteuerung aller Energieträger reizt die energetische Modernisierung grundsätzlich an – wobei die anfänglichen Mehrkosten insgesamt nur 5 % betragen. Es findet vor allem eine deutliche Verschiebung hin zu einer Verteuerung der fossilen Energieträger statt. Wärmepumpen und Holzkessel werden ohne Zuschuss wirtschaftlich. Die Investitionskostenzuschüsse können deutlich geringer ausfallen – letztlich bliebe die Anreizfinanzierung der baulichen Maßnahmen erhalten. In ähnlicher Größenordnung (10 bis 20 % statt 50 %) könnten dann auch Erzeuger sowie Maßnahmenpakete bezuschusst werden.

Die somit nicht notwendigen Investitionskostenzuschüsse könnten oder müssten teilweise in eine Unterstützung einkommensschwacher Haushalte fließen. Dies wird näher ausgeführt im Anhang 3.9.5.

Es ergibt sich auch mit den alternativen Energiepreisen ein sehr konstanter Gesamtkostenverlauf, der näherungsweise zu einer Grenzwirtschaftlichkeit führt. In der Anfangszeit liegen die Gesamtkosten der „Variante 2“ über der des „Hauptszenarios“, am Ende kehrt sich dies um.

Insgesamt ließe sich durch weitere Variation auch ein Modell der Energieträgerbepreisung finden, bei dem eine Kostengleichheit festzustellen ist. Darauf wird verzichtet. Mit der Variante 2 „Alternative Bepreisung“ konnte grundsätzlich gezeigt werden, dass eine Preisgestaltung rein nach Aspekten der Emissionen zu realistischen Gesamtkosten führen kann und dass sich auch Preissteigerungen an den Emissionen festmachen lassen, ohne dass „utopische“ Ergebnisse ermittelt werden. Bedenkt man die heutigen Importpreise von Erdöl und Erdgas mit etwa 0,02 €/kWh und von Strom mit etwa 0,04 €/kWhel an der Leipziger Strombörse erscheint eine „Alternative Bepreisung“ nicht utopisch.

Abschließend sei angemerkt, dass das Problem der Überschreitung des Emissionsbudgets mit dieser Variante 2 nicht gelöst ist. Dazu wären Variante 1 und 2 zu kombinieren. Darauf wird im Rahmen dieses Gutachtens verzichtet, weil diese Überlegung den Rahmen der Aufgabenstellung deutlich sprengt.

1.6 Handlungsoptionen

Auf Basis der Untersuchungen zur Makroperspektive werden nachfolgend Hinweise gegeben, welchen Handlungsbedarf und welche Handlungsoptionen die Gutachter sehen, um den Erfolg energetischer Sanierungen zu erhöhen. Dabei geht es im Detail um eine größere Akzeptanz von Maßnahmen bei Investoren und Planern und eine größere Sicherheit der Umsetzung gesteckter Ziele sowie um die Erschließung identifizierter Potenziale (verbesserte Einspareffekte, verbesserte Kosten-Nutzen-Verhältnisse). Dieser Frage widmet sich das Kapitel 1.6.2.

Etliche der in dem Gutachten erarbeiteten Vorschläge finden sich auch in dem Maßnahmenkatalog „Ergebnis des Dialogprozesses zum Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung“ aus dem Jahr 2016 wieder. Sie sind unter Beteiligung von Bundesländern, Kommunen, Verbänden, Bürgern und Delegierten erarbeitet worden [162].

Darüber hinaus wird in Kapitel 1.6.1 – auch als rückblickende Bewertung der Datenrecherche zu diesem Gutachten – abgeleitet, wie künftig verbesserte Datengrundlagen zur energetischen Gebäudebewertung aussehen könnten. Diese Ausgangsdaten wären einerseits dienlich für die wissenschaftliche Bearbeitung, jedoch andererseits auch eine geeignete Basis für wirksame und effiziente Politikentscheidungen.

Die Erkenntnisse zur „Energetischen Sanierung“ werden direkt von vorgelagerten Entscheidungen im Austausch betroffener Interessensgruppen aus Gesellschaft, Wirtschaft und Politik beeinflusst, z. B. der Art der Energieträgerbepreisung. Darüber hinaus löst die veränderte Umsetzung energetischer Sanierungen ihrerseits auch notwendige Entscheidungsketten aus, insbesondere für den Mietwohnungsbau. Mit diesen weitergehenden Handlungsoptionen sowie auch der Übertragung der Erkenntnisse auf den Neubau befasst sich Kapitel 1.6.3.

Abschließend ist anzumerken, dass die „Energetische Gebäudesanierung“ ein überschaubarer Aspekt der gesamten Klimapolitik ist. Das im Rahmen dieses Gutachtens bearbeitete Thema wird im Kapitel 1.6.4 abschließend in den Gesamtkontext der Zielsetzung „Klimaneutralität“ eingeordnet.

Die Aussagen zur Erreichung der Klimaziele durch die „Energetische Gebäudesanierung“ basieren schwerpunktmäßig auf den Untersuchungen des gesamten Wohngebäudesektors der Makroperspektive. Handlungsoptionen zur Förderpolitik für die „Energetische Gebäudesanierung“ leiten sich dagegen eher aus dem Blick auf die einzelne Maßnahme in der Mikroperspektive ab. Neben den eigenen Bilanzergebnissen wird ergänzend verfügbare Literatur – in Form anderer Makrostudien, Gutachten und Stellungnahmen – in Bezug genommen.

1.6.1 Datengrundlagen für Entscheidungen in Politik und Wissenschaft

Die Entscheidungen zur nationalen Klimapolitik beruhen auf einer Reihe von – teils internationalen – Vereinbarungen zu Minderungsquoten (Endenergie, Primärenergie) bezogen auf unterschiedliche zurückliegende Zeitpunkte (vorrangig 1990) sowie Anteilsquoten bestimmter Energieträger (Regenerativanteil an der Wärme und am Strom) bezogen auf unterschiedliche zukünftige Zeitpunkte. Vielfach werden Nachjustierungen einzelner Größen vorgenommen, wenn neue Klimaziele ausgerufen werden.

Emissionsbudget als Kontrollinstrument

Aus Sicht der Gutachter wäre es sinnvoll, alle Klimaschutzziele zu einer gemeinsamen Kenngröße zusammenzufassen, dem „Emissionsbudget“. Mit dieser Größe operiert auch der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderung seit 2009 [40].

Anstelle von vielen separaten Minderungsquoten und Ausbauanteilen erscheint den Gutachtern das „verfügbare Emissionsbudget“ als übergeordnete Ziel- und Kontrollgröße der Klimaschutzpolitik primär geeignet. Es ist mit ihm umzugehen wie mit einem „Kontomodell“.

Zu einer maximal tolerierbaren Erderwärmung – z. B. 2°C – gehört ein verfügbares Emissionsbudget. Es wird im Sinne eines „Anfangsguthabens“ auf das Konto gebucht.

Am Ende jedes Jahres werden die zurückliegenden registrierten Emissionen vom Guthaben „abgebucht“. Maßnahmen, die zu einer Emissionsminderung führen, vermindern die jährliche „Abbuchung“ (so, dass das Budget geschont wird). Nur Maßnahmen, die aktiv Emissionen binden (Aufforstung, CO_2-Abspaltung usw.) führen zu „Aufbuchungen“.

Es gibt keine Zeitachse im eigentlichen Sinne, sondern lediglich das Verbot, das „Konto ins Minus zu führen“ (das Emissionsbudget komplett aufzubrauchen). Es ist somit unerheblich, welcher Sektor wie schnell einen Wandel vollzieht.

Ist das Konto jedoch bei null angekommen, ist das Eingangs definierte Klimaziel nicht mehr erreichbar. Die vorher definierte Erderwärmung ist eingetreten oder wird in Kürze eintreten.

Eine neue Zieldefinition – z. B. 2,5°C – führt zu einer erneuten „Aufbuchung“ von Guthaben, also Emissionsbudget. Anschließend beginnt der Kreislauf von neuem, jedoch ist nun allgemein bekannt, dass das vorherige Ziel aufgegeben wurde bzw. nicht erreicht wurde.

Nach dieser Logik verzichten die Verfasser des vorliegenden Gutachtens beispielsweise darauf, das 1,5°C-Ziel als Anfangswert zu benennen, sondern starten gleich mit 2°C. Das Budget für den Zielwert 1,5°C ist bereits aufgebraucht, siehe Kapitel 1.5.3. Dieser Temperaturanstieg ist aus heutiger Sicht bereits eingetreten.

Die Ausgestaltung der Klimaschutzmaßnahmen ist davon unberührt. Es wären weiterhin Unterziele (Ausbauquoten regenerativer Energien usw.) zu definieren. Auch kann das Gesamtbudget den Sektoren zugewiesen werden, beispielsweise – wie auch im Makroteil dieses Gutachten erfolgt – dem Sektor „Gebäude“ oder nur den „Wohngebäuden“.

Jedoch erscheint eine übergeordnete Budgetdarstellung den Gutachtern greifbarer zur kurzfristigen Überprüfung des (politischen) Handelns. Es wäre am Ende jedes Jahres direkt (im Sinne eines „Kontoauszuges“) erkennbar, ob das Budget eingehalten wurde. Anhand der „jährlichen Abbuchungen“ kann auch die vorhersehbare Kontoüberziehung abgeschätzt werden – also auf welche Klimaerwärmung das (extrapolierte) Handeln zusteuert.

Sektorabgrenzung und Sektorkopplung

Zum Ausrufen von Budgetzielen für einzelne Sektoren und auch der Überprüfung der Zielerreichung wäre es hilfreich, eine eindeutige Festlegung zu treffen, wo die Sektorengrenzen verlaufen.

Im Rahmen dieses Gutachtens und der vorgelagerten Datenrecherche ist aufgefallen, dass eine Uneinigkeit bzgl. der Zuordnung von Emissionen für von Gebäuden bezogenen Strom und Fernwärme zum Sektor „Gebäude“ oder zur „Energiewirtschaft“ herrscht. Es scheint teilweise im Ermessen der jeweiligen Gutachter oder Berichterstatter zu liegen, ob nach Quell- oder Verursacherprinzip bilanziert wird.

Im deutschen Klimaschutzgesetz und für die internationale Berichterstattung gehören diese beiden Aspekte nicht zum Sektor „Gebäude“, nach der Europäischen Gebäuderichtlinie EPBD jedoch zumindest teilweise (jeglicher Strom, außer Haushaltstrom; die gesamte Fernwärme).

Die Autoren des vorliegenden Gutachtens haben nach dem „Verursacherprinzip“ bilanziert und den Bilanzrahmen auf jegliche Energieform erstreckt, die ein Gebäude bezieht (Fernwärme, jeglicher Strom, auch Haushaltsstrom). Dies erschien – der Aufgabenstellung nach – zweckmäßig. Ob diese Logik allgemein die präferierte ist, kann nicht beurteilt werden.

In jedem Fall ist das Problem beim Vergleich von Studien oder beim Abgleich zwischen Ziel und Zielerreichung zu beachten. Für politische Entscheidungen ist dies also ebenfalls relevant.

Wird nach dem „Quellprinzip“ bilanziert, dann gehören die Emissionen für Strom und Fernwärme zur „Energiewirtschaft“. Würden beispielsweise alle Gebäude ausschließlich an Fernwärme und Stromnetze angeschlossen, ergäben sich im Sektor „Gebäude“ dann keine Emissionen mehr.

Emissionsfaktoren

Eine ähnliche Problemlage resultiert für die Bereitstellung von Emissionsfaktoren der einzelnen Energieträger. Hier spielt die Festlegung eine Rolle, ob Exporte bzw. Importe von Energieträgern berücksichtigt werden oder nicht.

Es ist festzustellen, dass die Faktoren von „GEMIS“ (z. B. nach [159]) und UBA (z. B. nach [113]) nicht identisch sind. Ob eine Harmonisierung politisch angestrebt werden sollte, können die Gutachter nicht einschätzen, sehen es aber – aus Sicht der eigenen Arbeit – als sinnvoll an.

Dauerhaftes Verbrauchsmonitoring

Die Überprüfung der Zielerreichung von entweder vorher festgelegten Einsparzielen und Regenerativanteilen oder Emissionsbudgets erfordert ein Monitoring. Die erforderlichen Bilanzen des gesamten Sektors „Gebäude“ sind jeweils eine Mischung aus „Top-Down“ und „Buttom-Up“-Berechnungen.

Zurzeit wird regulär auf die Daten der AGEB zurückgegriffen, so auch in diesem Gutachten (detailliert siehe Anhang 5.4.1). Es lässt sich aber feststellen, dass die AGEB-Werte für die Wohnbauten (beim Rückrechnen auf Einzelobjekte, also „Top-Down“) merklich geringer ausfallen als alle veröffentlichten Verbrauchskennwerte von Gebäuden, siehe auch Anhang 5.2.

Es bedarf nach Ansicht der Gutachter einer breiteren Datenbasis zur Beurteilung realer Verbrauchswerte für Gebäude (Wohn- und Nichtwohnbauten), mindestens unterteilt in die Anwendungssparten „Heizung“, „Warmwasser“, „Haushaltsstrom/Nutzerstrom“ sowie „Kälte/Raumlufttechnik“ und verknüpft mit Faktoren der Gebäudegröße (Fläche, Nutzerzahl) und dem Baualter.

Das setzt voraus, dass eine nennenswerte Anzahl von Gebäuden entsprechende Energiezähler aufweist und mindestens eine repräsentative Stichprobe dauerhaft erfasst wird. Das gilt auch für evtl. nutzbar gemachte regenerative Energien, so dass über deren Höhe nicht mehr rechnerisch spekuliert werden muss (siehe Anhang 5.10.1).

Sofern die immer gleichen Objekte in ein Langzeitmonitoring integriert würden und jährlich Bericht erstatten, ließen sich in sehr viel kürzeren Zeitintervallen auch Aussagen zu Sanierungsfortschritten ableiten. So könnte kurzfristig – und nicht auf Basis punktueller Forschungsvorhaben (z. B. IWU Datenbasis, veröffentlicht 2010 [6] und 2018 [7]) mit fast einem Jahrzehnt Versatz – politisch gesteuert werden.

Diese Forderung wird auch von anderer Seite, z. B. der Stiftung Energieeffizienz 2018 [10] oder dem IWU unterstützt. Ob und wie die laut BMWi [11] dafür beauftragte Bundesstelle für Energieeffizienz diesen Wunsch erfüllen kann, können die Gutachter nicht beurteilen.

Sanierungsaktivität statt nur Sanierungsrate

Aus den Annahmen für dieses Gutachten resultiert die Erkenntnis, dass es sinnvoll ist, die Sanierungsaktivität nicht allein auf Basis der „Sanierungsrate“ zu bewerten. Sie beschreibt zunächst einmal nur den Faktor „Zeit“, d. h. die Anzahl von Sanierungen in einem Zeitintervall.

Jedoch ist allein mit einer Beschleunigung von energetischen Sanierungen noch keine ausreichende Emissionsminderung gegeben, wenn auch ein guter Anfang gemacht wird. Für die baulichen Sanierungen ist auch die „Sanierungstiefe“ (z. B. dämmdickenabhängig) relevant, für anlagentechnische Maßnahmen die Wechselquote zu weniger emissionslastigen Erzeugern zu definieren (teil-regenerativen Erzeugern, z. B. Wärmepumpen).

Politische Maßnahmen – Fördermittel insbesondere – zielen nach Ansicht der Gutachter möglichst nicht nur auf erhöhte Sanierungsraten für einzelne Bauprodukte ab, weil das zu Vorzieheffekten führen kann, die in den Folgejahren fehlen (vgl. auch Simons [120]), sondern sollten auch die Verbesserung der Standards anstreben.

In jedem Fall ist die Kenntnis über die reale Wechselquote von Erzeugern, erzielte tatsächliche Energieeinsparungen, verbesserte Hüllqualitäten – z. B. über einen Mikrozensus oder als Dauermonitoringaufgabe – aus Sicht der Gutachter sehr hilfreich. Basis können Messwerte aus einer einfachen Zählerausstattung sein, siehe auch Anhang 5.3.3.

1.6.2 Erhöhung der Effizienz energetischer Sanierungen

Mögliche Handlungsfelder, die nach Ansicht der Gutachter zu einer Erhöhung der Effizienz von Sanierungen führen, werden nachfolgend beschrieben. Es wird der Weg vom Zustand vor der Sanierung bis zum Monitoring der Erfolge danach verfolgt.

Vor der energetischen Sanierung: Informieren und Planung auf Vorrat

Die wichtigste Einflussgröße ist die **Information der Gebäudebesitzer**. Die mögliche politische Einflussnahme besteht in der Durchsetzung der Informationspflichten sowie einer Sicherstellung der dazu notwendigen Finanzierung.

Für die privaten Endverbraucher eignen sich nach Ansicht der Gutachter permanente und unaufgefordert gelieferte Informationen zu den Themen „CO_2-Fußabdruck“, „Erzeugereffizienzen“ und „Baustandards“. Die Daten lassen sich aus einer Minimalmesstechnik generieren, auch die digitale Datenerfassung (SmartMeter) ist relevant. Mögliche Informationspfade sind öffentliche Aushänge im Mietwohnbau (zukünftig modifizierter Energieausweis), Heizkosten- oder Energieabrechnungen, Informationsaufgaben der Schornsteinfeger o. ä. Die Daten sind bestenfalls sachlich, verständlich und transparent sowie weisen einen klaren Objektbezug auf (vgl. auch Forderungen und Vorschläge der Stiftung Energieeffizienz 2018 [10], Pehnt et al. [34], IWU 2013 [62] und BAK 2018 [50]).

Mit der ungefragten Adressierung über verschiedene Kanäle werden Kennwerte etabliert. Auch die Kenntnis typischer Verbrauchskennwerte für PKW (Liter pro 100 km) sind heute in der breiten Bevölkerung präsent. Das Ziel wären analoge, im Grundwissen verankerte Werte für den „persönlichen CO_2-Fußabdruck“, den typischen „Verbrauch für Gebäude in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr“, den typischen „Verbrauch von Wasser und Strom pro Kopf“.

Auch kostenlose Stromsparchecks der Verbraucherberatung für einkommensschwache Haushalte ließen sich ausweiten und auf Wärmechecks erweitern (BUND 2017 [32]). Ein weiterentwickelter Energieausweis, z. B. als „Klimaschutzausweis“ (BAK 2018 [50]) könnte als Informationslieferant dienen.

Für die private und kommunale Wirtschaft könnten verpflichtende Teilnahme an **Energie/Umweltnetzwerken** (BUND 2017 [32]) hilfreich sein, zunächst einmal ein Bewusstsein für das eigene Handeln aufzubauen. Auch die Einführung von „Energiebeauftragen“ auch für die Privatwirtschaft analog dem Vorgehen der Stadt Frankfurt wäre denkbar. Andere Gutachter sprechen von Verbänden der „regionalen Akteure“ (Weiß et al. 2018 [64]) oder „Sanierungslotsen“ (Pehnt et al. 2015 [34]).

Eine Verbesserung der Durchsetzung von energetischen Sanierungen dürfte gegeben sein, wenn allen Energieverbrauchern klar aufgezeigt wird, wie der eigene Verbrauch und die eigenen Emissionen sich zurzeit darstellen, welche Werte typisch sind, welche Optionen für eine Verbesserung des Fußabdrucks vorhanden sind und wer potentielle Ansprechpartner sind.

Für die Planerschaft erscheint aus Sicht der Gutachter eine offene, digitale Datenbank mit **„best case“ und „worst case“ Dokumentation** (im Sinne einer Bauschadensdatenbank, in permanenter Aktualisierung wie Baukostendatenbanken) von Projekten der energetischen Sanierung angebracht. Dies leitet sich aus den in der Praxis immer wiederkehrenden Fehlern, damit verbundenen Effizienzverlusten und Vorurteilen ab (vgl. Anhang 3.2 ff. der Mikroebene). Es wäre politisch eine Festlegung zu treffen, welche Institution (DIBt, Verbraucherzentrale, Hochschulverbund, DENA/Landesenergieagenturen usw.) mit dieser Aufgabe betraut werden könnte und wie die Verpflichtung zur Datenlieferung aussehen könnte. Beispielsweise können alle Forschungsnehmer über die beforschten Gebäude und Anlagen Auskunft geben, aber auch unabhängige Stichproben aus den Projekten der Bundesförderung (BEG) generiert werden.

Für die Umsetzung von Maßnahmen zur energetischer Sanierung erscheinen den Gutachtern auch Ansätze einer „**Planung auf Vorrat**“ sinnvoll. Dies ergibt sich aus der Sachlage, dass ein Großteil aller Maßnahmen sehr lange herausgezögert wird und an das Lebensende des Bauproduktes gekoppelt wird (vgl. Anhang 5.9.1). Insbesondere für Wärmeerzeuger, Speicher und Pumpen heißt dies, dass vom Defekt bis zum notwendigen Ersatz keine Zeit für Planung bleibt. Es liegt auf der Hand, dass diese Planung nicht Jahrzehnte im Voraus erfolgen kann, jedoch 10 Jahre vor Ende der planmäßigen Nutzungsdauer erscheint sie den Gutachtern als sinnvoll.

Dem könnte begegnet werden, wenn es die Verpflichtung zur Erstellung eines individuellen Sanierungsfahrplanes (**iSFP**) geben würde. Somit läge im Bedarfsfall zumindest das Konzept schon vor, auch wesentliche Leistungsdaten wären bekannt (z. B. zur Vermeidung von Überdimensionierung beim nächsten Wechsel des Wärmeerzeugers). Statt der allgemeinen Verpflichtung könnte es auch abgemindert wenigstens eine verpflichtende Energieberatung bei Eigentümerwechsel geben (BDH /DENA [31]). Das Institut Wohnen und Umwelt sieht als Vorstufe eine einheitliche Dokumentation/ Datenbank mit Rahmendaten zum Gebäude und der Ausstattung (IWU 2013 [62]), um schnell handlungsfähig zu sein. Im Nichtwohnbau könnten verpflichtende **kommunale Energiekonzepte** (BUND 2017 [32]) die Arbeitsfähigkeit im Bedarfsfall erhöhen. Für Neubauten mit BIM-basierter Planung ließe sich das Datenmodell weiter pflegen, bis der Sanierungsfall eintritt.

In jedem Fall wäre die politische Einflussnahme der Gesetzeslage dahingehend zu überdenken, die Menge an schnell verfügbaren Informationen, über die ein Gebäudebesitzer verfügt, wesentlich zu steigern.

Energetische Sanierung konkret: technische Planung

Ist der Entschluss zu einer energetischen Sanierung gefallen, steht die technische Planung an. Auch hier sehen die Gutachter zahlreiche Eingriffspunkte, um das System effizienter zu machen und die Erfolgsquote einer Sanierung zu verbessern.

In erster Instanz erscheint es den Gutachtern angebracht, das Klimaschutzziel – also die Emissionsminderung, rechnerisch bestimmbar über den **Emissionsfaktor** der Energieträger – erkennbar in den Fokus der Planung zu setzen. Insbesondere weil eine Diskrepanz zwischen Primärenergiefaktor und Emissionen herrscht (vgl. Anhang 4.3.3 und 4.3.4), beispielsweise für die fossilen Energieträger Gas und Heizöl im Vergleich.

Über die Frage, ob die Emissionsfaktoren zusätzlich (u. a. BAK 2018 [50]), mittelfristig alleinig (u. a. DV 2019 [51], GDW 2019 [52]) oder sofort (co2online / Fraunhofer ISE / Ostfalia 2015 [53], Stiftung Energieeffizienz 2018 [10]) verwendet werden, herrscht keine Einigkeit. Nach Ansicht der Gutachter wäre ein schneller Umstieg auf CO_2 als Bewertungsgröße sinnvoll, um im Gleichklang mit einer Informationskampagne zum „gesamtdeutschen Emissionsbudget“ und dem „persönlichen CO_2-Fußabdruck“ jedes Bürgers argumentieren zu können.

Diese Forderung widerspricht allerdings der „Langfristigen Renovierungsstrategie nach EPBD“, welche in dem Bericht des BMWi an die EU in 2020 abgegeben wurde [11]. Die politische Einflussnahme könnte darin bestehen, das Nachweisverfahren der Planung (namentlich das GEG) in Richtung „Emissionsbewertung“ zu ändern.

Ein weiterer Aspekt liegt in der Vereinfachung der Planung selbst. Die Vorstellungen der beteiligten Kreise differieren. Während die Architektenkammer u. a. moderat die Verwendung eines gemeinsamer Rechenkerns für die Software fordert (BAK 2018 [50]), stellt der Deutsche Verband für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung das komplexe Nachweisverfahren für die Sanierung insgesamt in Frage (DV 2019 [51]).

Die Gutachter plädieren seit längerem für einen **vereinfachten Nachweis mit einzelnen Nachweisgrößen** (u. a. in Schünemann et al. [163]) ohne dass der Bedarf als solches die Anforderungsgröße ist. Selbstverständlich müssten dabei Mindestanforderungen an die Gebäudehülle und an die Anlagentechnik als Einzelanforderungen (maximale Wärmedurchgangskoeffizienten, minimale Wirkungsgrade, notwendige Rohrleitungsdämmdicken usw.) erfüllt werden – ein Verfahren, das sich vor Einführung der EnEV und des EEWärmeG mit den früheren Wärmeschutz- und Heizungsanlagenverordnungen bewährt hat. Ein deutlicher Vorteil des skizzierten Verfahrens von Einzelanforderungen wäre der konsequente Verzicht auf komplizierte Berechnungen und unzählige Annahmen für die Nachweisführung. Das Ergebnis wird ehrlicher und spiegelt die realen Bedingungen wider. Weiterhin ist eine Kontrolle schnell und einfach (auch für den Nutzer nachvollziehbar) durchführbar.

Es werden daher nach Ansicht der Gutachter für Bestandsmodernisierungen nur „**best practice-Technologien**" eingesetzt, wenn sie das Wirtschaftlichkeitsgebot (ggf. unter Berücksichtigung von Fördermitteln) im Laufe ihrer planmäßigen Lebensdauer erfüllen (vgl. auch Jahnke et al. 2015 [53]). Diese Option ist gut kombinierbar mit dem Verfahren des Einzelnachweises. Denn die vielfachen Abhängigkeiten der einzelnen Effizienzprodukte spielten dann zumindest im Nachweis keine Rolle.

Das **Kompensationsprinzip** zwischen den Maßnahmen wäre damit nur noch sehr **stark eingeschränkt** wirksam (je nach Ausgestaltung der Anforderungen). Es gäbe nach Ansicht der Gutachter zumindest keine ineffizienten Wärmeerzeuger mehr in hochwärmegedämmten Baukörpern, aber auch keine hocheffizienten Erzeuger mehr in mäßig gedämmten Gebäuden. Aus Gründen der schon sehr weit fortgeschrittenen Ausschöpfung des Emissionsbudgets (vgl. Kapitel 1.5.3) erscheint den Gutachtern dies auch nicht mehr zeitgemäß. Zudem lassen sich insbesondere unterlassene Dämmmaßnahmen später praktisch kaum noch durch eine nachträgliche Dämmung nachholen.

Damit wären **ambitionierte, aber erreichbare Ziele** der Schwerpunkt von Forderungs- und Förderpolitik.

Eine Einsparprognose (also eine rechnerische Energiebedarfsberechnung) wäre weiterhin Teil der Planung einer energetischen Sanierung, jedoch kein Teil des Nachweises mehr. Dies käme der Forderung z. B. der Bundesarchitektenkammer (BAK 2018 [50]) oder des Institutes Wohnen und Umwelt (IWU 2019 [22]) entgegen, die sich für die Beratung von Endkunden **realistische Einsparung (keine Normwerte oder der Realität angepasst Normen)** und einen weiterentwickelten Energie- oder Klimaschutzausweis wünschen.

In diesem Zusammenhang ließe sich auch der Flächenbezug auf die fiktive „Nutzfläche nach EnEV" (vgl. Anhang 5.1.2 und 5.1.5) zugunsten der Wohnfläche (oder einer anderen dem Gebäudebesitzer bekannten Fläche) oder auch anderer Größen (insbesondere der Personenbelegung) abschaffen. Dies ändert zwar nichts an der Einsparprognose, schafft aber mehr Transparenz und damit voraussichtlich mehr Akzeptanz.

Weiterführende Ideen sind die Ausweitung **verpflichtender Sanierungsmaßnahmen** – über die Dämmung der obersten Geschossdecke oder den Kesseltausch nach 30 Jahren hinaus. Nach Ansicht der Gutachter ließen sich alle Maßnahmen, die in der Mikroebene (vgl. Kapitel 1.4.2 bis 1.4.6) als „fördermittelfrei" identifiziert wurden, verpflichtend einfordern. Der angepasste Vollzug wird auch unter Fachleuten diskutiert. Weiß und Vogelpohl schlagen angepasste Grundsteuern vor [164].

Sanierungsmaßnahmen könnten zudem deutlich stärker als heute an den Eigentümerwechsel gekoppelt werden. Es wird u. a. eine angepasste Grunderwerbssteuer für sanierte Objekte vorgeschlagen oder eine teilweise Rückerstattung, wenn in einem festgelegten Zeitraum nach Kauf saniert wird (vgl. Weiß et al. [64], Weiß und Vogelpohl [164], Pehnt et al. [34]). Dies kann bevorzugt mit einem konsequenten Monitoring und einer Energieanalyse aus dem Verbrauch gekoppelt werden, so dass aus den Ergebnissen nicht nur der Erfolgsnachweis erbracht werden kann, sondern auch Grundlagen für eine zusätzliche Besteuerung bei Mehrverbräuchen oder für eine Belohnung für verminderte CO_2-Emissionen gegeben sind.

Zuletzt wäre eine politische Handlungsoption darin gegeben, die Qualitätssicherung verpflichtend als Teil der Planung vorzuschreiben (Aufnahme in das GEG). Dies betrifft das luftdichte und wärmebrückenarme Bauen auch im Bestand sowie den sommerlichen Wärmeschutz. Für den Bestand ergäbe sich darüber hinaus auch die Verpflichtung zur nachträglichen Umsetzung eines hydraulischen Abgleichs von Heizungsanlagen, den auch die Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz (DENA / GEEA 2019 [165]) fordert.

Energetische Sanierung konkret: finanzielle Planung und Fördermittel

Auch für die **Förderung** von Maßnahmen sehen die Gutachter eine Handlungsoption darin, einen klaren **Bezug zu den Klimazielen** herzustellen, d. h. die Förderung von einer Einsparung an CO_2 abhängig zu machen. Alternativ werden Einzelanforderungen etabliert, die eine konkrete Bilanzierung überflüssig machen. Dies ist bereits im Neubau für das KfW-geförderte „Effizienzhaus 55 nach Referenzwerten" der Fall.

Für alle Maßnahmen wäre es nach Ansicht der Gutachter zielführend, die **Höhe von Bundesfördermitteln nach** dem **äquivalenten CO_2-Preis** auszurufen (also die Kapitalkosten im Verhältnis zur erzielten Emissionsminderung). Das Vorgehen ist in diesem Gutachten beschrieben, Ergebnisse sind für alle Einzelmaßnahmen verfügbar (vgl. Kapitel Mikroperspektive Kapitel 1.4.2 bis 1.4.6). Dies gilt auch und insbesondere für Nahwärmenetze, die regelmäßig zwar sehr gute Gesamteinsparungen erzielen, aber auch sehr kostenintensiv sind (Gegenargumentation siehe IFEU [166]).

Folgt man dem Wunsch der Fachplanerschaft, aber auch der Immobilienbesitzer (BAK 2018 [50], GDW 2019 [52]) führt eine **verstetigte Förderung** nicht nach Haushaltslage zu einer sanierungsfördernden Stimmung.

Die Gutachter möchten dazu anmerken, dass nicht nur die langfristige Planungssicherheit das Ziel politischer Handlungen sein könnte, sondern auch eine langfristige Festlegung rückläufiger Zuschüsse – in Anlehnung an die sinkende EEG-Umlage. Da insbesondere die nächsten 10 bis 15 Jahre für die Emissionsminderung wichtig sind, ließe sich mit leicht (!) degressiven Zuschüssen die Umsetzung voraussichtlich beschleunigen. Wird der Degressionszeitraum lang gewählt, werden Mitnahmeeffekte gemindert und der Handwerkermarkt nicht überlastet.

Die vielfach in anderen Gutachten (BAK 2018 [50], BUND 2017 [32]) vorgeschlagene **Bündelung der Fördermittel** (KfW und BAFA) wurde unterdessen durch das BEG [30] umgesetzt. Mit einigem Abstand zum Inkrafttreten der „Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung – EnSanMV" [29] ist haushalterisch zu prüfen, ob es Konkurrenz zwischen den Förderprodukten gibt, die dann abzuschaffen sind. Langfristig sind ggf. auch diese beiden Förderoptionen (wieder) zu vereinen.

Für die Finanzierung von energetischen Sanierungen in **einkommensschwachen Haushalten** (private Eigentümer, aber auch vermieteter, v. a. sozialer Wohnungsbau) sind gesonderte Maßnahmen zu ergreifen. Weiß und Vogelpohl schlagen vor, den Einsatz von Riesterrenten nicht nur für Immobilienkauf, sondern auch für die Sanierungen zu öffnen [164]. Das IWU (IWU 2013 [62]) sieht im sozialen Wohnungsbau eine „Objektförderung für Sanierung" (nicht Subjektförderung der einzelnen Person) als zielführend an.

Letztlich ist eine politische Handlungsoption darin gegeben, die **Qualitätssicherung** noch stärker in die Förderlandschaft einzubeziehen (vgl. auch Neuhoff et al. DIW 2011 [167]). Dies betrifft nicht nur die konkrete Planung und Umsetzung (Gebäudedichtheitsmessung, Wärmebrückenoptimierung, hydraulischer Abgleich usw.), sondern auch die vorbereitenden Maßnahmen, z. B. der Einbau von Zählern (vgl. auch das entsprechende Förderprogramm von Bremer Energiekonsens und proKlima [70]).

Monitoring nach Abschluss der energetischen Sanierung

Nach einer energetischen Sanierung erscheint den Gutachtern ein **(dauerhaftes) Monitoring** mit klarer Darstellung der Erfolge oder Misserfolge als zielführend. Diese Forderung teilen auch die BAK [50] sowie der GDW [52]. Letzterer fordert damit verbundene rechtliche Rahmenbedingungen, die entstehenden Kosten z. B. über die Heizkostenabrechnung umzulegen.

Diese Maßnahme bietet die Option, im Rahmen der Gewährleistung eventuelle Defizite noch zu beheben, so dass langfristig wiederkehrende Planungs- und Ausführungsfehler minimiert werden, aber auch der Erreichung der Klimaschutzziele Rechnung getragen wird.

Die Gutachter regen zur mehrfach in diesem Gutachten angesprochenen **„Energieanalyse aus dem Verbrauch (EAV)"** an. Das Verfahren bietet auf Basis einer überschaubaren Ausstattung mit Messtechnik und mit geringem personellen Aufwand eine Reihe von Erkenntnissen und Ansatzpunkte zur Qualitätssicherung (siehe auch Anhang 5.3.4).

Die Verwendung der EAV mit Abschluss der energetischen Sanierung und/oder Inbetriebnahme als laufende Qualitätskontrolle kann allen Beteiligten helfen, unerkannte Fehler schnell zu entdecken und die Anlagentechnik und das Nutzerverhalten zu optimieren. Die Forderung wird bekräftigt durch die Überlegungen der Stiftung Energieeffizienz 2018 [10].

Die Hinweise zum „Technischen Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung“ des AMEV können dazu hilfreich sein. Es ordnet das Monitoring in die Leistungsphasen der HOAI ein und gibt ebenfalls typische Aufwendungen und Nutzen an [168].

Das **Monitoring** kann selbstverständlich auch **als Daueraufgabe** angesehen werden und in bundesweite Strukturen überführt werden. Eine Kostenschätzung für die Dauerdienstleistung „Monitoring“ sowie deren Nutzen liefert auch der Artikel von Linder aus dem Jahr 2018 [169]. Anhand der Daten der Stadt Frankfurt (nur Nichtwohnbau) kann abgeschätzt werden, dass eine etwa 5 Mal so hohe Energiekostenersparnis erzielbar ist als es den Personalkostenaufwendungen entspricht. Für die kommunalen Gebäude der gesamten Republik (230 Mio. m² Nettogrundfläche) würden 1750 Personalstellen für das Monitoring benötigt.

Überträgt man die Zahlen auf den gesamten Wohnungsbau, der etwa um den Faktor 16 mehr Fläche aufweist, würden sich knapp 28.500 Personalstellen ergeben. Diese könnten für das Monitoring und alle damit zusammenhängenden Dienstleistungen zuständig sein, d. h. die Verbrauchsdatenerfassung, konkrete Auswertungen, Unterbreitung von Verbesserungen, Nutzerschulung, Überprüfung von Fördermittelansprüchen usw. Da dies etwa einer Personalstelle für fast 3000 Personen betrifft, wäre nur ein niederschwelliges und kostengünstiges Monitoring gegeben. Zum Vergleich: in der gesamten Energiewirtschaft sind fast 10 Mal so viele Personen heute schon beschäftigt.

Die Gutachter regen eine politische Diskussion an, ob und wie eine solche übergeordnete Monitoringinstanz gewünscht ist und welcher Institution diese Aufgabe übertragen werden könnte. Die Ergebnisse wären allemal die optimale Voraussetzung für die in Kapitel 1.6.1 angesprochenen „erweiterten Datengrundlagen“.

Monitoringergebnisse spiegeln auch das Nutzerverhalten wieder. Das Monitoring enthält daher optimalerweise eine qualifizierte Nutzeraufklärung und -schulung. Da davon ausgegangen werden kann, dass den Nutzern teilweise ein tieferes Systemverständnis fehlt, wie „Gebäude und Anlagentechnik im Zusammenspiel“ funktionieren, welche Handlungen welche Folgen haben und wie sie das System optimal bzw. weniger ineffizient nutzen. Im Vergleich zum PKW – mit einer Darstellung des aktuellen Verbrauchs – kann auch digitale Ausstattung (SmartMeter, Apps usw.) genutzt werden, um das Verhalten zeitnah zurückzuspiegeln und gegebenenfalls selbständig Hinweise zu Verbesserungen liefern.

1.6.3 Weitergehende Handlungsoptionen

Neben den direkt mit der energetischen Sanierung verbundenen Handlungsoptionen gibt es indirekte. Diese werden nachfolgend besprochen.

Veränderte Energieträgerbepreisung

Die Energieträgerbepreisung kann als wichtigste Vorbedingung für alle Handlungsoptionen zur Finanzierung der energetischen Sanierung identifiziert werden. Im Rahmen des Gutachtens konnte im Kapitel 1.4 detailliert herausgearbeitet werden, dass die derzeitige Energieträgerbepreisung nicht kompatibel mit einem (schnellen) Umstieg auf emissionsärmere Energieträger (hier vor allem Strom) ist. Selbst mit einer 100 %-Förderung von Wärmepumpen ist das System nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig gegenüber Gas oder Heizöl, siehe Kapitel 1.4.3.

Es ist eine veränderte Energieträgerpreisung vonnöten. Hierin sind sich praktisch alle von der Energiewendethematik betroffenen Akteure sowie mit Studien betraute Forschungseinrichtungen und Gutachter einig (AGORA 2017 [170], BDH /DENA 2019 [31], Prognos 2020 [171], Gäthke 2020 [172], Pehnt et al. 2015 [34], Mahler et al. UBA 2019 [173] , BAK 2018 [50], DMB 19 [59] u. v. w.).

Hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung ist lediglich der Trend einheitlich: es ist eine Absenkung der Strompreise gegenüber den anderen Energieträgern erforderlich. Ob dies durch Senkung oder Streichung (z. B. Stiftung Umweltenergierecht und DENA 2020 [153]) der EEG Umlage, eine dynamische EEG-Umlage (Gerhardt et al. 2015 [43]), teilweise oder gänzliche Abschaffung von EEG-Privilegien (BUND 2017 [32]), Abschaffung und/oder Umverteilung der Stromsteuer mit Heraufsetzen der Fossilpreise erfolgt, ist eine Frage der Ausgestaltung.

Die Gutachter haben im Rahmen dieses Gutachtens für Mikro- und Makroperspektive (Kapitel 1.4.9 und 1.5.6) nachgewiesen, dass auch ein rein auf CO_2-Emissionen basierendes Preismodell geeignet wäre, um die notwendigen Investitionskostenzuschüsse einer Anreizförderung deutlich zu mindern.

Vor einer weiteren Ausgestaltung der künftigen Förderpolitik des BEG oder der EnSanMV, aber auch der Verordnungs- und Gesetzgebungspolitik (GEG, EEG, KWKG usw.) ist allerdings zu entscheiden, in welche Richtung die Energiepreise sich entwickeln sollen – da Fördertatbestände direkt von den Energieträgerpreisen abhängen (bis auf reine Anreizförderung, die lediglich die Umsetzung beschleunigen sollen, aber nicht für die Wirtschaftlichkeit selbst erforderlich wären).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich zukünftige Energiepreise für rein regenerative Energien allein aus Investitionen ergeben bzw. aus Investitionen der Gebäudeeigentümer (Ausbau PV auf jedem möglichen Dach, Mieterstrom usw.). Die Sektorzuordnung „Energiewirtschaft" und/oder „Gebäude" sowie zukünftig auch „Mobilität" wird dabei natürlich auch komplexer, wenn man die Sektorentrennung im Klimaschutzgesetz beibehält.

Angepasste Rahmendaten für Mieter-Vermieter-Konstellationen

Unmittelbar von einer veränderten Energieträgerbepreisung, aber auch von veränderten Rahmendaten der energetischen Sanierung betroffen ist das Mieter-Vermieter-Verhältnis. Steigen die Preise der fossilen Energieträger (z. B. durch eine andere Art der Energieträgerbepreisung), steigen zunächst die Warmmieten für die Mieter an. In einem solchen Umfeld lässt sich mit einer energetischen Sanierung eher eine Warmmietenneutralität erreichen als unter heutigen Randdaten.

Die Investitionsaufwendungen der Sanierung werden auf die Mieter umgelegt. Zu der Art und Höhe von **Umlagen** gibt es diverse Vorschläge verschiedener Akteure (Weiß et al. [64], Pehnt et al. [34], IWU 2013 [62], DMB 2019 [59], AGORA 2020 [65] u. a.). Beispielsweise besteht die Option Investitionen nicht kostenabhängig mit festen Quoten, sondern einsparabhängig umzulegen, die Modernisierungsumlage auf das Doppelte der einsparbaren Energiekosten zu begrenzen, nur eine Umlage bis zur Warmmietenneutralität vorzunehmen oder weitgehend Warmmieten einzuführen. Auch örtliche Vergleichsmieten (der zweite limitierende Faktor für die Umlage) könnten den energetischen Standard berücksichtigen („ökologische Mietspiegel"). Auch das pragmatische **Drittelungsmodell** steht zur Diskussion (vgl. BUND 2017 [32]) – ein Drittel der Kosten einer energetischen Sanierung trägt der Vermieter (finanziert durch Kaltmieten und deren Erhöhung), ein Drittel trägt der Mieter (Resultat sind höhere Warmmieten), ein Drittel trägt der Bund (über Förderprogramme).

Darüber hinaus zeigen die eigenen Wirtschaftlichkeitsbewertungen (Grundlagen in Anhang 5.9.3), dass es zielführend wäre, die **Abschreibungszeiträume** der tatsächlichen Lebensdauer von Bauprodukten zumindest näherungsweise anzupassen (vgl. auch Überlegungen des DMB 2019 [59]). So ist es nicht nachvollziehbar, dass beispielsweise das teure, aber vergleichsweise kurzlebige Bauprodukt „Fenster" der praktisch verschleißfreien „Kellerdecke" mit 50 Jahren Abschreibungszeit gleichgesetzt wird. Würden die Bauprodukte angemessen abgeschrieben, ergäbe sich eine gerechtere Kostenverteilung und damit nach Ansicht der Gutachter größere Akzeptanz für Sanierungsmaßnahmen bei Vermietern und Mietern.

Ein weiteres Themenfeld ergibt sich aus der Sanktionierung von Vermietern, die sich nicht an gesetzliche Sanierungsanforderungen halten und somit die Heizkosten der Mieter rechtswidrig erhöhen. Derzeit ist das Streitpotential gering, weil nur wenige Maßnahmen vorgeschrieben sind (EnEV, GEG). Dies könnte sich künftig ändern. Eine Option wäre eine **Begrenzung der Umlagefähigkeit von Heizkosten als Sanktionsmechanismus**, wenn bestimmte energetische Standards nicht eingehalten werden (vgl. Pehnt et al. 2014 [124]).

Jegliche Überlegung zu einer vermehrten Marktdurchdringung von baulichen Sanierungen, Technologiewechseln, veränderter Energieträgerbepreisung usw. ruft auch politischen Klärungsbedarf zum **Nachteilsausgleich** hervor. Es liegen diverse Vorschläge zur Entlastung einkommensschwacher Haushalte vor (DMB 2019 [59], Neitzel et al. 2017 [60], Großklos et al. 2018 [174], IWU 2013 [62]): begrenzte oder keine Umlage von Emissionspreisen der Energieträger, Warmmietenzuschüsse oder Warmmietdeckel, eine Klimakomponente im Wohngeld/ Klimawohngeld. Aber auch Budgetansätze sind denkbar, um energiesparendes Verhalten (Wasser, Strom, kleinere Wohnung) zu belohnen.

Erfolgt der Umbau des Energiesystems mit abgestimmten politischen Maßnahmen, ergeben sich keine wesentlichen bzw. unüberwindbaren volkswirtschaftlichen Belastungen. Dies zeigt eine vom Öko-Institut für den Bundesverband der Verbraucherzentralen durchgeführte Studie, welche die Auswirkungen auf die Sozialkosten der verschiedenen Haushalte untersucht [63].

Abschließend sind die gesetzlichen Rahmendaten für den **Mieterstrom**, d. h. die Weiterverrechnung und/oder Bepreisung von Strom u. a. aus Photovoltaikanlagen anzupassen (siehe Forderungen BBH /DENA [31], DMB 19 [59], GDW [52]). Zur konkreten Ausgestaltung wird auf die genannten Literaturquellen verwiesen, die mehrere Optionen vorstellen.

Anforderungen für den Neubau

Die Überlegungen zur energetischen Sanierungen betreffen indirekt auch den Neubau. Er gibt vor, was technisch machbar und ohne Restriktionen (bei voller Planungsfreiheit) umsetzbar wäre. Es darf vorweggeschickt werden: ein jeder Neubau erhöht zunächst den Verbrauch und schmälert das verfügbare Emissionsbudget. Daher ist eine Sanierung in vielen Fällen einem Neubau vorzuziehen (Begrenzung der Energiemenge, die auch die Herstellung der Rohstoffe bewirkt); auch ein Ersatzneubau ist besser als ein reiner Zubau.

Die Gutachter ziehen nachfolgende Bilanz für mögliche Optionen im Neubau, mit denen die Klimaziele erreichbar wären:

- auch für Neubauten ist der Umstieg auf eine Emissionsbewertung angezeigt; ausschließlich (vgl. Schünemann et al. [163]), übergangsweise zusätzlich (BAK 2018 [50]),
- als Teil der Anforderungen des GEG halten die Gutachter den verpflichtenden Einbau von Zählern zu Effizienzbewertung für angemessen, denn so ist ein Monitoring leicht umsetzbar und die Investitionskosten sind nie wieder so gering wie bei der Ersterrichtung,
- für Neubauten sind Qualitätssicherungsmaßnahmen verpflichtend, also Teil des Anforderungsprofils des GEG (z. B. für die Anlagentechnik in Form des hydraulischen Abgleichs, siehe DENA / GEEA 2019 [165]),
- die Gutachter halten die Verpflichtung auf höhere Standards, den konsequenten Einsatz von „best practice“ Technologien sowie den Verzicht auf eine Kompensation der Maßnahmen untereinander für sinnvoll; sofern dies rechtlich durchsetzbar ist, erscheint es den Gutachtern als zielführend, Förderung und Forderung miteinander zu verknüpfen (vgl. auch DMB 19 [59] und BAK 2018 [50]),
- hinsichtlich der zu erreichenden Standards sehen die Gutachter das Passivhausniveau (vgl. BUND 2017 [32]) sowie vorgeschriebene Nutzung von Photovoltaik (vgl. u. a. Hamburger Klimaschutzgesetz [58]) als realistisch an.

Die konkrete Ausgestaltung wird nach Ansicht der Gutachter allein am Emissionsbudget gemessen. Auch Anreizregelungen für Nachhaltigkeitsaspekte bei Wohnbauten, z. B. einer Fläche-pro-Kopf-Grundsteuerkomponente o. ä. sind Neubauoptionen.

1.6.4 Ausblick auf die generelle Klimaschutzstrategie

Abschließend wird die energetische Modernisierung in die allgemeine Klimaschutzstrategie des Bundes eingeordnet.

Kein „entweder/oder“

Nur durch einen sehr ambitionierten Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung, durch ein beschleunigtes Sanieren von Gebäudehülle und Anlagentechnik auf beste Standards und immer verbunden mit einer Qualitätssicherung und einem verbrauchsorientierten Erfolgsnachweis könnten weitere CO_2-Emissionen vermieden und das noch verfügbare Emissionsbudget für das 2°C-Klimaschutz-Ziel noch eingehalten werden (vgl. Kapitel 1.5.3 und 1.5.5).

Das Ersetzen von „Prozentzielen“ in der politischen Diskussion durch eine Verdeutlichung der Klimaziele über das Kontomodell eines noch verbleibenden Emissionsbudgets ist nach Ansicht der Gutachter von entscheidender Bedeutung für die Kommunikation zwischen Gesellschaft, Wirtschaft und Politik.

Ein Vorziehen einzelner Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle sowie der Austausch fossiler Kessel gegen Wärmepumpen vor Ablauf der Lebensdauer – gestützt durch eine sinnvolle Förderpolitik – könnte den notwendigen Weg zur Klimaneutralität wesentlich beschleunigen.

Zu dieser Erkenntnis kamen bereits früher verschiedene Veröffentlichungen, zuletzt eine Studie des DIW [42] vom Juli 2020. Die Forscher kommen zu der Erkenntnis, dass die CO_2-Emissionen bis 2030 nicht nur um 40 %, sondern um 65 % gegenüber dem Jahr 1990 sinken müssen, um das Emissionsbudget noch einzuhalten. Bis spätestens 2040 ist die Energiegewinnung vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen. Dies sind die Rahmendaten, unter denen die Ziele des „European Green Deal" erreicht werden könnten.

Für die Klimapolitik im allgemeinen und den Gebäudesektor im speziellen bedeutet dies: es ist eine Kombination von „Energiesparen", „Effizienzverbesserung" und „Einsatz regenerativer Energien" mit kurzfristigen Entscheidungen noch in 2020/21 (EEG) notwendig. Für größere Kompensationen – auch zwischen den einzelnen Sektoren - ist die zur Verfügung stehende Zeit (besser das Restbudget an Emissionen) zu gering.

Ausstieg aus fossilen Energieträgern und Ausbau der regenerativen Energien

Notwendig ist ein kurzfristiger Ausstieg aus allen fossilen Energieträgern, zuerst im Neubau, kurz darauf in der Sanierung. Es mehren sich von verschiedenen Seiten daher Forderungen, im Gebäudebereich, wie bereits heute schon in einzelnen EU-Ländern konsequent realisiert, Verbote seitens des Gesetzgebers für fossil mit Heizöl und Erdgas befeuerte Wärmeerzeuger zu fordern (z. B. Gerhardt et al. [43]), um die Klimaschutzziele überhaupt noch einigermaßen einhalten zu können. Die Gutachter schließen sich diesen Forderungen an. Das Ausrufen von Verboten wird dabei so gestaltet und zeitlich gestaffelt, dass für Bauherren und Immobilienbesitzer eine Vorhersehbarkeit und Planbarkeit im Rahmen typischer Sanierungszyklen hergestellt wird.

Die aktuellen Berechnungen des DIW [42] zeigen zumindest, dass die im Green Deal angestrebte Klimaneutralität erreichbar ist. Weitere Voraussetzung ist eine drastisch beschleunigte Umstellung auf erneuerbare Stromerzeugung aus PV und Windkraft und der sofortige Ausstieg aus fossiler Stromerzeugung im Mittel- und Grundlastbereich. Flexible Erdgas- und zukünftig Wasserstoff-Spitzenlastkraftwerke mit möglichst geringen Laufzeiten würden in Zeiten der Flaute Residuallasten decken. Erdgas ist unter diesen Umständen als Übergangstechnologie anzusehen (vgl. Traber, Fell [44]).

Der Ausbau der Wasserstofftechnologie mit größtenteils aus dem Ausland importierten „grünen Gase" wird in einem Expertenpapier [175] jedoch eher kritisch bewertet:

> *„Um dem trügerischen Eindruck entgegenzuwirken, eine verstärkte Nutzung größtenteils aus dem Ausland importierter „grüner" Gase könne die politischen Anstrengungen im Bereich der Energieeffizienz mindern oder gar überflüssig machen, möchten die unterzeichnenden Expertinnen und Experten explizit auf die nach wie vor zentrale Rolle einer forcierten, alle Sektoren umfassenden Effizienzstrategie hinweisen."*

Die gemeinsame Stellungnahme von Leopoldina, acatech und Union der deutschen Akademien fordert [45] die Umsetzung von „No-regret"-Maßnahmen:

> *„Technologieoffenheit ist bei großen Transformationsprojekten wie dem Umbau unseres Energiesystems grundsätzlich von Vorteil, um frühe, möglicherweise falsche Festlegungen zu vermeiden. Allerdings gibt es gerade bei dieser Aufgabe nur sehr wenige technologische Optionen, um die ambitionierten Klimaziele 2030/2050 zu erreichen. Eine statische optimale Lösung gibt es aufgrund des sich stetig wandelnden technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umfelds nicht. Deswegen und auch angesichts der langen Zeitskalen, die für die Implementierung von Technologien auf der Größenskala des Energiesystems erforderlich sind, muss der Umbau entlang der großen, offensichtlichen Entwicklungslinien jetzt mit aller Kraft begonnen werden."*

Von den Gutachtern des vorliegenden Gutachtens verkürzt zusammengefasst:

- Nutzung von Photovoltaik und Windkraft, weil dies die einzigen Technologien sind, die den entsprechenden Reifegrad für schnellstmöglichen und großflächigen Praxiseinsatz aufweisen,
- Stromnetz- und Energiespeicherausbau, angepasst an die Fluktuation der regenerativen Energien,
- Ausbau der Wärmepumpentechnologie und Elektromobilität im Sinne der Sektorkopplung,
- Aufbau von stabilen Wegen zusätzlicher Energieimporte – kabelbasiert (schwierig) oder als Wasserstoff als Grundstoff für PtX oder zum Direkteinsatz (realistischer); Wasserstoff und dessen Folgeprodukte sind für den Einsatz für die Deckung der möglichst kurzfristigen Residuallasten der Stromerzeugung, im Flugverkehr, Schiffsverkehr, dem landwirtschaftlichen Verkehr oder der Industrie vorgesehen,
- Investitionen in Energieeffizienz, um die Nachfrage zu reduzieren und damit den Aufwand vorher genannter Punkte 1 bis 4.

Verzahnung der Sektoren

Über die gemeinsamen Ziele sind die Sektoren „Gebäude“, „Verkehr“, „Industrie“, „Energiewirtschaft“, „Landwirtschaft“ und „Abfallwirtschaft/Sonstige“ bereits intersektoral verbunden.

Ob auch ein Verbund über gemeinsame Steuerungsmechanismen hergestellt wird, ist eine Frage der politischen Ausgestaltung. Der Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung kommt 2019 [46] zu dem Schluss, dass nur ein gemeinsamer Europäischer Emissionshandel für alle Sektoren zielführend ist. Die CO_2-Besteuerung oder separate ETS-Zertifikate jenseits der Energiewirtschaft sind nur Übergangslösungen.

Diese Lösung wird auch in anderen Studien präferiert (AGORA 2019 [47]). Alternative oder ergänzende Lösungen sind Handelsoptionen für „weiße Zertifikate“ (vgl. Bürger 2012 [48]), d. h. Nachweise für getätigte Einsparmaßnahmen. Alternativ – und als von den Gutachtern präferierte und mit CO_2-Zertifikaten kompatible Lösung – gilt eine geregelte und langfristig bekannte (planbare) Mengenbegrenzung für das Inverkehrbringen von Kohlenstoff (vgl. Eisenbeiß [176]).

Gebündelte Krisenbewältigung

Die vorher genannten Voraussetzungen einer Klimazielerreichung erscheinen den Gutachtern zwar aktuell in der Corona-Krise besser durchsetzbar als noch vor einem Jahr, würden aber kurzfristig politische Entscheidungen in 2020/21, v. a. auch auf europäischer Ebene, erfordern.

Zu diesem Ergebnis kommen auch weitere Stellungnahmen während der Corona-Pandemie (Frühjahr bis Sommer 2020) von Leopoldina, acatech und Union der deutschen Akademien [84], [45], von DIW [42] und von AGORA-Energiewende [177]. Eine Übersicht zur Lage der Energiewende während der Corona-Pandemie gibt McKinsey in der Bewertung von 15 Indices für die Energiewende [178].

AGORA schlägt im Mai 2020 im Kontext der Corona-Pandemie einen „Doppelten Booster“ zur Ankurbelung der Konjunktur mit der Zielsetzung „Klimaneutralität“ vor [177]:

> *„Die Corona-Krise erfordert schnelles staatliches Handeln. Zu den ohnehin schon großen politischen Herausforderungen kommt mit der Bewältigung der Folgen der Corona-Pandemie eine weitere Herkulesaufgabe hinzu. Sie relativiert nicht die bestehenden industriepolitischen Herausforderungen – neben dem Klimaschutz gehört hierzu sicherlich die Digitalisierung –, sondern kommt noch oben drauf. Besondere Zeiten erfordern besondere Maßnahmen. Es ist daher nötig, die aktuellen Krisen zusammenzudenken und ihre Lösung zusammen zu betreiben. Der Wachstumsimpuls, der notwendig ist, um Deutschland und Europa aus der vermutlich größten Wirtschaftskrise seit dem Zweiten Weltkrieg herauszuführen, bekommt dadurch eine Richtung: Er zielt auf den European Green Deal.*
>
> *Das von uns skizzierte Konjunkturpaket ist ein Doppelter Booster für die deutsche Industrie, weil es die Bewältigung der wirtschaftlichen Folgen der Corona-Krise mit einem Modernisierungsschub verbindet. Für den Erfolg dieser zweiten, transformativen Aufgabe kommt es auch darauf an, dass auf das Konjunkturprogramm eine konsequent am Green Deal orientierte Reformphase folgt, mit langfristig wirksamen Veränderungen der Strukturen und Rahmenbedingungen. Dies ist auch im Interesse der Wirtschaft, denn sonst drohen in wenigen Jahren, durch den sich verschärfende Klimawandel, die nächsten Wirtschaftskrisen. Andere Herausforderungen, vor allem im Bereich der Digitalisierung, aber auch bei der Gesundheits-Infrastruktur wurden hier mangels eigener Expertise ausgeklammert. Doch auch sie sollten im Rahmen eines Konjunkturprogramms angemessen berücksichtigt werden. Insgesamt geht es darum, ein Paket zu schnüren, das Deutschland nach der Phase der Sofortmaßnahmen auf einen Pfad mit einer bestimmten Richtung bringt: Zukunftsfähigkeit.“*

So wie Gesellschaft, Politik und Wirtschaft viele Einschränkungen in der Coronakrise als Notwendigkeit akzeptiert haben, könnten diese neuen Erfahrungen und Perspektiven genutzt werden, um in der erwartbaren Klimakrise gemeinsam mindestens das 2°C-Ziel in einem absehbaren Zeitrahmen zu erreichen. Dazu möchten die Autoren des vorliegenden Gutachtens einen Beitrag leisten.

2 Anhang: Detaildarstellung des klima- und energiepolitischen Rahmens

Dieser Anhang stellt die Inhalte des Kapitel 1.2 detaillierter und mit weiteren Hintergrundinformationen, Beispielen, Tabellen und Abbildungen dar.

Seit mindestens 13 Jahren, kurz vor der Finanzkrise 2007 ist bekannt, dass zur Begrenzung der Klimaerwärmung ein weltweites Emissionsbudget gegeben ist, welches bereits aus damaliger Sicht minimal klein war [93]. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen schreibt aktuell [41]:

> *„Damit der Temperaturanstieg (mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 %) den Wert von 1,75°C nicht übersteigt und damit deutlich unter 2°C bleibt, dürfen weltweit ab dem Jahr 2018 nicht mehr als 800 Gigatonnen CO_2 ausgestoßen werden […] Legt man den deutschen Anteil an der Weltbevölkerung zugrunde und vernachlässigt die historischen Emissionen, beträgt das ab 2020 verbleibende CO_2-Budget für Deutschland maximal 6,7 Gigatonnen CO_2. Es bezieht sich auf eine maximale Erderwärmung von 1,75°C mit einer 67 %igen Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung. Das deutsche anteilige Budget mit einer 50 %igen Wahrscheinlichkeit, die Erderwärmung auf 1,5°C zu begrenzen, beträgt 4,2 Gigatonnen CO_2 ab 2020.“*

Der CO_2-Ausstoß Deutschlands liegt derzeit je nach Berechnungsmethodik zwischen 800 und 900 Mio. t CO_2/Jahr.

Im Gebäudebereich ist ein Weg zur Einhaltung des Emissionsbudgets der beschleunigte Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung mit Photovoltaik und die Umstellung der Wärmeerzeugung primär auf Wärmepumpen. Zudem wird auch darüber hinaus weiterer regenerativer Strom, vorrangig aus Windkraft benötigt [79].

Der Ausbau des „Elektropfads“ gilt bevorzugt für alle Neubauvorhaben, wenn noch alle Planungsfreiheitsgrade gegeben sind. Hier erscheinen in Anbetracht der Klimaziele Lösungen mit dem fossilen Brennstoff Erdgas als nicht mehr zeitgemäß. Auch nicht anteilig, als sogenannte Hybridlösungen oder für BHKWs. Im Bestand gilt es, alle Maßnahmen der Energieeinsparung und Effizienzsteigerung sowie den Ausbau erneuerbarer Wärmeerzeugung, überwiegend mit Elektrowärmepumpen, gleichzeitig zu ergreifen. Optionen in Richtung eines verstärkten Ausbaus von Wärmepumpensystemen sind zielkonform, wenn gleichzeitig für den Betrieb der Wärmepumpen verstärkt erneuerbarer Strom im gesamtdeutschen Stromnetz zur Verfügung steht bzw. erneuerbarer Eigenstrom aus Photovoltaikanlagen genutzt werden kann.

Eine sofortige Umstellung der Bewertung von Maßnahmen auf die Indikatoren „Endenergie“ und „CO_2-Emissionen“ anstelle der Primärenergiebewertung in Gesetzgebung und Förderprogrammen kann für eine einheitliche Kommunikation und ein einheitliches Monitoring eine sehr gute Basis ergeben. Über die Innovationsklausel des GEG [179] ist dies einfach umsetzbar. Die kontinuierliche, unterjährige Erfassung der Endenergieverbräuche anstelle theoretischer Bedarfsrechnungen ermöglicht hierbei eine fortwährende Überprüfung der einzuhaltenden Emissionsziele. Dies ist ohnehin bereits vorgesehen in den „Technischen Anforderungen für Einzelmaßnahmen“ der neuen Bundesförderung für effiziente Gebäude [30].

In digitalen Erfassungs- und Regeleinrichtungen können dann automatisiert die wesentlichen Kenngrößen zur Effizienzbewertung des Gebäudes, der Nutzung und der Anlagentechnik erfasst und für einen Erfolgsnachweis dokumentiert werden. Dies kann bevorzugt mit dem Werkzeug „Energieanalyse aus dem Verbrauch EAV“ erfolgen. Die Basis für eine Qualitätssicherung in Planung, Ausführung und Betrieb ist damit bereitgestellt. Eine intensive Beschäftigung mit der Gebäudequalität findet somit nicht mehr nur über den Nachweis rechnerischer Normkennwerte und Qualitätssiegel statt, wenn die Abnahme der Bauleistung erfolgt, sondern verschiebt sich in die Phase der Nutzung und des Betriebs. Das verschiebt Verantwortlichkeiten und zieht eine Anpassung der HOAI nach sich.

Auch Gesetzgebung und Förderprogramme können sich – ähnlich den Regelungen im EU-Land Schweden – an den tatsächlich gemessenen Energieverbräuchen als Nachweisinstrument orientieren. Anstelle eines komplexen Nachweisverfahrens im zukünftigen Gebäude-Energie-Gesetz GEG könnten ausschließlich Bauteilanforderungen für Gebäudehülle und Anlagentechnik den Nachweis für Neubauten und Modernisierung vereinfachen. Eine komplexe Energiebilanzierung zum Nachweis des Einhaltens eines Primärenergiebedarfs ist dann nicht mehr notwendig.

Hierzu könnte auf die Ende März 2020 veröffentlichte „Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung“ [29] zurückgegriffen werden. Das Kompensieren zwischen baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen in rechnerischen Bedarfs-Energiebilanzen (Normen: DIN V 4701-10, DIN V 18599) gehörte dann der Vergangenheit an. Es ginge um reale Effizienzen aller Komponenten, um ein „UND“ und nicht ein „ODER“ – was mit dem geringen verfügbaren Restbudget an Emissionen korreliert.

Der Großverbraucher ist jedoch der Bestand. Hier erscheint es naheliegend, die Maßnahmen mit erster Priorität anzugehen, deren Gesamtkosten bei größtmöglicher CO_2-Minderung zu einem Gesamtkostenminimum führen. Da fossile Brennstoffe nach den erweiterten Pariser Klimazielen zur Klimaneutralität in einer zukünftig vollständig erneuerbaren Welt nicht mehr vorkommen, spielen die Investitionskosten je jährlich eingesparter Tonne CO_2 im Vergleich zum fossilen Betrieb in der Vergangenheit die ausschlaggebende Rolle. Bei ökologischen und langfristigen Lösungen ergeben sich – nach Rifkin – Grenzkosten von Null für jede zusätzlich erzeugte Kilowattstunde elektrische Energie [87].

Der Aufwand für Raumheizung in Wohn- und Nichtwohngebäuden könnte durch Maßnahmen an der Gebäudehülle, durch kontrollierte Wohnungslüftung, v. a. in Neubauten, und durch Heizungsoptimierungsmaßnahmen (hydraulischer Abgleich, Pumpen- und Vorlauftemperaturregelung) so klein wie wirtschaftlich möglich sein. Dadurch werden die Heizlast und die Investitionen für zukünftige Erzeugerlösungen, vor allem Wärmepumpenlösungen begrenzt. Es bieten sich im Bestand gegebenenfalls auch bivalente Lösungen an, die mit zunehmender Klimaerwärmung von allein geringere Spitzenlastwerte benötigen und den Restanteil fossiler Energieträger stetig kleiner werden lässt. So gab es im Winter 2019/20 in vielen Regionen Deutschlands keinen Tag, dessen Mittelwert der Außentemperatur unterhalb 0°C lag.

Der Aufwand für Trinkwarmwasser hat sich nach den Ergebnissen eigener Felduntersuchungen in den letzten Jahrzehnten verringert. Auch Werte von 400 bis 500 kWh/(P·a) sind in Mietwohngebäuden anzutreffen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Aufgrund geringerer Nutzwärmemengen und einer gleichzeitigen Wohnflächenvergrößerung verschiebt sich der Fokus auf Systeme, die sich durch weniger Netzverlust auszeichnen. Dadurch könnte die Trinkwarmwasserbereitung – zukünftig direkt elektrisch und/oder mit elektrischen Kleinspeichern erfolgen. Eine Eigennutzung von PV-Strom – auch als Mieterstrom – kann hierbei sehr große Vorteile bringen.

Durch politische Entscheidungen zum zukünftigen Regime selbst genutzten Stroms auch für Eigenverbraucher können hierbei zukünftige Zusatzkosten entstehen, die solche Lösungen unwirtschaftlich machen [180].

Der „Elektropfad“ wird wahrscheinlich gegenüber dem „Technologiemix-Pfad“ beschleunigt umgesetzt, da gebäudezentrale Lösungen mit Wärmepumpen und/oder elektrischer Direktheizung wesentliche thermische Vorverluste vermeiden: von Nah- und Fernwärmenetzen und von Speichern. Die Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit von Kraft-Wärme-Kopplung in Heizkraftwerken und in Blockheizkraftwerken sinken umso mehr, je besser die Gebäude sind. Dies dient allein der Verlustvermeidung.

Heute gilt: jede vermiedene Kilowattstunde muss nicht fossil bereitgestellt werden; künftig gilt: jede vermiedene Kilowattstunde muss nicht regenerativ bereitgestellt und ggf. zwischengespeichert werden.

Diese Technologien würden einen mittel- und langfristig um 3 bis 5-fach so hohen Ausbau von PV- und Windkraft-Kapazitäten erfordern (vgl. PER-Bewertung nach Passivhaus-Institut [80]). Vor allem, wenn sie noch längere Zeit zunächst mit Erdgas unter Erschöpfung des noch verbliebenen geringen Emissionsbudgets betrieben würden.

Eine Abkehr von KWK ist zu Zeit nicht absehbar. Gegenwärtig gilt die sehr „wärmefreundliche“ KWK-Bewertung (Stichwort „Stromgutschriftmethode“) in den Berechnungsvorschriften der geltenden EnEV und auch des zukünftigen GEG. In vielen Studien, initiiert durch verschiedene Interessensverbände, wird eine weitere Ausbauförderung von KWK gefordert – ungeachtet der Netzverluste. Sie nehmen jedoch zu – sowohl absolut, als auch relativ, je geringer der tatsächliche Wärmebedarf der Gebäude zukünftig sein wird.

Nah- und Fernwärme (4.0), Kraft-Wärme-Kopplung, BHKW-Technologie und einfache Brennwerttechnik verlieren ihre Bedeutung, je schneller der Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung mit Windkraft und Photovoltaik gelingt. Kalte Fernwärme (10 bis 20°C) mit unterschiedlichen Wärmequellen könnte zukünftig als Wärmequelle für Gebäude dienen. Auch dezentrale Lösungen ergeben wirtschaftlichere Gesamtlösungen.

Aktuelle Untersuchungen des Fraunhofer ISE [68] zeigen, dass Investitionen für den beschleunigten Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung zur Klimaneutralität bis zum Jahr 2035 wesentlich von der gesellschaftlichen Bereitschaft abhängig ist, auch einen Suffizienz-Pfad mit Einschränkungen gegenüber heutigen Wohlstandsforderungen zu beschreiten. Investitionen in den Ausbau erneuerbarer Technologien von 500 Mrd. € stünden Investitionen von 3500 Mrd. € für ein Szenario Business-As-Usual bis 2050 gegenüber.

Die wissenschaftlichen Sachverständigenräte und weitere Berater der Bundesregierung ([41], [14], [81], [69], [82], [39]) empfehlen, für einen Aufschwung in und nach der Corona-Krise Konjunkturprogramme an den Anforderungen eines zukünftig zwingend verbesserten Klimaschutzes zu orientieren, um Klimaneutralität zu erreichen. Übertragen auf die Förderung der Baukonjunktur ergibt sich aus Sicht der Gutachter ein Fokus auf die Förderung hocheffizienter Maßnahmen am Gebäude und der zukünftigen Anlagentechnik (Ersatz fossiler Wärmeerzeuger, bevorzugt durch Wärmepumpen).

2.1 Rückblick und Ausblick

Seit 1990 sind in Deutschland energiebedingte CO_2-Emissionen von 1250 Mio. auf 805 Mio. Tonnen $CO_{2äqu}$ /a in 2019 und damit um 35,7 % reduziert worden. Die stärksten Reduzierungen fanden in den ersten fünfzehn Jahren nach der Wiedervereinigung statt. Allein im ersten Quartal 2020 haben sich die CO_2- Emissionen nach Auswertungen der Internationalen Energieagentur mit dem Einbruch der weltweiten Wirtschaft durch die Corona-Krise seit etwa Februar/März um 8 % reduziert. Aus einer aktuellen Pressemitteilung des BMU [181]:

> *„Die Emissionen aus dem Gebäudebereich stiegen 2019 im Vergleich zum Vorjahr um 5 Mio. Tonnen an (plus 4,4 %). Ein wesentlicher Treiber des Emissionsanstiegs sind die gegenüber dem Vorjahr deutlich gestiegenen Heizölabsätze. Das lag vor allem am Preis: 2019 war der Heizölpreis deutlich niedriger als 2018. Daneben spielte auch die Witterung eine Rolle: Nach dem außergewöhnlich warmen Jahr 2018 war das Jahr 2019 in vielen Teilen Deutschlands wieder etwas kühler."*

Der Anteil der Gebäude an den Gesamtemissionen liegt nach Angaben des UBA [14] mit 122 Mio. Tonnen $CO_{2äqu}$/a bei 15,1 % und das der Haushalte im Gebäudebereich mit 88 Mio. Tonnen $CO_{2äqu}$/a bei 10, 9 %. Hierin sind Emissionen für fernwärmeversorgte oder mit Stromheizungen versorgte Gebäude nicht enthalten, da nach der Sektorenaufteilung des Klimaschutzgesetzes Strom und Fernwärmeversorgung dem Sektor „Energiewirtschaft" und nicht dem Sektor „Gebäude" zugeordnet werden. Durchschnittlich produzierte jeder Bürger In Deutschland laut Umweltministerium im letzten Jahrzehnt jährlich 11,6 Tonnen CO_2, davon 1,75 Tonnen durch das Heizen der Wohn- und Nichtwohngebäude. Diese Werte haben sich trotz vieler Initiativen in den Bereichen Gebäudeenergieeffizienz und Ausbau erneuerbarer Energien seit mehr als 10 Jahren kaum geändert.

Um das CO_2-Restbudget auf Basis der Pariser Ziele einzuhalten, müssten wir:

- zur Einhaltung des 1,5°-Zieles vereinfacht bis 2025,
- zur Einhaltung des 1,75°-Ziels bis 2035 und
- zur Einhaltung des 2,0°-Zieles bis 2050

vollständige Klimaneutralität ohne Verbrennung fossiler Energieträger erreicht werden. Bereits 2020 liegt die durchschnittliche bodennahe Temperatur in Deutschland nach aktuellen Auswertungen des UBA [182] bei 1,5°C über dem langjährigen Mittel seit Beginn der Wetteraufzeichnung.

In der 2. Phase der Corona-Krise seit Anfang Mai 2020 plädieren viele Interessensgruppen aus Gesellschaft und Wirtschaft für ein „Wiederanfahren der Wirtschaft unter primärer Berücksichtigung des Klimaschutzes". Der wissenschaftliche Beirat beim Bundeswirtschaftsministerium empfiehlt in einem Brief an Minister Altmaier [81]:

> *„Der Beirat empfiehlt, sich jetzt schon auf diese Möglichkeit einzustellen und entsprechende Pläne vorzubereiten, so dass im Bedarfsfall keine Zeit verloren geht und möglichst sinnvolle Programme gestartet werden können. Der Beirat sieht drei Bereiche, in denen sich öffentliche Investitionsprogramme besonders auszahlen würden: öffentliche Infrastruktur, Digitalisierung sowie Energiewende und Klimaschutz.*
> *[…]*
> *Ein Konjunkturprogramm könnte genutzt werden, um strukturelle Veränderungen im Zusammenhang mit Energiewende und Klimaschutz vorzuziehen und zu beschleunigen, zum Beispiel durch die energetische Sanierung insbesondere von Bundesliegenschaften, eine Investitionsoffensive „Energieeffizienz" für die deutsche Wirtschaft und einen zügigen Ausbau der Wasserstoffwirtschaft.*

Wenn im Rahmen eines Konjunkturprogramms Steuer- und Abgabensenkungen vorgenommen werden sollen, bietet sich eine Finanzierung der EEG-Umlage durch Haushaltsmittel und eine Senkung der Stromsteuer an, weil sie nicht nur die Kaufkraft der Haushalte stärken, sondern auch den Umstieg auf Wärmepumpen und Elektromobilität fördern würden. Sie würden auch viele Unternehmen entlasten und im Industriesektor den Umstieg in Richtung klimaschonender Produktionsverfahren befördern."

Die überwiegende Mehrheit der wissenschaftlichen Beratung sieht im Beschreiten des „Elektropfads" durch beschleunigten Ausbau von Photovoltaik und Windkraft die erfolgversprechendste Alternative zum Erreichen von Klimaneutralität. Die wird durch die Aussagen in dem oben auszugsweise zitierten Brief des wissenschaftlichen Beirats beim Bundeswirtschaftsministerium zu den Themen „Strompreis" und „Umstieg auf Wärmepumpen" bestätigt. Dies sehen auch die Gutachter als vorrangige Strategie der Energiepolitik in und nach der Corona-Krise an.

2.1.1 Vor der Finanzkrise 2008

Bereits vor der Finanzkrise 2008/09 wurden in vielen Studien die Themen der CO_2-Emissionminderung zur Einhaltung des CO_2-Budgets intensiv diskutiert z. B. 2005 von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft [7]. Bereits damals wurde die unzureichende Geschwindigkeit der jährlichen CO_2-Minderung bemängelt.

Nach intensiven Diskussionen und Bekanntwerden der Zusammenhänge zwischen Klimaerwärmung und dem Einhalten eines dafür nur noch begrenzten CO_2-Emissionsbudgets haben sich die Gutachter zwischen 2007 und 2010 für die Idee eines ausgedehnten Kohlenstoff-Zertifikate-Handels eingesetzt. Sie unterstützen eine Idee von Gerd Eisenbeiß, damals Berater der Bundesregierung und der EU [176]. Hier Auszüge aus einem eigenen Vortragsmanuskript von 2007 [93]:

„Viel sinnvoller als sich am CO_2-Emissionsausstoß zu orientieren, ist der kürzlich [Anmerkung: Stand 2007] veröffentlichte Vorschlag von Gerd Eisenbeiß: „Den Klimaschutz vom Kopf auf die Füße stellen". Vorgeschlagen wird, das jetzige System des CO_2-Handels durch Kohlenstoff-Lizenzen zu ersetzen. Da Kohlenstoff und CO_2 in direktem Zusammenhang stehen, könnte man so auch die CO_2-Emissionen steuern. Gehandelt wird hier nicht – so wie heute – das Recht zu emittieren, sondern das Recht Kohlenstoff in welcher Form auch immer in den deutschen bzw. EU-Handel, langfristig evtl. sogar in einen weltweiten Handel zu bringen. Ein aktueller CO_2-Preis von 8 Euro/t CO_2 entspricht dann etwa 30 Euro/t Kohlenstoff.
[…]
Für die Quantifizierung externer Kosten sind v. a. die Wirkungen von Treibhausgasemissionen (Klimawandel) und die Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe von Bedeutung. Sie sollten in einen ehrlichen Energiepreis, z. B. in den oben von Eisenbeiß vorgeschlagenen Kohlenstoff-Lizenzpreisen Eingang finden. Als bester Schätzwert werden Schadenskosten von 70 Euro/t CO_2 (bei einer Spannbreite in der Literatur zwischen 15 und 280 Euro/t CO_2) genannt. Damit liegen die Schadenskosten mit ca. 5 … 6 Cent/kWh_{el} in der gleichen Größenordnung wie die heutigen Stromgestehungskosten aus einem neuen Kohlenkraftwerk!"

Die Aussagen von 2007 sind heute in gleichem Maße aktuell, wie die Vorschläge zum Klimaschutzpaket von 2019 zeigen. Aber sie sind auch eine Erklärung für die Tatsache, dass im Bereich CO_2-Minderung nach der Finanzkrise von 2008/09 die Klimaerwärmung ohne Bremseffekt weiter fortschritt.

2.1.2 Die Zwischenzeit von 2010 bis 2020

Energiepolitische Entscheidungen der letzten 10 Jahre in Deutschland betrafen wesentlich die Energiewirtschaft der Stromerzeugung. Zum einen der im Jahr 2011 nach Fukushima beschlossene Ausstieg aus der Kernkrafttechnologie bis 2022 und der 2018/19 beschlossene Ausstieg aus Kohle bis spätestens 2038. Beide Beschlüsse wurden leider nur national für Deutschland und nicht auf EU-Ebene getroffen.

Auf internationaler Ebene sind die Pariser Beschlüsse von 2015 mit Anpassungen in allen Nachfolgejahren bis heute bedeutsam. Hier konkurrieren Prozentbezogene Minderungsziele der verschiedenen Länder und Regierungen mit der seit ca. 2014 immer mehr sich verbreitenden Erkenntnis, dass für die Klimaerwärmung das weltweit noch verfügbare CO_2-Budget zum Einhalten des 1,5°- bzw. 2°-Ziels ausschlaggebend ist.

Der Budgetgedanke findet sich im „Klimaschutzplan 2050" der Bundesregierung [66] nicht explizit wieder. Die definierten Ziele sind prozentuale Einsparungen: 80 bis 95 % Emissionsminderung bis 2050 bezogen auf 1990. Dies wird von den Gutachtern kritisch gesehen - hier Auszüge eines eigenen Artikels von 2019 [55]:

„Der Weg zur Einhaltung der Pariser Klimaschutzziele soll für Deutschland die jährlichen CO_2-Emissionen bis 2030 auf jährlich 543 Mio. t $CO_{2äquiv}$/a reduzieren. In den letzten zehn Jahren lagen diese bei durchschnittlich 900 Mio. t $CO_{2äquiv}$/a. Damit wird das angestrebte Ziel einer Reduzierung gegenüber 1990 um ca. 55 % sogar geringfügig überboten.

Aber – leider – es reicht nicht. Wenn man den umfassenden wissenschaftlichen Erkenntnissen des IPCC traut, muss viel mehr und viel schneller der CO_2-Ausstoß reduziert werden. Auch die Vorschläge der Kohlekommission reichen leider nicht aus. Ursache für diese voraussehbare Entwicklung: große Teile der Politik, der Wirtschaft, aber leider auch teilweise der Wissenschaft haben die Klimaschutzproblematik nicht richtig verstanden. Es geht nicht vorrangig um das Einhalten prozentualer Minderungsziele bis 2030, 2040 oder dem wichtigsten Datum der angeblichen Klimaneutralität: 2050.

Es geht nicht vorrangig darum, ob wir im Jahre 2050 80 oder 95 % CO_2-Minderung gegenüber 1990 erreichen. Und ob wir das auf dem EL-Pfad (Elektrizität mit PV und Wind first) oder auf dem TM-Pfad (Technologiemix – der Markt entscheidet), mit mehr Effizienzsteigerung oder mit mehr Erneuerbaren Energie-Anteil besser erreichen.

Es geht alleine darum, ob wir das noch verfügbare CO_2-Emissionsbudget zur Einhaltung des 2°C-Ziels oder besser noch des 1,5°C-Ziels überhaupt noch erreichen können.“

2.1.3 Fridays for future und die Zeit der Corona-Krise

Fridays for future

Nach Wrights Buch über die „Realen Utopien“ [36] kann in vielen kleinen Schritten gesellschaftliche Ermächtigung in einem transparenten Prozess sowohl für die Wirtschaft als auch für die Politik zu zukünftigen Lösungen führen. Er setzt laut Rezension in der TAZ [183] auf:

„[…] einen kleinteiligen dialektischen Prozess, der zu Verschiebungen im Alltag führt. Dabei trotzen engagierte Menschengruppen nicht nur der Wirtschaft Räume ab, in denen andere Werte gelten als Konkurrenz und Profit. Entscheidend ist auch, wenn Politik und Verwaltung sich als Diener der Bürger verstehen und nicht als deren Lenker – und damit ‚Demokratie sehr ernst‘ nehmen.“

Die Bewegung „Fridays for future“ entspricht dieser Beschreibung in vieler Hinsicht.

Coronakrise und New Green Deal

Vor der Corona-Krise war die Baukonjunktur gekennzeichnet durch begrenzte Kapazitäten in Handwerk, Planung und Genehmigungsbehörden. Die Situation nach der Coronakrise ist nur schwer absehbar. Vor dem Petersberger Klimadialog Ende April 2020 wurden Forderungen an die Ausrichtung des „New Green Deal“ gestellt, vorgestellt auf ZEIT online am 24.04.20:

„Zwar führt die Corona-Krise derzeit dazu, dass der Ausstoß von Treibhausgasen weltweit sinkt. Daher wird Deutschland sein bereits aufgegebenes Klimaziel für 2020 voraussichtlich doch noch erreichen. Allerdings ist das ein einmaliger Effekt, der im temporären Herunterfahren der Wirtschaft begründet ist. Die Konferenz will sich darum mit der Frage befassen, wie Konjunkturpakete klimafreundlich geplant werden können.
[…]
Schulze warnte zugleich vor einer Neuauflage der sogenannten Abwrackprämie aus dem Jahr 2009. "Falsch wäre es, jetzt Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und hohem CO_2-Ausstoß zu fördern, die dann weitere zehn, 15 Jahre auf unseren Straßen fahren", sagte sie. Übertragen auf die Förderung der Baukonjunktur kann dies nur bedeuten: „Nur hocheffiziente Maßnahmen am Gebäude und für eine zukünftige Anlagentechnik (Ersatz fossiler Wärmeerzeuger durch Wärmepumpen) sollten gefördert werden.

Hinter diese Forderung stellt sich sogar ein Teil der Großindustrie. In einer gemeinsamen Erklärung von mehr als 60 großen und bekannten Unternehmen werden für zukünftige Konjunkturprogramme nach der Corona-Krise Investitionen gefordert, die alleine zukünftige Klimaziele erfüllen sollten:

Mehr als 60 Unternehmen fordern zum Auftakt des Petersberger Klimadialogs eine engagierte Klimaschutzpolitik von der Bundesregierung ein. Bei der weiteren Bewältigung der Coronavirus-Krise gehe es darum, Konjunktur- und Investitionsprogramme systematisch klimafreundlich auszurichten, heißt es dem Handelsblatt zufolge in einem Papier, das unter anderem von Thyssenkrupp, der Allianz, Bayer, E.on, Puma und der Telekom unterzeichnet wurde. “

Nach Ansicht der Gutachter wird dies aber nur gelingen, wenn zusätzlich zu den Investitionen eine konsequente Nachverfolgung der real erzielten Erfolge durch Qualitätssicherung und Monitoring des Kohlenstoffeinsatzes bzw. der CO_2-Emissionen vorgesehen wird.

Und, wenn ein Wandel zwischen Gesellschaft, Politik und Wirtschaft mit einem gemeinschaftlichen und solidarischen Dreiecksverhältnis auf gleicher Augenhöhe stattfindet. In vielen Entscheidungen zur Gesetzgebung, zu Förderprogrammen und der daraus evtl. folgenden Marktentwicklung waren in der Vergangenheit typisch nur zwei „Player" beteiligt: die Industrie und Wirtschaft, vertreten durch eine große Zahl von Interessensverbänden. Die betroffene Gesellschaft (hier z. B. stellvertretend Mieter) blieb weitgehend unbeteiligt.

Es sind der gesellschaftliche Rahmen und das Wirtschaftssystem sowie das Spannungs- aber auch Verantwortungsdreieck zwischen Gesellschaft, Politik und Wirtschaft in einer Analyse der Erfolgsaussichten von Partnerschaftsmodellen in alle Überlegungen einzubeziehen. Gesellschaft, Politik und Wirtschaft agieren dabei zukünftig bestenfalls auf Augenhöhe.

Zum Schluss hierzu passend Auszüge aus der FAZ vom 7. Mai 2020, Verfasser sind Olaf Bandt, der Vorsitzende des Bundes für Umwelt und Naturschutz (BUND) und Ulrich Schneider, der Hauptgeschäftsführer des Sozialverbands Der Paritätische:

> *„Die Corona-Krise […] wirft auch ein grelles Licht auf gesellschaftliche Ungleichheiten. Für Pandemien gilt ebenso wie für Naturkatastrophen, dass sie diejenigen am stärksten treffen, die ohnehin gesellschaftlich schlechter gestellt sind. Die aktuelle Krise gibt uns damit einen Vorgeschmack auf die Herausforderungen, die die Klimakrise als Dauerkrise an uns stellen wir, wenn wir ihr nicht ebenso durchgreifend begegnen.*
> *[…]*
> *Mit der Vision von erneuerbarer Energie und dem Leitbild der Energiedemokratie schlossen sich in den Anfängen der Energiewende Bürger zusammen, gründeten Energiegenossenschaften, brachten Bürgerwindenergie und Mieterstromkonzepte durch Photovoltaik voran. Sie machten die Welt ökologischer, schufen Wertschöpfung und Arbeitsplätze für ihre Region, versorgten sich und ihre Nachbarschaft mit grünem Strom: sozial, ökologisch und demokratisch. Im Rahmen einer Gemeinwirtschaft müssen wir zurück zu einer intelligent vernetzten dezentralen Energiewende in der Hand von Bürgern. Dezentral bedeutet, dass der Strom möglichst nah an dem Ort produziert wird, an dem er benötigt wird. In Bürgerhand bedeutet, dass die Menschen finanziell davon profitieren sollen, wenn erneuerbarer Strom erzeugt wird.*
>
> *Heute ist das Gegenteil der Fall. In Deutschland wurde die Teilhabe an der Energiewende immer stärker eingeschränkt, nicht zuletzt mit der Änderung des Erneuerbaren-Energie-Gesetzes von einem sicheren Vergütungssystem zu Ausschreibungen. Eine dezentrale Energiewende in Bürgerhand ist dadurch gestoppt worden. Das Bürgerengagement kann das Risiko des unsicheren Zuschlags finanziell nicht tragen, stattdessen bauen große Konzerne Windräder, wodurch die Akzeptanz in der Bevölkerung sinkt.*
> *[…]*
> *In der Gesundheit und Pflege, bei sozialen Dienstleistungen, aber auch im Wohnungswesen, im Verkehr oder in der Energieversorgung, brauchen wir den Aufbruch in eine Gemeinwirtschaft, die sich an tatsächlichen menschlichen Bedarfen und Bedürfnissen orientiert. Eine Gemeinwirtschaft, die den Gestaltungswillen von Bürgern entfacht und ihnen echte Mitentscheidung ermöglicht."*

Hierzu im Gegensatz stehen Aktivitäten des Bundesumweltministeriums mit einer Umfrage unter den größten europäischen Aktienunternehmen aus dem BMU-Pressedienst [184]:

> *„In einem Brief an die CEOs von fast 430 Großunternehmen in Europa bittet Bundesumweltministerin Svenja Schulze um Teilnahme an der Umfrage „European Sustainable Finance Survey". Das vom BMU geförderte Forschungsvorhaben misst damit erstmals die Nachhaltigkeit großer Firmen anhand einer neuen, europaweit geltenden Taxonomie. Mit der Umfrage […] wird ein besseres Verständnis davon erwartet, wie Konjunkturprogramme zukunftsgerecht und nachhaltig auszurichten.*
> *[…]*
> *Die Umfrage soll Unternehmen und Banken beim Aufbau von Kapazitäten für die EU-Taxonomie sensibilisieren und zeigen, inwieweit wirtschaftliche Aktivitäten von Unternehmen schon heute der EU-Taxonomie entsprechen und wo Herausforderungen und Lösungen bei der Weiterentwicklung der EU-Taxonomie liegen.*
> *[…]*
> *Die Umfrage erfasst erstmalig den Anteil nachhaltiger Wirtschaftsaktivitäten – gemäß dem Vorschlag der Expertengruppe der EU-Kommission für eine EU-Taxonomie zur nachhaltigen Finanzierung – in den größten, börsennotierten Unternehmen Europas, die in den nach Marktkapitalisierung 14 größten Leitindizes der EU-28 (EuroStoxx 50, FTSE 100, DAX 30, CAC40, etc.) vertreten sind. Die Erkenntnisse sollen eine wichtige Grundlage für gemeinsame Diskussionen von Wirtschaftsvertretern und Finanz- und Umweltministerien im Rahmen der deutschen EU-Ratspräsidentschaft bilden."*

2.1.4 Wesentliche Ursachen bisheriger Zielverfehlung

Verhältnis Gesellschaft – Wirtschaft – Politik

Nach intensiver Reflektion, interner Diskussion und Analyse der Ursachen der Zielverfehlung können aus Sicht der Gutachter folgende Hemmnisse und Hindernisse zur geplanten Zielerreichung genannt werden.

Grundlegende Mechanismen des derzeitigen Wirtschafts-, Politik- und Sozialsystems mit der Zielsetzung „Wachstum und Erzielung eigener Vorteile – Stichwort „Shareholder-Value" - für Personen und Unternehmen" sind nach Wright für die zukünftigen Aufgaben des Klimaschutzes und der Energieeinsparung ungeeignet [36]. In diese Richtung argumentieren auch Göpel [37], Mitglied des WBGU (Wissenschaftlicher Beirat für globale Umweltfragen) und Latif [38] in jeweils aktueller Literatur.

In Zusammenfassung vorgenannter Literatur verdichtet sich der Eindruck, dass nicht die dringend erforderlichen Maßnahmen und Investitionen zur Erreichung von Klimaschutzzielen im Fokus stehen, sondern die Aufrechterhaltung eines wirtschaftlichen Wachstums mit weitgehender Befriedigung persönlichen und unternehmensbezogenen Wert-(Vermögens-)Zuwachses (Gewinn) des eingesetzten Kapitals für „angeblich" sinnvolle Investitionen.

Fehlentwicklungen zur Erreichung der Klimaschutzziele sind dadurch vorprogrammiert. Es geht primär um Wachstum und die Umsatzsteigerung neuer Technologien. Es kommen erfahrungsgemäß dann weitere, aus den vorbeschriebenen Entwicklungen resultierende „Hybrid-Lösungen" hinzu. Es resultiert ein Wettbewerb alternativer Marktangebote, der häufig eine unnötig hohe Komplexität der am Markt angebotenen Technologien schafft und die Ziele des Klimaschutzes behindert und weniger nach vorne bringt.

Die Wissenschaft als neutraler Gutachter spielt bei diesen Prozessen in manchen Fällen eine unrühmliche Rolle. Als Beispiel sei das „Gutachten zur Ermittlung von anerkannten Pauschalwerten für den Jahresnutzungsgrad von Heizungsanlagen" der EBZ Business School [146] genannt. Hierauf wurde in einer eigenen Veröffentlichung der Ostfalia im Rahmen dieses Projektes detailliert eingegangen [145].

Trennung zwischen Planung, Ausführung und Betrieb

Der heutige serielle Planungs- und Ausführungsablauf gemäß den seit Jahrzehnten eingeführten HOAI-Phasen führt heute immer noch zu der strikten Trennung von Planung, Ausführung und Betrieb. So besteht heute noch in vielen Büros der Zustand, dass Planer teilweise nie mit der Praxis und dem Betrieb in Kontakt gekommen sind.

Die einzelnen Planungsphasen der HOAI werden dabei mit einem festgelegten Prozentsatz des berechneten Honorars vergütet. Die Phasen 1 (Grundlagenermittlung, 2 %) und 9 (Objektbetreuung 1 %) sind nach Ansicht der Gutachter unterbewertet, um ein tatsächlich energieeffizientes Gebäude zu errichten oder es auf dieses Niveau zu sanieren.

Die Planung bis zur Ausschreibung, dann die Vergabe (häufig an den günstigsten Anbieter), die Ausführung durch verschiedene Auftragnehmer (häufig ohne begleitende Qualitätssicherung und Projektsteuerung), die Inbetriebnahme (sofern überhaupt sorgfältig durchgeführt) sowie der Betrieb erfolgen mit den verschiedensten Partnern. Zukünftig ist mehr Kooperation zu fordern.

Klimakrise und Klimaneutralität

Nach Ausführungen der Energieagentur NRW [185] wird Klimaneutralität in Kommunen wie folgt beschrieben:

> *„Städte und Gemeinden, Unternehmen oder Produkte – wer es nicht schon ist, will es in den nächsten Jahren werden: klimaneutral. Kommunen stellen Masterpläne auf, Unternehmen werben damit. Aber was genau versteckt sich hinter dem Begriff? Und was bewirken die Maßnahmen?*
>
> *Wird Klimaneutralität definiert, gibt es die nachvollziehbare Möglichkeit, die durch den Menschen verursachten Treibhausgasemissionen als Maßstab für das Einhalten des Emissionsbudgets heranzuziehen. ‚Klimaneutralität bis Mitte des Jahrhunderts bedeutet, dass die Treibhausgasemissionen ab heute alle zehn Jahre halbiert werden müssen', rechnen die Klimaforscher des PIK vor. Erst wenn die Klimabilanz der Erde netto – also nach den Abzügen durch natürliche und künstliche Senken – Null beträgt, wäre die Menschheit ‚klimaneutral' und die globale Erderwärmung würde stabilisiert. Dann aber bei gestiegenen mittleren Temperaturen weltweit unterschiedlich."*

Um den Fußabdruck zu bilanzieren, sind die Verbrauchserfassung der eingesetzten Endenergien mit deren Emissionsfaktoren zu multiplizieren. Der schnellste Weg zur Klimaneutralität erfolgt nach Vorschlägen von Fraunhofer ISE und AGORA [68] [69] durch einen beschleunigten Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung in Verbindung mit Lösungen der Sektorenkopplung von Strom, Wärme (beschleunigter Ausbau von Wärmepumpen) und gegebenenfalls Mobilität.

2.2 Status Quo

Seit etwa 10 Jahren ist der CO_2-Ausstoß im Gebäudebereich fast konstant geblieben, ähnlich wie im Verkehrsbereich, während in der Energiewirtschaft der Anteil erneuerbarer Stromerzeugung stark gestiegen und die Emissionen aus der Stromerzeugung trotz geplantem Ausstieg aus Kernenergie (2022) und Kohle (2038) gesunken sind.

Im Anhang 2.1.1 wird die Kopplung der Sektoren Wärme – Strom als wesentliches Element für eine zukünftig beschleunigte CO_2-Minderung herausgearbeitet. Anhang 2.2.2 bis 2.2.5 gehen auf die immer umfangreicher werdenden europäischen und nationalen Richtlinien und Gesetze sowie auf die aktuell novellierten Förderprogramme bzw. sonstigen Finanzinstrumente für Neubau- und Modernisierungsmaßnahmen ein.

Nach einer in den letzten zehn Jahren nach der Finanzkrise staatlich geförderten Baukonjunktur mit Arbeitskräftemangel in allen Bereichen der Planung, Ausführung und des Betriebs wird die Corona-Krise seit Anfang 2020 wahrscheinlich tiefe Einschnitte in allen Industriesektoren und in der Wirtschaft bringen. Darauf geht Anhang 2.2.4 ein, während Anhang 2.2.5 die in der Vergangenheit wenig ausgeschöpften Chancen und Einsparpotenziale der Qualitätssicherung in Planung, Ausführung und Betrieb beschreibt und in einem ersten Schritt versucht, diese zu quantifizieren.

2.2.1 Sektorenkopplung

Während der Bearbeitung des vorliegenden Gutachtens wurden zwei politische Maßnahmen ergriffen, um den Ausbau von Photovoltaik und Windkraft mit dem Ziel einer zukünftig besseren Sektorenkopplung zu beschleunigen. Am 15. Mai 2020 brachte das Land Schleswig-Holstein in den Bundesrat einen Vorschlag ein, die Rahmenbedingungen für die Sektorenkopplung und den beschleunigten Ausbau von PV und Windkraft zu verbessern [186]:

> *„Der Bundesrat möge folgende Entschließung fassen:*
>
> *1. Als Beitrag zur Wiederbelebung der Wirtschaft nach der Corona-Epidemie und zur Erreichung der Ausbauziele bei den Erneuerbaren Energien bedarf es einer zügigen Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG), um neue Perspektiven für Innovation und Wachstum bei gleichzeitig sinkenden Treibhausgasemissionen als Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele zu schaffen. Ein weiterer zielstrebiger, effizienter und marktorientierter Ausbau der Erneuerbaren Energien ist sowohl Voraussetzung für eine erfolgreiche Energiewende und Klimaschutzpolitik auf dem Weg zur Klimaneutralität als auch Grundlage für Wertschöpfung und neue Arbeitsplätze in Zukunftsbranchen.*
>
> *2. […] Neben eindeutigen Ausbauvorgaben muss im Zuge der Reform für mehr Flexibilisierung beim Einsatz Erneuerbarer Energien gesorgt werden.*
>
> *3. Die Rahmenbedingungen für die Eigen- und Direktstromnutzung müssen attraktiver ausgestaltet werden, bis eine echte Reform bei der Grünstromvermarktung erfolgt ist. Zudem sollte der Weg der schrittweisen Absenkung der EEG-Umlage und der Stromsteuer im Wege einer systematischen Reform der Abgaben und Umlagen im Energiebereich mit schrittweise steigenden CO_2-Preisen in den Sektoren Wärme und Verkehr weiterverfolgt werden und ggf. zur Konjunkturbelebung eine deutlichere Entlastung bei den Stromnebenkosten als bislang geplant angestrebt werden.*
>
> *4. Um die bundesweit vorhandenen Potenziale für den Ausbau der Windenergieanlagen an Land heben zu können, sind Maßnahmen erforderlich, die den Ausbau im Süden vorantreiben, ohne den Ausbau im Norden zu blockieren. Hierzu sind neben geeigneten Instrumenten im EEG auch geeignete Maßnahmen zur Bereitstellung von Flächen in allen Ländern zu ergreifen. Ausbaubremsen wie das Netzausbaugebiet müssen zügig bundesweit gelöst werden. […]*
>
> *5. Mit Anpassungen u. a. der § 14, § 15, ggf. § 36c EEG sind die Regelungen für Zuschaltbare Lasten („nutzen statt abregeln und entschädigen") technologieoffen und für deutlich größere Volumina auszugestalten. […]*
>
> *6. Die Rahmenbedingungen für Biomasseanlagen sind […] anzupassen […]*
>
> *7. Zur Verbesserung der Ausbaubedingungen Erneuerbarer Energien auf See sind Änderungen im Windenergie auf See Gesetz (WindSeeG) erforderlich. […]*

8. Der Bundesrat lehnt die Einführung von bundesweit geltenden Mindestabständen zwischen Windenergieanlagen und Wohnbebauung, die über existierende Regelungen hinausgehen, ab.

9. […] Abschaffung des so genannten 52 GW PV Deckels […].

10. […] Bürgerenergieprojekte durch wirksame Maßnahmen zu unterstützen. […]"

Die Beschlussvorlage wurde zunächst in die entsprechenden Ausschüsse zur weiteren Diskussion verwiesen. Das Land Baden-Württemberg hat sich am 10.05 2020 über eine Photovoltaik-Pflicht auf Nichtwohngebäuden verständigt [187]:

„Zwar hat Hamburg im Zuge seines neuen Klimaschutzgesetzes als erstes Bundesland eine Verpflichtung zur Photovoltaik-Nutzung eingeführt, diese greift aber erst ab 2023. In Baden-Württemberg sollen Solaranlagen auf neuen Nicht-Wohngebäuden bereits ab 2022 landesweit Vorschrift sein. […] Aber auch über den Nichtwohnbereich hinaus, muss – auch in anderen Bundesländern – aus Sicht des Umweltministers eine allgemeine Photovoltaik-Pflicht kommen."

Alle Technologien, die zu schneller Klimaneutralität führen, erfordern den kurzfristig zu beschleunigenden Ausbau von Photovoltaik und Windkraft. Die Studien des Fraunhofer ISE [68] [83] zeigen, dass dies am schnellsten auf dem sogenannten Suffizienz-Pfad bis 2035 möglich ist. Die wichtigsten Ergebnisse und daraus abgeleitete Erkenntnisse sind im Folgenden [68] zusammengestellt:

1. *„Das Erreichen der Klimaschutzziele im Bereich der Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien ist aus technischer und systemischer Sicht machbar.*
2. *Strom aus erneuerbaren Quellen wird zur wichtigsten Primärenergie. Die erneuerbaren Energien Wind und Sonne liefern hierzu den größten Beitrag.*
3. *Aufgrund geringerer Verluste in den Wandlungsketten – ein wesentliches Resultat der Sektorenkopplung – sinkt das Primärenergieaufkommen erheblich.*
4. *Eine starke Flexibilisierung der Strombereitstellung und -nutzung wird zu einem Schlüsselelement der Systementwicklung.*
5. *Die Elektrolyse verbunden mit der Nutzung von Wasserstoff in verschiedenen Anwendungsbereichen ist ein wichtiger Baustein der zukünftigen Energieversorgung.*
6. *Die effiziente Nutzung von Energie und eine damit einhergehende Verbrauchsreduktion durch technische Maßnahmen tragen insbesondere im Bereich der Wärmebereitstellung wesentlich zur Erreichung von Klimaschutzzielen bei.*
7. *Verhaltensänderungen in weiten Teilen der Gesellschaft im Sinne eines sparsamen Umgangs mit Energie können eine erhebliche Wirkung auf den Umbau des Energiesystems haben und reduzieren die Kosten substanziell. […] Würde dies so eintreten, wäre eine signifikant geringere Menge an technischen Anlagen zur Wandlung, Speicherung, Verteilung und Nutzung erneuerbarer Energien notwendig. […] Zugleich lässt sich vermuten, dass geringere Ausbaumengen […] auch zu einer größeren Akzeptanz des Wandels, der mit dem Umbau des Energiesystems einhergeht, führen würden.*
8. *Der Import von Energie in Form von Strom und im Ausland auf Basis erneuerbaren Stroms hergestellter synthetischer chemischer Energieträger ist ein wichtiger Teil zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele. […]*
9. *Aus Systemsicht besteht die Möglichkeit der stärkeren Nutzung von Photovoltaik, wenn der Windausbau nicht im optimalen Maße gelingt. Dies führt allerdings zu einem größeren Bedarf an Energiespeicherung und zu höheren CO_2-Vermeidungskosten als bei einer kostenoptimalen Entwicklung.*
10. *Die Energiewende ist mit Mehraufwendungen verbunden gegenüber einer Entwicklung, die sich nicht an der Einhaltung von Klimaschutzzielen orientiert. […] Die Nettomehraufwendungen der zuvor beschriebenen Szenarien im Vergleich mit einem Business-as-usual-Szenario (BAU) liegen zwischen 440 Mrd. € für das Szenario Suffizienz und 2330 Mrd. € für das Szenario Beharrung."*

2.2.2 EnEV, EEWärmeG und GEG

Beide Gutachter sind seit 1996 (Prof. Wolff) bzw. 2000 (Prof. Jagnow) in die Normung zur Energieeinsparverordnung eng einbezogen. Prof. Wolff war von 1996 bis 2004 Obmann der Norm zur Anlagentechnik DIN V 4701-10, die noch heute in Ihrer ursprünglichen Fassung von 2003 gültig ist. Prof. Jagnow ist bis heute im Normenausschuss der Nachfolgenorm DIN V 18599 aktiv. Sie ist Koordinatorin für den Teil 1 sowie die Beiblätter 1 und 2.

Viele Veröffentlichungen belegen, dass beide seit Inkrafttreten der EnEV immer für reale Verbrauchsanalysen anstelle theoretischer Bedarfswerte eingetreten sind. Zur Bewertung der globalen bzw. gesamtgesellschaftlichen Effekte bevorzugen die Projektbearbeiter CO_2-Äquivalente (statt Primärenergie).

In einem Kommentar für das Deutsche Architektenblatt kamen die beiden Gutachter kurz nach Einführung der EnEV 2001/02 zu folgendem Fazit [147]:

> *„Was haben wir gelernt? Kommen wir zurück zum Thema und zur Hauptfragestellung dieses Beitrages. ‚Gelernt' wurde von der überwiegenden Zahl der Verantwortlichen in Ministerien, Industrieverbänden, Wissenschaft und Normungsausschüssen, dass nur eine integrierte Gesamtbilanzierung ohne Trennung von baulichen und anlagentechnischen Berechnungsvorschriften sowie eine Qualitätssicherung für die Weiterentwicklung von der EnEV zur europäischen Gebäuderichtlinie sinnvoll und notwendig ist.*
>
> *Positiv zu bewerten ist daher der Schritt zur ganzheitlichen Bewertung von Gebäude und Anlagentechnik in der geplanten Norm DIN 18599. Die Autoren empfehlen hierbei dringend, in den Bilanzverfahren nur noch absolute Energiewerte zu verwenden und auf bezogene Größen wie Nutzungsgrade und Aufwandszahlen weitgehend zu verzichten. Dann werden das Verfahren und die Handhabung vielleicht auch für einen normal begabten Nachweisführenden etwas durchschaubarer."*

Nach nun fast zwanzig Jahren EnEV-Praxis, erweitert um das EEWärmeG (2007/08), halten die Gutachter einen anderen Weg des Nachweises für zielführend: Umstellung auf Erfolgsnachweise mit den gemessenen Verbrauchswerten [148] und Ersatz des Primärenergiebezugs durch Endenergie- und CO_2-Bezug [116]. Dies würde den Nachweis einfacher machen und die Nachweisgröße entsprächen der Zielgröße des Klimaschutzes. [79]

Hier die entsprechenden Begründungen:

Aus dem Jahr 2012: Seit der Einführung der EnEV 2002 ist beim Neubau und unter bestimmten Bedingungen bei Änderung, Erweiterung und Ausbau von Gebäuden und Anlagen ein nach der Verordnung zu berechnender Jahres-Primärenergiebedarf einzuhalten. In seiner aktuellen Ausgestaltung führt der Primärenergiebezug zu Missverständnissen, vor allem durch den zu geringen Primärenergiefaktor für biogene Brennstoffe und für Fernwärme im Vergleich zu fossilen Brennstoffen. Ebenso führt das zu offen gestaltete Kompensationsprinzip in der EnEV zu einer Fehlentwicklung. Ein Arbeitsentwurf zur EnEV 2012 sieht statt einer Korrektur sogar eine noch weitergehende Öffnung vor. In Kombination beider Fehlentwicklungen wäre es möglich, neue Gebäude schlechter als in den 1980er-Jahren und trotzdem „EnEV-konform" zu dämmen [148].

Der Bundesrat hat in seiner Zustimmung zur EnEV 2014 die Bundesregierung aufgefordert, die Vereinfachung und Zusammenführung von EnEV und EEWärmeG unverzüglich anzugehen, einen besseren Abgleich derselben haben CDU, CSU und SPD in ihren Koalitionsvertrag und danach in weitere Aktionspläne geschrieben. Doch eine entsprechende Umsetzung wäre nur ein Teilerfolg.

Das GEG als Zusammenführung von EnEG, EnEV und EEWärmeG wurde inzwischen sowohl im Bundestag verabschiedet als auch im Bundesrat angenommen. Es wird ab 1. November 2020 gelten.

Primärenergiebezug wurde obsolet

Ende der 1990er-Jahre gab es eine politische Entscheidung, die umweltrelevanten Bewertungen in der EnEV über Primärenergie und nicht über CO_2-Emissionen vorzunehmen. Geschuldet war dies weitgehend der CO_2- neutralen Erzeugung der Kernenergie. Schon damals wollte man aus der Kernenergie aussteigen und sah deshalb keinen Spielraum, den Stromverbrauch im Gebäudesektor durch eine günstige Bewertung in der EnEV zu erhöhen.

Zwar kam es nach dem Atomkonsens (2000) im Dezember 2010 noch zu einer Laufzeitverlängerung. Doch die Havarie im Atomkraftwerk Fukushima im Frühjahr 2011 nahm diese wieder weitgehend zurück und besiegelte Deutschlands Ausstieg. Im Atomgesetz vom 31. Juli 2011 wurde festgeschrieben: Die letzte „Berechtigung zum Leistungsbetrieb einer Anlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität erlischt mit Ablauf des 31. Dezember 2022 für die Kernkraftwerke Isar 2, Emsland und Neckarwestheim 2 ".

Es wird also in Deutschland in wenigen Jahren keine Stromerzeugung aus Kernenergie mehr geben, die Primärenergiebewertung ist damit obsolet geworden. Darum kann wieder auf den ehemaligen Ansatz der reinen CO_2-Bilanzierung auf Basis der eingesetzten Endenergieträger zurückgegriffen werden [116].

Gefordert wurde bereits frühzeitig, den kompletten EnEV-Nachweis mit realen Verbrauchsmessungen und dem Verfahren der Energieanalyse aus dem Verbrauch EAV [92] als Erfolgsnachweis zu führen. Selbstverständlich wären dabei Mindestanforderungen an die Gebäudehülle und an die Anlagentechnik als Einzelanforderungen zu erfüllen – ein Verfahren, das sich vor Einführung der EnEV und des EEWärmeG mit den früheren Wärmeschutz- und Heizungsanlagenverordnungen bewährt hat.

Ein deutlicher Vorteil des skizzierten Verfahrens ist der konsequente Verzicht auf komplizierte Berechnungen und unzählige Annahmen für die Nachweisführung. Das Ergebnis wird ehrlicher und spiegelt die realen Bedingungen wider. Weiterhin ist eine Kontrolle schnell und einfach (auch für den Nutzer nachvollziehbar) durchführbar. Die Verwendung der EAV schon nach der Inbetriebnahme und als laufende Qualitätskontrolle kann allen Beteiligten helfen, unerkannte Fehler schnell zu entdecken und die Anlagentechnik und das Nutzerverhalten zu optimieren.

Die oben beschriebenen Vorschläge wurden zur Diskussion des geplanten Gebäudeenergiegesetzes als Zusammenführung von EnEG, EnEV, EEWärmeG in mehreren Fachveröffentlichungen der Gutachter wiederholt [188] [163] [149] [55].

Aufgrund der aus Sicht der Gutachter hohen Relevanz für die zukünftigen Novellierungen des GEG wird der 2017 veröffentlichte Vorschlag [163] hier auszugsweise wiedergegeben:

„Die Autoren schlagen alternativ zum derzeitigen GEG-Entwurf vor, als Hauptanforderung die spezifischen CO_2-Emissionen der Gebäude (Neubau und zukünftig auch Bestand) mit Ausweisung und Berücksichtigung aller eingesetzten Endenergien (Wärme und Strom) zu begrenzen. Als zwingende Nebenanforderung sollten wie bisher in etwas abgewandelter Form Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz gestellt werden (Transmissionswärmeverlustkoeffizient H_T bezogen auf die beheizte Fläche A_{EB});

Die zusätzlichen Forderungen an die Qualität des Baukörpers hinsichtlich Dichtheit und Wärmebrückenminimierung, an die Qualität aller Komponenten der Anlagentechnik sowie an die dazu notwendige Qualitätssicherung sollten zukünftig in getrennten Verordnungen formuliert werden, die vom GEG in Bezug genommen werden.

Ein Erfolgsnachweis durchgeführter Maßnahmen durch Analysen real verbrauchter Endenergien und der damit verbundenen CO_2-Emissionen sollte zukünftig den bisher rechnerischen Bedarfsnachweis vollständig ersetzen“.

Noch immer besteht die Chance, evtl. sogar forciert durch die europäische Gesetzgebung zum Klimaschutz, diese Vorschläge in einem zukünftigen GEG oder auch in einem neuen Gesetzgebungspaket zu realisieren. So wie sie auch im EU-Mitgliedsland Schweden in ähnlicher Form seit den 90er-Jahren praktiziert wird.

Die Chancen für ein solch neues Konzept der Nachweisführung haben sich mit der neuen steuerlichen Anreizgesetzgebung [29] und mit den neuen Förderbedingungen der Bundesförderung [30] sogar stark erhöht. Gefordert wird in den technischen Mindestanforderungen für die Förderung von Einzelmaßnahmen [30] bei jeglichem Einbau eines neuen Wärmeerzeugers, dass dieser mit Messeinrichtungen zur End- und Nutzenergiemessung sowie einer Effizienzanzeige ausgestattet wird. Die oben geforderten Mindestanforderungen an Bauteile der Gebäude- und Anlagentechnik befinden sich bereits heute fast vollständig in der „Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung – EnSanMV“ von 2019 [29].

2.2.3 Europa und EPBD

Europäische und deutsche Zielsetzungen sind vielfältig und teils widersprüchlich oder widersprüchlich formuliert.

Primäres Ziel ist das Einhalten des CO_2-Budgets, dem sich nach Einschätzung des Sachverständigenrates für Umweltfragen alle anderen Zielsetzungen unterzuordnen haben [41]. Es wird an dieser Stelle nicht weiter beschrieben und kommentiert, in welchem Umfang die europäischen Länder Ziele eingehalten haben oder auch nicht. Wichtiger ist die Tatsache, dass der deutsche CO_2-Fußabdruck höher und damit schlechter ist als der mittlere Fußabdruck in der EU und etwa doppelt so hoch wie der weltweite Fußabdruck.

Wichtig für das weitere Verständnis ist, dass relative bzw. Prozent-Zielangaben der Klimaschutzdiskussion nicht dienlich sind. Denn immer muss dann gleichzeitig der Bezug genannt werden.

Hatte man sich in den internationalen und europäischen Klimaschutztreffen auf die weltweiten, europäischen und nationalen Emissionen im Bezugsjahr 1990 geeinigt, wurde dies nach der Pariser Konferenz 2015 durch den IPCC auf das Bezugsjahr 2010 festgelegt.

> *„[...] Doch wenn die globalen Klimaschutzbemühungen nicht erheblich verstärkt werden, dann wird die Schwelle von 1,5°C Erwärmung bereits im Jahr 2040 oder sogar schon 2030 erreicht [...] Nach dem IPCC-Bericht müssen dafür die weltweiten Kohlendioxid-Emissionen bis 2030 um 45 Prozent gegenüber 2010 sinken. Der Weltklimarat hat hier – anders als in vorhergehenden Berichten – 2010 als Bezugsjahr eingeführt und nicht wie bisher auf das Jahr 1990 Bezug genommen. Bis 2050 ist dann die Reduktion auf Null-Emissionen notwendig." [189]*

Das Beispiel zeigt, wie wenig informativ Prozentangaben zur Zielerreichung sein können. Man muss umrechnen und berücksichtigen, wie hoch die Emissionen 1990 und 2010 waren – und das unterschiedlich weltweit, auf europäischer und auf nationaler Ebene. Viel einfacher wäre für jedes Land die jährliche Aktualisierung des „persönlichen Fußabdrucks" in Tonnen CO_2 pro Kopf und Jahr. Es würde sofort offensichtlich, wer dann wieviel zu tun hat.

Gleiches gilt für die verschiedenen Einzelziele, die auf europäischer und nationaler Ebene unterschiedlich formuliert werden. Obwohl bestmögliche Standards, z. B. für die Anforderungen an die Gebäudehülle oder an die Effizienz der eingebauten Anlagenelemente der Heizungs- und Lüftungstechnik, nicht mehr in Frage gestellt werden, wird immer noch das heute überflüssige Kompensieren zwischen verschiedenen Maßnahmen weitergeführt. Ohne, dass aber der reale Erfolg von Neubauten oder Modernisierungsmaßnahmen im realen Betrieb systematisch durch Verbrauchsanalysen nachgewiesen wird.

Die Frage, was ein „Nahe-Null-Energie"-Haus im Sinne der EPBD (Richtlinie (EU) 2018/844 - Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden) [190] ist, ist seit Jahren unbeantwortet.

Schulze-Darup forderte 2011 in einer Studie [123] weitaus bessere Qualitäten als sie heute von der Gesetzgebung in EnEV bzw. zukünftigem GEG gefordert werden:

„Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden aus den untersuchten Modellprojekten Empfehlungen für zukunftsfähige technische Gebäudestandards abgeleitet, die im Zyklus ohnehin anstehender Maßnahmen an den Bauteilen möglichst wirtschaftlich durchgeführt werden können: die U-Werte für die Gebäudehülle liegen für die Wand bei 0,18 bis 0,12 W/(m²K), im Dachbereich bei 0,16 bis 0,10 W/(m²K), der Kellerdecke bei 0,20 bis 0,15 W/(m²K) und für die Fenster bei U_W 0,8 bis 0,9 W/(m²K). Die Gebäudetechnik erfordert eine Lüftungsanlage, die möglichst mit Wärmerückgewinnung ausgeführt werden sollte. Die Heizanlage sollte hohe Effizienz mit dem Einsatz eines hohen Anteils erneuerbarer Energien verbinden.

Da der technische Sanierungszyklus kürzer ist, kann ggf. der optimierte regenerative Ansatz bei einer ersten Erneuerung der Anlage nach 15 bis 20 Jahren durchgeführt werden."

2.2.4 Fordern und Fördern

Während Anforderungen, v. a. an die Qualitätssicherung in Planung, Ausführung und Betrieb in den bekannten Verordnungen und Gesetzen festgelegt werden (vgl. Anhang 2.2.2), werden seit mehr als zwei Jahrzehnten Maßnahmen durch entsprechende Förderprogramme, z. B. der Kreditanstalt für Wiederaufbau und des BAFA, bzw. seit kurzem auch durch steuerliche Begünstigung nach vorne gebracht. Nachfolgend wird eine Kurzbeschreibung aus einer 2020 an der Ostfalia erstellten Masterprojektarbeit [191] zusammengefasst.

Energieeinspargesetz - EnEG

Das EnEG wurde im Zuge der Ölkrise 1976 verabschiedet. In seiner neuesten Form wurde es 2005 bekannt gemacht. Ziel ist die Reduzierung des Energieverbrauchs von Gebäuden. Zur Erfüllung des EnEG dient die ergänzende EnEV.

Bezugnehmend auf das Thema Qualitätssicherung im Betrieb liefert nur der §3 Abs. 1 eine Aussage: „Wer Heizungs-, raumlufttechnische, Kühl-, Beleuchtungs- sowie Warmwasserversorgungsanlagen oder -einrichtungen in Gebäuden betreibt oder betreiben lässt, hat dafür Sorge zu tragen, dass sie nach Maßgabe der nach Absatz 2 zu erlassenden Rechtsverordnung so instandgehalten und betrieben werden, dass nicht mehr Energie verbraucht wird, als zu ihrer bestimmungsgemäßen Nutzung erforderlich ist." Diese Formulierung lässt viel Spielraum für Interpretationen.

Energieeinsparverordnung EnEV

Die EnEV wurde am 01.02.2002 eingeführt und ersetzt seitdem die Heizungsanlagenverordnung (HeizAnlV) und die Wärmschutzverordnung (WSchV). Sie gilt vorwiegend für den Neubau und teilweise auch für Sanierungsmaßnahmen und liefert u. a. Angaben zu den Mindestanforderungen an Wärmedurchgangskoeffizienten für die Gebäudehülle, zur Leitungsdämmung und zur Ausstattung von Anlagen mit Regelgeräten. Ihre Anforderungen sind verpflichtend zu erfüllen. Die EnEV begrenzt mit in ihrer Hauptanforderung den maximalen Primärenergiebedarf der Gebäude. Der Primärenergiebedarf umfasst die Energiemengen für Heizung, Warmwasserbereitung, Kühlung und Lüftung sowie elektrische Hilfsenergien im Gebäude und berücksichtigt die Vorverluste für Förderung, Transport und Umwandlung der eingesetzten Energieträger. Außerdem dürfen als Nebenanforderung die Höchstwerte des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlusts die vorgegebenen Werte der EnEV nicht überschreiten.

Seit 2009 ist der durch die EnEV geforderte Energieausweis als rechnerischer Bedarfs- oder als Verbrauchsauweis (Jahresverbrauchswerte der letzten drei Jahre) Pflicht bei allen Gebäuden und liefert Daten zur Energieeffizienz und den anfallenden Energiekosten.

Zu Zwecken der Qualitätssicherung fordert die EnEV eine Bestätigung durch Sachverständige oder Fachunternehmen für die Einhaltung der Vorgaben der EnEV bei energetischen Maßnahmen. Dies erfolgt durch eine schriftliche Unternehmererklärung. Außerdem muss die Heizungsanlage kontinuierlich durch den Schornsteinfeger im Rahmen der Feuerstättenschau geprüft werden. Somit werden die Abgaswerte der Anlagen kontrolliert und erhöhte Schadstoffbelastungen erkannt. Somit werden durch die EnEV nur ein Bedarfsnachweis und kein Erfolgsnachweis durch Verbrauchsmessung gefordert.

Anders als in Schweden. Dort muss zur Erfüllung der gültigen Nationalen Bauverordnung bei Neubauten und sanierten Bestandsgebäuden der Energieverbrauch bei der Planung abgeschätzt werden und nach Durchführung der Maßnahme sind die Verbrauchsdaten für ein Jahr zu messen und anschließend der kontrollierenden Behörde vorzulegen. Bei Bestandsgebäuden ist der Energieverbrauch zu messen.

Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz EEWärmeG

Das EEWärmeG ist 2009 in Kraft getreten, um den Anteil an erneuerbaren Energien im Sektor der Gebäudetechnik zu erhöhen. Es sieht vor, dass bei Neubauten ein bestimmter Anteil des Wärmeenergiebedarfs (Beheizung, Warmwasserbereitung und Kühlung incl. Verluste der Verteilung und Speicherung) durch erneuerbare Energien abgedeckt wird. Die Höhe des Anteils am Wärmeenergiebedarf richtet sich nach dem Energieträger bzw. der Art der Energieerzeugung. Die Anforderungen des EEWärmeG bestehen nur für Neubauten.

In Baden-Württemberg gilt zusätzlich das Erneuerbare-Wärme-Gesetz (EWärmeG) der Landesregierung, welches für alle am 01. Januar 2009 bereits errichteten Wohn- und Nichtwohngebäude ab einer Fläche von 50 m² gilt. Es regelt die Nutzungspflicht für Eigentümer von bestehenden Gebäuden und schreibt einen Deckungsanteil von mindestens 15 % an erneuerbaren Energien am jährlichen Wärmeenergiebedarf vor, wenn der zentrale Wärmeerzeuger ausgetauscht oder erstmals eine zentrale Heizanlage eingebaut wird. Für Neubauten gilt das EEWärmeG des Bundes.

Richtlinien und Empfehlungen

Für die Planung, Ausführung und den Betrieb gibt es bereits mehrere ergänzende Richtlinien und Empfehlungen, welche jedoch keine rechtlich bindende Wirkung haben. Die Berücksichtigung dieser Dokumente muss vertraglich vereinbart werden, wenn sie bei einem Projekt umgesetzt werden sollen. Besonders hervorzuheben sind die „Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen“ [35].

Sie wurden im Januar 2014 vom Magistrat der Stadt Frankfurt am Main erlassen und gelten seitdem für alle Neubau- und Sanierungsvorhaben der Stadtverwaltung, städtischer Einrichtungen und Eigenbetriebe, die für die Stadt Frankfurt errichtet werden. Eine Nachrüstungspflicht für bestehende Gebäude besteht nicht. Die Leitlinien spiegeln den aktuellen Stand der Technik wieder und werden jährlich fortgeschrieben. Das Ziel ist, bei vorgegeben Qualitäten die jährlichen Gesamtkosten über den gesamten Lebenszyklus (i.d.R. 50 Jahre) zu minimieren. Die Leitlinien werden Bestandteil aller Architekten- und Ingenieurbeauftragungen und somit für die Planer rechtlich bindend. Die Einhaltung der Leitlinien ist an vier Meilensteine mit dazugehörigen Checklisten gebunden und wird von der Projektleitung des Hochbauamtes geprüft.

Durch die Kontrolle wird die Qualitätssicherung bei Planungsleistungen sichergestellt. Bei Einhaltung wird ein entsprechendes Zertifikat ausgestellt. Vor Beginn der Planung durch externe Büros wird eine sorgfältig abgestimmte und genehmigte Zielvereinbarung niedergelegt und im weiteren Planungsverlauf fortgeschrieben. Bei der Planung wird ein besonderes Augenmerk auf eine abgestimmte Planung aller Planungsbeteiligten gelegt und der Projektstand kontinuierlich dokumentiert Im Planungsfortschritt sind neben den Anschaffungskosten auch immer die voraussichtlichen Betriebskosten zu berücksichtigen. Das Honorar der Planer muss sich nicht, abweichend von der HOAI, an der Kostenberechnung orientieren, sondern kann pauschal auf der Basis des Raumprogrammes und entsprechender Kostenkennwerte vereinbart werden. Eine zusätzliche Bonus-/Malus-Regelung dient zur Sicherstellung, dass die Planer ein Interesse daran haben, die Gesamtkosten bei gegebener Qualität zu minimieren.

Die Leitlinien definieren die Anforderungen an die Ausführung und Energieeffizienz sehr genau. Alle Gebäude sollen dem Passivhausstandard entsprechen. Ist dies nicht möglich, ist mindestens eine 30 %-tig bessere Energieeffizienz gegenüber der aktuellen EnEV verlangt. Bei der Technik gilt der Ansatz, weniger ist mehr. Planungskonzepte, die die Gebäudetechnik und deren Steuerung minimieren, sind zu bevorzugen. Daraus ist zu schließen, dass Maßnahmen im Hochbau auf die Reduzierung von Anlagentechnik ausgerichtet sind, um Betriebs- und Wartungskosten zu verringern.

Förderprogramme und ihre Wirkung auf die Qualitätssicherung

Die Fülle an einzelnen Förderprogrammen (KfW, BAFA) für Einzelmaßnahmen und Maßnahmenprogramme ist für jeden angesprochenen Wohneigentümer nur schwer in Gänze zu überblicken – trotz diverser digitaler Hilfsmittel. Erschwerend kommt hinzu, dass bislang die Angebote auf zwei Institutionen aufgeteilt sind. Zum einen bietet die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) subventionierte Kredite und zum anderen gibt es vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) Anreizprogramme in Form von definierten Zuschüssen.

Zusätzlich sind seit Anfang 2020 Verbesserungen in der steuerlichen Absetzbarkeit geschaffen worden. Dies führt dazu, dass teilweise Maßnahmenpakete ausgewählt und gefördert werden, die nicht das Optimum an Energieeffizienz bei einem Gebäude schaffen. Aus diesem Grund hat die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) ab 2020 eine neue Förderrichtlinie erlassen, welche die bisherigen KfW- und BAFA-Programme vereint.

Förderprogramme und ihr geänderter Stand im Frühjahr 2020 werden ausführlich in Anhang 5.10 beschrieben. Auch hier wird von den Autoren eine Kopplung der Förderung an Erfolgsnachweise auf Basis von Verbrauchsauswertungen empfohlen.

Hier ein kurzer Ausblick auf das neue BEG – Bundesförderung für effiziente Gebäude

Förderrichtlinie zur Bundesförderung für effiziente Gebäude

Die neuen Förderrichtlinien zur Bundesförderung für effiziente Gebäude sollen dazu beitragen, die nationalen sowie die europäischen Energie- und Klimaziele bis 2030 zu erreichen. Hierfür werden die bestehenden Programme CO_2-Gebäudesanierungsprogramm (EBS-Programme), Marktanreizprogramm für erneuerbare Energien im Wärmemarkt (MAP), Anreizprogramm Energieeffizienz (APEE) und Heizungsoptimierungsprogramm (HZO) neu eingeführt.

Das Antragsverfahren soll stark vereinfacht und die Anreizwirkung für Investitionen in Energieeffizienz und erneuerbaren Energien verstärkt werden. Mit der Umsetzung der Richtlinie werden weiterhin die Förderinstitute KfW und BAFA beauftragt. Der Kreis der Antragsteller wird erweitert und die Zuschüsse im Vergleich zu den derzeitigen Förderungen erhöht. Die Förderrichtlinie teilt sich in zwei Programme auf. Zum einen in das Teilprogramm „Einzelmaßnahmen“ (BEG EM) und zum anderen in das Teilprogramm „Wohngebäude“ (BEG WG). Den beiden Teilprogrammen zugehörig liegen Technischen Mindestanforderungen (TMA) vor.

Nach Ansicht der Autoren sind die genannten Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei Heizungsanlagen verbesserungswürdig. Der Betrieb, und somit die ausschlaggebende Größe, wird nicht direkt geprüft. Es gibt keine Nachweispflicht, nach zum Beispiel einem vollen Betriebsjahr, dass die Planungswerte mit den Betriebsdaten übereinstimmen. Berücksichtigt wird in den „TMA“ das Thema Qualitätssicherung im Betrieb wie folgt [107]:

> *„Alle Energieverbräuche sowie alle erzeugten Wärmemengen eines förderfähigen Wärmeerzeugers müssen messtechnisch erfasst werden. Alle förderfähigen Wärmeerzeuger müssen mit einer Energieverbrauchs- und Effizienzanzeige ausgestattet sein.“*

Die Forderung nach Erfassung der Energieverbräuche und Wärmemengen ist ein sehr wichtiger Schritt. Dies war in den bisherigen Förderprogrammen von KfW und BAFA nicht enthalten. Die Energieverbräuche können anschließend mit den Planwerten abgeglichen werden. Dadurch besteht die Möglichkeit den Wärmeerzeuger auf den optimalen, energieeffizienten Betrieb zu analysieren und ggf. richtig einzustellen.

Allerdings fehlt eine Regelung, wer und nach welchem Zeitraum und mit welchen Konsequenzen im Nichterfüllungsfall – die Effizienzen tatsächlich prüft. Und zudem eine Regelung, welches die geschuldete Effizienz überhaupt ist. Ein Bezug auf Prüfstandswerte ist nicht sinnvoll. Es braucht ambitionierte, aber realistische Vergleichsmaßstäbe.

2.2.5 Potential der Qualitätssicherung

Die Grundlagen für die Gesetzgebung und für die Förderprogramme zur Qualitätssicherung bei Planung, Ausführung und Betrieb sind nicht ausreichend, um die geplanten Effizienzkennwerte für die Qualitäten der Gebäudehülle (Wärmebrücken, Luftdichtheit) und der Anlagentechnik (Hydraulischer Abgleich, Dämmung von Rohrleitungen und Anlagenkomponenten, Einstellung von Regelpumpen und Vorlauftemperaturreglern) zu gewährleisten.

Wenige Verordnungen und Gesetze fordern punktuell entsprechende Maßnahmen, z. B. die im vorangegangenen Anhang 2.2.2 besprochene Energieeinsparverordnung. Aus Sicht der Gutachter sind diese Maßnahmen jedoch nicht ausreichend. Die Forderungen sind teilweise zu schwammig formuliert und bieten viel Interpretationsspielraum, z. B. die in EnEV - §3 Abs. 1 getroffene Aussage: „Wer Heizungs-, raumlufttechnische, Kühl-, Beleuchtungs- sowie Warmwasserversorgungsanlagen oder -einrichtungen in Gebäuden betreibt oder betreiben lässt, hat dafür Sorge zu tragen, dass sie nach Maßgabe der nach Absatz 2 zu erlassenden Rechtsverordnung so instandgehalten und betrieben werden, dass nicht mehr Energie verbraucht wird, als zu ihrer bestimmungsgemäßen Nutzung erforderlich ist.“. Eine Pflicht zur Erfassung von Wärmemengen gibt es bis heute nicht.

Ein wirksamer Weg, um die gesteckten Klimaziele zu erfüllen, liegt darin, die materiellen Anforderungen an die Sanierung seitens der Gesetzgebung und der Förderung zu steigern. Bereits heute ist aber festzustellen: Dass jeweils das Gesamtpotenzial der umgesetzten Maßnahmen ausgeschöpft wird, darf bezweifelt werden. Das betrifft die tatsächlich erzielte Dämm-, Luftdichtheits-, Lüftungs-, Heizungs-, Beleuchtungsqualität usw.

Ein erster Schritt wäre – neben der materiellen Erhöhung von Forderung und Förderung – die Überprüfung des erreichten Erfolgs. Für die Heizungstechnik bedeutet dies beispielsweise den Nachweis, dass Anlagen optimal abgeglichen sind und somit energieeffizient betrieben werden.

Die Regeln der Technik fordern zwar ausdrücklich den hydraulischen Abgleich, eine energieeffiziente Dimensionierung und weitere Punkte der Qualitätssicherung, jedoch wird die Berücksichtigung in der Praxis bisher nicht als rechtlich verpflichtend angesehen. Grund hierfür sind der fehlende Rechtszwang, eine in Bearbeitung befindliche technische Norm und die ausbleibenden Kontrollen. Solange die Anlagen aus Sicht des Nutzers funktionieren und die Anforderungen an den Komfortanspruch erfüllt sind, gibt es keine Beanstandungen. Die Unwirtschaftlichkeit der Anlage kann ohne Kontrollen in Form von Messungen u. ä. durch einen Nutzer ohne Fachwissen nicht beurteilt werden.

Fachunternehmererklärungen werden an einigen Stellen, gerade bei der Nutzung von Förderprogrammen von KfW und BAFA (siehe Anhang 5.10) rechtsverbindlich gefordert. Diese Art der Qualitätssicherung sehen die Verfasser jedoch als nicht ausreichend an. Bei den Fachunternehmererklärungen unterschreibt der Fachhandwerker nach Fertigstellung der Maßnahmen, dass seine ausgeführten Leistungen die notwendigen Vorschriften einhalten. Eine Kontrolle, ob dies der Realität entspricht, gibt es aus gesetzlicher Sicht aber nicht.

Zu dem Thema Qualitätssicherung in der TGA fehlt es bei allen Beteiligten (Planer, Handwerk, Auftraggeber, Nutzer) an Informationen über die Erfolgschancen. Wie die Vergangenheit zeigt, funktionieren die Anlagen auch ohne Qualitätssicherung. Allerdings im erhöhten Maß energetisch und wirtschaftlich suboptimal.

Planer und Handwerker wehren sich vermehrt sogar gegen entsprechende Maßnahmen, da aus einer Qualitätskontrolle im Betrieb erweiterte Regressansprüche bei falscher bzw. schlechter Planung und Ausführung resultieren könnten.

Jedoch sollten auch die Erfolgschancen betrachtet werden. Ein Planer oder Handwerker kann durch das Feedback der Betriebsanalyse Rückschlüsse auf die Qualität seiner Arbeit schließen und sich damit weiterentwickeln. Die Qualität im eigenen Unternehmen steigt. Ohne dieses Umdenken und die Akzeptanz bei Planung und Ausführung wird der Prozess weiterhin stark behindert und Einspar- bzw. Effizienzpotenziale nicht erschlossen.

Im Bereich der Auftraggeber, Eigentümer und Nutzer sieht es ähnlich schwierig aus, eine Qualitätssicherung zu etablieren. Dies zeigen die umfangreichen Untersuchungsergebnisse des von den Gutachtern begleiteten DBU-Projekts „Optimus“ [23]. Vielfach wird gefragt, ob der Mehraufwand bzw. die zusätzlichen Kosten den Zugewinn an Qualität und Energieeffizienz rechtfertigen. Zudem ist Nutzern und Endverbrauchern, aber auch Energieberatern und auch einzelnen ausführenden Handwerksunternehmen nicht bekannt, welche Maßnahmen zur Qualitätssicherung getroffen werden können. Der Informationsaustausch zwischen Fachplaner und ausführendem Handwerk findet aus Gründen eines vom Gesetzgeber bzw. Fördermittelgeber nicht eindeutig formulierten Forderungskatalogs an die Qualitätssicherung nicht oder nur unzureichend statt.

Positive Lösungen zu dieser Problematik finden sich in den Leitlinien wirtschaftliches Bauens der Stadt Frankfurt [35]. Eine Aufklärung über das Thema in der Gesellschaft könnte zu mehr Akzeptanz und einer Forderung durch den Nutzer führen. Die Chance der Qualitätssicherung für den Nutzer der Gebäude liegt in steigenden Energiepreisen und auch in der Einführung der CO_2-Bepreisung, da sich die Einsparung von Energie und CO_2 direkt auf die Nebenkosten auswirkt und zukünftig an Bedeutung gewinnen wird.

3 Anhang: Detaildarstellung zur Untersuchung der Mikroperspektive

Dieser Anhang stellt die Inhalte des Kapitel 1.4 detaillierter und mit weiteren Hintergrundinformationen, Beispielen, Tabellen und Abbildungen dar.

Das nachfolgende Kapitel stellt eingangs die gewählten zwei Beispielgebäude – ein Ein- und Zweifamilienhaus EZFH und ein Mehrfamilienhaus MFH – mit ihren geometrischen Eigenschaften sowie wärme- und versorgungstechnischer Ausstattung vor. Aus den Bestandsmerkmalen (Personenbelegung, Wärmedurchgangskoeffizienten der Hülle, Art der Wärmeerzeuger usw.) und ihrer Häufigkeitsverteilung innerhalb der Typgebäude resultieren Energiebilanzen für das mittlere EZFH und das mittlere MFH.

Anhand dieser Ausgangsenergiebilanzen wird nachfolgend zunächst dargestellt, welche Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle und der Technik ergriffen werden können, um den Bestand zu verbessern. Dazu wird nur das betreffende Merkmal untersucht, während alle anderen Merkmale durchschnittlich besetzt sind. Für die Einzelmaßnahmen wird die Wirtschaftlichkeit bewertet, auch werden Einordnungen zur erzielbaren Emissionsminderung sowie dem Preis je eingesparter Tonne CO_2 vorgenommen. Aus den Einzelmaßnahmen werden im nächsten Schritt Pakete geschnürt und Reihenfolgen gebildet, sofern dies sinnvoll erscheint.

Die Bewertungskriterien seien an dieser Stelle noch einmal kurz erläutert sowie ein Hinweis auf das entsprechende Kapitel im Anhang 5 „Hintergrundinformationen“ gegeben:

Ökologische Sicht:

Emissionsminderung der Maßnahme in [%], bezogen auf den Ausgangszustand; für Maßnahmen, die auch die Strombilanz betreffen, erfolgt eine Gemeinschaftsbetrachtung „Wärme plus Strom“ (z. B. Photovoltaik), sonst nur „Wärme“ – weitere Informationen siehe Anhang 6.1.7

äquivalenter CO_2-Preis der Maßnahme in [€/t], als Verhältnis der Investitionskosten (bei ohnehin erforderlichen Maßnahmen nur die Zusatzkosten) zur damit erzielten Emissionsminderung; genutzt als Sortierkriterium für – aus Sicht der Emissionsminderung günstige Maßnahmen – weitere Informationen siehe Anhang 5.5.4 und 6.1.2

Ökonomische Sicht:

Gesamtkostendifferenz aus Kapital- Wartungs- und Energiekosten der Maßnahme in [€/(m²a)], bezogen auf die beheizte Wohnfläche und verglichen mit dem Ausgangszustand; weitere Informationen siehe Anhang 6.1.2

notwendiger Investitionskostenzuschuss in [%] bezogen auf die Gesamtkosten einer Maßnahme; analog einer Bezuschussung durch heutige KfW-Programme; der Wert ergibt sich so, dass eine Grenzwirtschaftlichkeit ohne Verlust oder Gewinn erreicht wird; wird ein Wert kleiner als null ermittelt, wird der Wert nicht ermittelt – die Maßnahme ist auch so wirtschaftlich; wird ein Wert über 100 % ermittelt, ist dies ein Indiz, dass nicht die Investitionskosten problematisch sind, sondern andere Bestandteile der Gesamtkostenrechnung (regulär steigende Energie- oder Wartungskosten trotz Modernisierung); weitere Informationen siehe Anhang 6.1.2

notwendiger zusätzlicher Emissionspreis in [€/t]; allgemein steigt die Wirtschaftlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen, wenn die Energiepreise hoch sind – es lohnt sich dann das Sparen; Energiepreise können auch steigen, wenn sie durch Emissionspreise belegt werden; berechnet wird die Verteuerung der Energieträger (z. B. des vor der Sanierung verwendeten Erdgases), die eintreten müsste, damit genau eine Grenzwirtschaftlichkeit ohne Verlust oder Gewinn erreicht wird; weitere Informationen siehe Anhang 6.1.2

Die sich ergebende Aussage wird anschließend interpretiert für den Fall selbstgenutzter Gebäude sowie aus der Konstellation Mieter/Vermieter oder des Contracting. Abschließend werden die Erkenntnisse auf wohnähnliche Nichtwohnbauten und den Neubau qualitativ übertragen. Ein Ablaufschema ist in Abbildung 42 gegeben.

Alle Überlegungen berücksichtigen im besonderen Maße die Qualitätssicherung. Sofern es Praxisergebnisse hergeben, werden Bandbreiten erzielbarer Ergebnisse angegeben.

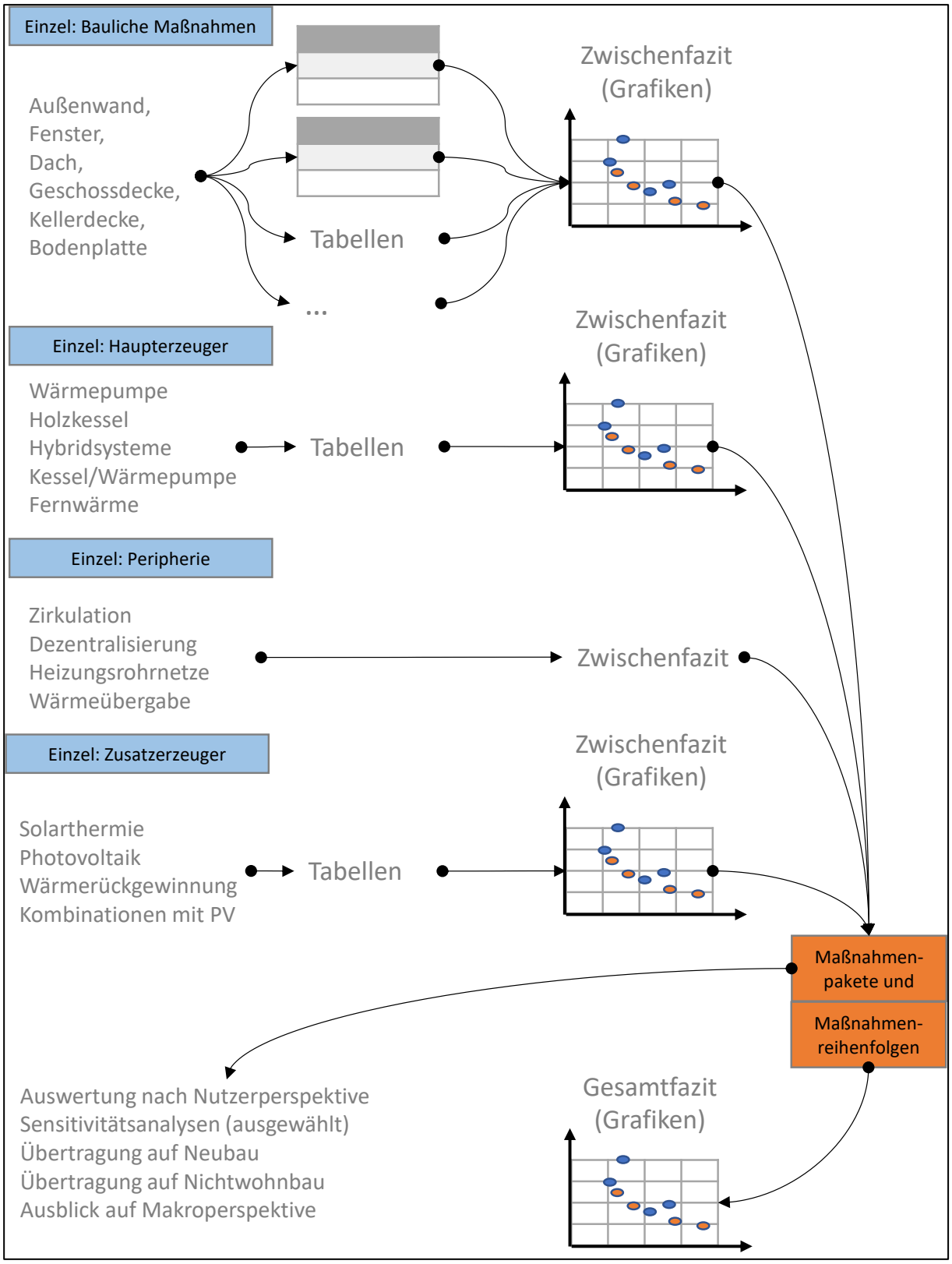


Abbildung 42 Ablaufschema für die Mikroperspektive [eigene Darstellung]

Information vorab: aufgrund der derzeitigen Energieträgerbepreisung erweisen sich fast alle Systemwechsel (z. B. Wärmepumpe statt Gaskessel) als unwirtschaftlich bzw. benötigen Investitionskostenzuschüsse, die die Investitionskosten überschreiten. Die Ergebnisse für eine alternative Bepreisung – welche die Gutachter für geeigneter halten – finden sich in Anhang 3.9.5.

3.1 Typgebäude

Zur Veranschaulichung möglicher Energie- und Emissionseinsparungen sowie der zugehörigen Wirtschaftlichkeit wird auf zwei Beispielgebäude zurückgegriffen.

Analog der Vorgehensweise in anderen Studien und Untersuchungen dient die „Deutsche Wohngebäudetypologie“ des Instituts für Wohnen und Umwelt [102] als Basis. Sie definiert allerdings fast 50 Gebäudetypen verschiedener Größe und Altersklasse, siehe Anhang 5.7.1. Eine komprimierte Anwendung erscheint sinnvoll, da es nachfolgend unter dem Aspekt der „Mikroperspektive“ vor allem darum geht, exemplarisch den Einzelfall darzustellen. Mit der – möglichst korrekten – Hochrechnung auf den deutschen Gesamtbestand befasst sich der Anhang 4 zur „Makroperspektive“.

Die Grundlage für das hier vorliegende Gutachten sind die 6 Beispielgebäude, welche von Diefenbach et al. in der Studie zum „Zielerreichungsszenario“ 2013 aus der Statistik abgeleitet wurden [62]. Die 3 Ein- und Zweifamilienhäuser sowie 3 Mehrfamilienhäuser wurden jedoch weiter komprimiert zu je einem Typgebäude. Darüber hinaus wurden die Zahlen an die aktuellsten Erhebungen des statistischen Bundesamtes angepasst.

Dies entspricht der Vorgehensweise, welche auch von Hoier und Erhorn in ihrer Studie „Entwicklung und energetische Bewertung alternativer Sanierungsfahrpläne“ [192] gewählt wurde: die Typgebäude werden aus der Statistik heraus komprimiert. Es entstehen je ein Ein-/Zweifamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus mit mittleren geometrischen Eigenschaften – je nach Häufigkeit des Vorkommens.

Aufgrund der statistischen Datenherkunft gibt es keine gezeichneten Modelle dieser Gebäude. Zum besseren Verständnis werden nachfolgend Fotos eingefügt, wie die Objekte aussehen könnten.

3.1.1 Ein- und Zweifamilienhaus EZFH

Das durchschnittliche Ein- und Zweifamilienhaus weist 1,2 Wohneinheiten und eine Wohnfläche von knapp 142 m² auf. Es ist etwa 15,8 Millionen Mal in Deutschland vorhanden. Hinsichtlich der Alterstypologie könnte es ein Objekt aus der Altersklasse F „1969-1978“ nach IWU [102] sein, weil Gebäude dieser Altersklasse die größte Einzelgruppe unter den Ein- und Zweifamilienhäusern ist. Eine beispielhafte Visualisierung zeigt Abbildung 43.

Abbildung 43 Beispielhaftes Ein- und Zweifamilienhaus [eigenes Bild]

Die zugehörigen geometrischen Daten der Gebäudehülle sind Tabelle 36 zu entnehmen. Das Typgebäude des IWU mit Datenstand von ca. 2010 ist in der linken Spalte dargestellt. Wie es zustande kommt, ist in Tabelle 168, Anhang 5.7.1 beschrieben. Es wird wie folgt aktualisiert: anhand der aktuelleren Werte für die Gesamtwohnfläche und Gebäudestückzahl des Zensus 2019 [101] zeigt sich eine größere Durchschnittswohnfläche. Daher wird auch die Gebäudehüllfläche entsprechend proportional erhöht.

		IWU-Typgebäude nach Mittelwertbildung Basis: Tabelle 168	nach Anpassung an Zensus18 [101]
Gesamtfläche	[m²]	2.022.000.000	2.242.305.000
Wohneinheiten	[WE]	18.590.000	18.966.444
Stückzahl	[G]	14.990.000	15.837.211
Grunddaten des Einzelobjektes			
Wohnfläche	[m²/G]	134,9	141,6
Wohneinheiten	[WE/G]	1,2	1,2
Gebäudehülle des Einzelobjektes			
Wand	[m²/G]	138,5	145,3
Dach/Obere Geschossdecke	[m²/G]	103,1	108,2
Boden/Kellerdecke	[m²/G]	84,5	88,7
Fenster	[m²/G]	27,2	28,5

Tabelle 36 Geometrische Daten des Typ-EZFH, eigene Berechnung nach [62] und [101]

In dem Einfamilienhaus wohnen durchschnittlich 2,74 Personen. Jeder Person sind entsprechend im Schnitt 51,6 m² Wohnfläche zuzuordnen. Die lichte Raumhöhe wird mit 2,50 m angenommen, was zu einem Luftvolumen von 354 m³ führt.

Die Detailauswertung zur Datenbasis des Gebäudestandes [7] ergibt, dass 53 % des oberen Gebäudeabschlusses eine Dachfläche ist, während 47 % der EZFH eine Begrenzung durch eine obere Geschossdecke aufweisen. Der untere Gebäudeabschluss ist zu 48 % eine Bodenplatte auf dem Erdreich und zu 52 % eine Kellerdecke. Diese Aufteilung ist für die Kostenschätzung relevant, denn die Sanierung ist entsprechend unterschiedlich aufwändig.

Tabelle 37 gibt einen Überblick über die Verteilung der einzelnen Erzeuger. Als Datenbasis dient die Datenerhebung zum Wohngebäudebestand von Cischinsky et al. von 2016 [7]. Sie wurde fortgeschrieben, wie im Anhang 5.6.2 erläutert wird.

Erzeuger	Heizungsversorgung, Anteile [-]	Trinkwarmwasserversorgung, Anteile [-]
Holzkessel	0,061	0,061
Erdgas NT	0,275	0,247
Heizöl NT	0,249	0,224
Erdgas Brennwert-Kessel	0,241	0,217
Heizöl Brennwert-Kessel	0,039	0,035
Fernwärme	0,040	0,040
Strom	0,033	0,120
Außenluft Wärmepumpe	0,038	0,034
Erdreich Wärmepumpe	0,023	0,023

Tabelle 37 Verteilung unterschiedlicher Wärmeerzeuger im Ein- und Zweifamilienhaus 2020 [eigene Darstellung]

Das Gebäude hat – im Falle der Zentralheizung – nach eigener Abschätzung [193] [23] [194] mit 20 % Wahrscheinlichkeit eine Fußbodenheizung und zu 80 % Heizkörper. Es gibt es Leitungsnetze, die mit 70 % Wahrscheinlichkeit im Keller liegen und mit 30 % Wahrscheinlichkeit nur im beheizten Zustand (Neubauten, Etagenheizungen).

Die Trinkwassererwärmung findet mit 12 % Wahrscheinlichkeit dezentral elektrisch statt und entsprechend zu 88 % als Zentralsystem [7]. Nach eigenen Abschätzungen hat – im Falle der Zentralversorgung – das System mit 50 % Wahrscheinlichkeit eine Zirkulation [193] [23] [194].

Eine Solarthermie ist – unter Fortschreibung der Zahlen von 2016 [7] – in 20 % der Gebäude vorhanden; etwa 14 % der Gebäude weisen eine Photovoltaik auf. Eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ist in 3 % der EZFH vorhanden und in 1 % der Gebäude eine Abluftanlage [7].

Wichtige Erkenntnisse und Ergebnisse, die insbesondere für das Ein- und Zweifamilienhaus EZFH gelten, sind im Folgenden in einem gesonderten Textfeld dargestellt.

3.1.2 *Mehrfamilienhaus MFH*

Das durchschnittliche Mehrfamilienhaus weist 6,8 Wohneinheiten und eine Wohnfläche von etwa 470 m² auf. Es ist etwa 3,2 Millionen Mal in Deutschland vorhanden.

Hinsichtlich der Alterstypologie könnte es ein Objekt aus der Altersklasse E „1958-1968“ nach IWU [102] sein, weil Gebäude dieser Altersklasse die größte Einzelgruppe unter den Mehrfamilienhäusern ist. Eine beispielhafte Visualisierung zeigt Abbildung 44.

Abbildung 44 Beispielhaftes Mehrfamilienhaus [eigenes Bild]

Die zugehörigen geometrischen Daten der Gebäudehülle sind Tabelle 38 zu entnehmen. Die Hintergrundinformationen zu der Anpassung des IWU-Datenstandes von ca. 2010 an die Zensusdaten von 2018 sind in Anhang 3.1.1 im Zusammenhang mit dem Ein- und Zweifamilienhaus beschrieben.

		IWU-Typgebäude nach Mittelwertbildung Basis: Tabelle 168	nach Anpassung an Zensus18 [101]
Gesamtfläche	[m²]	1.393.000.000	1.511.410.000
Wohneinheiten	[WE]	20.840.000	21.862.273
Stückzahl	[G]	3.050.000	3.216.005
Grunddaten des Einzelobjektes			
Wohnfläche	[m²/G]	456,7	470,0
Wohneinheiten	[WE/G]	6,83	6,8
Gebäudehülle des Einzelobjektes			
Wand	[m²/G]	333,9	343,5
Dach/Obere Geschossdecke	[m²/G]	202,8	208,7
Boden/Kellerdecke	[m²/G]	175,6	180,7
Fenster	[m²/G]	93,7	96,4

Tabelle 38 Geometrische Daten des Typ-MFH, eigene Berechnung nach [62] und [101]

In dem Mehrfamilienhaus wohnen durchschnittlich 12,18 Personen. Jeder Person sind entsprechend im Schnitt 38,6 m² Wohnfläche zuzuordnen. Die lichte Raumhöhe wird mit 2,50 m angenommen, was zu einem Luftvolumen von 1175 m³ führt.

Die Detailauswertung zur Datenbasis des Gebäudestandes [7] ergibt, dass 40 % des oberen Gebäudeabschlusses eine Dachfläche ist, während 60 % der MFH eine Begrenzung durch eine obere Geschossdecke aufweisen. Der untere Gebäudeabschluss ist zu 14 % eine Bodenplatte auf dem Erdreich und zu 86 % eine Kellerdecke. Die Aufteilung ist für die Kostenschätzung relevant.

Tabelle 39 gibt einen Überblick über die Verteilung der einzelnen Erzeuger. Als Datenbasis dient die Datenerhebung zum Wohngebäudebestand von Cischinsky et al. von 2016 [7]. Sie wurde fortgeschrieben, wie im Anhang 5.6.2 erläutert wird.

Erzeuger	Heizungsversorgung, Anteile	Trinkwarmwasserversorgung, Anteile
	[-]	[-]
Holzkessel	0,021	0,021
Erdgas NT	0,301	0,242
Heizöl NT	0,151	0,121
Erdgas Brennwert-Kessel	0,261	0,210
Heizöl Brennwert-Kessel	0,023	0,018
Fernwärme	0,192	0,192
Strom	0,034	0,180
Außenluft Wärmepumpe	0,011	0,009
Erdreich Wärmepumpe	0,007	0,007

Tabelle 39 Verteilung unterschiedlicher Wärmeerzeuger im Mehrfamilienhaus 2020 [eigene Darstellung]

Das Gebäude hat – im Falle der Zentralheizung – nach eigener Abschätzung [193] [23] [194] mit 10 % Wahrscheinlichkeit eine Fußbodenheizung und zu 90 % Heizkörper. Es gibt es Leitungsnetze, die mit 90 % Wahrscheinlichkeit im Keller liegen und mit 10 % Wahrscheinlichkeit nur im beheizten Zustand (Neubauten, Etagenheizungen).

Die Trinkwassererwärmung findet mit 18 % Wahrscheinlichkeit dezentral elektrisch statt und entsprechend zu 82 % als Zentralsystem [7]. Nach eigenen Abschätzungen hat – im Falle der Zentralversorgung – das System mit 80 % Wahrscheinlichkeit eine Zirkulation [193] [23] [194].

Eine Solarthermie ist – unter Fortschreibung der Zahlen von 2016 [7] – in 9 % der Gebäude vorhanden; etwa 6 % der Gebäude weisen eine Photovoltaik auf. Eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ist in 1 % der MFH vorhanden und in 4 % der Gebäude eine Abluftanlage [7].

Wichtige Erkenntnisse und Ergebnisse, die insbesondere für das Mehrfamilienhaus MFH gelten, sind im Folgenden in einem gesonderten Textfeld dargestellt.

3.1.3 Grundbilanz

Werden alle Eigenschaften der beiden Gebäude auf ihre jeweiligen Durchschnittswerte festgelegt, entsteht die mittlere Energiebilanz für die Gebäude. Die resultierenden Ergebnisse für die Endenergie zeigen Tabelle 40 und Tabelle 41.

	Typgebäude		EZFH		MFH	
	Qualitätssicherung		mit	ohne	mit	ohne
Primärenergie	Heizung	kWh/(m²a)	145	170	108	128
	Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	29	33	37	39
	Wärme	kWh/(m²a)	174	202	144	167
	Haushaltsstrom	kWh/(m²a)	44	44	58	58
	PV Strom selbst genutzt	kWh/(m²a)	1	1	0	0
	PV Strom rückgespeist	kWh/(m²a)	0	0	0	0
	gesamt	kWh/(m²a)	216	245	202	225
Emissionen	Heizung	kg/(m²a)	32	37	24	28
	Trinkwarmwasser	kg/(m²a)	6	7	8	9
	Wärme	kg/(m²a)	38	45	32	37
	Haushaltsstrom	kg/(m²a)	11	11	14	14
	PV Strom selbst genutzt	kg/(m²a)	0	0	0	0
	PV Strom rückgespeist	kg/(m²a)	0	0	0	0
	gesamt	kg/(m²a)	49	55	47	52
Energiekosten	Wärme	€/a	1751	2030	5167	5907
	Haushaltsstrom	€/a	1063	1063	4718	4718
	PV Strom selbst genutzt	€/a	34	34	28	28
	PV Strom rückgespeist	€/a	88	88	73	73
	gesamt	€/a	2692	2970	9784	10524

Tabelle 40 Umweltbilanz und Energiekosten für durchschnittliche EZFH und MFH mit und ohne Qualitätssicherung [eigene Darstellung]

	Typgebäude		EZFH		MFH	
	Qualitätssicherung		mit	ohne	mit	ohne
Globale Daten	Heizgrenze	°C	15,6	15,8	15,2	15,3
	Heizperiode	d/a	277	280	270	272
	mittlere Innentemperatur	°C	19,0	19,0	19,8	19,8
	Baustandard/ Fingerabdruck h	W/(m²K)	2,01	2,15	1,61	1,73
	Güte der Hülle H_T‘	W/(m²K)	0,67	0,69	0,74	0,76
	Heizlast	W/m²	64	69	52	55
Heizwärme	Transmission	kWh/(m²a)	145	149	113	116
	Lüftung	kWh/(m²a)	20	27	26	34
	Interne Gewinne Personen/Geräte	kWh/(m²a)	19	20	25	25
	Interne Gewinne Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	5	5	5	5
	Solargewinne	kWh/(m²a)	26	27	25	25
	Heizwärme	kWh/(m²a)	115	125	84	93
Heizenergie	Heizwärme	kWh/(m²a)	115	125	84	93
	Zuschlag Qualitätssicherung	kWh/(m²a)	1	2	1	3
	Verteilung Heizung	kWh/(m²a)	4	5	5	5
	Speicherung Heizung	kWh/(m²a)	1	1	0	0
	Erzeugernutzwärmeabgabe Heizung	kWh/(m²a)	121	133	91	102
	Erzeugerverlust/gewinn Heizung	kWh/(m²a)	5	16	8	16
	Erzeugereffizienz Heizung	-	0,882	0,830	0883	0,839
	Endenergie Heizung	kWh/(m²a)	137	160	102	122
Trinkwarm-wasserenergie	Trinkwarmwassernutzen	kWh/(m²a)	11	11	15	15
	Verteilung Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	11	11	14	14
	Speicherung Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	3	4	1	2
	Solarerzeugung	kWh/(m²a)	2	2	1	1
	Erzeugernutzwärmeabgabe TWW	kWh/(m²a)	23	25	29	30
	Erzeugerverlust/gewinn TWW	kWh/(m²a)	1	3	2	4
	Erzeugereffizienz Trinkwarmwasser	-	0,888	0,839	0,902	0,864
	Endenergie Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	26	29	32	34
Gesamtbilanz Wärme	Nutzen	kWh/(m²a)	127	138	100	111
	Endenergie Wärme	kWh/(m²a)	163	189	134	156
Strombilanz	Haushaltsstrom	kWh/(m²a)	24	24	32	32
PV-Bilanz	PV Strom selbst genutzt	kWh/(m²a)	1	1	0	0
	PV Strom rückgespeist	kWh/(m²a)	7	7	2	2
	PV Strom gesamt	kWh/(m²a)	8	8	2	2
Endenergie	Wärme (ohne PV-Nutzung)	kWh/(m²a)	163	189	134	156
	Haushaltsstrom (ohne PV-Nutzung)	kWh/(m²a)	24	24	32	32
	gesamt (incl. PV-Nutzung)	kWh/(m²a)	180	206	165	187

Tabelle 41 Endenergiebilanz für durchschnittliche EZFH und MFH mit und ohne Qualitätssicherung [eigene Darstellung]

Unterstellt man eine Gewichtung von 15 % der Gebäude mit und 85 % ohne Qualitätssicherung, ergibt sich ein durchschnittliches EZFH mit einer Endenergie für Wärme von 185 kWh/(m²a). Das MFH weist 153 kWh/(m²a) auf, das Durchschnittsgebäude Deutschland 172 kWh/(m²a). Diese Werte decken sich gut mit den Verbrauchsdaten aus der Statistik, siehe Anhang 5.4 Die Gesamtendenergie für Wärme (Heizung plus Warmwasser, ohne Haushaltsstrom) ergibt sich in dem gewählten Ansatz zu 647 TWh/a.

Werden aus den Endenergien die Primärenergien, Emissionen und Energiekosten bestimmt, ergeben sich die Werte nach Tabelle 40. In der Summe aller Gebäude liegen die Emissionen für Wärme (Heizung und Warmwasser) bei 153 Mt/a, einschließlich des Haushaltsstroms bei 198 Mt/a. Dies Werte entsprechen nicht den Emissionen, die dem Klimaschutzplan der Bundesregierung für Gebäude zugeordnet werden, da diese nicht den Beitrag der Energiewirtschaft für mit Strom und Fernwärme aus KWK beheizte Gebäude berücksichtigen.

3.2 Energieeffizienz und Kosten für Maßnahmen am Baukörper

Nachfolgend werden Maßnahmen an der Außenwand, den Fenstern sowie dem oberen und unteren Gebäudeabschluss als Einzelmaßnahmen untersucht. Dazu wird auf die beiden Typgebäude EZFH und MFH zurückgegriffen, wobei alle anderen Hüllbauteile – außer das jeweils untersuchte – mit einem mittleren Zustand angenommen werden, ebenfalls die gesamte Technik.

Die zugrunde gelegten erzielbaren Standards sind angelehnt an die Maßnahmen, die derzeit von der KfW als einzelmaßnahmen oder im Rahmen des Effizienzhaus-Programmes erreicht werden, siehe Abbildung 45.

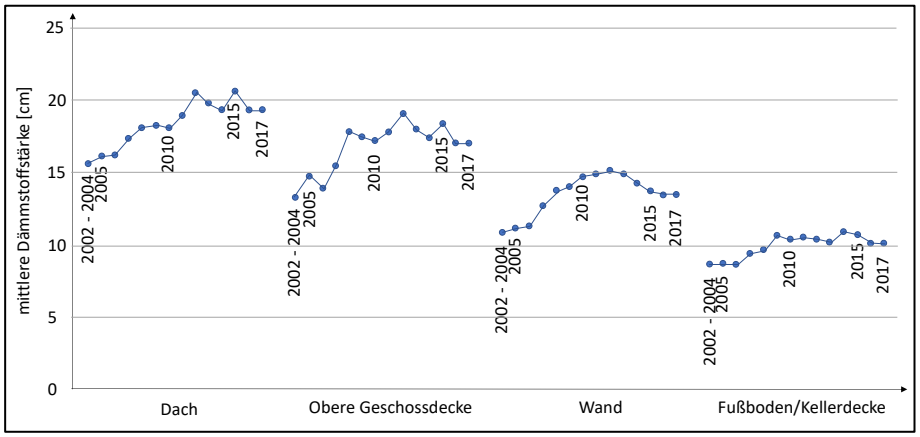


Abbildung 45 Mittlere Dämmstoffdicken (bei Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(mK)) in der KfW-Sanierung, Grafik mit Werten aus [15]

Wenn absehbar ist, dass sich gänzlich andere Aussagen ergeben, wenn auch andere Merkmale abweichen – insbesondere die Art der Wärmeerzeugung – wird dieser Fall gesondert untersucht. Allerdings wird darauf verzichtet, nur selten vorkommenden Konstellationen von Baukörper/Technik-Ausstattung zu besprechen.

Bei allen Maßnahmen am Baukörper werden jedoch grundsätzlich zwei Fälle unterschieden: die Maßnahme erfolgt, weil sie ohnehin geplant war (im Sanierungszyklus) oder sie wird anlasslos durchgeführt. Im ersten Fall sind die Mehrkosten relevant – über das ohnehin geplante Maß hinaus. Im zweiten Fall zählen die Vollkosten.

Das Gutachten beschränkt sich auf den wirtschaftlichen Aspekt bzw. den Aspekt der Emissionsminderung, welche aus der Energieverbrauchsminderung resultiert. Die bauphysikalischen Vor- und Nachteile der verfügbaren Dämmstoffe sowie deren Einsatzbereiche sind in der „Metastudie Wärmdämmstoffe“ von Sprengard et al. zusammengestellt [195]. Asam befasst sich vor allem mit den Wiederverwertbarkeit und dem Brandschutz [196]. In dem DBU-Projekt von Reinhardt et al. steht die ganzheitliche ökologische Bilanz (Ökobilanz) im Vordergrund. Die genannten Themen werden an dieser Stelle nicht vertieft, obwohl sich die Gutachter der Bandbreite der Aspekte bewusst sind.

3.2.1 Dämmung Außenwand

Der Endbericht zur Datenbasis des Wohngebäudebestandes des IWU von 2016 klassifiziert die Außenwände wie folgt: etwa 61 % sind einschaliges Mauerwert und etwa 3 % Plattenbauten. Darüber hinaus gibt es etwa 28 % zweischaliges Mauerwerk, 3 % Fachwerk sowie 5 % Holzbauweisen. Die Dämmung wird wie folgt beschrieben [7]:

- das einschalige Mauerwerk ist zu etwa 29 % gedämmt, davon fast 90 % von außen und nur knapp 10 % von innen
- das zweischalige Mauerwerk ist zu 59 % gedämmt, zu fast ⅔ im Zwischenraum, zu knapp ⅓ von außen und sehr selten von innen
- Fachwerkwände sind zu 46 % gedämmt, gut die Hälfte von außen, knapp ⅓ von innen und sonst auch in den Gefachen
- Holzbauweisen sind zu 79 % gedämmt und
- Plattenbauten zu 79 % (Art der Dämmung ähnlich dem einschaligen Mauerwerk).

Die Umsetzungshäufigkeit einer Außenwanddämmung bei Gebäuden mit Denkmalschutz liegt bei etwa 20 %, was unterdurchschnittlich ist [7].

Mit der zweiten Wärmeschutzverordnung von 1984 erhielten Gebäude Dämmdicken im Bereich von 6 cm. Mit der Wärmeschutzverordnung von 1995 bis hin zur EnEV 2002 dominieren Dämmdicken im Bereich 8 bis 12 cm. Ab der EnEV 2009 sind Dämmdicken von 14 bis 16 cm typisch [7] [90]. Der Monitoring-Bericht zu den KfW-Förderprogrammen 2017 benennt 16 cm als die mit Abstand am häufigstem vorkommende Dämmdicke [15]. Innendämmungen weisen häufig nur etwa 7 bis 8 cm Dicke auf [7].

Wärmeleitfähigkeiten der Dämmstoffe von 0,035 W/(mK) sind etwa seit Einführung der ersten EnEV 2002 gängig am Markt; noch bessere Standards von 0,032 W/(mK) haben sich knapp 10 Jahre später etabliert [197]. Davor wiesen Dämmstoffe zumeist die Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/(mK) auf. Der Monitoring-Bericht zu den KfW-Förderprogrammen 2017 identifiziert die Bandbreite von 0,031 bis 0,035 W/(mK) mit 80 % als die häufigste für die Außenwanddämmung eingesetzte Wärmeleitfähigkeit [15].

Außenwände in den Typgebäuden: Ausgangszustand

Die Daten der IWU-Studie zum Zielerreichungsszenario [62], siehe Tabelle 171 in Anhang 5.7.1, werden als Basisdaten verwendet. Aus den Einzelranddaten der drei gegebenen Baualtersklassen wird ein gemitteltes Gebäudemodell mit ebenfalls gemittelten Wärmedurchgangskoeffizienten konzipiert. Da seit der Datenerhebung bereits etwa ein Jahrzehnt vergangen ist, wird der Sanierungszustand entsprechend fortgeschrieben.

Die jeweils anzunehmenden Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwände vor und nach der Sanierung werden drei Qualitätsklassen „gut“, „mittel“ und „schlecht“ zugeordnet. Es ergibt sich die in Tabelle 42 für die EZFH und in Tabelle 43 für die MFH zusammengestellte Datenbasis zur Häufigkeit der drei Klassen und dem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten (kurz: U-Wert) jeder Klasse.

Daten für die EZFH		Altersklasse bis 1978	Altersklasse 1979 - 1994	Altersklasse 1995 - 2009	Ergebnis
Stückzahl	[G]	9.610.000	2.710.000	2.670.000	
Wand	[m²/G]	144	135	122	
Anteile					Ø Anteile
gut	[-]	0,30*	0,17*	1,00	0,39
mittel	[-]	-	0,83	-	0,15
schlecht	[-]	0,70	-	-	0,47
U-Wert					Ø U-Werte
gut	[(W/(m²K)]	0,35	0,26	0,28	0,31
mittel	[(W/(m²K)]	-	0,60	-	0,60
schlecht	[(W/(m²K)]	1,00**	-	-	1,00
alle	[(W/(m²K)]	-	-	-	0,68
* Fortschreibung der Sanierung mit 1 %/a | ** Festlegung des maximalen U-Wertes auf 1 W/(m²K)					

Tabelle 42 Sanierungszustand und Qualitäten der Außenwände des Typ-EZFH [eigene Darstellung]

Daten für die MFH		Altersklasse bis 1978	Altersklasse 1979 - 1994	Altersklasse 1995 - 2009	Ergebnis
Stückzahl	[G]	2.340.000	440.000	270.000	
Wand	[m²/G]	303	466	386	
Anteile					Ø Anteile
gut	[-]	0,36*	0,25*	1,00	0,40
mittel	[-]	-	0,75	-	0,15
schlecht	[-]	0,64	-	-	0,45
U-Wert					Ø U-Werte
gut	[(W/(m²K)]	0,34	0,27	0,39	0,34
mittel	[(W/(m²K)]	-	0,68	-	0,68
schlecht	[(W/(m²K)]	1,00**	-	-	1,00
alle	[(W/(m²K)]	-	-	-	0,69
* Fortschreibung der Sanierung mit 1 %/a | ** Festlegung des maximalen U-Wertes auf 1 W/(m²K)					

Tabelle 43 Sanierungszustand und Qualitäten der Außenwände des Typ-MFH [eigene Darstellung]

Außenwände in den Typgebäuden: Zielzustand

Als bester zu erreichender Zustand für Außenwände in der Sanierung („best“) wird in den Berechnungen, die diesem Gutachten zugrunde liegen, ein Wärmedurchgangskoeffizient von U = 0,15 W/(m²K) angesetzt. Er lässt sich problemlos mit einer Außenwanddämmung umsetzen. Je nach Dämmstoff und Ausgangsqualität ergibt sich eine Dämmdicke von etwa 16 bis 18 cm.

Der Wert ist zahlenmäßig der Grenzwert für das Passivhaus. Er ist besser als der Wert, der derzeit von der KfW bzw. der EnSanMV [29] als Einzelmaßnahme gefördert wird (0,20 W/(m²K)). Für die Außenwand wird somit ein best practice-Zielwert als beste Lösung definiert. Dies bedeutet jedoch nicht, dass dieser in allen Gebäuden umgesetzt werden kann oder muss (Stichwort: erhaltenswerte Fassade, Innendämmung, Denkmalschutz, zweischalige Wand). Bei der Betrachtung in der Makroebene wird dies berücksichtigt.

Auf den gesonderten Einbezug von Vakuumdämmung oder andere zukunftsweisende Materialien wird im Rahmen dieses Gutachtens verzichtet. Sollten künftig Stoffe mit deutlich geringen Wärmeleitfähigkeiten für den Massenmarkt verfügbar sein, ergeben sich Gesamtaufbauten geringerer Dicke. die Gutachter gehen davon aus, dass die Kosten zum Erreichen bestimmter Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) nahezu unabhängig davon sind.

In vergleichbaren Studien – z. B. von AGORA – werden Werte von 0,15 bis 0,20 W/(m²K) je nach Szenario für eine ambitionierte Sanierung verwendet [128]. IWU geht in der „Tabula“-Studie von 0,22 bis 0,25 W/(m²K) für eine Standard-Modernisierung sowie von 0,11 bis 0,14 W/(m²K) bei einer verbesserten Modernisierung aus. Der Wert bei Innendämmung liegt in der Größenordnung 0,35 bis 0,40 W/(m²K) [102]. Jochum et al. ermitteln zunächst kostenoptimale Dämmstoffdicken für verschiedene Dämmstoffe und Hüllbauteile, auch für die Außenwand. Für die konventionellen Dämmstoffe (Polystyrol, Mineralwolle usw.) stellen sich Einzel-Optima leicht oberhalb von U = 0,1 W/(m²K) ein; auch mit zukunftweisenden Dämmstoffen (Aerogel, wird ein Optimum bei etwa U = 0,11 W/(m²K) ermittelt. Auf Gebäudeebene und unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen aller Dämmmaßnahmen wird für die Außenwand ein wirtschaftliches Optimum von 0,12 W/(m²K) bestimmt. In der Simulation wird gleitend gerechnet. Im konventionellen Szenario sinkt der U-Wert von 0,3 auf 0,15 W/(m²K), in der ambitionierten Sanierung von 0,20 auf 0,10 W/(m²K). Jeweils Startwert für den schlechteren Wert ist das Jahr 2011, der beste wird entsprechend 2050 erreicht [127].

Vor etwa 20 Jahren lagen die für die (damalige) Zukunft empfohlenen Werte bei 8 bis 16 cm Dämmdicke für die übliche bis ambitionierte Sanierung [72].

Dämmung einer ungedämmten Wand von außen

Das in allen anderen Merkmalen durchschnittliche Gebäude hat vorher Außenwände mit einem U-Wert von 1,0 W/(m²K) und nachher mit 0,15 W/(m²K). Die restlichen Eigenschaften (alle anderen Bauteile sowie die gesamte Technik) sind bei dieser Betrachtung zunächst durchschnittlich, Schema siehe Abbildung 46

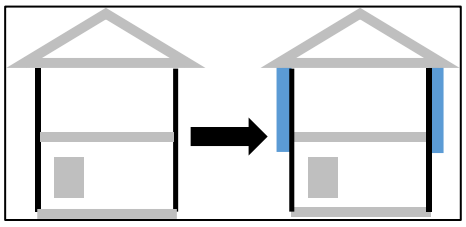


Abbildung 46 Schema – Außenwand mit Dämmung von außen [eigene Darstellung]

Wenn unterstellt wird, dass eine Investition ohne Anlass stattfindet, müssen Vollkosten betrachtet werden. Auf Basis des mittleren EZFH und MFH zeigt Tabelle 44 die Ergebnisse für die Außenwanddämmung (von außen) als Einzelmaßnahme.

Die Emissionen für Wärme reduzieren sich zwischen 40 % im EZFH und 38 % im MFH. Bezogen auf die somit erreichte Minderung an Emissionen liegt der äquivalente CO_2-Preis bei 321 bis 340 €/t. Das ist ein mittlerer Wert. Eine Außenwanddämmung ist somit eine Maßnahme, die selbst ohne Anlass fast wirtschaftlich ist. Es müsste zum Erreichen der Grenzwirtschaftlichkeit ein nur sehr geringer Investitionskostenzuschuss (der Vollkosten) von 1 bis 7 % erfolgen. Alternativ müssten die Energieträgerkosten steigen, z. B. durch einen zusätzlichen Emissionspreis von 2 bis 25 €/t. Das entspricht einer maximalen Erhöhung der Energiepreise um 1 Cent/kWh.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmung der Außenwand von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
Transmissionswärmeverlust flächenbezogen H_T'	vorher	W/(m²K)	0,80	0,87
	nachher	W/(m²K)	0,47	0,52
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes“) h	vorher	W/(m²K)	2,34	1,84
	nachher	W/(m²K)	1,48	1,23
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	191	155
	nachher	kWh/(m²a)	117	99
Investition	Vollkosten	T€	28,0	66,1
Emissionsminderung, Wärme		%	-40	-36
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	340	321
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	61	18
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	7 %	1 %
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	25	3

Tabelle 44 Auswertung Außenwanddämmung (von außen) auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die Alternative ist eine Außenwanddämmung (von außen) im Rahmen der ohnehin notwendigen Instandhaltung nach z. B. 45 Jahren Betrieb. Mindestens ein Anstrich und ein paar Reparaturen am Putz oder der Wandbekleidung stehen an. Das würde dem reinen Bestandserhalt – ohne Verbesserung der energetischen Qualität – entsprechen.

Tabelle 51 zeigt die Ergebnisse für die alternative Sanierung von außen auf das best practice-Niveau. Bezogen auf die somit erreichte Minderung an Emissionen liegt der äquivalente CO_2-Preis bei 240 bis 240 €/t. Das ist ein geringer Wert. Diese Maßnahme ist wirtschaftlich; es ergibt sich kein Fehlbetrag (sondern ein Gewinn). Insofern müssen keine Investitionskostenzuschüsse fließen. Auch ist keine Energiekostenerhöhung (z. B. in Form von Emissionspreisen) notwendig.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmung der Außenwand von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	191	155	177
	nachher	117	99	107
Investition	Mehrkosten	T€	16,6	39,3
Emissionsminderung, Wärme		%	-40	-36
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	254	240
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-148	-477
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 45 Auswertung Außenwanddämmung (von außen) auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

MFH: Der Fall einer Dämmung mit Fernwärme als Energieträger schneidet gleichermaßen positiv ab (es ergibt sich ein Überschuss von 636 €/a).

EZFH: die Ergebnisse für den häufigsten Fall, die Versorgung mit Gas- oder Ölkessels entsprechen in etwa den o.g. Werten (leicht geringerer Überschuss von -63 €/a). Es ergibt sich jedoch grundsätzlich die gleiche Aussage. Für den Fall, dass eine Außenluftwärmepumpe bereits vorhanden ist und die Außenwanddämmung erst später kommt, ergibt sich ein deutlich positiveres Ergebnis. Da sowohl die Transmissionsverluste vermindert werden als auch bessere Systemtemperaturen möglich sind, wird keine Förderung notwendig (Überschuss 767 €/a). Lediglich bei Verwendung eines Holzkessels verschlechtern sich die Wirtschaftlichkeitsergebnisse leicht – da der Brennstoff so günstig ist. Es ergibt sich eine Grenzwirtschaftlichkeit ohne Verlust oder Gewinn.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Dämmung einer ungedämmten Wand von innen

Die Alternative zu der Dämmung von außen ist die Innendämmung. Da diese Maßnahme praktisch immer anlasslos erfolgt, werden ebenfalls die Vollkosten betrachtet. Allerdings lassen sich nicht so gute Qualitäten erreichen, Schema siehe Abbildung 47. Es wird davon ausgegangen, dass der Ziel-U-Wert bei 0,34 W/(m²K) liegt, was dem „guten" Zustand entspricht (nicht „best").

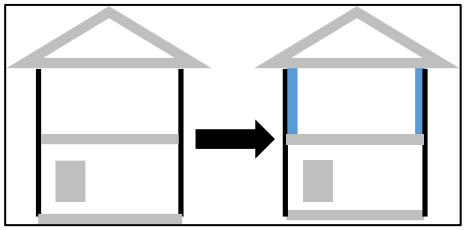


Abbildung 47 Schema – Außenwand mit Dämmung von innen [eigene Darstellung]

Auf Basis des mittleren EZFH und MFH zeigt Tabelle 46 die Ergebnisse für die Außenwanddämmung (von innen) als Einzelmaßnahme. Die Werte ähneln denen der Dämmung von außen. Es müsste zum Erreichen der Grenzwirtschaftlichkeit ein Investitionskostenzuschuss (der Vollkosten) von etwa 2 % erfolgen.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmung der Außenwand von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,31 bis 0,34 W/(m²K)				
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
Transmissionswärmeverlust flächenbezogen H_T'	vorher	W/(m²K)	0,80	0,87
	nachher	W/(m²K)	0,54	0,60
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes") h	vorher	W/(m²K)	2,34	1,84
	nachher	W/(m²K)	1,65	1,37
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	191	155
	nachher	kWh/(m²a)	131	112
Investition	Vollkosten	T€	21,4	49,3
Emissionsminderung, Wärme		%	-32	-28
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	322	309
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	14	-43
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	2 %	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	7	keiner

Tabelle 46 Auswertung Außenwanddämmung (von innen) auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die Werte für die Innendämmung sind in etwa übertragbar auf Konstellationen mit zweischaliger Wand, wo ebenfalls Restriktionen der Dämmdicke gegeben sind. Es wird an dieser Stelle angemerkt, dass gesonderte Betrachtungen der Wärmebrücken an dieser Stelle nicht erfolgen; hierzu siehe 3.6.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Nachdämmen von außen

Des Weiteren ist der Fall anzutreffen, dass eine Dämmung erhöht wird. Es wird davon ausgegangen, dass dies nur im Zusammenhang mit einer ohnehin erforderlichen Sanierung des Putzes oder eines Neuanstriches erfolgt, Schema siehe Abbildung 48-

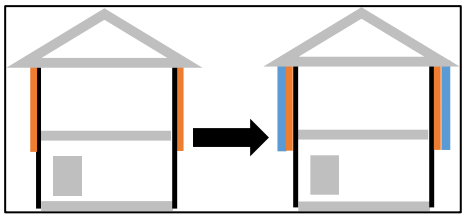


Abbildung 48 Schema – Außenwand mit Nachdämmung von außen [eigene Darstellung]

Die bereits vorhandene Dämmung, jedoch geringer Dicke (hier angenommen im Zustand „mittel“ mit 0,6 W/(m²K) wird in den „besten“ Zustand versetzt. Diese Untersuchung liefert die Erkenntnis, dass nunmehr ein vergleichsweise hoher Zuschuss notwendig wären, um diese Sanierung grenzwirtschaftlich zu rechtfertigen. Alternativ müssten die Energiekosten z. B. mit einem Emissionspreis von 43 bis 134 €/t angehoben werden, was einem Gaspreis von z. B. 7 bis 9 Cent/kWh entspräche.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmung der Außenwand von U = 0,60 bis 0,68 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
Transmissionswärmeverlust flächenbezogen H_T‘	vorher	W/(m²K)	0,65	0,74
	nachher	W/(m²K)	0,47	0,52
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes“) h	vorher	W/(m²K)	1,94	1,61
	nachher	W/(m²K)	1,48	1,23
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	156	134
	nachher	kWh/(m²a)	117	99
Investition	Mehrkosten	T€	15,5	36,7
Emissionsminderung, Wärme		%	-26	-26
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	448	361
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	174	166
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	22	9
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	134	43

Tabelle 47 Auswertung Aufdoppeln der Außenwanddämmung (von außen) auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die anlasslose Verbesserung durch Aufdoppeln wird nicht untersucht. Es ist davon auszugehen, dass der Bestand an Sanierungsobjekten so groß ist, dass Objekte mit bereits vorhandener Dämmung nicht prioritär zu verbessern sind.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Fazit zur Außenwanddämmung

Die Außenwanddämmung auf hochwertiges Niveau (von außen) oder ein gutes Niveau (von innen) ist wirtschaftlich unter zwei Bedingungen: es wird nicht mit Holz geheizt und es sind ohnehin Maßnahmen an der Fassade notwendig. Ist keine Maßnahme geplant und Vollkosten werden wirksam, so ist ein nur geringer Investitionskostenzuschuss von maximal 5 % der Vollkosten erforderlich, um eine Grenzwirtschaftlichkeit zu erreichen. Alternativ würde ein zusätzlicher Emissionspreis von maximal 25 €/t und die damit einhergehende Verteuerung der Energieträger denselben Effekt haben.

Die Gutachter können feststellen, dass die anlasslose Aufdopplung der Dämmung nur unter größeren Zuschüssen machbar ist (bis 50 % der Vollkosten). Die Aufdopplung unter der Annahme einer ohnehin notwendigen Fassadensanierung ist dagegen mit geringeren Zuschüssen realisierbar (unter 10 %). Alternativ würden entsprechende Emissionspreise auf die Energieträger ebenfalls zur Grenzwirtschaftlichkeit führen. Mit den sonstigen Aspekten der Aufdopplung – von Befestigung bis Fassadengestaltung – befassen sich Clausnitzer et al. ausführlich in einem weiterführenden Projektbericht [198].

Entsprechende Planungs- und Umsetzungshinweise zur Vermeidung von Wärmebrücken sind insbesondere bei der Innendämmung zu beachten [199]. Aber auch im Bereich von Sockelbereichen, einbindenden Garagen- oder Wintergärtenwänden sind Detailüberlegungen zur Vermeidung von Wärmebrücken notwendig [53]. Mit sonstigen immer wiederkehrenden Pro- und Kontra-Argumenten befasst sich die Veröffentlichung „Über den Sinn von Wärmedämmung“ von Kienzlen et al. von 2015 [200].

Die Erkenntnisse zur Dämmung der Außenwände decken sich grundsätzlich mit denen andere Studien, z. B. des Passivhausinstitutes [134], von Jochum et al. [127], IWU [62] und Holm et al. [201] – jedenfalls soweit die abweichenden Annahmen einen Vergleich zulassen. Die ermittelten Investitionskostenzuschüsse sind mit den heutigen Werten der KfW vergleichbar bzw. liegen darunter.

3.2.2 Fenstertausch

Bis zur ersten Wärmeschutzverordnung sind einfachverglaste Fenster sowie Kastenfenster typisch. Danach setzen sich Fenster mit Isolierverglasung (zweifach) durch. Etwa mit der Wärmeschutzverordnung von 1995 findet die Wärmeschutzverglasung, zunächst als 2-Fach-Verglasung, Anwendung. Es gibt sie in 3 Qualitätsstufen. Seit etwa 2005 wird Dreifachverglasung verwendet. Sie stellt heute den größten Marktanteil dar, siehe Abbildung 49.

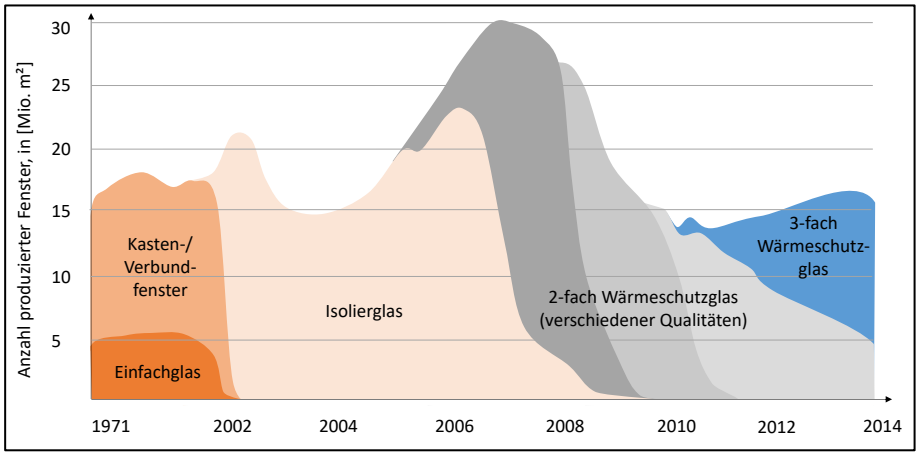


Abbildung 49 Zeitliche Einordnung der Verkaufsmengen verschiedener Fensterqualitäten, Grafik vereinfacht nach [9]

Entsprechend sind im Bestand knapp 50 % Fenster mit Zweischeiben-Wärmeschutzglas vertreten mit Wärmedurchgangskoeffizienten von 1,6 W/(m²K) und besser vertreten; jedoch sind noch 3 % aller Fenster Einscheibenverglasungen sowie knapp 40 % Zweischeibenfenster mit Isolierverglasung sowie Kastenfenster gegeben (Datenstand 2015) [9].

In der Auswertung der KfW-Förderprogramme (für 2017) wird festgestellt, dass der Anteil der 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung in geförderten Projekten 81 % beträgt; der Anteil der darin enthaltenen Passivhausfenster beläuft sich auf 6 % der neu eingebauten Fensterfläche [15].

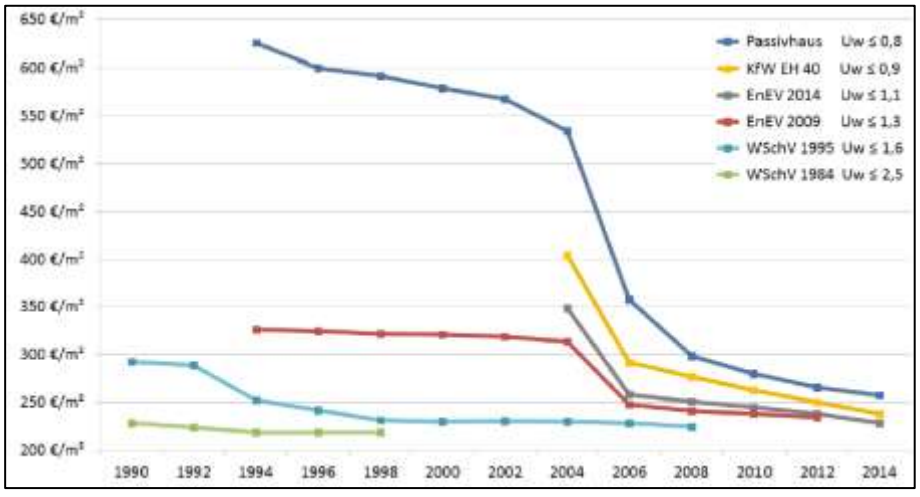


Abbildung 50 Preisentwicklung der Fenster (inkl. Mehrwertsteuer, preisbereinigt), Grafik aus [197]

Die Fensterqualitäten sind recht homogen in den Gebäuden verteilt – unabhängig davon, ob es sich um ein EZFH oder MFH handelt [7]. Simons geht davon aus, dass die Fenster der schlechtesten Qualitäten sich in beheizten Kellern, Werkstatträumen, Waschküchen u. ä. wenig beheizen Räumen befinden; dass also die energetisch relevanten Fenster mindestens eine Zweischeiben-Isolierverglasung aufweisen [120].

Neue Fensterqualitäten wurden jeweils mit großen Mehrkosten in den Markt eingeführt. Mit der Marktdurchdringung ergaben sich jedoch etwa gleich hohe preisbereinigte Kosten, siehe Abbildung 50.

Fenstersanierung ist bislang häufig eine Teilsanierungsmaßnahme. In einer Erhebung von co2online von 2015 hat die untersuchte Stichprobe nur zu 38 % eine vollständige Fenstererneuerung erhalten [53]. Cischinsky und Diefenbach stellen in der Datenerhebung zum Wohngebäudebestand von 2016 fest, dass im Gesamtbestand durchschnittlich nur 55 % der Fenster von der Sanierung erfasst werden [7].

Dies muss bei der Angabe einer Sanierungsrate berücksichtigt werden, welche das IWU auf etwa 2,5 %/a [7] beziffert.

Fenster in den Typgebäuden: Ausgangszustand

Die Daten der IWU-Studie zum Zielerreichungsszenario [62], siehe Tabelle 171 in Anhang 5.7.1, werden als Basisdaten verwendet. Aus den Einzelranddaten der drei gegebenen Baualtersklassen werden ein gemitteltes Gebäudemodell – und somit auch mittlere Fensterqualitäten – konzipiert.

Daten für die EZFH		Altersklasse bis 1978	Altersklasse 1979 - 1994	Altersklasse 1995 - 2009	Ergebnis
Stückzahl	[G]	9.610.000	2.710.000	2.670.000	
Fenster	[m²/G]	27	30	25	
Anteile					Ø Anteile
gut	[-]	0,10*	0,10*	0,10*	0,10
mittel	[-]	0,36	0,12	0,90	0,40
schlecht	[-]	0,54	0,78	-	0,50
U-Wert					Ø U-Werte
gut	[(W/(m²K)]	1,30*	1,30*	1,30*	1,30
mittel	[(W/(m²K)]	1,60	1,60	1,60	1,60
schlecht	[(W/(m²K)]	2,70	2,70	-	2,70
alle	[(W/(m²K)]	-	-	-	2,12
* Fortschreibung der Sanierung mit 1 %/a | ** Festlegung des Sanierungs-U-Werte auf 1,3 W/(m²K)					

Tabelle 48 Sanierungszustand und Qualitäten der Fenster des Typ-EZFH [eigene Darstellung]

Daten für die MFH		Altersklasse bis 1978	Altersklasse 1979 - 1994	Altersklasse 1995 - 2009	Ergebnis
Stückzahl	[G]	2.340.000	440.000	270.000	
Fenster	[m²/G]	81	142	125	
Anteile					Ø Anteile
gut	[-]	0,10*	0,10*	0,10*	0,10
mittel	[-]	0,45	0,24	0,90	0,46
schlecht	[-]	0,45	0,66	-	0,44
U-Wert					Ø U-Werte
gut	[(W/(m²K)]	1,30**	1,30**	1,30**	1,30
mittel	[(W/(m²K)]	1,60	1,60	1,60	1,60
schlecht	[(W/(m²K)]	2,70	2,70	-	2,70
alle	[(W/(m²K)]	-	-	-	2,06
* Fortschreibung der Sanierung mit 1 %/a | ** Festlegung des Sanierungs-U-Werte auf 1,3 W/(m²K)					

Tabelle 49 Sanierungszustand und Qualitäten der Fenster des Typ-MFH [eigene Darstellung]

Die gegebene Datenbasis zum Sanierungszustand wird dabei fortgeschrieben, weil seit der Datenerhebung fast ein Jahrzehnt vergangen ist. Die Fortschreibung erfolgt mit der Sanierungsrate von etwa 1 %/a. Für die im letzten Jahrzehnt erfolgten Fenstersanierungen wird allerdings ein verbesserter Wärmedurchgangskoeffizient von 1,3 W/(m²K) in Anlehnung an die EnEV festgelegt.

Die jeweils anzunehmenden Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster vor und nach der Sanierung werden im Rahmen dieses Gutachtens den drei Qualitätsklassen „gut“, „mittel“ und „schlecht“ zugeordnet. Es ergibt sich die in Tabelle 42 für die EZFH und in Tabelle 43 für die MFH zusammengestellte Datenbasis zur Häufigkeit der drei Klassen und dem sich ergebenden mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten (kurz: U-Wert) jeder Klasse.

Fenster in den Typgebäuden: Zielzustand

Als bester zu erreichender Zustand für Fenster in der Sanierung („best“) wird in den Berechnungen, die diesem Gutachten zugrunde liegen, ein Wärmedurchgangskoeffizient von U = 0,9 W/(m²K) angesetzt. Dieser Wert ist heute bereits am Markt verfügbar und liegt zahlenmäßig zwischen der derzeitigen Fördergrenze der KfW-Einzelmaßnahmen (0,95 W/(m²K)) bzw. der EnSanMV [29] und den Empfehlungen des Passivhausinstitutes (0,8 W/(m²K)). Aktuelle best practice-Fenster weisen einen U-Wert von 0,65 W/(m²K) auf [90].

In vergleichbaren Studien – z. B. von AGORA – werden Werte von 1,0 bis 1,2 W/(m²K) für die Mindestanforderung einer Sanierung sowie 0,7 bis 0,9 W/(m²K) für eine ambitionierte Sanierung verwendet [128]. IWU geht in der „Tabula“-Studie von 1,1 bis 1,3 W/(m²K) für eine Standard-Modernisierung sowie von 0,7 bis 0,95 W/(m²K) bei einer verbesserten Modernisierung aus [102]. Jochum et al. setzen den Startwert für Sanierungsbetrachtungen auf das KfW-Förderniveau von 0,95 W/(m²K) bei heutiger Sanierung und lassen den Wert jährlich sinken, bis 0,5 W/(m²K) im Jahr 2050 erreicht ist [127].

Vor etwa 20 Jahren lagen die für die (damalige) Zukunft empfohlenen Werte bei 1,4 bis 0,8 W/(m²K) für die übliche bis ambitionierte Sanierung [72].

Ersatz alter Fenster

Das in allen anderen Merkmalen durchschnittliche Gebäude hat vorher Fenster mit einem U-Wert von 2,7 W/(m²K) und nachher Fenster mit einem U-Wert von 0,9 W/(m²K) – Schema siehe Abbildung 51.

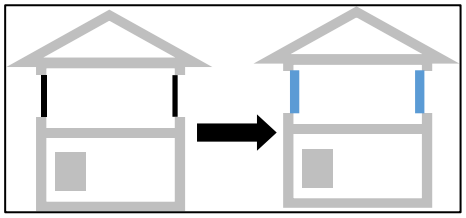


Abbildung 51 Schema – Ersatz alter Fenster [eigene Darstellung]

Wenn unterstellt wird, dass eine Investition ohne Anlass stattfindet, müssen Vollkosten betrachtet werden. auf Basis des mittleren EZFH und MFH zeigt Tabelle 50 die Ergebnisse für den Fenstertausch als Einzelmaßnahme.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Ersatz von Fenstern mit U = 2,7 W/(m²K) durch Fenster mit U = 0,9 W/(m²K)				
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
Transmissionswärmeverlust flächenbezogen H_T'	vorher	W/(m²K)	0,72	0,81
	nachher	W/(m²K)	0,58	0,61
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes“) h	vorher	W/(m²K)	2,13	1,74
	nachher	W/(m²K)	1,77	1,38
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	170	144
	nachher	kWh/(m²a)	148	118
Investition	Vollkosten	T€	19,9	67,3
Emissionsminderung, Wärme		%	-13	-18
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	1019	925
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	526	1691
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	69	66
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	703	607

Tabelle 50 Auswertung Fenstertausch auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die Emissionen für Wärme reduzieren sich zwischen 13 % im EZFH und 18 % im MFH. Bezogen auf die somit erreichte Minderung an Emissionen liegt der äquivalente CO_2-Preis bei 925 bis 1019 €/t. Das ist ein sehr hoher Wert. Ein Fenstertausch ist somit keine Maßnahme, die anlasslos sinnvoll ist. Erfolgt dies dennoch, so müsste zum Erreichen der Grenzwirtschaftlichkeit ein Investitionskostenzuschuss (der Vollkosten) von 66 bis 69 % erfolgen. Alternativ müssten die Energieträgerkosten steigen, z. B. durch einen zusätzlichen Emissionspreis von 607 bis 703 €/t. Das entspräche bei Erdgas einer Preiserhöhung auf ca. 20 Cent/kWh.

EZFH: die Ergebnisse für den häufigsten Fall, die Versorgung mit Gas- oder Ölkessels entsprechen in etwa den o.g. Werten. Es ergibt sich die gleiche Aussage.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Verbesserung guter Fenster

Der für die Praxis relevantere Fall ist die ohnehin notwendige Investition, z. B. weil die vorherige Fenstergeneration nach 35 Jahren etwa das Ende der Lebensdauer erreicht hat. Es ist ohnehin ein neues Fenster notwendig. Der reine Bestandserhalt – ohne Verbesserung der energetischen Qualität – ist nicht darstellbar, weil es keine Fenster in der alten Qualität mehr gibt. Insofern ist mit jedem am Markt verfügbaren Fenster bereits eine Verbesserung erreicht. Es wird davon ausgegangen, dass die schlechtmöglichsten, verfügbaren Fenster einen U-Wert von 1,6 W/(m²K) aufweisen.

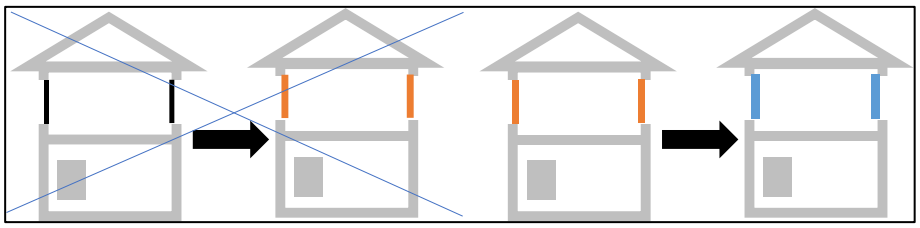


Abbildung 52 Schema – Verbesserung guter Fenster [eigene Darstellung]

Damit jedoch nicht ungenutzte Chancen für die nächsten 35 Jahre zu bedauern sind, weil das schlechtmöglichste Fenster gewählt wurde, soll im Rahmen dieses Gutachtens untersucht werden, wie sich die Wirtschaftlichkeit des besten Zustandes mit dem U-Wert von 0,9 W/(m²K) darstellt. Es werden – um eine faire Bewertung zu erhalten – jedoch nur die Einsparungen zugrunde gelegt, die sich durch die Verbesserung des Standards über das ohnehin erzielbare Maß hinaus ergeben. Auf der anderen Seite erfolgt dies auch mit den Kosten: die Kosten des schlechtmöglichsten Fensters sind die Sowiesokosten.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Ersatz von Fenstern mit U = 1,6 W/(m²K)* durch Fenster mit U = 0,9 W/(m²K)				
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
Transmissionswärmeverlust flächenbezogen H_T'	vorher	W/(m²K)	0,64	0,69
	nachher	W/(m²K)	0,58	0,61
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes“) h	vorher	W/(m²K)	1,91	1,52
	nachher	W/(m²K)	1,77	1,38
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher*	kWh/(m²a)	157	128
	nachher	kWh/(m²a)	148	118
Investition	Mehrkosten*	T€	5,5	18,6
Emissionsminderung, Wärme		%	-6	-8
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	857	784
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	159	507
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	21	20
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	542	466
* schlechtmöglichster heute realisierbarer Standard wird als Basis genommen				

Tabelle 51 Auswertung Fenstertausch auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Tabelle 51 zeigt die Ergebnisse. Die Emissionen für Wärme reduzieren sich zwischen 6 % im EZFH und 8 % im MFH. Bezogen auf die somit erreichte Minderung an Emissionen liegt der äquivalente CO_2-Preis bei 857 bis 784 €/t. Das ist ein hoher Wert.

Erfolgt diese Maßnahme, so müsste zum Erreichen der Grenzwirtschaftlichkeit ein Investitionskostenzuschuss (der Vollkosten) von 20 bis 21 % erfolgen. Alternativ müssten die Energieträgerkosten steigen, z. B. durch einen zusätzlichen Emissionspreis von 466 bis 542 €/t. Das entspräche bei Erdgas einer Preiserhöhung auf ca. 17 Cent/kWh.

MFH: wird das Gebäude mit Fernwärme versorgt, ergibt sich nahezu die gleiche Aussage. Der notwendige Investitionskostenzuschuss liegt dann bei 18 % (Mehrkosten 479 €/a).

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Fazit zum Fenstertausch

Die Wirtschaftlichkeit des Fensteraustauschs ist maßgeblich vom Berechnungsansatz Vollkosten oder Differenzkosten abhängig. Simons merkt an:

> *„Auch wenn die Fenstererneuerung verhältnismäßig wenig wirtschaftlich ist, so wurde sie in der Vergangenheit von den Eigentümern vorgenommen, wenn die Fenster ohnehin ersetzt werden mussten." [120]*

Die Gutachter können feststellen, dass der Fenstertausch vor allem dann sinnvoll ist, wenn das Bestandsfenster das Ende seiner Lebensdauer – also etwa 35 Jahre – erreicht hat. Der Empfehlung, u. a. der Herstellerverbände [129], den Austausch zunächst auf Fenster mit schlechteren Werten als U = 2,7 W/(m²K) (bzw. neutral gesprochen Zweischeiben-Isolierverglasung oder schlechter) zu beschränken, erscheint anhand der Kosten sinnvoll.

Die schnelle Umsetzung eines Standards von U ≤ 1,0 W/(m²K) ist aus Sicht der Emissionsminderung erstrebenswert. Die notwendige Förderung beläuft sich auf ca. 20 % der Gesamtkosten (incl. KG 700, sonst entsprechend weniger).

Entsprechende Planungs- und Umsetzungshinweise zur Vermeidung von Schimmelschäden sind zu beachten [199]. Neue Fenster erhöhen die Dichtheit des Gebäudes und machen damit andere Schwachstellen, z. B. vorhandene Wärmebücken ggf. erst sichtbar.

Darüber hinaus führt eine Fenstersanierung – da im Wohnungsbau alle relevanten Räume ähnlich davon profitieren – dazu, dass die Systemtemperaturen der Heizung abgesenkt werden können. Dies wirkt sich positiv auf die Effizienz insbesondere von Wärmepumpen aus.

3.2.3 Dämmung Dach und Geschossdecken

Seit der ersten Wärmeschutzverordnung 1977 ist der Einbau von Dämmung (zunächst etwa 8 cm) im Dach typisch. Seit der Wärmeschutzverordnung von 1995 bis zur geltenden EnEV dominieren Dämmdicken im Bereich von 18 bis 20 cm [7] [90]. Die KfW stellt in allen Sanierungsstufen des Effizienzhauses heute 20 cm Dämmung und mehr fest [15].

Für die nachträgliche Dämmung des Bestandes ergibt sich eine vergleichsweise homogene Ausgangslage unter den Gebäuden mit Baujahren vor der 1. Wärmeschutzverordnung [7]:

- in den EZFH sind ca. 42 % aller Dachgeschosse beheizt, 21 % teilbeheizt und 37 % unbeheizt
- in den MFH sind ca. 42 % aller Dachgeschosse beheizt, 16 % teilbeheizt und 43 % unbeheizt.

Der Endbericht zur Datenbasis des Wohngebäudebestandes des IWU von 2016 legt offen, dass der obere Gebäudeabschluss (Dach oder oberste Geschossdecke) im Bestand das Bauteil ist, bei dem die höchste Durchdringung einer Wärmedämmung festzustellen ist – in mehr als ¾ aller Gebäude mit Baujahr vor 1979.

Der obere Gebäudeabschluss wird oft als Komplettmodernisierung durchgeführt, d. h. alle Teilflächen sind anschließend gedämmt [53]. Dächer und oberste Geschossdecken weisen mit etwa 1,5 %/a die höchsten Sanierungsraten aller Hüllbauteile (außer den Fenstern) auf [7]. Simons stellt in diesem Zusammenhang fest [120]:

„Die bereits hohe Quote an gedämmten oberen Geschossdecken/Dächern kann auch dahingehend interpretiert werden, dass dies in den einfachen Fällen bereits geschehen ist. Bei den noch verbleibenden Gebäuden mit ungedämmtem Dach/obere Geschossdecke dürfte sich damit der Anteil der schwierigen Fälle kontinuierlich erhöhen. Dies könnten z. B. Flachdächer oder andere Dachtypen ohne zugängliche Dachböden sein. Auch ein vollgestellter Dachboden kann sehr wohl ein unüberwindbares Hemmnis für das ansonsten einfache Auslegen von Dämmplatten sein.“

Frühere Sanierungen mit Einbau von Wärmedämmung waren stark von dem Wunsch beeinflusst, den Komfort zu verbessern, mutmaßt Simons [120].

Die für die Geschossdeckendämmung heute zum Einsatz kommenden Materialien weisen in mehr als 80 % % aller Fälle Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,031 und 0,035 W/(mK) auf. Beim Dach ist der Anteil geringer (ca. ⅔), jedoch sind hier vor allem zu mehr als 25 % noch bessere Qualitäten zu finden. es kann davon ausgegangen werden, dass diese Erkenntnis des KfW-Monitoring-Berichtes auch für andere Modernisierungen gilt [15].

Oberer Gebäudeabschluss in den Typgebäuden: Ausgangszustand

Die Daten der IWU-Studie zum Zielerreichungsszenario [62], siehe Tabelle 171 in Anhang 5.7.1, werden als Basisdaten verwendet. Aus den Einzelranddaten der drei gegebenen Altersklassen wird ein gemitteltes Gebäudemodell konzipiert. Die gegebene Datenbasis zum Sanierungszustand wird dabei fortgeschrieben, weil unterdessen ein Jahrzehnt vergangen ist.

Die jeweils anzunehmenden Wärmedurchgangskoeffizienten von Dächern und obersten Geschossdecken vor und nach der Sanierung werden drei Qualitätsklassen „gut“, „mittel“ und „schlecht“ zugeordnet. Es ergibt sich die in Tabelle 52 für die EZFH und in Tabelle 53 für die MFH zusammengestellte Datenbasis zur Häufigkeit der drei Klassen und dem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten (kurz: U-Wert) jeder Klasse.

Daten für die EZFH		Altersklasse bis 1978	Altersklasse 1979 - 1994	Altersklasse 1995 - 2009	Ergebnis
Stückzahl	[G]	9.610.000	2.710.000	2.670.000	
Dach/Obere Geschossdecke	[m²/G]	105	110	89	
Anteile					Ø Anteile
gut	[-]	0,57*	0,34*	1,00	0,59
mittel	[-]	-	0,66	-	0,13
schlecht	[-]	0,43	-	-	0,28
U-Wert					Ø U-Werte
gut	[(W/(m²K)]	0,24	0,18	0,33	0,26
mittel	[(W/(m²K)]	-	0,44	-	0,44
schlecht	[(W/(m²K)]	1,00**	-	-	1,00
alle	[(W/(m²K)]	-	-	-	0,49
* Fortschreibung der Sanierung mit 1 %/a | ** Festlegung des maximalen U-Wertes auf 1 W/(m²K)					

Tabelle 52 Sanierungszustand und Qualitäten der Dächer und obersten Geschossdecken des Typ-EZFH [eigene Darstellung]

Daten für die MFH		Altersklasse bis 1978	Altersklasse 1979 - 1994	Altersklasse 1995 - 2009	Ergebnis
Stückzahl	[G]	2.340.000	440.000	270.000	
Dach/Obere Geschossdecke	[m²/G]	173	303	298	
Anteile					Ø Anteile
gut	[-]	0,58*	0,33*	1,00	0,58
mittel	[-]	-	0,67	-	0,14
schlecht	[-]	0,42	-	-	0,27
U-Wert					Ø U-Werte
gut	[(W/(m²K)]	0,24	0,18	0,34	0,26
mittel	[(W/(m²K)]	-	0,45	-	0,45
schlecht	[(W/(m²K)]	1,00**	-	-	1,00
alle	[(W/(m²K)]	-	-	-	0,49
* Fortschreibung der Sanierung mit 1 %/a | ** Festlegung des maximalen U-Wertes auf 1 W/(m²K)					

Tabelle 53 Sanierungszustand und Qualitäten der Dächer und obersten Geschossdecken des Typ-MFH [eigene Darstellung]

Oberer Gebäudeabschluss in den Typgebäuden: Zielzustand

Als bester zu erreichender Zustand für den oberen Gebäudeabschluss in der Sanierung („best“) wird in den Berechnungen, die diesem Gutachten zugrunde liegen, ein Wärmedurchgangskoeffizient von U = 0,15 W/(m²K) angesetzt. Der Wert ist zahlenmäßig der Grenzwert für das Passivhaus und liegt in etwa bei dem Wert, der derzeit von der KfW bzw. der EnSanMV [29] als Einzelmaßnahme gefördert wird (0,14 W/(m²K)).

Der Monitoring-Bericht zu den KfW-Sanierungs-Förderprogrammen 2017 beziffert den typischen in einer Sanierung erreichten U-Wert eines Daches mit 0,17 W/(m²K), den einer Geschossdecke mit 0,16 W/(m²K) [15].

In vergleichbaren Studien – z. B. von AGORA – werden Werte von 0,12 bis 0,14 W/(m²K) je nach Szenario für eine ambitionierte Sanierung verwendet [128]. IWU geht in der „Tabula“-Studie von 0,38 bis 0,41 W/(m²K) für eine Standard-Modernisierung einer Holzkonstruktion (nur Zwischensparrendämmung) bzw. 0,25 W/(m²K) für eine Massivkonstruktion aus, während bei einer verbesserten Modernisierung Werte zwischen 0,09 und 0,14 W/(m²K) erreicht werden [102].

Jochum et al. ermitteln zunächst kostenoptimale Dämmstoffdicken für verschiedene Dämmstoffe und Hüllbauteile. Die verschiedenen Konstruktionen des oberen Gebäudeabschlusses finden im Bereich 0,08 bis 0,13 W/(m²K) ihre optimalen Werte. In der Simulation wird gleitend gerechnet. Im konventionellen Szenario sinkt der U-Wert von etwa 0,3 auf 0,15 W/(m²K), in der ambitionierten Sanierung von 0,14 auf 0,08 W/(m²K). Jeweils Startwert für den schlechteren Wert ist das Jahr 2011, der beste wird entsprechend 2050 erreicht [127].

Schulze-Darup stellt 2019 fest [90]:

> *„Das Anforderungsprofil des Standards KfW Effizienzhaus 55 liegt mit U = 0,14 W/(m²K) ambitionierter als das Passivhaus-Bauteil und wird problemlos am Markt angenommen und in der Breite ausgeführt […] Langfristig werden im Dachbereich U-Werte etwa im Bereich 0,12 bis 0,14 W/(m²K) eine sinnvolle Lösung darstellen […]“.*

Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses (gemittelte Betrachtung)

Das in allen anderen Merkmalen durchschnittliche Gebäude hat vorher einen oberen Gebäudeabschluss (oberste Geschossdecke oder Dach) mit einem U-Wert von 1,0 W/(m²K) und nachher mit 0,15 W/(m²K). Diese Maßnahme ist schematisch für die gemittelte Betrachtung in Abbildung 53 dargestellt. Beide Anteile dieser Bauteile werden gewichtet berechnet – je nach Häufigkeit des Vorkommens in den Gebäuden. Es ergeben sich gewichtete Investitionskosten sowie alle weiteren Kennwerte.

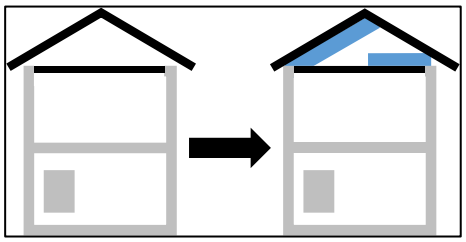


Abbildung 53 Schema – Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses [eigene Darstellung]

Wenn unterstellt wird, dass eine Investition ohne Anlass stattfindet, müssen Vollkosten betrachtet werden. auf Basis des mittleren EZFH und MFH zeigt Tabelle 54 die Ergebnisse für diese Dämmung als Einzelmaßnahme.

Die Emissionen für Wärme reduzieren sich zwischen 29 % im EZFH und 22 % im MFH. Bezogen auf die somit erreichte Minderung an Emissionen liegt der äquivalente CO_2-Preis bei 219 bis 275 €/t. Das ist ein geringer Wert unter den baulichen Maßnahmen.

Da sich keine Fehlbeträge bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung ergeben (sondern Gewinne), sind keine Zuschüsse notwendig. Diese Maßnahme rechnet sich bereits ohne Erhöhung der Energiepreise.

Die Alternative ist eine Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses im Rahmen der ohnehin notwendigen Instandhaltung nach z. B. nach 45 Jahren für das Dach. Beispielsweise steht eine neue Dacheindeckung an. Das würde dem reinen Bestandserhalt – ohne Verbesserung der energetischen Qualität – entsprechen.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen des oberen Gebäudeabschlusses von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
Transmissionswärmeverlust flächenbezogen H_T‘	vorher	W/(m²K)	0,82	0,87
	nachher	W/(m²K)	0,58	0,66
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes“) h	vorher	W/(m²K)	2,39	1,83
	nachher	W/(m²K)	1,76	1,46
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	196	155
	nachher	kWh/(m²a)	141	121
Investition	Vollkosten	T€	19,5	33,1
Emissionsminderung, Wärme		%	-29	-22
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	275	219
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-74	-370
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 54 Auswertung Dämmung oberer Gebäudeabschluss auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Tabelle 55 zeigt die Ergebnisse für die Verbesserung auf das best practice-Niveau. Bezogen auf die somit erreichte Minderung an Emissionen liegt der äquivalente CO_2-Preis bei 145 bis 166 €/t – ein geringer Wert. Diese Maßnahme ist wirtschaftlich; es ergibt sich kein Fehlbetrag (sondern ein Gewinn). Insofern müssen keine Investitionskostenzuschüsse fließen. Auch ist keine Energiekostenerhöhung (z. B. in Form von Emissionspreisen) notwendig.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen des oberen Gebäudeabschlusses von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	196	155
	nachher	kWh/(m²a)	141	121
Investition	Mehrkosten	T€	10,1	19,4
Emissionsminderung, Wärme		%	-29	-22
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	166	145
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-273	-648
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 55 Auswertung Dämmung oberer Gebäudeabschluss auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Dämmung des Daches

Die bisherigen Berechnungen sind Mischberechnungen für den oberen Gebäudeabschluss. Allerdings sind die Aussagen für Dach und oberste Geschossdecke durchaus verschieden. Untersucht wird zunächst das Dach als oberer Gebäudeabschluss – Skizze siehe Abbildung 54.

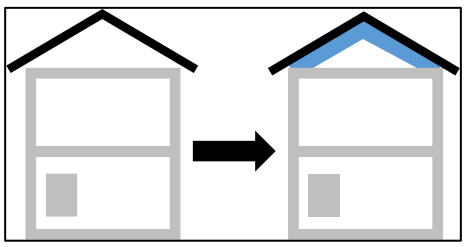


Abbildung 54 Schema – Dämmung des Daches [eigene Darstellung]

Tabelle 56 zeigt die Ergebnisse für das Dach. Alle energetischen Kennwerte sind unverändert, jedoch alle Kennwerte, bei denen die Kosten eine Rolle spielen, haben sich verschlechtert. Der äquivalente CO_2-Preis liegt mit 457 bzw. 429 €/t im Mittelfeld der baulichen Maßnahmen. Es ergeben sich Fehlbeträge bei der Wirtschaftlichkeit. Diese wären durch Investitionskostenzuschüsse von etwa 30 % auszugleichen. Alternativ würde die Energiepreiserhöhung zu einer Grenzwirtschaftlichkeit führen. Mit den notwendigen Emissionspreisen von 111 bis 142 €/t ergäben sich beispielsweise Gaspreise in der Größenordnung 8 bis 9 Cent/kWh.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen des Daches von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	196	155
	nachher	kWh/(m²a)	141	121
Investition	Vollkosten	T€	28,0	54,0
Emissionsminderung, Wärme		%	-29	-22
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	457	429
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	258	417
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	31	26
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	142	111

Tabelle 56 Auswertung Dämmung des Daches auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Da nur die Dachsanierung zu den ggf. „ohnehin fälligen Maßnahmen" zählt, soll diese abschließend noch separat untersucht werden.

Tabelle 57 zeigt die Ergebnisse für das Dach. Alle energetischen Kennwerte sind unverändert, jedoch alle Kennwerte, bei denen die Kosten eine Rolle spielen, haben sich verschlechtert. Dennoch ergibt sich ein positives Wirtschaftlichkeitsergebnis, also ein Überschuss. Somit ist festzustellen, dass im Falle einer ohnehin notwendigen Dachsanierung keine weitere Maßnahme (Zuschuss, Energiepreiserhöhung) erforderlich ist.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen des Daches von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	196	155
	nachher	kWh/(m²a)	141	121
Investition	Mehrkosten	T€	10,4	20,1
Emissionsminderung, Wärme		%	-29	-22
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	214	201
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-185	-438
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 57 Auswertung Dämmung des Daches auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Dämmung der oberen Geschossdecke

In vielen Fällen ist jedoch der Dachraum nicht ausgebaut, so dass ausschließlich die oberste Geschossdecke betrachtet werden kann, siehe Abbildung 55

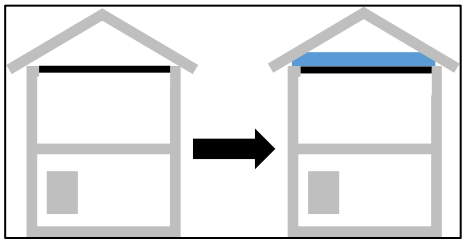


Abbildung 55 Schema – Dämmung der oberen Geschossdecke [eigene Darstellung]

Deutlich günstiger liegen die Werte bei der obersten Geschossdecke, siehe Tabelle 58. Trotz des Vollkostenansatzes, der hier sicherlich gerechtfertigt ist, ergibt sich eine Wirtschaftlichkeit mit Überschuss in den Jahreskosten. Daher werden keine Zuschüsse oder Preiserhöhungen notwendig.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen der obersten Geschossdecke von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	196	155
	nachher	kWh/(m²a)	141	121
Investition	Vollkosten	T€	9,8	19,0
Emissionsminderung, Wärme		%	-29	-22
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	121	113
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-355	-766
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 58 Auswertung Dämmung der obersten Geschossdecke auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Nachdämmung des Daches

Falls das Dach bereits eine geringe Dämmung aufweist, z. B. eine Dämmschicht früherer Sanierungen, liegt der Ausgangs-U-Wert bereits niedriger – Skizze siehe Abbildung 56.

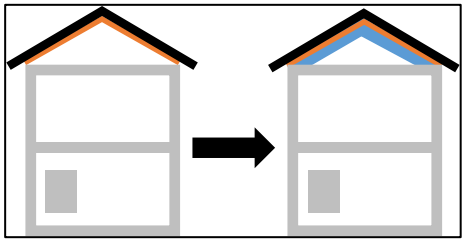


Abbildung 56 Schema – Nachdämmung des Daches [eigene Darstellung]

Zunächst wird mit den Zahlen aus Tabelle 59 die Version der anlasslosen Investition untersucht. Es gelten die Vollkosten. Die Vorteile der Sanierung sinken deutlich. Mit einer notwendigen Förderung von nunmehr etwa 75 % und äquivalenten CO_2-Preisen erscheint diese Maßnahme nicht sinnvoll für eine weitere Verfolgung.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen des Daches von U = 0,44 bis 0,45 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	160	133
	nachher	kWh/(m²a)	141	121
Investition	Vollkosten	T€	26,4	51,6
Emissionsminderung, Wärme		%	-12	-9
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	1263	1166
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	591	1118
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	75	73
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	948	849

Tabelle 59 Auswertung Nachdämmung des Daches auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die Umsetzung sollte an einen Anlass gekoppelt werden. Die sich dann ergebenden Ergebnisse auf Basis der Mehrkosten zeigt Tabelle 60. Obwohl der Standard vorher bereits vergleichsweise gut ist, ist die Maßnahme – im Vergleich zu anderen – als vorteilhaft einzuschätzen. Mit einer nur geringen Förderung von 16 bis 17 % wäre jeweils Grenzwirtschaftlichkeit erreicht.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen des Daches von U = 0,44 bis 0,45 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	160	133
	nachher	kWh/(m²a)	141	121
Investition	Mehrkosten	T€	8,9	17,7
Emissionsminderung, Wärme		%	-12	-9
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	533	503
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	136	244
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	17	16
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	218	185

Tabelle 60 Auswertung Nachdämmung des Daches auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Nachdämmung der oberen Geschossdecke

Abschließend soll die Nachdämmung der oberste Geschossdecke untersucht werden, vgl. Abbildung 57. Falls sie bereits eine geringe Dämmung aufweist, z. B. in Form einer Trittschalldämmung, liegt der Ausgangs-U-Wert bereits niedriger.

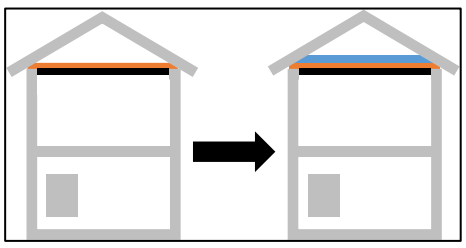


Abbildung 57 Schema – Nachdämmung der oberen Geschossdecke [eigene Darstellung]

Es wird hier nur die anlasslose Investition auf Basis der Vollkosten untersucht, da bis auf mögliche Bauschadensfälle (Wassereintritt von außen o. ä.) eine solche Fläche keinen Sanierungsbedarf hat. Tabelle 61 zeigt die Ergebnisse.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen der obersten Geschossdecke von U = 0,44 bis 0,45 W/(m²K) auf U = 0,15 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	160	133
	nachher	kWh/(m²a)	141	121
Investition	Vollkosten	T€	8,4	16,8
Emissionsminderung, Wärme		%	-12	-9
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	302	285
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-8	-43
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 61 Auswertung Dämmung der obersten Geschossdecke auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die Vorteile der Sanierung sinken zwar, aber der Überschuss reicht immer noch aus, dass diese Maßnahme ohne Förderungsnotwendigkeit auskommt. Sie hat einen sehr geringen äquivalenten CO_2-Preis, d. h. mit dem eingesetzten Geld kann viel CO_2 gespart werden – in diesem Fall ohne Nachteil für die Gesamtwirtschaftlichkeit. Dieser Zustand ergibt etwa eine Grenzwirtschaftlichkeit.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Fazit zur Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses

Die Dämmung der obersten Geschossdecke ist eine wirtschaftliche Maßnahme, die auch anlasslos unter Verwendung der Vollkosten keine Bezuschussung benötigt. Sie führt zu sehr geringen äquivalenten CO_2-Preisen. Dies gilt auch, wenn bereits eine Dämmung vorhanden ist für die Aufdopplung. Erst ab einem Ausgangszustand, welcher der Wärmeschutzverordnung 1995 entspricht, ist dies nicht mehr wirtschaftlich.

Die Dachsanierung hingegen weist schlechtere Ergebnisse auf. Auf Basis der Vollkosten ergibt sich keine Wirtschaftlichkeit. Es sind entweder Investitionskostenzuschüsse von etwa 30 % notwendig oder eine künstliche Energiepreiserhöhung tritt ein (Emissionspreis). Liegt die Dachsanierung aber sowieso an, ist die Maßnahme wirtschaftlich. Eine Aufdopplung der Dämmung ist hingegeben grenzwirtschaftlich.

Die Erkenntnisse zur Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses decken sich grundsätzlich mit denen andere Studien, z. B. des Passivhausinstitutes [134], von Jochum et al. [127], IWU [62] und Holm et al. [201] – jedenfalls soweit die abweichenden Annahmen einen Vergleich zulassen. Die ermittelten Investitionskostenzuschüsse sind mit denen vergleichbar, welche die KfW heute fördert bzw. liegen darunter.

Hinweise zur Minimierung von Wärmebrücken, Verminderung des Wartungsaufwandes, brandschutzfreundlich verlegter Entwässerung sowie Einbindung von PV als Dacheindeckung sind in der Literatur zu finden, z. B. in [90]. Bei einer Dachsanierung als Einzelmaßnahme sollte in jedem Fall bereits ein ausreichender Dachüberstand für eine Außenwanddämmung hergestellt werden, selbst wenn diese erst später erfolgt.

3.2.4 Dämmung Kellerdecke und Bodenplatten

Erst mit der zweiten Wärmeschutzverordnung von 1984 erhielten Kellerdecken und Bodenplatten verpflichtend einen nennenswerten Wärmeschutz. Dämmdicken im Bereich von 4 bis 6 cm etablierten sich. Mit der Wärmeschutzverordnung von 1995 bis zur geltenden EnEV dominieren Dämmdicken im Bereich von 10 bis 12 cm [7] [90]. Für die nachträgliche Dämmung des Bestandes ergibt sich eine inhomogene Ausgangslage unter den Gebäuden mit Baujahren vor der 1. Wärmeschutzverordnung [7]:

- in den EZFH sind ca. 13 % aller Gebäude nicht unterkellert oder weisen teil- (33 %) oder vollbeheizten (7 % Keller auf; entsprechend ergibt sich in nur etwa 47 % der Gebäude die ideale Voraussetzung einer Kellerdeckendämmung von unten
- in den MFH sind zu 74 % unbeheizte Keller vorhanden; 6 % haben keinen, 19 % einen teil- und 2 % einen vollbeheizten Keller.

Der Endbericht zur Datenbasis des Wohngebäudebestandes des IWU von 2016 legt offen, dass der untere Gebäudeabschluss im Bestand das Bauteil ist, bei dem die geringste Durchdringung einer Wärmedämmung festzustellen ist – nur in knapp 27 % aller Gebäude mit Baujahr vor 1979. Nachträglich gedämmt sind die genannten Flächen in nur 18 % aller Altbauten. Außerdem ist der untere Gebäudeabschluss oft von einer Teilmodernisierung betroffen. Im Schnitt ist eine gedämmte Kellerdecke oder Bodenplatte nicht zu 100 %, sondern nur zu 80 % gedämmt. Kellerdecken und Bodenplatten weisen mit 0,3 %/a die geringsten Sanierungsraten aller Hüllbauteile auf [7].

Selbst das Passivhausinstitut geht davon aus, dass ein beheizter Keller im Zuge der Sanierung standardmäßig allenfalls eine Innendämmung erhält, keine Bodenplattendämmung [202]. Simons stellt 2012 fest [120]:

> *„[…] Da gleichzeitig bei der Kellerdecke kein Sanierungszyklus besteht, reduzieren sich auch die Kosten nicht durch eine Koppelung an eine ohnehin notwendige Maßnahme. Ein Anreiz ist von dieser Seite auch in Zukunft nicht zu erwarten.“*

Der Monitoring-Bericht zu den KfW-Sanierungs-Förderprogrammen 2017 beziffert jedoch den typischen in einer Sanierung erreichten U-Wert einer Kellerdecke mit 0,22 W/(m²K), den einer Bodenplatte mit 0,28 W/(m²K) [15].

Unterer Gebäudeabschluss in den Typgebäuden: Ausgangszustand

Die Daten der IWU-Studie zum Zielerreichungsszenario [62], siehe Tabelle 171 in Anhang 5.7.1, werden als Basisdaten verwendet. Aus den Einzelranddaten der drei gegebenen Altersklassen wird ein gemitteltes Gebäudemodell konzipiert. Die gegebene Datenbasis zum Sanierungszustand wird dabei fortgeschrieben.

Die jeweils anzunehmenden Wärmedurchgangskoeffizienten für Bodenplatten und Kellerdecken vor und nach der Sanierung werden drei Qualitätsklassen „gut“, „mittel“ und „schlecht“ zugeordnet. Es ergibt sich die in Tabelle 62 für die EZFH und in Tabelle 63 für die MFH zusammengestellte Datenbasis zur Häufigkeit der drei Klassen und dem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten (kurz: U-Wert) jeder Klasse.

Daten für die EZFH		Altersklasse bis 1978	Altersklasse 1979 - 1994	Altersklasse 1995 - 2009	Ergebnis
Stückzahl	[G]	9.610.000	2.710.000	2.670.000	
Boden/Keller	[m²/G]	87	90	70	
Anteile					Ø Anteile
gut	[-]	0,20*	0,13*	1,00	0,30
mittel	[-]	-	0,87	-	0,17
schlecht	[-]	0,80	-	-	0,53
U-Wert					Ø U-Werte
gut	[(W/(m²K)]	0,37	0,30	0,41	0,38
mittel	[(W/(m²K)]	-	0,68	-	0,68
schlecht	[(W/(m²K)]	1,00**	-	-	1,00
alle	[(W/(m²K)]	-	-	-	0,76
* Fortschreibung der Sanierung mit 1 %/a | ** Festlegung des maximalen U-Wertes auf 1 W/(m²K)					

Tabelle 62 Sanierungszustand und Qualitäten der Kellerdecken und Bodenplatten des Typ-EZFH [eigene Darstellung]

Daten für die MFH		Altersklasse bis 1978	Altersklasse 1979 - 1994	Altersklasse 1995 - 2009	Ergebnis
Stückzahl	[G]	2.340.000	440.000	270.000	
Boden/Keller	[m²/G]	152	271	225	
Anteile					Ø Anteile
gut	[-]	0,21*	0,17*	1,00	0,29
mittel	[-]	-	0,83	-	0,18
schlecht	[-]	0,79	-	-	0,52
U-Wert					Ø U-Werte
gut	[(W/(m²K)]	0,39	0,30	0,43	0,39
mittel	[(W/(m²K)]	-	0,69	-	0,69
schlecht	[(W/(m²K)]	1,00**	-	-	1,00
alle	[(W/(m²K)]	-	-	-	0,77
* Fortschreibung der Sanierung mit 1 %/a | ** Festlegung des maximalen U-Wertes auf 1 W/(m²K)					

Tabelle 63 Sanierungszustand und Qualitäten der Kellerdecken und Bodenplatten des Typ-MFH [eigene Darstellung]

Unterer Gebäudeabschluss in den Typgebäuden: Zielzustand

Als bester zu erreichender Zustand für den unteren Gebäudeabschluss in der Sanierung („best“) wird in den Berechnungen, die diesem Gutachten zugrunde liegen, ein Wärmedurchgangskoeffizient von U = 0,20 W/(m²K) angesetzt. Der Wert ist zahlenmäßig in der Mitte zwischen dem Grenzwert für das Passivhaus (0,15 W/(m²K)) und dem Wert, der derzeit von der KfW bzw. der EnSanMV [29] als Einzelmaßnahme gefördert wird (0,25 W/(m²K)) angesiedelt.

Für den unteren Gebäudeabschluss wird somit ein best practice-Zielwert als beste Lösung definiert. Dies bedeutet jedoch nicht, dass dieser in allen Gebäuden umgesetzt werden kann oder muss (Stichwort: fehlende Deckenhöhe, nicht zugängliche Bodenplatte). Bei der Betrachtung in der Makroebene wird dies berücksichtigt.

In vergleichbaren Studien – z. B. von AGORA – werden Werte von 0,18 bis 0,24 W/(m²K) je nach Szenario für eine ambitionierte Sanierung verwendet [128]. IWU geht in der „Tabula“-Studie von 0,27 bis 0,49 W/(m²K) für die nachträgliche Wärmedämmung einer Bodenplatte aus. Die Kellerdecke erreicht 0,26 bis 0,32 W/(m²K) bei einer Standard-Modernisierung sowie 0,20 bis 0,25 W/(m²K) bei einer verbesserten Modernisierung [102].

Jochum et al. verwenden in der Simulation gleitend absinkende Werte für die Kellerbauteile und Bodenplatten. Im konventionellen Szenario sinkt der U-Wert von 0,38 auf 0,15 W/(m²K), in der ambitionierten Sanierung von 0,25 auf 0,08 W/(m²K). Jeweils Startwert für den schlechteren Wert ist das Jahr 2011, der beste wird entsprechend 2050 erreicht [127].

Schulze-Darup et al. sehen den künftigen Standard für optimierte Planungen auf einen Wert zwischen 0,20 und 0,15 W/(m²K) hinauslaufen [90].

Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses (gemittelte Betrachtung)

Das in allen anderen Merkmalen durchschnittliche Gebäude hat vorher einen unteren Gebäudeabschluss (Kellerdecke oder Bodenplatte) mit einem U-Wert von 1,0 W/(m²K) und nachher mit 0,15 W/(m²K). Diese Maßnahme ist schematisch für die gemittelte Betrachtung in Abbildung 58 dargestellt. Beide Anteile dieser Bauteile werden gewichtet berechnet – je nach Häufigkeit des Vorkommens in den Gebäuden. Es ergeben sich gewichtete Investitionskosten sowie alle weiteren Kennwerte.

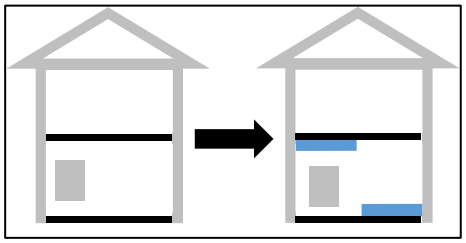


Abbildung 58 Schema – Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses [eigene Darstellung]

Wenn unterstellt wird, dass eine Investition ohne Anlass stattfindet, müssen Vollkosten betrachtet werden. auf Basis des mittleren EZFH und MFH zeigt Tabelle 64 die Ergebnisse für diese Dämmung als Einzelmaßnahme.

Die Emissionen für Wärme reduzieren sich zwischen 13 % im EZFH und 10 % im MFH. Bezogen auf die somit erreichte Minderung an Emissionen liegt der äquivalente CO_2-Preis bei 262 bis 357 €/t. Das ist ein mittlerer Wert unter den baulichen Maßnahmen. Da sich beim MFH keine Fehlbeträge bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung ergeben (sondern Gewinne), sind keine Zuschüsse notwendig. Diese Maßnahme rechnet sich bereits ohne Erhöhung der Energiepreise. Beim EZFH ergibt sich nur ein geringer Fehlbetrag zur Wirtschaftlichkeit.

Prinzipiell sind ohnehin notwendige Maßnahmen an Bodenplatten oder Kellerdecken kaum anzutreffen, da es sich um langlebige Bauteile mit kaum Instandhaltungsbedarf handelt. Es wird auf eine Detailuntersuchung von „ohnehin erforderlichen Sanierungen“ (auf Basis der Mehrkosten) daher verzichtet.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,2 W/(m²K)				
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
Transmissionswärmeverlust flächenbezogen H_T'	vorher	W/(m²K)	0,70	0,77
	nachher	W/(m²K)	0,61	0,68
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes“) h	vorher	W/(m²K)	2,09	1,66
	nachher	W/(m²K)	1,84	1,51
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	169	139
	nachher	kWh/(m²a)	148	125
Investition	Vollkosten	T€	12,6	18,5
Emissionsminderung, Wärme		%	-13	-10
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	357	262
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	30	-85
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	12	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	42	keiner

Tabelle 64 Auswertung unterer Gebäudeabschluss auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Dämmung der Bodenplatte

Die bisherigen Berechnungen sind Mischberechnungen für den unteren Gebäudeabschluss. Allerdings sind die Aussagen für Kellerdecke und Bodenplatte durchaus verschieden. Zunächst soll die Bodenplattendämmung betrachtet werden – siehe Abbildung 59 (Hinweis: die Lage der Dämmschicht ist nur als Prinzipskizze zu verstehen; sie könnten auf oder unter der Bodenplatte liegen)

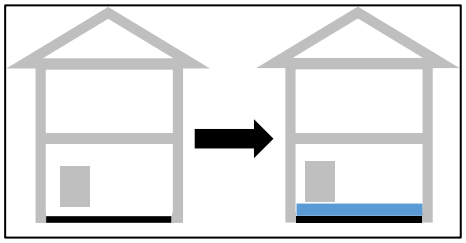


Abbildung 59 Schema – Dämmung der Bodenplatte [eigene Darstellung]

Tabelle 65 zeigt die Ergebnisse für die Bodenplatte. Alle energetischen Kennwerte sind unverändert, jedoch alle Kennwerte, bei denen die Kosten eine Rolle spielen, haben sich verschlechtert. Der äquivalente CO_2-Preis liegt mit 456 bzw. 430 €/t im Mittelfeld der baulichen Maßnahmen. Es ergeben sich Fehlbeträge bei der Wirtschaftlichkeit. Diese wären durch Investitionskostenzuschüsse von etwa 30 % auszugleichen. Alternativ würde die Energiepreiserhöhung zu einer Grenzwirtschaftlichkeit führen. Mit den notwendigen Emissionspreisen von 112 bis 141 €/t ergäben sich beispielsweise Gaspreise in der Größenordnung 8 bis 9 Cent/kWh.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmung der Bodenplatte von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,2 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	169	139
	nachher	kWh/(m²a)	148	125
Investition	Vollkosten	T€	18,0	36,7
Emissionsminderung, Wärme		%	-13	-10
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	456	430
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	99	171
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	31	26
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	141	112

Tabelle 65 Auswertung Dämmung der Bodenplatte auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die Zahlen liegen in derselben Größenordnung wie beim Dach. Daher wird auf eine weitere Untersuchung der Nachdämmung einer Bodenplatte verzichtet. Es ist absehbar, dass dies – wie beim Dach – nur mit großen Zuschüssen (in der Größenordnung von 75 % auf die Investitionskosten) machbar wäre.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Dämmung der Kellerdecke

Der Fall der Kellerdeckendämmung wird anschließend untersucht. Prinzipskizze siehe Abbildung 60. Auch hier gilt: die Lage der Dämmschicht auf oder unter der Rohdecke ist – bis auf die Wärmebrückenproblematik – unerheblich. Die Skizze ist als Schema zu verstehen.

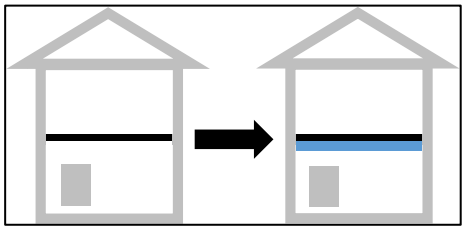


Abbildung 60 Schema – Dämmung der Kellerdecke [eigene Darstellung]

Deutlich günstigere Werte ergeben sich in diesem Fall, siehe Tabelle 66. Trotz des Vollkostenansatzes, der hier sicherlich gerechtfertigt ist, ergibt sich eine Wirtschaftlichkeit mit Überschuss in den Jahreskosten. Daher werden keine Zuschüsse oder Preiserhöhungen notwendig.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen der Kellerdecke von U = 1,0 W/(m²K) auf U = 0,2 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	169	139
	nachher	kWh/(m²a)	148	125
Investition	Vollkosten	T€	7,6	15,5
Emissionsminderung, Wärme		%	-10	-13
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	241	227
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-52	-138
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 66 Auswertung Dämmung der Kellerdecke auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Nachdämmung der Kellerdecke

Falls die Kellerdecke bereits eine geringe Dämmung aufweist, z. B. in Form einer Trittschalldämmung, ist die Ausgangsqualität bereits besser. Dieser Fall soll abschließend untersucht werden, Skizze siehe Abbildung 61.

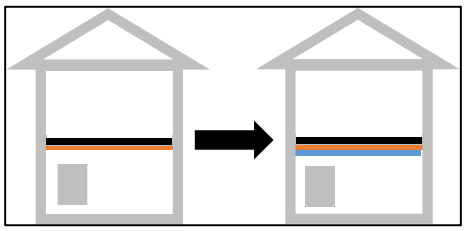


Abbildung 61 Schema – Nachdämmung der Kellerdecke [eigene Darstellung]

Ausgehend vom „mittleren“ Standard ist ein leichter Verlust in der Gesamtkostenberechnung festzustellen siehe Tabelle 67. Eine Grenzwirtschaftlichkeit ließe sich erreichen, wenn der Zuschuss bei 10bis 18 % der Investitionskosten (Vollkosten) gewährt würde. Alternativ unter den Randdaten höherer Energiepreise (CO_2-Preis von 37 bis 69 €/t). Da die Werte sehr nahe an der Erreichung einer Wirtschaftlichkeit liegen und eine sehr günstigen äquivalenten CO_2-Preis aufweisen, werden sie weiterverfolgt.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Dämmen der Kellerdecke von U = 0,68 bis 0,69 W/(m²K) auf U = 0,2 W/(m²K)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	161	133
	nachher	kWh/(m²a)	148	125
Investition	Vollkosten	T€	7,3	14,8
Emissionsminderung, Wärme		%	-8	-6
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	383	354
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	29	34
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	18	10
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	69	37

Tabelle 67 Auswertung Nachdämmung der Kellerdecke auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller baulichen Maßnahmen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.2.5.

Fazit zur Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses

Die Dämmung der Kellerdecke ist eine wirtschaftliche Maßnahme, die auch anlasslos unter Verwendung der Vollkosten keine Bezuschussung benötigt. Sie führt zu geringen äquivalenten CO_2-Preisen. Dies gilt auch, wenn bereits eine geringe Dämmung vorhanden ist für die Aufdopplung bzw. Nachdämmung. Mit Zuschüssen in der Größenordnung von 5 % ist eine Wirtschaftlichkeit herzustellen.

Die – praktisch nie „ohnehin“ anzutreffende – Bodendämmung ist nicht wirtschaftlich. Es ergeben sich Fehlbeträge bei der Wirtschaftlichkeit. Diese wären durch Investitionskostenzuschüsse von etwa 15 % auszugleichen. Alternativ würde die Energiepreiserhöhung zu einer Grenzwirtschaftlichkeit führen. Mit den notwendigen Emissionspreisen von 112 bis 141 €/t ergäben sich beispielsweise Gaspreise in der Größenordnung 8 bis 9 Cent/kWh.

Insgesamt ist die Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses im Mehrfamilienhaus deutlich einfacher umzusetzen als im Ein- und Zweifamilienhaus, da in großer Zahl unbeheizte Keller vorhanden sind.

Die Erkenntnisse zur Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses decken sich grundsätzlich mit denen anderer Studien, z. B. des Passivhausinstitutes [134], von Jochum et al. [127], IWU [62] und Holm et al. [201] – jedenfalls soweit die abweichenden Annahmen einen Vergleich zulassen. Die ermittelten Investitionskostenzuschüsse sind mit den heutigen Zuschüssen der KfW vergleichbar.

Entsprechende Planungs- und Umsetzungshinweise zur Vermeidung von Wärmebrücken sind insbesondere bei Kellerdeckendämmungen zu beachten [199]. Der erhöhte Aufwand aufgrund unebener Decken (bis hin zu Gewölben) sowie der Rohrleitungsführung ist zu bedenken [53]. Bei den im Rahmen dieses Gutachtens gewählten Kostenansätzen wurde dies beachtet.

Mit weiterführenden Themen, z. B. Schäden nach Hochwasserereignissen beschäftigen sich Holm et al. in der Metastudie zu Wärmedämmstoffen [201].

3.2.5 Zwischenfazit bauliche Maßnahmen

Die baulichen Maßnahmen sind vor allem dann wirtschaftlich, wenn sie mit notwendigen Maßnahmen der Instandhaltung gekoppelt werden.

Betriebswirtschaftliche Einschätzung

Abbildung 62 zeigt die Ergebnisse der Kostenbewertung für eine jeweilige Verbesserung des Bauteils ausgehend von einem ungedämmten bzw. mittleren Ausgangszustand. Dargestellt ist das Ergebnis der Gesamtkostenbetrachtung (Überschuss oder Fehlbetrag in [€/a] bezogen auf die Wohnfläche in [m²]).

Alle Werte unter der Nulllinie sind wirtschaftlich, ohne dass die Energiepreise steigen bzw. bedürfen keiner Förderung. Dazu zählen die Dämmung der ungedämmten obersten Geschossdecke, aber auch die Kellerdeckendämmung (jeweils ohne Anlass). Die Dachdämmung und die Außenwanddämmung sind nur wirtschaftlich, wenn ohnehin eine Maßnahme ansteht und entsprechend nur die Mehrkosten zählen.

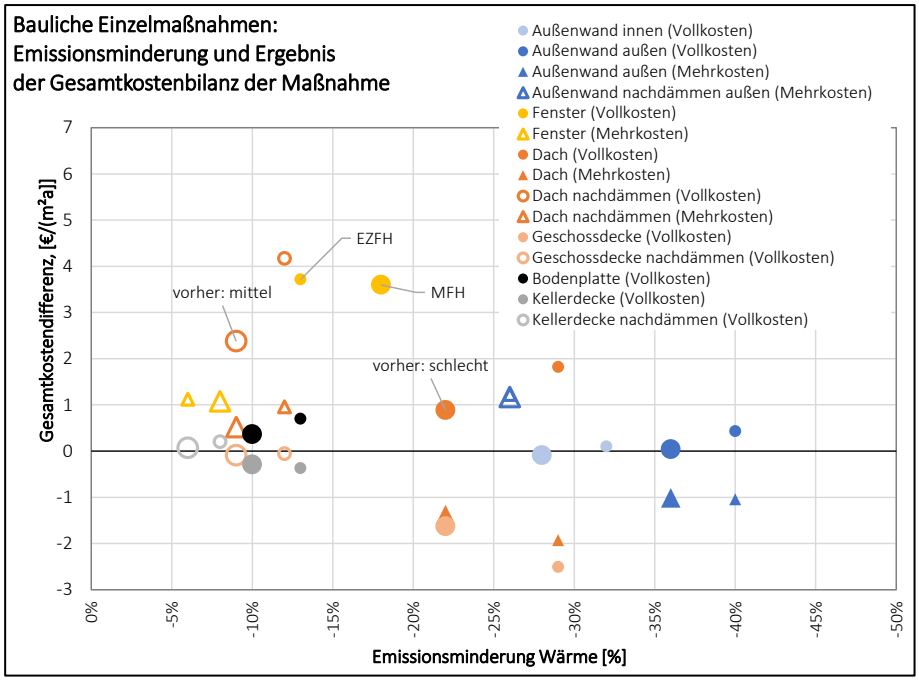


Abbildung 62 Bewertung der baulichen Maßnahmen nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung]

Nicht ohne Ausgleichsmaßnahmen kommen die Dämmung der Bodenplatte, der Fenstertausch sowie die anlasslosen Dämmungen von Dach und Außenwand (von innen oder außen) aus. Die möglichen Gegenmaßnahmen sind in Abbildung 63 dargestellt. Bei den untersuchten möglichen Nachdämmungsmaßnahmen zeigt sich jeweils eine Verschlechterung – verglichen mit den Varianten, die vom schlechten Zustand ausgehen. Jedoch die Aufdopplung für Keller- und Geschossdecken liegen im Bereich der Grenzwirtschaftlichkeit.

Maßnahmen zum Ausgleich von Unwirtschaftlichkeiten

Abbildung 63 zeigt die notwendigen Investitionskostenzuschüsse (X-Achse), um die in sich nicht wirtschaftlichen Maßnahmen grenzwirtschaftlich werden zu lassen. Alternativ sind die zusätzlich notwendigen Emissionspreise genannt, unter denen diese Grenzwirtschaftlichkeit ebenfalls eintritt. Kombinierte Zwischenwerte sind ebenfalls denkbar, aber nicht dargestellt.

Zur beispielhaften Erläuterung: eine anlasslose Bodenplattendämmung benötigte entweder einen Zuschuss von ca. 30 % auf die Investitionskosten oder würde sich rechnen, wenn die Energieträger mit einem Preisaufschlag von etwa 110 bis 140 €/t CO_2 versehen werden würden. Der Erdgaspreis läge dann bei 8 bis 9 Cent/kWh. Die Autoren dieses Gutachtens gehen davon aus, dass es tatsächlich den Zuschuss benötigte, weil ohne Anreiz keine Sanierung augenscheinlich ist. Er müsste vermutlich noch etwas über dem genannten Wert der Grenzwirtschaftlichkeit liegen, damit er tatsächlich als Anreiz dient.

Die restlichen Maßnahmen: Dach und Außenwand (als anlasslose Maßnahme) sowie das Nachdämmen der Außenwand (wenn ohnehin eine Maßnahme ansteht) ließen sich mit Zuschüssen in den zeigten Größenordnungen anreizen.

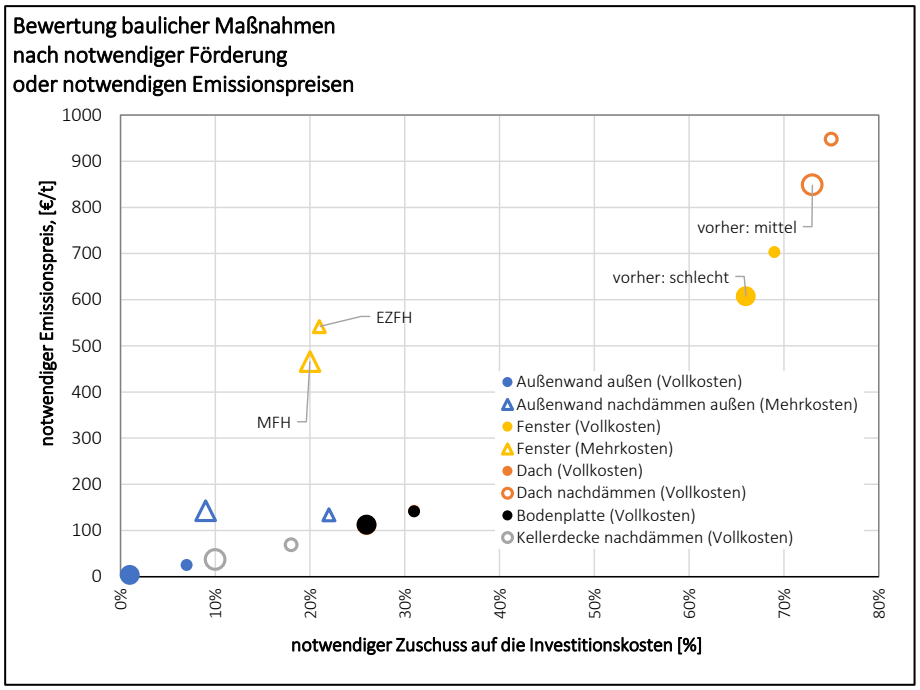


Abbildung 63 Bewertung der baulichen Maßnahmen nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung]

Auf die Bezuschussung von anlasslosen Verbesserungen des bereits etwas gedämmten Daches sollte verzichtet werden. Hinsichtlich des Fenstertausches sollte allenfalls ein ohnehin erforderlicher Austausch (dann zählen nur die Mehrkosten) bezuschusst werden.

Einschätzung auf Basis der Emissionsminderung

Abbildung 64 ordnet die baulichen Maßnahmen unter dem Gesichtspunkt der Emissionsminderung ein. Je weiter rechts und gleichzeitig unten eine Maßnahme angeordnet ist, desto interessanter ist sie aus Sicht der Gesamtverbesserung des deutschen Bestandes.

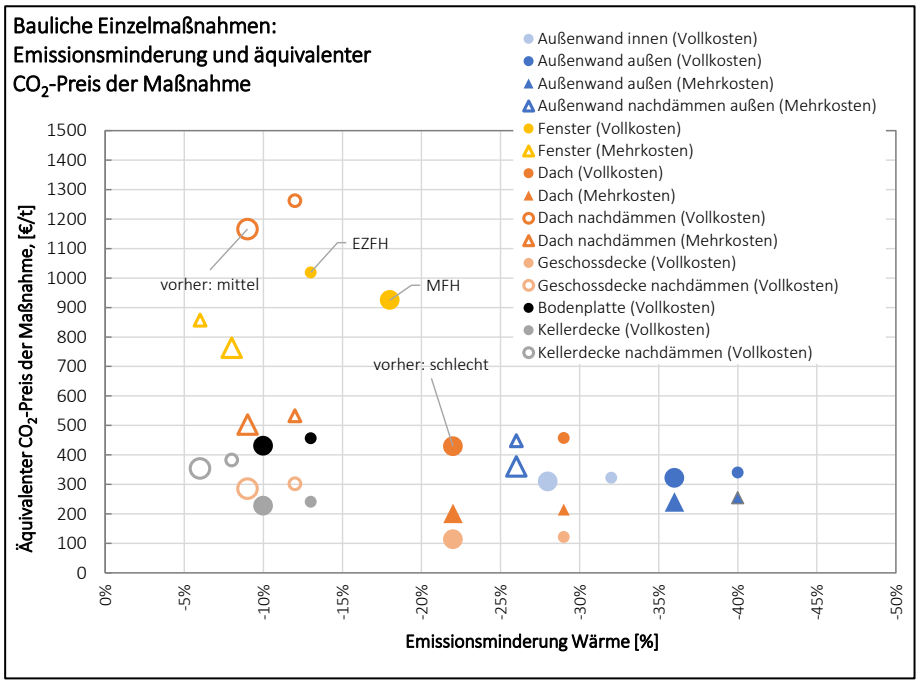


Abbildung 64 Bewertung der baulichen Maßnahmen nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung]

Lage unten (gutes Verhältnis von eingesetztem Kapital zur erzielten Emissionsminderung): am besten schneiden die Maßnahmen an der obersten Geschossdecke ab, weil sie sehr kostengünstig sind. Ähnliches gilt für das Dach, wenn ohnehin eine Maßnahme ansteht. Die Kellerdeckendämmung führt ebenfalls zu einer sehr kostengünstigen Einsparung an Emissionen. Selbst das Nachdämmen einer bereits mittelmäßigen obersten Geschossdecke auf bestes Niveau zählt zu diesen Maßnahmen

Lage rechts (großer „Hebel" hinsichtlich der Emissionsminderung in einem Schritt): die Außenwanddämmung liegt weit rechts im Bild – unabhängig davon, ob es einen Anlass gibt oder nicht, ob von außen oder innen. Sogar das Nachdämmen ist interessant.

Fenster sowie die anlasslose Nachdämmung eines bereits wenig gedämmten Daches sind in dieser Betrachtung die ungünstigsten (weitere noch ungünstigere wurden nicht untersucht); sie weisen einerseits nur geringe Gesamteinsparpotentiale auf und andererseits ergeben sich – selbst beim ohnehin fälligen Tausch – große Kosten der Emissionsvermeidung.

Einfluss der vorhandenen Anlagentechnik

Die Ergebnisse wurden auf Basis einer mittleren Anlagentechnik ermittelt. Diese ist zu großen Teilen durch Gas- und Heizölkessel sowie Fernwärme geprägt. Für die drei genannten Versorgungssysteme gelten die Ergebnisse mit marginalen Abweichungen zu den genannten Zahlen.

Sind Wärmepumpen vorhanden, aber die genannten Hüllbauteile noch ungedämmt, so ergeben sich günstigere Ergebnisse (bessere Wirtschaftlichkeit, geringere notwendige Förderung usw.). Wenn die genannten Zuschüsse gewährt würden oder die Emissionspreise auf die Energieträger umgesetzt würden, profitieren die Wärmepumpengebäude mehr als die Durchschnittgebäude.

Einzig der Holzkessel führt zu nennenswert anderen Ergebnissen, da der Energiepreis zu gering ist. Hier würde zum Erzielen einer Wirtschaftlichkeit der notwendige Investitionskostenzuschuss steigen. Alternativ müssten Emissionen bepreist werden – was bei Holz jedoch zu keinem sinnvollen Ergebnis führt. Daher ist festzuhalten, dass Holzkesselgebäude unter den ermittelten Ergebnissen nicht animiert werden, eine Gebäudeverbesserung zu erreichen. Andererseits sind deren Beiträge zu den Gesamtemissionen ohnehin gering (geringer Anteil in der Beheizungsstruktur und geringe Einzelemissionen).

Einfluss bereits vorhandener Dämmung (Aufdopplung)

Relevant ist die Überlegung für alle Hüllbauteile außer für die Außenwand mit Innendämmung und die Bodenplatte. Es ist festzustellen:

- die Außenwand mit Dämmung ist auf Basis der Vollkosten (anlasslos) nicht ohne Förderung nachzudämmen, jedoch sind im Rahmen ohnehin fälliger Maßnahmen an der Dämmung geringe Investitionskostenzuschüsse (in der Größenordnung 20 %) ausreichend, um eine Grenzwirtschaftlichkeit zu erzielen; Voraussetzung ist eine „mittlere" Wand eines Standards vor der 2. Wärmeschutzverordnung von 1984 ($U \geq 0{,}6$ W/(m²K))
- analog gelten die Aussagen für das Dach, bei welchem die Erhöhung der Dämmdicke im Rahmen der ohnehin geplanten Sanierung mit einem Zuschuss in der Größenordnung von 30 % auskommt, wenn eine Dachkonstruktion vor der 1. Wärmeschutzverordnung von 1977 zugrunde gelegt wird ($U \geq 0{,}5$ W/(m²K))
- die oberste Geschossdecke wird in der Regel nicht anlasslos verbessert; auf Basis der Volkosten ergibt sich eine sinnvolle Aufdopplung der Dämmung auch ohne Zuschuss, wenn eine „mittlere" Deckenkonstruktion vor der 1. Wärmeschutzverordnung von 1977 zugrunde gelegt wird ($U \geq 0{,}5$ W/(m²K))
- für die Kellerdecke gilt analoges; auf Basis der Volkosten ergibt sich eine sinnvolle Aufdopplung der Dämmung mit ca. 15 % Zuschuss, wenn eine „mittlere" Deckenkonstruktion vor der 2. Wärmeschutzverordnung von 1984 zugrunde gelegt wird ($U \geq 0{,}7$ W/(m²K))

Anstelle der genannten Werte könnte jeweils auch eine Erhöhung der Energiepreise eintreten, z. B. durch emissionsabhängige Preisbestandteile. Dabei sind die mehrfach genannten etwa 15 bis 20 % Investitionskostenzuschuss zu ersetzen durch eine alternative Bepreisung aller Energieträger in der Größenordnung 50 bis 100 €/t. Der Erdgaspreis liegt dann bei etwa 8 Cent/kWh.

Einschränkungen

Sind Gebäude noch geringer mit Personen belegt (z. B. das EZFH mit 2 statt den durchschnittlichen 2,7 Personen) verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit. Da allerdings bereits von vornherein eine geringe Belegung unterstellt wurde, sind die Abweichungen moderat. In allen Gebäuden mit dichterer Personenbelegung sind die Werte besser.

3.3 Energieeffizienz und Kosten für Maßnahmen an den Haupterzeugern

Nachfolgend werden Maßnahmen an den Hauptwärmeerzeugern als Einzelmaßnahmen untersucht. Dies sind Wärmepumpen, Gas- und Ölkessel, Holzkessel sowie verschiedene Wärmenetzlösungen. Dazu wird auf die beiden Typgebäude EZFH und MFH zurückgegriffen.

Da die Effizienz der Erzeuger häufig von der Systemtemperatur abhängt, werden die Betrachtungen zum Erzeugertausch zunächst am Durchschnittsgebäude (alle Hüllbauteile sind „durchschnittlich“) getestet, jedoch alternativ auch immer ein saniertes Gebäude (alle Hüllbauteile sind „gut“ oder auf den Standard „best“ saniert) als Alternative betrachtet.

Wird ein Erzeuger ausgetauscht, ist für die Emissionsminderung auch relevant, welcher Energieträger vorher zum Einsatz kam. Daher ergeben sich häufig viele verschiedene Varianten. Sie werden zunächst tabellarisch, am Ende des Kapitels auch grafisch ausgewertet.

Wenn absehbar ist, dass sich gänzlich andere Aussagen ergeben, wenn auch andere Merkmale abweichen – insbesondere das Vorhandensein vor Zusatzerzeugern wie Solarthermie oder Photovoltaik – wird dieser Fall gesondert untersucht. Dies erfolgt allerdings separat im Anhang 3.4.

Es wird darauf verzichtet, nur selten vorkommenden Konstellationen von Baukörper/Technik-Ausstattung zu besprechen, beispielsweise „Wärmenetzanschlüsse“ im Ein- und Zweifamilienhaus.

Bei allen Wärmeerzeugerwechseln werden grundsätzlich zwei Fälle unterschieden: die Maßnahme erfolgt, weil sie ohnehin geplant war (im Sanierungszyklus) oder sie wird anlasslos durchgeführt. Im ersten Fall sind die Mehrkosten relevant – über das ohnehin geplante Maß hinaus. Im zweiten Fall zählen die Vollkosten.

Das Gutachten beschränkt sich auf den wirtschaftlichen Aspekt und den Aspekt der Emissionsminderung, welche aus der Energieverbrauchsminderung resultiert. Weitere Vorteile – Betriebssicherheit, Bedienkomfort usw. sind ebenfalls für die Praxis relevant, werden jedoch nicht vertieft.

Information vorab: aufgrund der derzeitigen Energieträgerbepreisung erweisen sich fast alle Systemwechsel (z. B. Wärmepumpe statt Gaskessel) als unwirtschaftlich bzw. benötigen Investitionskostenzuschüsse, die die Investitionskosten überschreiten. Die Ergebnisse für eine alternative Bepreisung – welche die Gutachter für geeigneter halten – finden sich in Anhang 3.9.5.

3.3.1 Wärmepumpe

Der Wärmepumpenmarkt ist einer der am stärksten wachsenden Erzeugermärkte für die Gebäudebeheizung und Trinkwassererwärmung. Obwohl die heute feststellbaren Anteile am Gesamterzeugerbestand mit etwa 5 % noch gering sind, hat im Neubau schon fast jede dritte Wohneinheit eine Wärmepumpe vgl. Anhang 5.6.

Der KfW-Monitoringbericht 2017 [15] wertet den Einsatz von Wärmepumpen im Effizienzhaus aus. Je besser das EH-Niveau, desto häufiger ist eine Wärmepumpe anzutreffen: beim Effizienzhaus 55 und 70 haben fast 50 % aller Förderfälle eine Wärmepumpe (erhalten), beim Effizienzhaus 115 nur 12 %.

Nachfolgend werden zunächst Praxisergebnisse aus der Literatur vorgestellt und anschließend an den Beispielsgebäuden beispielhafte Ergebnisse für die Umrüstung auf eine Wärmepumpe vorgestellt. Auf eine vertiefte Beschäftigung mit Hintergrundinformationen, z. B. dem Wärmepumpenprinzip, den historischen Rückblick, Markt- und Kostenentwicklung, Kurzabriss der Branchenentwicklung, Marktakteure und Technologieentwicklung wird verzichtet. Diese Fakten sind sehr komprimiert dem Statusbericht von Wetzel et al. zu entnehmen [203].

Reale Effizienzen

Aus Effizienzmessungen im Feld lassen sich Jahresarbeitszahlen ableiten. Es müssen die aufgewendeten elektrischen Energien und die erzeugten Wärmemengen Verhältnis gesetzt werden. Dabei gibt es diverse Varianten, einen eindeutigen Bilanzkreis festzulegen (mit oder ohne Pufferspeicherverluste, mit oder ohne Einbezug von Hilfsaggregaten und Pumpen, mit oder ohne elektrische Spitzenlasterzeugung). Eine ausführliche Beschreibung liefert die Feldstudie von Miara et al. aus dem Jahr 2011 [204].

Allerdings basieren diese Überlegungen alle auf der Annahme, dass die Energiemengen überhaupt gemessen werden. Die Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz stellt in ihrer Verbraucherbefragung 2019 unter mehr als 750 Teilnehmern jedoch Folgendes fest [205]:

> *„Die Ergebnisse der Umfrage zeigen, dass auf der einen Seite eine hohe Zufriedenheit mit der Wärmepumpe unter den Hausbesitzern besteht. Andererseits ist ein deutliches Defizit in der Kenntnis der Verbräuche und Kosten sowie der wichtigsten Kennzahlen zur Bewertung der Effizienz einer Wärmepumpe festzustellen. Die Zufriedenheit mit der Wärmepumpe im Hinblick auf Heizkosten, Bedienbarkeit, Wärmekomfort und Wartungsaufwand liegt bei allen vier Kriterien zwischen 85 und 94 Prozent und wird unterstrichen von einer Weiterempfehlungsrate von 91 Prozent.*
>
> *Dieses Ergebnis fällt so positiv aus, obwohl bei jeweils einem knappen Viertel der Haushalte die Wärmepumpe schon einmal ausgefallen war oder bereits eine Reparatur oder ein Austausch einzelner Bauteile vorgenommen werden musste. Auch der Stromverbrauch ist bei einem knappen Drittel der Befragten höher als erwartet. Offensichtlich besteht eine deutliche Akzeptanz dieser Nachteile, so dass kein merklicher Einfluss auf die hohe Zufriedenheit festzustellen ist.*
>
> *Die Hauptmotive für den Kauf einer Wärmepumpe sind Umweltschutz (72 %) und Wirtschaftlichkeit (71 %). Trotzdem kann die knappe Hälfte der Teilnehmer den jährlichen Stromverbrauch der Wärmepumpe (42 %) und die Stromkosten (49 %) nicht benennen.*
> *[…]*
> *Zur Berechnung der Jahresarbeitszahl sind ein gesonderter Strom- und ein Wärmemengenzähler erforderlich. Weniger als ein Viertel der Befragten bestätigt, dass ein Wärmemengenzähler eingebaut ist und liest diesen auch mindestens einmal im Jahr ab. Außerdem hat sich gezeigt, dass nur 31 Prozent der Befragten überhaupt wissen, was die Jahresarbeitszahl ist – und nur weniger als zehn Prozent der Befragten kontrollieren diese auch regelmäßig.*
>
> *Dieses Ergebnis zeigt, dass hier umfassender Aufklärungsbedarf besteht. Jeder Wärmepumpenbesitzer sollte dazu angehalten werden, die Effizienz seiner Wärmepumpenanlage zu kontrollieren.*
> *[…]*
> *Ein großes Ziel in Bezug auf die Wärmepumpen-Heizung ist die Stärkung der Verbraucherinnen und Verbraucher durch Aufklärung, um das Bauchgefühl in Fakten und Wissen umzuwandeln.“*

Von den mehr als 750 Wärmepumpenprojekten verfügen nur 27 der Endnutzer über (plausible) Daten, um die Jahresarbeitszahl überhaupt zu bestimmen. Es ergeben sich (je zur Hälfte Bestand und Neubau) folgende Jahresarbeitszahlen [205]:

- Erdreichwärmepumpen mit Sonde: 3,7
- Erdreichwärmepumpen mit Erdkollektor: 3,3
- Grundwasserwärmepumpe 3,2
- Außenluftwärmepumpe 2,6

Die Werte streuen zwischen 1,2 und 4,5.

Die lokale Agenda 21 Gruppe Lahr hat 2008 die Feldergebnisse für 33 Wärmepumpen veröffentlicht [206]:

- Erdreichwärmepumpen: 3,30 - 3,38
- Grundwasserwärmepumpe 3,00 - 3,40
- Außenluftwärmepumpe: 2,30 - 2,83

Das Fraunhofer ISE hat in drei Monitoring-Projekten insgesamt mehr als 230 Wärmepumpen untersucht (teils im Bestand, teils im Neubau). Ausgewertet wurde die Gesamtarbeitszahl (incl. Antriebsenergie für Solarkreispumpe oder Ventilator sowie elektrischem Heizstab). Es zeigen sich folgende Ergebnisse mit großen Bandbreiten [53] [204]:

- Erdreichwärmepumpe: 2,2 - 4,3 (Bestand) 3,0 - 5,4 (Neubau)
- Außenluftwärmepump: 2,1 - 3,3 (Bestand) 2,3 - 4,2 (Neubau)

Verfolgt man die Praxismessungen an Jahresarbeitszahlen, ergibt sich im Verlaufe der Zeit eine Verbesserung. So veröffentlichen Born et al. in ihrer Wärmepumpenstudie [207] rückblickend Werte von 2,7 bis 3,5 für das Jahr 2006, aber bereits sechs Jahre später Jahresarbeitszahlen von 3,0 bis 3,8 (jeweils Außenluft … Erdreichwärmepumpe). Hauptgrund für die Verbesserung ist die bessere Geräteeffizienz. Die Autoren nennen einen über die Jahre einigermaßen konstanten Umrechnungsfaktor von 0,77 (Außenluft) bzw. 0,81 (Erdreich) zwischen der Prüfstandsmessung (COP) und der realen typischen Arbeitszahl.

Fehlerpotential und Qualitätssicherung

Die Befragung der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz aus dem Jahr 2019 liefert die Erkenntnis, dass etwa 60 % der Wärmepumpen fehlerfrei laufen und dass Lärm kein nennenswerter Beschwerdegrund ist [205]. Die Forscher des Fraunhofer ISE stellen im Abgleich zweier Wärmepumpenstudien von 2011 [204] und 2020 [208] fest, dass die Störfälle und Fehler seltener wurden. Sie führen dies auf Effekte der Qualitätssicherung zurück.

Die Ergebnisse einer detaillierten Umfrage unter Sachverständigen von Simon et al. liefert typische Fehlerquellen und Mängel, Hinweise zu deren Beseitigung und damit einhergehenden Kosten [209].

Dennoch sind technische Probleme deutlich zahlreicher als bei Heizungskesseln.

Cali et al. berichten 2016 in der Dokumentation für das BMWi-Projekt eneff:Stadt von diversen Problemen [210]. Unter anderem führte das Software-Update eines Wärmepumpenherstellers dazu, dass die Monatsarbeitszahl von 3,0 auf 3,5 stieg. Eine Abluftwärmepumpe erreichte zunächst nur Arbeitszahlen von 1,1 – nach Behebung des Installationsfehlers stieg der Wert auf 1,9 (nicht bestimmungsgemäß). Eine Außenluftwärmepumpe musste während des Feldversuchs zweimal getauscht werden.

Als Problempunkte fehlender Qualitätssicherung stellt das Fraunhofer ISE fest [53]:

> *„Weiterhin konnte beim Einsatz von Kombispeichern mehrmals die nicht exakte Trennung des Wärmepumpenbetriebs in Trinkwarmwasser- und Heizmodus festgestellt werden. Falsch platzierte Temperatursensoren und schlecht gewählte Regelparameter führten dazu, dass die Wärmepumpe für einen Teil des Heizwärmebedarfs Energie auf dem Temperaturniveau des Trinkwarmwassers (in den Neubauten!) bereitgestellt hat. Defekte Rückschlagklappen oder undichte 3-Wege-Ventile führten in mehreren Fällen zu Fehlbeladungen bzw. Speicherentladungen. Diese Effekte wurden durch unnötigen Betrieb von Pumpen noch verstärkt. Allgemein konnte festgestellt werden, dass einfache hydraulische Systeme robuster und daher weniger fehleranfällig sind.“*

Die qualitätsgesicherte Planung muss auch die Frage beantworten, wo die abgekühlte Abluft ausgelassen wird. Ein Nachbar muss hier nicht alles tolerieren [211].

Der Einfluss der Qualitätssicherung betrifft also einerseits die Betriebssicherheit, Störgeräusche und andere nicht energetisch relevante Aspekte. Hauptsächlich ist die Qualitätssicherung aber auch effizienzbeeinflussend.

Aus dem Betriebstest in der Wohnungswirtschaft leiten Orthjohann und Streckenberg 2015 einen Einfluss der Qualitätssicherung von 54 % auf die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe ab. Der „übliche Pool“ von Anlagen (hier 11 Stück) weist eine Arbeitszahl von 2,21 auf, die qualitätsgesicherten Anlagen (hier 2 Stück) erreichen 3,41 [130]. Wegen des geringen Stichprobenumfangs ist diese Aussage nicht unmittelbar auf den Gesamtbestand hochzurechnen, aber der Trend bestätigt die auch für Holzkessel und Solarthermie gefundenen Ergebnisse.

So sehen die Autoren dieses Gutachtens es als sinnvoll an, ebenso wie bei anderen Erzeugern eine Unterscheidung bei der Berechnung vorzunehmen: mit und ohne Qualitätssicherung.

Die EnSanMV [29] definiert wie bislang das BAFA Mindesteffizienzen, die nur rechnerisch im Zusammenhang mit der Förderung nachgewiesen werden müssen (Erdreich 3,8 – Außenluft 3,5 – keine Abhängigkeit von der Art des Heizsystems und vom Vorhandensein einer Trinkwassererwärmung). Es werden zwar Zähler vorgeschrieben, die der Effizienzmessung dienen können, jedoch ist keine Abhängigkeit der Förderung vom erzielten Ergebnis gegeben.

Die in Förderprogrammen oder den Bewertungsnormen für das EEWärmeG/GEG anvisierten Jahresarbeitszahlen werden nach Ansicht der Gutachter und im Abgleich mit den Feldergebnissen nicht erreicht, auch wenn dies mit Qualitätssicherung möglich wäre. E s kann überlegt werden, ob die zukünftige Förderung mit Boni oder Mali an einen Erfolgsnachweis gekoppelt wird.

Theoretische Effizienzen in Makrostudien

Die Streubreite der Annahmen zu Wärmepumpeneffizienzen ist sehr groß. Die best-case und worst-case-Szenarien der verschiedenen Forscher unterscheiden sich fast um den Faktor 2. Solche Abweichungen sind selbstverständlich deutlich ergebnisbeeinflussend. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien hier genannt:

Bettgenhäuser und Boermans verwenden 2011 typische Jahresarbeitszahlen aus Feldtests [212]. Dieser Logik schließen sich die Autoren des vorliegenden Gutachtens an.

Diefenbach et al. nutzen in der Studie zum „Zielerreichungsszenario 2010“ einheitlich für alle Wärmepumpen und Anwendungen den Wert 3,0 [6], in einer späteren Studie zur „Energieversorgungsstruktur für den Wohngebäudesektor“ nur noch 2,5 [57]. Diese Werte erscheinen den Gutachtern zu gering, v. a., weil sie in der Konsequenz dafür sprechen, Wärmepumpen in begrenzterem Umfang einzusetzen bzw. einen deutlich größeren notwendigen Ausbau der Primärstromquellen (PV, Windkraft) rechnerisch erfordern.

Nitsch et al. verwenden für Kleinanlagen (brennwertbezogene) Nutzungsgrade von 81 % (Gas) bzw. 80 % (Öl) in ihrer „Leitstudie 2010“ für das BMU [213].

Die Verfasser der DENA Leitstudie zur integrierten Energiewende verwenden pauschale Effizienzen für die Gesamtanlagentechnik (incl. aller Speicher- und Netzverluste) einheitlich für Heizung und Trinkwarmwasser und unabhängig von der Gebäudegröße. Für ein System mit Erdreich-Wärmepumpe im Neubau liegt der Wert bei 4,0, für die Außenluftwärmepumpe im Bestand bei 3,33 [67]. Diesen Ansatz sehen die Gutachter als deutlich zu günstig an; insbesondere für die Trinkwassererwärmung – v. a. da die Werte bereits alle Verluste innerhalb des Gebäudes mit enthalten.

Bewertung der Wärmepumpen in den Typgebäuden

Die Jahresarbeitszahlen werden im Rahmen der Berechnungen zu diesem Gutachten abhängig von der Vorlauftemperatur bestimmt. Dieses Vorgehen wird auch in anderen Studien verfolgt, z. B. [128].

Für Erdreichwärmepumpen werden in diesem Gutachten als Hilfsgröße exergetische Nutzungsgrade festgelegt. Der Effekt einer Qualitätssicherung wird positiv berücksichtigt.

- mit Qualitätssicherung: $\zeta_{ex} = 0{,}39$
- ohne Qualitätssicherung: $\zeta_{ex} = 0{,}34$

Für ein teilsaniertes Gebäude im Bestand mit einer Vorlauftemperatur am kältesten Tag von 55°C und Betrieb mit Heizkörpern ergibt sich daraus beispielsweise eine Jahresarbeitszahl von 3,38 (mit Qualitätssicherung) bzw. 2,95 (ohne Qualitätssicherung). Im Trinkwarmwasserbetrieb liegt der Wert bei 2,46 bzw. 2,41.

Die Werte für Außenluftwärmepumpen lauten:

- mit Qualitätssicherung: $\zeta_{ex} = 0{,}35$
- ohne Qualitätssicherung: $\zeta_{ex} = 0{,}30$

Für ein gut saniertes Gebäude im Bestand mit einer Vorlauftemperatur am kältesten Tag von 40°C und Betrieb mit Flächenheizung ergibt sich daraus eine Jahresarbeitszahl von 3,40 (mit Qualitätssicherung) bzw. 2,92 (ohne Qualitätssicherung). Im Trinkwarmwasserbetrieb liegt der Wert bei 2,03 bzw. 1,76.
Die Außenluftwärmepumpen werden mit einer elektrischen Ergänzungsheizung berechnet. Das weitere Berechnungsverfahren ist, da es vergleichsweise umfangreich ist, im Anhang 6.1.5 beschrieben.

Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-NT-Kessel

Eine ohnehin notwendige Investition könnte eintreten, wenn ein abgängiger Niedertemperaturkessel ersetzt wird, siehe Abbildung 65. Es sind die Mehrkosten relevant, die über den ohnehin zu kaufenden Kessel anfallen. Die Maßnahme wird in einem durchschnittlichen Bestand untersucht sowie in einem gut sanierten Gebäude, beginnend mit der Erdreichwärmepumpe.

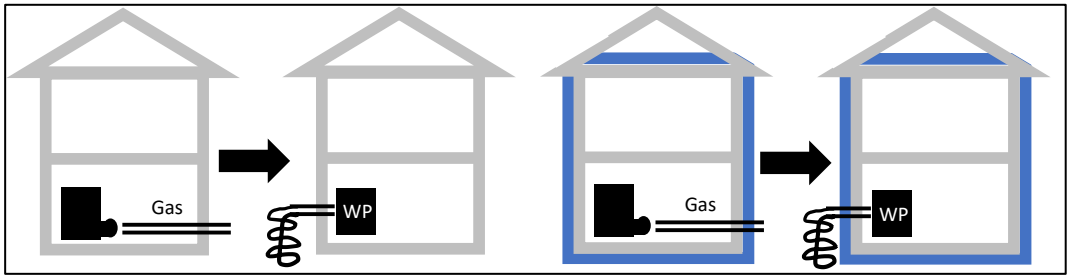


Abbildung 65 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-NT-Kessel [eigene Darstellung]

Tabelle 68 zeigt die Ergebnisse für die Erdreichwärmepumpe als Ersatz für einen Gaskessel. Alle Ergebnisse sind günstiger als bei Ersatz eines noch intakten Brennwertkessels. Die erzielbaren Emissionsminderungen sind höher und die anzusetzenden Kosten geringer. Für den Fall des EZFH mit gutem Standard ergibt sich dennoch ein notwendiger Investitionskostenzuschuss von 76 %, was recht hoch ist. Alle anderen Varianten sind schlechter.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Ersatz eines Gas-NT-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude*		…im „guten“ Gebäude	
* Beispiel wird im Anhang 3.5.1 fortgeführt, dort siehe Tabelle 104						
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	117	79	58	36
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,80	0,80	0,80	0,80
	nachher	-	3,00	2,95	3,25	2,98
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	176	152	102	98
	nachher	kWh/(m²a)	48	41	26	27
Investition	Mehrkosten	T€	25,6	60,0	15,0	41,9
Emissionsminderung, Wärme		%	-42	-42	-47	-42
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	771	640	686	680
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1673	3973	895	2737
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	96	105	76	101
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	766	641	633	673

Tabelle 68 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz eines Gas-NT-Kessels auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die Alternative Investition ist eine Außenluftwärmepumpe, schematisch siehe Abbildung 66.

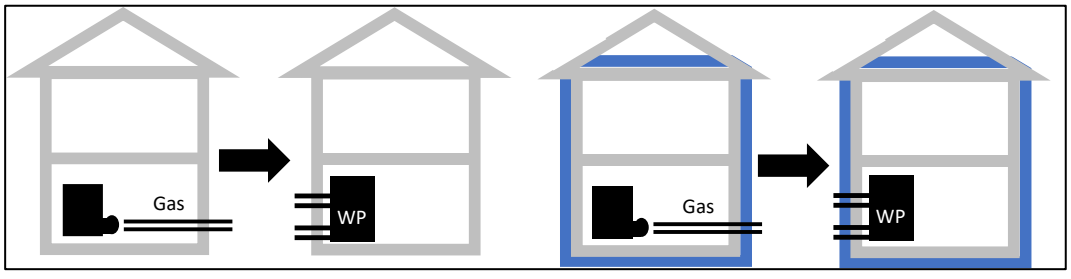


Abbildung 66 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-NT-Kessel [eigene Darstellung]

Tabelle 69 zeigt, dass auch bei Verwendung einer Außenluftwärmepumpe die Ergebnisse ähnlich ausfallen. Die Wirtschaftlichkeit im Bestandsgebäude ist jedoch schlechter als bei der Erdreichwärmepumpe, im sanierten Gebäude ist sie besser als die Erdreichwärmepumpe. Die notwendigen Investitionskostenzuschüsse sind allerdings wieder sehr hoch, da der Energieträger Strom teuer ist (selbst unter Verwendung des Wärmepumpentarifs).

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Ersatz eines Gas-NT-Kessels durch eine Außenluftwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		…im „guten“ Gebäude	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	117	79	58	36
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,80	0,80	0,80	0,80
	nachher	-	2,40	2,37	2,57	2,39
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	176	152	102	98
	nachher	kWh/(m²a)	59	52	32	33
Investition	Mehrkosten	T€	11,1	21,4	6,2	15,9
Emissionsminderung, Wärme		%	-28	-27	-33	-28
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	485	331	198	675
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1056	2406	511	1655
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	109	138	72	125
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	729	590	517	612

Tabelle 69 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz eines Gas-NT-Kessels auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zur Änderung der Haupterzeuger und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7. Ein Teil der Varianten mit Photovoltaik, wird entsprechend im Anhang „Zusatzerzeuger“ fortgeführt. Die sich daraus ergebende Zusammenfassung ist in Anhang 3.5.4 zu finden.

Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-Brennwertkessel

Die anlasslose Investition könnte eintreten, wenn ein an sich intakter Brennwertkessel, der noch viele Lebensjahre vor sich hätten, vorzeitig ersetzt wird. Es sind die Vollkosten relevant. Wieder werden das durchschnittliche Gebäude sowie das gut sanierte Gebäude untersucht, siehe Abbildung 67.

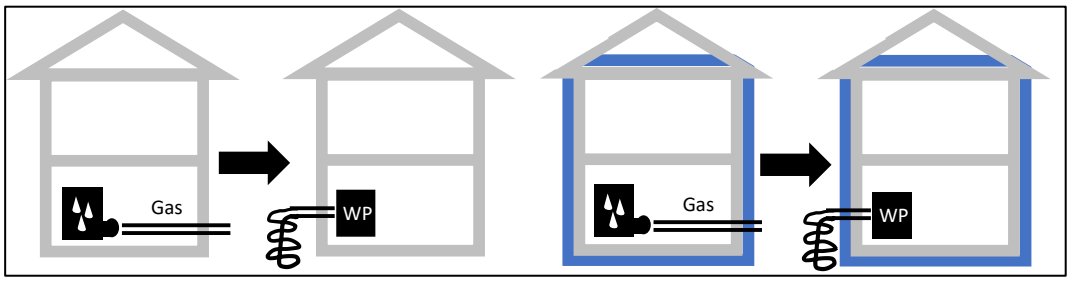


Abbildung 67 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Tabelle 70 zeigt die Bewertung der Ersatzmaßnahme für die zwei unterschiedlichen Baustandards. Es ist erkennbar, dass die Arbeitszahlen wegen der geringeren Temperaturen im sanierten Gebäude deutlich besser ausfallen. Die Emissionsminderung liegt näherungsweise in allen Varianten bei etwa 35 %.

In dieser Konstellation: Vollkosten und bereits installierter Brennwertkessel ist der äquivalente CO_2-Preis sehr hoch. Zudem wird der vergleichsweise emissionsarme Energieträger Erdgas ersetzt. Die Maßnahme führt zu höheren laufenden Energiekosten als der Betrieb vorher, deshalb müsste sie mit einem Investitionskostenzuschuss kombiniert werden, der höher als die eigentliche Investition ist.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Ersatz eines Gas-Brennwert-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		…im „guten“ Gebäude	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	117	79	58	36
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,93	0,93	0,93	0,93
	nachher	-	3,00	2,95	3,25	2,98
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	151	131	88	84
	nachher	kWh/(m²a)	48	41	26	27
Investition	Vollkosten	T€	33,0	72,0	22,4	51,3
Emissionsminderung, Wärme		%	-33	-32	-38	-33
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	1190	921	1185	993
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1936	4399	1221	3064
notw. Investitionskostenzuschuss		%	111	116	104	113
notw. zusätzlicher Emissionspreis		€/t	1326	1067	1232	1125

Tabelle 70 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz eines Gas-Brennwertkessels auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die Alternative Investition ist eine Außenluftwärmepumpe, schematisch siehe Abbildung 68. Wird sie eingesetzt, sinken die Emissionen deutlich weniger. Sie ist deutlich ineffizienter als eine Erdreichwärmepumpe.

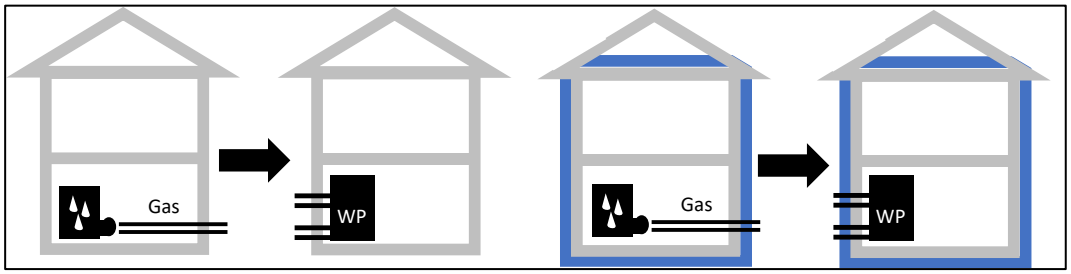


Abbildung 68 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Ersatz eines Gas-Brennwert-Kessels durch eine Außenluftwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		…im „guten“ Gebäude*	
* Beispiel wird im Anhang 3.5.1 fortgeführt, dort siehe Tabelle 105						
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	117	79	58	36
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,93	0,93	0,93	0,93
	nachher	-	2,40	2,37	2,57	2,39
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	151	131	88	84
	nachher	kWh/(m²a)	59	52	32	33
Investition	Vollkosten	T€	18,5	33,4	13,6	25,3
Emissionsminderung, Wärme		%	-16	-16	-22	-16
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	1337	872	1250	974
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1532	3398	966	2361
notw. Investitionskostenzuschuss		%	158	195	136	178
notw. zusätzlicher Emissionspreis		€/t	2115	1700	1700	1737

Tabelle 71 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz eines Gas-Brennwertkessels auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Es ergeben sich jeweils keine wirtschaftlichen Randdaten. Alle Varianten führen zu Fehlbeträgen bei den Jahreskosten. Ein Ausgleich wäre nur durch sehr hohe Investitionskostenzuschüsse auszugleichen, siehe Tabelle 71. Die Werte betragen jeweils mehr als 100 %, was sich daraus ergibt, dass die Energiekosten nicht sinken und ebenfalls subventioniert werden müssen. Im guten Gebäude sehen die Werte kaum besser aus als im Altbau.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zur Änderung der Haupterzeuger und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7. Ein Teil der Varianten mit Photovoltaik, wird entsprechend im Anhang „Zusatzerzeuger" fortgeführt. Die sich daraus ergebende Zusammenfassung ist in Anhang 3.5.4 zu finden.

Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-NT-Kessel

Die Untersuchung wird analog auf den Energieträger Erdgas übertragen. Eine ohnehin notwendige Investition könnte eintreten, wenn ein abgängiger Niedertemperaturkessel ersetzt wird, siehe Abbildung 69. Es sind die Mehrkosten relevant, die über den ohnehin zu kaufenden Kessel anfallen. Die Maßnahme wird an einem durchschnittlichen Bestand untersucht sowie in einem gut sanierten Gebäude, beginnend mit der Erdreichwärmepumpe.

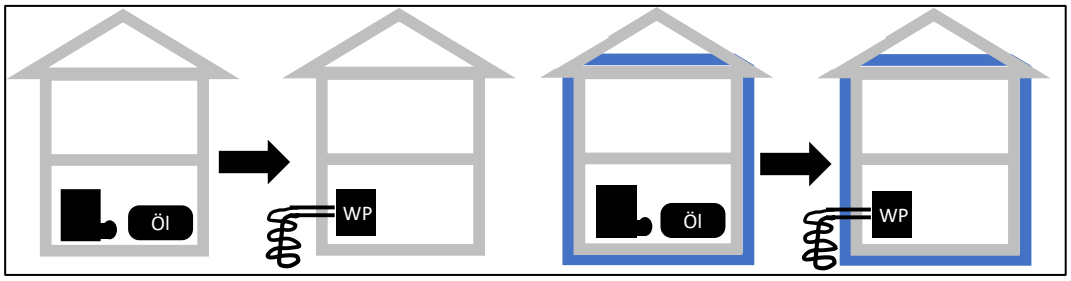


Abbildung 69 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-NT-Kessel [eigene Darstellung]

Tabelle 72 zeigt die Ergebnisse für den Öl-NT-Kessel als Ausgangserzeuger. Alle Energiemengen und Erzeugereffizienzen sind identisch wie bei dem Gas-NT-Kessel. Sie wurden daher weggelassen. Bis auf die etwas besseren Kennwerte für die Emissionsminderung ist diese Variante ähnlich unwirtschaftlich.

Der äquivalente CO_2-Preis ist allerdings sehr gering – auf dem Niveau einiger Dämmmaßnahmen. Und die Auswertung der Wirtschaftlichkeitsbewertung zeigt, dass eine überschaubare Preiserhöhung der Energieträger zu einer Grenzwirtschaftlichkeit führt. Hier wären es etwa Verdopplungen der Energiepreise.

		EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung					
Ersatz eines Öl-NT-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)		…im Ø-Gebäude		…im „guten" Gebäude	
Ergebnisse					
Emissionsminderung, Wärme	%	-59	-58	-62	-59
Äquivalenter CO_2-Preis	€/t	394	325	369	348
Dateninterpretation					
Jahreskosten, Fehlbetrag	€/a	1673	3973	895	2737
notwendiger Investitionskostenzuschuss	%	96	105	76	101
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	€/t	391	326	340	345

Tabelle 72 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz eines Öl-NT-Kessels auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die Alternative Investition ist eine Außenluftwärmepumpe, schematisch siehe Abbildung 70.

Tabelle 73 zeigt die Ergebnisse für den Öl-NT-Kessel als Ausgangserzeuger. Alle Energiemengen und Erzeugereffizienzen sind identisch wie bei dem Gas-NT-Kessel. Sie wurden daher weggelassen. Bis auf die etwas besseren Kennwerte für die Emissionsminderung ist diese Variante ähnlich unwirtschaftlich.

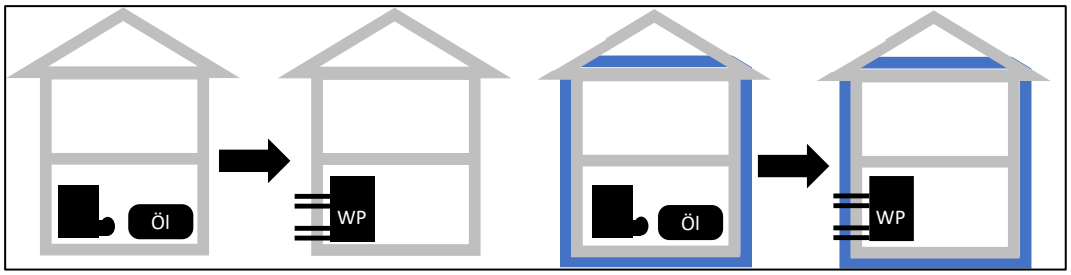


Abbildung 70 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-NT-Kessel [eigene Darstellung]

Der äquivalente CO_2-Preis ist wieder sehr gering – auf dem Niveau einiger Dämmmaßnahmen. Und die Auswertung der Wirtschaftlichkeitsbewertung zeigt, dass eine überschaubare Preiserhöhung der Energieträger zu einer Grenzwirtschaftlichkeit führt. Hier wären es etwa 50 % höhere Energiepreise für Gas und Öl.

		EZFH	MFH*	EZFH	MFH
* Beispiel wird im Anhang 3.5.1 fortgeführt, dort siehe Tabelle 102					
Maßnahmenbeschreibung					
Ersatz eines Öl-NT-Kessels durch eine Außenluftwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)		…im Ø-Gebäude		…im „guten“ Gebäude	
Ergebnisse					
Emissionsminderung, Wärme	%	-49	-48	-52	-49
Äquivalenter CO_2-Preis	€/t	198	134	151	153
Dateninterpretation					
Jahreskosten, Fehlbetrag	€/a	1056	2406	511	1655
notwendiger Investitionskostenzuschuss	%	109	138	72	125
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	€/t	298	239	231	151

Tabelle 73 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz eines Öl-NT-Kessels auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Das Beispiel wird mit einer Photovoltaikanlage kombiniert weitergeführt. Dort zeigt sich eine nennenswerte Verbesserung, da der nutzbare PV-Strom einerseits (rechnerisch) emissionsfrei produziert wird und auch mit Gestehungskosten von unter 10 Cent/kWh deutlich günstiger ist.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zur Änderung der Haupterzeuger und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7. Ein Teil der Varianten mit Photovoltaik, wird entsprechend im Anhang „Zusatzerzeuger“ fortgeführt. Die sich daraus ergebende Zusammenfassung ist in Anhang 3.5.4 zu finden.

Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-Brennwertkessel

Auch der Brennwertkessel wird im Anschluss untersucht. Die anlasslose Investition könnte eintreten, wenn ein an sich intakter Brennwertkessel ersetzt wird. Es sind die Vollkosten relevant. Wieder werden das durchschnittliche Gebäude sowie das gut sanierte Gebäude untersucht, siehe Abbildung 71.

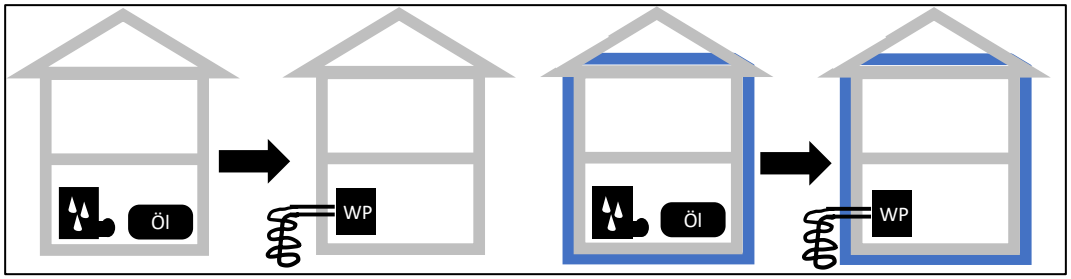


Abbildung 71 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Tabelle 74 zeigt die Ergebnisse für den Ölbrennwertkessel als Ausgangserzeuger. Alle Energiemengen und Erzeugereffizienzen sind identisch wie bei dem Gas-Brennwertkessel. Sie wurden daher weggelassen. Lediglich die von der Emission abhängenden Werte sind dargestellt.

Die Emissionen können um etwa 55 % vermindert werden. Allerdings ist die Wirtschaftlichkeitsbewertung genauso schlecht wie bei dem Gasbrennwertkessel. Diese Maßnahme ist ebenfalls als Einzelmaßnahme nicht wirtschaftlich interessant. Sie wird mit Photovoltaik exemplarisch für das „gute“ Gebäude weitergeführt und verbessert sich dann deutlich.

		EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung					
Ersatz eines Öl-Brennwert-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)		…im Ø-Gebäude		…im „guten“ Gebäude*	
* Beispiel wird im Anhang 3.5.1 fortgeführt, dort siehe Tabelle 103					
Ergebnisse					
Emissionsminderung, Wärme	%	-52	-52	-56	-52
Äquivalenter CO_2-Preis	€/t	533	409	576	446
Dateninterpretation					
Jahreskosten, Fehlbetrag	€/a	1936	4399	1221	3064
notwendiger Investitionskostenzuschuss	%	111	116	104	113
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	€/t	594	474	506	471

Tabelle 74 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz eines Öl-Brennwertkessels auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die Alternative Investition ist eine Außenluftwärmepumpe, schematisch siehe Abbildung 72.

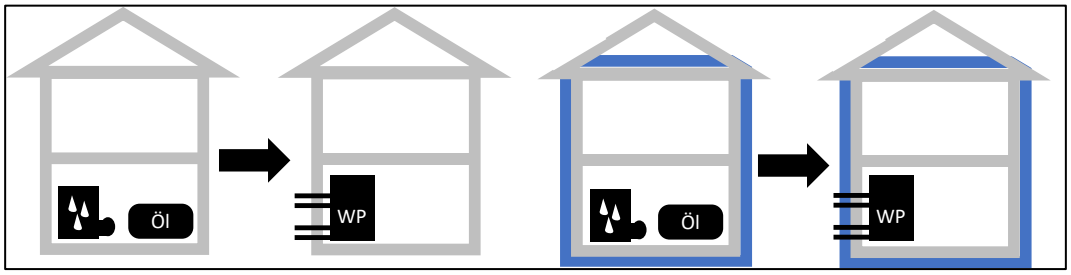


Abbildung 72 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Tabelle 75 zeigt die Ergebnisse für den Ölbrennwertkessel als Ausgangserzeuger. Alle Energiemengen und Erzeugereffizienzen sind identisch wie bei dem Gas-Brennwertkessel. Sie wurden daher weggelassen. Bis auf die etwas besseren Kennwerte für die Emissionsminderung ist diese Variante ähnlich unwirtschaftlich. Allerdings sind die äquivalenten CO_2-Preise sehr gering – sie liegen deutlich im Bereich der baulichen Maßnahmen.

		EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung					
Ersatz eines Öl-Brennwert-Kessels durch eine Außenluftwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)		…im Ø-Gebäude		…im „guten“ Gebäude	
Ergebnisse					
Emissionsminderung, Wärme	%	-40	-40	-44	-40
Äquivalenter CO_2-Preis	€/t	384	244	439	282
Dateninterpretation					
Jahreskosten, Fehlbetrag	€/a	1532	3398	966	2361
notwendiger Investitionskostenzuschuss	%	158	195	136	178
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	€/t	607	475	597	503

Tabelle 75 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz eines Öl-Brennwertkessels auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zur Änderung der Haupterzeuger und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7. Ein Teil der Varianten mit Photovoltaik, wird entsprechend im Anhang „Zusatzerzeuger“ fortgeführt. Die sich daraus ergebende Zusammenfassung ist in Anhang 3.5.4 zu finden.

Wärmepumpen als Ersatz für einen Fernwärmenetzanschluss

Der letzte Ausgangszustand, der untersucht wird, ist der Fernwärmeanschluss, siehe Abbildung 73. Es werden die Vollkosten untersucht, da kaum davon abzugehen ist, dass ein nennenswerter Ersatz notwendig wird.

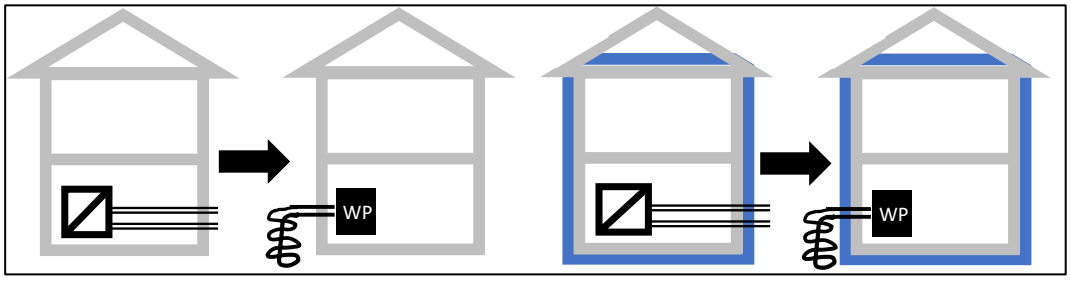


Abbildung 73 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Fernwärmeanschluss [eigene Darstellung]

Tabelle 76 zeigt die Ergebnisse für die Fernwärme. Hinsichtlich der Emissionsminderung ist die mit Erdgas vergleichbar. Die Wirtschaftlichkeitsbewertung ist deutlich besser als bei Erdgas oder Heizöl, weil der Ausgangswert der Kosten höher ist. Erstmalig liegen die Investitionskostenzuschüsse unterhalb der eigentlichen Investitionssumme, allerdings mit etwa 80 % sehr hoch.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Ersatz eines Fernwärmeanschlusses durch eine Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude*		…im „guten“ Gebäude	
* Beispiel wird im Anhang 3.5.1 fortgeführt, dort siehe Tabelle 106						
Detailkennwerte der Bilanz						
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,99	0,99	0,99	0,99
	nachher	-	3,00	2,95	3,25	2,98
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	142	123	83	79
	nachher	kWh/(m²a)	48	41	26	27
Emissionsminderung, Wärme		%	-38	-38	-43	-38
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	947	731	972	791
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1410	2891	915	2090
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	81	76	78	77
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	796	556	756	612

Tabelle 76 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz für Fernwärme auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die Alternative Investition ist eine Außenluftwärmepumpe, schematisch siehe Abbildung 74.

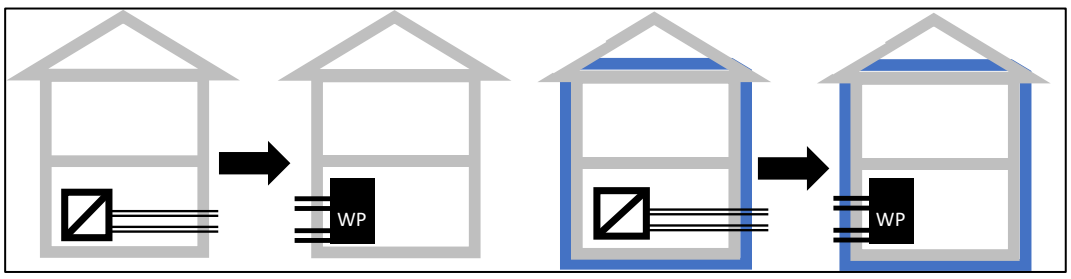


Abbildung 74 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Fernwärmeanschluss [eigene Darstellung]

Wird ein Fernwärmeanschluss durch eine Außenluftwärmepumpe ersetzt, ergeben sich etwas bessere Ergebnisse. Jedoch sind sie schlechter als bei der Erdreichwärmepumpe, insbesondere was den notwendigen Investitionskostenzuschuss angeht, siehe Tabelle 77.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Ersatz eines Fernwärmeanschlusses durch eine Außenluftwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		…im „guten“ Gebäude*	
* Beispiel wird im Anhang 3.5.1 fortgeführt, dort siehe Tabelle 107						
Detailkennwerte der Bilanz						
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,99	0,99	0,99	0,99
	nachher	-	2,40	2,37	2,57	2,39
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	142	123	83	79
	nachher	kWh/(m²a)	59	52	32	33
Emissionsminderung, Wärme		%	-23	-22	-28	-23
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	881	568	903	645
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1006	1890	659	1386
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	104	108	93	105
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	916	615	839	675

Tabelle 77 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz für Fernwärme auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zur Änderung der Haupterzeuger und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7. Ein Teil der Varianten mit Photovoltaik, wird entsprechend im Anhang „Zusatzerzeuger“ fortgeführt. Die sich daraus ergebende Zusammenfassung ist in Anhang 3.5.4 zu finden.

Restriktionen

Eine Wärmepumpe kann nicht im unsanierten Bestand eingesetzt werden. Mit einer Fußbodenheizung könnte die erforderliche Leistungsdichte nicht erreicht werden (die Oberflächentemperaturen würden zu hoch). Werden Heizkörper gewählt bzw. die üblicherweise vorhandenen Heizkörper genutzt, ergeben sich unrealistisch hohe Vorlauftemperaturen. Eine Gebäudemodernisierung senkt die notwendige Vorlauftemperatur in den „wärmepumpentauglichen“ Bereich. Jochum et al. nehmen etwa 55°C (bzw. die Arbeitszahl von 2,0) als Obergrenze an [119].

Viele am Markt verfügbare Wärmepumpen sind in der Lage, Vorlauftemperaturen von 70°C zu liefern [124]. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens gehen daher von 60°C als limitierende Temperatur aus, da auch Trinkwarmwasser mit diesem Temperaturniveau bereitgestellt werden kann, jedoch ist der Einsatz in Gebäuden mit besserem Wärmeschutz eindeutig sinnvoller. In jedem Fall gilt, dass auch eine Teilsanierung bereits reicht, um ein vor der 1. Wärmschutzverordnung errichtetes Gebäude in den wärmepumpentauglichen Temperaturbereich zu führen. Das deckt sich auch mit den Erkenntnissen der neuesten Fraunhofer ISE-Wärmepumpen-Studie von 2020 [208].

Hinweise zu Restriktionen für Wärmepumpen, u. a. die Kältemittel und den Luftschall betreffend, sind in der aktuellen IWU-Studie „Analyse der Energieversorgungsstruktur für den für den Wohngebäudesektor zur Erreichung der Klimaschutzziele 2050“ zu finden [57].

Die Verwendung von Erdreichwärmepumpen im Geschosswohnungsbau ist limitiert durch die verfügbaren Grundstücksgrößen sowie Grenzabstände von Tiefenbohrungen. Dies betrifft die Innenstadtbebauung sowie Hochhäuser gleichermaßen.

Eine weitere Restriktion ist durch die Begrenzungen des Marktes (Verfügbarkeit von Geräten und ausführenden Firmen) gegeben. Jochum et al. [119]. gehen nach Auswertungen von Branchendaten einer Steigerung der jährlich installierten Wärmepumpen aus. Während 2020 Kapazität für maximal 100.000 neue Geräte vorhanden ist, ließe sich der Wert auf maximal 650.000 Geräte/Jahr bis 2050 steigern.

Der Markthochlauf ist der limitierende Faktor für die Wärmepumpenumstellung.

Fazit

Alle Studien zur Energiewende gehen von einer Vervielfachung des Wärmepumpenbestandes aus. Die Gutachter stimmen der nachfolgenden Aussage der aktuellen IWU-Studie zur „Analyse der Energieversorgungsstruktur für den für den Wohngebäudesektor“ zu [57]:

> *„Elektrischen Wärmepumpen kommt vor diesem Hintergrund eine Schlüsselrolle in der zukünftigen Wärmeversorgung zu. Die Wärmepumpen schaffen zunächst einmal die Grundvoraussetzung dafür, dass Windenergie überhaupt effizient zur Wärmeversorgung eingesetzt werden kann. Darüber hinaus ermöglichen sie auch die Nutzung von Photovoltaikstrom und eröffnen daher über das Stromnetz zusätzlich die Möglichkeit, auch diejenigen Gebäude mit Sonnenenergie zu versorgen, die selbst keine für Solaranlagen nutzbaren Dachflächen aufweisen.“*

Hinsichtlich der künftigen Marktdurchdringung sind durchaus geteilte Einschätzungen festzustellen. In der AGORA-Studie von 2018 gehen Mellwig et al. von einer Vervielfachung der installierten Wärmepumpen mit Faktor 3 bis 6 bis 2030 aus [128]. Nitsch et al. gehen in ihrer Leitstudie von 2010 von einer Verzehnfachung der elektrischen Energie für Wärmepumpen bis 2050 aus [213].

Die Autoren können anhand der eigenen Wirtschaftlichkeitsbewertung allerdings Folgendes feststellen:

Die Berechnungen zum Ersatz von Heizkesseln oder Fernwärme durch Wärmepumpen ist durch alle Varianten hinweg unwirtschaftlich – saniertes Gebäude oder durchschnittliches, EZFH oder MFH. Teils ließe sich dies durch einen Investitionskostenzuschuss ausgleichen, der aber fast immer nahe 100 % der Investitionssumme abdecken müsste.

Häufig sind die Energiekosten nachher höher als vorher, so dass selbst bei einer „geschenkten“ Wärmepumpe keine Wirtschaftlichkeit eintritt.

Dieses Ergebnis kann mit dem hohen Strompreis (auch beim Wärmepumpentarif) begründet werden, der gegenüber dem vorherigen Energieträger kaum zu Kostenreduktionen führt. Etwas besser schneidet Fernwärmeersatz ab, jedoch auch kaum wirtschaftlich. In der heute vorhandenen Preisstruktur ist es zielführend, eine Photovoltaikanlage einzubinden, die zumindest teilweise die Strompreise mindert. Alternativ müssen Energieträgerverteuerungen eintreten.

Die sich ergebenden Emissionsvermeidungskosten sind aber in Teilen durchaus mit denen der Dämmmaßnahmen vergleichbar. Aus Sicht der Emissionsvermeidung ist selbstverständlich der Ersatz von Heizöl günstiger, da es emissionsintensiver ist.

Wärmepumpen sind auch mit Anschluss an eine „kalte Nahwärme“ denkbar, vgl. Anhang 3.3.5. Im Rahmen dieses Gutachtens werden dann die gleichen Effizienzen wie bei Erdreichwärmepumpen angesetzt.

3.3.2 Gas- und Ölkessel

Die Mehrzahl der Gebäude in Deutschland ist derzeit mit Kesseln ausgestattet, die einer üblichen Altersstruktur unterliegen (vgl. Anhang 5.6). Im Zuge des Umbaus des Energiesystems müssten diese in der Mehrzahl ersetzt werden durch Erzeuger, die weniger CO_2 emittieren.

Schulze-Darup stellt in seiner Studie „Kostengünstiger und zukunftsfähiger Geschosswohnungsbau im Quartier“ Folgendes fest:

> *„Monovalente Kessel-Lösungen sind neben der Fernwärmeversorgung aus investiver Sicht am kostengünstigsten. Aufgrund der EnEV-/GEG-Anforderungen ist aber ein erneuerbarer Anteil […] einzuplanen, was die Systemlösungen verteuert. Brennwertgeräte haben sich seit den 1990er Jahren für dieses Segment durchgesetzt, werden aber im Zuge der Energiewende aus primärenergetischer Sicht zu einem Problemfall werden. Da sie in der Konsequenz langfristig mit synthetischem erneuerbaren Gas aus dem PtG-Prozess befeuert werden müssen, wird ihre primärenergetische Bewertung in einem erneuerbaren System bei etwa 1,7 liegen und deutlich erhöhte Brennstoffkosten verursachen.*
>
> *Wenn heute kesselbasierte Anlagen gebaut werden, so kann dies bis zum nächsten Erneuerungszyklus in etwa 20 Jahren eine wirtschaftliche Lösung darstellen. Bei der Planung sollte allerdings bedacht werden, welche Versorgungsvariante sich ca. ab dem Jahr 2040 anschließen wird und wie hoch die Kosten für die Umstellung auf solch ein neues System ausfallen werden.“*

Die Gutachter gehen davon aus, dass es ab 2021 zur Verminderung von CO_2-Emissionen und zum Einhalten der Klimaziele künftig keinen 1:1 Austausch von Kesseln mehr geben kann, sondern dass Kessel nur als Hybrid-Lösungen eingesetzt werden. (Die entsprechenden Überlegungen werden weiter unten erläutert)

Unabhängig davon ist selbstverständlich eine Qualitätssicherung auch bei Kesseln oder Hybridlösungen angebracht, um die maximal mögliche Effizienz zu erreichen.

Praxisergebnisse und Qualitätssicherung

In einer Studie zum Betriebsverhalten von Brennwertkesseln haben die Gutachter 60 Brennwertkessel und 7 NT-Kessel im Feld untersucht. Es handelte sich ausnahmslos um Kleinanlagen für Ein- und Zweifamilienhäuser. Die mittleren brennwertbezogenen Jahresnutzungsgrade betragen [194]:

- Brennwertkessel: η_{HS} = 87 %
- Niedertemperaturkessel: η_{HS} = 75 %

Es konnten bei den Brennwertkesseln Einflüsse der Qualitätssicherung und Anlagenkonzeption sichtbar gemacht werden. Für die Brennwertkessel ergaben sich folgende Einflüsse einzelner Merkmale:

• Überströmventil:	mit 85 %	ohne 89 %	
• Kesselaufstellort:	kalt: 87 %	warm: 89 %	
• Solarthermie:	mit 85 %	ohne 87 %	
• Regelung:	witterungsgeführt 87 %	Referenzraum 84 %	beides 87 %
• Heizflächenart:	Heizkörper 86 %	Fußbodenheizung 93 %	beides 87 %

In einer Studie zum hydraulischen Abgleich und der Qualitätssicherung wurden als Nebenergebnisse von den Autoren des vorliegenden Gutachtens auch Nutzungsgrade für Heizkessel bestimmt [23]. Die betrachteten Anlagen sind in allen Gebäudegrößen bis zum mittleren Mehrfamilienhaus installiert.

- Brennwertkessel: η_{HS} = 79 % (16 Anlagen, 78 bis 97 %)
- Niedertemperaturkessel: η_{HS} = 73 % (23 Anlagen, 71 bis 90)

Die Untersuchung von 13 Brennwertkesseln im Zusammenhang von Solarthermie [131] beschränkte sich ausschließlich auf Mehrfamilienhäuser und Quartiere. Nach diesen Zahlen aus dem Jahr 2012 liegen die Messwerte bei η_{HS} = 88 % - mit einer Streuung von 86 bis 94 %.

Der Abrechnungsdienstleister TECHEM veröffentlicht für das Jahr 2018 Jahresnutzungsgrade. Alle Anlagen werden dabei zusammengefasst (NT-Kessel und Brennwert-Kessel). Es wird bei der Auswertung in die Fälle „mit und ohne Betriebsführung“ (Contracting) unterschieden. Folgende Ergebnisse werden ermittelt [104]:

- Erdgas, ohne Betriebsführung: η_{HS} = 77 %
- Heizöl, ohne Betriebsführung: η_{HS} = 71 %
- Erdgas, mit Betriebsführung: η_{HS} = 82 %
- Heizöl, mit Betriebsführung: η_{HS} = 81 %

Als Ursachen der höheren Effizienz werden einerseits die optimierte Betriebsführung genannt, anderseits auch bessere technische Standards (höherer Brennwertkesselanteil in der Stichprobe).

Aus den genannten Werten und Praxiserkenntnissen, die von den Gutachtern ggf. zwecks Vergleichbarkeit auf den Brennwert umgerechnet wurden, leiten sich die typischen Annahmen in diesem Gutachten für die Berechnung ab.

Die Verbraucherzentrale Bundesverband veröffentliche 2011 die Ergebnisse ihrer „Aktion Brennwertcheck“ [135]. Untersucht wurden knapp 1000 Heizkessel unterschiedlichen Baualters. Bei einer typischen winterlichen Außentemperatur wurde die Kondensatbildung bestimmt. Negative Einflüsse hinsichtlich der Kondensatbildung sind u. a. festzustellen bei:

- einer fehlenden Regelung nach der Witterung/Außentemperatur durch einen Außenfühler (-23 %)
- einem fehlenden hydraulischer Abgleich (-18 %), vgl. Anhang 3.6.2
- Heizkörperheizungen oder gemischten Heizungen (-10 %) gegenüber reinen Flächenheizungen
- bei hohem Kesselalter (-2 %/a für jedes Jahr früherem Einbaujahr)

Grinewitschus und Lepper leiten aus einer Stichprobe von knapp 580 Kesseln eine Formel zur pauschalen Abschätzung des Nutzungsgrades ab [146]. Einflüsse sind: die Kesselart (Brennwert, Niedertemperatur), die Art des Brenners (atmosphärisch oder nicht), das Vorhandensein von Warmwasserbereitung, die Leistung und Auslastung. Sie weisen nach, dass die Normwerte der DIN V 4701-10 [214] für Niedertemperatur- und Brennwertkessel in der Praxis nicht erreicht werden. Die Daten anderer Studien werden damit grundsätzlich bestätigt. Eine Angabe für mittlere Nutzungsgrade fehlt, es sind jeweils nur Punktwolken grafisch ausgewertet.

Theoretische Effizienzen in Makrostudien

Da in den meisten Studien zum Umbau des Energiesystems Kessel enthalten sind – um sei es nur für eine Übergangszeit – müssen Nutzungsgrade definiert werden. Liegen sie zu optimistisch, wird die Austauschnotwendigkeit „künstlich“ gering gerechnet. Sind die Annahmen zu gut, werden Emissionsminderungspotentiale des Kesseltausches überschätzt. Einzelne veröffentlichte Werte seien exemplarisch nachfolgend besprochen. Ein Einfluss der Qualitätssicherung ist in keiner Studie berücksichtigt.

Die Verfasser der DENA Leitstudie zur integrierten Energiewende verwenden pauschale Effizienzen für die Gesamtanlagentechnik (incl. aller Speicher- und Netzverluste) einheitlich für Heizung und Trinkwarmwasser und alle Sanierungsstandards. Für ein System mit Erdgas-NT-Kessel im EZFH liegt der Wert bei 76 %, für den Brennwertkessel bei 89 % (jeweils brennwertbezogen); die Werte für das MFH sind marginal schlechter [67]. Der Ansatz für die Niedertemperaturkessel erscheint realistisch. Jedoch den Ansatz für die Brennwertkessel sehen die Gutachter als deutlich zu günstig an. Insbesondere da alle Verluste innerhalb des Gebäudes mit enthalten sein sollen. Im Feld erreichen Brennwertkessel selbst die genannte Effizienz oftmals kaum.

Die Verfasser einer UBA-Studie von 2011 Bettgenhäuser und Boermans gleichen ihre Berechnungswerte an Feldstudien an [212]. Sie unterscheiden unterschiedliche Effizienzen für Heizung und Trinkwarmwasser sowie im FH und MFH. Es ergeben sich beispielsweise für ein unsaniertes MFH brennwertbezogene Nutzungsgrade von 87 % (Heizung) und 81 % (Warmwasser). Die Werte erscheinen etwas zu gering bzgl. der Feldmessungen, was aber auch auf die ältere Datenlage zurückgeführt werden kann.

Diefenbach et nutzen in der Studie zum „Zielerreichungsszenario 2010“ für Brennwertkessel Nutzungsgrade von 87 bis 92 % und für Niedertemperaturkessel 84 bis 88 % (jeweils brennwertbezogen umgerechnet) [6]. In einer späteren Studie zur „Energieversorgungsstruktur für den für den Wohngebäudesektor“ wird für Gaskessel allgemein ein Nutzungsgrad von 86 % (brennwertbezogen) angenommen [57]. Die früheren Werte der NT-Kessel werden als deutlich zu gut eingeschätzt, die Brennwertkesselwerte sind plausibel. Der spätere Wert ist nach Ansicht der Autoren zu gering, auf jeden Fall, wenn damit Brennwertkessel gemeint sind.

Bewertung der Gas- und Ölkessel in den Typgebäuden

Für Kessel werden im Rahmen der Berechnungen zu diesem Gutachten brennwertbezogene Effizienzen als Nutzungsgrade festgelegt. Sie werden unabhängig von der tatsächlichen Kesselauslastung angesetzt. Der Effekt einer Qualitätssicherung wird positiv berücksichtigt.

- Nutzungsgrad für Niedertemperaturkessel Erdgas/Heizöl
    - mit Qualitätssicherung: 0,85
    - ohne Qualitätssicherung: 0,80

- Nutzungsgrad für Brennwertkessel Erdgas/Heizöl
    - mit Qualitätssicherung: 0,93
    - ohne Qualitätssicherung: 0,88

Aufbau von Hybridsystemen

Als Voraussetzung der weiteren Überlegungen zum künftigen Einsatz von Gas- und Ölkesseln dienen die folgenden Randdaten:

- Wärmeerzeuger werden etwa 25 Jahre betrieben, bevor sie getauscht werden, vgl. Anhang 5.9.1. Werden sie also heute eingebaut, ist erst 2045 wieder mit einem erneuten (anlasslosen) Systemumbau zu rechnen. Das ist fast das Ende der Zeitspanne, die für den Umbau der Versorgungsysteme insgesamt vorgesehen sind.
- Der zur Verfügung stehende Strom stammt bereits heute zu nennenswerten Anteilen aus den regenerativen Quellen Wind und Photovoltaik. Die Technologien zur Herstellung regenerativen Stroms sind bekannt, markteingeführt und erprobt – wenn auch immer noch technische Weiterentwicklungen möglich und sinnvoll sind.
- Das zur Verfügung stehende Erdgas und Heizöl kommt heute fast ausschließlich aus fossilen Quellen. Die Möglichkeiten zur Erzeugung von Biogas- und Bioöl sind limitiert. Ein Umbau auf Wasserstoff oder synthetische Stoffe ist denkbar. Der industrielle Einstieg in derartige Technologien ist bis 2050 auf jeden Fall möglich. Aus heutiger Sicht ist aber noch nicht absehbar, wann der Komplettumstieg geschafft sein wird. Unter der Prämisse, dass er bereits auf absehbare Zeit zu erreichen wäre, könnte die „klassische" Verbrennungstechnologie in den Gebäuden prinzipiell beibehalten werden.
- Aber auch ein Umstieg auf Wasserstoff/synthetische Brennstoffe erfordert einen Ausbau der regenerativen Stromquellen (Wind und Photovoltaik) – und dies in sehr viel stärkerem Maße als die direkte Stromnutzung, da deutliche Umwandlungsverluste festzustellen sind.

Der Umbau hin zu einer Wasserstoffwirtschaft oder zu einer Wirtschaft synthetischer Gase und Öle basiert darauf, dass zunächst der Ausbau der regenerativen Stromerzeugung selbst forciert wird. Dieses Vorhaben braucht Zeit. In der Zwischenzeit bis zum Erreichen von großen regenerativen Stromüberschüssen kann der (bis dahin teilregenerative, sich immer weiter verbessernde) Strommix genutzt werden, um bereits Gebäude so zu versorgen, dass weniger Emissionen entstehen. Die im Gebäude notwendigen Systeme sind Wärmepumpen oder direktelektrische Erzeuger.

Wenn der Ausbau regenerativer Energien langfristig zu einer etablierten Wasserstoffwirtschaft oder synthetischer Brennstoffe führt, sind die Nutzer – in der Reihenfolge sinnvoller Anwendungen: der Verkehrssektor (zunächst alle Verkehrsträger, die nicht auf dem Land stattfinden), die Industrie (Hochtemperaturanwendungen) und anschließend – wenn überhaupt - die Gebäude.

Allerdings ist bezüglich der Ausgangslage in den zu versorgenden Gebäuden festzustellen, dass die Sanierungsrate der Gebäudehülle grundsätzlich geringer als die der Anlagentechnik ist – bedingt durch die unterschiedlichen Lebensdauern. Somit sind viele Gebäude noch nicht auf einem Standard, der einem für Wärmepumpen günstigen Temperaturniveau entspricht. Die mehrheitliche Ausstattung der Gebäude mit Heizkörpernetzen erhöht dieses Problem noch. Jedoch ist ein Sanierungszyklus häufig bereits absehbar.

Ein guter Kompromiss zwischen beiden Vorüberlegungen – einerseits schnell die Gebäude in einen emissionsärmeren Zustand zu versetzen, andererseits nicht bis zum nächsten Gebäudesanierungszyklus warten zu wollen – ist der übergangsweise Aufbau von Hybridheizungen aus Kesseln und Wärmepumpen.

Der Anteil regenerativer Stromnutzung lässt sich somit erhöhen, v. a. wenn der Wärmepumpenausbau an den Ausbau (dezentraler) Photovoltaik gekoppelt wird, siehe Anhang 3.5.1. Mit der nächsten Gebäudesanierung kann das Hybridsystem dann zu einem reinen Wärmepumpensystem umfunktioniert werden.

In ihrer Makrostudie von 2019 kommen Diefenbach et al. zu einer ähnlichen Einschätzung, was die Verwendung von Wärmepumpen angeht [57]:

> *„Dabei ist keineswegs vorauszusetzen, dass der Einsatz der Wärmepumpen in monovalenten Systemen (d. h. allein bzw. kombiniert mit elektrischem Heizstab) erfolgt. Dies wäre zwar grundsätzlich denkbar, führt allerdings an kalten Wintertagen zu hohen Leistungsspitzen im elektrischen Netz mit entsprechendem Bedarf an zusätzlicher konventioneller Kraftwerksleistung (Erdgas-Spitzenlast-Kraftwerke) und einer Nachrüstung auf Ebene der lokalen elektrischen Verteil- bzw. Ortsnetze (soweit diese nicht aus anderen Gründen, z. B. wegen der Zunahme von Elektrofahrzeugen, ohnehin erfolgt).*
>
> *Als Alternative bietet sich der Einsatz von bivalenten Wärmepumpensystemen […] an. […] Die Auswirkungen der monovalenten Systeme auf das elektrische Energiesystem (hoher Leistungszubau bei der Erzeugung und Ertüchtigung von lokalen Netzen) lassen sich hier größtenteils vermeiden."*

Da eine Hybridlösung klar von der Logik „einfache Systeme sind einfacher zu beherrschen“ abweicht, ist eine Qualitätssicherung bei der Planung und Ausführung hier noch wichtiger als bei reinen Wärmepumpenlösungen. Zudem sollte es ein kritisches niederschwelliges Monitoring der Verbrauchswerte (vgl. Anhang 5.3.4) für mindestens zwei Heizperioden geben.

Zur Begründung: die Gutachter gehen davon aus, dass die verwendeten Wärmepumpen so bemessen werden, dass sie nach der absehbar erfolgenden Gebäudesanierung zum dann erforderlichen Leistungsbedarf passen. Bis dieser Zustand eintritt, sind die Wärmepumpen allein zu klein zur Alleinversorgung, aber die verfügbare summierte Erzeugerleistung des Paketes „Kessel und Wärmepumpe“ übersteigt vielfach den Leistungsbedarf des Gebäudes. Diese Konstellation tritt vor allen dann ein, wenn die Wärmepumpe nur zugekauft wird und der vorherige Erzeuger weiterbenutzt wird. Auch in kleinen Gebäuden ist der Fall absehbar, weil Kessel sehr kleiner Leistungen nicht verfügbar sind.

Ein Überangebot aus Leistung ist der ideale Nährboden für (unbeabsichtigte) Verschwendung. Die Problematik ist aus dem Betrieb von Solarthermieanlagen hinreichend bekannt, vgl. auch eigene Studien hierzu [131].

Da die regelungstechnische Verschaltung der beiden Erzeuger die Wärmepumpe als Grundlasterzeuger ansieht, wird der Kessel in der Theorie nur zu den Spitzenzeiten/-lasten hinzugeschaltet. Ob tatsächlich ein Spitzenlastbedarf gerechtfertigt ist oder nicht, kann die Regelung im Zweifelsfall nicht beurteilen. Eine unsachgemäße Bedienung der Anlage, ein Effizienzverlust der Wärmepumpe durch Defekt, Fehler bei der Quellenerschließung, falsch platzierte Fühler im Speicher usw. können dazu führen, dass der Kessel unnötig hinzugeschaltet wird. Wäre die Wärmepumpe der Alleinerzeuger, fielen viele der genannten Fehler auf.

Günther et al. stellen in der neuesten Fraunhofer ISE-Studie zu SG-Ready-Wärmepumpen (smart Grid) in Hinblick auf die korrekte Funktion von Hybridanlagen ebenfalls fest [208]:

> *„Als Hemmnisse hat sich in diesem Feldtest gezeigt, dass bei einigen Systemen die SG-Ready Einstellungen der Wärmepumpen gerade in Bezug auf die Nutzung des Heizstabs oder des Kessels noch verbessert werden können., Hybridsysteme sind nicht oder unzweckmäßig eingebunden“*

Hybridsystem mit Gaskessel und Erdreichwärmepumpe

Anhand der Beispielgebäude werden nachfolgend alle gängigen Varianten des Aufbaus von Hybridanlagen untersucht. Den Beginn macht die Lösung mit Gaskessel und Erdreichwärmepumpe, schematisch in Abbildung 75 dargestellt.

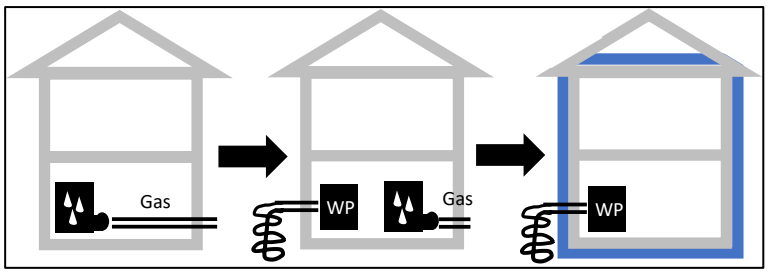


Abbildung 75 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Erdreichwärmepumpe und Gasbrennwertkessel [eigene Darstellung]

Es sind die Vollkosten zu betrachten, wenn folgender Fall eintritt: ein Brennwertkessel ist bereits im Gebäude vorhanden und wird – anlasslos – ergänzt durch eine Erdreichwärmepumpe. Der Kessel wird anschließend noch weiter als Spitzenlasterzeuger verwendet. Die Erdreichwärmepumpe ist so ausgelegt, dass sie das absehbar „gut“ sanierte Gebäude später allein versorgen kann.

Für das EZFH im Bestand heißt dies, dass anstelle einer Wärmepumpe mit 9,3 kW Prüfstandsleistung nur ein Gerät mit 5,7 kW angeschafft wird. Dies dezimiert die Anschaffungskosten. Anstelle von 29.400 € fallen nur 19.800 € (incl. KG 700 sowie Erdreicherschließung) an Investitionskosten an. Hinzu kommen die Kosten für den Pufferspeicher.

Tabelle 78 zeigt die Ergebnisse. Diese Lösung reduziert die Emissionen sofort um 22 bis 28 %. Die weitere Dezimierung ergibt sich später mit der Dämmung und dem Wegfall des Gaskessels. Die Maßnahme ist mit 781 bis 1173 €/t relativ hochpreisig (es wird vergleichsweise viel Geld aufgewendet, um eine Tonne CO_2 zu vermeiden.). Aus Sicht der wirtschaftlichen Überlegung des Gebäudebetriebs zeigt sich, dass in beiden Fällen ein Fehlbetrag festzustellen ist. Dieser könnte durch einen Investitionskostenzuschuss ausgeglichen werden. Der Zuschuss liegt rechnerisch bei etwa 120 % der Investitionssumme. Dass dieser Wert höher als die eigentliche Investition ist, zeigt an, dass nicht nur die Investition zu subventionieren wäre, sondern auch die Mehrkosten an Energie.

Es zeigt sich das bereits aus dem Anhang „Wärmepumpen“ 3.3.1 bekannte Problem: die Strompreise sind unverhältnismäßig hoch verglichen mit den fossilen Energieträgern Gas und Heizöl – zumindest wenn es um das Verhältnis von Emissionen und Preis geht.

Allerdings sind in dieser Hybrid-Konstellation noch weitere negative Randdaten festzustellen: Erdgas ist ohnehin vergleichsweise emissionsarm (alternativ wird Heizöl ersetzt), die Erdreichwärmepumpe ist sehr teuer (alternativ wird eine Außenluftwärmepumpe gewählt) und der Brennwertkessel hat bereits eine gute Effizienz (alternativ ist ein Niedertemperaturkessel vorhanden). Die genannten Konstellationen werden nachfolgend ebenfalls untersucht. Als Fazit dieser Lösung kann festgestellt werden, dass sie für eine massenhafte Umsetzung nicht geeignet erscheint.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Aufbau einer Hybridheizung durch nachträglichen Einbau einer Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		späterer Zustand („gutes“ Gebäude)	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	115	84	57	41
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,93	0,93		
	nachher	-	2,66	2,85	3,11	3,05
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	157	129		
	nachher	kWh/(m²a)	56	42	28	25
Investition	Vollkosten	T€	23,1	53,1		
Emissionen Wärme	vorher	kg/(m²a)	32,6	26,8		
	nachher	kg/(m²a)	25,3	19,3	12,5	11,3
Emissionsminderung, Wärme		%	-22	-28		
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	1173	781		
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1490	3382		
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	123	121		
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	1446	948		

Tabelle 78 Auswertung Hybridheizung Gas-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Ein Fall, bei dem nur die Mehrkosten zählen, ergibt sich bei Ersatz eines Niedertemperaturkessels, der abgängig ist. Anstelle der Neuanschaffung eines Brennwertkessels, wird das Paket „Brennwert plus Erdreichwärmepumpe“ angeschafft, vgl. Schema in Abbildung 76.

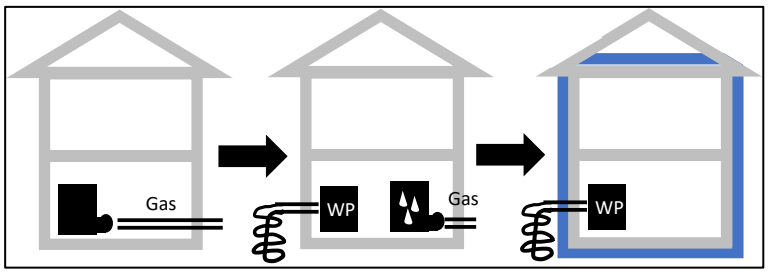


Abbildung 76 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Erdreichwärmepumpe und Gasbrennwertkessel [eigene Darstellung]

Für das Mehrfamilienhaus ergibt sich somit beispielsweise eine Wärmpumpe mit 16,4 kW Prüfstandsleistung (46.300 €) plus ein Brennwertkessel mit 10 kW Leistung (7.400 €) anstelle eines Brennwertkessels von 24,2 kW Leistung (12.000 €, alle Werte incl. KG 700), der sonst notwendig gewesen wäre.

Hinweis: Mellwig et al. [128] gehen für Hybridheizungen mit Wärmepumpe im Jahr 2030 von 80 % Aufschlag auf den reinen Kesselpreis aus. Aufgrund von Skaleneffekten sinkt der Wert bis 2050 auf nur noch 60 %. Das ist aus Sicht der Gutachter in Anbetracht der o.g. Zahlen fragwürdig, weshalb von dieser Vereinfachung abgesehen wird.

Tabelle 79 zeigt die deutlich besseren Ergebnisse. Sowohl die sofort erzielbare Emissionsminderung, als auch der äquivalente CO_2-Preis sind aus Sicht des Klimaziels deutlich besser eingehalten. Die problematische Wirtschaftlichkeitsbewertung bleibt erhalten, wie in allen Wärmepumpenprojekten.

Für das MFH ist diese Maßnahme interessanter als für das EZFH. Das liegt u. a. daran, dass die Investitionskosten für den Spitzenlastkessel tatsächlich geringer sind als für einen reinen Ersatzkessel (10 kW statt 24 kW, s.o.). Bei dem EZFH kommt in beiden Fällen die kleinste verfügbare Kesselgröße (hier mit 10 kW angenommen) zum Einsatz.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Aufbau einer Hybridheizung durch Ersatz von Gas-NT-Kessel und Einbau von Gas-Brennwert-kessel und Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		späterer Zustand („gutes“ Gebäude)	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	115	84	57	41
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,88	0,88		
	nachher	-	2,66	2,85	3,11	3,05
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	182	150		
	nachher	kWh/(m²a)	56	42	28	25
Investition	Mehrkosten	T€	23,1	48,5		
Emissionen Wärme	vorher	kg/(m²a)	37,9	31,2		
	nachher	kg/(m²a)	24,2	18,7	12,5	11,3
Emissionsminderung, Wärme		%	-36	-40		
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	779	542		
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1578	3383		
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	98	100		
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	812	543		

Tabelle 79 Auswertung Hybridheizung Gas-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zum Aufbau von Hybridanlagen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7.

Hybridsystem mit Gaskessel und Außenluftwärmepumpe

Die Untersuchung wird nachfolgend wiederholt, jedoch mit einer Außenluftwärmepumpe, siehe Abbildung 77. Bleibt der Gasbrennwertkessel erhalten, fallen nur die Kosten für die Wärmepumpe und den Pufferspeicher an. Mit den Randdaten der Beispielgebäude wird für das EZFH ein 3,7 kW-Gerät und im MFH ein 10,7 kW-Modell gewählt.

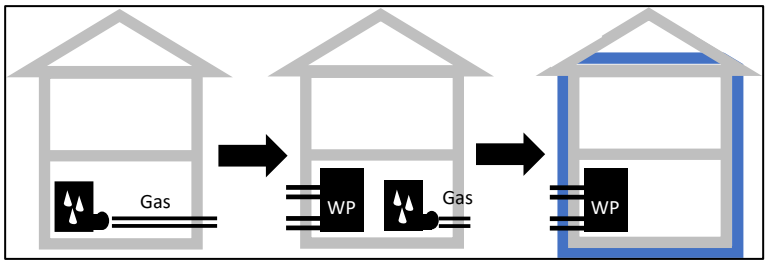


Abbildung 77 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Außenluftwärmepumpe und Gasbrennwertkessel [eigene Darstellung]

Tabelle 80 fasst die Ergebnisse zusammen. Zum einen zeigt sich eine deutlich geringere Emissionsminderung von nur 7 bis 10 % gegenüber dem reinen Gaskesselbetrieb. Auch verglichen mit der Erdreichwärmepumpe sind die Betriebsdaten schlechter, weil das (im Altbau) notwendige Temperaturniveau sehr ungünstig ist. Es verbessert sich erst mit der baulichen Sanierung.

Daher steigen die Energiekosten deutlich und der gesamtwirtschaftliche Verlust bei den Jahreskosten ebenfalls. Die reine Bezuschussung der Investition reicht bei weitem nicht aus, das Manko auszugleichen. Diese Lösung ist daher nicht sinnvoll.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Aufbau einer Hybridheizung durch nachträglichen Einbau einer Außenluftwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		später Zustand („gutes“ Gebäude)	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	115	84	57	41
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,93	0,93		
	nachher	-	1,85	2,01	2,43	3,05
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	157	129		
	nachher	kWh/(m²a)	80	60	35	32
Investition	Vollkosten	T€	14,2	26,7		
Emissionen Wärme	vorher	kg/(m²a)	32,6	26,8		
	nachher	kg/(m²a)	30,3	24,0	15,7	14,1
Emissionsminderung, Wärme		%	-7	-10		
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	2251	1049		
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1235	2725		
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	168	197		
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	3773	2062		

Tabelle 80 Auswertung Hybridheizung Gas-Brennwertkessel und Außenluftwärmepumpe auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die alternative Variante ist die Anschaffung des Pakets „Gasbrennwertkessel plus Außenluftwärmepumpe“ bei ohnehin erforderlicher Kesselsanierung, siehe Abbildung 78.

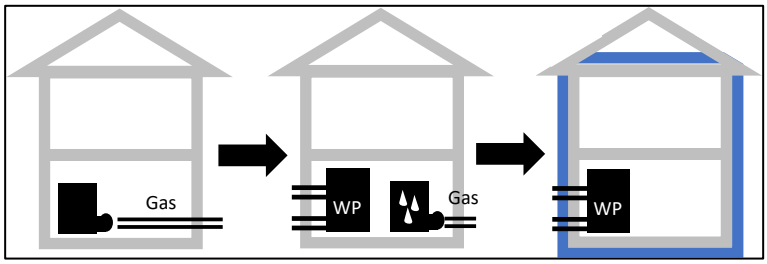


Abbildung 78 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Außenluftwärmepumpe und Gasbrennwertkessel [eigene Darstellung]

Tabelle 81 zeigt die Ergebnisse. An der schlechten Arbeitszahl und den hohen Energiekosten ändert sich nichts. allerdings sind die Minderungspotentiale für Emission günstiger, weil der Ausgangszustand schlechter war. Etwa 20 bis 23 % werden erreicht. Das verbessert den äquivalenten CO_2-Preis der Maßnahme, der ja das Verhältnis von Kapitaleinsatz zu erreichter Umweltwirkung ausdrückt.

Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit ist diese Maßnahme etwas besser als die Erdreichwärmepumpe einzuschätzen. Sie führt allerdings auch zu einer notwendigen Subvention, die größer ist als die Anschaffungskosten selbst.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Aufbau einer Hybridheizung durch Ersatz von Gas-NT-Kessel und Einbau von Gas-Brennwert-kessel und Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		späterer Zustand („gutes“ Gebäude)	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	115	84	57	41
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,88	0,88		
	nachher	-	1,85	2,01	2,43	3,05
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	182	150		
	nachher	kWh/(m²a)	80	60	35	32
Investition	Vollkosten	T€	14,2	23,4		
Emissionen Wärme	vorher	kg/(m²a)	32,6	26,8		
	nachher	kg/(m²a)	30,3	24,0	15,7	14,1
Emissionsminderung, Wärme		%	-20	-23		
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	847	442		
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1195	2238		
notw. Investitionskostenzuschuss		%	106	121		
notw. zusätzlicher Emissionspreis		€/t	1109	664		

Tabelle 81 Auswertung Hybridheizung Gas-Brennwertkessel und Außenluftwärmepumpe auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zum Aufbau von Hybridanlagen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7.

Hybridsystem mit Ölkessel und Erdreichwärmepumpe

Anhand der Beispielgebäude werden nachfolgend die Varianten des Aufbaus von Hybridanlagen in Verbindung mit Heizölkesseln untersucht. Den Beginn macht die Lösung mit Heizölkessel und Erdreichwärmepumpe, schematisch in Abbildung 79 dargestellt.

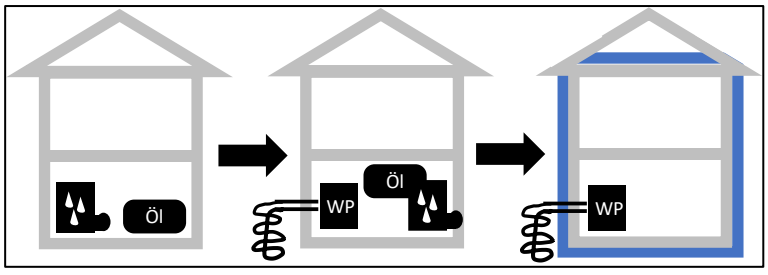


Abbildung 79 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Erdreichwärmepumpe und Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Es sind die Vollkosten zu betrachten, wenn folgender Fall eintritt: ein Brennwertkessel ist bereits im Gebäude vorhanden und wird – anlasslos – ergänzt durch eine Erdreichwärmepumpe. Der Kessel wird anschließend noch weiter als Spitzenlasterzeuger verwendet. Die Erdreichwärmepumpe ist so ausgelegt, dass sie das absehbar „gut“ sanierte Gebäude später allein versorgen kann.

Alle Leistungsangaben und Investitionskosten der notwendigen Erzeuger sind identisch wie bei der Untersuchung der Gaskessel, weshalb an dieser Stelle keine Wiederholung erfolgen soll.

Tabelle 82 zeigt die Ergebnisse. Diese Lösung reduziert die Emissionen sofort um 45 bis 49 %. Die weitere Dezimierung ergibt sich später mit der Dämmung und dem Wegfall des Heizölkessels.

Die Maßnahme ist mit 381 bis 481 €/t relativ günstig (es wird vergleichsweise wenig Geld aufgewendet, um eine Tonne CO_2 zu vermeiden.).

Aus Sicht der wirtschaftlichen Überlegung des Gebäudebetriebs zeigt sich, dass in beiden Fällen ein Fehlbetrag festzustellen ist. Die Zahlen sind identisch wie beim Gaskessel, da beide Energieträger im Rahmen dieses Gutachtens gleich bewertet werden (brennwertbezogener Preis und Nutzungsgrad sowie Anschaffungskosten). Der notwendige Zuschuss ist relativ hoch. Allerdings würde sich eine Wirtschaftlichkeit einstellen, wenn die Energieträger verteuert würden. Erhielte das Heizöl eine Verteuerung um den in der Tabelle genannten Emissionspreis von 450 bis 515 €/t wäre auch ohne Zuschuss eine Grenzwirtschaftlichkeit gegeben. Das Heizöl müsste dann 14 bis 17 Cent/kWh kosten. Mischlösungen (geringerer Emissionspreis und Zuschuss) sind ebenfalls denkbar.

Als Fazit dieser Lösung kann festgestellt werden, dass sie durchaus interessant ist, um einen Ausstieg aus der Heizölverbrennung zu bewerkstelligen. Zudem ist in dieser Konstellation der Komplettumstieg auf die Wärmepumpe absehbar – zum Zeitpunkt der baulichen Sanierung oder spätestens bei Lebensende des Heizölkessels.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Aufbau einer Hybridheizung durch nachträglichen Einbau einer Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		späterer Zustand („gutes“ Gebäude)	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	115	84	57	41
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,93	0,93		
	nachher	-	2,66	2,85	3,11	3,05
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	157	129		
	nachher	kWh/(m²a)	56	42	28	25
Investition	Vollkosten	T€	23,1	53,1		
Emissionen Wärme	vorher	kg/(m²a)	45,8	37,7		
	nachher	kg/(m²a)	25,3	19,3	12,5	11,3
Emissionsminderung, Wärme		%	-45	-49		
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	418	381		
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1490	3382		
notw. Investitionskostenzuschuss		%	123	121		
notw. zusätzlicher Emissionspreis		€/t	515	450		

Tabelle 82 Auswertung Hybridheizung Öl-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Ein Fall, bei dem nur die Mehrkosten zählen, ergibt sich bei Ersatz eines Niedertemperaturkessels, der abgängig ist. Anstelle der Neuanschaffung eines Brennwertkessels, wird das Paket „Brennwert plus Erdreichwärmepumpe“ angeschafft, vgl. Schema in Abbildung 80.

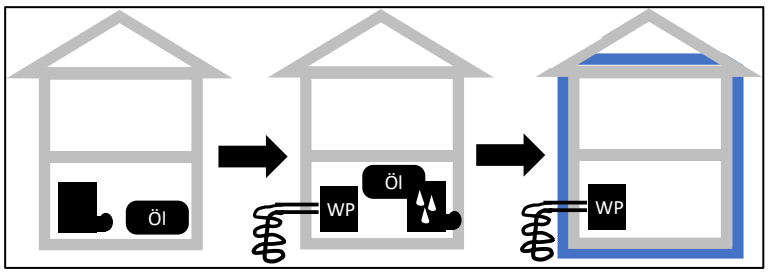


Abbildung 80 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Erdreichwärmepumpe und Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Tabelle 83 zeigt die deutlich besseren Ergebnisse. Sowohl die sofort erzielbare Emissionsminderung, als auch der äquivalente CO_2-Preis sind aus Sicht des Klimaziels deutlich besser eingehalten. Die problematische Wirtschaftlichkeitsbewertung bleibt erhalten, wie in allen Wärmepumpenprojekten.

Die Ergebnisse sind besser als bei Verwendung eines Gaskessels. Allerdings ist anzumerken, dass die dann neu installierte Brennwerttechnik weitere etwa 25 Jahre an diesen Energieträger gebunden ist. Die konsequente Umsetzung des anvisierten „guten" Gebäudezustandes in absehbarer Zukunft ermöglicht einen Ausstieg aus der Nutzung des emissionsreichen Energieträgers Heizöl.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Aufbau einer Hybridheizung durch Ersatz von Öl-NT-Kessel und Einbau von Öl-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		späterer Zustand („gutes" Gebäude)	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	115	84	57	41
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,88	0,88		
	nachher	-	2,66	2,85	3,11	3,05
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	182	150		
	nachher	kWh/(m²a)	56	42	28	25
Investition	Mehrkosten	T€	23,1	48,5		
Emissionen Wärme	vorher	kg/(m²a)	53,2	43,8		
	nachher	kg/(m²a)	25,3	19,3	12,5	11,3
Emissionsminderung, Wärme		%	-52	-56		
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	383	275		
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1578	3341		
notw. Investitionskostenzuschuss		%	98	100		
notw. zusätzlicher Emissionspreis		€/t	400	276		

Tabelle 83 Auswertung Hybridheizung Öl-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zum Aufbau von Hybridanlagen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7.

Hybridsystem mit Ölkessel und Außenluftwärmepumpe

Die Untersuchung wird nachfolgend wiederholt, jedoch mit einer Außenluftwärmepumpe, siehe Abbildung 81.

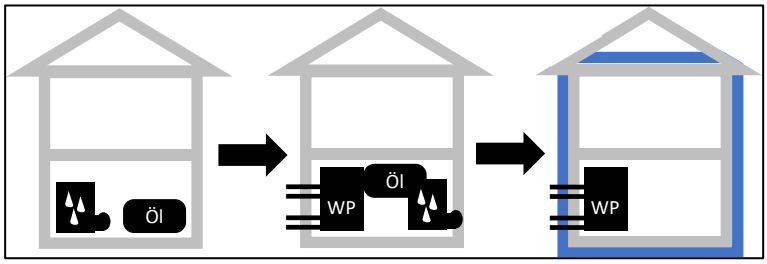


Abbildung 81 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Außenluftwärmepumpe und Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Tabelle 84 fasst die Ergebnisse zusammen. Zum einen zeigt sich eine deutlich geringere Emissionsminderung von nur 25 bis 29 % gegenüber dem reinen Ölkesselbetrieb (Dennoch ist sie weit größer als bei der vergleichbaren Gaskessellösung.). Die Kosten zur Einsparung einer Tonne CO_2 durch diese Maßnahme steigen auf vergleichbare Werte wie bei der Erdreichwärmepumpe.

Wegen der schlechten Arbeitszahlen steigen die Energiekosten deutlich und der gesamtwirtschaftliche Verlust bei den Jahreskosten ebenfalls. Die reine Bezuschussung der Investition reicht bei weitem nicht aus, das Manko auszugleichen. Auch durch Emissionspreise steigende Ölpreise müssten so hoch sein, dass diese Lösung deutlich hinter der Erdreich-Hybrid-Lösung zurückbleibt.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Aufbau einer Hybridheizung durch nachträglichen Einbau einer Außenluftwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		später Zustand („gutes“ Gebäude)	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	115	84	57	41
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,93	0,93		
	nachher	-	1,85	2,01	2,47	2,43
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	157	129		
	nachher	kWh/(m²a)	80	60	35	32
Investition	Vollkosten	T€	14,2	34,4		
Emissionen Wärme	vorher	kg/(m²a)	45,8	37,7		
	nachher	kg/(m²a)	34,4	26,6	15,7	14,1
Emissionsminderung, Wärme		%	-25	-29		
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	456	345		
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1235	3137		
notw. Investitionskostenzuschuss		%	168	174		
notw. zusätzlicher Emissionspreis		€/t	764	602		

Tabelle 84 Auswertung Hybridheizung Öl-Brennwertkessel und Außenluftwärmepumpe auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die alternative Variante ist die Anschaffung des Pakets „Ölbrennwertkessel plus Außenluftwärmepumpe“ bei ohnehin erforderlicher Kesselsanierung, siehe Abbildung 82.

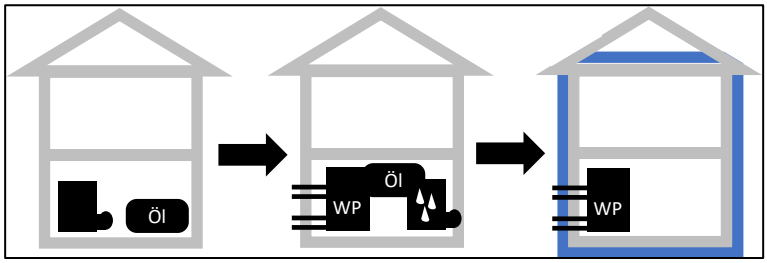


Abbildung 82 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Außenluftwärmepumpe und Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Tabelle 85 zeigt die Ergebnisse. An der schlechten Arbeitszahl und den hohen Energiekosten ändert sich nichts. allerdings sind die Minderungspotentiale für Emission günstiger, weil der Ausgangszustand schlechter war. Etwa 35 bis 39 % werden erreicht. Das verbessert den äquivalenten CO_2-Preis der Maßnahme.

Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit ist diese Maßnahme etwas besser als die Erdreichwärmepumpe einzuschätzen. Sie führt allerdings auch zu einer notwendigen Subvention, die größer ist als die Anschaffungskosten selbst.

Die forcierte Umsetzung dieser Maßnahme führt bei den Gutachtern zu den gleichen Bedenken, wie sie bereits für das Hybrid-System mit Erdreichwärmepumpe geäußert wurden. Es ist zumindest diskussionswürdig, ob der Neueinbau von Ölkesseln an eine zeitliche Limitierung gekoppelt sein soll.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zum Aufbau von Hybridanlagen und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7.

			EZFH	MFH	EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Aufbau einer Hybridheizung durch Ersatz von Öl-NT-Kessel und Einbau von Öl-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe (zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			…im Ø-Gebäude		später Zustand („gutes“ Gebäude)	
Detailkennwerte der Bilanz						
Heizwärmebedarf		kWh/(m²a)	115	84	57	41
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,88	0,88		
	nachher	-	1,85	2,01	2,47	2,43
Ergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	182	150		
	nachher	kWh/(m²a)	80	60	35	32
Investition	Vollkosten	T€	14,2	26,7		
Emissionen Wärme	vorher	kg/(m²a)	52,3	43,8		
	nachher	kg/(m²a)	34,4	26,6	15,7	14,1
Emissionsminderung, Wärme		%	-35	-39		
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	342	213		
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1195	2466		
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	106	121		
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	448	305		

Tabelle 85 Auswertung Hybridheizung Öl-Brennwertkessel und Außenluftwärmepumpe auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Fazit

Aus Sicht der Gutachter sollte im Zuge von reinen Sanierungen, z. B. bei einem nicht geplanten Ausfall des alten Kessels, möglichst kein Einbau von reinen (monovalenten) Gas- oder Ölheizungen mehr erfolgen, um das Erreichen der Klimaziele nicht unnötig zu erschweren. Sofern die baulichen Randdaten in dem Objekt noch keinen reinen Wärmepumpenbetrieb ermöglichen (Gebäude vor Wärmeschutzverordnung 1984), kann ein Hybrid-System mit Wärmepumpen aufgebaut werden bzw. eine für zukünftige Erweiterungen offene Kessellösung, die bereits auf eine Hybridlösungserweiterung regelungs- und systemtechnisch vorbereitet ist.

Die Wärmepumpe wird dabei nach der absehbar geringeren Heizlast gewählt, die sich nach der Modernisierung der Gebäudehülle ergibt. Sie ist daher für eine bestimmte Zeit unterdimensioniert. Der Hybridgedanke lohnt sich, wenn die geplante Gebäudemodernisierung innerhalb eines Zeitfensters der nächsten 7 bis 10 Jahre liegt. Findet sie in der noch näheren Zukunft statt, ist zu überlegen, ob nicht bei noch funktionierender Altkesselanlage bis dahin gewartet wird und dann sofort eine Wärmepumpenlösung gewählt wird. Ist sie nicht in dem Zeitfenster oder nie möglich – z. B. bei denkmalgeschützten Gebäuden, ist eher über eine Neudimensionierung der Heizflächen nachzudenken, so dass das Gebäude auch ungedämmt wärmepumpentauglich wird.

Ein Umstieg auf einen Holzkessel ist selbstverständlich ebenso denkbar, siehe Anhang 3.3.3.

3.3.3 Holzkessel

Zurzeit weisen etwa 2 % aller MFH und 6 % aller EZFH einen Holzkessel als Haupterzeuger auf, siehe Anhang 3.1.

Reale und theoretische Effizienzen

Die Anzahl der dokumentierten Praxisergebnisse bzw. gemessen Effizienzen ist überschaubar. Die in Mikro- als auch Makrostudien verwendeten Effizienzannahmen, z. B. die Werte der DIN V 4701-10 [214], sind dennoch vergleichsweise realistisch.

Sterchele et al. setzen für die Berechnungen heizwertbezogene Nutzungsgrade von 93 % (Niedertemperaturwärme, z. B. Heizungsanwendungen im Wohnbau) bzw. 88 % (Hochtemperaturwärme, z. B. die Trinkwassererwärmung) an [68]. Diese Werte entsprechen brennwertbezogenen Jahresnutzungsgraden von: $\eta_{a,HS}$ = 83 bis 88 % (der Umrechnungsfaktor von Heizwert in Brennwert beträgt bei Holz durchschnittlich 1,06).

IWU nimmt in der Studie „Analyse der Energieversorgungsstruktur für den Wohngebäudesektor zur Erreichung der Klimaschutzziele 2050“ für einen Holzkessel den heizwertbezogenen Nutzungsgrad von 85 % an; das ist brennwertbezogen etwa $\eta_{a,HS}$ = 80 %. Bettgenhäuser und Boermans setzen heizwertbezogene Aufwandszahlen an. Die verwendeten Werte betragen 1,33 für Hackschnitzelkessel sowie 1,22 bis 1,25 für Pellet-Niedertemperaturkessel [212]. Diese Werte entsprechen brennwertbezogenen Jahresnutzungsgraden von $\eta_{a,HS}$ = 71 % bzw. 75 bis 77 %.

Eigene Auswertungen an einer Pelletkesselanlage im MFH (150 kW Nennwärmeleistung) lieferte einen Jahresnutzungsgrad (brennwertbezogen) von $\eta_{a,HS}$ = 75,3 % [131]. Großklos et al. veröffentlichten für ein Nahwärmenetz mit 3 Gebäuden in der Sanierung einen gemessenen Jahresnutzungsgrad von nur 55 % (incl. Pufferspeicher) [215].

Aus dem Betriebstest für 100 Anlagen von 10 Betreibern leiten Orthjohann und Streckenberg 2015 einen Einfluss der Qualitätssicherung von 19 % ab. Der „übliche Pool“ von Anlagen (hier 11 Stück) weist einen Jahresnutzungsgrad von 72 % auf, die qualitätsgesicherten Anlagen (hier 4 Stück) erreichen 86 % [130]. Die brennwertbezogenen Jahresnutzungsgrade betragen $\eta_{a,HS}$ = 68 % bzw. 81 %.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Jahresnutzungsgrade von Holzfeuerungen bei weitem nicht die Werte von gas- oder ölbefeuerten Kesseln erreichen. Allerdings ist der Einfluss der Qualitätssicherung hoch.

In ihrem Innovationsbericht für erneuerbare Wärme- und Kälteerzeugung fassen Wenzel et al. treffend zusammen [203]:

> *„Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit gilt es vielmehr, die Lücke zwischen den Prüfstands-Kesselwirkungsgraden und den Wirkungsgraden unter realen Einsatzbedingungen zu schließen. Ziel ist es, durch eine optimale Auslegung der Anlage und Einbindung ins Heizsystem Jahresnutzungsgrad von über 85 % zu erreichen“.*

In der Förderung des BAFA bzw. der EnSanMV [29] sowie auch den Nebenanforderungen zum EEWärmeG wird jedoch ausschließlich auf Wirkungsgrade abgezielt [4], die Prüfstandswerte sind und weder die Betriebsbereitschaftsverluste einschließen, noch auf die Auslegung Rücksicht nehmen.

Bewertung der Holzkessel in den Typgebäuden

Für Kessel werden im Rahmen der Berechnungen dieses Gutachtens brennwertbezogene Effizienzen als Nutzungsgrade festgelegt. Sie werden unabhängig von der tatsächlichen Kesselauslastung angesetzt. Der Effekt einer Qualitätssicherung wird positiv berücksichtigt.

- Nutzungsgrad mit Qualitätssicherung: $\eta_{a,HS}$ = 0,75
- Nutzungsgrad ohne Qualitätssicherung: $\eta_{a,HS}$ = 0,70

Aufgrund der schlechten Datenlage insbesondere für effiziente Anlagen, wird die von Orthjohann und Streckenberg (s. o.) vorgefundene Spannbreite nicht voll ausgenutzt.

Einbau eines Holzkessels in ein Durchschnittsgebäude

Holzkessel kommen vor allem dort zum Einsatz, wo seltener Erdgas verfügbar ist (dörfliche Strukturen, ländlicher Raum). Die anlasslose Investition könnte gegeben sein, wenn in einem Gebäude ein eigentlich noch funktionstüchtiger Heizöl-Brennwertkessel durch einen Holzkessel ersetzt wird. Schematische Darstellung siehe Abbildung 83

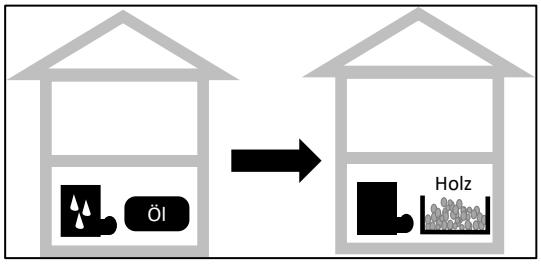


Abbildung 83 Schema – Einbau eines Holzkessels in ein Durchschnittsgebäude mit Öl-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Die Ergebnisse für das durchschnittliche EZFH sowie das MFH zeigt Tabelle 86. Da die Effizienz des Holzkessels deutlich ungünstiger ist als die des (fast neuen) Heizölkessels, steigt der Endenergieeinsatz merklich an. Holz ist zwar der günstigere Energieträger, jedoch ergibt sich am Ende fast eine Energiekostengleichheit.

Für den einzelnen Anlagenbetreiber ergibt sich kein finanzieller Vorteil, sondern ein wirtschaftlicher Verlust – da auch noch die Investitionskosten in voller Höhe zu verzeichnen sind. Allerdings werden große Mengen an CO_2 reduziert mit einem sehr geringen Einsatz von Kapital. Der äquivalente CO_2-Preis der Maßnahme liegt bei sehr geringen 114 bis 186 €/t.

Aus Investorensicht müsste zum Erreichen der Grenzwirtschaftlichkeit der Holzkessel in voller Höhe gefördert werden. Alternativ wird die Anlage auch wirtschaftlich, wenn die anderen Energieträger (also hier das Heizöl) mit Emissionspreisbestandteilen versehen werden. Bereits ein geringer Aufschlag von 123 bis 197 €/t reicht aus. Das Heizöl läge dann nicht mehr 6 Cent/kWh, sondern bei 10 Cent/kWh.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Ersatz eines Öl-Brennwert-Kessels durch einen Holzkessel (im Ø-Gebäude, zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	151	131
	nachher	kWh/(m²a)	190	163
Investition	Vollkosten	T€	20,9	36,8
Emissionsminderung, Wärme		%	-94	-94
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	186	114
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1153	2065
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	106	108
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	197	123

Tabelle 86 Auswertung Holzkesseleinbau in ein durchschnittliches Gebäude auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Eine ohnehin notwendige Investition könnte sich ergeben, wenn ein Bestandheizkessel abgängig ist. Dies könnte ein Heizöl-Niedertemperaturkessel sein, der ohnehin ersetzt wird, siehe Abbildung 84.

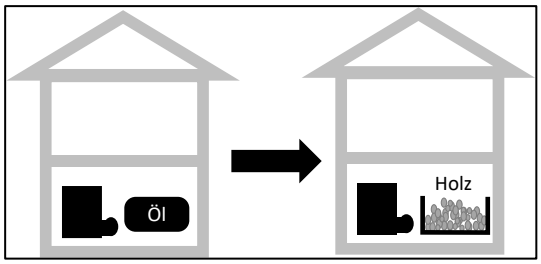


Abbildung 84 Schema – Einbau eines Holzkessels in ein Durchschnittsgebäude mit Öl-NT-Kessel [eigene Darstellung]

Es sind nur die Mehrkosten relevant. Tabelle 89 zeigt die Werte.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Ersatz eines Öl-NT-Kessels durch einen Holzkessel (im Ø-Gebäude, zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	176	152
	nachher	kWh/(m²a)	190	163
Investition	Mehrkosten	T€	13,5	24,8
Emissionsminderung, Wärme		%	-94	-94
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	158	100
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	939	1515
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	86	79
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	137	77

Tabelle 87 Auswertung Holzkesseleinbau in ein durchschnittliches Gebäude auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Grundsätzlich sind die Ergebnisse aus Sicht des Investors nur leicht besser als bei der Volkostenberechnung. Es würde ein Zuschuss von ca. 80 % Investitionssumme benötigt. Aus Sicht der CO_2-Vermeidung ist die Maßnahme in jedem Fall interessant. Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zur Änderung der Haupterzeuger und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7.

Einbau eines Holzkessels in ein gutes Gebäude

Die Ergebnisse verändern sich mit dem Baustandard. Da nicht jedes bauliche Niveau untersucht werden soll, wird ein „gutes“ Gebäude zugrunde gelegt. Sein Zustand entspricht in etwa dem heutigen Neubau. Zunächst wird wieder der anlasslose Ersatz eines intakten Kessels geprüft, der ausschließlich der Verbesserung der Emissionsbilanz dient. Die Basis ist ein Heizöl-Brennwertkessel, siehe Abbildung 85.

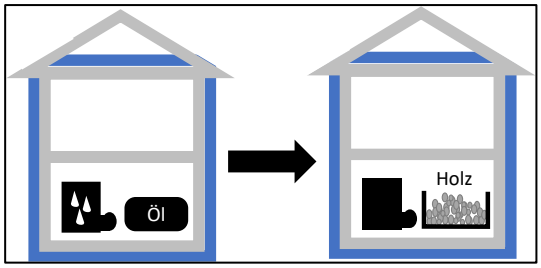


Abbildung 85 Schema – Einbau eines Holzkessels in ein gutes Gebäude mit Öl-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Wie in Tabelle 88 zu erkennen ergibt sich eine etwas bessere Wirtschaftlichkeitsbewertung. Der Verlust ist nur knapp halb zu hoch. Einerseits wird die Investition geringer, weil die Heizlast gesunken ist. Andererseits sind – wegen des geringeren Bedarfs – die Verluste bei den Energiekosten (und damit Gesamtkosten) geringer. Eine Grenzwirtschaftlichkeit würde erreicht, wenn der Zuschuss etwa 100 % der Investitionskosten beträgt. Was weiterhin positiv zu verzeichnen bleibt: die Investitionssumme zur Minderung der Emissionen ist sehr gering.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Ersatz eines Öl-Brennwert-Kessels durch einen Holzkessel (im „guten“ Gebäude, zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	88	84
	nachher	kWh/(m²a)	111	105
Investition	Vollkosten	T€	16,6	28,5
Emissionsminderung, Wärme		%	-94	-94
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	254	137
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	900	1578
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	104	106
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	264	145

Tabelle 88 Auswertung Holzkesseleinbau in ein gutes Gebäude auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Zuletzt wird der Ersatz eines abgängigen Heizöl-NT-Kessels in einem bereits gut gedämmten Gebäude untersucht, schematisch siehe Abbildung 86.

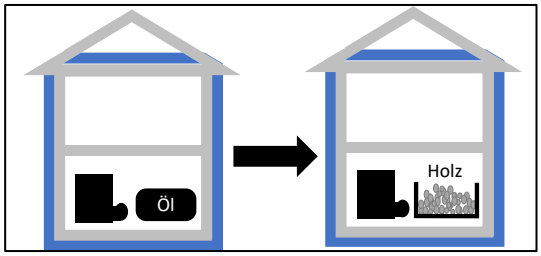


Abbildung 86 Schema – Einbau eines Holzkessels in ein gutes Gebäude mit Öl-NT-Kessel [eigene Darstellung]

Ausgehend vom „guten“ Standard, der etwa dem heutigen Neubauniveau entspricht, ergibt sich eine bessere Wirtschaftlichkeitsbewertung. Die Ergebnisse sind fast vergleichbar mit dem entsprechenden Altbau. Die Investitionskosten sinken, weil die Heizlast sinkt. Es sind ebenfalls leicht sinkenden Energiekosten festzustellen.

Es ist jedoch immer noch ein Verlust festzustellen. Da allerdings die Emissionsminderung abnimmt (weil es bereits vorher weniger Emissionen gab), steigt der äquivalente CO_2-Preis der Maßnahme auf 119 bis 180 €/t an. Dieser Wert ist jedoch im Vergleich zu anderen Maßnahmen sehr gering. Weitere Ergebnisse zeigt Tabelle 89.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Ersatz eines Öl-NT-Kessels durch einen Holzkessel (im „guten“ Gebäude, zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	102	98
	nachher	kWh/(m²a)	111	105
Investition	Mehrkosten	T€	9,2	19,0
Emissionsminderung, Wärme		%	-94	-94
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	180	119
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	635	1230
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	73	83
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	159	97

Tabelle 89 Auswertung Holzkesseleinbau in ein gutes Gebäude auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zur Änderung der Haupterzeuger und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.3.7.

Ersatz eines Gaskessels

Ausgehend vom Gaskessel als vorheriger Wärmeerzeuger liegen alle ökologischen Werte schlechter, weil die Emissionen geringer sind (ca. 70 % der Ölkesselemissionen). Die wirtschaftliche Bewertung ist identisch. Das spricht dafür, Holzkessel vor allem als Ersatz für Heizölkessel zu verwenden.

Biomassebudget

Der BEE war zwar vor gut zehn Jahren davon ausgegangen, dass sich der Einsatz von Biomasse zur Wärmeproduktion bis 2020 verachtfachen würde; dies ist aber so nicht eingetreten. Barzantny et al. führen etwa zur gleichen Zeit [121] in ihrer Studie zum „Energiekonzept Deutschland“ bereits die Gründe an:

> *„Die Potenziale der Biomassenutzung zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie zur Herstellung von Agrokraftstoffen sind heute bereits zu großen Teilen erschlossen. Im Sinne einer nachhaltigen Nutzung wird zwar ein weiterer Ausbau der Biomassenutzung angestrebt, dieser sollte mittelfristig allerdings in erster Linie nicht durch die Erschließung weiterer Flächen zum Anbau von Energiepflanzen erfolgen, sondern aus Kriterien des Natur- und Umweltschutzes vielmehr durch heute noch ungenutzte Potenziale […]. Ein weiterer Grund für diesen Ansatz ist das Ziel, die Akzeptanz der Biomassenutzung zur Energiebereitstellung nicht durch Flächenkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelerzeugung negativ zu beeinflussen.“*

Da Holz ein endlicher Energieträger ist, der in seiner Verfügbarkeit begrenzt ist, können nicht alle Gebäude auf diese Art versorgt werden. Das Budget ist limitiert auf 20 kWh/(m²a) (wohnflächenbezogen und als Mittelwert für den Gesamtbestand zu verstehen), siehe Anhang 5.5.2.

Legt man die o.g. Durchschnittsgebäude zugrunde, so ergibt sich bereits anhand der heute installierten Holzkessel eine flächenbezogene Endenergie von 8 kWh/(m²a) als Mittelwert des Gesamtbestandes. Genauere Auswertungen zu der Frage, ob überwiegend gute oder eher schlechtere Gebäude einen Holzkessel nutzen, führen an dieser Stelle zu weit. Die grundsätzliche Aussage lässt sich auch ohne weitere Detaillierung vereinfacht zusammenfassen.

Etwa ⅓ des für die Gebäudebeheizung verfügbaren Biomassebudgets ist heute schon ausgereizt. In der langfristigen Perspektive kann Holz als Brennstoff zur CO_2-Minderung beitragen, jedoch nicht in einem Massenmarkt. Realistisch lässt sich ein sinnvoller Anteil von Holzkesseln noch maximal verdreifachen.

Dies deckt sich mit den Annahmen von Jochum et al. Sie sehen den Einsatz des Biomassepotentials langfristig verschoben hin zu zentralen KWK-Anlagen. Im Wohnungsbau finden sich langfristig etwa doppelt so viele Anlagen (als Pelletheizungen) wieder als heute, vorzugsweise in kleinen Gebäuden [119].

Eine vertiefte Beschäftigung mit der Holzheizung, incl. Diskussionen um Feinstaubemissionen, Kurzabriss der Branchenentwicklung, Marktakteure und Technologieentwicklung ist dem Statusbericht von Wetzel et al. zu finden in [203].

Zusatzheizung

co2online liefert vertiefte Erkenntnisse zum Thema „Zusatzheizung", häufig mit Holz als Energieträger. Die Studie kommt zu folgendem Ergebnis [216]:

> *„Für die weitere energetische Bewertung der Zusatzheizung wird der Anteil der aufgewendeten Energiemenge betrachtet, der nicht den Verbrauch der Hauptheizung substituiert. Dazu ist zunächst festzustellen, dass der Verbrauch der Zusatzheizung (39,25 kWh/(m²·a)) nicht der Summe aus der eingesparten Endenergie der Primärheizung (27,83 kWh/(m²a)) und dem Gesamtmehrverbrauch (19,52 kWh/(m²·a)) entspricht.*
>
> *Nach diesen Berechnungen werden etwa 40 Prozent (je nach gewähltem Ansatz zwischen 29 und 50 %) des Zusatzheizungsverbrauchs nicht zur Substitution des Hauptheizungsverbrauchs aufgewendet. Dieser „verlorene" bzw. „verschwendete" Anteil des Zusatzheizungsverbrauchs ist zum einen auf die schlechtere Effizienz der Zusatzheizung gegenüber dem Hauptheizsystem zurückzuführen und zum anderen auf überhöhte Raumtemperaturen. Hierbei ist es gleichgültig, ob diese Temperaturen aus falschen Komfortgesichtspunkten gewünscht oder technisch bedingt sind."*

Zur Begründung gibt es folgende Ansätze: eine geringe Effizienz der Feuerungsanlagen, eine künstliche Erhöhung des Luftwechsels bei raumluftabhängig betriebenen Anlagen, Benutzung der Anlagen zur Erhöhung des Komforts oder der Behaglichkeit und nicht zur Senkung des Verbrauchs (Nutzerverhalten), höhere Wärmeabgabe als es dem Wärmebedarf entspricht, insbesondere im effizienten Gebäude, bei fehlenden Wärmespeichern und bei Vorhandensein von Flächenheizungen.

Sobald Gebäude ein Effizienzhausniveau erreicht haben, bietet der Markt zurzeit keine sinnvollen Leistungsklassen an dezentralen Zusatzholzheizungen, die eine bedarfsgerechte Regelung ermöglichen. Die Gutachter gehen davon aus, dass der Anteil von Zusatzerzeugern insgesamt abnehmen wird; insbesondere, weil auch das „Komfortkriterium" abnimmt.

Fazit

Da bei einer Holzheizung hohe Temperaturen erreichbar sind, sollte die vor allem in Gebäuden zum Einsatz kommen, die auch langfristig keinen Niedertemperaturbetrieb erlauben, z. B. Denkmale (nach Ausführung aller möglichen baulichen Maßnahmen). Für den Betrieb von Nahwärmenetzen und die damit verbundenen Verluste an das Erdreich erscheint den Gutachtern Holz als zu wertvoll, weil begrenzt.

Eine finanzielle Förderung – vor allen in der berechneten Höhe – erscheint in Anbetracht des noch verfügbaren Biomassebudgets nicht angebracht. Aufgrund der günstigen Emissionsbilanz scheint eine Bepreisung der anderen Energieträger sinnvoller.

3.3.4 Konventionelle Nah- und Fernwärmesysteme

Die Verbreitung von konventioneller Nah- und Fernwärme, d. h. von Hochtemperaturwärmenetzen, beschränkt sich zumeist und historisch gewachsen auf dicht besiedelte urbane Räume. Angeschlossen sind vor allem Mehrfamilienhäuser, vgl. auch Anhang 5.6.2. Etwa 20 % der Mehrfamilienhäuser werden nach der Datenerhebung von Cischinsky und Diefenbach [7] über ein Wärmenetz versorgt.

Mit der Diskussion über die „Wärmewende" prallen sehr unterschiedliche Meinungen zum Thema „Wärmenetze" aufeinander: vom Ausbau bis Rückbau.

Nachfolgend werden zunächst die typische Dämmung sowie die sich ergebenden Netzverluste besprochen. Anschließend wird anhand der Typgebäude unter heutigen Randdaten der Umstieg auf eine Wärmenetzlösung behandelt. Abschließend werden die Lösungen „Netzausbau" oder „Dezentralisierung" diskutiert.

Leitungsdämmung und Netzverluste

Wärmenetze werden in Deutschland regulär im Erdreich verlegt. Der heute verwendete Dämmstoff der Mantelrohre ist PUR Hartschaum. Seine Wärmeleitfähigkeit verschlechtert sich ausgehend von sehr guten Anfangswerten um λ = 0,022 bis 0,028 W/(mK) über die Lebensdauer von 30 Jahren in den Bereich auf λ = 0,026 bis 0,038 W/(mK).

Die AGFW (früher Arbeitsgemeinschaft Fernwärme, heute Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.) empfiehlt Dämmdicken lt. Tabelle 90 und sieht die "Stufe 1" als üblichen Standard an. Die Dämmqualitäten der "Stufe 1" sind insbesondere bei großen Durchmessern geringer als die Anforderungen der Energieeinsparverordnung an Heizungs- oder Trinkwarmwasserleitungen im unbeheizten Bereich. Die EnEV stellt jedoch keine Anforderungen an erdreichverlegte Leitungen.

Rohrinnendurchmesser di, in [mm]	Dämmdicke $d_{DÄ}$, in [mm]			Verhältnis $d_{DÄ}$ / di		
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
28,5	26	36	43	91 %	126 %	151 %
54,5	30	37	47	55 %	68 %	86 %
82,5	33	43	52	40 %	52 %	63 %
107,1	40	52	64	37 %	49 %	60 %
210,1	43	62	68	20 %	30 %	32 %
393,7	68	102	146	17 %	26 %	37 %
595,8	83	132	182	14 %	22 %	31 %

Tabelle 90 Dämmung von Fernwärmeleitungen nach AGFW, eigene Darstellung nach [217]

Für nicht konzentrische Rohrdämmungen oder Trassen mit 2 Leitungen in einer Dämmhülse liegen die resultierenden Werte in ähnlicher Größenordnung (es gelten die gleichen energetischen Standards), jedoch lassen sich aufgrund der Bauform evtl. Einsparungen bei der Verlegung der Netze erzielen.

Der Verteilverlust von Wärmeleitungen ergibt sich analog zu dem der Heizungsleitungen im Gebäude. Es werden mittlere Medien- und Erdreichtemperaturen für die Berechnung zugrunde gelegt. Typische auf die Trassenlänge bezogene Ergebnisse zeigt Tabelle 91, jeweils für zwei separate, parallel im Erdreich verlegte Leitungen.

Beschreibung		Wärmeverlust, bezogen auf 1 m Trassenlänge, in kWh/(m · a)
Netze für Betrieb von Heizung und Prozesswärme (z. B. Trinkwassererwärmung)	schlechte Dämmung, Netztemperaturen ca. 80 - 100°C	350
	übliche Dämmung, Netztemperaturen ca. 70 - 90°C	250
	gute Dämmung, Netztemperaturen ca. 60 - 80°C	200
Netze für reinen Heizbetrieb	schlechte Dämmung, Netztemperaturen ca. 80 - 100°C	200
	übliche Dämmung, Netztemperaturen ca. 70 - 90°C	150
	gute Dämmung, Netztemperaturen ca. 60 - 80°C	100

Tabelle 91 Längenbezogene Wärmenetzverluste [eigene Darstellung]

Der Nutzungsgrad ist das Verhältnis von gelieferter Energiemenge zum Energieeinsatz. Üblich ist die Angabe von Jahreswerten. Je geringer die Anschlussleistungen am Netz, desto schlechter der Jahresnutzungsgrad. Eine Querauswertung verschiedener real gebauter Netze ergibt die in Abbildung 87 abgeleitete Regressionsformel. Maßgeblich ist die Wärmeleistungsliniendichte, d. h. das Verhältnis der maximalen Anschlussleistung der Verbraucher zur Länge der Trasse. Die AGFW kommt bei einer Auswertung von 1324 Netzen im Bundesgebiet zu einem mittleren Nutzungsgrad von 88 %. Die durchschnittliche Trassenlänge je Hausstation liegt bei 58 m, die durchschnittliche Leistung bei 138 kW. Dies führt zu einer Wärmeleistungsliniendichte von knapp 2,4 MW/km [78].

Jedoch schneiden Niedertemperaturnetze sowie neuere Trassen besser ab, z. B. das 1999 errichtete Stadtviertelnetz in Hannover Kronsberg. Die Einschätzung bestehender Netze lässt sich mit Wärmemengenmessungen einfach realisieren. Häufig sind bereits an der Abnehmerseite des Netzes Zähler zur Abrechnung installiert. Daher wird lediglich ein weiterer Zähler am Netzeinspeisepunkt benötigt.

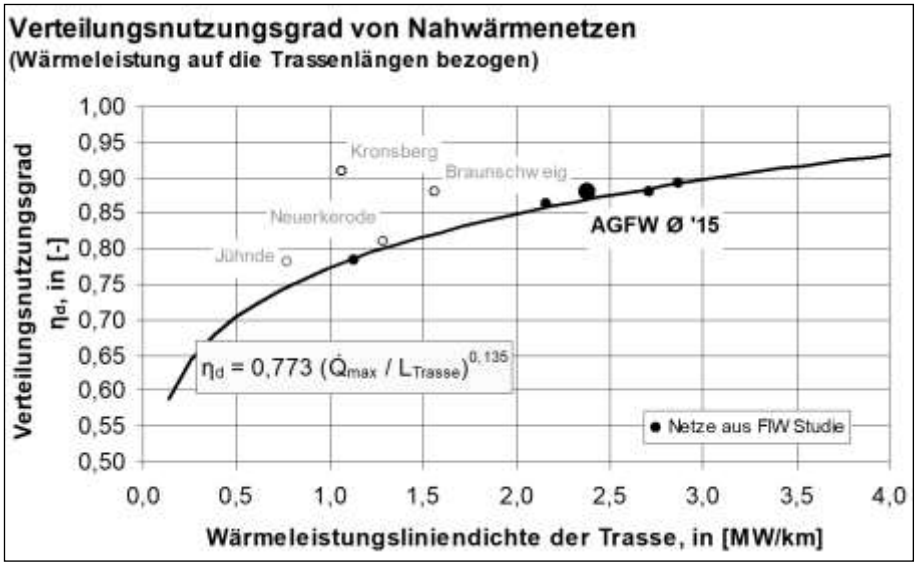


Abbildung 87 Verteilungsnutzungsgrad von Nahwärmenetzen nach Wärmeleistungsliniendichte, Grafik aus [218]

Flächenbezogene Wärmeverluste ergeben sich aus einem Bezug auf die Fläche der angeschlossenen Verbraucher. Die Verluste liegen außerhalb der Gebäudehülle, so dass diese Wahl nicht sofort offensichtlich ist. Jedoch lässt sich das Ergebnis problemlos mit gebäudeinternen Kennwerten vergleichen und in Relation setzen.

Typische Werte je nach Siedlungsstruktur des zu versorgenden Gebietes zeigt Tabelle 92. Es wird deutlich, dass mit abnehmender Besiedlungsdichte nennenswerte Verteilverluste entstehen, die in der Größenordnung des Raumheizwärmeverbrauchs neuer Niedrigenergie- und Passivhäuser liegen.

Siedlungstyp	bezogene Trassenlänge	jährlicher Wärmeverlust	Verteilverlust bezogen auf die beheizte Fläche
	[m/Wohneinheit]	[%]	[kWh/(m²a)]
Einfamilienhaussiedlung niedriger Dichte	14 - 25	12 - 17	25 - 45
EFH-Siedlung hoher Dichte und Reihenhäuser	6 - 14	9 - 12	15 - 30
Mehrfamilienhäuser in mittlerer Dichte (3-5 Geschosse)	6 - 14	7 - 9	5 - 15
Mehrfamilienhäuser in hoher Dichte (Zeilenbebauung, Hochhäuser)	2 - 6	5 - 7	2 - 10

Tabelle 92 Netzlänge nach Siedlungsstruktur [eigene Darstellung] nach [78]

Würden mit Hilfe der Beispielgebäude aus Anhang 3.1.1 Siedlungen konzipiert, ergeben sich exemplarisch folgende Fernwärmenutzungsgrade, wenn von den Durchschnittsgebäuden (mehrheitlich wenig saniert) ausgegangen wird:

„Vorstadt heute“
- Basis: MFH Durchschnittsgebäude
- Wärmebedarf (ohne Erzeugerverluste) 125 kWh/(m²a), vgl. Tabelle 41
- Verlust Leitungstrasse 10 kWh/(m²a)
- zu produzierende Wärme: 135 kWh/(m²a)
- Nutzungsgrad Wärmenetz: 93 %

„Dorfstruktur heute“
- Basis: EZFH Durchschnittsgebäude
- Wärmebedarf (ohne Erzeugerverluste) 150 kWh/(m²a), vgl. Tabelle 41
- Verlust Leitungstrasse 35 kWh/(m²a)
- zu produzierende Wärme: 185 kWh/(m²a)
- Nutzungsgrad Wärmenetz: 81 %

Insbesondere in der „Dorfstruktur“ machen sich die großen Entfernungen deutlich bemerkbar. Der Aufbau von Bioenergiedörfern folgt dennoch dieser Logik und akzeptiert die sehr geringen Nutzungsgrade. Das Beispieldorf „Jühnde“ ist in Abbildung 87 mit eingetragen. Hier werden nicht einmal 80 % erreicht. Problematisch ist die energetische Sanierung der Gebäude.

Nach der baulichen Sanierung auf „gutes“ bis „bestes“ Niveau, wie in im Anhang 3.2 beschrieben, ändert sich das Bild wie folgt:

„Vorstadt Zukunft“
- Basis: MFH „gut“ bis „best“
- Wärmebedarf (ohne Erzeugerverluste) 60 bis 70 kWh/(m²a), vgl. Tabelle 41
- Verlust Leitungstrasse 10 kWh/(m²a)
- Nutzungsgrad Wärmenetz: 86 bis 88 %

„Dorfstruktur Zukunft“
- Basis: EZFH „gut“ bis „best“
- Wärmebedarf (ohne Erzeugerverluste) 55 bis 75 kWh/(m²a), vgl. Tabelle 41
- Verlust Leitungstrasse 35 kWh/(m²a)
- Nutzungsgrad Wärmenetz: 61 bis 68 %

Die Nutzungsgrade der Leitungsnetze sinken beträchtlich. Zum Ausgleich wäre ihre Wärmeabgabe an das Dämmniveau der Gebäude anzupassen (Logik: halbieren sich die Wärmeabnahmen der Gebäude, sind ebenfalls halb so hohe Netzverluste erforderlich). Da – bis auf wenige Ausnahmen – von Leitungen im Erdreich auszugehen ist, erfordert die nachträgliche Dämmung eine Öffnung der Rohrgräben. Anschließend werden Dämmschichten erhöht oder eine komplett neue Dämmung angebracht. Im Normalfall ist dies so aufwändig, dass die Verbesserung der Dämmung nur in Angriff genommen wird, wenn das Netz ohnehin repariert oder ausgetauscht wird. Das bedeutet: die einmal gewählte Dämmschichtdicke ist für die gesamte Lebensdauer relevant.

Die Einsparpotentiale durch verminderte Betriebszeiten ergeben sich bei einer Sommerabschaltung – sofern die Nah- und Fernwärme nicht für die Warmwasserbereitung benutzt wird. Liegenschaften mit diesen Randdaten gibt es in der Praxis nicht häufig, da die jährlich übertragene Wärmemenge entsprechend geringer ist, was bei praktisch gleichem Installationsaufwand zu unwirtschaftlicheren Randdaten führt. Im Nichtwohnbau, z. B. im Umfeld von Hochschulen sind solche Netze zu finden.

Eine erfolgversprechende Strategie zur Verlustverminderung ist die Installation einer „kalten Nah- bzw. Fernwärme“, siehe Anhang 3.3.5.

Bewertung der Netzanschlüsse in den Typgebäuden

In den Typgebäuden werden Wärmenetzanschlüsse abgebildet, da ein nennenswerter Anteil von Gebäuden sie aufweist. Die Vorverluste sind in der Bewertung der Fernwärme enthalten (Preis, Emissionsfaktor) und werden daher nicht separat ermittelt.

Für Übergabestationen werden Effizienzen als Nutzungsgrade festgelegt. Der Effekt einer Qualitätssicherung – in Form von Dämmung aller Armaturen und Anschlussleitungen – wird positiv berücksichtigt.

- Nutzungsgrad mit Qualitätssicherung: $\eta_a = 0{,}99$
- Nutzungsgrad ohne Qualitätssicherung: $\eta_a = 0{,}98$

Einbau einer Fernwärme in ein durchschnittliches Gebäude

Ein Wärmenetzanschluss kommt vor allem für MFH in urbanen Räumen infrage. Aus heutiger Sicht wäre die Versorgung mit einem Gaskessel ein repräsentativer Ausgangszustand, den Netzanschluss zu untersuchen. Es wird mit Vollkosten gerechnet, da diese Umstellung nach Ansicht der Gutachter nicht „sowieso“ im Rahmen defekter Alt-Erzeuger erfolgt.

Es werden zwei repräsentative Fälle unterschieden, damit nicht alle Kombinationen gerechnet werden müssen: das durchschnittliche Gebäude mit Gas-NT-Kessel sowie ein auf besten Standard saniertes mit Gas-Brennwertkessel, siehe schematische Abbildung 88 und Abbildung 89.

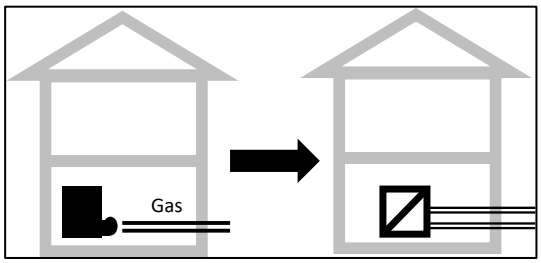


Abbildung 88 Schema – Einbau einer Fernwärme in ein Durchschnittsgebäude mit Gas-NT-Kessel [eigene Darstellung]

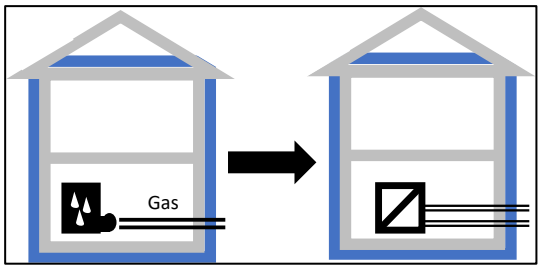


Abbildung 89 Schema – Einbau einer Fernwärme in ein Durchschnittsgebäude mit Gas-Brennwertkessel [eigene Darstellung]

Die Ergebnisse für die Mehrfamilienhäuser zeigt Tabelle 93. Im Vergleich zu einem alten Gas-NT-Kessel sinkt die Endenergie sehr deutlich, weil die Erzeugerverluste entfallen. Dieser Vorteil nimmt bei dem Vergleich mit dem Gas-Brennwertkessel ab.

			MFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Ersatz eines Gas-Kessels durch einen Netzanschluss (Gebäude zentral versorgt, ohne PV und Solarthermie)			im Ø-Gebäude, vorher Gas-NT	im „best"-Gebäude, vorher Gas-Brennwert
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	152	61
	nachher	kWh/(m²a)	123	57
Investition	Vollkosten	T€	7,1	5,5
Emissionsminderung, Wärme		%	-7	8
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	238	k. A. möglich
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1148	887
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	486 %	480 %
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	1143	k. A. möglich

Tabelle 93 Auswertung Wärmenetzumschluss von MFH auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Für das Altgebäude ist eine Emissionsminderung von 7 % festzustellen, wenn die heutige durchschnittliche Nah- und Fernwärme zugrunde gelegt wird. Allerdings ergeben sich wirtschaftliche Verluste. Diese sind nicht mit einem Investitionskostenzuschuss zu beseitigen (er läge bei fast 500 %), denn Ursache sind die deutlich höheren Energiepreise und damit die laufenden Kosten – nicht die Kapitalkosten. Ein Emissionspreis würde das Problem beheben. Dieser ist allerdings mit fast 1150 €/t sehr hoch – Erdgas würde damit heute 30 Cent/kWh kosten.

In dem Gebäude mit bestem Baustandard ergibt sich keine Emissionsminderung unter heutigen Randdaten. Somit ist diese Maßnahme nicht weiter relevant.

Für die Typgebäude zeigt sich: da die heutige mittlere Fernwärme (vgl. Kenndaten in 5.5) keine nennenswerten Vorteile hinsichtlich der Emissionen aufweist (das Niveau entspricht etwa dem Erdgas), jedoch – bis auf Strom – den höchsten Energiepreis aufweist, wäre lediglich ein Vorteil bei den Investitionskosten gegeben. Die untersuchten Beispiele zeigen diesen nicht. In der Praxis müssten die Gebäude deutlich größer sein als die Typgebäude.

Nutzung erneuerbarer Energien: 100 % Netzverbund versus dezentrale Systemen

Stehen nur noch PV und Windkraft als Energiequellen zur Verfügung, stellt sich die Frage, welcher Energieträger bzw. welche Technologie die Basis einer künftigen Fernwärme sein soll. In Frage kommen:

- Solarthermie
- Kessel oder KWK-Anlagen und Brennstoffe, die auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellt wurden
- regenerativer Strom, der Wärmepumpen antreibt
- jegliche Form industrieller Abwärme (Müll, Prozesswärme usw.)

Bis auf die zuletzt genannte Quelle weisen alle anderen die gleichen Restriktionen auf, die auch für die Direktverwendung am Gebäude gelten: saisonale Schwankungen (Solarthermie, PV-Strom), verlustbehaftete Vorketten (künstliche Brennstoffe). Es bleibt daher die Frage: sind die zusätzlichen Netzverluste gerechtfertigt, um die sich ergebenden geringeren Investitionskosten von Großanlagen gegenüber vieler Kleinanlagen zu rechtfertigen?

Nach Ansicht der Gutachter ist der Ausbau von Nah- und Fernwärme („Fernwärme 4.0“) in Frage zu stellen. Dies gilt v. a. dann, wenn die Nah- und Fernwärme allein zur Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung vorgesehen wird. Dies wird nachfolgend begründet.

Bereits 2005 hat das IWU auf negative Feldergebnisse für Nahwärmenetze mit Solarthermieunterstützung und BHKW-Technologie hingewiesen [219]:

> *„Aufgrund der hohen anteiligen Wärmeverluste des Nahwärmesystems und des geringen Deckungsanteils des BHKW lassen sich, unabhängig von der Bewertungsmethode für die Kraft-Wärme-Kopplung, keine befriedigenden Werte für die Gesamteffizienz der Wärmeversorgung erreichen.“*

Auch für die Gartenhofsiedlung Lummerlund in Wiesbaden ergaben sich folgende Ergebnisse [219]:

> *„Der Jahresnutzungsgrad der Wärmeverteilung in der Siedlung ergab sich zu 59 % (Basis: Gesamtverluste) bzw. 73 % (Basis: verbleibende Verluste nach Abzug der nutzbaren Gewinne)“*

Die Tatsache, dass Netze teils beträchtliche Verluste aufweisen, ist messtechnisch belegt. Über die Frage, ob zur vermehrten Nutzung erneuerbarer Energien trotzdem ein Netzausbau notwendig ist oder auf die dezentrale Verwendung (v. a. Wärmepumpen in Gebäuden) gesetzt wird, herrscht in der Fachwelt dennoch Uneinigkeit.

An zwei Beispielveröffentlichungen soll dies verdeutlicht werden. Sowohl im Umweltgutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen [41], als auch in dem IWU-Thesenpapier „Fernwärme für eine klimaneutrale Wärmeversorgung“ [220] finden sich widersprüchliche Aussagen zum Potenzial von Nah- und Fernwärmesystemen für zukünftige Klimaneutralität.

Das Thesenpapier des IWU [220] liefert nachfolgende Aussage, welche jedoch im Widerspruch zu den Feldergebnissen des IWU, welche vorab zitiert wurden, steht:

> *„Für den Gebäudebereich wurde in verschiedenen Studien der Weg zur Minimierung der Treibhausgasemissionen bereits untersucht – auch in einer aktuellen Untersuchung unseres Instituts. Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigen, dass dazu die Energieverbräuche deutlich reduziert und die verbleibenden Verbräuche sehr weitgehend auf regenerative Energien umgestellt werden müssen. Dies gilt auch im Fall der leitungsgebundenen Wärmeversorgung.*
>
> *Bisher werden ca. 14 % der Gebäude in Deutschland über Wärmenetze (Fern- oder Nahwärme) versorgt. Auch hier müssen die Gebäude gedämmt werden, und die Netze müssen und können einen wichtigen Beitrag zur Klimaneutralität leisten. Dazu müssen sie in den nächsten 30 Jahren wesentlich ertüchtigt werden. Neue Wärmenetze können ebenfalls zur Erreichung der Klimaziele beitragen, wenn sie am richtigen Ort (in einer geeigneten Bebauungssituation) und auf die richtige Weise (mit geringen Wärmeverlusten und hohen Anteilen von Solar- und Windenergienutzung) installiert werden.*

Auch eigene Ergebnisse der Gutachter kommen zu folgender Erkenntnis [218] in der von den Gutachtern erstellten „Fernwärmestudie“. In dieser wurde die Thematik der Sektorkopplung verbunden mit Erzeugungssystemen aus KWK und mit entsprechenden Fernwärmenetzen ausführlich analysiert.

> *„In innerstädtischen Lagen, bei der Versorgung von Quartieren mit hoher Bebauungsdichte oder auch für denkmalgeschützte Gebäude oder Ensembles wird Fern- bzw. Nahwärme in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Wärmeversorgung von Gebäuden spielen. Dazu muss eine Reihe von Punkten für die Weiterentwicklung der Fern- oder Nahwärmeversorgung berücksichtigt werden.“*

Nachfolgende Vorschläge des IWU für zukünftige Erzeuger von Nah- und Fernwärme sind mit den zukünftig erforderlichen Potenzialen für den Ausbau erneuerbarer PV- und Windkraft-Kapazitäten abzugleichen [220].

„Die Energiequellen für Wärmenetze müssen überwiegend auf regenerative Energieträger umgestellt werden. Dies sind vor allem Wind- und Solarstrom (EE-Strom), aber auch Solarthermie und in begrenztem Umfang Biomasse sowie regional auch Abwärme. Um EE-Strom nutzen zu können, ist der Einsatz von Wärmepumpen erforderlich, da diese den Strom mit hoher Effizienz in Wärme umwandeln können
[…]
Die Fähigkeit zur Solar- und Windenergienutzung muss daher möglichst flächendeckend in allen Heizsystemen erreicht werden, auch in den Wärmenetzen.
[…]
Damit aber auch im Winter eine soweit wie möglich brennstofffreie Wärmeversorgung erreicht werden kann, ist die Einbindung von Windenergie notwendig. Im Hinblick auf die effiziente Nutzung von Windenergie zur Wärmeversorgung kommt Wärmepumpen zukünftig eine wichtige Rolle zu - auch in Wärmenetzen."

Anmerkung der Gutachter: Der Einsatz von Großwärmepumpen in Nah- und Fernwärmenetzen erfordert im Mittel höhere Vorlauftemperaturen als bei dezentral in den Gebäuden angeordneten Wärmepumpen, unabhängig von den eingesetzten Wärmequellen. Da die Effizienz von Wärmepumpen je 1 Grad Vorlauftemperaturänderung sehr stark vom Temperaturhub abhängt, kann dies nicht durch bessere Effizienzen (exergetische Wirkungsgrade) bei gleichzeitig zusätzlichen Speicher- und Netzverlusten von Großwärmepumpen für Fernwärmenetze gegenüber Kleinwärmepumpen in den Gebäuden kompensiert werden.

„Die nicht zu vermeidende Nutzung insbesondere von fossilen Brennstoffen sollte möglichst effizient in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erfolgen (Spitzenlastkessel nur für wirkliche Lastspitzen). Diese müssen zukünftig weitgehend stromgeführt betrieben werden, d. h. dürfen nur dann laufen, wenn im Stromnetz nicht genug Solar- und Windstrom zur Verfügung steht. […] Bei der Bewertung von Nah- der Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung müssen ausgewogene Verfahren eingesetzt werden. Ansätze, die für die Wärme aus KWK einen Primärenergieeinsatz bzw. Treibhausgasemissionen nahe Null berechnen (Stromgutschriftmethode, Enthalpiemethode), können hier nicht zur Orientierung dienen, da sie den Brennstoffeinsatz von der Wärme- in die Stromproduktion verschieben, so dass er bei der Wärmebewertung nicht mehr angemessen sichtbar wird […]." [220]

Anmerkung der Gutachter: Das zukünftig kritische Thema „KWK in einer klimaneutralen Energiewelt" wird im nachfolgenden Anhang 3.3.6 näher analysiert. An dieser Stelle weisen die Gutachter darauf hin, dass bei heutigem Einsatz von Erdgas in KWK-/BHKW-Anlagen dieses in kürzester Zeit durch PtX-Anlagen ersetzt werden müsste, um das nur noch minimal erlaubte CO_2-Emissionsbudget einhalten zu können.

„Neuartige synthetische, regenerative Brennstoffe z. B. aus Power-to-Gas-Anlagen können aus heutiger Sicht nur mit geringer Effizienz und zu hohen Kosten hergestellt werden. Es handelt sich um eine neue Technologie, die erst einmal im Markt eingeführt werden muss und dann vorrangig dort benötigt wird, wo keine direkte Nutzung von Solar-/Windstrom und Solarwärme möglich ist, d. h. in bestimmten Bereichen von Industrie und beim Verkehr. Für die Wärmeversorgung z. B. in Wärmenetzen sind diese Brennstoffe auf absehbare Zeit keine Option. Wenn sie später dennoch zur Verfügung steht, kann sie in Zeiten mit zu geringem Angebot von Sonnen- und Windenergie die direkte Nutzung dieser Energien sinnvoll ergänzen und den Verbrauch von fossilen Brennstoffen und Biomasse weiter zurückdrängen.

Um die zeitlichen Angebotsschwankungen bei den erneuerbaren Energien besser ausgleichen zu können, sind in Wärmenetzen zentrale Wärmespeicher erforderlich. Gleichzeitig erlauben diese auch eine größere Flexibilität beim stromgeführten Betrieb von KWK-Anlagen." [220]

Anmerkung der Gutachter: IWU weist zwar auf die Problematik „KWK in einer klimaneutralen Energiewelt" hin, nennt aber nachfolgend zusätzliche Aspekte, die den Vorteil von Netzen und Speichern in Nah- und Fernwärmesystemen zwar qualitativ begründen, aber quantitativ unter Berücksichtigung der hohen Wirkungsgradverluste der mit PtX verbundenen Umwandlungsketten nicht belegen (können).

„Wärmenetze bieten bei der Energiewende große Vorteile. Sie erlauben die Nutzung von Energieträgern, die einen hohen anlagentechnischen Aufwand erfordern (z. B. für die Abgasreinigung bei Biomassenutzung) und erlauben die Integration erneuerbarer Energien zu vergleichsweise geringen spezifischen Investitionskosten. Weiterhin kann aus heutiger Sicht nur mit Wärmenetzen die anfallende Abwärme bei der Deckung der verbleibenden Residuallast im Stromnetz (Kraftwerke, die für Systemdienstleistungen oder zum Ausgleich von Erzeugungsschwankungen bei erneuerbaren Energien dienen) in Form von Kraft-Wärme-Kopplung in der Breite genutzt werden." [220]

Anmerkung der Gutachter: viele aktuelle Beispiele zeigen, dass die Entkopplung der unterschiedlichen Wärme- und Stromlastprofile bereits heute vielen Fernwärmeversorgungsunternehmen große betriebswirtschaftliche

Probleme bereiten. Dies würde sich bei einer zukünftig primär durch volatil anfallenden PV- und Windstrom verstärken. Die Argumente „Pro Ausbau von Wärmenetzen“ werden weiter ausgeführt, obwohl die von den Gutachtern angesprochenen Widersprüche dadurch nicht aufgehoben werden [220]:

> *„Bei der Erweiterung bzw. Neuinstallation von Wärmenetzen sind noch weitere Aspekte zu berücksichtigen:*
>
> - *Die spezifische Wärmeabnahme je Gebäude muss und wird in den nächsten Jahrzehnten sinken. Damit nimmt die Bedeutung der Wärme- bzw. Verteilverluste weiter zu.*
> - *Wärmenetze bieten sich im Allgemeinen vor allem bei größeren Bebauungsdichten an, da hier die Netzlängen und damit die Verteilverluste pro versorgter Nutzfläche geringer sind.*
> - *Neue Netze müssen zur Begrenzung der Wärmeverluste einerseits mit niedrigen Vorlauftemperaturen umgesetzt werden, andererseits sind die Wärmeverluste durch höchste Standards bei der Leitungsdämmung weiter zu reduzieren (z. B. Dämmserie 3 oder Duoleitungen).*
> - *Für die Einbindung erneuerbarer Energien müssen die Netztemperaturen weiter reduziert werden. Bei Neubaugebieten sollten Niedertemperaturnetze mit Vorlauf-Temperaturen von höchstens 60°C umgesetzt werden. Als Folge niedriger Netztemperaturen sind die Konzepte für die Warmwasserbereitung dem zukünftigen Temperaturniveau anzupassen, wofür bereits Lösungen am Markt verfügbar sind. […].*
> - *Der Einbindung von Wärmepumpen in Wärmenetze kommt insbesondere wegen der Möglichkeit einer effizienten Windstromnutzung eine Schlüsselrolle zu. Auch in städtischen Gebieten müssen hierfür geeignete Wärmequellen erschlossen werden (Luft, Erdreich, Grund- bzw. Abwasser, Abwärme). […]*
> - *[…] Auch „kalte Netze“, die nicht der direkten Wärmeversorgung dienen, sondern Geothermie aus Erdwärmesonden oder Abwärme in die Wohngebiete transportieren, wo sie in dezentralen Wärmepumpen genutzt wird, stellen eine Option dar.*
> - *Bei Großsystemen können eine saisonale Pufferung von Sonnenenergie in sehr großen Wärmespeichern oder (in geologisch geeigneten Gebieten) die Nutzung von Tiefen-Geothermie eine Option darstellen. Auch hierfür ist in der Regel eine Anbindung innerstädtischer Netze an die Peripherie notwendig.*
> - *Falls in bestimmten Wärmenetzen eine Einbindung von Solarthermie und Wärmepumpen auf absehbare Zeit nicht möglich erscheint, sollte die Abschaltung der Netze und die temporäre dezentrale Warmwasserbereitung (über Solarthermie und / oder Wärmepumpen) im Sommer geprüft werden. […]*
> - *Durch eine regenerative Versorgung oder die energetische Verbesserung bei bestehenden Wärmenetzen entstehen in der Regel Mehrkosten gegenüber einer konventionellen Versorgung. […]“*

Anmerkung der Gutachter: Keiner der zusätzlich angeführten Aspekte belegt den Vorteil einer zentralen Nah- und Fernwärmeversorgung gegenüber dezentralen Lösungen. Allein der Vorschlag „Kalte Fernwärme“ geht aus Sicht der Gutachter in die Richtung einer langfristig ressourcenschonenden und klimaneutralen Lösung. Dieser Vorschlag wird deshalb in diesem Gutachten vertieft.

Fernwärme ist aufgrund der höheren Infrastrukturkosten (hohe Leistungspreise) seit Jahrzehnten teurer als Gaslösungen. Diese Preisentwicklung wird sich aus Sicht der Gutachter mit zunehmender Verbesserung der Gebäudestandards verstärken. Der sich daraus ergebende Widerspruch hinsichtlich zukünftiger Tarifstrukturen für Nah- und Fernwärme wird vom IWU nachfolgend erkannt, aber aus Sicht der Gutachter nicht gelöst:

> *„Es ist also energiepolitisch außerordentlich wünschenswert Nah- und Fernwärmesysteme, die das Energieversorgungssystem insgesamt effizienter machen, zu erhalten bzw. in geeigneten Situationen auszubauen. Dabei muss die Preisstruktur der Fernwärme die Durchführung der notwendigen Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz der Gebäude z. B. durch Wärmedämmung unterstützen. Hohe fixe Preiskomponenten wie Hausanschlusskosten und Grundpreise des Fernwärmesystems und niedrige Verbrauchskosten können aber dazu führen, dass sich die ökologisch wichtige Verminderung des Energiebedarfs eines gut gedämmten Hauses nicht ausreichend in eingesparten Energiekosten niederschlägt, denn die fixen Preiskomponenten müssen unabhängig vom Verbrauch bezahlt werden.*
>
> *Die Kostenstrukturen der Fernwärmeversorgung sollten daher immer einen niedrigen Verbrauch begünstigen. Dazu darf nur ein möglichst geringer Anteil der Fixkosten der Netze als Baukostenzuschuss, Grundgebühr oder Leistungspreis erhoben werden, ein möglichst großer Teil ist verbrauchsabhängig zu kalkulieren (wie beim Stromnetz).“ [220]*

Vielen angeführten Argumenten kann seitens der Gutachter nicht zugestimmt werden. Es wird von den Gutachtern bezweifelt, dass wegen der Begrenztheit des Ausbaus erneuerbarer Energiequellen wie PV und Windkraft die hohen zusätzlichen Verluste in Nah- und Fernwärmesystemen wirtschaftlich abgebildet werden können. Vielmehr müsste ein erhöhter Ausbau von PV- und Windkraftleistung bei einem verstärkten Einsatz von Nah- und Fernwärmesystemen vorgesehen werden, da bei langfristig guten Gebäudestandards der Anteil der Netzverluste immer weiter zunimmt.

Fazit

Der sinnvolle Einsatz von Netzlösungen sollte mit Hilfe wirtschaftlicher und ökologischer Analysen gefunden werden. In Anbetracht sinkender Wärmeabnahmen, welche sich aus der Gebäudemodernisierung ergeben, fallen Netzverluste deutlich mehr ins Gewicht als früher. Netzlösungen bieten sich an in Lieferungsstrukturen mit folgenden Randdaten [78]:

- große Besiedlungs- bzw. Abnehmerdichten,
- schlechte Baustandards, z. B. Gebäude unter Denkmalschutz, Prozesswärmebedarf,
- Einsatz von zentralen Erzeugern, die es für den Einzelabnehmer nicht gibt, z. B. eine Müllverbrennungsanlage,
- Einsatz von zentralen Erzeugern, die prinzipiell auch für Kleinanlagen verfügbar wären, aber deren Kosten bei Einzelbeschaffung unverhältnismäßig hoch wären oder deren Effizienz als Kleinanlage nicht (ausreichend) hoch ist, z. B. eine Holzhackschnitzelheizung
- Verfügbarkeit von Abwärme aus ohnehin stattfindenden (industriellen) Prozessen oder dauerhafter Kälteproduktion (Wärme-Kälte-Verschiebung)

Es werden künftig Siedlungsgebiete mit Wärmenetzlösungen verbleiben, v. a. in sehr stark verdichteten urbanen Räumen. Mit der zunehmenden Gebäudesanierung nehmen die geeigneten Siedlungsgebiete eher ab als zu.

Künftig ist vorrangig die gänzliche Vermeidung des Netzes zu untersuchen. Ein Wärmenetz außerhalb von Gebäuden führt zu einem Wärmeverlust an die Umwelt, den es ohne dieses Netz nicht gäbe. Ob sich trotz Netz ein energetischer, ökologischer oder wirtschaftlicher Vorteil ergibt, ist zu prüfen.

3.3.5 Kalte Nah- und Fernwärme

Die im vorangegangenen Kapitel angesprochene kalte Fernwärme als Wärmequelle von dezentral in den Gebäuden installierte Wärmepumpen vermeidet die bei höher temperierten Nah- und Fernwärmenetzen auftretenden und nicht zu vernachlässigenden Wärmeverluste. Deshalb wird nachfolgend das Thema Einsatz von „Kalten Fernwärmsystemen“ vertieft.

Netze dieser Art können sinnvoll sein, wenn Niedertemperaturabwärme aus ohnehin vorhandenen Prozessen nahezu kostenlos zur Verfügung steht oder ausreichende Flächen für Erdkollektoren oder Erdsonden wirtschaftlich erschlossen werden können.

In der Studie „Dynamis“ von Wagner et al. [137] wird das Flächenpotenzial von Luft-Wasser- und Erdreich-Wärmepumpen für EZFH und MFH abgeschätzt. Danach können EZFH zu 89 % und MFH zu 80 % aufgrund der Restriktionen Schallausbreitung (Luft-Wasser-Wärmepumpen für EZFH: max. 65 % - für MFH: max. 67 %) bzw. Flächenverfügbarkeit in Nähe der Gebäude (Erdreich-Wärmepumpen für EZFH: max. 74 % - für MFH: max. 49 %) mit Wärmepumpen ausgerüstet werden.

Für die restlichen Gebäude ist das Potenzial von kalter Nahwärme aus weiter entfernt nutzbaren kalten Wärmequellen zu untersuchen. Begrenzend sind hierbei die vielfach höheren Volumenströme, die bei z. B. angenommener Auskühlung von nur 5 bis 8 K gegenüber 20 bis 30 K bei konventioneller Nah- und Fernwärme erforderlich sind. Demgegenüber steht der Vorteil, dass der Verzicht auf eine Wärmedämmung der kalten Fernwärmerohre größere Rohrquerschnitte bei gleichem Platzbedarf im Vergleich zu konventionellen Nahwärmenetzen erlauben.

Folgendes Rechenbeispiel belegt dies:

Bei konventioneller Nahwärme mit Auslegung 80/60°C und einer Geschwindigkeit des Heizwassers von typisch 1,5 m/s ergeben sich für einen Rohrinnendurchmesser von 107,1 mm bei Dämmung nach Stufe 2 Außenmaße des „Gesamtrohrs“ von ca. 220 mm. Für kalte Nahwärme mit Auslegung 10/5°C (vereinfacht Wasser und nicht Sole angenommen) könnte also ein gängiges Rohr mit Rohrinnendurchmesser von 210 mm ohne Dämmung eingesetzt werden. Unter diesen Annahmen könnte in dem kalten Nahwärmerohr ein gerundet dreimal so hoher Volumenstrom bei gleichen hydraulischen und elektrischen Leistungserfordernissen für die Pumpen gefördert werden.

Dadurch wird zwar der Unterschied der transportierbaren Wärmeleistungen aufgrund der unterschiedlichen Temperaturspreizungen (1:4) nicht vollständig kompensiert, aber unter Berücksichtigung der angenommenen Wärmepumpen muss auch nicht die gesamte Heizlast aus dem kalten Netz, sondern je nach Arbeitszahl ⅔ oder ¾ abgedeckt werden. Die hydraulische Auslegung kalter Nahwärmenetze ist also vergleichbar mit der Auslegung von Kaltwassernetzen (6/12°C) für den Kältetransport; nur, dass letztere selbstverständlich zu dämmen sind.

Für kalte Fernwärme ergibt sich in naher Zukunft aus Sicht der Gutachter ein weiterer, aber begrenzter Forschungsbedarf, um die Vorteile gegenüber „warmen bzw. heißen Netzen" grundsätzlich zu belegen. In diesem Gutachten wird deshalb kalte Nah- und Fernwärme nicht gesondert behandelt, sondern es wird für Erdreich-Wärmepumpen vorausgesetzt, dass entsprechende Quellen zur Verfügung stehen.

3.3.6 Kraft-Wärme-Kopplung

Aus heutiger Sicht konkurrieren zwei technische Systeme zur Strom- und Wärmeproduktion:

- die gekoppelte Produktion von Wärme und Strom, z. B. in einem BHKW oder in einem Heizkraftwerk, deren Abwärme z. B. als Nah- und Fernwärme genutzt wird
- die getrennte Stromerzeugung in einem Kraftwerk ergänzt durch eine dezentrale Wärmeerzeugung, z. B. in einem Gasbrennwertkessel.

Brennstoffzellen-Technologien werden wegen ihres immer noch nicht erreichten „Standes der Technik" in diesem Gutachten nicht berücksichtigt.

Auch bei Verwendung künftig regenerativ produzierter künstlicher Brennstoffe (Wasserstoff, PtX) sind diese beiden Alternativen denkbar. Beide Systeme haben Vor- und Nachteile, die nachfolgend erläutert werden.

Für die heutige Nah- und Fernwärme sind folgende Randdaten gegeben – die in Klammern angegeben Zahlen geben die anteilige Einspeisung von Wärme in 1324 von der AGWF ausgewerteten Netzen an: [221]

- Erzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung KWK (83 %)
- Erzeugung ohne KWK, d. h. Heizwerke (15 %)
- Nutzung industrieller Abwärme (2 %)

Für reine Heizwerke gilt: aus früherer Sicht (z. B. einer zentralen Koksfeuerung) konnte argumentiert werden, dass der zentrale Wärmeerzeuger einen so großen Nutzungsgradvorteil gegenüber den Einzelerzeugern hat, dass die Netzverluste aufgewogen werden. Das ist aus heutiger Sicht praktisch nie der Fall. Bleibt also nur der wirtschaftliche Vergleich incl. Einbezug der Investition, Wartungs- und Unterhaltskosten.

Wärme aus KWK: sie wird vielfach als ohnehin verfügbare Abwärme einer Stromproduktion angesehen, wobei dies nicht immer korrekt ist. Insbesondere in GUD-Kraftwerken reduziert die Wärmeentnahme den elektrischen Wirkungsgrad, was bei ökologischen und wirtschaftlichen Vergleichen zu bedenken ist. Werden die Netzverluste bis zu den Abnehmern hinzuaddiert, gibt es zukünftig eine immer weiter steigende Anzahl von Versorgungsgebieten, in denen die reine Stromauskopplung ohne Wärmenutzung sinnvoller ist, um kurzfristig auf volatile Lastanforderungen flexibel zu reagieren. Die Gebäude erhalten dann lokale Einzelerzeuger, z. B. Gaskessel bzw. zukünftig Elektrowärmepumpen.

In der Studie „Dynamis" von Wagner et al. [137] wird dieses Thema ausführlich behandelt. Auch hier wird KWK als auslaufende Übergangstechnologie bewertet.

Künftige Herkunft der Brennstoffe

Die gesamte Problematik der zukünftig notwendigen Umstellung von fossiler auf 100 % erneuerbarer Energie beschreibt Kuck [132]. Die Veröffentlichung wird nachfolgend auszugsweise wiedergegeben. aus ihr lässt sich die Rolle der künftigen KWK ableiten.

„Fossile Brennstoffe werden zentral gewonnen […]. Regenerative Energie wird dagegen in der Fläche eingesammelt und umgewandelt. Das bedeutet, dass die Gewinnung regenerativer Energie einen wesentlich größeren Einfluss auf unser Landschaftsbild hat als die Gewinnung fossiler Energie, die wir zudem größtenteils importieren. Es bedeutet auch: Der ländliche Raum muss energieüberschüssig werden, um die Ballungszentren zu versorgen, ähnlich wie es heute schon bei Nahrungsmitteln der Fall ist.
[…]
Fossile Brennstoffe haben eine hohe Energiedichte und sind lagerfähig. Sie sind deshalb bestens geeignet als Energiespeicher. In einer fossilbasierten Energiewirtschaft sind Speicher für elektrische Energie weitgehend entbehrlich, denn sie wird aus lagerfähigen Brennstoffen erzeugt. Das „Ernten" des Stroms aus dem wechselnden Angebot von Wind und Sonne bedeutet dagegen: Es müssen „Stromspeicher" geschaffen werden, um Angebot und Nachfrage zeitlich zu entkoppeln. Diese Aufgabe tritt im zeitlichen Verlauf der Umstellung nicht sofort auf, da die fossilen Brennstoffe noch eine Weile als Speicher zur Verfügung stehen, aber sie verschärft sich sehr gegen Ende der Umstellung. Der Bedarf an Stromspeichern lässt sich reduzieren durch die Flexibilisierung des Verbrauchs. Früher war es wirtschaftlich attraktiv, Strom möglichst gleichmäßig zu verbrauchen. In der neuen Energiewelt wird es attraktiv sein, Strom flexibel zu beziehen: Viel Bezug an sonnigen windigen Tagen, wenig bei Flaute und bedecktem Himmel.
[…]
Der Flächenertrag von regenerativen Energieträgern unterscheidet sich erheblich […] Konsequenz: Aus Biomasse ist auch ein sinnvoll reduzierter Energieverbrauch Deutschlands nicht darstellbar. Biomasse wird es natürlich in einer zu 100 % regenerativen Energieversorgung geben, aber nicht signifikant mehr als heute. Ausbaubar sind nur Photovoltaik und Wind, gewisse Beiträge werden auch von der Solarthermie kommen. Das bedeutet: Statt wie bisher Brennstoff steht Strom am Beginn unserer Energiewandlung und -nutzung. Strom ist die neue „Primärenergie"
[…]
Wenn wir versuchen, die alten Verhältnisse wiederherzustellen, indem wir aus dem geerntetem Strom erst einmal Brennstoff herstellen, um diesen dann in der üblichen Weise einzusetzen, etwa in Gaskesseln oder Verbrennungsmotoren, werden wir mit verlustreichen Umwandlungsketten bestraft (s. folgende Abbildung)."

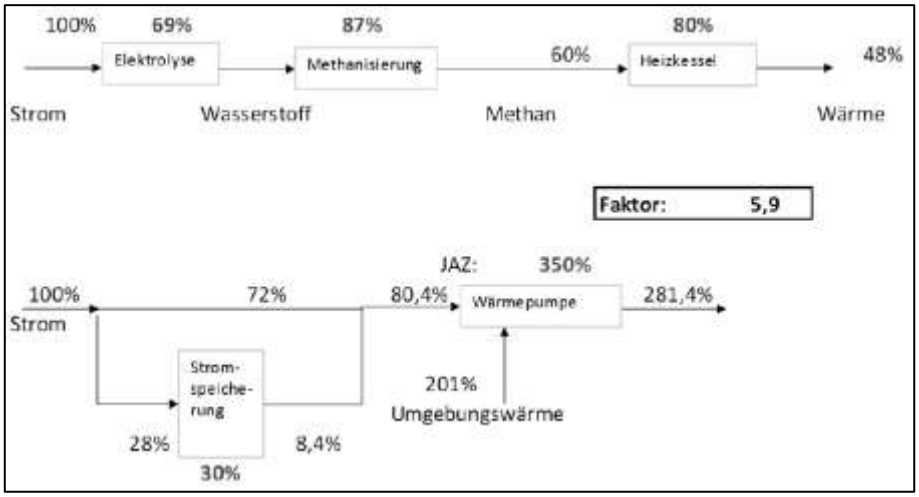


Abbildung 90 Vergleich der Wirkungsgradkette „Strom zu Heizwärme" über Brennstoffpfad und Strompfad, Grafik aus [132]

„[…] Die Erklärung ist, dass jede Energie zerlegt werden kann in einen Anteil, den man in beliebige andere Energieformen umwandeln kann („Exergie"). und einen Anteil, mit dem das nicht möglich ist („Anergie"). Strom ist 100 %ig in alle anderen Energieformen wandelbar. Bei der Energieform „Wärme" ist die Aufteilung dieser Anteile dagegen vom Temperaturniveau abhängig […]

Bei jedem Umwandlungsschritt bleibt zwar die Energie erhalten (so verlangt es der Energieerhaltungssatz), aber sie wird entwertet, Exergie wird zu Anergie. Hinzu kommt: Wir haben uns daran gewöhnt, die Anergie, die wir z. B. zum Heizen benötigen, durch Vernichtung von Exergie „herzustellen". Das ist ein verlustreicher Weg, der keine Zukunft haben wird. Die Zukunft gehört den intelligenten, exergieschonenden Prozessen wie z. B. der Wärmepumpe (s. folgende Abbildung)."

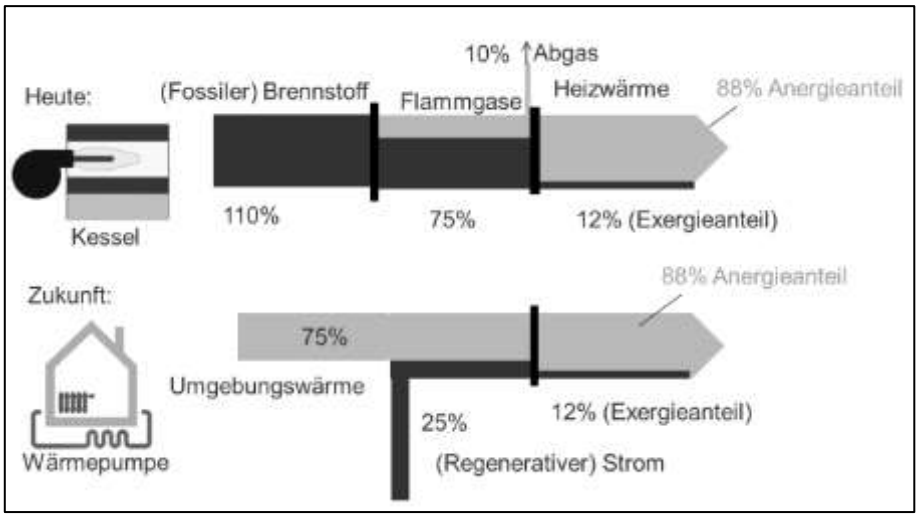


Abbildung 91 Herkunft der Exergie und Anergie – heute und künftig, Grafik aus [132]

„Die regenerativen Energien ernten uns bereits die intelligente, edle Energieform „elektrischer Strom". Aufgabe ist es, unsere Energiewirtschaft an diese intelligente Energieform anzupassen. Das ist der Weg von der Energiewirtschaft zur Exergiewirtschaft."

Künftige Energiewirtschaft und die Rolle der KWK

Kuck stellt anschließend die Frage, ob eine sparsame fossilbasierte Energiewirtschaft oder eine 100 % regenerative Energiewirtschaft das Ziel der künftigen Handlungsrichtung sein soll. Er ordnet die Rolle der KWK ein [132].

„Eine regenerative Energiewirtschaft unterscheidet sich fundamental von einer fossilbasierten Energiewirtschaft, auch von einer sparsamen fossilbasierten Energiewirtschaft, einem Idealbild, das wir in vielen Teilen unserer technischen und politischen Bemühungen noch verfolgen. Beispiele:

- *In einer fossilbasierten Energiewirtschaft sind elektrische Wärmepumpen eine zweifelhafte Sache, denn sie machen ja Wärme aus Strom, der vorher Wärme gewesen war (mit einer verlustreichen Umwandlungskette). In der neuen Welt sind elektrische Wärmepumpen die intelligenten Wandler des regenerativ geernteten Stroms […]*
- *In einer fossilbasierten Energiewirtschaft fährt man mit einem sparsamen Verbrenner genauso gut wie mit einem Elektromobil oder sogar besser, denn fossilbasiert ist jede Kilowattstunde Strom aus 2-3 Kilowattstunden Brennstoff entstanden. In der neuen Welt ist Elektromobilität etwa 6-mal so effizient wie der Umwandlungspfad über „strombasierten Brennstoff".*
- *Das Ideal der fossilbasierten Energiewirtschaft, die wärmegeführte Kraft-Wärmekopplung (KWK), passt nicht mehr in die neue Welt, denn sie erzeugt zur Erfüllung ihrer Wärmeaufgabe „Zwangsstrom", der keine fossilen Kraftwerke mehr verdrängt, sondern PV und Wind.*
- *Wärmedämmung von Gebäuden ist in einer fossilbasierten Energiewirtschaft weniger wichtig, wenn diese mit Wärme aus (zentraler oder dezentraler) Kraft-Wärme-Kopplung versorgt werden. In einer 100 % regenerativen Energiewirtschaft ist dagegen perfekte Wärmedämmung gefragt, weil sie durch elektrische Wärmepumpen versorgt werden, und regenerativer Strom kommt im Winter praktisch nur aus Windkraftwerken oder – teuer – aus dem saisonalen Stromspeicher.*
- *„Heiße" Fernwärmenetze zur Verteilung zentral erzeugter KWK-Wärme sind ein weiteres Ideal einer sparsamen fossilbasierten Energiewirtschaft. In der neuen Welt passen sie nicht mehr ins Konzept – ihre Verluste sind im Vergleich zum niedrigen Wärmebedarf der wärmegedämmten Zukunftshäuser viel zu hoch.*

Abschließend stellt er als wichtigste Maßnahme zur Zielerreichung einer langfristig 100 % regenerativen Energiewirtschaft als wichtigste Handlungsrichtungen und Empfehlungen fest [132]:

- *„Die EEG-Kosten müssen auf die fossilen Brennstoffe umgelegt werden. Kohle, Öl Gas müssen teuer werden, Strom muss günstiger werden (beim Verbraucher, nicht an der Börse!).*
- *Speicherkraftwerke sind den anderen Kraftwerken gleichzustellen, d. h. sie müssen vollständig von Netznutzungsentgelten befreit werden.*
- *Fehlförderungen z. B. für wärmegeführte KWK, Wärmenetze oder „strombasierte Kraftstoffe" sind sofort einzustellen.*

- *Aus der EnEV muss wieder eine Wärmeschutzverordnung werden. Das Absenken der Dämmstandards bei Anschluss an Fernwärme ist eine Fehlsteuerung.*
- *Elektromobilität muss dort gefördert werden, wo sie heute schon praxistauglich ist: Im Stadtverkehr. Das bedeutet gezielte Förderung von Elektrotaxis, Elektrobussen und Elektrolieferfahrzeugen.*
- *Förderung von effizienten strombasierten Prozessen in der Industrie (z. B. elektromechanische Brüdenverdichtung)*
- *Für die Windenergieanlagen im Bestand, die in den nächsten Jahren nach 20 Jahren aus der EEG-Förderung fallen, muss rechtzeitig eine Anschlusslösung gefunden werden. Für solche abgeschriebenen Windenergieanlagen dürften 4 ct/kWh ausreichend sein – auch das liegt aber über dem derzeitigen Börsenpreis."*

KWK in den Typgebäuden

In diesem Gutachten wird auf KWK und BHKW-Technologie in den Variationsrechnungen für die Typgebäude EZFH und MFH nicht weiter eingegangen. Exemplarisch zeigt Abbildung 92 einen Vergleich auf Basis von Zahlen. Grundlage ist das „gute" bis „beste" MFH-Typgebäude. Es hat einen Wärmebedarf von 65 kWh/(m²a) für Heizung und Trinkwarmwasser (ohne Erzeugerverluste) sowie einen Strombedarf von 32 kWh/(m²a), zusammen 97 kWh/(m²a).

Würde das MFH eine eigene KWK besitzen (in Abbildung 92 oben), müssten regenerative Kapazitäten (PV, Windkraft) errichtet werden, die 202 kWh/(m²a) – also etwa das Doppelte des Gebäudebedarfs erzeugen. Die Effizienzen der Einzelkomponenten sind aus Abbildung 90 entnommen, die der KWK wurde an einen Kessel angelehnt.

Der Bedarf ist eigentlich noch größer, denn in dem System ist zu Vereinfachung kein Speicher eingefügt. Die KWK erzeugt zwar passgenau – für das Gebäude – im Verlauf eines Jahres etwa doppelt so viel Strom wie Wärme. Allerdings wird im Winter geheizt, dort entstünde ein Stromüberschuss, der erst im Sommer benötigt wird. Wo der Speicher steht und wie er funktioniert, ist nicht von Bedeutung für die Energiebilanz – er hat Verluste und dies bedeutet einen erhöhten Einsatz am Anfang der Kette.

Würde eine Netzlösung verwendet, stünde die KWK nicht im Gebäude, so dass es zusätzliche Netzverluste gäbe (bei ansonsten fast identischen Effizienzen), die ebenfalls die Energiemenge am Anfang der Kette erhöhen würde.

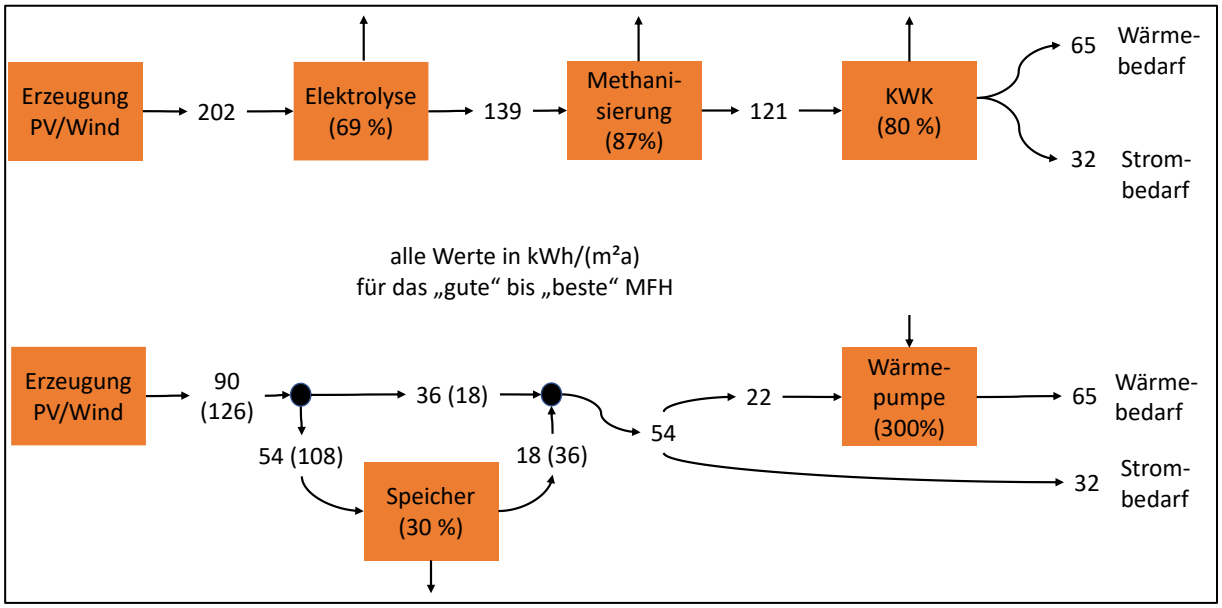


Abbildung 92 Vergleich KWK und Wärmepumpenlösung im MFH [eigene Darstellung]

Die Alternative mit Wärmepumpe setzt ebenfalls Speicher voraus. Es wurde – deutlich ungünstiger als Kucks Annahmen in Abbildung 90 – angenommen, dass ⅓ der Jahresenergiemenge über einen Speicherprozess zeitlich verschoben werden muss, aber ⅔ des erzeugten Stroms direkt genutzt werden können. Unter diesen Randdaten müssten Kapazitäten von 90 kWh/(m²a) am Anfang der Prozesskette stehen. Die Werte in Klammern zeigen den Fall, dass ⅔ des Stroms zwischengespeichert werden müssten. Auch dann ergäbe sich noch eine deutlich geringere Ausbaunotwendigkeit der Primärstromerzeuger.

Fazit zur KWK

Für die Autoren diese Gutachtens ist die Argumentationskette von Kuck [132] sehr plausibel. Die KWK ist eine Übergangstechnologie, zunächst noch im Wohnbau, später ggf. noch im Nichtwohnbau.

Eine künftige Stromproduktion in Zeiten ohne PV- oder Windstrom wird auch künftig unvermeidbar sein. In diesen Phasen wird eine Rückverstromung vorher hergestellter künstlicher Brennstoffe stattfinden müssen. Da diese Phasen aber nicht mit dem Dauerbetrieb heutiger KWK-Anlagen vergleichbar sind, sondern eher temporär stattfinden, ist künftig nicht von permanent verfügbarer Wärme aus einer KWK auszugehen. Damit verschlechtern sich alle Ausgangsbedingungen für den Aufbau von Wärmenetzen mit KWK massiv.

Aufgegriffen wird das Thema im Makro-Teil (Anhang 4) dieses Gutachtens.

3.3.7 Zwischenfazit Haupterzeuger

Die Systematisierung der Ergebnisse für die Haupterzeuger ist anspruchsvoll. Es kann Folgendes festgestellt werden:

- Einen großen Einfluss hat der Baustandard. Einerseits bestimmt er das Temperaturniveau, so dass beispielsweise Wärmepumpen effizienter im gut gedämmten Gebäude arbeiten. Andererseits bestimmt das absolute Verbrauchsniveau die erzielbaren Endenergie-, Energiekosten- und Emissionseinsparungen – im gut sanierten Gebäude sinken die Potentiale. Zuletzt bestimmt er die Investitionskosten: mit kleineren Leistungen sinken die notwendigen Erzeugerkosten. Allerdings sinken diese Kosten nicht proportional, so dass die Kapitalkosten im guten Gebäude vergleichsweise ungünstig ausfallen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Durchschnittsgebäude und sanierte Bestandsgebäude in separaten Grafiken abgebildet.

- Ein weiterer Einfluss ergibt sich aus dem CO_2-Äquivalent der Energieträger, die vor und nach dem Erzeugertausch zum Einsatz kommen. Ist ein emissionsreicher Energieträger (wie Heizöl) der Ausgangsenergieträger, können deutlich höhere Emissionsminderungen erzielt werden, als wenn das emissionsärmere Erdgas oder auch Fernwärme zugrunde gelegt werden.

Nachfolgend werden in den Grafiken die Ausgangsenergieträger durch die Randfarbe der Markierungssymbole gekennzeichnet. Erdgas = gelber Rand, Heizöl = grauer Rand, Fernwärme = schwarzer Rand.

Für die künftigen Energieträger bzw. Systeme wird die Füllfarbe der Markierungssymbole variiert. Außenluftwärmepumpe = blau, Erdreichwärmepumpe = orange, Holz = hellblau.

- Auch die Frage des Kesseltyps im Bestand ist bedeutsam. So ist bei Niedertemperaturkesseln davon auszugehen, dass sie ohnehin zur Sanierung anstehen; das bewirkt eine Untersuchung auf Basis der Mehrkosten. Der Brennwertkesseltausch erfolgt im Rahmen dieses Gutachtens i. d. R. anlasslos. Es gelten dann die Vollkosten. Diese Logik muss in der Praxis nicht immer so sein, sie ist jedoch wahrscheinlicher als die umgekehrte. Darüber hinaus sind die erzielbaren Einsparungen beim Ersatz von NT-Kesseln größer als bei Brennwertkesseln. Die Anzahl der notwendigen Rechenvarianten wird auf die günstigste (NT/Mehrkosten) und die ungünstigste Konstellation (Brennwert/Vollkosten) reduziert.

Nachfolgend wird in den Grafiken die Art der Kostenberechnung durch die Form der Markierungssymbole gekennzeichnet. Vollkosten = Kreis, Mehrkosten = Dreieck.

Haupterzeuger: Betriebswirtschaftliche Einschätzung

Abbildung 93 zeigt die Ergebnisse der Kostenbewertung für verschiedene Erzeugertausche ausgehend von einem durchschnittlichen Ausgangszustand des Gebäudes. Dargestellt ist das Ergebnis der Gesamtkostenbetrachtung (Überschuss oder Fehlbetrag in [€/a] bezogen auf die Wohnfläche in [m²]).

Alle Werte unter der Nulllinie wären wirtschaftlich, ohne dass die Energiepreise steigen bzw. bedürfen keiner Förderung. Es sind keine solchen Maßnahmen bestimmt worden – anders als beispielsweise bei der Baukörperverbesserung. Alle Maßnahmen bedürfen einer Förderung verschiedener Höhe oder rechnen sich nur, wenn die Energiepreise steigen.

Hinsichtlich der festzustellenden Fehlbeträge schneiden die Erdreichwärmepumpen (orange gefüllte Symbole) deutlich schlechter ab als die Außenluftwärmepumpen (blau gefüllte Symbole). Allerdings sind damit auch größere Emissionsminderungen erreichbar. Am günstigsten sind die Varianten, die sowohl möglichst weit unten im Bild, als auch weit rechts liegen. Von den Wärmepumpen ist der Einsatz einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz für einen Heizöl-NT-Kessel zu nennen.

Der Energieträger Holz (hellblau gefüllte Symbole) schneidet am besten ab. Jedoch ist er in seiner Menge nur begrenzt verfügbar.

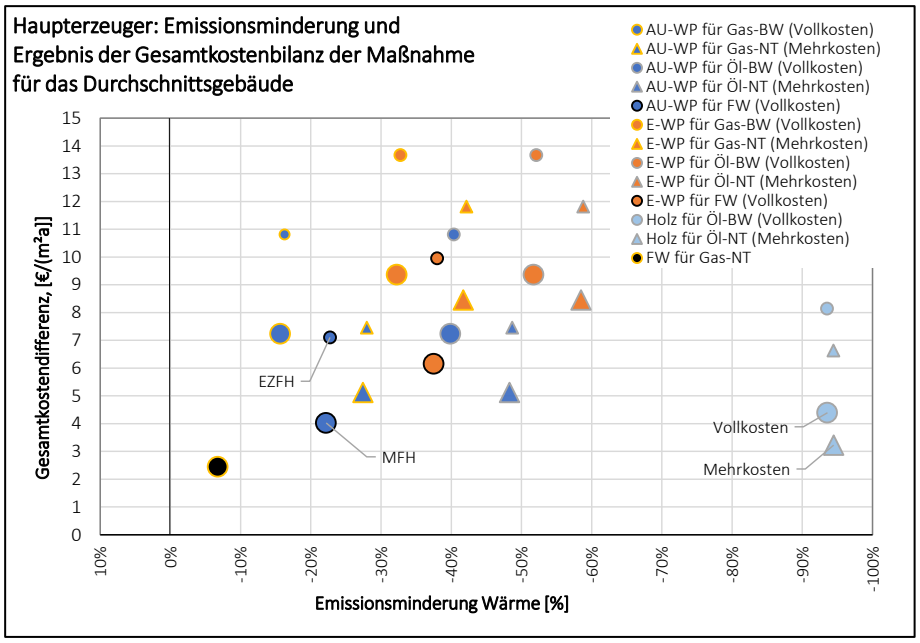


Abbildung 93 Bewertung der Erzeuger nach Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung]

Abbildung 94 wiederholt die Auswertung für das gut sanierte Gebäude – mit den gleichen Achsendimensionen. Es lässt sich gut erkennen, dass die Punkte vor allem weiter unten angeordnet sind. Die Maßnahmen sind also wirtschaftlicher. Vor allem liegen viele der Wärmepumpenpunkte in fast identischer Höhe wie die Holzkessel, was für ein vergleichbares Wirtschaftlichkeitsdefizit spricht. Das Kennfeld der Wärmepumpen ist näher zusammengerückt – im sanierten Objekt gleichen sich die wirtschaftlichen Vor- und Nachteile an. Allerdings schneiden immer noch die Außenluftwärmepumpen (blau gefüllte Symbole) bei den Kosten etwas besser und bei den Effizienzen etwas schlechter ab.

Die Fernwärmelösung führt im sanierten Objekt (hier „best“ untersucht) zu einer Erhöhung der Emissionen für Wärme. Gegenüber einem Gasbrennwertkessel wäre dies noch deutlicher sichtbar, bei einem Heizölkessel wäre eine leichte Emissionsminderung zu sehen.

Für das Durchschnittsgebäude und den sanierten Bestand gleichermaßen ist festzustellen, dass die MFH (große Symbole) wirtschaftlich stets etwas besser abschneiden als die EZFH (kleine Symbole), was an den Investitionskosten liegt. Sie sind im kleinen Gebäude ungünstiger. Hinsichtlich der Emissionsminderung ist das EZFH in der Regel etwas besser, weil ein größerer flächenbezogener Wärmebedarf festzustellen ist.

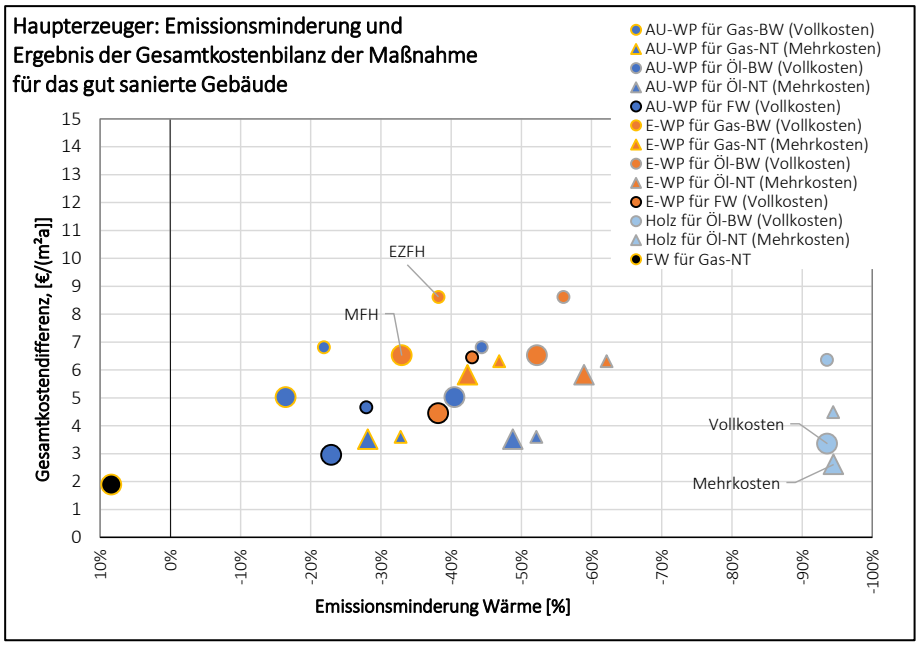


Abbildung 94 Bewertung der Erzeuger nach Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im guten Gebäude [eigene Darstellung]

Haupterzeuger: Maßnahmen zum Ausgleich von Unwirtschaftlichkeiten

Abbildung 95 zeigt die notwendigen Investitionskostenzuschüsse (X-Achse), um die in sich nicht wirtschaftlichen Maßnahmen grenzwirtschaftlich werden zu lassen. Alternativ sind die zusätzlich notwendigen Emissionspreise genannt, unter denen diese Grenzwirtschaftlichkeit ebenfalls eintritt. Kombinierte Zwischenwerte sind ebenfalls denkbar, aber nicht dargestellt.

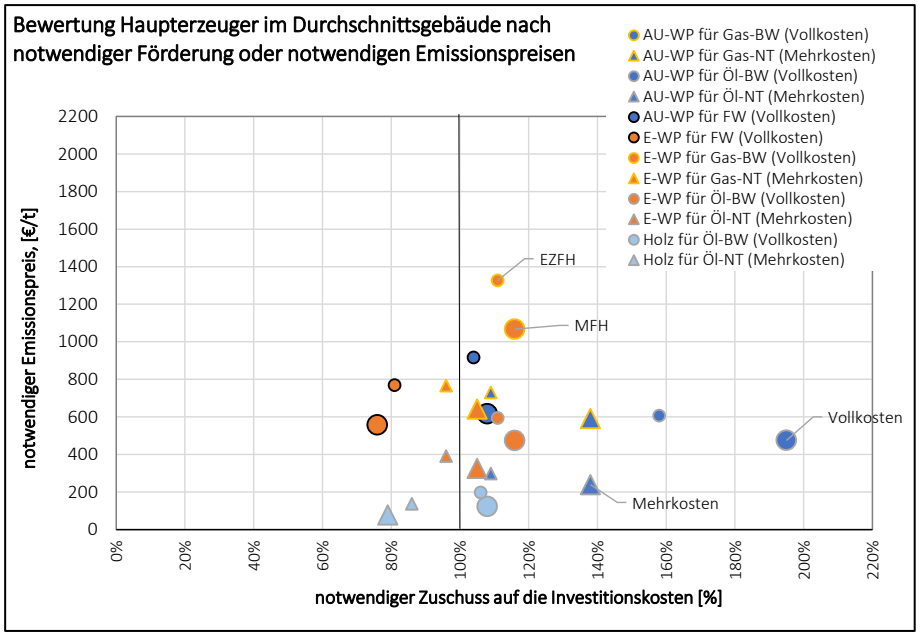


Abbildung 95 Bewertung der Erzeuger im Durchschnittsgebäude nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung]

Es sind im Durchschnittsgebäude nur wenige Maßnahmen erkennbar, die einen Zuschuss unter 100 % benötigen. Alle Maßnahmen darüber benötigen nicht nur die eigentliche Investition (in voller Höhe subventioniert), sondern weitere Ausgleichszahlungen. Diese ergeben sich in geringem Maße aufgrund höherer Wartungskosten, aber vor allem durch gestiegene Energiekosten. Am stärksten sind fast alle Außenluftwärmepumpenkonstellationen von diesem Problem betroffen. Lediglich für den Umstieg von Heizöl-NT-Kessel auf Holz sowie von Fernwärme auf die Erdreichwärmepumpe ist dies nicht so.

Alternativ ließen sich die Unwirtschaftlichkeiten ausgleichen, indem der eingesetzte Energieträger teurer wird. dies könnte die übliche Energiepreissteigerung sein, aber auch eine Verteuerung aufgrund des Emissionspreises. Je weiter unten in der Grafik ein Punkt liegt, desto geringer muss die Preiserhöhung ausfallen. Dabei bedeuten Emissionspreise von beispielsweise 300 €/t real, das die Energieträger Erdgas und Heizöl etwa doppelt so viel wie heute kosten müssten. Bei 700 €/t ergäbe sich der dreifache Preis.

Abbildung 96 wiederholt die Auswertung, jedoch auf Basis des gut sanierten Objektes. Deutlich mehr Punkte liegen nun links der Linie „100 % Zuschuss“.

Für die Wärmepumpenlösungen ist dennoch in der Mehrzahl der Fälle festzustellen: es muss an der grundsätzlichen Struktur der Energieträgerpreise etwas geändert werden. Selbst ein Strompreis von 22 Cent/kWh kann mit den Preisen der fossilen Energieträger nicht konkurrieren. Es lässt sich das Problem durch den Betrieb einer Photovoltaikanlage mildern, vgl. Anhang 3.5.1. Eine Abschätzung zur notwendigen Preisstruktur wird in Anhang 3.9 gegeben.

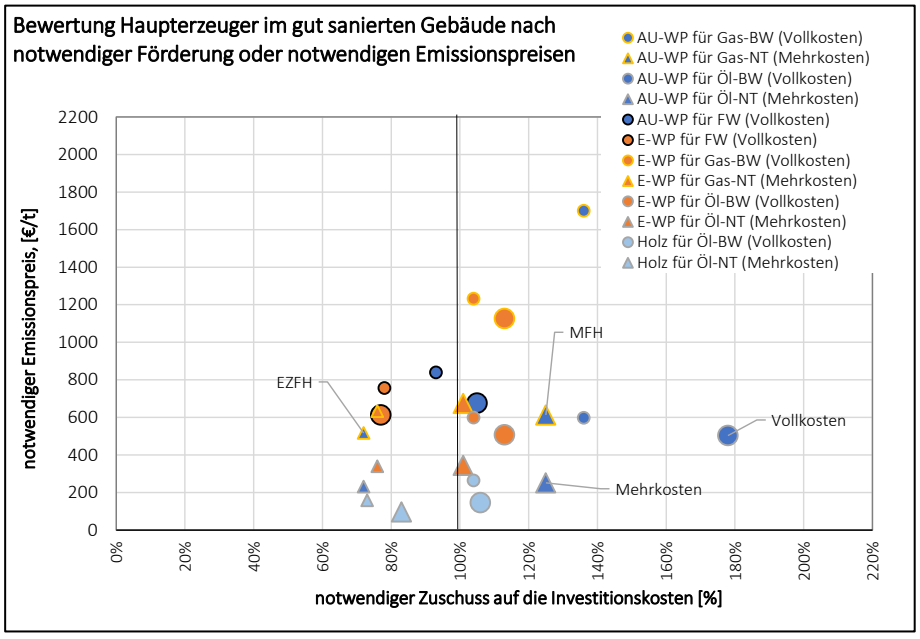


Abbildung 96 Bewertung der Erzeuger im guten Gebäude nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung]

Die Erkenntnisse der Gutachter zu notwendigen Investitionskostenzuschüssen liegen höher als in anderer Gutachten und Makrostudien, sofern diese dies überhaupt thematisieren. Dies liegt vor allem an den schlechteren Effizienzannahmen, welche jedoch auf Basis der verfügbaren Feldmessungen realistisch erscheinen. Die Erkenntnis, dass eine alternative Energieträgerbepreisung einen Ausgleich schafft, ist allerdings auch in anderen Studien zu finden, z. B. AGORA [128].

Haupterzeuger: Einschätzung auf Basis der Emissionsminderung

Abbildung 97 ordnet den Erzeugertausch unter dem Gesichtspunkt der Emissionsminderung ein. Je weiter rechts und gleichzeitig unten eine Maßnahme angeordnet ist, desto interessanter ist sie aus Sicht der Gesamtverbesserung des deutschen Bestandes.

Lage unten (gutes Verhältnis von eingesetztem Kapital zur erzielten Emissionsminderung): besser schneiden alle ohnehin erforderlichen Wärmeerzeugertausche ab (dreieckige Symbole) – wegen der geringeren Kosten. Auch günstiger ist der Ersatz des Energieträgers Heizöl (Symbole mit grauem Rand). Die Außenluftwärmepumpen sind im Schnitt besser als die vergleichbare Erdreichwärmepumpenlösung. Zum Vergleich: die günstigeren baulichen Maßnahmen liegen ebenfalls in der Größenordnung 200 bis 400 €/t.

Lage rechts (großer „Hebel“ hinsichtlich der Emissionsminderung in einem Schritt): die Holzkessel (hellblau gefüllte Symbole) liegen sehr weit rechts. Auf die Einschränkung von verfügbarem Biomassebudget wurde bereits mehrfach hingewiesen.

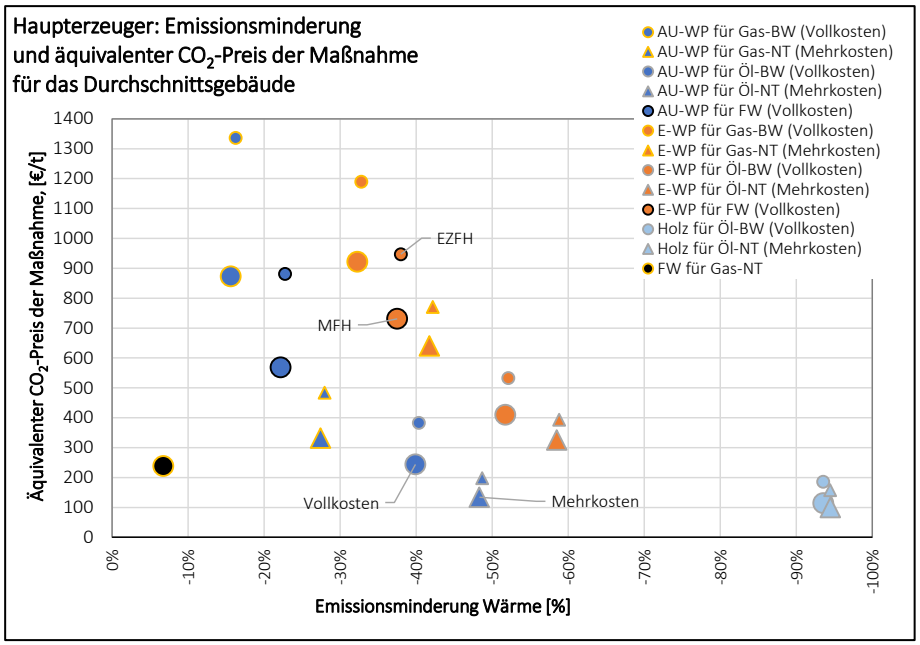


Abbildung 97 Bewertung der Erzeuger im Durchschnittsgebäude nach Emissionsminderung u. äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung]

Der Unterschied zwischen Durchschnittsgebäude und saniertem Bestand ist bei dieser Betrachtung nur gering, siehe Abbildung 98.

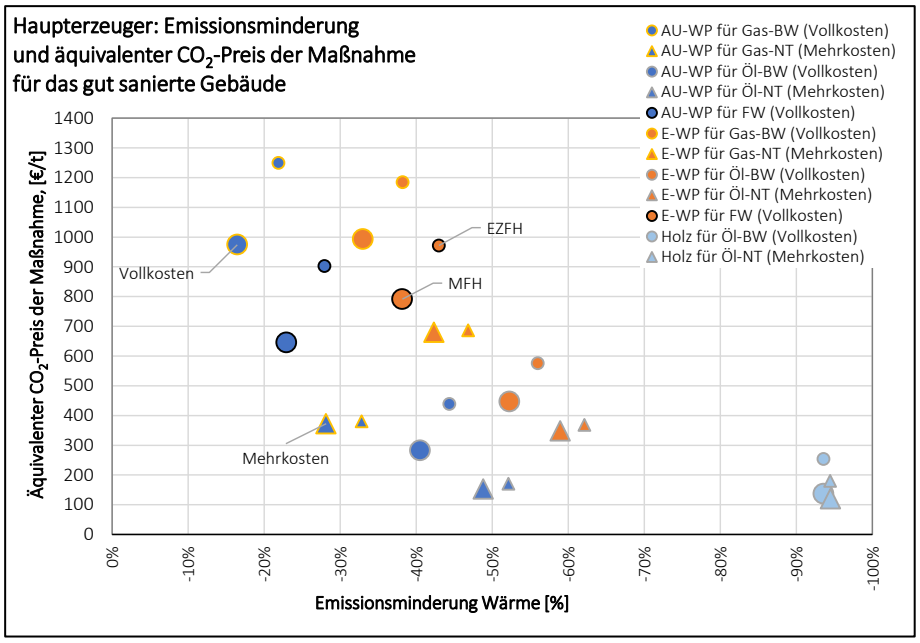


Abbildung 98 Bewertung der Erzeuger im neuen Gebäude nach Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung]

Wärmepumpensysteme mit Photovoltaik

Eine Auswahl von Wärmepumpensystemen werden in Anhang 3.5.1 behandelt. Die grafische Auswertung analog der oben durchgeführten folgt im Zwischenfazit der Zusatzerzeuger, Anhang 3.5.4. Um Doppelungen zu vermeiden, wird an dieser Stelle darauf verwiesen. Vorab sei erwähnt, dass alle Varianten besser abschneiden, weil der selbst produzierte Strom kostengünstiger ist als der eingekaufte. Dies verbessert die Wirtschaftlichkeit und senkt gleichzeitig die Emissionen.

Hybridsysteme: Betriebswirtschaftliche Einschätzung

Abbildung 99 und Abbildung 100 zeigen die Ergebnisse der Kostenbewertung für verschiedene Hybridsysteme aus Wärmepumpen und Kesseln – jeweils für die Ölkessel und die Gaskessel getrennt. Dargestellt ist das Ergebnis der Gesamtkostenbetrachtung (Überschuss oder Fehlbetrag in [€/a] bezogen auf die Wohnfläche in [m²]). Damit die Werte besser eingeordnet werden können, sind die reinen Wärmepumpenlösungen mit eingetragen. Jeweils zusammengehörig sind folgende Symbole:

- Vollkosten: Kreise (Hybrid) und Rauten (vergleichbares reines Wärmepumpensystem)
- Mehrkosten Dreiecke (Hybrid) und Quadrate (vergleichbares reines Wärmepumpensystem)

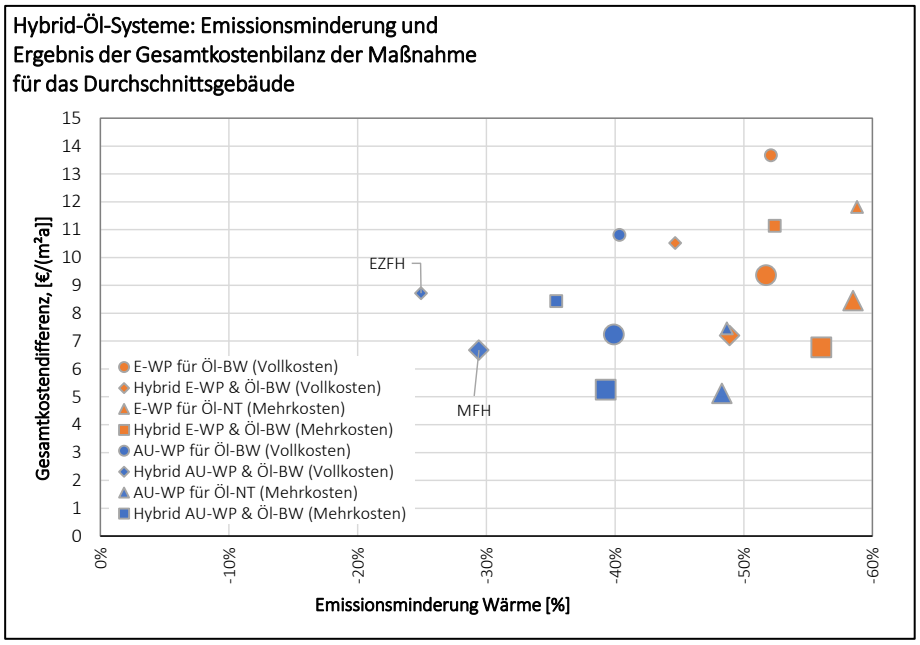


Abbildung 99 Bewertung der Hybrid-Öl-Systeme nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung]

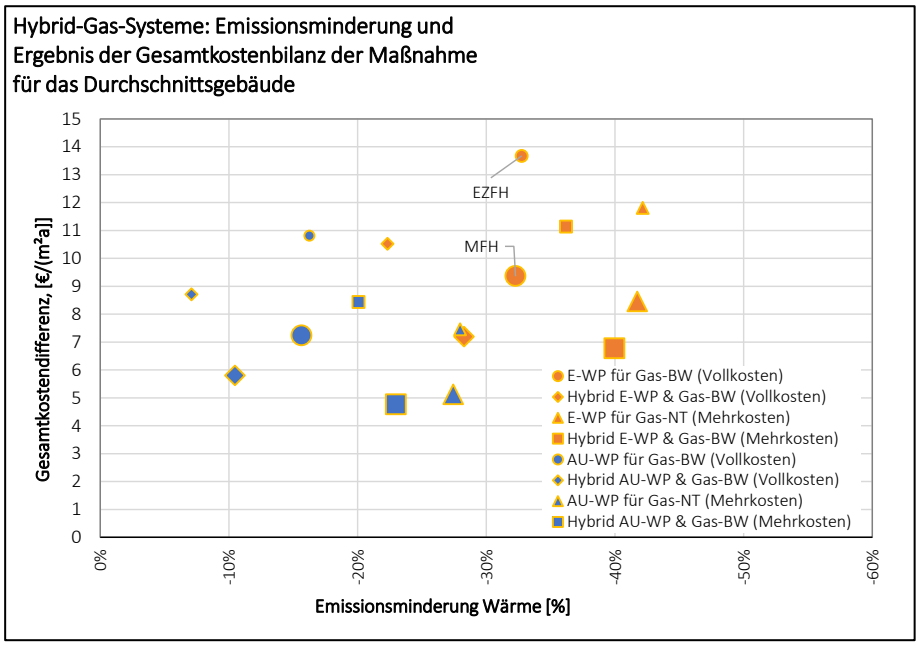


Abbildung 100 Bewertung der Hybrid-Gas-Systeme nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung]

Es zeigt sich, dass keine der Lösungen wirtschaftlich ist. Jedoch sind die Hybridlösungen konkurrenzfähig zu dem Komplettumstieg. Dies gilt vor allem für die Lösungen mit Erdreichwärmepumpe (orange Symbolfüllung) sowie für den Ersatz von NT-Kesseln. EZFH (kleine Symbole) schneiden ungünstiger ab als MFH (große Symbole).

Die vorher geschilderte Problematik, des sehr teuren Energieträgers Strom gilt hier gleichermaßen. Eine geänderte Preisstruktur, siehe Anhang 3.9, könnte das Problem beheben.

Hybridsysteme: Maßnahmen zum Ausgleich von Unwirtschaftlichkeiten

Abbildung 101 und Abbildung 102 zeigen die notwendigen Investitionskostenzuschüsse (X-Achse), um die in sich nicht wirtschaftlichen Maßnahmen grenzwirtschaftlich werden zu lassen. Alternativ sind die zusätzlich notwendigen Emissionspreise genannt, unter denen diese Grenzwirtschaftlichkeit ebenfalls eintritt. Kombinierte Zwischenwerte sind ebenfalls denkbar, aber nicht dargestellt.

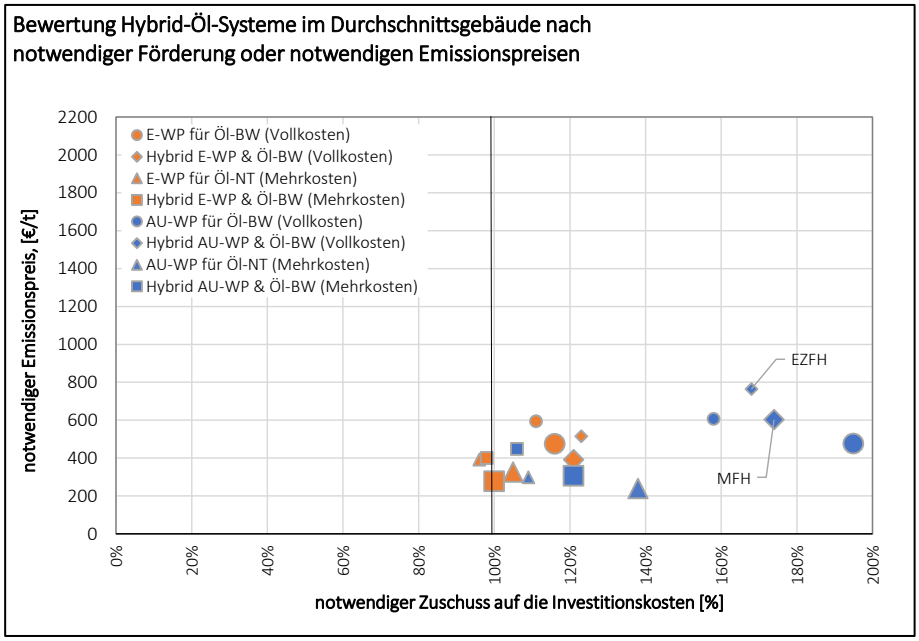


Abbildung 101 Bewertung der Hybrid-Öl-Systeme nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung]

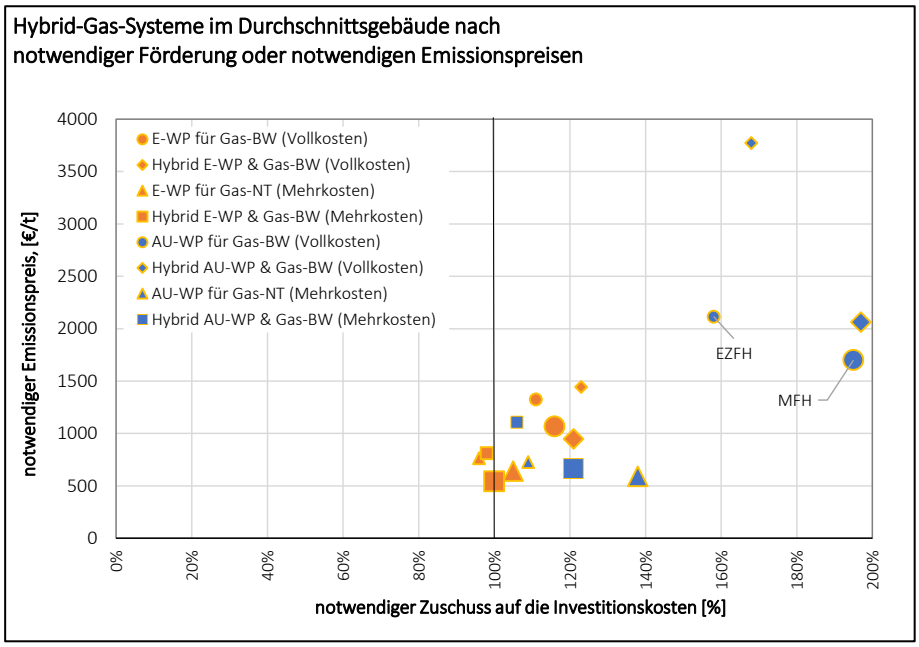


Abbildung 102 Bewertung der Hybrid-Gas-Systeme nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung]

Es können nur wenige Lösungen – mit Erdreichwärmepumpen – bestimmt werden, die einen Zuschuss unter 100 % benötigen. Das bedeutet für die Hybridlösungen (wie die reinen Wärmepumpenlösungen), dass nicht nur die eigentliche Investition in voller Höhe subventioniert werden müsste, sondern weitere Ausgleichszahlungen notwendig sind. Diese ergeben sich in geringem Maße aufgrund höherer Wartungskosten, aber vor allem durch gestiegene Energiekosten. Stärker davon betroffen sind die Außenluftwärmepumpenkonstellationen.

Die Hybridlösungen schneiden vielfach sehr ähnlich ab wie die zugehörigen reinen Wärmepumpenlösungen. Besonders schlecht liegen allerdings Lösungen, bei denen vorher ein Brennwertkessel vorhanden war.

Alternativ ließen sich die Unwirtschaftlichkeiten ausgleichen, indem der eingesetzte Energieträger teurer wird. Bei den Ölkesseln ergeben sich notwendige Emissionspreise von im besten Falle 200 bis 300 €/t, was einer Verdopplung des Heizölpreises entspricht. Für Erdgas liegen die Werte bei unrealistisch hohen Werten von 600 €/t aufwärts. Das entspräche einem fast 3-fach höheren Gaspreis als heute.

Hybridsysteme: Einschätzung auf Basis der Emissionsminderung

Abbildung 103 und Abbildung 104 ordnen den Erzeugertausch unter dem Gesichtspunkt der Emissionsminderung ein. Je weiter rechts und gleichzeitig unten eine Maßnahme angeordnet ist, desto interessanter ist sie aus Sicht der Gesamtverbesserung des deutschen Bestandes.

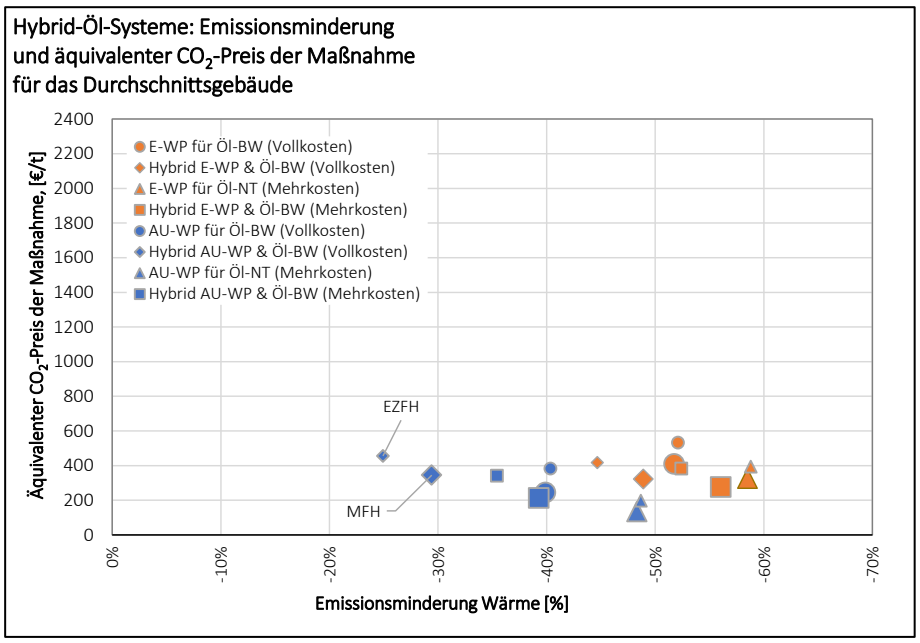


Abbildung 103 Bewertung der Hybrid-Öl-Systeme nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung]

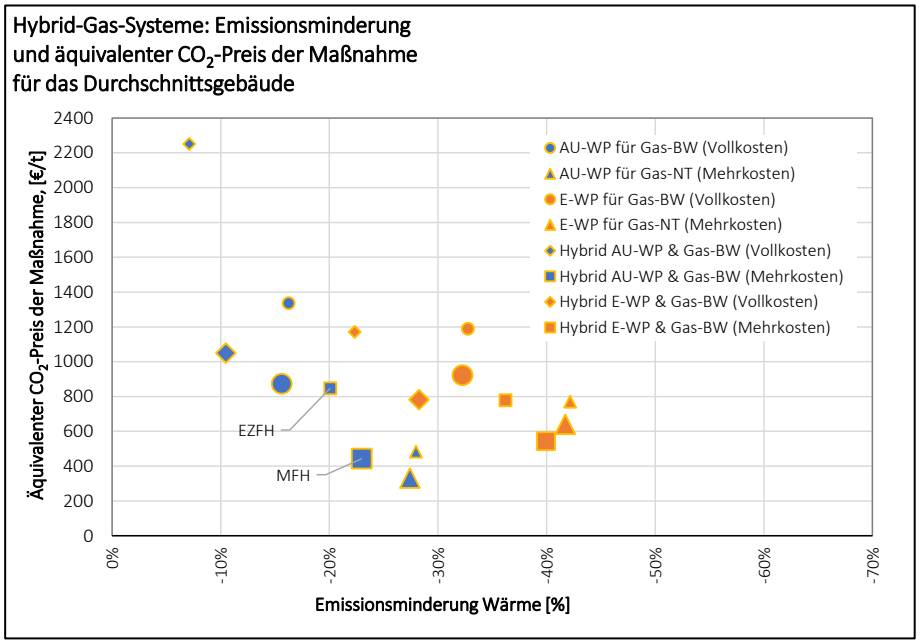


Abbildung 104 Bewertung der Hybrid-Gas-Systeme nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung]

Lage rechts (großer „Hebel“ hinsichtlich der Emissionsminderung in einem Schritt): insgesamt ist festzustellen, dass die Hybridlösungen zu geringeren Emissionsminderungen führen als die vergleichbaren reinen Wärmepumpenlösungen. Der Aufbau von Öl-Hybridlösungen sind interessanter als der von Gas-Hybridlösungen. Erdreichwärmepumpen (orange Symbolfüllung) sind deutlich besser als Außenluftwärmepumpen (blaue Symbolfüllung).

Lage unten (gutes Verhältnis von eingesetztem Kapital zur erzielten Emissionsminderung): besser schneiden die Hybridlösungen im MFH ab. Hier kann die später als Alleinerzeuger fungierende Wärmepumpe deutlich kleiner angeschafft werden. Auch ist der ggf. neu gekaufte Spitzenlastkessel nicht so stark überdimensioniert. Im EZFH ist die kleinste verfügbare Größe noch zu groß.

Einschränkungen

Sind Gebäude noch geringer mit Personen belegt (z. B. das EZFH mit 2 statt den durchschnittlichen 2,7 Personen) verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit. Da allerdings bereits eine geringe Belegung unterstellt wurde, sind die Abweichungen moderat.

Hinsichtlich des Baustandards ist festzustellen: untersucht wurden das „gute“ Gebäude sowie das Durchschnittsgebäude. Letzteres entspricht in seinen Qualtäten etwa dem Niveau „mittel“ der thermischen Hülle (es liegt zwischen „mittel“ und „schlecht“, jedoch deutlich näher an „mittel“). Die Aussagen für den „schlechten“ sowie den „besten“ Baukörperzustand können qualitativ abgeschätzt werden. Dabei ist zu bedenken, dass das Qualitätsniveau und damit der Wärmebedarf von „best“ und „gut“ insgesamt näher zusammenliegen als von „schlecht“ und „mittel“.

Zeigt sich, dass eine Maßnahme im „guten“ Gebäude vielversprechender war als bei dem „Durchschnittsgebäude“, wird sie im „besten“ Gebäude noch etwa vorteilhafter, aber im „schlechten“ deutlich uninteressanter.

Fazit zu allen Erzeugern

Der Umstieg auf andere Energieträger als die fossilen ist unbestritten, um die Emissionen zu senken. Daher schließen die Gutachter einen Beibehalt des Status-Quo aus.

Für alle untersuchten Erzeuger ist festzustellen, dass sich deutliche Emissionsminderungen erzielen lassen. Es werden beim Ersatz von Heizöl durch Wärmepumpen typischerweise 45 bis 55 % Emissionsminderung (Wärme) erreicht, beim Ersatz von Gaskesseln etwa 25 bis 35 %. Zum Vergleich: nur die Außenwand- und Dachverbesserung erreichen diesen Wert, alle anderen baulichen Maßnahmen liegen in der Größenordnung von 10 bis 15 %.

Auch die erzielten äquivalenten CO_2-Preise, d. h. die Frage wie sinnvoll das investierte Kapital die Emissionen mindert – ist in Teilen vergleichbar. Ein typischer Wert vieler baulicher Maßnahmen liegt bei 200 bis 400 €/t. Das ist mit Wärmepumpen erreichbar, wenn Erzeuger getauscht werden, die ohnehin zur Sanierung anstanden, vorzugsweise Heizölkessel. Nur die Konstellation „Erdreichwärmepumpe ersetzt Erdgas“ schneidet schlechter ab.

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Bewertung ist eine deutliche Diskrepanz festzustellen.

Während die baulichen Maßnahmen mit Investitionskostenzuschüssen von größtenteils maximal 20 % in die Grenzwirtschaftlichkeit zu befördern sind (außer Fenster), ergeben sich bei den Erzeugern im besten Falle Werte knapp unter 100 %.

Alternativ reichen für die baulichen Maßnahmen kleine Preiserhöhungen bei Gas oder Heizöl auf 8 bis 9 Cent/kWh aus, um das Problem der Unwirtschaftlichkeit auch ohne Förderung zu beheben. Wird der Energieträger Strom verwendet, ist keine Förderung notwendig, weil er so teuer ist.

Für den Erzeugertausch ist dieses strukturelle Problem der Hinderungsgrund. Gas- und Ölpreise müssten mindestens verdoppelt, oft auch verdreifacht werden, damit sich die anlagentechnischen Maßnahmen rechnen. Dies ist unrealistisch – und auch nicht logisch im Sinne einer Preisbildung, die zumindest ansatzweise an den Emissionen ausgerichtet ist. Eine Möglichkeit ist die Vergünstigung der Strompreise durch Photovoltaik (vgl. Anhang 3.5.1) oder andere Maßnahmen (vgl. Anhang 3.9).

Außen vor sind Holzkessel, deren Limitierung sich durch das Biomassebudget ergibt.

3.4 Energieeffizienz und Kosten für Maßnahmen an der Peripherie

Als „Peripherie“ werden im Rahmen dieses Gutachtens vor allem die Rohrnetze – für die Trinkwarmwasserverteilung zentral oder dezentral, mit oder ohne Zirkulation sowie für die Heizung – verstanden. Die Netze sind aus zwei Aspekten interessant im Rahmen der energetischen Sanierung. Werden sie weggelassen, sinken die Verteilverluste und damit auch der Endenergiebedarf. Lagen die Rohre vorher im unbeheizten Bereich, gilt dies noch viel mehr als für die Leitungsteile im beheizten Bereich. Jedoch sind auch diese maßgeblich: solange das Gebäude ungedämmt ist, tragen sie nennenswert zur Beheizung bei (als interne Wärmegewinne). Ist der Baustandard aber gut oder sehr gut, können sie die betreffenden Räume auch überwärmen. Insbesondere gilt dies für das Sommerhalbjahr.

Darüber hinaus werden die Heizflächen – Heizkörper und Fußbodenheizung – mit ihren wesentlichen Einflüssen auf die Energiebilanz sanierter Bestandsbauten besprochen.

3.4.1 Trinkwarmwasserzirkulation

Die Trinkwarmwasserzirkulation findet sich aus zwei Gründen in Gebäuden: zur Erhöhung des Komforts (Wartezeit bis warmes Wasser verfügbar ist) und zur Dezimierung von Legionellen, also Wasserkeimen (thermische Desinfektion). In jedem Fall sind deutlich relevante Verteilverluste damit verbunden.

Insbesondere in Mehrfamilienhäusern mit Zirkulation sind Systeme mit Verteil- und Speicherverlusten, die die Nutzwärmemengen überschreiten der Normalfall. Der Messdienstleister TECHEM leitet aus seinem Datenbestand einen mittleren Nutzungsgrad von 41 bis 49 % ab (je nach Energieträger) [104], vgl. auch Anhang 5.4.2.

In zentralen Systemen lässt sich ein ungünstiges Verhältnis von Netzverlusten zum gezapften Nutzen feststellen. Dies ist zunächst auch unabhängig von der Frage, aus welcher Quelle die eingesetzte Energie stammt. Ist sie fossil, so steigen die Emissionen und für den Nutzer die Energiekosten. Ist sie regenerativ oder teilregenerativ (Solar, Wärmepumpen) so steigt die Notwendigkeit größere Quellen zu erschließen. Dann steigen die Investitionskosten.

Eigene Untersuchungen an Praxisprojekten zeigen, dass dafür insbesondere das Verhältnis von Wohnungsanzahl nebeneinander zu der Geschosszahl übereinander von Bedeutung ist [193]. Ist eine weitläufige waagerechte Verteilung unter der Kellerdecke erforderlich (z. B. Abbildung 105, rechts außen), steigen die Verluste stark an. In dem betreffenden Projekt liegt der Nutzungsgrad bei nur 37 %. Günstig sind hohe Gebäude, da die senkrechten Verbindungsleitungen von einer Wohnung zur anderen deutlich kürzer ausfallen. Eine Ausnahme bilden kleine Mehrfamilienhäuser, welche als Zweispänner ausgeführt sind (z. B. Abbildung 105, links außen), da hier auch bei geringer Geschossigkeit keine weitläufigen waagerechten Erschließungen notwendig sind.

Abbildung 105 Unterschiedlich günstige Gebäudekubaturen für die Trinkwasserverteilung – links günstig, rechts ungünstig [eigene Bilder]

Ein detaillierter Systemvergleich ist im BBSR-Projektbericht „Warmwasserbereitung und -verteilung bei Niedrigenergiesanierungen im Wohnungsbau“ von Brillinger et al. zu finden [222]. Mit der Trinkwasserhygiene befasst sich detailliert das Projekt „EnEff: Wärme – Verbundvorhaben Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation“ von Rühling et al. [223].

Bewertung der zentralen Trinkwarmwassernetze in den Typgebäuden

Für die Berechnungen im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wird das Verteilnetz für die Trinkwassererwärmung wie folgt auf Basis eigener Vorarbeiten eingeschätzt [193] [224]:

- Wärmedurchgangskoeffizient einer Trinkwarmwasserleitung: 0,20 W/(mK)
- System mit Zirkulation (Kennwerte m Rohrleitung bezogen auf die beheizte Fläche):
    - beheizter Bereich: 0,26 m/m² bezogen auf die Wohnfläche
    - unbeheizter Bereich: 0,10 m/m² bezogen auf die Wohnfläche
- System ohne Zirkulation
    - beheizter Bereich: 0,20 m/m² bezogen auf die Wohnfläche
    - unbeheizter Bereich: 0,05 m/m² bezogen auf die Wohnfläche

Das Beispielmehrfamilienhaus mit Zirkulation ist mit einer Gesamtleitungslänge von 170 m ausgestattet (122 m beheizt, 48 m unbeheizt verlegt). Im Einfamilienhaus mit Zirkulation sind es 51 m (37 m beheizt, 14 m unbeheizt) bzw. bei Verzicht auf die Zirkulation 35 m (28 m beheizt, 7 m unbeheizt).

Prinzipiell sind die Leitungslängen nicht linear proportional zur Fläche (doppelt so großes Gebäude ≠ doppelt so viel Rohrnetz). Jedoch wird – da nur zwei Typgebäude mit mittleren Eigenschaften untersucht werden – dieser Zusammenhang vereinfacht. Die genannten typischen Verlegedichten würde für sehr kleine oder sehr große Gebäude nicht gelten.

Die Häufigkeiten der Systeme mit und ohne Zirkulation sind in Anhang 3.1 beschrieben. Als Mehrfamilienhäuser ohne Zirkulation, jedoch mit zentraler Versorgung, werden beispielsweise Gebäude mit Etagenheizung aufgefasst.

Verzicht auf Zirkulation im EZFH

Da die Leitungswege in EZFH regulär so kurz geplant werden können, dass zumindest aus hygienischer Sicht keine Zirkulation notwendig ist, wird der Verzicht nachfolgend untersucht. Tabelle 94 zeigt die Ergebnisse.

			EZFH	EZFH	EZFH
Maßnahmenbeschreibung					
Rückbau der Zirkulation			… Baustandard Ø mit Ø Erzeuger	… Baustandard „best“ mit Kessel	… Baustandard „gut“ mit Außenluftwärmepumpe
Detailkennwerte der Bilanz					
Verteilverluste Trinkwarmwasser	vorher	kWh/(m²a)	21	20	20
	nachher	kWh/(m²a)	5	5	5
interne Gewinne aus TWW	vorher	kWh/(m²a)	11	10	10
	nachher	kWh/(m²a)	3	3	3
Heizwärmebedarf	vorher	kWh/(m²a)	109	23	51
	nachher	kWh/(m²a)	117	30	58
Ergebnisse					
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	168	68	37
	nachher	kWh/(m²a)	160	59	32
Emissionen, Wärme	vorher	kg/(m²a)	39,9	19,8	16,5
	nachher	kg/(m²a)	37,7	17,3	14,3
	Minderung	%	-6	-13	-13

Tabelle 94 Auswertung Zirkulationsverzicht im EZFH [eigene Darstellung]

Die Verteilverlust können um etwa 75 % vermindert werden. Es sinken selbstverständlich die internen Gewinne, wenn die wärmeabgebenden Leitungen fehlen. Das gilt für die Heizperiode, nicht jedoch für die Sommerperiode. So ist auch verständlich, dass in den besseren Baustandards die nutzbaren Gewinne etwas kleiner ausfallen – die Heizperiode ist kürzer und die Sommerpause ist länger.

In Hinblick auf die Endenergie sind verschieden hohe Einsparungen erkennbar, je nachdem ob ein Kessel oder eine Wärmepumpe eingesetzt werden. Eines ist jedoch erkennbar: die Emissionsminderung steigt bei den effizienten Gebäuden, weil die Wärmeabgabe der Rohre aufgrund des kleinen Wärmebedarfs des Gebäudes insgesamt schlechter nutzbar ist. Die Emissionsminderung von 13 % ist praktisch ohne Mehrkosten zu erzielen, wenn der Systemumbau im Rahmen einer ohnehin erforderlichen Sanierung des Leitungsnetzes erfolgt.

Langfristig sehen die Gutachter den Verzicht von Zirkulation in den EZFH als sinnvoll und zielführend an. Sofern sich – aufgrund großer Strecken – einzelne Zapfstellen im Gebäude nicht sinnvoll versorgen lassen, werden sie dezentral (elektrisch) versorgt, z. B. Gäste-WC.

Das Beispiel wird im nächsten Anhang 3.4.2 fortgeführt, indem es komplett durch eine dezentrale Variante ersetzt wird.

Verzicht auf Zirkulation im MFH

In Mehrfamilienhäusern lässt sich auf eine klassische Zirkulation (siehe Abbildung 106-1) verzichten, wenn:

- eine voll dezentrale Versorgung geplant ist, siehe Abbildung 106-3 und siehe Anhang 3.4.2; es gibt keine nennenswerten Verteilverluste
- eine teildezentrale Versorgung ausgeführt wird, in der nur die Hauptverbraucher (Duschen, Wannen) mit einer Leitung an den Speicher angebunden sind, aber alle anderen Verbraucher (Handwaschbecken, Küchenspüle) dezentral versorgt werden (Abbildung 106-2); es gibt sehr geringe Verteilverluste, aber nur bei einem Verzicht auf waagerechte Verteilung, daher ggf. mehreren Trinkwarmwasserspeichern
- eine Anknüpfung an die Heizung geschaffen wird mit einem klassischen Zweileiter-Netz (Abbildung 106-4), bei dem ganzjährig eine Erwärmung auf mindestens 45°C Trinkwarmwassertemperatur möglich ist; hier sind die Verteilverluste etwas vermindert, da der Steigestrang selbst zwar ganzjährig warm gehalten wird, aber die Verteilverluste für die Warmwasserbereitung komplett entfallen
- eine Anknüpfung an die Heizung geschaffen wird mit einem geregelten Zweileiter-Netz (Abbildung 106-5), bei dem die Vorerwärmung des Trinkwassers sich nach der Heiznetztemperatur richtet und daher eine elektrische Nacherwärmung bis auf 45°C Trinkwarmwassertemperatur (z. B. im Sommer) erfolgt; hier entfällt tatsächlich ein großer Teil der Verteilverluste, weil der gemeinsame Steigestrang temperaturgeregelt ist (und wie üblich für eine Heizungsverteilung im Sommer außer Betrieb sein kann).

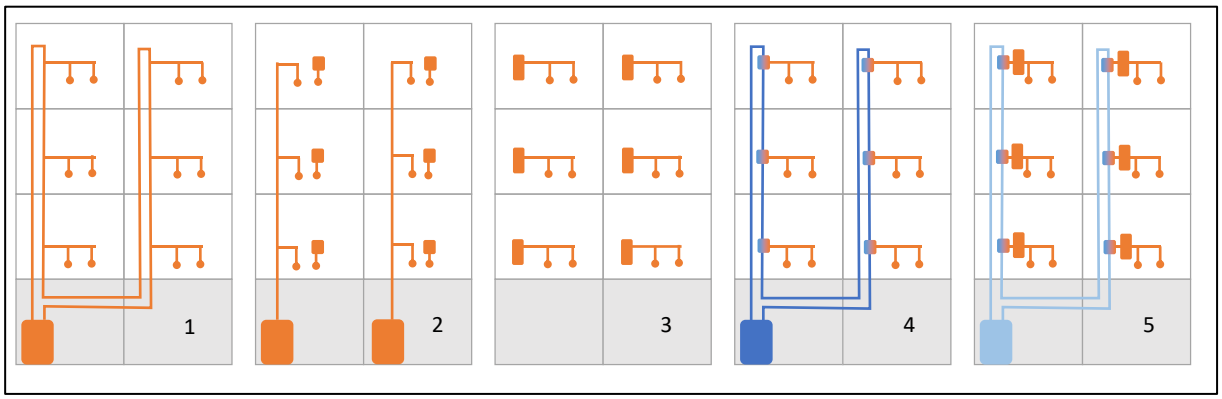


Abbildung 106 Prinzipielle Möglichkeiten der Trinkwarmwasserversorgung im MFH [eigene Darstellung]

Der Trend geht in jedem Fall weg von einer klassischen Versorgung, vor allem zur Vermeidung des Legionellenproblems. Schulze-Darup geht von einer stärkeren Verbreitung der Frischwasserstationen aus und schreibt in seinem Projektbericht zu zukünftigen effizienten Mehrfamilienhäusern [90]:

> *„Bei hocheffizienten Gebäuden liegt der Heizwärmebedarf für die Warmwasserbereitung über demjenigen für das Heizen. Ansätze für eine grundlegend effizientere Warmwasserbereitstellung besitzen also ein hohes Potenzial zur Energieeinsparung. Sinnvoll sind Lösungen mit niedrigen Systemtemperaturen bei gleichzeitiger Legionellensicherheit, mit optimierten Verteilsystemen und weitgehendem Verzicht auf Zirkulation […]*
>
> *Anzustreben ist jeweils ein zentral gelegener Steigstrang pro Wohnung (ggf. für je zwei Wohnungen). Alle übereinander gelegenen Wohnungen sind direkt auf minimalem Weg an den Strang angebunden, idealerweise mit identischen Bädern, die einen hohen Vorfertigungsgrad ermöglichen. Auch innerhalb der Wohnungen sind die Stichleitungen zu den Verbrauchsstellen minimal kurz auszuführen, sodass Leitungsverluste minimiert werden können. Die Übergabe vom Netz an die Wohnungsverteilung mit Zähleinrichtung und ggf. Wohnungsstation muss detailliert geplant und in der Werk- und Detailplanung dargestellt werden. Das Delegieren dieser Aufgabe an die Handwerker ist in vielen Fällen nicht sinnvoll.“*

Langfristig sehen die Gutachter den Verzicht klassischer Zirkulationssysteme angebracht, um die Gesamtemissionen zu vermindern. Je nach Kubatur der MFH sind folgende Systeme als Ersatz sinnvoll: für langgestreckte flache MFH erscheint die komplette Dezentralisierung als beste Option; für Gebäude mit ohnehin vorhandenen Abluftanlagen und nicht mehr als 3 Etagen die Teildezentralisierung (mehrere lokale Speicher mit Abluftwärmepumpe). Andere MFH erhalten ein geregeltes Zweileitersystem mit elektrischer Nachheizung. So lässt sich in jedem Fall das Problem einer sommerlichen Überwärmung der Küchen/Bäder/Flure minimieren und dennoch regenerative Energie (Wärmepumpe, Photovoltaik) einbinden.

Dämmung der Leitungen

Es ist auch langfristig damit zu rechnen, dass dauerhaft auf Temperatur gehaltene Leitungsnetze im MFH zu finden sind (Zweileiternetz, ungeregelt). Für diese Leitungsteile gilt: die Leitungen müssen lückenlos gedämmt werden. Die heute nach EnEV vorgeschriebene Dämmdicke (etwa Dämmdicke = Rohrdurchmesser) stellt dabei die untere Grenze dar [225].

Diefenbach et al. schlagen eine 1,5 bis 2-fache Dämmdicke vor [151]. Das Passivhausinstitut geht von doppelter Dämmung aus und sieht eine weitere Erhöhung als nicht praktikabel (Platzbedarf) oder notwendig (Wirtschaftlichkeit) an [226]. Insbesondere in Räumen mit geringem Heizwärmebedarf (sehr guter Dämmstandard, Vorhandensein von Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung) schützt die doppelte Dämmung nicht nur das Rohr vor Wärmeverlust, sondern vor allem den betreffenden Raum vor (sommerlicher) Überhitzung.

Darüber hinaus sei angemerkt, dass das Problem der Leitungswärmeabgabe warmer Leitungsteile auch die Kaltwasserleitungen berührt, die es gilt, zur Vermeidung von Keimen vor Erwärmung zu schützen. Rühling et al. empfehlen die Verlegung in getrennten Schächten [223].

Nutzer- und Grundrisseinfluss

Mit steigenden Grundrissgrößen steigt das Problem der Verluste prinzipiell an – zumindest bei waagerechter Erschließung nebeneinanderliegender Wohnungen vergrößern sich die zu überwindenden Strecken. Außerdem sind Trends erkennbar, dass die tatsächlich gezapften Trinkwarmwassermengen sinken, vgl. auch Anhang 5.4.2. Dort werden auch Abhängigkeiten zwischen der gezapften Trinkwarmwassernutzwärme und dem verwendeten System thematisiert. Alles in allem bestätigen auch diese Randdaten die notwendige Abkehr von klassischen Trinkwarmwassersystemen, vor allem im MFH.

3.4.2 Dezentralisierung der Trinkwassererwärmung

In dezentralen Systemen zur Trinkwassererwärmung sind praktisch keine Verteilverluste zu verzeichnen, weshalb sie – im Sinne von Effizienzüberlegungen und Emissionsminderungen – für die Sanierung interessant sind. Allerdings müssen sie vielfach angeschafft werden und bieten weniger universelles Potential für die Einbindung regenerativer Energie. Sie lassen sich – in Hinblick auf heutige und künftige Versorgungsstrukturen – ausführen als:

- Durchlauferhitzer; kein Speichervermögen, große Leistungsspitzen
- elektrisch beheizte Kleinspeicher für untergeordnete Zapfstellen sowie Wohnungsspeicher; jeweils mit oder ohne Option auf Einbindung von Photovoltaikstrom; kleine Ladeleistungen
- Wohnungsspeicher mit Wärmepumpenbeheizung auf Basis von Abluft einer Lüftungsanlage als Wärmequelle; jeweils mit oder ohne Option auf Einbindung von Photovoltaikstrom; sehr kleine Ladeleistungen

Zudem sind teildezentrale Systeme bzw. 2-Leiter-Systeme mit dezentraler Trinkwassererwärmung denkbar, siehe Anhang 3.4.1.

Bewertung der dezentralen Trinkwarmwassernetze in den Typgebäuden

Für die Berechnungen im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wird das dezentrale Verteilnetz für die Trinkwassererwärmung im beheizten Bereich des Gebäudes wie folgt auf Basis eigener Vorarbeiten eingeschätzt [193] [224]:

- Wärmedurchgangskoeffizient einer Trinkwarmwasserleitung: 0,20 W/(mK)
- verlegte Verteilung bei einem dezentralen System: 0,1 m/m² bezogen auf die Wohnfläche

Die dezentrale Versorgung führt zu nur etwa 2 m (EZFH) oder 7 m (MFH) Leitungslänge. Die statistischen Häufigkeiten des Vorkommens dieses Systems sind in Anhang 3.1 beschrieben.

Dezentralisierung im EZFH

Die nachfolgende Tabelle 95 führt das Beispiel aus Anhang 3.4.1 fort. Nach dem Verzicht auf die Zirkulation wird nun der Umbau auf eine dezentrale Versorgung mit Elektrospeicher/Durchlauferhitzer untersucht. Um einen möglichst breiten Blick auf alle möglichen Kombinationen zu haben, fällt die Wahl auf das Durchschnittsgebäude, aber auch auf ein auf bestes Niveau saniertes Gebäude mit Heizölbrennwertkessel sowie ein gutes Gebäude mit Außenluftwärmepumpe, siehe Abbildung 107 und Abbildung 108.

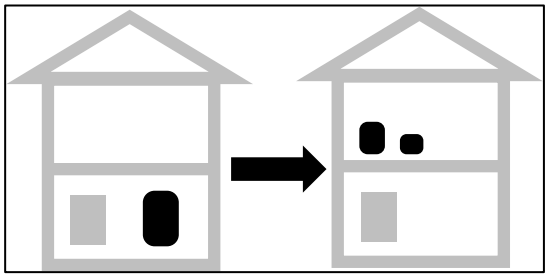


Abbildung 107 Schema – Dezentralisierung im Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung]

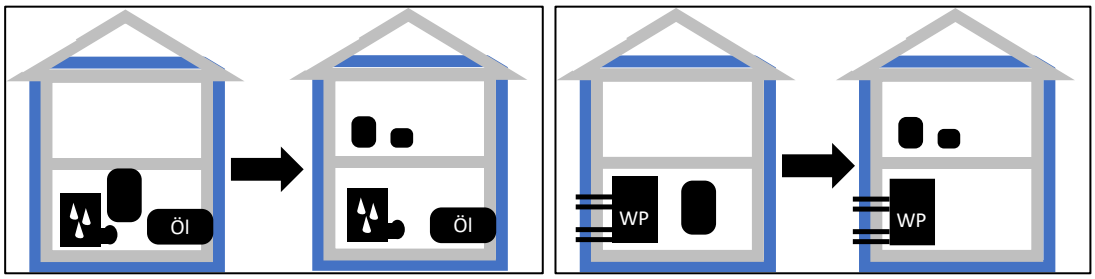


Abbildung 108 Schema – Dezentralisierung im gedämmten Gebäude [eigene Darstellung]

			EZFH	EZFH	EZFH
Maßnahmenbeschreibung					
Ersatz der zentralen Versorgung ohne Zirkulation durch eine dezentral elektrische			… Baustandard Ø mit Ø Erzeuger	… Baustandard „best“ mit Kessel	… Baustandard „gut“ mit Außenluftwärmepumpe
Detailkennwerte der Bilanz					
Verteilverluste Trinkwarmwasser	vorher	kWh/(m²a)	5	5	5
	nachher	kWh/(m²a)	0	0	0
interne Gewinne aus TWW	vorher	kWh/(m²a)	3	3	3
	nachher	kWh/(m²a)	0	0	0
Heizwärmebedarf	vorher	kWh/(m²a)	117	30	58
	nachher	kWh/(m²a)	119	33	61
Ergebnisse					
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	160	59	32
	nachher	kWh/(m²a)	156	55	38
Emissionen, Wärme	vorher	kg/(m²a)	37,2	17,3	14,3
	nachher	kg/(m²a)	39,2	18,3	16,7
	Minderung	%	+4	+6	+17

Tabelle 95 Auswertung Dezentralisierung im EZFH [eigene Darstellung]

Da sich weder Energiekostenminderungen ergeben, noch eine Emissionsminderung (jeweils unter heutigen Randdaten), ist diese Maßnahme als Einzelmaßnahme in einem EZFH nicht vorteilhaft.

Sie wird in Anhang 3.5.1 erneut untersucht, jedoch dann in Verbindung mit Photovoltaik.

Dezentralisierung im MFH

In MFH ist die häufigste Ausgangsbasis das System mit Zirkulation. Tabelle 96 zeigt die Untersuchung der Dezentralisierung für diesen Fall. Aus Sicht der Emissionen betrachtet, kann die dezentrale Anlage nur in dem Gebäude mit Kessel eine Verbesserung hervorrufen. Nur hier wäre ein Einsatz für weitere Überlegungen in Richtung Förderung, Emissionsbepreisung usw. gegeben. Da jedoch vom kostengünstigen Energieträger Erdgas auf den deutlich teureren Energieträger Strom gewechselt wird, zeigt sich jedoch betriebswirtschaftlich für den Betreiber kein Vorteil.

In der Version mit Außenluftwärmepumpe ergibt sich weder ein Vorteil aus Sicht der Emissionen, noch aus Sicht der Endenergien (stellvertretend für die Kosten, da der Energieträger in beiden Fällen Strom ist, jedoch der Wärmepumpenstrom günstiger als der allgemeine Haushaltsstrom). Die Ergebnisse wären im Vergleich mit der effizienteren Wärmepumpe noch deutlich schlechter. Auch diese Lösung ist daher als Einzelmaßnahme nicht näher zu untersuchen, jedoch in Verbindung mit Photovoltaik, siehe Anhang 3.5.1.

			MFH	MFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung					
Ersatz der zentralen Versorgung mit Zirkulation durch eine dezentral elektrische			… Baustandard Ø mit Ø Erzeuger	… Baustandard „best“ mit Kessel	… Baustandard „gut“ mit Außenluftwärmepumpe
Detailkennwerte der Bilanz					
Verteilverluste Trinkwarmwasser	vorher	kWh/(m²a)	20	20	20
	nachher	kWh/(m²a)	0	0	0
interne Gewinne aus TWW	vorher	kWh/(m²a)	10	9	10
	nachher	kWh/(m²a)	0	0	0
Heizwärmebedarf	vorher	kWh/(m²a)	79	13	36
	nachher	kWh/(m²a)	89	22	46
Ergebnisse					
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	137	61	33
	nachher	kWh/(m²a)	124	49	35
Emissionen, Wärme	vorher	kg/(m²a)	33,0	17,8	14,7
	nachher	kg/(m²a)	32,4	16,6	14,5
	Minderung	%	-2	-7	5 %

Tabelle 96 Auswertung Dezentralisierung im MFH [eigene Darstellung]

Ein Vorteil ist jedoch deutlich sichtbar, der nicht vernachlässigbar ist: die Thematik der Abwärme der Rohrleitungen und gleichermaßen damit der internen Wärmegewinne.

Im „guten“ Baustandard ergibt (unabhängig vom Wärmeerzeuger) sich mit der Dezentralisierung ein Heizwärmebedarf von 46 kWh/(m²a). Etwa 10 kWh/(m²a) können rechnerisch durch die Rohrleitungen gedeckt werden – wenn das System zentral ausgeführt wird. Ein Leitungsnetz verteilt sich nicht gleichmäßig in der Wohnung. Unterstellt man einen Flächenanteil von etwa 25 % des Grundrisses, in dem die Rohre tatsächlich angeordnet sind (Küchen und Bäder, ggf. Teile des Flurs), so ist der lokale Wärmeeintrag viel höher. Effektiv gibt es ¼ der Fläche mit internen Gewinnen von 40 kWh/(m²a) und ¾ der Fläche ohne Gewinne. Bei diesem Baustandard ist in Küche und Bad praktisch kein Heizwärmebedarf mehr zu verzeichnen bzw. die Gefahr einer Überwärmung groß – abgesehen vom Kernwinter.

Das Problem potenziert sich in dem „besten“ Baustandard. Denn dort ist der Heizwärmebedarf insgesamt nur halb so groß. Das heißt, es muss von einer ganzjährigen Überwärmung der Küchen und Bäder durch die Rohrleitungen ausgegangen werden.

Der reine Umstieg von zentraler auf dezentrale Trinkwassererwärmung hat vor allem den Vorteil, die Überwärmungsproblematik von Wohnraum zu verbessern.

Die Dezentralisierung wird in Anhang 3.5.1 erneut untersucht, jedoch dann in Verbindung mit Photovoltaik.

Fazit

Der wirtschaftliche Vorteil von dezentralen Systemen ohne Einbezug von Photovoltaik ist aus Sicht der Emissionen nicht gegeben (unter heutigen Randdaten für den Strom). Je emissionsärmer der Strommix wird, desto interessanter wird aber die Dezentralisierung – auch gegenüber zentral betriebenen Wärmepumpen – weil sie gleichermaßen interne Gewinne vermeidet und das Legionellenproblem weitgehend ausschließt.

Der Kompromiss ist entweder ein Einbezug von Photovoltaik. Vorstellbar sind künftig aber auch dezentrale Systeme mit Kleinstwärmepumpen, wie sie Schulze-Darup für den künftigen Geschosswohnungsbau beschreibt [90]:

> *„Dabei handelt es sich um Geräte, die in Verbindung mit einem 60 bis 100-Liter-Speicher die Warmwasserbereitung für 2- bis 3-Zimmer-Wohnungen durchführen. Der Nachteil liegt im Platzverlust. Außerdem muss ein Wärmeangebot für den Primärkreis der Mini-Wärmepumpe gegeben sein. Die Fortluft von Abluftanlagen bietet sich an. Alternativ kann ein einfaches Konzept eines Wärmepumpenkompaktaggregats inkl. Lüftung mit Wärmerückgewinnung angedacht werden. Solche Anlagen sind bisher jedoch vornehmlich im Leistungsbereich von Einfamilienhäusern verfügbar. Diese an und für sich sehr einfache Technik hat grundsätzlich ein großes Potenzial und könnte mittelfristig im Sinn Weißer Ware gefertigt werden. Montage und Austausch könnten sehr einfach mit Plug- & Play-Logik erfolgen."*

3.4.3 Wärmeabgabesysteme

Heizflächen haben die Aufgabe, die vom Heizmittel gelieferte Wärme in den zu heizenden Räumen durch Konvektion und Strahlung an die Raumluft zu übertragen. Die dazu verfügbaren Raumheizeinrichtungen (Raumheizflächen) teilen sich in freie Heizflächen (z. B. Heizkörper) und in im Baukörper integrierte Heizflächen (Flächenheizungen, z. B. Fußbodenheizungen, Wandheizungen) auf.

Die heute überwiegend eingesetzten Heizflächen übertragen Wärme an den Raum sowohl durch Konvektion (Lufterwärmung) als auch durch Strahlung (Umschließungsflächenerwärmung). Dabei schwanken die Strahlungs- und Konvektionsanteile bei den unterschiedlichen Systemen. Warmluftheizungen sind rein konvektive Heizsysteme, Wand- und Fußbodenheizungen haben einen hohen Strahlungsanteil.

Die Wärmeübergabe an den Nutzer erfolgt mit freien (z. B. Radiatoren, Konvektoren) oder bauteilintegrierten (z. B. Wand- oder Fußbodenheizung) Heizflächen. Zur Heizfläche gehört eine Regeleinrichtung. Beide Elemente zusammen führen – je nach Nutzereingriff und Fremdwärmeaufkommen – zu einer mehr oder weniger konstant und nahe dem Sollwert gehaltenen Raumtemperatur.

Die realen Auswirkungen verschiedener regelungstechnischer Ausstattungsmerkmale auf die Innentemperatur wird in der Praxis stark vom Nutzereingriff überlagert. Je höher der Nutzereingriff in die Regelung, desto mehr wird die eigentliche Regelfunktion überlagert. Der Regelabweichung von Raumreglern kann beispielsweise entgegengewirkt werden, indem der Sollwert in kurzen Intervallen angepasst wird. Die Normen zu EnEV, hier z. B. die DIN V 4701-0 [214] geht zum Systemvergleich von einem gleichen Nutzerverhalten bei allen Ausstattungsvarianten aus – was in der Realität eher unwahrscheinlich ist.

Heizkörper vs. Flächenheizungen

Die verschiedenen Heizflächenarten zeichnen sich durch unterschiedliche Komforteindrücke für den Nutzer sowie durch verschiedene Trägheiten und Selbstregeleffekte im Zusammenspiel mit der Raumheizlast aus. In der Praxis erweisen sich Heizflächen mit geringem Wasserinhalt, d. h. mit geringer Wärmekapazität bei hoher Leistung, als vorteilhaft, weil sie für eine dynamische Leistungsanpassung besser geeignet sind.

Durch die Anordnung von Heizflächen soll in Gebäuden mit schlechten Wandaufbauten die Strahlungsasymmetrie durch unterschiedlich temperierte Oberflächen ausgeglichen werden. Im Neubau oder in nachträglich gedämmten Gebäuden ist die Strahlungsasymmetrie jedoch gering. Hier bestehen praktisch keine Probleme mit der thermischen Behaglichkeit, lediglich die Fallluftströme an hohen Fenstern und während Lüftungsphasen sind kritisch. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Anordnung der Heizflächen im gut gedämmten Gebäude nur noch eine untergeordnete Rolle spielt, wenn normale Glasflächenanteile und übliche Lüftung vorliegen. Trotzdem ist die Anordnung an der Außenwand anzustreben.

Fußbodenheizungen geben ihre Wärme zu etwa zwei Dritteln durch Strahlung und einem Drittel durch Konvektion ab. Sie zählen daher zu den Strahlungsheizungen. Die Fußbodenheizung besteht aus Heizschlangen im Beton, Estrich oder in Hohlräumen des Fußbodens.

Wesentliche Vorteile der Fußbodenheizung sind die möglichen niedrigen Vorlauftemperaturen (Wärmepumpen, Brennwerttechnik und Solarheizung) des Heizsystems sowie die geringe Staubentwicklung im Raum. Es besteht kein Platzbedarf für Raumheizkörper im Aufenthaltsbereich, eine gleichmäßige Wärmeverteilung im Raum kann erreicht werden.

Nachteilig sind bei im Estrich verlegten Systemen die größere Trägheit der Heizflächen und daher eine schlechtere Regelfähigkeit. Es ergeben sich höhere Investitionskosten, eine nachträgliche Änderung des Heizsystems ist praktisch unmöglich. Dichte Rohrverbindungen innerhalb des FußboDENAufbaus sind unabdingbar. Wegen der starken Abhängigkeit der Leistung von der Temperaturdifferenz von Fußbodenoberfläche und Lufttemperatur ergeben sich untere Einsatzgrenzen in hochwärmegedämmten Gebäuden. Die Temperaturdifferenz in einem auf Passivhausniveau gedämmten Gebäudes (Heizlast: 10 W/m²) beträgt bei Auslegung nur 1,1 K. Hier dürften – vor allem im Teillastfall – die Grenzen der Regelbarkeit bereits überschritten sein.

In einem gut gedämmten Gebäude mit ggf. gleichzeitig großen Fensterflächenanteilen treten darüber hinaus hohe Fremdwärmegewinne auf. Bei konventioneller Fußbodenheizung wird typisch in 50 % der Heizperiode, d. h. an 120 Tagen, ein 5 bis 6 cm dicker Heizestrich morgens um ca. 2 bis 4 K über die Raumtemperatur aufgeheizt, obwohl im weiteren Tagesverlauf keine Wärmezufuhr erforderlich ist. Das hieraus resultierende „Verschwendungspotential“ liegt typisch bei 8 bis 14kWh/(m²a).

Das Passivhausinstitut führt in seinem „Altbauhandbuch“ 2009 aus [134]:

> *„Die klassische Art der Beheizung über Heizkörper hat auch im Passivhaus durchaus ihre sinnvollen Einsatzmöglichkeiten. In großen Wohnungen bzw. Gebäuden, welche nur von einer vergleichsweise geringen Personenzahl bewohnt werden, ist die nach dem Personen-Kriterium definierte Luftmenge zur Beheizung nicht ausreichend. Heizkörper, zumindest in einigen Räumen, schaffen hier einen Ausgleich. […] Zudem entspricht diese Art der Wärmeabgabe dem gewohnten Standard und hat eine hohe Akzeptanz bei den Bewohnern. Falls schon ein Heizkörpersystem vorhanden ist, kann dieses weiter genutzt werden um die Investitionskosten gering zu halten.*
> *[…]*
> *Die Heizkörper werden in der Regel als Niedertemperatursystem mit einer Vorlauf-/Rücklauftemperatur von 55/45°C ausgelegt. Eine schnelle Reaktion der Heizflachen ist von Vorteil, daher sollten die Masse und der Wasserinhalt des Heizkörpers in Bezug zu seiner Leistung möglichst gering sein.*
> *[…]*
> *Flächenheizsysteme werden häufig aufgrund ihres hohen Strahlungsanteils bevorzugt. In konventionellen Gebäuden hat dies seine Berechtigung, nicht mehr jedoch im PH, im Gegenteil: Ein Fußbodenheizsystem ist aufgrund der großen Masse sehr träge, und führt daher dazu, dass in der Übergangszeit Räume (durch die solare Einstrahlung über die Fenster) überheizt werden. Diese Überschusswärme wird dann hinausgelüftet, da z. B. der Fußboden als Wärmespeicher praktisch nicht zur Verfügung steht; letztlich wird der Energieverbrauch dadurch erhöht.*
> *[…]*
> *Die Kosten von Flächenheizsystemen liegen im Normalfall über den Kosten eines Heizkörpersystems, da ein relativ hoher Aufwand für die nach EnEV vorgeschriebene Einzelraumregelung entsteht*
> *[…]*
>
> *Generell sollte die Anordnung von Heizflachen in bzw. an der thermischen Gebäudehülle vermieden werden: Auch bei Dämmdicken im Passivhausstandard führt dies dazu, dass der entsprechend ausgestattete Wand- oder Fußbodenbereich auf dem Temperaturniveau der Vorlauftemperatur liegt. Die Transmissionsverluste in diesem Bereich liegen dann durch die hohe Temperaturdifferenz nach außen bzw. zum Keller auf einem deutlich höheren Niveau als bei der sonst zugrunde gelegten Raumtemperatur. Wandheizflachen oder auch Sockelleistenheizungen sollten daher nur an Innenwänden vorgesehen werden.“*

Energetischer Vergleich - Praxismessungen

In einer Planungsunterlage des Heizkörperherstellers Purmo wird 2012 [133] die Thematik „Mehrverbrauch von Flächenheizsystemen“ auf Basis skandinavischer Studien thematisiert und quantifiziert. In einer Veröffentlichung der Fachzeitschrift SBZ werden die Aussagen wie folgt wiedergegeben [227] (Hinweis der Gutachter: trotz intensiver Suche sind die ursprünglichen Quellen der skandinavischen Studie nicht mehr auffindbar):

„Feldstudien in Skandinavien haben ergeben, dass Heizkörper energieeffizienter sind als Flächenheizungen. Den Ausschlag gibt dabei die flinke Systemdynamik. Wissenschaftliche Studien zeigen, dass Heizkörper in gut gedämmten Gebäuden rund 15 % weniger Energie benötigen können als Flächenheizungen. Grund ist die Empfindlichkeit moderner Gebäude gegenüber inneren und äußeren Wärmequellen und die Reaktionsschnelligkeit moderner Heizkörper.

Eine Studie von Professor Dr. Jarek Kurnitski, Technische Universität Helsinki, untersuchte die Reaktion und den Energieverbrauch der Heizung eines modernen einstöckigen Einfamilienhauses in Deutschland – einmal mit Heizkörpern und einmal mit Flächenheizungen. […] Letztlich verbrauchte die Heizkörperheizung erheblich weniger Energie als die Flächenheizung. Die Hauptgründe dafür sieht Kurnitski in den geringen Systemverlusten und in der schnellen Reaktion der Heizkörper auf Wärmegewinne […] Das Heizkörpersystem reagierte aufgrund seiner geringen thermischen Masse bereits bei einem Wärmegewinn von 0,5°C und hielt die Temperatur nahezu verlustfrei am Sollwert. Die Flächenheizung hingegen reagierte durch ihre große Speichermasse viel langsamer. Das System gab weiterhin Wärme ab und die Raumtemperatur stieg weit über den eingestellten Wert hinaus. Insgesamt ergab die Studie eine Differenz von rund 15 % im Energieverbrauch der beiden Wärmeübergabesysteme – zugunsten des Heizkörpers.
[…]
Sein schwedischer Kollege Professor Dr. Christer Harrysson, Örebro Universität, untersuchte zwölf Monate lang den Energieverbrauch von sechs Wohnsiedlungen in Kristianstad, Schweden, mit insgesamt 130 Einfamilienhäusern aus den 1980er-Jahren. Der Dämmstandard der untersuchten Häuser ist dabei mit den Vorgaben der EnEV 2009 in Deutschland vergleichbar. Vier der Siedlungen waren mit Heizkörpern und zwei mit Fußbodenheizungen ausgestattet […] Die Wissenschaftler ermittelten in den Häusern mit Heizkörpern einen durchschnittlichen Gesamtenergieverbrauch von 115 kWh/m² und in den fußbodenbeheizten Häusern von durchschnittlich 134 kWh/m². Der Energieverbrauch war also auch hier in den heizkörperbeheizten Häusern um rund 15 % geringer. In den Häusern, in denen die Fußbodenheizung nach unten schlecht gedämmt war und es höhere Systemverluste gab, betrug die Differenz zum Energieverbrauch der Heizkörperheizung sogar 25 %.“

Die energetische Bewertung im Rahmen dieses Gutachtens erfolgt gemäß Anhang 5.7.1: die Effekte u. a. der Regelung und Fremdwärmenutzung sind als „Differenzenergiemenge für die Qualitätssicherung“ zusammengefasst.

Dabei werden die erläuterten Effekte der Trägheit der Flächenheizung nicht negativ angelastet. Es erfolgt eine Gleichbehandlung der Systeme. Da auch die Heizkörperheizung Schwachstellen aufweist (insbesondere Abwärme aus Steigesträngen), welche bei der Flächenheizung weniger ausgeprägt sind, erscheint diese Vorgehensweise gerechtfertigt.

Änderung der Art der Übergabe

Mit der Art der Wärmeübergabe ändert sich auf jeden Falls die Systemtemperatur im Heizsystem. Dies wird in dem selbst erstellten Rechenmodell berücksichtigt. Die Verteilverluste (nennenswert im unbeheizten Keller) nehmen ab, die Effizienz der Erzeuger zu – zumindest soweit eine nennenswerte Temperaturabhängigkeit gegeben ist (v. a. bei Wärmepumpen).

Tabelle 97 zeigt den sehr geringen Einfluss im Gebäudedurchschnitt.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Umstellung von Heizkörper- auf Fußbodenheizung				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	166	135
	nachher	kWh/(m²a)	162	133
Emissionsminderung, Wärme		%	-2 %	-2 %

Tabelle 97 Auswertung Änderung des Übergabesystems im Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung]

Besonders einflussreich ist die Art des Übergabesystems in Verbindung mit dem Wärmepumpeneinsatz. Eine schematische Übersicht der untersuchten Varianten zeigt Abbildung 109. Da im Bestand regulär die Heizkörper bereits vorhanden sind, wird eine Umrüstung auf Flächenheizung energetisch geprüft.

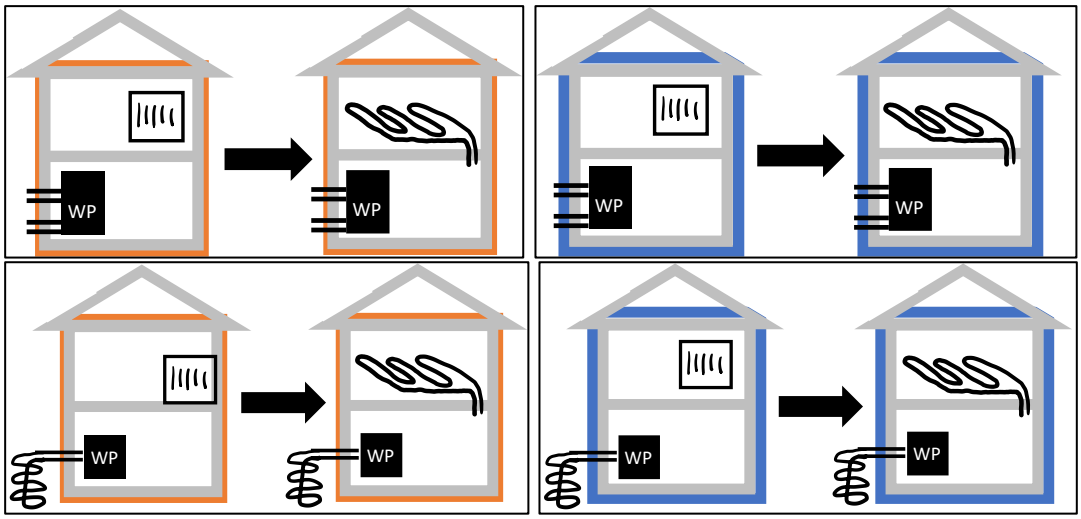


Abbildung 109 Schema – Einbau einer Flächenheizung anstelle von Heizkörpern in Gebäude mit Wärmepumpen [eigene Darstellung]

Tabelle 98 zeigt die Ergebnisse für EZFH verschiedener Baustandards. Die Emissionsminderung liegt bei den Gebäuden mittleren Baustandards (etwa Wärmeschutzverordnung 1984) bei etwa 20 %, bei den besten Baustandards (Effizienzhaus, Passivhaus) bei nur noch 8 bis 9 %. Die Systemtemperaturen für Heizkörper und Flächenheizungen gleichen sich mit verbessertem Baustandard an, damit differieren die Jahresarbeitszahlen entsprechend nicht mehr so stark. Noch schlechtere Gebäude wurden nicht untersucht, weil die Umstellung auf Flächenheizung praktisch kaum möglich ist.

			EZFH		EZFH	
Maßnahmenbeschreibung						
Umstellung von Heizkörper- auf Fußbodenheizung			… im „mittel“-Gebäude mit		… im „best“-Gebäude mit	
			Außenluft-Wärme-pumpe	Erdreich-Wärme-pumpe	Außenluft-Wärme-pumpe	Erdreich-Wärme-pumpe
Ergebnisse						
Auslegungsvor-lauftemperatur	vorher	°C	65	65	46	46
	nachher	°C	42	42	35	35
Jahresarbeits-zahl Heizung*	vorher	-	2,4	3,0	2,9	3,8
	nachher	-	3,1	4,0	3,3	4,4
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	56	45	24	19
	nachher	kWh/(m²a)	46	36	22	18
Emissionsminderung, Wärme		%	-19 %	-20	-8	-9
*bei den Außenluftwärmepumpen ist der Wert incl. des Spitzenlastheizstabes dargestellt						

Tabelle 98 Auswertung Änderung des Übergabesystems in EZFH mit Wärmepumpen [eigene Darstellung]

Die sich ergebende Endenergiedifferenz lässt sich in Energiekostenersparnisse umrechnen. Die maximal 10 kWh/(m²a) für die Version „Altbau mit Außenluftwärmepumpe“ entsprechen etwas mehr als 300 €/a an Kostenersparnis. Unter der Annahme, dass die Flächenheizung wenigstens 30 Jahre Lebensdauer aufweist, würde sich ein maximaler Betrag von 9.000 bis 10.000 € ergeben, den die Umrüstung kosten darf. Für die genannte Summe könnte nachträglich in ein EZFH von 140 m² Größe eine Flächenheizung installiert werden, wenn sich das Gebäude in einem Rohbauzustand befindet und ohnehin Innentüren usw. getauscht werden.

MFH: Die Werte sind grundsätzliche mit denen der EZFH vergleichbar. Die Emissionsminderung fällt etwas geringer aus, weil die Heizung gegenüber der Trinkwassererwärmung weniger Gewicht hat. Die Kostenüberlegungen sind nahezu identisch.

In allen anderen Versionen (bessere Gebäude und/oder günstigere Energieträger und/oder weniger temperatursensible Erzeuger) werden kleinere Beträge ermittelt. Die tatsächliche Umsetzung solcher Maßnahmen wird dann (noch) unwirtschaftlicher.

Es ist davon auszugehen, dass die größere Durchdringung des Bestandes mit Flächenheizungen überschaubar bleibt, weil die baupraktische Ausführung kompliziert ist, vgl. auch die Interviews von Clausen und Hinterholzer 2017 [228].

Erfolgt eine Umrüstung dennoch, sind andere Gründe als der Treiber als die Energieeffizienz. In den Berechnungen zu diesem Gutachten ist der Systemumstieg nicht mit Kosten hinterlegt.

Eine insgesamt größere Marktdurchdringung – bezogen auf den Gesamtbestand – ist vor allem durch den Neubau (mit gleichzeitigem Rückbau von heizkörperbeheizten Gebäuden) zu erwarten. Dieses für die Heizungsindustrie sensible Thema wird mit wenigen Ausnahmen in der Fachdiskussion wenig bis gar nicht angesprochen, obwohl auch die Gutachter und auch das Passivhaus-Institut in früheren Veröffentlichungen aus verschiedenen eigenen Feldstudien die Ergebnisse eines Mehrverbrauchs von Fußbodenheizsystemen gegenüber Heizkörpern bestätigen. Mit Ausnahme der skandinavischen Studie sind jedoch keine weiteren praktischen Feldstudien mit statistisch erhobener Sicherheit den Gutachtern bekannt.

Die Tatsache aber, dass z. B. die Förderung von Wärmepumpen an den Einbau von Flächenheizsystemen gebunden wird und daraus ein wesentlicher Mehrverbrauch zukünftiger Effizienzhäuser resultieren könnte, zeigt hier einen notwendigen und wichtigen zukünftigen Forschungsbedarf.

3.4.4 Heizungsrohrnetze

In Gebäuden des Bestandes sind überwiegend Heizkörperheizungen vorhanden. In der Praxis ergibt sich eine Fülle von Ausführungsvarianten. Im Altbau typisch ist die überwiegend vertikale Erschließung über Steigestränge und kurze Anbindeleitungen an die Heizkörper. Im Neubau finden sich häufig Systeme mit Leitungsverlegung im Estrich, ausgehend von einem Zentralverteiler pro Wohn- oder Nutzeinheit. Die Erschließung über etagenweise angeordnete Ringe kommt unabhängig vom Baualter häufig zum Einsatz. Typische gewählte Verteilnetzvarianten zeigt Abbildung 110.

In einem Netz sind jeweils Einzelanschlüsse der Heizkörper vorhanden (im Bild: schwarz), die häufig nur in dem betreffenden Raum verlegt sind, in dem sich auch die Heizfläche befindet. Eine Ausnahme bildet das mittlere System, bei dem Einzelschlüsse der Heizflächen in einem Flur oder Hausanschlussraum starten (auch Fußbodenheizungen würden so aussehen).

Darüber hinaus gibt es die Hauptleitungen (im Bild: gelb) als Verteilleitung (waagerecht) oder Steigestrang (senkrecht). Sie liegen im Keller oder queren beheizte Bereiche, wobei sie häufig auch Räume queren, für deren Wärmeversorgung sie selbst nicht zuständig sind.

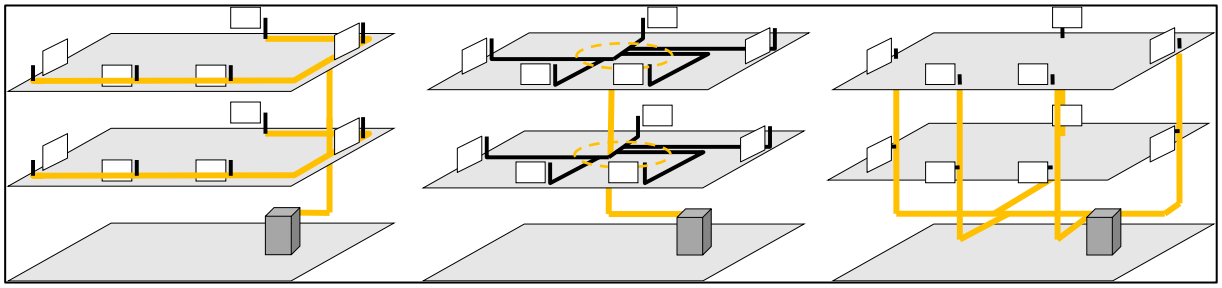


Abbildung 110 Prinzipielle Möglichkeiten der Heizwasserversorgung [eigene Darstellung]

Tatsächliche Verluste ergeben sich aus den Leitungen im unbeheizten Bereich, für die eine Dämmpflicht „etwa 100 % des Rohrdurchmessers“ nach EnEV besteht. Dennoch sind auch die Leitungen im beheizten Bereich relevant, vor allem bei nachträglich baulich sanierten Gebäuden mit (noch) alten Leitungsnetzen.

Nur selten erfolgt in der Literatur eine kritische Auseinandersetzung mit der Thematik „Wärmeabgabe von Heizleitungen im beheizten Bereich“. Mercker und Arnold bemerken in einer ISFH-Studie 2017 [229]:

> *„Durch eine energetische Sanierung der Gebäudehülle steigt der Anteil der Verteilverluste an der Gesamtwärmeerzeugung deutlich an (Werte von 50 % und mehr können erreicht werden). Daher ist es von hoher Wichtigkeit, die Verteilverluste nicht einfach pauschal zu betrachten oder gar zu ignorieren, sondern sie stets angemessen in allen Berechnungen mit einzubeziehen und ihre Nutzbarkeit richtig einzuschätzen.“*

Bewertung der Rohrnetze in den Typgebäuden

Für die Berechnungen im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wird das Verteilnetz im unbeheizten Bereich des Gebäudes wie folgt auf Basis eigener Vorarbeiten eingeschätzt [193] [224]:

- Wärmedurchgangskoeffizient einer Heizungsleitung im Keller: 0,25 W/(mK)
- verlegte Verteilleitung für Heizung im Keller: 0,15 m/m² bezogen auf die Wohnfläche

In dem Beispielmehrfamilienhaus sind etwa 70 m Rohr als Heizungsverteilung im Keller zu erwarten; bei einer typischen Zweirohrheizung sind dies je 35 m Vor- und Rücklaufleitungen. Das Einfamilienhaus weist etwa 21 m Rohrleitungen für die Heizung auf.

Darüber hinaus sind weitere Rohrleitungen im beheizten Bereich vorhanden. Sie werden im Rahmen der Berechnungen nicht separat berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass ihre Wärmeabgabe zur Heizung nutzbar ist, so dass keine Verluste berechnet werden müssen (und diese Leitungsabschnitte auch nicht bei den Gewinnen erscheinen).

Allerdings ist dies eine Vereinfachung: je besser der Baustandard, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass eine Heizungsrohrleitung – zumal wenn sie ungedämmt ist – den betreffenden Raum auch überwärmt. Von den Gutachtern wurde die Problematik erstmalig in einem BBSR-Projekt 2003 thematisiert [230] – Stichwort „erzwungener Lüftungswärmeverlust“. Dieser Effekt wird im Rahmen dieses Gutachtens in der Qualitätssicherung zusammen mit anderen Merkmalen dieser Art zusammengefasst, siehe Anhang 3.6.2.

Damit die Größenordnung dieser Leitungsabschnitte im Vergleich zu den oben genannten deutlich wird, seien Vergleichswerte hier informativ genannt [193] [224]:

- Wärmedurchgangskoeffizient einer Heizungsleitung im beheizen Bereich: ca. 0,50 W/(mK)
- verlegte Verteilleitung für Heizung im beheizten Bereich: 0,55 m/m² bezogen auf die Wohnfläche

In dem Beispielmehrfamilienhaus sind weitere etwa 258 m Rohr als Heizungsverteilung zu erwarten; bei einer typischen Zweirohrheizung sind dies je 129 m Vor- und Rücklaufleitungen. Das Einfamilienhaus weist etwa 78 m Rohrleitungen für die Heizung im beheizten Bereich auf. Welche Konsequenzen sich daraus ergeben, wird nachfolgend besprochen.

Überwärmung durch Leitungen im beheizten Bereich:

Fall 1: betrachtet wird eine Verteilung als Etagenringsystem, siehe Abbildung 110 links. Hier interessiert als Extrembeispiel der Eckraum rechts vorn. Ein solcher Raum wird an zwei Seiten von einer Hauptleitung durchquert. Für einen Wohnraum von 3 x 5 m Fläche (z. B. Kinderzimmer) sind dies 16 m Leitungslänge. In dem typischen Bestandsgebäude-MFH sind folgende Randdaten gegeben:

- Heizwärmebedarf (mittlerer Wert für das Gebäude) 84 kWh/(m²a)
- typische Heizwassernetztemperatur im Verlauf der Heizperiode: 37°C
- typische mittlere Innenraumtemperatur: 20°C

Im Verlaufe einer Heizperiode (270 d/a) gibt das typischerweise ungedämmte Rohrnetz an den Raum eine Energiemenge von 880 kWh/a ab. Das Zimmer hat bei der genannten Größe einen Heizwärmebedarf von 1260 kWh/a. Mit der Rohrleitung kann bereits im Bestand 70 % der Wärmemenge gedeckt werden.

Fall 2: betrachtet wird das Verteilsystem über Steigestränge siehe Abbildung 110 links. Hier interessiert als Extrembeispiel ein eher kleiner Raum mit Steigestrang, z. B. ein Bad von 2 x 3 m. Ein paar Steigleitungen sind zusammen 5 m lang. In dem typischen „gut“ sanierten Bestandsgebäude-MFH sind folgende Randdaten gegeben:

- Heizwärmebedarf (mittlerer Wert für das Gebäude) 36 kWh/(m²a)
- typische Heizwassernetztemperatur im Verlauf der Heizperiode: 32°C
- typische mittlere Innenraumtemperatur: 20°C

Im Verlaufe einer Heizperiode (261 d/a) gibt das typischerweise – immer noch – ungedämmte Rohrnetz an den Raum eine Energiemenge von 188 kWh/a ab. Das Bad hat bei der genannten Größe einen Heizwärmebedarf von 216 kWh/a. Mit der Rohrleitung kann nach der Sanierung 87 % der Wärmemenge gedeckt werden. Die vermutlich ebenfalls in diesem Raum befindliche Leitung für das Trinkwarmwasser kommt noch hinzu!

Weitere ähnliche Beispiele ließen sich konstruieren.

Die Wärmeabgabe ungedämmter Heizungsleitungen im beheizten Bereich ist nicht immer nutzbar. In kritischen Räumen mit großer Leitungsverlegedichte je Wohnfläche (je nach Art der Verteilung sind diese an anderen Stellen im Gebäude zu finden) kann es zu einer ganzjährigen oder zumindest teilweisen Überwärmung der Räume kommen. Überschusswärme wird ungenutzt abgelüftet.

Verschärft wird die Problematik bei der Verwendung von Einrohrheizungen (größere Rohrdurchmesser, kaum Temperaturregelung, ständige Durchströmung). Hier haben die Gutachter nach Bestandssanierungen Objekte messtechnisch untersucht, bei denen mehr als 80 % der gesamten Heizwärme über das Rohrnetz abgegeben wurden [193]. Wegen der ungewünschten und nicht regulierbaren Wärmeeinträge bestand „Zwangswärmekonsum“. Neben Behaglichkeitsproblemen und Mehrverbrauch ist dies problematisch für die Heizkostenabrechnung.

Fazit

Die Leitungsdämmung im Keller ist eine der wirtschaftlichsten Maßnahmen überhaupt. Daher schreibt die EnEV die nachträgliche Dämmung ungedämmter Leitungen im unbeheizten Bereich auch vor. Allerdings sind gänzlich ungedämmte Netze im Keller eher die Ausnahme. Selbst die Verbesserung eines schlecht gedämmten Leitungsnetzes im Keller (50 %) auf Neubauniveau (100 %) vermindert typischerweise die Verluste um 5 bis 15 kWh/(m²a) auf fast 50 % der Ausgangswerte. Die kleineren Werte gelten für das MFH, die größeren für EZFH.

Eine Dämmung bzw. Nachdämmung von Heizungsverteilleitungen im Keller auf etwa 150 bis 200 % (heutiger Standard 100 %) des Durchmessers erachten die Gutachter für sinnvoll.

Im beheizten Bereich verbessert eine nachträgliche Dämmung von ungedämmten Steigesträngen und Etagenringen die Überwärmungsproblematik (falls vorhanden) und Heizkostengerechtigkeit (falls relevant). Dies betrifft vor allem Systeme mit Einrohrheizung.

Dem hydraulischen Abgleich eines Heizungsnetzes (vgl. Anhang 3.6.2) sollte eine wärmetechnische Verbesserung der Rohre vorausgehen. Ziel des Abgleichs ist, die Wärmeabgabe der Heizflächen entsprechend einzuregeln. Dies setzt allerdings voraus, dass in jedem Raum die Hauptwärmeabgabe auch seitens der Heizfläche erfolgt und nicht ungeregelt über Steigestränge oder Verteilleitungen.

Eine Dämmung bzw. Nachdämmung von Heizungsverteilleitungen im beheizten Bereich auf etwa 100 bis 150 % (heutiger Standard 50 %) des Durchmessers erachten die Gutachter für sinnvoll.

Die Dämmstandards lehnen sich an die Aussagen von Bastian et al. zur „Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten“ [134] an.

Darüber hinaus können regelungstechnische Maßnahmen ergriffen werden, um eine (unabsichtliche) Sommerheizung zu unterbinden. In mehreren Altbauobjekten, welche von den Gutachtern vor einer Modernisierung untersucht wurden, konnte eine nennenswerte Sommerheizung festgestellt werden (Anteil ca. 50 %) [26]. Auch in forschungsbegleiteten Modernisierungsprojekten tritt dieser Fall auf, wie Cali et al. 2016 berichten [210]. Die Abschaltung der Heizungsanlage im Sommer führte zu einer Minderung des Verbrauchs um 15 %.

3.4.5 Zwischenfazit Peripherie

Übergabesysteme

Da nach einer umfassenden Gebäudedämmung die Systemtemperaturen auch in Heizkörpernetzen herabgesetzt werden können, spricht aus energetisch/wirtschaftlicher Sicht nichts gegen den Beibehalt der Heizkörper. Ein anlassloser Umbau von Heizkörpern auf Flächenheizungen ist nicht sinnvoll, wenn auch sich unbestreitbar geringere Verteilverluste und bessere Wärmeerzeugereffizienzen ergeben.

Jegliche Änderung – findet sie dennoch statt – ist an den Sanierungszyklus zu koppeln. Ist die dann gewählte Flächenheizung schnell regelbar, kann sie im effizient sanierten Gebäude gut auf die eintreffende Fremdwärme reagieren. Die klassischen dickschichtigen Estrichverlegungen sind aus dieser Überlegung her nicht sinnvoll.

Da der Einbau von Flächenheizungen einen rohbauähnlichen Gebäudezustand erforderlich macht (zumindest als Fußbodenheizung), ist die Marktdurchdringung eher vom Neubaugeschehen abhängig als von der Sanierung. Die Gutachter gehen davon aus, dass – im nennenswerten Stil – nur in den EZFH das System gewechselt wird. Im Zusammenhang mit Komplettumbauten, Anbauten, Ausbauten usw. Der Motivationsgrund dürfte jenseits der Energieeffizienz liegen. Der Geschosswohnungsbau wird weniger von Systemwechseln betroffen sein, schon aus Sicht der damit unvermeidlichen längeren Leerstände während der Umbauphasen.

Da die Kosten eines Systemumbaus sehr hoch, die Vorteile aus Sicht der Emissionsvermeidung eher gering sind – selbst bei Wärmepumpen – sehen die Gutachter keinen Anlass einer Anreizförderung.

Verteilnetze Heizung

Die Dämmung von Rohrleitungen erfolgt analog den Werten, die für die Trinkwassererwärmung genannt sind., Die Gründe sind identisch.

Zirkulationsverzicht im EZFH

Die Verfasser dieses Gutachtens gehen davon aus, dass in Ein- und Zweifamilienhäusern im Zuge der anstehenden Sanierungszyklen alle Systeme mit Zirkulation nach und nach durch solche ohne Zirkulation ersetzt werden. Ein kleinerer Anteil wird in diesem Zuge hin zu dezentralen Systemen umgebaut. Alle Leitungsteile, die im Gebäude installiert sind, haben eine Dämmung in Stärke des Durchmessers – unabhängig davon, wo sie liegen. Da sich – wenn auf den Sanierungszyklus gewartet wird – keine Mehrkosten ergeben, sehen die Gutachter keinen Anlass einer Anreizförderung.

Dezentralisierung im MFH

Eine klassische Versorgung mit Hochtemperaturzirkulation sehen die Gutachter nicht als langfristige Lösung für den Großteil der MFH an. Sie weist als Negativmerkmal vor allem die Überwärmungsproblematik der beheizten Räume auf. Außerdem setzt sie – wärmepumpenunfreundlich – hohe Systemtemperaturen voraus. Der Zirkulationsverzicht im MFH kann jedoch nur erfolgen, wenn klassisch dezentralisiert wird oder ein Zweileitersystem mit örtlicher Wärmeauskopplung errichtet wird. Die Gutachter gehen davon aus, dass im Zuge von Modernisierungen nach und nach ein Umbau erfolgt.

Der Anteil der klassischen dezentralen Systeme wird dabei noch steigen. Dies betrifft vor allem Gebäude mit ungünstigen Kubaturen (lang und flach). Für die Kombination mit Fußbodenheizung – die nach Ansicht der Gutachter noch auf Jahrzehnte nicht das Standardsystem im MFH ist – erscheint eine direkt elektrische Versorgung mit Trinkwarmwasser ebenfalls logischer. Es besteht in solchen Gebäuden eine deutliche Diskrepanz der beiden Temperaturniveaus. Eine Entkoppelung der beiden Versorgungssysteme ist daher naheliegender. Außerdem neigen Gebäude mit Flächenheizung zu Mehrverbräuchen.

Die anderen Gebäude erhalten tendenziell Zweileitersysteme, vor allem in Kombination mit Heizkörperheizungen. Da hier nennenswerte Vorlauftemperaturen ohnehin zur Verfügung stehen, kann eine lokale Wärmeauskopplung in der Wohnung erfolgen (Wohnungsstation). Nach Ansicht der Gutachter bieten sich dabei eher geregelte Systeme an, die eine Vorlauftemperatur nach der Heizkurve liefern und in der Wohnung elektrisch direkt nachgeheizt werden. In dieser Lösung müssen keine besonderen Vorkehrungen für die Vorlauftemperaturregelung getroffen werden. Sie erfolgt zentral. In der Nichtheizperiode kann der notwendige Strom aus Photovoltaik eingesetzt werden.

Der Umbau klassischer Vierleiternetze hin zu anderen Lösungen kann mit Anreizen verbunden werden. Beispielsweise indem die Investitionskostenzuschüsse für bestimmte Erzeuger (z. B. Wärmepumpe anstelle Ölkessel) auch auf die Verbesserung der Netze ausgedehnt werden (Paketbildung).

Alle Leitungsteile, die sich dauerhaft durchströmt im unbeheizten Gebäudebereich befinden sind mit einer Dämmdicke von mehr als 150 bis 200 % (heutiger Standard 100 %) des Durchmessers zu versehen. Im beheizten Bereich sind 100 bis 150 % anzustreben (heutiger Standard 50 %). Dies dient der Vermeidung von Verlusten im Überwärmung der durchquerten Räume.

3.5 Energieeffizienz und Kosten für Zusatzerzeuger

Die nachfolgende Untersuchung betrifft den Einsatz ergänzender Anlagentechnik – in Abgrenzung zu den „Haupterzeugern“ aus Anhang 3.3 hier als „Zusatzerzeuger“ zusammengefasst. Ein Gebäude kann auch ohne diese Erzeuger betrieben werden, jedoch können sie eingesetzt werden, um den Bedarf an Endenergie zu mindern. Betrachtet werden Solarthermie, Photovoltaik und Wohnungslüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung.

Information vorab: aufgrund der derzeitigen Energieträgerbepreisung erweisen sich fast alle Systemwechsel (z. B. Wärmepumpe statt Gaskessel) als unwirtschaftlich bzw. benötigen Investitionskostenzuschüsse, die die Investitionskosten überschreiten. Die Ergebnisse für eine alternative Bepreisung – welche die Gutachter für geeigneter halten – finden sich in Anhang 3.9.5.

3.5.1 Photovoltaik

Bei der IWU-Zustandserhebung des Wohnbaus 2016 lässt sich feststellen, dass in etwa 8 % aller Wohnbauten eine Photovoltaikanlage installiert ist. Bei den Neubauten ab 2010 sind es 16 % [7]. Der Ausbau nimmt seit 2016 wieder zu, siehe Details in Anhang 5.6.4.

Der KfW-Monitoringbericht 2017 ergibt, dass in 2 % aller Förderfälle eine Photovoltaikanlage eingebaut wird; unter den Effizienzhausprojekten im Bestand haben 15 % aller Fördermittelnehmer eine PV-Anlage gewählt [15].

Erträge und Qualitätssicherung

Der Wirkungsgrad von Photovoltaikanlagen und damit die Erträge sind in den vergangenen Jahrzehnten stark angestiegen. 1997 lagen Anlagen im Realmonitoring noch bei etwa 700 kWh/a je kW_{peak} [231]. Nur ein halbes Jahrzehnt später konnten in der Praxis etwa 850 kWh/(a·kW_{peak}) gemessen werden [232].

Heute können deutlich höhere Werte von 900 bis 1000 kWh/(a·kW_{peak}) erzielt werden [83]. Sogar mit Fassadenkollektorfeldern in Südrichtung und am Standort Hamburg lassen sich 900 kWh/(a·kW_{peak}) generieren [233]. Die Werte können durch mehrere Messprojekte der Gutachter bestätigt werden, z. B. Halle/Saale 1036 kWh/kW_{peak} [234].

Es sind keine Erkenntnisse bekannt, die dafürsprechen, das es wegen mangelnder Qualitätssicherung nennenswerte Ertragsverluste gibt. Eine Photovoltaikanlage kann selbstverständlich ebenfalls Mängel aufweisen, jedoch ist sie – nach heutiger Datenlage eingeschätzt – sehr robust. Erste Probleme mit Rissen auf der Rückseite von PV-Modulen wurden Anfang Juli 2020 bekannt. Hier sind die Hersteller kurzfristig gefordert, zu reagieren.

Lokale Photovoltaik

Die Erzeugung von Photovoltaikstrom bewirkt unvermeidbar im Verlaufe eines Jahres Überschüsse, die nicht unmittelbar im Gebäude genutzt werden. Diese müssen zurückgespeist, ggf. umgewandelt und bis zur späteren Nutzung gespeichert werden (z. B. in Pumpspeicherkraftwerken, als Wasserstoff oder anderer künstlicher Brennstoffe). Später erfolgt eine erneute Umwandlung, um wieder Strom zu erzeugen. Die gesamten Umwandlungsketten sind verlustbehaftet.

Diese Zusammenhänge gelten jedoch unabhängig davon, ob die PV-Anlage auf dem Gebäude angeordnet oder als Freiflächenanlage aufgestellt ist. Die lokale Anordnung am Gebäude bewirkt zumindest, dass der maximal mögliche Momentanbedarf ohne Hin- und Rückumwandlung sowie Netzverluste der Stromtrassen sofort gedeckt werden kann. Außerdem kann eine lokal eingebaute Regelung vor Ort (autark) entscheiden, ob vorhandene Speicher (Trinkwarmwasser, Heizung) noch Aufnahmekapazität für Überschüsse aufweisen.

Die weitere Alternative einer Komplettumwandlung von Photovoltaikstrom in ein künstliches Gas (PtG) bei dann 100 % Versorgung der Gebäude mit ebendiesem (und einem Kessel) wäre ebenfalls denkbar. Dieses Konzept führt aber dazu, dass für jegliche Kilowattstunde des Energieträgers immer beide Verluste der Hin- und Rückumwandlung gelten. Überhaupt kein Strom würde direkt nutzbar, was unweigerlich zu einer größeren notwendigen Gesamtfläche an Photovoltaik führt.

Schulze-Darup führt in seiner Studie zu Mehrfamilienhausquartieren 2019 entsprechend aus [90]:

> *„Die künftige erneuerbare Versorgung basiert auf der Primärseite zu überwiegenden Teilen auf Strom, der als Primärstrom vor allem aus Windkraftanlagen und Photovoltaik bereitgestellt wird. Direkt genutzter Wind- und Sonnenstrom weist einen regenerativen Primärenergiefaktor […] von 1,0 auf und ist zunehmend sehr kostengünstig verfügbar. PV-Strom kann auf Gebäuden für weniger als 0,12 €/kWh bereitgestellt werden, günstige Anlagen ermöglichen Werte bis hinunter zu 0,07 €/kWh. Gas muss dagegen aufwendig mittels Elektrolyse erzeugt werden. Dafür hat sich die Bezeichnung „Power to Gas" (PtG) etabliert. Dieser Prozess ist mit einem erhöhten erneuerbaren Primärenergiefaktor […] von z. B. 1,75 behaftet. Inklusive Rückverstromung betragen die Kosten pro kWh derzeit etwa 0,25 bis 0,45 €/kWh. Dieser Wert wird sinken, bleibt aber auch langfristig deutlich über dem Preis der direkt genutzten erneuerbaren Energien."*

Aus genannten Gründen sehen die Gutachter die vorrangige Direkterzeugung und -nutzung in Form von Strom vor Ort als sinnvoll an.

Bewertung der Photovoltaik in den Typgebäuden

Es wird bei der Bilanzierung von einem Ertrag von 1000 kWh/kW_{peak} ausgegangen. Dies ist ein Wert, der sich für mittlere Strahlungsdaten auch nach der DIN V 18599 ergibt [112]. Aus heutiger Sicht ist er im oberen Bereich tatsächlich gemessener Effizienzen angesetzt. Die erscheint den Gutachtern gerechtfertigt, da – auf Basis der Effizienzsteigerungen zurückliegender Jahre – auch künftig noch Effizienzsteigerungen zu erwarten sind.

Da keine Dimensionierung im Einzelfall erfolgt, gibt es in den Typgebäuden nur zwei Zustände: die Anlage ist vorhanden oder nicht. Dabei wird mit einer standardmäßigen durchschnittlichen Dachbelegung von 36 % gerechnet – siehe Anhang 5.6.4. Die Umrechnung von Photovoltaikfläche in eine Peakleistung erfolgt mit einem Modulwirkungsgrad von 20 %.

Beispiel: in dem Ein- und Zweifamilienhaus ergibt sich bei einer Dachfläche von 108 m² eine Photovoltaikfläche von 39 m² mit einer Peakleistung von 7,8 kW_{peak}. Der zu erwartende Ertrag liegt entsprechend bei 7800 kWh/a.

Bei dem EZFH ergibt sich ein Ertrag von 88 kWh/(m²·a) bezogen auf die überbaute Grundfläche (wenn man die Kellerdecke/Bodenplatte als dieses ansieht). Im Sinne der PER-Bewertung des Passivhausinstitutes wäre ein „Passivhaus Plus" erreicht (Zielwert ≥ 60 kWh/(m²·a)), jedoch kein „Passivhaus Premium" (Zielwert ≥ 120 kWh/(m²·a)) [235]. Bei dem MFH sehen die Werte nur marginal schlechter aus.

Unter Berücksichtigung der angenommenen Investitionskosten und Lebensdauer (siehe Anhang 5.8.2 und 5.9.1) sowie des Kapitalzinses und der Wartungskosten (siehe Anhang 5.9.2 und 5.8.3) liegen die Gestehungskosten für den Strom aus PV bei 6,6 Cent/kWh. In heutigen Großanlagen läge der Wert bei 4 bis 5 Cent/kWh [83].

Einbau einer Photovoltaik in das Durchschnittsgebäude

Die Ergebnisse des nachträglichen Einbaus von Photovoltaik in die jeweils durchschnittlichen Bestandsgebäude zeigt Tabelle 108. Es handelt sich um eine Vollkostenbetrachtung, da die Nachrüstung praktisch immer ohne Anlass erfolgt.

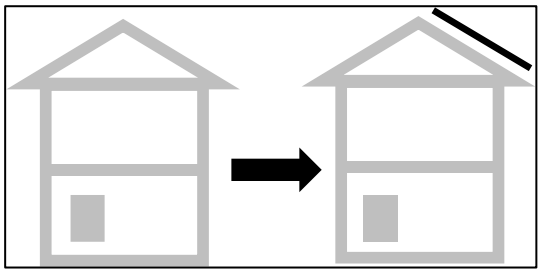


Abbildung 111 Schema – Einbau einer Photovoltaik in ein Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung]

Da der Bedarf vor allem aus dem Haushaltsstrom ergibt, müssen Wärme und Haushaltsstrom in diesem Fall gemeinsam betrachtet werden. Es wird daher die Änderung der Gesamtemission für Wärme und Strom angegeben. Sie liegt bei 7 bis 10 % und somit etwas über dem Wert für die Solarthermie.

Die Maßnahme führt zu äquivalenten CO_2-Preisen von 554 bis 1340 €/t. Das MFH schneidet deutlich besser ab, weil die Anlage hier passender zum Haushaltsstromverbrauch dimensioniert ist. Es ist anzumerken, dass der Vorteil, den die Rückspeisung von Strom in das Netz ergibt (= Sinken des Emissionsfaktors des Strommix') in dieser Betrachtung nicht positiv berücksichtigt wird.

Eine Wirtschaftlichkeit ist in beiden Fällen gegeben. Es ergibt sich jeweils ein Überschuss. Sie ist auch wirtschaftlich, wenn die Energiepreise den heutigen Wert haben und nicht über zusätzliche Emissionspreise höher sind. Die Maßnahme benötigt keinen weiteren Investitionskostenzuschuss, wobei die Vergütung des Überschussstroms mit der heute geltenden EEG-Umlage (vgl. Anhang 5.5.1) angerechnet wird. Da die Emissionsminderungen nur den Haushaltstrom betreffen, ergibt sich das Ergebnis dieser Untersuchung unabhängig von der Wärmeerzeugung.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Einbau einer Photovoltaikanlage (in das Ø-Gebäude)				
Detailkennwerte Stromerzeugung				
produzierter Strom		kWh/(m²a)	55	32
selbst genutzter Strom		kWh/(m²a)	8	11
zurückgespeister Strom		kWh/(m²a)	47	21
Detailkennwerte Stromverbrauch				
Haushaltsstrom		kWh/(m²a)	24	32
Ergebnisse				
Investition	Vollkosten	T€	12,2	23,4
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-7	-10
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	1340	554
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-291	-1220
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 99 Auswertung Photovoltaik auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Deutlich besser werden die Ergebnisse, wenn das Gebäude bereits eine elektrische Trinkwassererwärmung aufweist, da der Strombedarf von vornherein größer ist. Schematisch die diese Maßnahmen in Abbildung 112 dargestellt.

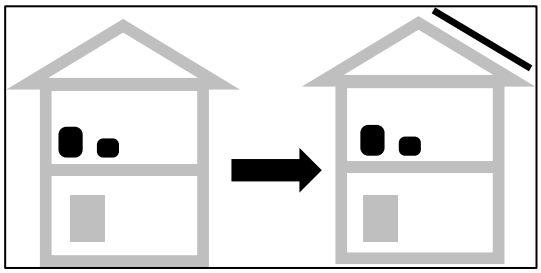


Abbildung 112 Schema – Einbau einer Photovoltaik in ein Durchschnittsgebäude mit elektrischer Trinkwassererwärmung [eigene Darstellung]

Sowohl die Emissionsminderung ist nun größer als vorher, weil der PV-Strom emissionsärmer produziert werden kann als der Netzstrom. Auch die Wirtschaftlichkeit verbessert sich, weil bei gleicher Investition eine deutliche Kostenreduzierung erzielt werden kann. Der selbst produzierte Strom ist günstiger als der eingekaufte. Weitere Ergebnisse zeigt Tabelle 100.

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zur den Zusatzerzeugern und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.5.4.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Einbau einer Photovoltaikanlage (in das Ø-Gebäude)				
Detailkennwerte Stromerzeugung				
produzierter Strom		kWh/(m²a)	55	32
selbst genutzter Strom		kWh/(m²a)	14	14
zurückgespeister Strom		kWh/(m²a)	41	18
Detailkennwerte Stromverbrauch				
Haushaltsstrom		kWh/(m²a)	24	32
Strom für Trinkwarmwasser		kWh/(m²a)	14	16
Ergebnisse				
Investition	Vollkosten	T€	12,2	23,4
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-12	-13
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	981	555
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-286	-1178
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 100 Auswertung Photovoltaik in einem Gebäude mit elektrischer Trinkwassererwärmung auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Dezentralisierung der Trinkwassererwärmung mit Photovoltaik

Die nachfolgende Tabelle 101 führt das Beispiel aus Anhang 3.4.2 fort. Im Zusammenhang mit dem Umbau auf eine dezentral elektrische Warmwasserbereitung wird gleichzeitig eine Photovoltaik installiert. In den Wohnungen würden dazu beispielsweise Elektrokleinspeicher sowie ein größerer Elektrovorratsspeicher (ca. 80 l) installiert, welche im Vorrang per Photovoltaik versorgt werden. Das Prinzipschema ist in Abbildung 113 dargestellt.

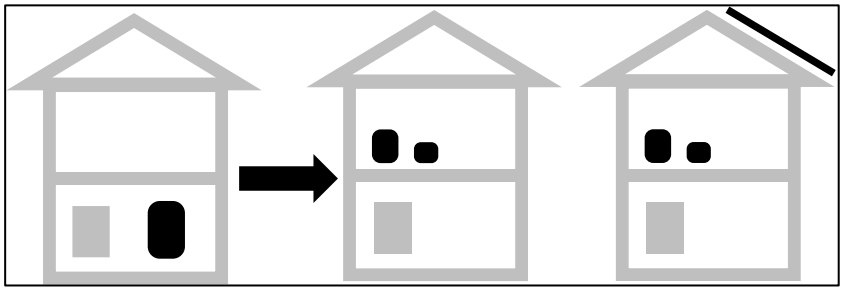


Abbildung 113 Schema – Dezentralisierung mit Photovoltaik im Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung]

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Tabelle 108 ist erkennbar, dass der Anteil an selbst genutztem Strom steigt und entsprechend weniger ins Netz zurückgespeist werden muss. Da der Haushaltsstrom jeweils mehr als doppelt so hoch ist wie der Wärmebedarf der Trinkwassererwärmung, überwiegt er dennoch das Ergebnis.

Wegen der im Vergleich zum Bedarf kleiner dimensionierten MFH-Anlage wird dort eine größere Selbstnutzung des Stroms erreicht. Im EZFH wird immer noch ¾ des erzeugten Stroms ins Netz zurück gespeist. Im Umkehrschluss bewirkt aber die kleinere Anlage, dass im MFH nur 30 % des Strombedarfs aus der PV-Anlage gedeckt werden (14 / (32+15)), während es im EZFH 40 % sind (14 / (24+11)).

Insbesondere für das MFH ist diese Lösung interessant, da hier große Mengen an Zirkulationsverlusten (und die zugehörigen Emissionen) vermieden werden. Der sich ergebende äquivalente CO_2-Preis liegt in der Größenordnung der Solarthermielösungen.

Die Lösung „dezentral ohne Photovoltaik“ ist unwirtschaftlich, weil der allgemeine Strompreis derzeit um ein Vielfaches über dem Preis von Gas, Heizöl oder Fernwärme liegt. Die vermiedenen Verteilverluste (weil das Netz entfällt) können das nicht ausgleichen – auch nicht im MFH, wo sie größer als der Nutzen waren, vgl. Anhang 3.4.2.

Mit Photovoltaik wird die Lösung für das MFH wirtschaftlich interessanter. Würden die Energieträger mit 106 €/t Emissionspreis belegt (Erdgas würde dann 8 Cent/kWh) kosten, wäre eine Grenzwirtschaftlichkeit im MFH erreicht. Auch ein Investitionskostenzuschuss von 17 % hat denselben Effekt.

			EZFH	EZFH	MFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung						
Ersatz der zentralen Versorgung durch eine dezentral elektrische (in das Ø-Gebäude)			… ohne Photovol-taik	… mit Photovol-taik	… ohne Photovol-taik	… mit Photovol-taik
Detailkennwerte Stromerzeugung						
produzierter Strom		kWh/(m²a)	0	55	0	32
selbst genutzter Strom		kWh/(m²a)	0	14	0	14
zurückgespeister Strom		kWh/(m²a)	0	41	0	18
Detailkennwerte Stromverbrauch						
Haushaltsstromverbrauch		kWh/(m²a)	24	24	32	32
Strom für Trinkwarmwasser	vorher	kWh/(m²a)	0	0	0	0
	nachher	kWh/(m²a)	11	11	15	15
Ergebnisse						
Investition	Mehrkosten	T€	1,5	13,7	8,8	32,3
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	+3	-9	-1	-15
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	k. A.	1526	2467	745
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	497	210	1520	342
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	357	27	193	17
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	k. A.	328	4746	106

Tabelle 101 Auswertung Dezentralisierung mit Photovoltaik [eigene Darstellung]

Die vergleichende grafische Zusammenfassung aller Maßnahmen zu den Zusatzerzeugern und ein Zwischenfazit folgen in Anhang 3.5.4.

Weitere Kombinationen – auch mit strombasierter Heizung – werden nachfolgend untersucht.

Ersatz von Ölkesseln durch Kombisysteme mit Photovoltaik

Untersucht wird ein durchschnittliches, wenig gedämmtes Mehrfamilienhaus in insgesamt 4 Varianten, siehe Abbildung 114.

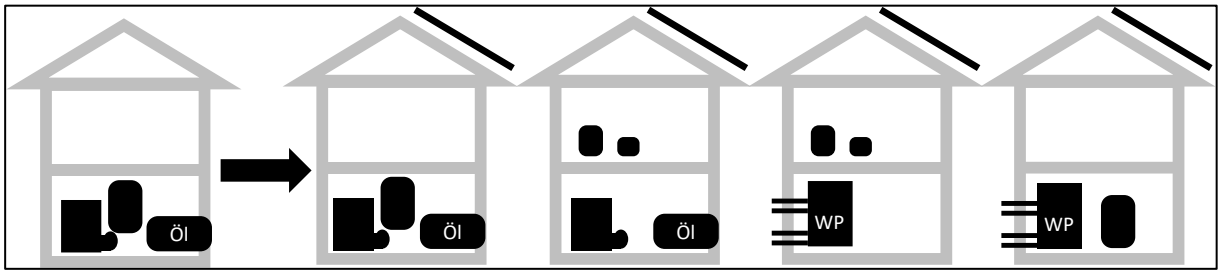


Abbildung 114 Schema – Kombinationen von Heizöl-NT-Kessel, Außenluftwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung]

Die Ergebnisse zeigt Tabelle 102. Eine sehr hohe Gesamtemissionsminderung ergibt sich nur, wenn gleichzeitig eine Wärmepumpe installiert wird. Dann steigen auch nennenswert die Selbstnutzungsquoten für den erzeugten Strom.

Der reine Umstieg auf dezentral elektrische Warmwasserbereitung unter Beibehalten des Kessels für die Heizung ist grundsätzlich interessant, jedoch nur mit einer Förderung von 33 % machbar.

Die Varianten mit dezentraler Warmwasserbereitung und Wärmepumpe sind hinsichtlich der äquivalenten CO_2-Preise ähnlich gut – solange die Heizung eine Wärmepumpe erhält. Da die notwendigen Zuschüsse für die dezentrale Version deutlich größer sind, würde hier die zentrale Wärmepumpe bevorzugt.

		MFH	MFH	MFH	MFH*
* Fortführung des Beispiel aus Anhang 3.3.1, dort siehe Tabelle 73					
Maßnahmenbeschreibung					
Einbau einer Photovoltaikanlage in ein Gebäude mit Ø-Baustandard und Heizöl-NT-Kessel		TWW bleibt zentral	… Dezentralisierung der Trink-wassererwärmung		TWW bleibt zentral
		Öl-NT-Kessel bleibt		… Einbau einer Außenluft-Wärmepumpe	
Detailkennwerte der Bilanz					
produzierter Strom	kWh/(m²a)	32	32	32	32
selbst genutzter Strom	kWh/(m²a)	11	14	29	29
zurückgespeister Strom	kWh/(m²a)	21	18	3	3
Detailkennwerte Stromverbrauch (nachher)					
Haushaltsstromverbrauch	kWh/(m²a)	32	32	32	32
Strom für Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	0	16	16	18
Strom für Heizung	kWh/(m²a)	0	0	45	45
Ergebnisse					
Investition Vollkosten	T€	23,4	32,3	65,7	56,8
Emissionsminderung, Wärme + Strom	%	-8	-15	-57	-59
Äquivalenter CO_2-Preis	€/t	554	507	241	185
Dateninterpretation					
Jahreskosten, Fehlbetrag	€/a	-1220	676	2022	514
notwendiger Investitionskostenzuschuss	%	keiner	33	53	17
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	€/t	keiner	168	129	32

Tabelle 102 Auswertung Photovoltaik im durchschnittlichen MFH mit Heizöl-NT-Kessel [eigene Darstellung]

EZFH: Werden die Maßnahmenpakete auf das EZFH übertragen ergeben sich grundsätzlich ähnliche Aussagen, wenn auch insgesamt ungünstiger. Die Varianten der Dezentralisierung schneiden schlechter ab, weil die Verteilverluste bereits vorher geringer sind und somit die erzielbare Einsparung sinkt.

Die Ergebnisse ändern sich mit dem Baustandard sowie dem Standard der verwendeten Technik. Da nicht alle Varianten untersucht werden können, beschränkt sich die Auswertung auf das „gute“ Gebäude mit Heizölbrennwertkessel, in welchem ggf. eine Erdreichwärmepumpe eingebaut wird – siehe Abbildung 115.

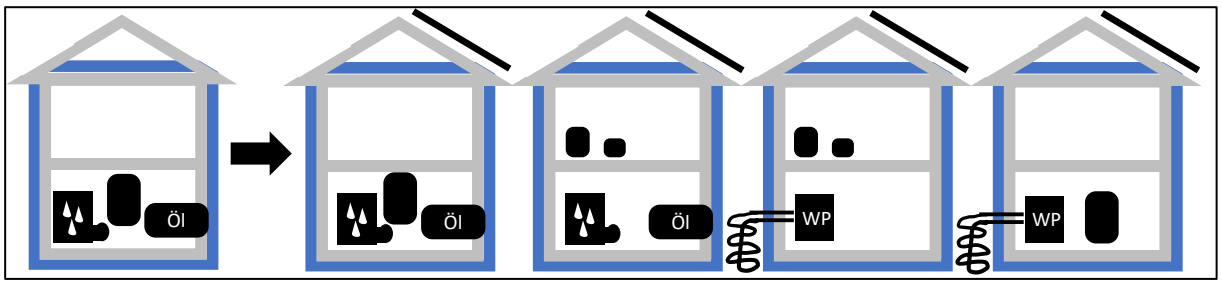


Abbildung 115 Schema – Kombinationen von Heizöl-Brennwertkessel, Erdreichwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung]

Tabelle 103 zeigt die Ergebnisse für ein MFH. Alle erzielbaren Emissionsminderungen sind geringer, weil das Gebäude bereits einen besseren Ausgangszustand aufweist. Zudem ist die teurere Variante der Wärmepumpe gewählt, um das gesamte Spektrum von Variationen abzudecken.

Eine sehr hohe Gesamtemissionsminderung ergibt sich nur, wenn gleichzeitig eine Wärmepumpe installiert wird. Der Umstieg auf dezentral elektrische Warmwasserbereitung ist aus Sicht der Emissionsminderung ähnlich interessant wie der Umstieg auf eine Wärmepumpe für die Trinkwassererwärmung. Da die notwendigen Zuschüsse für die dezentrale Version deutlich größer sind, würde auch hier die zentrale Wärmepumpe bevorzugt.

			MFH	MFH	MFH	MFH*
* Fortführung des Beispiel aus Anhang 3.3.1, dort siehe Tabelle 74						
Maßnahmenbeschreibung						
Einbau einer Photovoltaikanlage in ein Gebäude mit „gutem“ Baustandard und Heizöl-Brennwertkessel			TWW bleibt zentral	… Dezentralisierung der Trink-wassererwärmung		TWW bleibt zentral
			Ölbrennwertkessel bleibt		… Einbau einer Erdreich-Wärmepumpe	
Detailkennwerte der Bilanz						
produzierter Strom		kWh/(m²a)	32	32	32	32
selbst genutzter Strom		kWh/(m²a)	11	14	26	25
zurückgespeister Strom		kWh/(m²a)	21	18	6	7
Detailkennwerte Stromverbrauch (nachher)						
Haushaltsstromverbrauch		kWh/(m²a)	32	32	32	32
Strom für Trinkwarmwasser		kWh/(m²a)	0	16	16	15
Strom für Heizung		kWh/(m²a)	0	0	15	12
Ergebnisse						
Investition	Vollkosten	T€	23,4	32,3	83,6	74,7
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-12	-19	-58	-62
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	554	591	445	349
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-1220	702	2667	1022
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	39	56	26
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	229	250	90

Tabelle 103 Auswertung Photovoltaik im guten MFH mit Heizöl-Brennwert-Kessel [eigene Darstellung]

EZFH: Werden die Maßnahmenpakete auf das EZFH übertragen ergeben sich grundsätzlich ähnliche Aussagen, wenn auch insgesamt ungünstiger. Die äquivalenten CO_2-Preise sind allesamt ungünstiger, das heißt mit dem eingesetzten Kapital lassen sich weniger Emissionen vermeiden als im MFH. Vor allem die Dezentralisierung ohne Änderung der Heizung ist aus Sicht des äquivalenter CO_2-Preises nicht sinnvoll.

Ersatz von Gaskesseln durch Kombisysteme mit Photovoltaik

Die Ergebnisse für ein durchschnittliches, wenig gedämmtes Mehrfamilienhaus zeigt Tabelle 104. Die Aussagen sind – hinsichtlich der Tendenzen – mit denen der Ölkessel vergleichbar. Untersucht wird zunächst der Altbau, der eine Erdreichwärmepumpe erhält, siehe Abbildung 116.

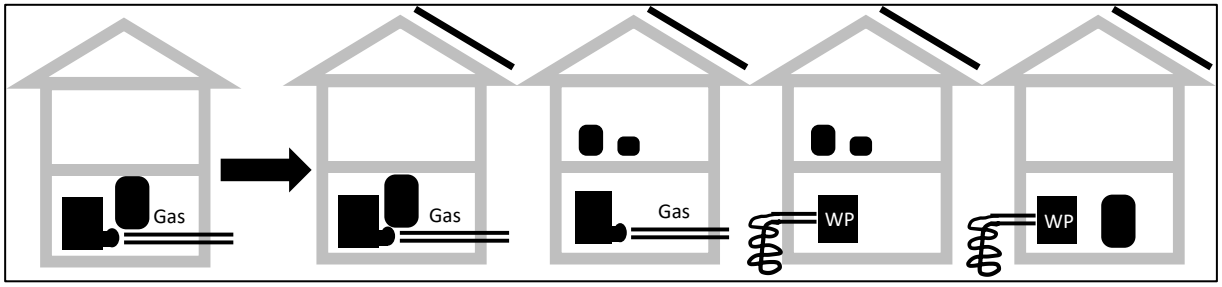


Abbildung 116 Schema – Kombinationen von Erdgas-NT-Kessel, Erdreichwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung]

Die wirtschaftliche Einschätzung aus Sicht des Investors ist etwas schlechter, da die teurere Erdreichwärmepumpe zugrunde gelegt wurde. Insbesondere deshalb steigen die notwendigen Investitionskostenzuschüsse an. Bei der Betrachtung der Emissionsminderungen und allen damit zusammenhängenden Kennwerten macht sich der günstigere Ausgangswert für Erdgas negativ bemerkbar. Es wird teurer eine Tonne CO_2 zu sparen.

			MFH	MFH	MFH	MFH*
* Fortführung des Beispiel aus Anhang 3.3.1, dort siehe Tabelle 68						
Maßnahmenbeschreibung						
Einbau einer Photovoltaikanlage in ein Gebäude mit Ø-Baustandard und Erdgas-NT-Kessel			TWW bleibt zentral	… Dezentralisierung der Trink-wassererwärmung		TWW bleibt zentral
			Gas-NT-Kessel bleibt		… Einbau einer Erdreich-Wärmepumpe	
Detailkennwerte der Bilanz						
produzierter Strom		kWh/(m²a)	32	32	32	32
selbst genutzter Strom		kWh/(m²a)	11	14	29	28
zurückgespeister Strom		kWh/(m²a)	21	18	3	4
Detailkennwerte Stromverbrauch (nachher)						
Haushaltsstromverbrauch		kWh/(m²a)	32	32	32	
Strom für Trinkwarmwasser		kWh/(m²a)	0	16	16	
Strom für Heizung		kWh/(m²a)	0	0	30	
Ergebnisse						
Investition	Vollkosten	T€	23,4	32,2	104,3	
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-8	-15	-57	-59
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	554	746	517	416
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-291	93	1328	915
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	33	56	31
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	246	290	129

Tabelle 104 Auswertung Photovoltaik im durchschnittlichen MFH mit Erdgas-NT-Kessel [eigene Darstellung]

EZFH: Werden die Maßnahmenpakete auf das EZFH übertragen ergeben sich grundsätzlich ähnliche Tendenzen. Die äquivalenten CO_2-Preise sind allesamt etwas ungünstiger, das heißt mit dem eingesetzten Kapital lässt sich eine geringere Emission vermeiden als im MFH. Vor allem die Dezentralisierung ohne Änderung der Heizung ist aus Sicht des äquivalenter CO_2-Preises nicht sinnvoll.

Als alternative Variante wird – auszugsweise für alle möglichen Kombinationen gerechnet: das „gute“ Gebäude mit Erdgasbrennwertkessel, in welchem ggf. eine Außenluftwärmepumpe eingebaut wird, siehe Abbildung 117.

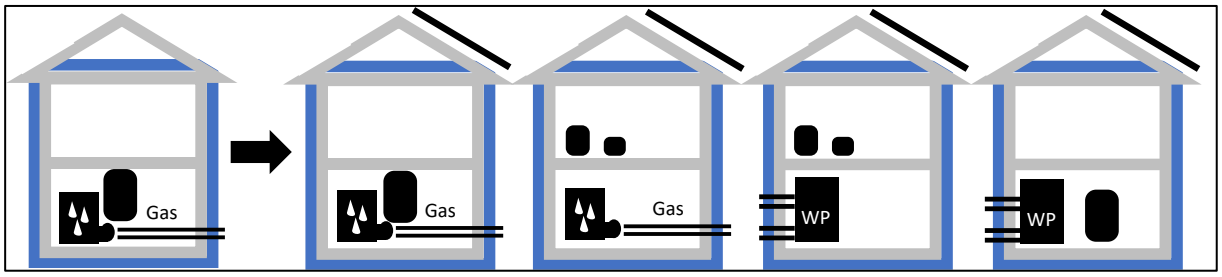


Abbildung 117 Schema – Kombinationen von Erdgas-Brennwertkessel, Außenluftwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung]

Tabelle 105 zeigt die Ergebnisse für ein MFH mit gutem Baustandard und Erdgasbrennwertkessel. Alle erzielbaren Emissionsminderungen sind geringer, weil das Gebäude bereits einen besseren Ausgangszustand aufweist. Andererseits ergeben sich geringere Investitionskosten, weil die günstigere Außenluftwärmepumpe untersucht wird.

Vor allem bei der vollzentralen Variante mit Wärmepumpe ergeben sich deutliche wirtschaftliche Vorteile des Gesamtpaketes. Eine Dezentralisierung ist wirtschaftlich weniger interessant.

		MFH	MFH	MFH	MFH*
* Fortführung des Beispiel aus Anhang 3.3.1, dort siehe Tabelle 71					
Maßnahmenbeschreibung					
Einbau einer Photovoltaikanlage in ein Gebäude mit „gutem“ Baustandard und Erdgas-Brennwertkessel		TWW bleibt zentral	… Dezentralisierung der Trink-wassererwärmung		TWW bleibt zentral
		Erdgas-Brennwertkessel bleibt		… Einbau einer Außenluft-Wärmepumpe	
Detailkennwerte der Bilanz					
produzierter Strom	kWh/(m²a)	32	32	32	32
selbst genutzter Strom	kWh/(m²a)	11	14	27	27
zurückgespeister Strom	kWh/(m²a)	21	18	5	5
Detailkennwerte Stromverbrauch (nachher)					
Haushaltsstromverbrauch	kWh/(m²a)	32	32	32	32
Strom für Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	0	16	16	18
Strom für Heizung	kWh/(m²a)	0	0	19	15
Ergebnisse					
Investition Vollkosten	T€	23,4	32,3	57,6	48,9
Emissionsminderung, Wärme + Strom	%	-15	-16	-44	-46
Äquivalenter CO_2-Preis	€/t	554	875	511	373
Dateninterpretation					
Jahreskosten, Fehlbetrag	€/a	-1220	792	1686	248
notwendiger Investitionskostenzuschuss	%	keiner	39	50	10
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	€/t	keiner	339	255	36

Tabelle 105 Auswertung Photovoltaik im guten MFH mit Erdgas-Brennwert-Kessel [eigene Darstellung]

EZFH: Werden die Maßnahmenpakete auf das EZFFH übertragen ergeben sich grundsätzlich ähnliche Tendenzen. Die äquivalenten CO_2-Preise sind allesamt etwas ungünstiger, das heißt mit dem eingesetzten Kapital lässt sich eine geringere Emission vermeiden als im MFH.

Ersatz von Fernwärmeanschlüssen durch Kombisysteme mit Photovoltaik

Die Ergebnisse für ein durchschnittliches, wenig gedämmtes Mehrfamilienhaus – analog Prinzipskizze in Abbildung 118 – zeigt Tabelle 106.

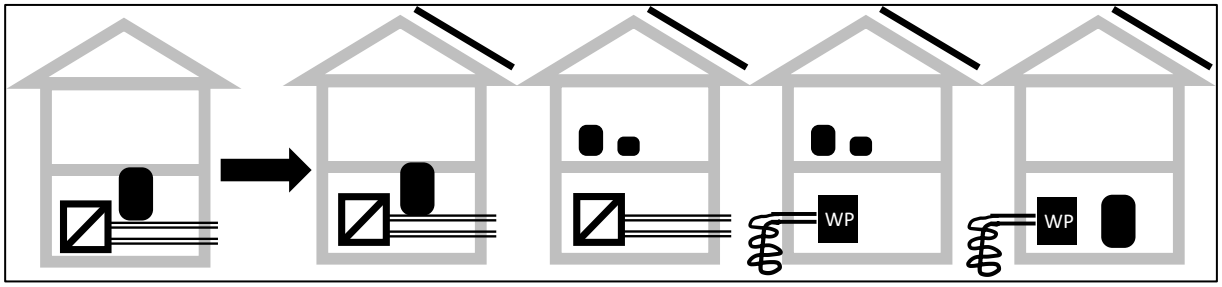


Abbildung 118 Schema – Kombinationen von Fernwärme, Erdreichwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung]

Die Aussagen sind hinsichtlich der äquivalenten CO_2-Preise vergleichbar mit Erdgaskesseln. Allerdings ist die Wirtschaftlichkeitsbewertung besser, weil Fernwärme teurer ist und somit erzielbare Energieeinsparungen zu einer größeren Kostenreduktion führen. Es sind geringere Zuschüsse notwendig als bei Kesseln.

		MFH	MFH	MFH	MFH*
* Fortführung des Beispiel aus Anhang 3.3.1, dort siehe Tabelle 76					
Maßnahmenbeschreibung					
Einbau einer Photovoltaikanlage in ein Gebäude mit Ø-Baustandard und Fernwärme		TWW bleibt zentral	… Dezentralisierung der Trink-wassererwärmung		TWW bleibt zentral
		Fernwärme bleibt		… Einbau einer Erdreich-Wärmepumpe	
Detailkennwerte der Bilanz					
produzierter Strom	kWh/(m²a)	32	32	32	32
selbst genutzter Strom	kWh/(m²a)	11	14	29	28
zurückgespeister Strom	kWh/(m²a)	21	18	3	4
Detailkennwerte Stromverbrauch (nachher)					
Haushaltsstromverbrauch	kWh/(m²a)	32	32	32	32
Strom für Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	0	16	16	15
Strom für Heizung	kWh/(m²a)	0	0	30	27
Ergebnisse					
Investition Vollkosten	T€	23,4	32,3	104,3	95,5
Emissionsminderung, Wärme + Strom	%	-11	-12	-50	-54
Äquivalenter CO_2-Preis	€/t	554	810	568	454
Dateninterpretation					
Jahreskosten, Fehlbetrag	€/a	-1220	480	2373	658
notwendiger Investitionskostenzuschuss	%	keiner	23	41	13
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis	€/t	keiner	190	230	59

Tabelle 106 Auswertung Photovoltaik im durchschnittlichen MFH mit Fernwärme [eigene Darstellung]

Tabelle 107 zeigt die Ergebnisse für ein MFH mit gutem Baustandard und Fernwärmeanschluss, wie es in Abbildung 119 schematisch dargestellt ist.

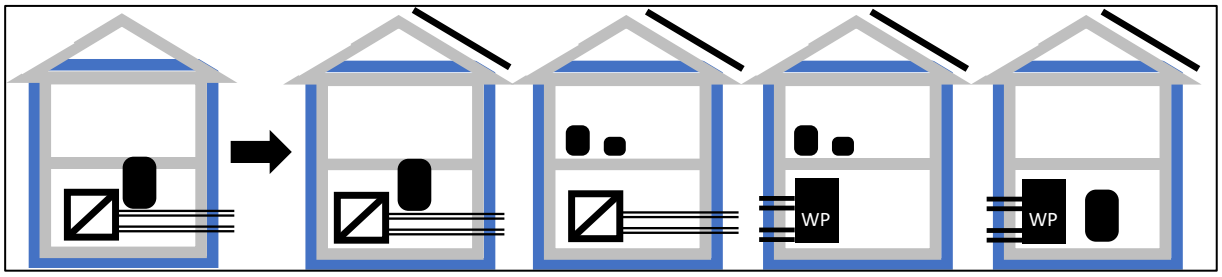


Abbildung 119 Schema – Kombinationen von Fernwärme, Außenluftwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung]

Alle erzielbaren Emissionsminderungen sind geringer, weil das Gebäude bereits einen besseren Ausgangszustand aufweist. Andererseits ergeben sich geringere Investitionskosten, weil die günstigere Außenluftwärmepumpe untersucht wird. Die Vollumstellung ließe sich ohne Zuschuss bewerkstelligen.

			MFH	MFH	MFH	MFH*
* Fortführung des Beispiel aus Anhang 3.3.1, dort siehe Tabelle 77						
Maßnahmenbeschreibung						
Einbau einer Photovoltaikanlage in ein Gebäude mit „gutem“ Baustandard und Fernwärmeanschluss			TWW bleibt zentral	… Dezentralisierung der Trink-wassererwärmung		TWW bleibt zentral
			Fernwärme bleibt		… Einbau einer Außenluft-Wärmepumpe	
Detailkennwerte der Bilanz						
produzierter Strom		kWh/(m²a)	32	32	32	32
selbst genutzter Strom		kWh/(m²a)	11	14	27	27
zurückgespeister Strom		kWh/(m²a)	21	18	5	5
Detailkennwerte Stromverbrauch (nachher)						
Haushaltsstromverbrauch		kWh/(m²a)	32	32	32	32
Strom für Trinkwarmwasser		kWh/(m²a)	0	16	16	21
Strom für Heizung		kWh/(m²a)	0	0	19	15
Ergebnisse						
Investition	Vollkosten	T€	23,4	32,3	57,6	48,8
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-14	-14	-46	-48
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	554	801	462	339
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-1220	508	711	-727
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	23	21	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	199	98	keiner

Tabelle 107 Auswertung Photovoltaik im guten MFH mit Fernwärme [eigene Darstellung]

Fazit

Die Gutachter schließen sich der Erkenntnis von Schulze-Darup für Quartiere an [90]:

> *„Das größte Potenzial für zukünftige regenerative Techniken innerhalb von Siedlungsstrukturen weist die Photovoltaik auf. Daraus ergeben sich Paradigmenwechsel bei der Wahl der Versorgungssysteme. Intensiv diskutiert wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens die Alternative zwischen einer Versorgung mit einem Wärmenetz gegenüber dem Netzverbund durch das Stromnetz. Technisch-physikalisch sprechen viele Argumente für die strombasierte Variante. Unterstützt wird diese deutliche Tendenz auch durch die Langfristbetrachtungen und Wirtschaftlichkeitsberechnungen hinsichtlich der Entwicklung der Primärenergiebilanz […] und der Kosten für die Brennstoffe […] Versorgungskonzepte stellen eine langfristige Investition dar, sodass vor Systementscheidungen Risiken und Chancen abgeschätzt werden müssen, die aufgrund der Energiewende entstehen.“*

Die dezentrale Stromproduktion kann vergleichsweise ausfallsicher erfolgen. Für den Mietwohnungsbau sind aus Sicht der heutigen Rechtslage Konzepte für den Vertrieb von Mieterstrom notwendig, z. B. in Form des Contracting [56].

Da in allen Gebäuden ein nennenswerter Haushaltsstromverbrauch zu verzeichnen ist, welcher größenordnungsmäßig beim Doppelten des Trinkwasserwärmebedarfs liegt und immer Strom als Energieträger benötigt, ist der PV gegenüber der Solarthermie auf dem Dach der Vorrang zu gewähren.

3.5.2 Solarthermie

In der IWU-Zustandserhebung des Wohnbaus 2016 wurde festgestellt, dass in etwa 20 % aller Wohnbauten eine Solarthermieanlage installiert ist. Bei den Neubauten ab 2010 sind es 52 % [7].

Vorangetrieben wurde der Ausbau bis 2006 vor allem durch die Förderung des MAP sowie die nach der Jahrtausendwende auch in der Wohnungswirtschaft stark propagierte „solare Sanierung“ [236].

Der KfW-Monitoringbericht 2017 [15] legt offen, dass in 5 % aller Förderfälle eine Solarthermieanlage eingebaut wird. Unter den Effizienzhausprojekten im Bestand haben ¼ aller Fördermittelnehmer eine Solarthermieanlage gewählt. Dies erfolgte überwiegend in den Niveaus Effizienzhaus 100 und 115 zusammen mit einem Erdgaskessel. Bei den Niveaus EH85 und darunter steigt der Anteil der Wärmepumpen an, gleichzeitig nimmt die Wahl einer Solarthermieanlage deutlich ab. Das EH100 hat beispielsweise mit 50 % Wahrscheinlichkeit eine Solarthermie, das EH85 nur mit 16 %. Bei den effizienteren Niveaus steigt stattdessen der Anteil von Photovoltaik und Lüftung mit Wärmerückgewinnung.

Eine vertiefte Beschäftigung mit der Solarthermie, incl. historischem Rückblick, Markt- und Kostenentwicklung, Kurzabriss der Branchenentwicklung, Marktakteure und Technologieentwicklung ist dem Statusbericht von Wetzel et al. zu finden in [203].

Erträge und Qualitätssicherung

Die Einschätzung der erzielbaren Erträge differiert stark. Wie bei anderen regenerativen Technologien fällt die theoretische Bewertung teils deutlich optimistischer aus als die Praxisergebnisse.

Eigene Auswertungen der Gutachter in 14 Gebäude- und Netzanlagen ergaben einen mittleren Ertrag von 340 kWh/(m²a). Die parallel innerhalb des Projektes durchgeführten Simulationsberechnungen ergeben Werte von 440 bis 540 kWh/(m²a) je nach Dimensionierung der Solaranlage [131].

Aus dem Betriebstest für 100 Anlagen von 10 Betreibern leiten Orthjohann und Streckenberg 2015 einen Einfluss der Qualitätssicherung von 61 % ab. Der „übliche Pool“ von Anlagen (hier 11 Stück) weist einen kollektorflächenbezogenen Ertrag von nur 209 kWh/(m²a) auf, die qualitätsgesicherten Anlagen (hier 32 Stück) erreichen 337 kWh/(m²a) [130].

Hufnagel hat Auswertungen an etwa 150 geförderten Solarthermieanlagen vorgenommen. Er unterscheidet nicht verschiedene Stufen der Qualitätssicherung. Es ergibt sich ein Kollektorkreisertrag von 302 kWh/(m²a) für Trinkwarmwasseranlagen und 278 kWh/(m²a) für Kombianlagen – jeweils mit Flachkollektor. Die Werte für Vakuumröhren liegen etwa 25 % höher [237].

In den frühen Monitoringberichten des MAP werden die Wirtschaftlichkeitsranddaten offen gelegt, unter denen die Förderung berechnet wurde: die angenommenen Erträge von 400 kWh/(m²a) für Flachkollektoranlagen zur reinen Trinkwassererwärmung (mit Röhrenkollektoren das 1,45-fache) [238] konnten nach Einschätzung der Gutachter allenfalls auf dem Prüfstand erreicht werden.

Gründe für die vergleichsweise hohe Diskrepanz zwischen Theorie und Praxis sind:

- zusätzliche Rohre, Speicher und anderen hydraulische Bauteile
- hohe Zirkulationsverluste und/oder Nahwärmeverluste in vielen Anlagen; dies ist wegen des ganzjährig hohen Temperaturniveaus eine ungünstige Ausgangsbedingung für Solarthermienutzung
- eine schlechte Peripherie in fast allen Anlagen; das heißt Regelungseinstellungen sind nicht oder nur mangelhaft nachvollziehbar, hydraulische Verschaltungen sind komplex und energetisch suboptimal
- Netztemperaturen, Volumenströme beziehungsweise die Abnehmerstruktur allgemein bieten schlechte Bedingungen für Brennwertnutzung und Solarthermienutzung.

Nur teilweise lassen sich die Probleme im Rahmen einer Qualitätssicherung komplett abstellen. Jedoch lassen die typischen Praxisergebnisse den Schluss zu, dass selbst ein niederschwelliges Monitoring fehlt.

Meyer stellt im Rahmen einer Querauswertung von vier solaren Großanlagen in der Wohnungswirtschaft fest, dass durch ein Monitoring in der ersten Betriebsphase Anfangsschwierigkeiten schnell behoben werden können (3 von 4 Anlagen lieferten nach Inbetriebnahme nicht den erwarteten Ertrag) [239]. Ein automatisiertes Ertrags-Controlling, wie von Vanoli und Pärisch bereits 2008 vorgeschlagen, hat sich dennoch nicht durchgesetzt [240].

Bewertung der Solarthermie in den Typgebäuden

Die Berechnungen des vorliegenden Gutachtens basieren auf der Annahme, dass eine personenbezogene Kollektorfläche von 1,5 m²/P für die Trinkwarmwasserversorgung installiert werden. Als Standardansatz für die Speicherung der Solarwärme von 60 l/m² Kollektorfläche ausgegangen. Dies entspricht einer typischen Auslegung [241].

Der Ertrag einer solarthermischen Anlage für die Trinkwassererwärmung in der o.g. Dimensionierung liegt in folgender typischer Größenordnung [131] [108]. Dabei wird die gesamte Bandbreite von in der Praxis festgestellten Erträgen in zwei Kategorien unterteilt:

- Solarertrag mit Qualitätssicherung: 360 kWh/(m^2_{Koll} · a)
- Solarertrag ohne Qualitätssicherung: 320 kWh/(m^2_{Koll} · a)

Beispiel: in dem Typmehrfamilienhaus ergibt sich bei einer Belegung mit etwa 12 Personen eine Gesamtkollektorfläche von etwa 18 m² sowie ein Solarertrag von knapp 6600 kWh/a (mit Qualitätssicherung) oder gut 5800 kWh/a (ohne Qualitätssicherung).

Damit sind die Prognosewerte nicht im gesamten Spektrum der vorgefundenen Praxismesswerte ausgeschöpft. Dennoch bildet – nach Ansicht der Autoren – das gewählte Wertepaar die Praxis und auch den Einfluss der Qualitätssicherung realitätsnah ab. Pehnt et al. gehen in ihrer Makrostudie zur Erreichung eines „Auf dem Weg zum Niedrigstenergiehaus im Gebäudebestand“ von 350 bis 450 kWh/(m²a) aus [124]. Dies sind nach Ansicht der Autoren zu hohe Werte.

Einbau einer Solarthermie in das Durchschnittsgebäude

Als Eingangsvariante wird der nachträgliche Einbau von Solarthermie in das jeweils durchschnittliche Bestandsgebäude untersucht, siehe schematische Darstellung in Abbildung 120.

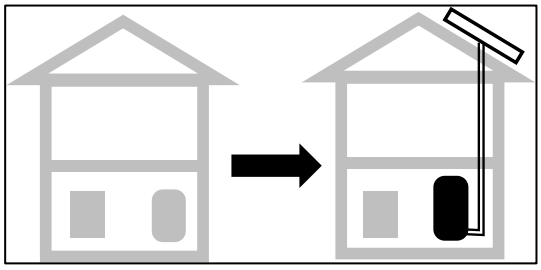


Abbildung 120 Schema – Einbau einer Solarthermie in ein Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung]

Die Ergebnisse zeigt Tabelle 108. Es handelt sich um eine Vollkostenbetrachtung. Die Endenergie für Wärme sinkt rechnerisch in der Größenordnung der bekannten Praxisergebnisse: um etwa 10 bis 14 kWh/(m²a). Hinweis zu den Werten im Abgleich mit der Praxis: in Praxisprojekten wird bei MFH durchaus weniger Ertrag gemessen, z. B. auch in eigenen Projekten [131]. Dies kann begründet werden mit einer real oft geringeren installierten Kollektorfläche je Person – z. B. aus Kostengründen. Ein bei Praxisprojekten real etwas höherer Ertrag bei EZFH kann mit einer größeren Belegungsdichte als im Typgebäude begründet werden. Die Praxismesswerte liegen in der Praxis häufig näher zusammen als in der Tabelle dargestellt.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Einbau einer Solarthermieanlage für die Trinkwassererwärmung (in das Ø-Gebäude)				
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
vom Hauptwärmeerzeuger zu erzeugende Wärme	vorher	kWh/(m²a)	141	122
	nachher	kWh/(m²a)	132	109
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	160	137
	nachher	kWh/(m²a)	150	123
Investition	Vollkosten	T€	7,2	27,7
Emissionsminderung, Wärme		%	-7	-10
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	1005	827
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	234	722
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	64	51
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	642	419

Tabelle 108 Auswertung Solarthermie auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Mit der Endenergieeinsparung geht eine Emissionsminderung von 7 bis 10 % für die Wärmeenergie einher. Eine Wirtschaftlichkeit ist ohne Förderung nicht gegeben. Für das EZFH müssen etwa 64 % der Investitionskosten bezuschusst werden, im MFH 51 %. Alternativ wird der Jahresfehlbetrag durch eine Energiepreiserhöhung der ansonsten einzukaufenden Energieträger ausgeglichen. Mit einem durch Emissionspreise verteuerten Erdgas für 15 bis 19 Cent/kWh ergäbe sich ebenfalls eine Grenzwirtschaftlichkeit.

Auf Basis von Vollkosten gerechnet ist die Nachrüstung einer Solarthermieanlage zwar eine Maßnahme, die Emissionen merkbar reduziert, jedoch ist ein vergleichsweise hoher äquivalenter CO_2-Preis festzustellen.

Sofern der Einbau der Anlage an die ohnehin erforderliche Erneuerung des Trinkwarmwasserspeichers gekoppelt wird, ergeben sich etwas bessere Werte, siehe Tabelle 109. Der notwenige Investitionskostenzuschuss sinkt. Dennoch ist der äquivalente CO_2-Preis vergleichsweise hoch, d. h. es muss recht viel Kapital aufgewendet werden, um eine Tonne CO_2 einzusparen.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Einbau einer Solarthermieanlage für die Trinkwassererwärmung (in das Ø-Gebäude)				
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	160	137
	nachher	kWh/(m²a)	150	123
Investition	Mehrkosten	T€	5,4	25,0
Emissionsminderung, Wärme		%	-7	-10
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	934	900
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	208	849
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	57	60
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	571	492

Tabelle 109 Auswertung Solarthermie auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Stellt man der erzielten Endenergieeinsparung von 10 bis 14 kWh/(m²a) die kapitalisierten Kosten gegenüber (Lebensdauer 25 Jahre, vereinfacht ohne Zinsen gerechnet) ergibt sich ein Wärmepreis von 15 bis 17 Cent/kWh. Der Wert liegt deutlich über allen anderen Wärmepreisen (einschließlich Fernwärme), so dass – aus wirtschaftlicher Sicht – nur ein geringer Anreiz zur Nachrüstung besteht.

Einbau einer Solarthermie in das Durchschnittsgebäude mit regenerativer Erzeugung

Abschließend werden die Ergebnisse dargestellt, die sich ergeben, wenn Erzeugung auf Basis regenerativer Energien gegeben ist – entweder mit Erdreichwärmepumpe analog Abbildung 121, mit Außenluftwärmepumpe wie in Abbildung 122 gezeigt oder mit Holzkessel nach Abbildung 123. Zur Minimierung des Zahlenmaterials werden nur die Mehrkosten dargestellt.

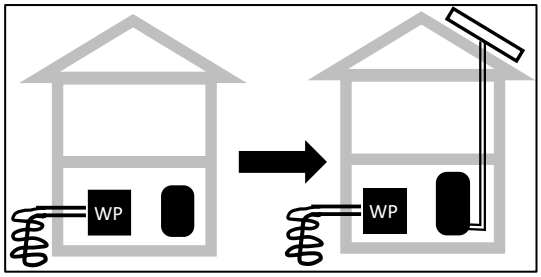


Abbildung 121 Schema – Einbau einer Solarthermie in ein Durchschnittsgebäude mit Erdreichwärmepumpe [eigene Darstellung]

Ausgehend von einer Erdreichwärmepumpe als Erzeuger (bei ansonsten gleichen Randdaten wie in Tabelle 109) ergibt sich ein deutlich schlechteres Bild. Für die Investitionskosten wäre einen Zuschuss von 61 % (EZFH) oder 72 % (MFH) notwendig. Der äquivalente CO_2-Preis liegt dann bei 1453 €/t (EZFH) bzw. 1444 €/t (MFH). Die Emissionsminderung ist mit 8 % (EZFH) bzw. 12 % (MFH) fast vergleichbar.

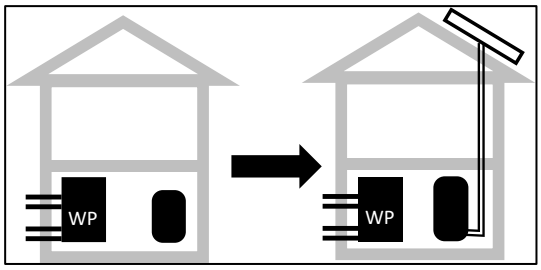


Abbildung 122 Schema – Einbau einer Solarthermie in ein Durchschnittsgebäude mit Außenluftwärmepumpe [eigene Darstellung]

Ausgehend von einer Außenluftwärmepumpe als Erzeuger (bei ansonsten gleichen Randdaten wie in Tabelle 108) ergibt sich auch hier ein etwas schlechteres Bild. Der äquivalente CO_2-Preis liegt dann bei 1293 €/t (EZFH) bzw. 1097 €/t (MFH). Dennoch wäre für die Investitionskosten nur ein Zuschuss von 62 % (EZFH) bzw. 55 % (MFH) notwendig, um Grenzwirtschaftlichkeit zu erzielen. Die Emissionsminderung ist mit 8 % (EZFH) bzw. 12 % (MFH) fast genauso groß wie bei der Erdreichwärmepumpe.

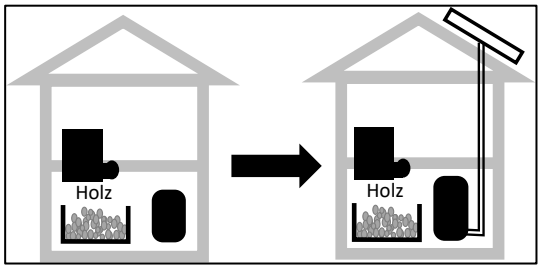


Abbildung 123 Schema – Einbau einer Solarthermie in ein Durchschnittsgebäude mit Holzkessel [eigene Darstellung]

Ausgehend von einem Holzkessel als Erzeuger (bei ansonsten gleichen Randdaten wie in Tabelle 109) ergibt sich ein deutlich schlechteres Bild. Der äquivalente CO_2-Preis liegt dann bei 13.129 €/t (EZFH) bzw. 15.604 €/t (MFH). Diese riesigen Werte ergeben sich, da in einem holzbeheizten Haus mit Solarthermie kaum noch CO_2 eingespart werden kann. Da Holz zudem ein vergleichsweise kostengünstiger Energieträger ist, wird das Paket noch unwirtschaftlicher: mit einem Investitionskostenzuschuss von 69 % (EZFH) oder 84 % (MFH) ließe sich Grenzwirtschaftlichkeit erzielen.

Der Fall einer gleichzeitigen Installation von Holzkessel und Solarthermie im EZFH ist dennoch von Bedeutung, v. a., weil der Kessel damit im Sommer nicht betrieben werden muss (Praktikabilität für den Betreiber).

Die Thematik „Sonnenhaus“ oder „Solar-Aktive-Haus“ (sehr große Kollektorfelder und Speicher im Bereich von ein bis mehreren Kubikmetern) wird an dieser Stelle nicht vertieft. Da diese Konzepte seit mehr als 30 Jahren am Markt sind, jedoch immer noch ein Nischenprodukt darstellen, gehen die Gutachter nicht davon aus, dass sich auf absehbare Zeit ein Massenmarkt entwickelt.

Fazit

Im Gegensatz zu anderen Studien sehen die Gutachter die Relevanz der Solarthermie sehr eingeschränkt. Sie hat ihre Berechtigung im EZFH – unter der Voraussetzung einer ausreichenden Belegung und nicht vorhandener Zirkulation. Auch die Kombination von Holzheizung ist praktikabel, wenn auch weder besonders emissionsmindernd, noch wirtschaftlich.

Für das MFH sind die hydraulischen Probleme in den letzten 30 Jahren nicht merklich zurückgegangen. Das Maß an notwendiger Qualitätssicherung bis zu einem zufriedenstellenden Betrieb ist so hoch, dass davon in der Regel Abstand genommen wird. Zudem ist der ungünstige Umstand einer Trinkwarmwasserzirkulation kaum vermeidbar. Die Gutachter sehen für Solarthermie in MFH keine langfristige Relevanz.

Im Verbindung mit Außenluft-Wärmepumpen ist anzumerken, dass beide Anlagen gleichzeitig Effizienzoptima (Sommer) und Minima (Winter) aufweisen, was ungünstig für die Wirtschaftlichkeit ist. In Verbindung mit der Erdreichwärmepumpe ist das Problem geringer. Allerdings erschwert in diesem Fall die bessere Wärmepumpeneffizienz einen wirtschaftlichen Solarbetrieb. Selbst bei einem Strompreis von über 30 Cent/kWh kann eine Wärmepumpe im Sommer zu günstigeren Konditionen Wärme liefern als eine Solarthermieanlage.

Der Einsatz in Nahwärmesystemen ist – wegen der Netzverluste – fragwürdig, siehe Anhang 3.3.4.

Die größte Konkurrenz ergibt sich zur Photovoltaik, siehe Anhang 3.5.1. Da mit größerer Sicherheit der vorher bestimmte Ertrag auch eintritt und die Anlagen auch ohne nennenswerte Qualitätssicherung ihre zugesicherten Eigenschaften aufweisen, wird die geringere Effizienz (Ertrag pro Fläche) in Kauf genommen. Zumal der Energieträger Strom einerseits hochwertiger (universeller einsetzbar) ist und zu geringeren Gestehungskosten produziert werden kann.

Da in allen Gebäuden ein nennenswerter Haushaltsstromverbrauch zu verzeichnen ist, welcher größenordnungsmäßig beim Doppelten des Trinkwasserwärmebedarfs liegt und immer Strom als Energieträger benötigt, ist der PV gegenüber der Solarthermie auf dem Dach der Vorrang zu gewähren.

Mellwig et al. prüfen in ihrer Szenarioberechnung „Effizienz und Erneuerbare Energien“ auch den massiven Ausbau von Solarthermie (Faktor 15 bezogen auf heute). Aufgrund der hohen Kosten wird dieses Szenario nicht empfohlen; das volkswirtschaftlich günstigste Konzept enthält lediglich eine Verdopplung der Solarthermie bis 2050 [128]. In dieser Größenordnung sehen – wenn überhaupt - auch die Verfasser des vorliegenden Gutachtens die Entwicklung – jedoch nur im EZFH.

In der Zukunft können Solarthermiefelder an der Fassade als Kollektorfeld für Wärmepumpen dienen [242]; einerseits sind viele Flächen wegen Teilverschattung nicht optimal für Photovoltaik, andererseits herrschen günstigere Temperaturen als bei Außenluft als Wärmequelle.

3.5.3 Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung

Etwa 4 % aller Wohnbauten sind mit einer Lüftungsanlage ausgestattet; es ergibt sich jedoch eine starke Ungleichverteilung, wie Cischinsky und Diefenbach 2016 ausführen [7]: im Neubau seit 2010 haben mehr als 30 % aller Gebäude eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, im Altbau vor 1978 sind es nicht einmal 2 %.

Das Monitoring der KfW-Förderung für Effizienzhäuser im Bestand für das Jahr 2017 zeigt, dass in nur etwa 5 % aller Förderfälle nachträglich eine Lüftungsanlage installiert wurde; sie ist zu etwa 40 % eine Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Bei den Effizienzhausniveaus EH85 und besser hat jedoch etwa jedes zweite Gebäude eine Lüftungsanlage erhalten [15].

Bewertung der Lüftung mit Wärmerückgewinnung in den Typgebäuden

Die Häufigkeiten der Systeme in den Typgebäuden sind in Anhang 3.1 beschrieben.

Für die Bewertung der Effizienz wird in Anlehnung an die EnEV-Normen [214] in der Berechnung der Wärmerückgewinnungsgrad mit 85 % festgesetzt . Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass bei Vorhandensein von Lüftungsanlagen ein insgesamt um 0,1 h^{-1} höherer Luftwechsel vorhanden ist als bei Fensterlüftung. Es wird also eine etwas bessere Luftqualität erreicht.

Der Zusatzstromaufwand für eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ergibt sich aus der Annahme einer typischen elektrischen Leistung je zu beförderndem Volumenstrom von 0,4 W/(m³/h) [112]. Ein Anlagenbetrieb wird nur innerhalb der Heizperiode angenommen (als Dauerbetrieb).

Nur die Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung werden energetisch relevant in der Wärmebilanz im Rahmen dieses Gutachtens berücksichtigt. Dies folgt dem Vorgehen auch anderer Studien, z. B. der Untersuchung von Jochum et al. zur Dämmbarkeit des Gebäudebestandes [127].

Praxiserfahrungen

Die Ergebnisse aktueller Messungen der Gutachter zeigen folgendes Ergebnis für die Sanierung von Mehrfamilienhäusern [98]: im Vergleich zweier ansonsten baugleicher Wohnblöcke ergibt sich ein Minderverbrauch von 10 bis 15 kWh/(m²a) bei den Gebäuden mit Wärmerückgewinnung. Die Werte wurden mit einem Wärmemengenzähler hinter dem Erzeuger bestimmt. Dem gegenüber ergibt sich ein zusätzlicher Hilfsstromaufwand, der etwa ¼ bis ⅙ der Wärmeeinsparung beträgt. Allein aufgrund der Preisverhältnisse – Strompreis zu Wärmepreis – in der üblichen Bandbreite 4 : 1 ergibt sich damit unter ungünstigen Randbedingungen zwar eine Energieeinsparung, aber keine Kosteneinsparung. Einschließlich der Kosten für Wartung und Investition ließ sich in dem Praxisprojekt keine Wirtschaftlichkeit feststellen.

Das Monitoring einer Passivhausschule mit Einliegerwohnung für den Hausmeister zeigte sehr positive Ergebnisse für die Lüftung mit Wärmerückgewinnung. Insbesondere in der Hausmeisterwohnung mit einer separaten Wohnungslüftung und raumweise direkt elektrischer Nachheizung lag der Endenergieverbrauch für Strom bei den geplanten Werten. Zudem wurde der Nachweis erbracht, dass im Sommer eine nennenswerte Nachtlüftung und -kühlung erreichbar ist [234]. Dieses Praxisbeispiel liefert auch eine Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Negativbeispiele sind vor allem mangelnder Qualitätssicherung geschuldet. In der Niedrigenergiesiedlung Hannover/Kronsberg konnten die Gutachter einerseits falsch dimensionierte Volumenströme bzw. auch fehlende hydraulische Abgleiche (in Lüftungs- und Heizungsanlagen) feststellen. Dies führte zu Beschwerden über zu kalte Räume sowie teilweise zur Außerbetriebnahme (oder Abkleben der Luftauslässe) der Anlagen durch die Nutzer [243].

Schulze-Darup führt aus, dass es sich im Geschosswohnungsbau bewährt hat, nur die Grundlüftungsstufe einzustellen. Der resultierende Luftwechsel ist zwar so gering, dass er nicht mehr der Nennlüftung nach DIN 1946 entspricht, jedoch vermindert sich im Winter das Problem der trockenen Luft. Der Nutzer solle im Falle nur kurzzeitigen Mehrbedarfs an Luft die Fenster öffnen [90]. Das spricht für die Annahme insgesamt deutlich geringerer Anlagenluftwechsel (bei einer typischen Energiebilanz) als es beispielsweise in den EnEV-Normen erfolgt.

Einbau der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung in ein Durchschnittsgebäude

Untersucht wird zunächst der nachträgliche Einbau von Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung in die jeweils durchschnittlichen Bestandsgebäude. Schematisch ist die in Abbildung 124 dargestellt.

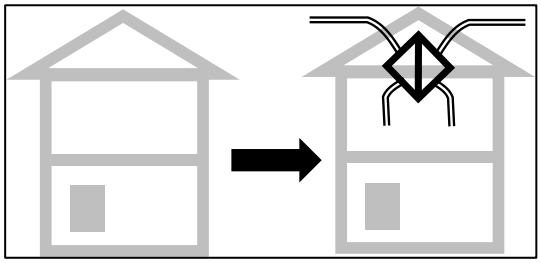


Abbildung 124 Schema – Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG in ein Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung]

Die Ergebnisse zeigt Tabelle 110. Es handelt sich um eine Vollkostenbetrachtung, da diese Maßnahme immer anlasslos stattfinden dürfte. Die Endenergie für Wärme sinkt rechnerisch in der Größenordnung der bekannten Praxisergebnisse: im EZFH etwa 10 kWh/(m²a), im dichter belegten MFH um etwa 15 kWh/(m²a). Im Gegenzug steigt der Haushaltsstrombedarf um etwa 2 bis 2,5 kWh_{el}/(m²a) an.

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Einbau einer Zu- und Abluftanlage mit 85 % WRG (in das Ø-Gebäude)				
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes“) h	vorher	W/(m²K)	2,02	1,61
	nachher	W/(m²K)	1,89	1,44
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	163,4	134,7
	nachher	kWh/(m²a)	152,4	118,6
Endenergie Strom	vorher	kWh/(m²a)	24,2	32,4
	nachher	kWh/(m²a)	26,2	34,7
Investition	Vollkosten	T€	13,8	45,8
Emissionsminderung, Wärme		%	7 %	12 %
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	3048	1917
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	713	2235
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	96	91
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	2940	1745

Tabelle 110 Auswertung Wohnungslüftung auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die nachträgliche Investition ist nicht wirtschaftlich. Es ergeben sich Mehrkosten von 2000 bis. 3000 €/a, wobei das MFH insgesamt besser abschneidet. Dieser Missstand wäre durch eine Vollfinanzierung der Anlage über Fördermittel gerade so auszugleichen. Der Fall einer anlasslosen Investition wird nicht näher betrachtet, da er für die Sanierung nicht relevant ist. Es handelt sich hierbei allenfalls um den turnusmäßigen Austausch einer bereits vorher vorhandenen Anlage.

Im durchschnittlichen Sanierungsfall eines bestehenden Wohnbaus ist die Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit so hohen Kosten verbunden, dass sich keine Wirtschaftlichkeit ergibt.

Die weiteren Überlegungen betreffen vor allem MFH im Bestand, da hier ein sinnvoller Einsatz (im Sinne einer Nachrüstung) unter bestimmten Umständen vorstellbar ist.

Verbindung des Einbaus einer Lüftungsanlage mit der Wärmepumpe

Unter der Vorrausetzung eines „mittleren Gebäudes“ – wie es nach der Wärmeschutzverordnung von 1984 zu erwarten ist – sind erneute Dämmmaßnahmen („Aufdoppeln“) weniger wirtschaftlich, siehe Anhang 3.2.5. Wird hier eine Wärmepumpe eingesetzt, sind häufig die notwendigen Vorlauftemperaturen noch zu hoch, um einen effizienten Betrieb zu ermöglichen. Entweder es wird eine Hybridanlage errichtet, vgl. Anhang 3.3.2, oder eine Lüftungsanlage verbessert das energetische Niveau. Berechnet wird exemplarisch für die vielen möglichen Kombinationen der Ersatz eines Heizöl-NT-Kessel durch eine Wärmepumpe in Kombination mit der Lüftungstechnik, siehe Abbildung 125.

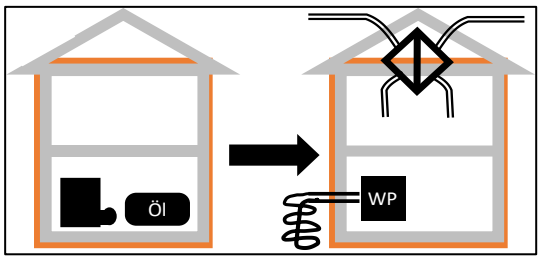


Abbildung 125 Schema – Einbau von Erdreichwärmepumpe und Lüftungsanlage mit WRG in ein mittleres Gebäude [eigene Darstellung]

Tabelle 111 zeigt die Ergebnisse für das Mehrfamilienhaus auf Basis der Vollkosten. Sowohl die Leistung der anzuschaffenden Erdreichwärmepumpe vermindert sich (kleinere Heizlast des Gebäudes) als auch die notwendige Vorlauftemperatur. Dies verbessert die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe.

			MFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Ersatz eines Heizöl-NT-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe (in einem Gebäude mit Baustandard „mittel“)			keine weiteren Maßnahmen	Zu- und Abluftanlage mit 85 % WRG
Detailkennwerte dieser Maßnahme				
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes“) h	vorher	W/(m²K)	1,49	1,49
	nachher	W/(m²K)	1,49	1,31
Auslegungsvorlauftemperatur	nachher	°C	60	56
Prüfstandsleistung Wärmepumpe	nachher	kW	23,4	20,7
Jahresarbeitszahl für Heizung	nachher	-	3,22	3,34
Ergebnisse				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	142	142
	nachher	kWh/(m²a)	39	34
Investition	Vollkosten	T€	66,0	107,2
Emissionsminderung, Wärme		%	-58	-64
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	309	475
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	3511	5514
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	101	97
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	309	461

Tabelle 111 Auswertung der Kombination von Erdreichwärmepumpe und Wohnungslüftung auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung]

Die hohen Anschaffungs- und vor allem Einbaukosten der Lüftungsanlage lassen sich jedoch nicht durch die resultierenden Mehrfachverbesserungen ausgleichen.

Lüftungsanlage in elektrisch direkt beheizten Gebäuden

Eine letzte Überlegung betrifft die Gruppe der mittelmäßig gedämmten Einfamilienhäuser aus den 1970er/1980er Jahren, welche – in Form von Fertigteilhäusern – aus Kostengründen bei der Errichtung mit einer Elektroheizung (z. B. Elektrospeicherheizung) ausgestattet wurden.

Werden sie mit besserem Wärmeschutz saniert, lohnt nicht unbedingt der Einbau einer Zentralheizung. Jedoch lässt sich überlegen, ob das Gebäude nicht bei seiner Sanierung auf besten Baustandard eine Lüftungsanlage erhält. Das Resultat entspricht in den Grundzügen dann dem Passivhauskonzept der 1980er Jahre. Verglichen werden drei Varianten der Änderung gegenüber dem Ursprungszustand, siehe Abbildung 126.

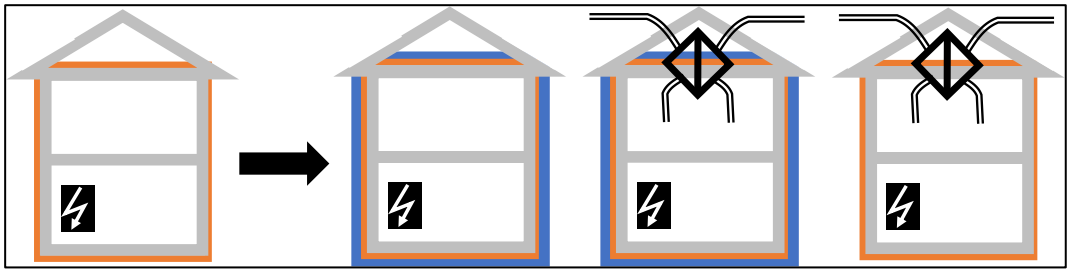


Abbildung 126 Schema – Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG, Nachdämmen oder deren Kombination [eigene Darstellung]

Tabelle 112 zeigt die Ergebnisse für entweder nur die (ohnehin notwendige) Dämmung, die Kombinationsmaßnahme oder nur die Lüftungsanlage. Es ist ersichtlich, dass auch das Maßnahmenpaket wirtschaftlich ist. Es wird durch die Dämmung „querfinanziert“.

			EZFH		EZFH
Maßnahmenbeschreibung					
Gebäude mit elektrisch direkter Versorgung			… nachträgliche Dämmung „best“		Standard unverändert „mittel“
			Fensterlüftung	Einbau einer Zu- und Abluftanlage mit 85 % WRG	
Detailkennwerte dieser Maßnahme					
Baustandard („Fingerabdruck des Gebäudes“) h	vorher	W/(m²K)	1,78	1,78	1,78
	nachher	W/(m²K)	0,82	0,69	1,65
Ergebnisse					
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	119	119	119
	nachher	kWh/(m²a)	50	41	109
Investition	Mehrkosten	T€	41,7	55,5	13,8
Emissionsminderung, Wärme		%	-58	-65	-7
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	309	548	1540
Dateninterpretation					
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-1681	-716	404
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner	55
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner	842

Tabelle 112 Auswertung der Kombination von Dämmung und Wohnungslüftung auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung]

Fazit

Das Einsatzgebiet der Lüftungsanlagen ist auf absehbare Zeit der Neubau. Die Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist im Geschosswohnungsbau vor allem dann interessant, wenn eine Wärmepumpe eingesetzt wird, vgl. auch die Ausführungen von Schulze-Darup [90]. Sie bietet einen Doppelnutzen. Da sie in allen Räumen gleichermaßen zu einer Heizlastverminderung führt (sogar in fensterlosen Räumen), ist sie eine gute Voraussetzung zum Erreichen eines niedrigeren Temperaturniveaus in der Heizungsanlage. Dies ergibt im Verlauf des Jahres einen effizienteren Betrieb. Die Verminderung der Heizlast führt zum anderen dazu, dass die Auslegungsleistung der Wärmepumpe geringer ausfallen kann, was zu geringeren Investitionskosten führt. Zudem entlastet diese Maßnahme die Notwendigkeit eines Zubaus von Spitzenlastkraftwerken bzw. -leistung.

In der Sanierung wird die Wohnungslüftung ein Nischenprodukt bleiben – begründet durch die hohen Nachrüstungskosten zumindest zentraler Anlagen. Ob sich dezentrale (raumweise) Anlagen mit Wärmerückgewinnung bei der Sanierung durchsetzen, bleibt abzuwarten. Der erhöhten Schallschutzproblematik von dezentral direkt am Ort der Nutzung befindlichen Ventilatoren stehen die Vorteile der Kosteneffizienz und des geringeren Planungsaufwandes (v. a. Brandschutz) gegenüber.

Im durchschnittlichen Sanierungsfall eines bestehenden Wohnbaus ist die Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit so hohen Kosten verbunden, dass sich keine Wirtschaftlichkeit ergibt.

Mellwig et al. gehen in den verschiedenen Szenarien ihrer Makrostudie von einer Vervielfachung der Anlagen (bezogen auf 2017) um den Faktor 2,7 bis 4,5 aus [128]. Diese eher konservative Einschätzung erscheint realistisch und wird auch von den Verfassern des vorliegenden Gutachtens geteilt.

Für eine vertiefende Auseinandersetzung mit dem Thema, auch aus Aspekten der Schimmelprävention, Innenraumästhetik (samt zugehöriger Gerichtsurteile) sowie Außenschallvermeidung wird auf die Literatur verwiesen, z. B. [211].

3.5.4 Zwischenfazit Zusatzerzeuger

Die Zusatzerzeuger bieten ein uneinheitliches Bild. Insbesondere die Photovoltaikanlage ist positiv zu erwähnen, weil Überschüsse gegen Entgelt ins Netz zurückgespeist werden können.

Zusatzerzeuger: Betriebswirtschaftliche Einschätzung

Abbildung 127 zeigt die Ergebnisse der Kostenbewertung für den Einsatz eines der genannten Zusatzerzeuger. Ausgangszustand ist das mittlere Gebäude (durchschnittlich gedämmter Baukörper) mit der mittleren Versorgungsanlage. Im Zustand vorher gibt es die untersuchte Technik nicht, nachher ist sie vorhanden. Alle anderen Randdaten sind gleich belassen. Dargestellt ist das Ergebnis der Gesamtkostenbetrachtung (Überschuss oder Fehlbetrag in [€/a] bezogen auf die Wohnfläche in [m²])

Alle Werte unter der Nulllinie sind wirtschaftlich, ohne dass die Energiepreise steigen bzw. bedürfen keiner Förderung. Dazu zählt die Photovoltaik. Nicht ohne Ausgleichsmaßnahmen kommen die Solarthermie und die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung aus. Die möglichen Gegenmaßnahmen sind in Abbildung 128 dargestellt.

Die Dezentralisierung der Trinkwassererwärmung mit Photovoltaik ist ebenfalls ausgewertet, ebenso wie eine reine Dezentralisierung (nur zum Vergleich). Gut zu erkennen ist, dass der Vorteil der Photovoltaik in punkto Kostenersparnis und der Kostennachteil der reinen Dezentralisierung sich ausgleichen. Die Kombimaßnahme liegt – was die Gesamtkostendifferenz angeht – in der Mitte. Allerdings addieren sich die Einsparungen zu einer größeren Emissionsminderung. Das Paket „PV+Dezentralisierung“ weist im EZFH fast dasselbe wirtschaftliche Defizit auf wie die Solarthermie, jedoch bei deutlich größerer Emissionsminderung. Im MFH ist es in beiden Punkten günstiger.

Hat das Gebäude jedoch bereits vorher eine dezentral elektrische Warmwasserbereitung, ist die Einbindung der Photovoltaik noch vorteilhafter als im Durchschnittsgebäude. Da ein größerer Strombedarf vorhanden ist, lässt sich der erzeugte Strom besser verwerten. Die Emissionsminderung verbessert sich.

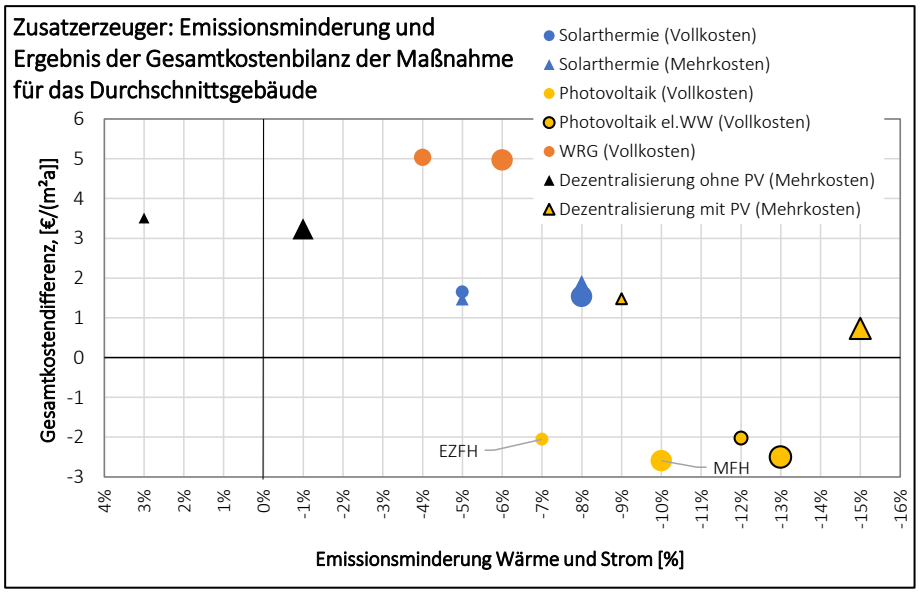


Abbildung 127 Bewertung der Zusatzerzeuger nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung]

Zusatzerzeuger: Maßnahmen zum Ausgleich von Unwirtschaftlichkeiten

Abbildung 128 zeigt die notwendigen Investitionskostenzuschüsse (X-Achse), um die in sich nicht wirtschaftlichen Maßnahmen grenzwirtschaftlich werden zu lassen. Die Lüftungsanlage benötigt eine Förderung, die in etwa in Höhe der Investitionskosten liegt. Damit ist sie nicht für die nachträgliche Modernisierung interessant, außer das Gebäude wird ohnehin in einen Rohbauzustand versetzt, so dass die Investitionskosten geringer ausfallen.

Die Solarthermie benötigt einen Zuschuss von 55 bis 60 %, damit sie wirtschaftlich ist. Alternativ steigen die Energiepreise, so dass sie dann allein aufgrund der erreichbaren Energiekostenersparnisse wirtschaftlich ist. Es müssen allerdings mit 500 €/t vergleichsweise hohe zusätzliche Energieträgerkosten hinzukommen. Erdgas läge mit den genannten Werten bei ca. dem 2,5-facen Preis wie heute.

Die reine Dezentralisierung ist nicht mit dargestellt, weil sie – sehr große Zuschüsse benötigen würde. Jedoch das Paket „PV+Dezentralisierung“. Es ist nicht aus sich heraus wirtschaftlich, jedoch kommt es mit deutlich geringen Zuschüssen aus. Hat das Gebäude bereits vorher eine dezentrale elektrische Warmwasserbereitung, sind keine Zuschüsse notwendig, daher ist diese Maßnahme in diesem Diagramm nicht dargestellt.

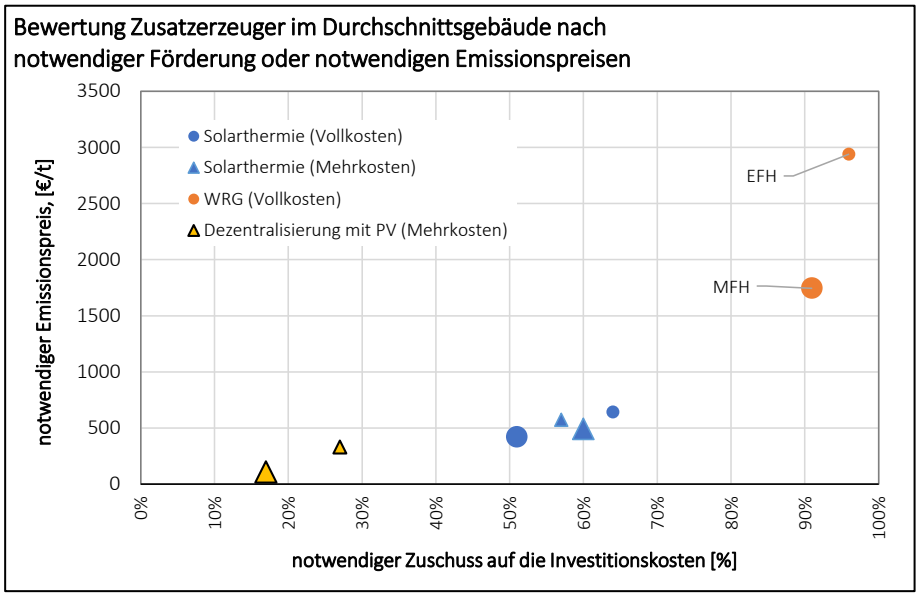


Abbildung 128 Bewertung der Zusatzerzeuger nach notwendiger Förderung oder notwendigen Emissionspreisen [eigene Darstellung]

Zusatzerzeuger: Einschätzung auf Basis der Emissionsminderung

Abbildung 129 ordnet die Zusatzerzeuger unter dem Gesichtspunkt der Emissionsminderung ein. Je weiter unten und rechts eine Maßnahmen angeordnet ist, desto interessanter ist sie aus Sicht der Gesamtverbesserung des Bestandes.

Am besten bzgl. des äquivalenten CO_2-Preises schneidet die Photovoltaikanlage im MFH ab. Der mit ihr erzielbare äquivalente CO_2-Preis ist deutlich geringer als bei dem EZFH. Dies liegt an der verwendeten Logik bei der Dimensionierung – da diese nicht nach dem Bedarf erfolgt, sondern nach der verfügbaren Dachfläche, ist sie im EZFH prinzipiell deutlich überdimensionierter. Zumindest für das hier unterstellte mittlere Gebäude, welches außer dem Haushaltstrom für die Heizung und Trinkwassererwärmung kaum Strom einsetzt.

Sobald jedoch weitere Stromverbraucher hinzukommen, verbessert sich das Bild. Schon bei einer elektrischen Trinkwarmwasserbereitung im Ausgangsgebäude sinkt beispielsweise im EZFH der äquivalente CO_2-Preis der Maßnahme auf 981 €/t. Gleichzeitig werden dann auch 12 % Emissionen eingespart. Der Punkt wandert im Diagramm nach unten und rechts, was positiver ist.

Die ungünstigsten Randdaten sind mit der Lüftungsanlage gegeben. Die Emissionen sinken kaum, weil u. a. auch elektrische Verbraucher (Ventilatoren) hinzukommen, die es vorher nicht gab. Gleichzeitig ist die Maßnahme vergleichsweise teuer.

Die Solarthermie liegt im Mittelfeld. Im Mehrfamilienhaus schneidet sie eindeutig schlechter ab als die Photovoltaik (teurer und geringere Emissionsminderung). Im EZFH liegen beide Systeme etwa gleichauf, wenn man das mittlere Gebäude betrachtet. Die Gutachter sehen den Einsatzbereich langfristig ausschließlich im EZFH. Da die Dachflächen im MFH begrenzt sind, ist ihre primäre Verwendung für die Photovoltaik sinnvoller.

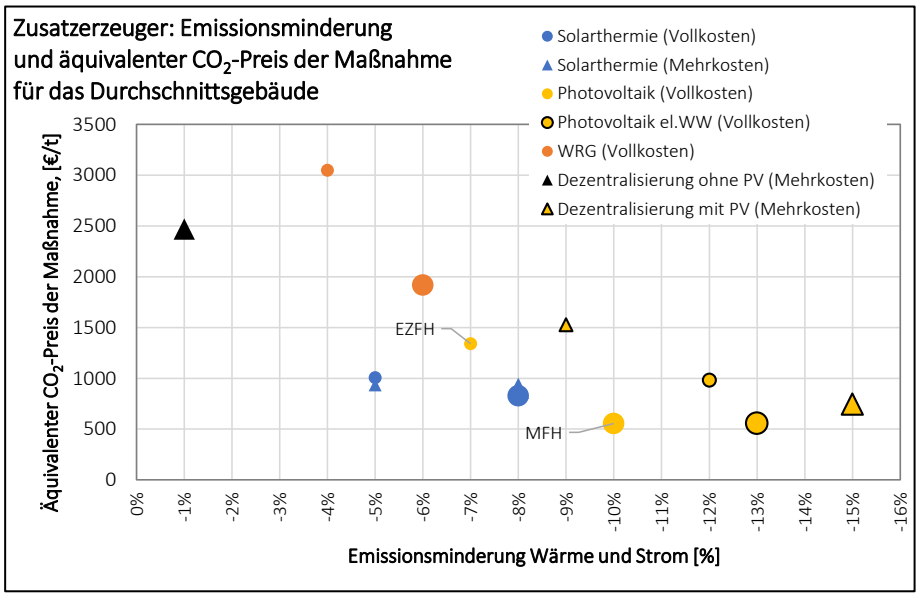


Abbildung 129 Bewertung der Zusatzerzeuger nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung]

Das Paket „PV+Dezentralisierung“ schneidet nur geringfügig anders ab als die jeweilige reine Photovoltaiklösung. Sie spart jeweils deutlich mehr Emissionen ein und führt zu einem kaum größeren äquivalenten CO_2-Preis. Das heißt, das eingesetzte Investitionskapital kann viele Emissionen einsparen. Die Lösung ist damit eine Alternative zur Solarthermie. Jedoch: ein Systemumbau ist kostenintensiv. Die Maßnahme ist sinnvollerweise an den Sanierungszyklus der Rohrleitungen zu koppeln (es sind nur die Mehrkosten berücksichtigt!).

Zusatzerzeuger: Einschränkungen

Sind Gebäude mit sehr vielen Personen belegt, kann sich eine Solarthermie lohnen. Da die Berechnung des EZFH von etwa 50 m²/Person ausgeht, ist dies als obere Grenze anzusehen. Leben die Personen deutlich dichter (mindestens so wie in dem MFH, also auf ≤ 38 m²/Person), sind Einzelfallprüfungen vorzunehmen. Bei dünnerer Belegung verschlechtern sich die Ergebnisse.

Bei der Photovoltaikanlage ist der Einfluss der Belegung nicht so ausschlaggebend. Selbstverständlich sinken die Emissionsminderung und auch die Wirtschaftlichkeit, da die Eigenstromnutzung abnimmt. Kompensiert wird dies in Teilen dann durch die Einspeisevergütung.

Die Lüftungsanlage mit WRG führt in der Sanierung zu so hohen Investitionskosten, dass allenfalls dezentrale Lösungen (raumweise Anlagen) zu einer Wirtschaftlichkeit führen, was im Rahmen dieses Gutachtens nicht getestet wurde. Selbst bei einem Zehntel der Investitionskosten ist noch keine Wirtschaftlichkeit zu erkennen. Diese Technologie ist voraussichtlich dem Neubau vorbehalten. Lüftungsanlagen können selbstverständlich aus anderen Gründen, z. B. dem Schutz vor Außenlärm oder Allergenen etc. installiert werden.

Wärmepumpen & Photovoltaik: Betriebswirtschaftliche Einschätzung

Die nachfolgenden Grafiken greifen die ohne Photovoltaik untersuchten Wärmepumpenlösungen wieder auf (siehe Anhang 3.3.1 bzw. Zwischenfazit in Anhang 3.3.7) und stellen sie den jeweiligen Versionen mit Photovoltaik gegenüber. Hinsichtlich der verwendeten Symbolik für die Grafiken sind die Hinweise in Anhang 3.3.7 zu beachten.

Um die Variantenvielfalt und den Auswerteaufwand zu begrenzen, erfolgt eine Auswahl möglicher Konstellationen (Ausgangserzeuger: Gas- oder Ölkessel als Brennwert- oder NT-Kessel sowie Fernwärme; Zielerzeuger: Außenluft- oder Erdreich-Wärmepumpe; Durchschnittsgebäude oder gut sanierter Bestand).

Abbildung 130 und Abbildung 131 zeigen die Ergebnisse der Kostenbewertung für verschiedene Kombinationen aus Photovoltaik und Wärmepumpen – jeweils für das Durchschnittsgebäude sowie ein gut saniertes Gebäude getrennt. Dargestellt ist das Ergebnis der Gesamtkostenbetrachtung (Überschuss oder Fehlbetrag in [€/a] bezogen auf die Wohnfläche in [m²]). Damit die Werte besser eingeordnet werden können, sind die reinen Wärmepumpenlösungen mit eingetragen. Jeweils zusammengehörig sind folgende Symbole

- Vollkosten: Kreise (keine Photovoltaik) und Rauten (mit Photovoltaik)
- Mehrkosten Dreiecke (keine Photovoltaik) und Quadrate (mit Photovoltaik)

Es zeigt sich, dass im durchschnittlichen Bestand keine der Lösungen wirtschaftlich ist, jedoch im gut sanierten Gebäude die Lösung „Außenluftwärmepumpe und PV ersetzt Fernwärme“. Die weist vorher die höchsten Energiekosten auf.

In den EZFH-Lösungen lassen sich höhere Emissionsminderungen erzielen, weil die PV-Anlage größer dimensioniert ist und damit ein größerer Anteil des Stroms für die Wärmepumpe aus der PV stammt.

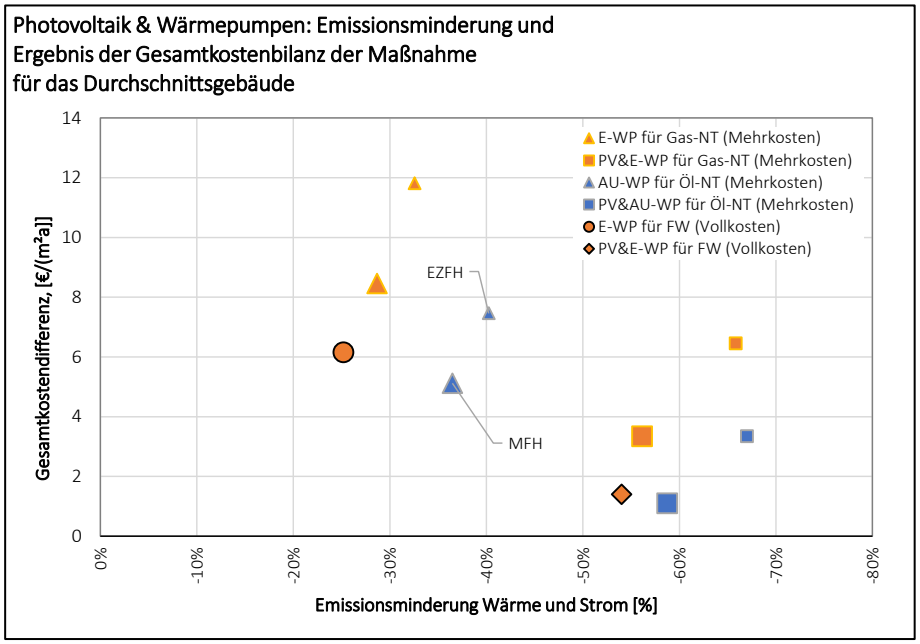


Abbildung 130 Bewertung Wärmepumpe & PV nach Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im Ø-Gebäude [eigene Darstellung]

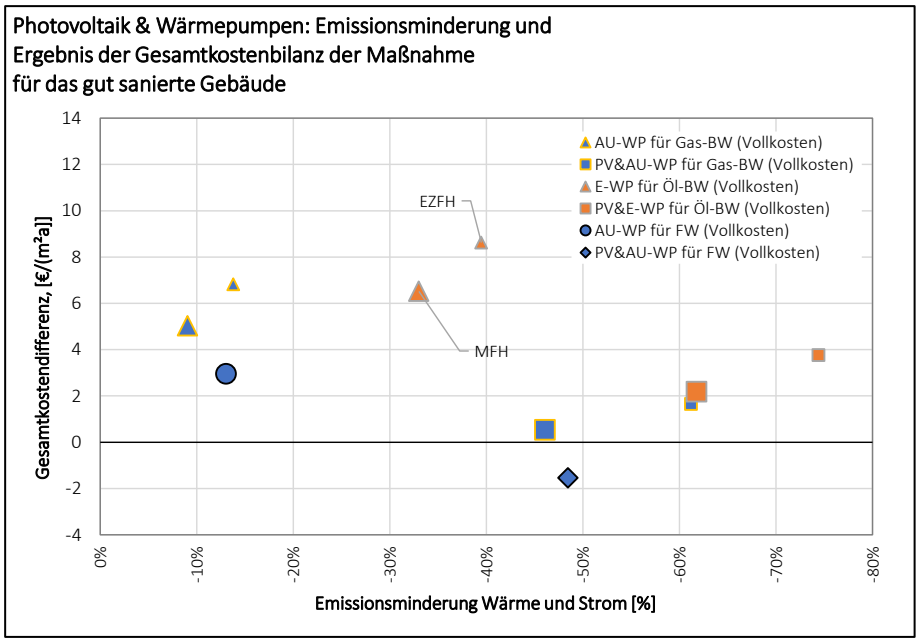


Abbildung 131 Bewertung Wärmepumpe & PV nach Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im guten Gebäude [eigene Darstellung]

Wärmepumpen & Photovoltaik: Maßnahmen zum Ausgleich von Unwirtschaftlichkeiten

Abbildung 132 und Abbildung 133 zeigen die notwendigen Investitionskostenzuschüsse (X-Achse), um die in sich nicht wirtschaftlichen Maßnahmen grenzwirtschaftlich werden zu lassen. Alternativ sind die zusätzlich notwendigen Emissionspreise genannt, unter denen diese Grenzwirtschaftlichkeit ebenfalls eintritt. Kombinierte Zwischenwerte sind ebenfalls denkbar, aber nicht dargestellt.

Die Lösungen mit Photovoltaik führen im Bestand dazu, dass ein Zuschuss von unter 40 %, im gute sanierten Objekt unter 35 % ausreicht, um eine Wirtschaftlichkeit herzustellen. Unter allen untersuchten Anlagentechnikvarianten konnten somit Lösungen gefunden werden, die eine ähnliche Subvention wie die baulichen Lösungen voraussetzen.

Zu der Frage, warum die notwendigen Zuschüsse bei den Varianten ohne PV so hoch sind, wird auf die Auswertung in Anhang 3.3.7 verwiesen.

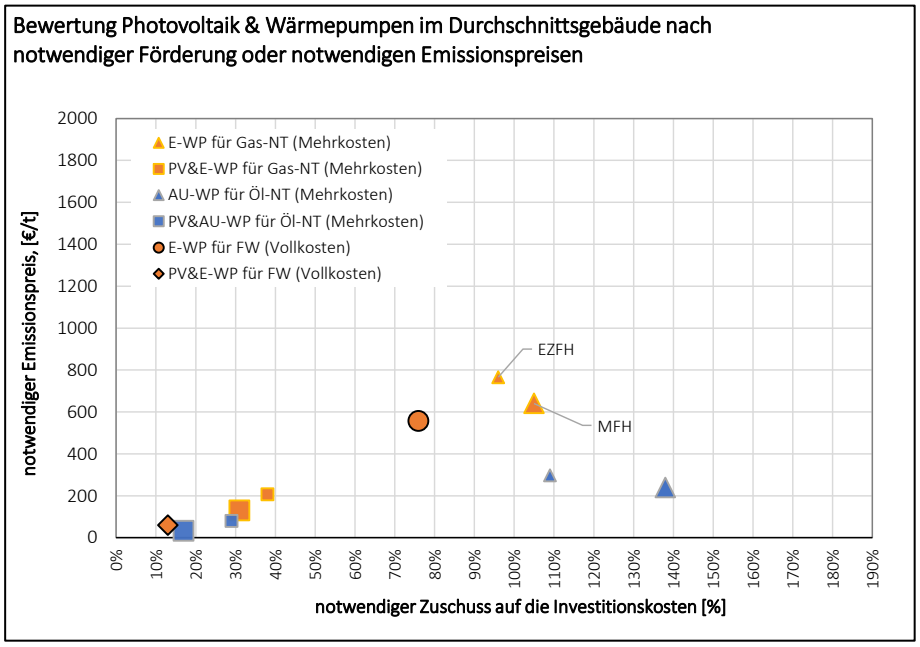


Abbildung 132 Bewertung Wärmepumpe & PV im Durchschnittsgebäude nach notw. Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung]

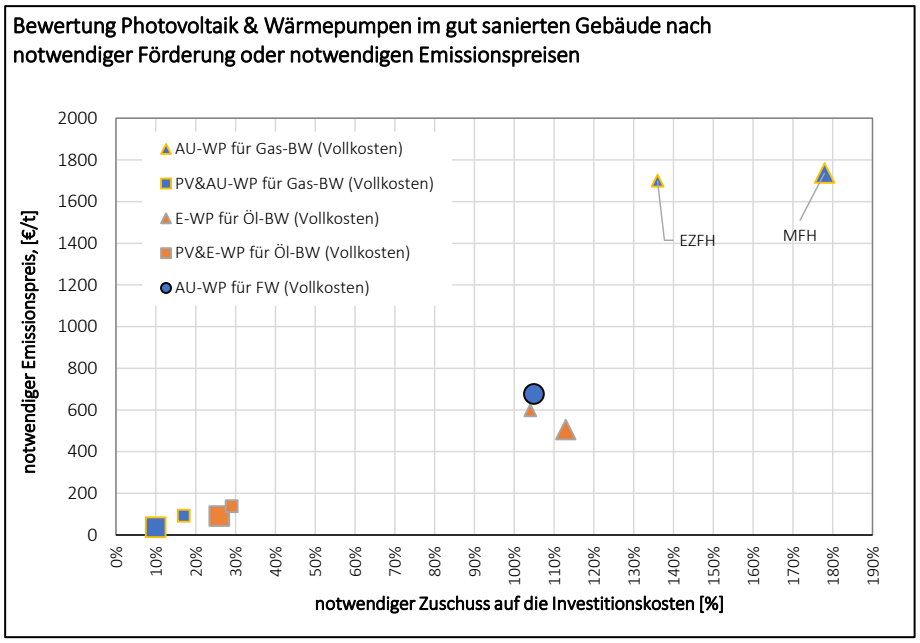


Abbildung 133 Bewertung Wärmepumpe & PV im guten Gebäude nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung]

Alternativ ließen sich die Unwirtschaftlichkeiten ausgleichen, indem der eingesetzte Energieträger teurer wird. Bei den Außenluftwärmepumpen ergeben sich notwendige Emissionspreise von etwa 100 €/t, bei den Erdreichwärmepumpen maximal 200 €/t. Diese Werte sind vergleichsweise niedrig. Das entspräche einem etwa 1,5 bis 2-fach höheren Gaspreis als heute.

Wärmepumpen & Photovoltaik: Einschätzung auf Basis der Emissionsminderung

Abbildung 134 und Abbildung 135 ordnen den Wärmepumpeneinbau mit PV unter dem Gesichtspunkt der Emissionsminderung ein. Je weiter rechts und gleichzeitig unten eine Maßnahme angeordnet ist, desto interessanter ist sie aus Sicht der Gesamtverbesserung des deutschen Bestandes.

Lage rechts (großer „Hebel“ hinsichtlich der Emissionsminderung in einem Schritt): insgesamt ist festzustellen, dass die Lösungen mit PV zu höheren Emissionsminderungen (für Wärme und Strom) führen als die vergleichbaren reinen Wärmepumpenlösungen.

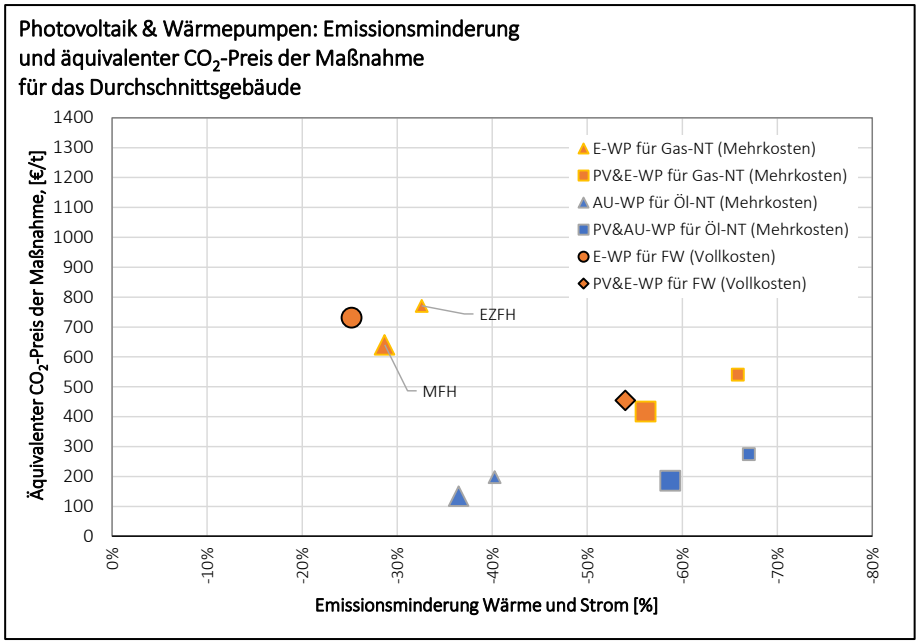


Abbildung 134 Bewertung Wärmepumpe & PV im Ø-Gebäude nach Emissionsminderung u. äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung]

Lage unten (gutes Verhältnis von eingesetztem Kapital zur erzielten Emissionsminderung): vor allem schneiden die PV-Lösungen hinsichtlich der erreichten CO_2-Preise besser ab. Sie liegen auf einem vergleichbaren Niveau wie die wärmetechnischen Maßnahmen an der Hülle.

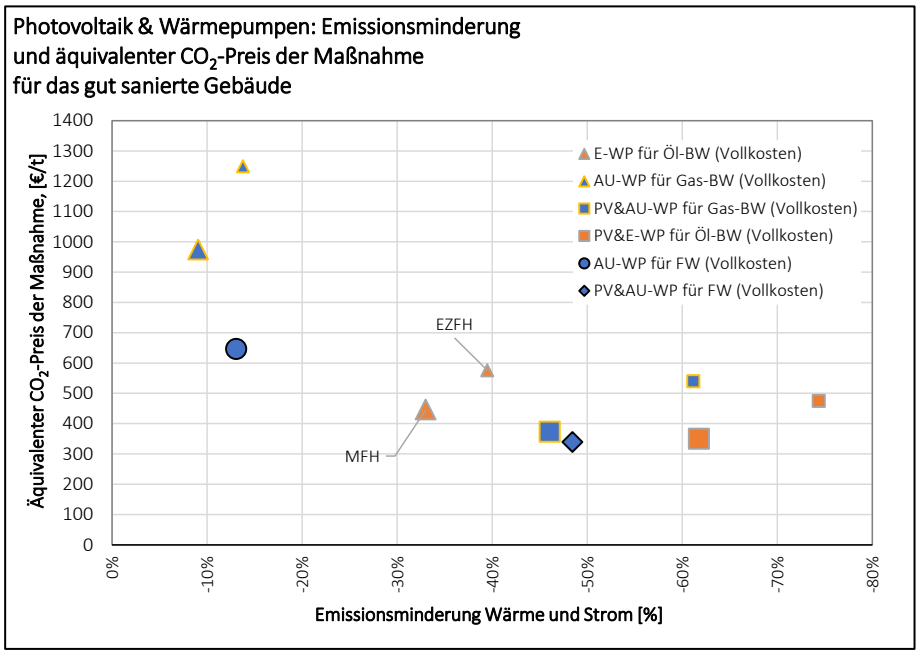


Abbildung 135 Bewertung Wärmepumpe & PV im guten Gebäude nach Emissionsminderung u. äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung]

Insgesamt ist festzustellen, dass in Kombination mit Photovoltaik viele Wärmepumpenlösungen wirtschaftlich werden, weil eine „Quersubventionierung" stattfindet. Der Bezug teuren Netzstroms wird vermieden. Diese Maßnahmen sind vor allem dann interessant, wenn keine generelle Umstrukturierung der Strompreisbildung erfolgt (vgl. Anhang 3.9).

Dezentralisierung & Photovoltaik: Betriebswirtschaftliche Einschätzung

Der Einbau einer Wärmepumpe kann zum Anlass genommen werden, die zentrale Warmwasserbereitung durch eine dezentrale zu ersetzen. Ohne die gleichzeitige Verwendung einer Photovoltaik ist dies in den Typgebäuden nicht sinnvoll, weil der Energieträger Strom zu teuer ist. Mit Photovoltaik lassen sich sinnvolle Kombinationen finden.

Untersucht werden jeweils drei Varianten im gut sanierten Gebäude und drei im Durchschnittsgebäude – jeweils ausschließlich in MFH. Der Version „zentral mit Wärmepumpe und PV" (runde Symbole in den Bildern) wird die Lösung „dezentral elektrisch, Wärmepumpe nur für Heizung plus PV" (quadratische Symbole gleicher Farbgebung) gegenübergestellt.

Abbildung 136 zeigt die Ergebnisse. Dargestellt ist das Ergebnis der Gesamtkostenbetrachtung (Überschuss oder Fehlbetrag in [€/a] bezogen auf die Wohnfläche in [m²]).

Die Variante unter der Nulllinie – der Ersatz eines Heizölkessels durch eine Außenluftwärmepumpe mit zentraler Warmwasserbereitung – ist wirtschaftlich, ohne dass die Energiepreise steigen bzw. sie bedarf keiner Förderung. Die Lösungen mit dezentraler Trinkwassererwärmung schneiden wirtschaftlich ungünstiger ab, wenn auch ähnliche Emissionsminderungen erzielt werden.

Der Baustandard hat geringeren Einfluss auf das Ergebnis, jedoch schneiden die Lösungen mit Außenluftwärmepumpen (blaue Füllung der Symbole) besser ab. Auch spielt der frühere Energieträger eine Rolle, Heizöl führt zu einer größeren Emissionsminderung (grau umrandete Symbole).

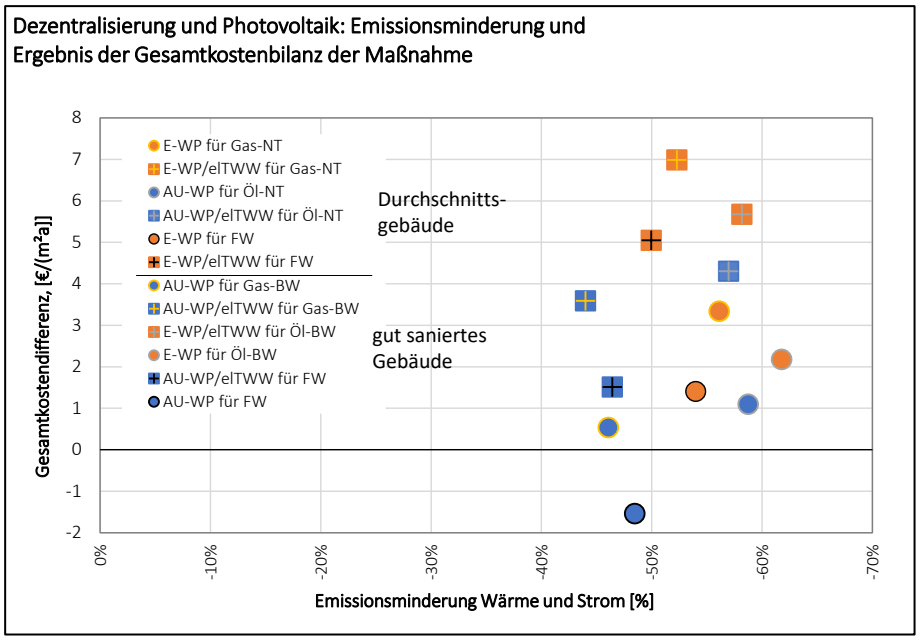


Abbildung 136 Bewertung der Dezentralisierung nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung]

Dezentralisierung & Photovoltaik: Maßnahmen zum Ausgleich von Unwirtschaftlichkeiten

Abbildung 137 zeigt die notwendigen Investitionskostenzuschüsse (X-Achse), um die in sich nicht wirtschaftlichen Maßnahmen grenzwirtschaftlich werden zu lassen. Alternativ sind die zusätzlich notwendigen Emissionspreise genannt, unter denen diese Grenzwirtschaftlichkeit ebenfalls eintritt. Kombinierte Zwischenwerte sind ebenfalls denkbar, aber nicht dargestellt.

Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den reinen Wärmepumpenlösungen: die Maßnahmen wären nur mit Zuschuss wirtschaftlich. Auch wenn die Photovoltaikanlage zu einer Verbesserung des Strompreises führt, weil er günstiger selbst hergestellt als bezogen werden kann, bleibt dennoch das Problem, dass Strom im Vergleich zu anderen Energieträgern teuer ist, vgl. Ausführungen in Anhang 3.3.7.

im Vergleich zu den reinen Wärmepumpenlösungen schneiden die Varianten mit Dezentralisierung schlechter ab.

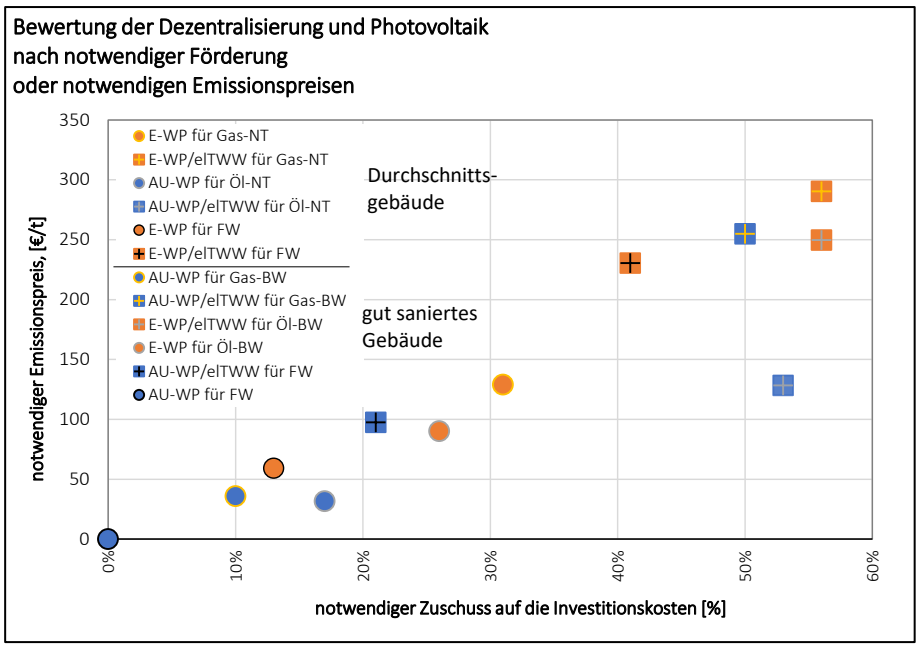


Abbildung 137 Bewertung der Dezentralisierung nach notwendiger Förderung oder notwendigen Emissionspreisen [eigene Darstellung]

Dezentralisierung & Photovoltaik: Einschätzung auf Basis der Emissionsminderung

Abbildung 138 ordnet die baulichen Maßnahmen unter dem Gesichtspunkt der Emissionsminderung ein. Je weiter rechts und gleichzeitig unten eine Maßnahme angeordnet ist, desto interessanter ist sie aus Sicht der Gesamtverbesserung des deutschen Bestandes. Lage unten (gutes Verhältnis von eingesetztem Kapital zur erzielten Emissionsminderung): die Varianten der Dezentralisierung der Trinkwassererwärmung sind immer etwas schlechter als die zentralen. Jedoch ist die Lösung in dem Gebäude mit ehemals Heizölkessel und nun einer Außenluftwärmepumpe aus Sicht der Emissionsvermeidung vorteilhaft.

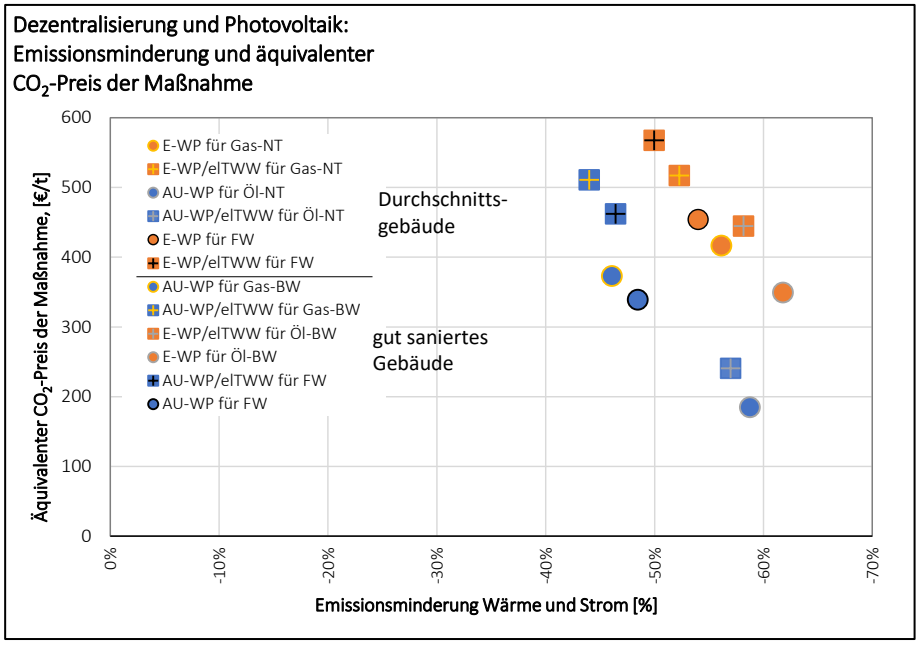


Abbildung 138 Bewertung der Dezentralisierung nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung]

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Photovoltaikanlage das grundsätzliche Problem der hohen Strompreise in Teilen löst. Sie kann aber nur bedingt den hohen Strompreis für die elektrische Warmwasserbereitung (von 31 Cent/kWh) ausgleichen. Der Vorteil dieses Systems liegt in der Verlustvermeidung und Vermeidung lokaler Überwärmung, vgl. Anhang 3.4.2. Unter den derzeitigen Randdaten für den Strompreis lassen sich allerdings keine wirtschaftlicheren Lösungen erreichen als mit Wärmepumpen.

Wären künftig Wärmepumpenstrom und Allgemeinstrom günstiger und vor allem gleich oder ähnlich teuer, wird sich das Bild in Richtung Dezentralisierung verschieben.

3.6 Energieeffizienz und Kosten für die Qualitätssicherung

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens werden drei Aspekte der Qualitätssicherung betrachtet, die sich jedoch nur schwer bzw. gar nicht voneinander trennen lassen:

1. die qualitätsgesicherte Gebäudehülle – luftdicht und wärmebrückenarm – deren Umsetzung zusammen mit den baulichen Maßnahmen erfolgt (Anhang 3.2); jedoch kann bei einer Teilsanierung der Hülle jeweils auch nur ein Teil des Problems gelöst werden, weshalb es schwierig ist, den einzelnen Maßnahmen (z. B. der Kellerdeckendämmung) einen Anteil der Vorzüge der Qualitätssicherung zuzuschlagen
2. die qualitätsgesicherte anlagentechnische Peripherie – minimierte unkontrollierte Wärmeeinträge von Rohrleitungen in den beheizen Bereich (Anhang 3.4), hydraulischer Abgleich, optimale Raumregelung und Systemtemperaturen, passende Pumpen usw.; wobei optimale Verhältnisse umso schwieriger zu erreichen sind, je besser der bauliche Wärmeschutz ist; die Problematik unkontrollierter Wärmeeinträge und lokaler Überwärmung, Nachteile träger Regelungen und Heizflächen wirkt sich in Gebäuden mit geringem Wärmebedarf entsprechend deutlich negativer aus
3. die qualitätsgesicherte Erzeugung von Wärme durch die Haupterzeuger (Anhang 3.3) und Zusatzerzeuger (Anhang 3.5); dabei hängt die Frage der optimalen Systemtemperaturen von der Peripherie und deren Qualität ab.

Bezogen auf den Gesamtbestand Deutschland wird für den heutigen Zustand der Gebäude von einer Durchdringungsrate der Qualitätssicherung von 15 % im Wohnungsbau angenommen. Für die Anlagentechnik entstammt die Erkenntnis eigenen Untersuchungen [23] bzw. auch den statistischen Erhebungen der Verbraucherzentralen [135]; für den baulichen Wärmeschutz wird sie aus den Neubau- und Sanierungsaktivitäten seit Einführung der EnEV 2002 abgeschätzt.

Der zahlenmäßige Nachweis – in kombinierter Bewertung aller 3 Aspekte – ist Anhang 3.6.3 zu entnehmen.

3.6.1 Bauliche Qualität

Bewertung der Wärmebrücken in den Typgebäuden

Der Effekt von Wärmebrücken ist abhängig vom sonstigen Baustandard der Hüllbauteile. In den Berechnungen, die diesem Gutachten zugrunde liegen, wird eine Näherungsformel verwendet. Sie verwendet den mittleren hüllflächenbezogenen Transmissionswärmeverlust H_T' („mittlerer U-Wert“) als Eingangsgröße.

- mit Optimierung: $0{,}03 - 0{,}02 \cdot H'_T \ [\frac{W}{m^2K}]$
- ohne Optimierung: $0{,}07 - 0{,}05 \cdot H'_T \ [\frac{W}{m^2K}]$

Bei einem vollständig unsanierten Altbau (incl. älterer Bestandsfenster) und einem resultierenden Wert H_T' = 1,3 W/(m²K) führen beide Ansätze zu einem Wärmebrückenzuschlag von 0 W/(m²K). Je besser der Baukörper ist – ausgehend vom genannten schlechtesten Wert), desto höher fallen Wärmebrückenzuschläge nach dem genannten Ansatz aus. Bei einer Passivhauskonstruktion mit einem Ausgangswert von H_T' = 0,3 W/(m²K) führen der Ansatz mit Qualitätssicherung zu 0,02 W/(m²K), der ohne Qualitätssicherung zu 0,05 W/(m²K) Zuschlag. Die insbesondere im Holzbau möglichen noch geringeren Wärmebrückenzuschläge werden aus Gründen der Vereinfachung nicht abgebildet.

Die für die Berechnung verwendeten Werte sind insgesamt nur etwa halb so groß wie die pauschalen Wärmebrückenzuschläge der EnEV-Normen [112] [244]. Da die Normen nachfolgend beschriebene Logik verfolgen, erscheint dies als gerechtfertigt: die pauschalen Wärmebrückenzuschläge der Normen fassen die ungünstigsten Praxisfälle zusammen und definieren dafür einen Wärmebrückenzuschlag, der – auf der sicheren Seite liegend – in jedem Fall keine zu geringe Bewertung des Wärmebrückeneinflusses ermöglicht. Bei Anwendung dieses Zuschlags entfällt Planungsaufwand, dafür wird das Gebäude im Mittel schlechter abgebildet, als es tatsächlich ist. Erfolgt im Rahmen der Planung eine detaillierte Betrachtung kann ein geringerer tatsächlicher Wert ermittelt werden – so dass sich ein konkreter Vorteil der detaillierten Planung ergibt. Dies deckt sich auch mit eigenen Erkenntnissen der Gutachter aus Projekten.

Für die im Rahmen dieses Gutachtens angestrebte möglichst realistische Einschätzung der tatsächlichen Energiemengen wird daher nicht der schlechteste Werte, sondern ein typischer Wert angesetzt.

Ein vergleichender messtechnischer Nachweis – anhand der tatsächlichen Verbrauchswerte einer größeren Stichprobe von Gebäude mit und ohne Wärmebrückenoptimierung – ist den Gutachtern nicht bekannt. Die entsprechende Versuche von co2online im Rahmen des Projektes „Sanierungswirkung“ waren nicht geeignet, da es zu viele weitere Einflüsse gibt [53]. Allerdings sind die Zuschläge auf der ungünstigen Seite liegend gewählt.

Schadensbilder sowie Schadensabhilfe sind der Literatur zu entnehmen, z. B. der Kurzstudie von Böhmer und Simon [199].

Bewertung der Luftdichtheit in den Typgebäuden

Für ein dichtes Gebäude wird eine verminderte Infiltration angesetzt. Die für die Berechnungen dieses Gutachtens gewählten Ansätze folgen der Bewertung des IWU im „Energiepass Heizung/Warmwasser“ [75] sowie den EnEV-Wohnbau-Normen [112] [244].

- mit Optimierung: 0,1 h^{-1}
- ohne Optimierung: 0,2 h^{-1}

Der Infiltrationsluftwechsel ist dabei nur ein Teil des Gesamtluftwechsels, welcher zusätzlich den Nutzereinfluss und ggf. auch eine Lüftungsanlage berücksichtigt.

Auch hier gilt: ein vergleichender messtechnischer Nachweis – anhand der tatsächlichen Verbrauchswerte einer größeren Stichprobe von Gebäuden mit und ohne Luftdichtheit – ist den Gutachtern nicht bekannt. Da sich im realen Gebäude der Effekt der Dichtheit mit dem Nutzerverhalten überlagert (vgl. auch die Ansätze in der DIN V 18599 [112]), wäre ein messtechnischer Nachweis über Stichproben auch stark eingeschränkt möglich.

Mögliche negative Konsequenzen fehlender Luftdichtheit – auch über die energetischen Aspekte hinaus – sind der Literatur zu entnehmen, z. B. dem Projektbericht von Schulze-Darup [90].

Nachweis baulicher Qualität

Zu nennen sind die Gebäudedichtheitsmessung und die Thermographie. Da beides punktuelle Messverfahren (Momentaufnahmen) sind und keine dauerhaften, offenbaren sie zwar Schwachstellen des Gebäudes, lassen aber nur in begrenztem Maß einen Rückschluss auf das gesamte Jahr und den Energieverbrauch zu.

Die Gutachter sehen beide Werkzeuge als sehr geeignet an, jedoch ergänzt um die Energieanalyse aus dem Verbrauch, vgl. Anhang 5.3.3.

Mit ihr lassen sich Auswirkungen fehlender Qualität gut sichtbar machen, siehe Anhang 5.3.4. Allerdings ist anzumerken, dass anhand von Messwerten nicht mehr zu trennen ist in „schlechte Wärmebrücken“ oder „hohe Undichtheit“ – jedoch zumindest der Summeneinfluss „überhöhter Transmission und Lüftung“ lässt sich anhand von Verbrauchwerten nachweisen.

3.6.2 Anlagentechnische Qualität

Eine komplette Liste aller potentiellen Fehlerquellen an der Anlagentechnik ist mit Ausnahme der Dissertation der Gutachterin Prof. Jagnow [91] den Gutachtern nicht bekannt. Es handelt sich um eine Vielzahl einzelner „Kleinigkeiten“. Rehberg fasst die Erkenntnisse der Wohnungswirtschaft wie folgt zusammen – im Sinne einer Fehlerliste, die anschließend in einer Qualitätssicherung behoben wurde (Anmerkung der Gutachter: die Aspekte baulicher Qualitätssicherung wurden aus der Aufstellung entfernt) [245]:

> *„• Anlagen waren häufig falsch berechnet und ausgelegt […]*
> *• Lastanpassung der Fernwärmeanschlüsse und von Kesselanlagen wurde nach Wärmedämmung der Gebäudehülle häufig nicht vorgenommen*
> *• Kesselanlagen, Trinkwarmwasser (TWW)-Speicher und Pumpen sind oft überdimensioniert*
> *• Verwendung wenig geeigneter Armaturen*
> *• Pauschale Dimensionierung der Raumheizflächen ohne Berücksichtigung der lagebedingt unterschiedlichen Heizlasten bzw. Wärmebedarfe*
> *• Planlose Verwendung zu vieler Drosselungen, d. h. mangelnde Kenntnis hydraulischer Schaltungen*
> *• Temperaturfühler der Regelung zur Warmwasserbereitung waren zum Teil fehlerhaft und müssen überprüft und abgeglichen werden*
> *• Kein hydraulischer Abgleich der Heizungsanlagen, selbst wenn voreinstellbare Thermostat-Ventile vorhanden waren (die TH-Ventile standen auf „Werkseinstellung“)*
> *• Teilweise waren keine voreinstellbaren Heizkörperventile eingebaut, so dass die Kosten für den hydraulischen Abgleich sehr hoch waren*
> *• Die Dämmung der Rohrleitungen und Armaturen fehlte oder war beispielsweise nach Beseitigung von Havarien nicht ergänzt oder erneuert worden*
> *• Vielfach war keine fachgerechte Wartung mit dem Ziel einer Energieeffizienzsteigerung erkennbar*
> *• Die Betriebsführung der Heizungs- und Warmwasseranlagen erwies sich vielfach als suboptimal, wie überzogene Heizkennlinien zeigten […]“*

Nicht alle, aber möglichst viele der Aspekte mangelnder Qualitätssicherung werden in den Berechnungen, die diesem Gutachten zugrunde liegen, quantitativ berücksichtigt.

Raumregelung und lokale Überwärmung

In einer Heizungsanlage sind Regelorgane (zentrale und dezentrale) vorhanden, die dafür sorgen, dass Fremdwärme vorrangig vor der zu bezahlenden Energie genutzt wird. Je besser der Baustandard, desto höher ist jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass – zumindest räumlich und zeitlich eingeschränkt betrachtet – die vorhandene Anlagentechnik nicht in der Lage ist, genau die gewünschte Wärmemenge zu liefern und damit den aktuellen Wärmebedarf exakt einzuhalten.

Grundvoraussetzung vieler Unzulänglichkeiten einer nicht optimierten Anlage ist einerseits ein geringer Wärmebedarf des Gebäudes (geringe Transmissions- und Lüftungswärmeverluste) gepaart mit andererseits einem großen Angebot an Fremdwärme (innere und solare Wärmegewinne).

Folgende Phänomene stören die ideale Energiebilanz, bei der jeder Gewinn zur rechten Zeit und am rechten Ort und in passender Menge auftritt:

- die Anlage ist nicht hydraulisch abgeglichen; insbesondere die dezentralen Regelorgane sind nicht oder nicht optimal in der Lage auf Fremdwärme zu reagieren, weil sie zu hohe Anlagendrücke und/oder Volumenströme (falsch eingestellte Pumpe) oder zu hohe Vorlauftemperaturen (falsch eingestellte Vorlauftemperaturregelung) ausgleichen müssen
- die gewählten Raumregler sind unpassend dimensioniert und haben dann eine schlechte Regelgenauigkeit
- das Heizungssystem ist träge und reagiert zwar prinzipiell korrekt, jedoch mir großen zeitlichen Verzögerungen; dies tritt bei massereichen Gussradiatoren, aber auch bei estrichverlegten Flächenheizungen auf
- das Gebäude hat eine geringe Speichermasse (alle Raumbegrenzungsflächen und das Inventar, außer die Heizfläche), so dass die Überwärmungseffekte schneller auftreten als die Heizflächenregler (Thermostatventile) dies ausregeln können
- die Anlage weist größere Mengen Rohrleitungen auf, die nicht regelbar und im schlechtesten Fall auch ungedämmt sind (Steigestränge zu anderen Etagen, Anschlussleitungen von Heizflächen anderer Räume im Estrich, Etagenringleitungen), was das Angebot an Fremdwärme aus der Anlagentechnik erhöht.

Die Effekte bedingen sich teils gegenseitig, daher werden sie im Rahmen dieses Gutachtens gemeinschaftlich bewertet. Grundlage sind die Erkenntnisse eigener Studien zum Thema, insbesondere das DBU-Projekt „Optimus“ [23]. Es zeigt sich, dass vor allem im unsanierten Altbau das Überwärmungsproblem deutlich geringer ausfällt, da ohnehin dauerhaft viel Wärme benötigt wird. Die Regler und Stellglieder arbeiten entsprechend nicht an der unteren Grenze ihres möglichen Einsatzbereiches.

Im Bestand sind die energetischen Unterschiede zwischen optimierten und nicht optimierten Gebäuden geringer. Sobald der Baukörper jedoch energetisch verbessert ist, machen sich die trägen Heizflächen und ungedämmten Rohrleitungen deutlich bemerkbar. Jedoch ist festzuhalten, dass ein idealer Wert nicht erreicht werden kann. auch unter besten Bedingungen gibt es kurzzeitige lokale Überwärmung, die dann abgelüftet werden muss.

Hydraulischer Abgleich

Unmittelbar verbunden mit der Überwärmungsproblematik ist der hydraulische Abgleich. Einfach umschrieben: die Begrenzung des maximal möglichen Wärmeangebotes an den Heizflächen (Volumenstrombegrenzung, Druckverlustabgleich). So erhalten die Raumregler die Chance, auf Fremdwärme bestimmungsgemäß zu reagieren.

In dem DBU-Projekt „Optimus“ [23], welches u. a. von den Gutachtern bearbeitet wurde, konnte in einer Stichprobe von mehr als 30 Gebäuden der Vorteil der Optimierung (hydraulischer Abgleich plus Systemtemperaturoptimierung plus Pumpenoptimierung) messtechnisch nachgewiesen werden. Die Optimierung führte zu einer Verringerung der Heizenergie um etwa 8 kWh/(m²a) bzw. 6 % des Ausgangswertes. Bei den Pumpen wurden 13 % Elektroenergie bzw. 0,3 kWh/(m²a) eingespart.

Das Projekt „Optimus“ wurde in leicht modifizierter Form und mit anderen Projektpartnern fortgeführt oder in die Förderung übernommen. Die städtische Wohnbaugesellschaft in Bremen bestätigte die Ergebnisse mit Einsparungen an Endenergie von 7 bis 22 kWh/(m²a) in Mehrfamilienhäusern verschiedener Baujahre [246].

Eine Adaption in den Geschosswohnungsbau Berlins und Brandenburgs lieferte das Projekt „Alfa“. Rehberg fasst 2016 die energetischen und monetären Erkenntnisse wie folgt zusammen [245]:

> *„In den 21 optimierten Gebäuden lag der Energieverbrauch für Heizung- und Warmwasserbereitung vor Umsetzung der Maßnahmen zwischen 86 bis 228 kWh/m² und Jahr. Nach Durchführung der Optimierungsmaßnahmen lag der Energieverbrauch zwischen 74 bis 190 kWh/m² und Jahr. In acht Gebäuden wurde eine Energieeinsparung von mehr als elf Prozent bereits nach dem ersten vollen Betriebsjahr nach Optimierung erreicht. In den ersten drei Jahren nach Optimierung der Anlagen in diesen Gebäuden beträgt die Energieeinsparung im Mittel rund 17 Prozent. Die Gesamtkosten der Optimierungsmaßnahmen betrugen durchschnittlich 6,47 €/m²; mit einer Spannweite zwischen 2,03 €/m² und 13,18 €/m² […] Die Größe dieser Gebäude liegt zwischen 12 und 96 Wohnungen. Die Gebäude entstammen den Baujahren 1895 bis 2000, sie spiegeln das gesamte Spektrum der Gebäude im Portfolio der Mitgliedsunternehmen des BBU wider.“*

Mehrere 1000 Förderfälle hat proKlima in Hannover ab 2006 genehmigt [247]. Die evangelische Landekirche Baden hat die Ideen erfolgreich auf ihren Gebäudebestand adaptiert [248]. Eine weitere Zusammenstellung von Primärliteratur sowie den ermittelten energetischen und wirtschaftlichen Vorteilen ist der Studie von Mailach et al. [249] aus dem Jahr 2019 zu entnehmen.

Eine Übersicht rechtlicher Rahmendaten, anerkannter Regeln der Technik und der Rechtsprechung zum Thema liefert Drusche [250].

Hinsichtlich der Markdurchdringung der Dienstleistung „Optimierung“ fassen Jahnke et al. einen „Feldtest zur Sanierungswirkung“ wie folgt zusammen [53]:

> *„Für das gesamte Feldtestsample ergab sich, dass rund ein Drittel der teilnehmenden Haushalte die Heizanlage hydraulisch abgleichen ließ. Bei den Haushalten, die ihre Heizanlage erneuern ließen, waren es immerhin 40 Prozent. Bei den geförderten Maßnahmen waren es knapp 70 Prozent.“*

Systemtemperaturoptimierung und qualitätsgesicherte Wärmeerzeugung

Im Zusammenhang mit dem hydraulischen Abgleich von Heizungsanlagen kann eine passende Vorlauftemperatur gefunden und eingestellt werden. Dies ist ohne negative Konsequenzen erst möglich, wenn die Volumenströme bestimmungsgemäß den Verbrauchern zugeordnet sind (nur so lassen sich unterversorgte Gebäude- oder Wohnungsteile vermeiden).

Die passende Vorlauftemperatur führt zu einer sich ergebenden Rücklauftemperatur im System. Für viele Erzeuger sind beide Temperaturen (zusammengefasst als „Systemtemperatur“ bezeichnet) effizienzbeeinflussend.

Ein Teil der Vorteile eines qualitätsgesicherten Erzeugers (vgl. die Annahmen zu den Effizienzen in Anhang 3.3) lässt sich darauf zurückführen. Ansonsten hängt eine qualitätsgesicherte Erzeugung auch davon ab, ob ein Erzeuger passend dimensioniert ist (Planung), die Fähigkeit hat entsprechend herunterzuregeln (Produkteigenschaft) und optimal in das System eingebunden ist (Hydraulik, Dämmung von Anschlüssen usw.).

Ob die prognostizierte Effizienz eintritt, kann einfach mit Zählern festgestellt werden. Eine neuere Veröffentlichung der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz stellt dazu fest [205]:

> *„Sämtliche Wärmepumpensysteme, die künftig zur Beheizung von Gebäuden installiert werden, müssen mit einem Wärmemengenzähler ausgestattet sein. Nur dadurch können frühzeitig nicht genutzte Effizienzpotentiale erkannt und behoben werden. Dies sollte im Übrigen für sämtliche Wärmeerzeuger per Verordnung vorgeschrieben werden. Das relativ einfache Monitoring zur Qualitätssicherung dient sowohl den Verbraucherinteressen als auch der nachhaltigen Erreichung von Energieeffizienz- und Klimaschutzzielen.“*

Solarthermie, Abwärmenutzung und regenerative Energien

Die Nutzung regenerativer Energien ist häufig mit einer deutlich zunehmenden Komplexität an hydraulischen Schaltungen und deren Hydraulik und Regelung verbunden. Dies betrifft die Solarthermie, Wärmepumpenanlagen mit Pufferspeichern und Kollektorkreisen, Abwärmeeinspeisung (aus Prozessen oder KWK) in konventionelle Versorgungsstrukturen. Solche Strukturen sind fehleranfällig.

Jahnke et al. benennen entsprechende Probleme aus Praxisprojekten [53]:

„Weiterhin konnte beim Einsatz von Kombispeichern mehrmals die nicht exakte Trennung des Wärmepumpenbetriebs in Trinkwarmwasser- und Heizmodus festgestellt werden. Falsch platzierte Temperatursensoren und schlecht gewählte Regelparameter führten dazu, dass die Wärmepumpe für einen Teil des Heizwärmebedarfs Energie auf dem Temperaturniveau des Trinkwarmwassers (in den Neubauten!) bereitgestellt hat. Defekte Ruckschlagklappen oder undichte 3-Wege-Ventile führten in mehreren Fällen zu Fehlbeladungen bzw. Speicherentladungen. Diese Effekte wurden durch unnötigen Betrieb von Pumpen noch verstärkt. Allgemein konnte festgestellt werden, dass einfache hydraulische Systeme robuster und daher weniger fehleranfällig sind.

Eigene Projekte zur Solarthermie zeigen vor allem regelungstechnische und hydraulische Optimierungsbedarfe an der Peripherie [131]. So sind ungünstige Schaltprogramme, Speicherbe- und -entladungslogiken, Pumpenansteuerungen usw. festzustellen. Häufig besteht die Qualitätssicherung aber auch erst einmal darin, bei neuen Anlagen (unter 5 Betriebsjahre) eine Istzustands-Dokumentation anzufertigen, auf die bei der Inbetriebnahme verzichtet wurde. Auch ein Projekt mit Abwärmenutzung aus einem Biogas-BHKW benötigte intensives Monitoring (incl. Planung und Ausführung) als Qualitätssicherung, bis ein optimaler Betrieb eintrat [26].

Bewertung der anlagentechnischen Qualitätssicherung – Peripherie

Den Einfluss der Qualitätssicherung auf die Erzeugung beschreiben die Kennwerte in Anhang 3.3 (Haupterzeuger) und 3.5 (Zusatzerzeuger). Die Effekte des hydraulischen Abgleichs und der Temperaturoptimierung im Zusammenspiel mit der Raumregelung und Vermeidung lokaler Überwärmung werden separat bewertet.

Es wird eine Differenzenergiemenge definiert (analog der Dissertation der Gutachterin [91]), die über den ohnehin notwendigen Heizwärmebedarf zu verzeichnen ist. Sie fasst alle „nicht optimalen" Einflüsse zusammen. Es gilt: der Effekt ist stärker im effizienten Gebäude, aber der Einfluss kann nicht null sein, da es keine ideale Regelung gibt.

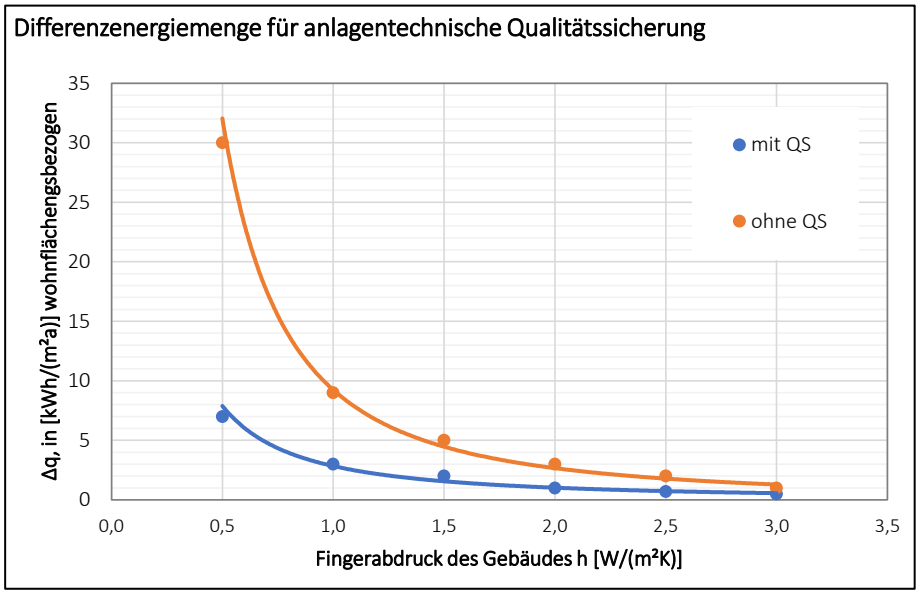


Abbildung 139 Differenzenergiemenge für anlagentechnische Qualitätssicherung [eigene Darstellung]

Der in Abbildung 139 dargestellte Zusammenhang wird in der Berechnung durch folgende Näherungsfunktionen, ausgehend vom Baustandard bzw. „Fingerabdruck des Gebäudes" angenähert:

- mit Qualitätssicherung: $2{,}8\frac{kWh}{m^2a}\cdot\left(h[\frac{W}{m^2K}]\right)^{-1{,}5}$
- ohne Qualitätssicherung: $9{,}2\frac{kWh}{m^2a}\cdot\left(h[\frac{W}{m^2K}]\right)^{-1{,}8}$

Für das durchschnittliche Mehrfamilienhaus im Bestand mit h = 1,6 W/(m²K) liegt der Wert bei 4 kWh/(m²a) im nicht qualitätsgesicherten Zustand und kann auf 1 kWh/(m²a) mit Qualitätssicherung vermindert werden. Erst nach der Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes zeigen sich deutliche Differenzen. Bei einer Ertüchtigung des Baukörpers auf etwa heutiges Neubauniveau und einem Wert von h = 0,8 W/(m²K) liegen die Werte bei 4 bzw. 14 kWh/(m²a). Der Vorteil der Qualitätssicherung ergibt sich zu 10 kWh/(m²a).

Die Zahlen basieren auf den vorher genannten Studien zur Optimierung [23] [246] [245] [247] [248].

Pumpen

Der Einbau von Hocheffizienzpumpen wird in diesem Gutachten nicht thematisiert. Er ist nachweislich wirtschaftlich, wie schon eigene Untersuchungen aus dem Jahr 2010 zeigen [247]. Nachdem die Ökodesign-Richtlinie in einem zweistufigen Verfahren (2015, 2020) Hocheffizienzpumpen praktisch zum allgemeinen Standard erhoben hat, ist es nur eine Frage der Zeit, bis eine fast vollständige Marktdurchdringung stattgefunden hat. Es bedarf keiner Förderung.

Da die Pumpenlebensdauer relativ kurz ausfällt, geht der Austausch schneller voran als bei allen anderen stromverbrauchenden Geräten, die der Gebäudeenergieversorgung zuzuordnen sind. Lediglich im Wärmeerzeuger (insbesondere Thermen) sind integrierte Pumpen problematisch. Hier ist die Lebensdauer des Kessels anzusetzen. Da dieser die Zulassung verlieren würde (CE-Zeichen), wenn eine andere Pumpe eingebaut wird, ist von einem 1:1 Tausch auszugehen. Erst die nächste Erzeugergeneration weist dann Hocheffizienzpumpen auf.

Prognos ermittelte 2007 im Auftrag des BMWi [251] ein wirtschaftliches Einsparpotential von 1 bis 3 % für den verminderten Stromverbrauch durch Effizienzpumpen (zusammen mit hydraulischem Abgleich) – aus heutiger Sicht eine deutlich zu klein geschätzte Zahl.

3.6.3 Energieeffizienz und Kosten

Tabelle 113 und Tabelle 114 zeigen die kombinierte Berechnung der Qualitätssicherung für den Baukörper, die Peripherie (Übergabe, Verteilung, Speicherung) sowie die Erzeugung für das EZFH und das MFH. Aus der vielfältigen Kombinatorik wurden neben den mittleren Gebäuden und Anlagentechniken auch jeweils drei Varianten berechnet. Hinsichtlich des Baukörpers: eine schlechte Ausführung, eine gute (etwa heutiger Neubau) und eine optimale. Bei der Anlagentechnik: eine konventionelle, eine Version mit Solareinbindung sowie eine Wärmepumpenlösung.

Da die Ergebnisse der EZFH und der MFH grundsätzlich ähnlich sind, erfolgt die Erläuterung jeweils an dem einen oder dem anderen Gebäudemodell. So werden Dopplungen vermieden.

Energieeffizienz und Kosten der Qualitätssicherung im EZFH

Der Einfluss der **Qualitätssicherung des Baukörpers** steigt, je besser der Standard wird. Während das dichte Bauen über alle Klassen hinweg eine kontante Verbesserung hervorruft, nehmen die Wärmebrückeneinflüsse bei großer Dämmung stark zu bzw. die Auswirkungen der Optimierung sind sehr viel relevanter.

Für das „gute“ Gebäude führt eine Berücksichtigung der Wärmebrückenoptimierung und eine Herstellung der Dichtheit bei der Modernisierung zu einem etwa 18 % geringeren Heizwärmebedarf. Im Altbau beträgt der Einfluss nur 4 %. Im Segment der hocheffizienten Gebäude läge er bei 30 % - jedoch findet hier in der Praxis bereits eine Qualitätssicherung statt. Kritisch ist die übliche Sanierung auf „gutes“ Niveau, bei der eine qualitätsgesicherte Planung und Ausführung nach Ansicht der Gutachter noch nicht der Standard ist.

Die **Qualitätssicherung an der Peripherie** (gedämmte Rohrleitungen, auch im beheizten Bereich, hydraulischer Abgleich, Systemtemperaturoptimierung) ist ebenfalls dann sehr relevant, wenn nennenswerter Wärmeschutz festzustellen ist. Während der Einfluss im mittleren Gebäude bei 18 % liegt, nimmt er bis zum „besten“ Gebäude stark zu (32 % geringere Verluste).

(Zu der Variante mit Solarthermie ist anzumerken: die Werte sind sehr viel höher, weil die qualitätsgesicherte Solarthermie der „Peripherie“ zugeschlagen wurde.)

Für die **Erzeugereffizienz des Haupterzeugers** wird der Nutzungsgrad bzw. die Arbeitszahl als Messlatte herangezogen. Die mittlere Anlagentechnik enthält überwiegend Gaskessel und Fernwärme. In dem „besten“ Gebäude ist eine Außenluftwärmepumpe mit elektrischer Nachheizung angenommen (dargestellt ist die kombinierte Arbeitszahl).

Die Effizienzen werden besser, wenn eine Temperaturoptimierung stattgefunden hat, Erzeuger passend bemessen werden. Das zeigt sich an der Wärmepumpe am deutlichsten. Anzumerken ist, dass für die Kessel keine temperaturabhängige Effizienz berechnet wird, sondern die Nutzungsgrade fix vorgegeben werden, um das Rechenmodell nicht unnötig kompliziert werden zu lassen.

			EZFH	EZFH	EZFH	EZFH
Baustandard			Ø	schlecht	gut	best
Anlagentechnik			Ø	Ölbrenn-wertkessel	Ölbrenn-wertkessel + Solar	Außenluft-wärme-pumpe
Maßnahmenbeschreibung						
bauliche und anlagentechnische Qualitätssicherung						
Baukörper						
Transmissionswärme-verlust flächenbezo-gen H_T'	vorher	W/(m²K)	0,69	1,03	0,39	0,25
	nachher	W/(m²K)	0,67	1,02	0,36	0,22
Baustandard („Fin-gerabdruck des Ge-bäudes“) h	vorher	W/(m²K)	2,15	3,02	1,36	0,99
	nachher	W/(m²K)	2,01	2,91	1,20	0,82
Heizwärmebedarf	vorher	kWh/(m²a)	125	188	71	44
	nachher	kWh/(m²a)	115	180	58	31
		%	**-8 %**	**-4 %**	**-18 %**	**-30 %**
Peripherie						
Einfluss der Qualitäts-sicherung Δq	vorher	kWh/(m²a)	2,3	1,3	5,3	9,3
	nachher	kWh/(m²a)	1,0	0,6	2,1	3,8
		%	-57 %	-54 %	-60 %	-59 %
Verluste Netz, Spei-cher und Δq (und Ge-winn der Solarther-mie) insgesamt	vorher	kWh/(m²a)	22	20	12	22
	nachher	kWh/(m²a)	18	17	5	15
		%	**-18 %**	**-15 %**	**-58 %**	**-32 %**
Wärmeerzeugung						
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,83	0,88	0,88	2,43
	nachher	-	0,88	0,93	0,93	2,73
		%	**6 %**	**6 %**	**6 %**	**12 %**
Gesamtergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	190	248	106	31
	nachher	kWh/(m²a)	163	224	80	20
Emissionen, Wärme	vorher	kg/(m²a)	44,6	72,7	30,1	14,0
	nachher	kg/(m²a)	38,4	65,5	23,5	9,1
		%	**-14 %**	**-10 %**	**-22 %**	**-35 %**

Tabelle 113 Auswertung Qualitätssicherung im EZFH [eigene Darstellung]

Energieeffizienz und Kosten der Qualitätssicherung im MFH

Für die Gesamtergebnisse der „guten“ und „besten“ Standards (welche künftig zu erreichen sind) ergibt sich: die Endenergie und damit auch die Emissionen können nach Ansicht der Gutachter mit einer umfassenden Qualitätssicherung um mehr als ¼ minimiert werden.

Die Endenergie für das „gute“ MFH mit Kessel und Solarthermie könnte – unter Ausschöpfung aller Maßnahmen – von 96 kWh/(m²a) auf 72 kWh/(m²a) verbessert werden. Die heute noch nicht oder nur teilweise vorhandene Qualitätssicherung dürfte somit auch einen Teil der Diskrepanzen zwischen Normbedarf und realem Verbrauch erklären, vgl. Anhang 5.2.

So würden die Gutachter aus eigener Projekterfahrung mit Sanierungen auf das genannte „gute“ Niveau einschätzen, dass durchaus in der Mehrzahl der Fälle eine Beschäftigung der Projektbeteiligten mit dem Thema Wärmebrücken stattfindet, in einer immer noch großen Zahl von Gebäuden die Luftdichtheit erhöht wird (wenn auch in der Sanierung nur selten gemessen), aber in einer Minderzahl eine umfassende Optimierung der Anlage (mit allen genannten Aspekten) stattfindet. So ist der real erreichte Verbrauch dann vielleicht nicht der allerschlechteste in der genannten Bandbreite, liegt aber eher im Bereich von 90 kWh/(m²a) als bei 75 kWh/(m²a).

			MFH	MFH	MFH	MFH
Baustandard			Ø	schlecht	gut	best
Anlagentechnik			Ø	Ölbrenn-wertkessel	Ölbrenn-wertkessel + Solar	Außenluft-wärme-pumpe
Maßnahmenbeschreibung						
bauliche und anlagentechnische Qualitätssicherung						
Baukörper						
Transmissionswärme-verlust flächenbezo-gen H_T'	vorher	W/(m²K)	0,76	1,10	0,45	0,28
	nachher	W/(m²K)	0,74	1,09	0,42	0,25
Baustandard („Fin-gerabdruck des Ge-bäudes“) h	vorher	W/(m²K)	1,73	2,33	1,18	0,88
	nachher	W/(m²K)	1,61	2,23	1,04	0,74
Heizwärmebedarf	vorher	kWh/(m²a)	93	134	47	34
	nachher	kWh/(m²a)	84	126	36	23
		%	**-10 %**	**-6 %**	**-23 %**	**-32 %**
Peripherie						
Einfluss der Qualitäts-sicherung Δq	vorher	kWh/(m²a)	3,4	2,0	6,9	11,5
	nachher	kWh/(m²a)	1,4	0,8	2,6	4,4
		%	-59 %	-60 %	-62 %	-62 %
Verluste Netz, Speicher und Δq insgesamt	vorher	kWh/(m²a)	24	32	23	18
	nachher	kWh/(m²a)	21	30	16	10
		%	**-13 %**	**-6 %**	**-30 %**	**-44 %**
Wärmeerzeugung						
Nutzungsgrad bzw. Arbeitszahl	vorher	-	0,84	0,88	0,93	2,07
	nachher	-	0,89	0,93	0,88	1,95
		%	**6 %**	**6 %**	**6 %**	**6 %**
Gesamtergebnisse						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	156	205	96	32
	nachher	kWh/(m²a)	134	184	72	24
Emissionen, Wärme	vorher	kg/(m²a)	37,3	59,9	28,1	14,4
	nachher	kg/(m²a)	32,2	53,6	20,9	10,7
		%	**-14 %**	**-11 %**	**-26 %**	**-26 %**

Tabelle 114 Auswertung Qualitätssicherung im MFH [eigene Darstellung]

Die von Prognos 2007 im Auftrag des BMWi ermittelten Einsparpotentiale von 2 bis 4 % der Brennstoffe durch die Optimierung sind nach Ansicht der Gutachter in jedem Fall zu klein [251].

Für den Gesamtbestand wird aus heutiger Sicht davon ausgegangen – dass im Schnitt – ein Gebäude mit Qualitätssicherung zu 14 % weniger Emissionen führt als eines ohne. Ausgehend von der Eingangsfestlegung, dass bereits nur etwa 15 % der Gebäude qualitätsgesichert sind, bleibt demnach ein großes Potential, was es zu heben gilt.

Wirtschaftliche Bewertung

Ausgehend vom „guten“ Baustandard sowie der Versorgung mit Kessel und Solarthermie und einer erzielbaren Einsparung mit allen Maßnahmen werden die maximal zulässigen Investitionskosten geschätzt.

Für das MFH gilt:

- Endenergieeinsparung: 24 kWh/(m²a)
- Energiekosteneinsparung: 1,44 €/(m²a)
- Investitionskosten: 36 €/(m²a) bei einer „Lebensdauer“ von 25 Jahren

In dem Mehrfamilienhaus mit seinen 470 m² Wohnfläche ergibt sich eine Investitionskostensumme von knapp 17.000 € zum Erreichen der Grenzwirtschaftlichkeit. Die Gutachter gehen davon aus, dass von dieser Summe die Qualitätssicherung finanzierbar ist.

Eine gesonderte Vergütung (z. B. in Form einer Förderung) der Qualitätssicherung erscheint in Anbetracht der erreichbaren Einsparungen als nicht notwendig. Besser wäre eine Kopplung aller geförderten Maßnahmen an eine obligatorische Qualitätssicherung und dann etwas höhere Fördersätze für die eigentliche Maßnahme. Daher haben die Gutachter alle Berechnungen mit „auskömmlichen" Investitionskosten versehen, sind aber grundsätzlich von einer Umsetzung ausgegangen.

Für das EZFH sehen die o.g. Zahlen fast identisch aus, so dass auf eine erneute Berechnung verzichtet wird.

Fazit zur baulichen Qualitätssicherung

Da der Einfluss mangelnder Qualität vor allem bei einer Verbesserung des Standards auftritt, sind die Optimierungsbemühungen auf den Sanierungsfall zu fokussieren. Nur für Gebäude, die eine Modernisierung erst vor kurzem beendet haben und entsprechend in den nächsten Jahren keine weiteren Maßnahmen erwarten lassen, ist eine nachträgliche Qualitätssicherung sinnvoll.

Eine nachträgliche Qualitätssicherung an Wärmebrücken und Luftdichtheit ist kaum umsetzbar. Selbst wenn Mängel bei der Umsetzung festgestellt werden, lassen sie sich aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten und aus der Motivation einer Energieeinsparung heraus kaum heben. Anders sieht es aus, wenn es um die Behebung von Schäden geht.

Die bauliche Qualitätssicherung muss von Anfang an zusammen mit der Umsetzung der Maßnahmen erfolgen.

Auf eine separate Kostenschätzung wird verzichtet. Da alle Kosten der baulichen Maßnahmen bereits mit der Kostengruppe 700 zu 30 % beaufschlagt wurden, sind nach Ansicht der Gutachter damit sowohl die Planung als auch das Monitoring (einmalige Dichtheitsmessung, Thermographie) abgegolten.

Fazit zur Qualitätssicherung an der Peripherie

Ein Teil der Maßnahmen lässt sich leicht und zu jedem Zeitpunkt durchführen: die Optimierung der Systemtemperatur sowie der hydraulische Abgleich. Auch Speicher lassen sich nachdämmen. Der andere Teil – insbesondere schwer regelbare Heizflächen (Estrichfußbodenheizung, Stahlradiatoren) kann erst beim nächsten Sanierungszyklus angegangen werden. Die Möglichkeit der Nachdämmung von Rohrleitungen hängt vom Ort der Installation ab: frei zugänglich oder in der Konstruktion.

Ein hydraulischer Abgleich mit Temperaturoptimierung wird sinnvoll dann durchgeführt, wenn der bauliche Wärmeschutz auf mindestens die nächsten 10 Jahre hin keine weitere Änderung mehr erfahren wird; also nach der absehbar letzten baulichen Verbesserung (einschließlich Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung). Darüber hinaus ist er dann vorteilhat, wenn das Gebäude mindestens den Standard nach Wärmeschutzverordnung 1995 erreicht hat (keine Optimierung im unsanierten Bestand).

Da Wärmepumpen sehr temperatursensibel sind, stellt das Gebäude mit Wärmepumpe eine Ausnahme dar. Hier erscheint den Gutachtern unabhängig vom derzeitigen Dämmzustand eine Optimierung als sinnvoll. Außerdem ist bei jeder nennenswerten baulichen Verbesserung (einschließlich Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) die Optimierung zu wiederholen, weil die Systemtemperatur voraussichtlich immer weiter gesenkt werden kann.

Die Kosten dieser Maßnahme sind in Anhang 5.8.2 mit aufgeführt. Praxiserfahrungen zeigen, dass unter Beachtung der o.g. Hinweise eine Wirtschaftlichkeit eintritt.

Fazit zur Qualitätssicherung der Wärmeerzeuger

Da alle Wärmeerzeuger großes Potential einer Effizienzverbesserung aufweisen, aber auf alle vorgelagerten Störgrößen (anderes Nutzerverhalten, Änderungen am Baukörper, Änderungen an der Peripherie) reagieren, ist hier die Qualitätssicherung eher als Daueraufgabe zu verstehen.

Die passende Dimensionierung kann nur im Rahmen der Modernisierung erfolgen, nicht nachträglich. Jedoch Anpassungen der Regelparameter und Hydraulik sind einige Zeit nach Inbetriebnahme sinnvoll.

Eine nachträgliche Qualitätssicherung als Alleinmaßnahme ist sinnvoll, wenn ein Monitoring stattgefunden hat, anhand dem das Problem lokalisiert und erkannt werden. Eine gute Basis ist eine (automatisierte) Energieanalyse, vgl. Anhang 5.3.3 bzw. 5.3.4.

Es bietet sich an, die Umsetzung eines Monitorings zu fördern (z. B. für 2 Jahre) und einen Teil der Fördermittel für die anlagentechnische Verbesserung an dieses Monitoring zu knüpfen. Besser noch wäre eine erfolgsabhängige Vergütung; jedoch ist den Gutachtern die Schwierigkeit der Umsetzung solcher Maßnahmen bewusst.

3.7 Nicht detailliert berücksichtige Maßnahmen und Technologien

In diesem Gutachten wird nur verkürzt auf nachfolgende spezifische Themen bzw. Komponentensysteme eingegangen – in der programmierten Berechnung zu diesem Gutachten werden sie nicht berücksichtigt. Dennoch werden sie – ggf. mit einem Hinweis auf ergänzende Literatur – nachfolgend erwähnt.

Digitalisierung

Seit Mitte der 1980-Jahre wird den Themen der Digitalisierung und Automatisierung eine hohe Relevanz hinsichtlich möglicher Einsparpotenziale zugeordnet. Dies gilt v. a. im Bereich der Heizungstechnik und hier im speziellen beim Thema der elektronischen Einzelraumregelung.

Obwohl entsprechende „elektronische Thermostate“ seit Mitte der 1980er-Jahre und ca. fünf Jahre später auch komplette Einzelraumregelsysteme für Wohn- und Nichtwohngebäude am Markt angeboten werden, haben sich entsprechende Systeme gegenüber einfachen Thermostatventilen ohne Hilfsenergieantrieb nicht wesentlich verbreitet.

Auch die seit ca. zehn bis fünfzehn Jahren von verschiedenen Herstellern angebotenen „Smart-Home-Systeme und -Komponenten“ werden zwar von vielen als Systeme der Zukunft gesehen [137], ihr Einsparpotenzial hinsichtlich des Heizwärmeverbrauchs sinkt jedoch mit zunehmender Qualität der Gebäudehülle und aktivem sparsamen Nutzerverhalten. (Siehe auch Anhang 3.4.3)

In diesem Gutachten wird deshalb nicht auf zusätzliche Einspareffekte durch Digitalisierung eingegangen bzw. Effekte werden durch den Einfluss der Qualitätssicherung (siehe Anhang 3.6.2) quantitativ berücksichtigt.

Wohngebäudekühlung

Etwa 2 % der Fläche im deutschen Wohnungsbau sind mit einer Anlage zur Raumkühlung ausgestattet. Zudem werden die Anlagen in einem zeitlich nur sehr geringen Umfang betrieben, so dass sich sehr geringe Endenergieaufwendungen von 1 bis 5 kWh/(m²a) für die Kühlung ergeben. Dagegen ist im Nichtwohnbau die flächenmäßige Durchdringung einerseits, als auch die Nutzungsintensität andererseits ungleich höher [78]:

- Handel: 66 % gekühlt, Endenergie 33 kWh/(m²a)
- Büro, Verwaltung: 51 % gekühlt, Endenergie 20 kWh/(m²a)
- Hotel, Restaurant: 30 % gekühlt, Endenergie 17 kWh/(m²a)
- Krankenhäuser: 20 % gekühlt, Endenergie 19 kWh/(m²a)
- Bildungsbauten: 14 % gekühlt, Endenergie 11 kWh/(m²a)

Auf die Bilanzierung der Kühlung wird in diesem Gutachten verzichtet. Für künftige Aspekte besser gedämmter Gebäude wird das Thema immer relevanter. Zur Minimierung der Kühlenergie im Wohnungsbau sind die bereits seit Jahren mit der EnEV geltenden Anforderungen an den Nachweis zum „sommerlicher Wärmeschutz“ zu beachten und konsequent (sowie qualitätsgesichert) zu planen und auszuführen.

Dennoch ist mit dem Klimawandel einerseits und dem besseren Wärmeschutz andererseits eine Erhöhung von Energiemengen für Kühlung absehbar. Sie fallen vor allem an Tagen an, an denen hohe solare Gewinne zu verzeichnen sind. Sofern der Ausbau dezentraler Photovoltaik entsprechend voranschreitet kann eine Kühlung im Sommer mit der gebäudenah produzierten Energiemenge erfolgen. Beispielsweise könnten die heute noch abgeregelten Energiemengen zur Kühlung verwendet werden (in Kombination mit Wärmepumpen oder separaten Kühlsystemen).

Gaswärmepumpen

Nach der Gemeinschaftsstudie Dynamis von Wagner et al. [137] wird der Einsatz von Gaswärmepumpen, also Gaskompressionswärmepumpen, Gasadsorptionswärmepumpen und Gasabsorptionswärmepumpen sowohl für das Jahr 2035 als auch für 2050 mit 4000 Stück als vernachlässigbar gering eingestuft. Die Gutachter schließen sich dieser Einschätzung an.

Abwasserwärmenutzung

Hierzu finden sich in der UBA-Veröffentlichung „Klimaneutraler Gebäudebestand" aus dem Jahr 2016 [252] folgende Hinweise:

> *„Die Nutzung der im Abwasser enthaltenen Wärme durch den Einbau von Wärmetauschern in ausreichend großen Kanälen (angeschlossene Einwohnerzahl ≥ 3.000, Trockenwetterabfluss ≥ 15 l/s, Innendurchmesser ≥ DN 800) und bei Bedarf die nachgeschaltete Temperaturerhöhung mittels einer Wärmepumpe ist Stand der Technik und wird in der Schweiz in vielen Projekten angewandt.*
>
> *Nach Wietschel et al. (2010) gibt es in Deutschland ein Potenzial von 340 MW, womit durch die Nutzung von Wärmepumpen (JAZ = 4) ca. 36 PJ_{th}/a für die Heizung und Warmwasserbereitung und ca. 60 PJ_{th}/a bei der Nutzung des Systems zum Kühlen im Sommer bereitgestellt werden können (nach Vogt, Frisch & Pehnt (2010) beträgt das Potenzial bis zu 418 MW).*
>
> *Allerdings wird dieses Potenzial in Deutschland bislang nur in wenigen Pilotprojekten genutzt und es ist auch nicht das gesamte Potenzial unter ökonomischen Gesichtspunkten nutzbar, da der Einbau von Wärmetauschern in Abwasserkanäle teilweise aufwändig und damit kostenintensiv ist. Zusätzliche Wärmenutzungspotenziale bieten auch die Abflüsse von Klärwerken, da dort ein konstanter Wasserstrom zur Verfügung steht und es ökologisch auch vorteilhaft ist, die Temperatur des Abflusses durch Wärmeentnahme zu reduzieren bevor das Wasser in natürliche Gewässer eingeleitet wird.*
> *[…]*
> *Darüber hinaus hat die Erhöhung der JAZ von Wärmepumpen großen Einfluss auf die Nutzbarkeit der Abwasserwärme und die Effizienz des Gesamtsystems. Nach Wietschel et al. (2010) wird erwartet, dass 2050 durch die Nutzung der Abwasserwärme eine Wärmemenge in Höhe von 40-60 PJ_{th}/a wirtschaftlich bereitgestellt werden könnte (JAZ = 8)."*

In diesem Gutachten wird Abwasserwärmenutzung nicht gesondert berücksichtigt. Sie sind hinsichtlich ihrer Effizienz mit Erdreichwärmepumpen vergleichbar, so dass deren Ergebnisse ersatzweise interpretiert werden können.

Eine wirtschaftliche Bewertung der Wärmerückgewinnung aus Duschwasser findet sich in der Veröffentlichung von Krick zu Versorgungskonzepten für das Niedrigenergie- und Passivhaus [138]. Er ermittelt je nach zentraler oder dezentraler Variante äquivalente Energiepreisen von ca. 7 bis 8 Cent/kWh, also Werte nahe der Grenzwirtschaftlichkeit. Insbesondere dieser Kopplung dieser Technik an Varianten dezentraler elektrischer Trinkwassererwärmung sind daher interessant.

Gebäudeautomation

Die Gebäudeautomation umfasst nach DIN 276 einerseits ein übergeordnetes Gebäudemanagementsystem (auch Gebäudeleittechnik GLT) sowie andererseits ein oder mehrere Anlagen-Automationssysteme incl. Schaltschränken (für die zentralen Heizungs-, Lüftung-, Kühlungs-, Klimatisierungsanlagen) sowie die Raumautomationssysteme (für Beleuchtungs-, Sonnenschutz- und Raumklimaregelung). Sie werden insbesondere in Nichtwohngebäuden eingesetzt, während in Wohngebäuden standardmäßig zentrale Vorlauftemperaturregler meist in der Wärmeerzeugerregelung bzw. in der Heizkreisregelung integriert sind.

Die Gutachter sehen auch langfristig – in den betrachteten Zeithorizonten bis 2050 – im Wohnungsbau nur einen untergeordneten Einsatz von GLT. Allerdings müssen auch die Kombinationen von Wärmepumpen/Photovoltaik und ggf. elektrischer Warmwasserbereitung sowie Hybridsysteme aus Kessel und Wärmepumpen abgestimmte Regelungen aufweisen. Nach Praxiserfahrungen in eigenen Projekten ist eine detailliere Qualitätssicherung notwendig; zudem sind Systeme „aus einer Hand" zu bevorzugen. Langfristig sehen die Gutachter den Verzicht von Zirkulation in den EZFH als sinnvoll und zielführend an.

Batteriespeicher

Heutige PV-Anlagen können mit oder ohne elektrische Batteriespeicher in Wohngebäuden installiert werden. Nach [68] (Fraunhofer ISE 2020) ist neben einem verstärkten Ausbau von PV bzw. Windkraft die gleichzeitige Installation von Kurzzeitspeichern erforderlich. Je nach Entwicklungsszenario ergeben sich notwendige Speicherkapazitäten in Deutschland zwischen 50 bis zu 400 GWh_{el}.

In diesem Gutachten mit der dazugehörigen Berechnungstabelle werden Batteriespeicher nicht mitberücksichtigt. Die Gutachter begründen dies zurzeit mit der unklaren ökologischen Bewertung der Ausgangsprodukte für Batteriespeicher. Zudem sind die Betriebserfahrungen noch sehr weit von einer Wirtschaftlichkeit entfernt – eigene Projekterfahrung siehe [234]. Sofern sich das Preisgefüge ändert, wird voraussichtlich die Mobilität vorrangig bedient.
Sofern solche Speicher eingesetzt werden, verbessert sich die Stromselbstnutzung über das berechnete Maß hinaus. In der rechnerischen Programmierung wird davon ausgegangen, dass Überschussstrom in Wärme- oder Trinkwarmwasserspeichern gelagert wird. Für Haushaltsstrom wird ohne Zwischenspeicherung von PV eine geringere Eigenstromnutzung gerechnet, als sie sich mit Batterie erreichen ließe.

Ultramembranfiltertechnologie in Trinkwarmwassernetzen

Durch Ultrafiltrationsmodule werden in Trinkwarmwasserzirkulationsnetzen mikrobiologische Bestandteile, wie z. B. Legionellen und weitere biologische Bestandteile entfernt. Dies Systeme befinden sich derzeit noch in der Erprobungsphase und erlauben eine Temperaturabsenkung im Netz bis unter 50°C.

Da noch keine ausreichenden Erfahrungen mit ausreichender Anzahl von Feldanlagen vorliegen, wird in diesem Gutachten diese Technologie nicht mitberücksichtigt. Die bisherigen Projekterfahrungen der Gutachter [95] zeigen etwas bessere Ergebnisse als die klassische „Vierleiterzirkulation“ – jedoch werden sie in der rechnerischen Abbildung zu diesem Gutachten den konventionellen Systemen gleichgestellt.

Abluftanlage

Die Thematik der Abluftanlagen wird im Rahmen dieses Gutachtens nicht vertieft. Sie werden vor allem aus Gründen des Bautenschutzes (Feuchteschutz, Schimmelprävention) oder zur Entkopplung der Wohnung vom außenraum (Schallschutz, Pollenvermeidung) eingesetzt. Das Monitoring der KfW-Förderung für Effizienzhäuser im Bestand für das Jahr 2017 zeigt, dass in nur etwa 5 % aller Förderfälle nachträglich eine Lüftungsanlage installiert wurde; sie ist zu etwa 60 % eine reine Abluftanlage [15].

In den Typgebäuden des Anhangs 3.1 wurden die Fensterlüftung und die Abluftanlagen zusammengefasst. Der erhöhte Stromverbrauch der Abluftanlagen gegenüber einer Fensterlüftung blieb unberücksichtigt bzw. ist im allgemeinen Haushaltsstromansatz enthalten, was bei der derzeitigen Marktdurchdringung mit Abluftanlagen (siehe Anhang 5.6.4) gerechtfertigt erscheint.

Es ist jedoch damit zu rechnen, dass insbesondere im Geschosswohnungsbau die Marktdurchdringung der Abluftanlagen weiter steigt. Aus Sicht der Gutachter kann die sich ergebende Wärmequelle (Abluft) anstelle von Außenluft zum Betrieb einer Wärmepumpe genutzt werden.

Vereinfachend werden in diesem Gutachten Abluftwärmepumpen zur Trinkwarmwassererwärmung nicht separat betrachtet, sondern als energetisch schlechtere Außenluftwärmepumpen bilanziert.

3.8 Maßnahmenfolgen und -pakete

Aus den Einzelmaßnahmen der Anhang 3.2 bis 3.6 werden Pakete oder Maßnahmenreihenfolgen gebildet. Es stellt sich die Frage, ob es günstiger ist, nacheinander in einer Reihenfolge zu investieren oder ein Paket von Maßnahmen zu bilden.

Dies bedeutet gleichzeitig die Frage, welchen Zustand die zu sanierenden Komponenten im Moment der Entscheidungsnotwendigkeit aufweisen. Abbildung 140 zeigt die Zusammenhänge. Die Zeitachse beginnt mit einer Errichtung des Gebäudes, alle Einzelelemente haben einen Wert, von dem aus abgeschrieben wird, bis das Ende der Nutzungsdauer erreicht ist.

Dann muss das Bauteil verbessert werden. Die Bauteile weisen unterschiedliche Lebenszyklen auf, so dass es in Zukunft nur noch wenige Zeitpunkte gibt, zu denen alle Einzelelemente gleichzeitig wieder saniert werden müssen. Als Bauteil sind hier vereinfacht nur „Baukörper“ und „Anlagentechnik“ exemplarisch zusammengefasst dargestellt.

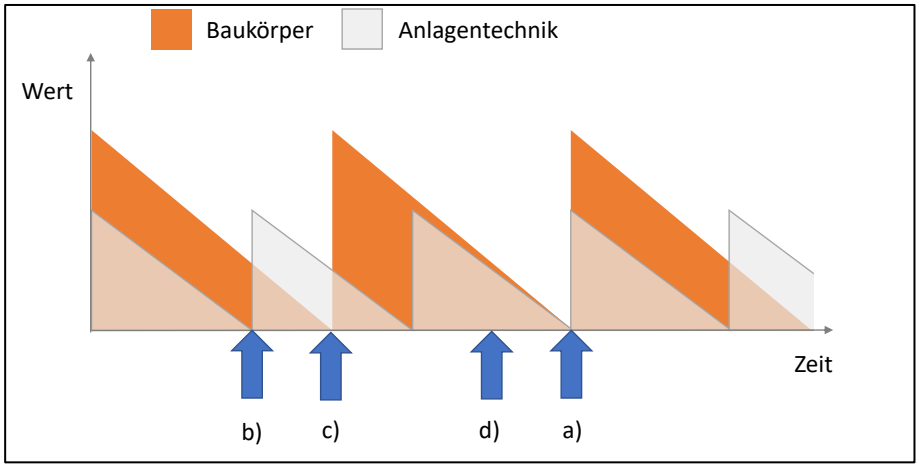


Abbildung 140 Schematische Darstellung von Investitionszeitpunkten und Restwerten der vorhandenen Bauteile [eigene Darstellung]

Abbildung 140 a): Zu einem Zeitpunkt, an dem sowohl die Anlage, als auch der Baukörper den natürlichen Sanierungszyklus erreicht haben, besteht nur eine Option: es ist ein Maßnahmenpaket auszuführen. Es gelten für Baukörper und Anlagentechnik die Mehrkosten, weil ohnehin ein Sanierungsbedarf bestand. Siehe Anhang 3.8.1.

Abbildung 140 b): Betrachtet wird ein Zeitpunkt, in dem die Anlagentechnik zwangläufig erneuert werden muss, weil sie das Lebensende erreicht hat. Für die Anlagentechnik sind in jedem Fall Mehrkosten anzusetzen. Es kann überlegt werden, ob eine Maßnahmenreihenfolge durchgeführt wird: „Anlage → Baukörper“, d. h. mit der Investition in den Baukörper noch gewartet wird, bis er kurze Zeit später ohnehin zu verbessern ist, so dass dann auch für den Baukörper nur die Mehrkosten gelten. Alternativ wird sofort ein Paket ausgeführt. Die baulichen Investitionen werden entsprechend vorgezogen, es gelten für sie die anteiligen Vollkosten. Es ist für diese Betrachtung von Relevanz, wann der zweite Schritt erfolgt. Es wird für alle weiteren Betrachtungen davon ausgegangen, dass die Baukörpermodernisierung ohnehin in 10 Jahren erfolgen muss. Damit ist sie als Teil des Paketes entsprechend 10 Jahre vorgezogen (und es gelten für die ersten 10 Jahre der Betrachtung die Vollkosten, erst danach die Mehrkosten). Bei der Reihenfolge wird gewartet bis zum ohnehin erforderlichen Zeitpunkt und es gelten ab dann Mehrkosten. Siehe Anhang 3.8.2.

Abbildung 140 c): Analog b), jedoch wird nun entweder eine Reihung „Baukörper → Anlage“ durchgeführt oder ein Paket, in dem die Anlagentechnik vorgezogen (dann Vollkosten) erneuert wird. Siehe Anhang 3.8.3.

Abbildung 140 d): Es gibt Zeitpunkte, zu denen grundsätzlich kein Sanierungsbedarf besteht. Jede Investition, die dann erfolgt, ist vorgezogen. Bei dem oben gewählten Zeitpunkt kann überlegt werden, ob die Reihenfolge „Anlage → Baukörper“ durchgeführt wird (Anlage sofort: Vollkosten, Baukörper später zum ohnehin fälligen Zeitpunkt: Mehrkosten) oder die umgekehrte Reihenfolge: „Baukörper → Anlage“ (Baukörper: Vollkosten, Anlage: Mehrkosten). In diesem Fall kann auch ein Paket ausgeführt werden, wobei dann Baukörper und Anlagentechnik vorgezogen werden. Alternativ wartet man und führt beides erst später aus, was dann zum Fall c) führt. Siehe Anhang 3.8.4.

Die vorherigen Optionen werden nachfolgend anhand eines EZFH- und eines MFH-Beispiels exemplarisch erläutert, die unterschiedliche Ausgangszustände aufweisen und auch unterschiedlichen Sanierungsbedarf, siehe Tabelle 115.

→ Information vorab: aufgrund der derzeitigen Energieträgerbepreisung erweisen sich fast alle Systemwechsel (z. B. Wärmepumpe statt Gaskessel) als unwirtschaftlich bzw. benötigen Investitionskostenzuschüsse, die die Investitionskosten überschreiten. Die Ergebnisse für eine alternative Bepreisung – welche die Gutachter für geeigneter halten – finden sich in Anhang 3.9.5.

Bauteil		EZFH		MFH	
		vorher	saniert	vorher	saniert
Gebäude-hülle	Außenwand	„schlecht“	„best“	„schlecht“	„best“
	Dach/Obere Geschossdecke	„mittel“	„best“	„mittel“	-
	Boden/Kellerdecke	„mittel“	-	„schlecht“	„best“
	Fenster	„schlecht“	„best“	„gut“	-
	Lüftung	Fenster	-	Fenster	-
Peripherie	Übergabe	Heizkörper	-	Heizkörper	-
	Trinkwarmwasser	zentral	-	zentral	-
	Zirkulation	nein	-	ja	-
Haupterzeuger		Heizöl-NT-Kessel	Außenluft-Wärmepumpe	Gas-NT-Kessel	Erdreich-Wärmepumpe
Zusatzer-zeuger	Solar	nein	-	nein	-
	Photovoltaik	nein	ja	nein	ja

Tabelle 115 Beschreibung der Maßnahmen für Pakete und Reihenfolgen im EZFH und MFH [eigene Darstellung]

3.8.1 Kompletter Sanierungsbedarf

Abbildung 141 zeigt schematisch die Verbesserungsmaßnahmen in einem Schritt. Da Baukörper und Anlagentechnik das jeweilige Nutzungsende erreicht haben, werden sie saniert. Es gelten die Mehrkosten.

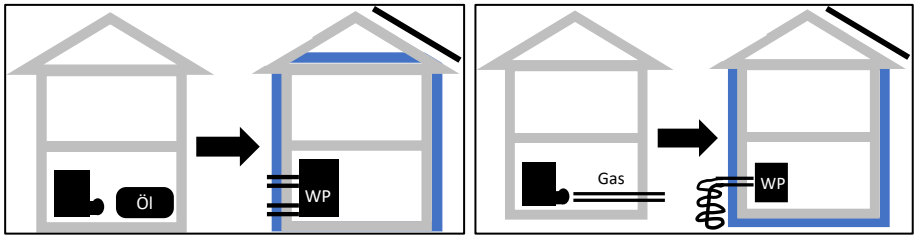


Abbildung 141 Schema – Komplettsanierung des EZFH oder MFH [eigene Darstellung]

Tabelle 116 fasst die Ergebnisse zusammen. Diese dienen vor allem als Referenz für die späteren Fragestellungen (vorgezogener Investitionen).

			EZFH	MFH
Maßnahmenbeschreibung				
Komplettmodernisierung in einem Schritt				
Ergebnisse der Energiebilanz				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	212	167
	nachher	kWh/(m²a)	27	25
Investitionskosten				
Investition	Mehrkosten	T€	47,6	120,1
Ergebnisse der Energiebilanz				
Emissionen Wärme und Strom	vorher	kg/(m²a)	72,7	49,1
	nachher	kg/(m²a)	9,8	14,8
Ergebnisse der Energiebilanz				
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	252	375
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-66	692
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	11
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	43

Tabelle 116 Auswertung Maßnahmenpaket EZFH und MFH [eigene Darstellung]

Die Maßnahme ist für das EZFH ohne weitere Zuschüsse auf die Investitionskosten wirtschaftlich, beim MFH werden 11 % Zuschuss benötigt. Alternativ ergibt sich die Wirtschaftlichkeit auch, wenn die Energiekosten steigen. Eine sehr geringe Emissionsbepreisung würde bereits ausreichen – der angegeben Wert entspräche einem Erdgaspreis von 7 Cent/kWh statt heute 6 Cent/kWh.

Da alle Maßnahmen dann erfolgen, wenn sie fällig sind, ergibt sich eine sehr gute Wirtschaftlichkeit.

3.8.2 Sanierungsbedarf nur an der Anlagentechnik

Da die Anlagentechnik ohnehin saniert werden muss, ergibt sich die Option die Gebäudehülle vorgezogen mitzusanieren. Alternativ wird zuerst ein Hybridsystem mit Wärmepumpe übergangsweise aufgebaut, welches nach der Baukörpermodernisierung als reines Wärmepumpensystem arbeitet.

Es ist für diese Betrachtung von Relevanz, wann der zweite Schritt erfolgt. Es wird für alle weiteren Betrachtungen davon ausgegangen, dass die Baukörpermodernisierung ohnehin in 10 Jahren erfolgen muss. Damit ist sie als Teil des Paketes entsprechend 10 Jahre vorgezogen (und es gelten für die ersten 10 Jahre der Betrachtung die Vollkosten, erst danach die Mehrkosten). Bei der Reihenfolge wird gewartet bis zum ohnehin erforderlichen Zeitpunkt und es gelten ab dann Mehrkosten.

Die Bilanzierung erfolgt weiterhin über 30 Jahre. Es werden gemittelte Kennwerte aus Mehrkosten und Vollkosten gebildet. Auch die Energiemengen und Emissionen werden bei den Reihenfolgen gewichtet angegeben. Informativ werden die Zwischenwerte mit erwähnt.

Beispiel des EZFH

Abbildung 142 zeigt schematisch die Optionen für das EZFH, in Tabelle 117 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

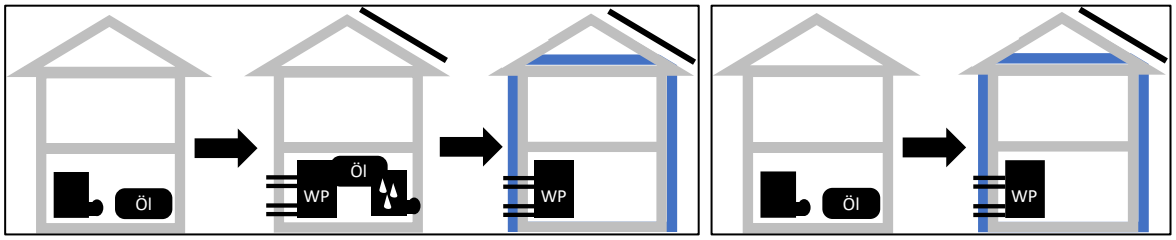


Abbildung 142 Schema – Reihenfolge Anlage → Baukörper oder Maßnahmenpaket für das EZFH [eigene Darstellung]

Die Energiekosten sinken im ersten Schritt auf etwa die Hälfte des früheren Wertes ab. Es wird dabei so viel gespart, dass die Kapitalkosten (nur die Mehrkosten!) refinanziert werden können. Es ist kein Zuschuss notwendig. Der zweite Schritt der Dämmung nach 10 Jahren erhöht die Kapitalkosten weiter und mindert die Energiekosten auf ihren Endwert. Auch hierbei ergibt sich in etwa eine ausgeglichene Kostenbilanz, also keine Förderungsnotwendigkeit. Die Emissionsminderung ist zwar beträchtlich. Allerdings werden in dieser Variante über die 30 Jahre gemittelt doppelt so viele Emissionen ausgestoßen wie beim Paket.

Bei der Paketlösung mit vorzeitiger Verbesserung des Baukörpers ergibt sich insgesamt ebenfalls ein positives Bild, ohne Zuschussnotwendigkeit – bezogen auf den Gesamtzeitraum. Allerdings steigen in den ersten 10 Jahren die Summe aus Kapital- und Energiekosten über den Ausgangswert der alten Energiekosten an. Das ist für den Gebäudebesitzer nicht erstrebenswert (es ergibt sich ein Minus von 630 €/a). Um einen Anreiz zu bieten, das Paket dennoch umzusetzen, müsste hier Förderung gewährt werden. Um das Minus der ersten 10 Jahre auszugleichen, sind dies etwa 20 % der Investitionskosten. Daraus ergibt sich dann ab dem 11. Jahr ein Gewinn für den Bauherrn.

Die äquivalenten CO_2-Preise sind fast identisch. Das bedeutet, dass insgesamt in beiden Varianten ähnlich viel Geld in die Hand genommen muss, um Emissionen zu sparen.

→ Es kann nicht eindeutig einer Variante der Vorzug gegeben werden. Aus Sicht der Emissionsminderung ist es das Paket, jedoch ist eine Bezuschussung von ca. 20 % der Investitionskosten ein vergleichsweise hoher Betrag. Allerdings ist er vergleichbar mit heutigen Werten der KfW-Förderung und es wird die Zwischenlösung - der Aufbau einer Hybridheizung – vermieden. Die Gutachter halten – wenn wirtschaftlich begründbar – die Paketlösung für geeigneter.

			EZFH Reihe	EZFH Paket
Maßnahmenbeschreibung				
			sofort Technik, in 10 a Baukörper	alle Maßnahmen sofort
Ergebnisse der Energiebilanz und Energiekosten				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	212	212
	Jahr 1-10	kWh/(m²a)	113	27
	Jahr 11-30	kWh/(m²a)	27	
Energiekosten	vorher	€/a	2866	2866
	Jahr 1-10	€/a	1509	556
	Jahr 11-30	€/a	556	
Investitions- und Kapitalkosten				
Investition	Mehrkosten, sofort	T€	24,9	16,8
	Vollkosten, sofort	T€	-	65,9
	Mehrkosten, Jahr 11	T€	30,8	-
Kapitalkosten	Jahr 1-10	€/a	1306	2940
	Jahr 11-30	€/a	2234	1811
Ergebnisse der Emissionsbilanz				
Emissionen Wärme und Strom	vorher	kg/(m²a)	72,7	72,7
	Jahr 1-10	kg/(m²a)	37,1	9,8
	Jahr 11-30	kg/(m²a)	9,8	
	nachher Ø	kg/(m²a)	18,9	9,8
Ergebnisse der Energiebilanz				
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	253	246
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-68	-123
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 117 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Anlage → Baukörper oder Paket für das EZFH [eigene Darstellung]

Beispiel des MFH

Abbildung 143 zeigt schematisch die Optionen für das MFH, in Tabelle 118 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

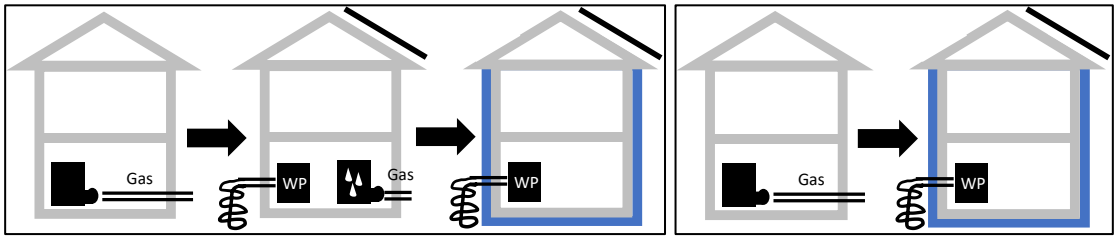


Abbildung 143 Schema – Reihenfolge Anlage → Baukörper oder Maßnahmenpaket für das MFH [eigene Darstellung]

Die Energiekosten sinken bei der Reihenbildung auf etwa 40 % des früheren Wertes ab. Es wird dabei so viel gespart, dass die Kapitalkosten (nur die Mehrkosten!) fast refinanziert werden können. Im Vergleich vor und nach Schritt 1 ist ein Defizit von ca. 170 €/a festzustellen. Dies wäre durch einen Zuschuss von 4 % auf die Investition auszugleichen. Der zweite Schritt erhöht die Kapitalkosten weiter und mindert die Energiekosten auf den Endwert. Dieser Schritt ist für sich betrachtet dann wirtschaftlich. Er führt zu einer Gesamtkostenminderung von etwa 340 €/a und benötigt keine Förderung

Bei der Paketlösung mit vorzeitigem Ersatz des Baukörpers ergibt sich insgesamt ebenfalls ein positives Bild. Die Problemlage ist jedoch identisch zum EZFH: in den ersten 10 Jahren ist die Maßnahme nicht wirtschaftlich; es könnte ein Zuschuss helfen, den Fehlbetrag von ca. 300 €/a auszugleichen. Dies entspräche 5 % der Investitionssumme. Daraus ergibt sich dann ab dem 11. Jahr ein Gewinn für den Bauherrn. Die damit zusätzlich erzielbare Emissionsminderung ist jedoch überschaubar. Allerdings würde der Aufbau einer Hybridheizung umgangen, wenn sofort auch die Hülle verbessert wird.

			MFH Reihe	MFH Paket
Maßnahmenbeschreibung				
			sofort Technik, in 10 a Baukörper	alle Maßnahmen sofort
Ergebnisse der Energiebilanz und Energiekosten				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	167	167
	Jahr 1-10	kWh/(m²a)	50	25
	Jahr 11-30	kWh/(m²a)	25	
Energiekosten	vorher	€/a	9429	9429
	Jahr 1-10	€/a	5978	4068
	Jahr 11-30	€/a	4068	
Investitions- und Kapitalkosten				
Investition	Mehrkosten, sofort	T€	68,7	62,3
	Vollkosten, sofort	T€	-	84,6
	Mehrkosten, Jahr 11	T€	57,8	-
Kapitalkosten	Jahr 1-10	€/a	3618	5662
	Jahr 11-30	€/a	5187	4865
Ergebnisse der Emissionsbilanz				
Emissionen Wärme und Strom	vorher	kg/(m²a)	49,1	49,1
	Jahr 1-10	kg/(m²a)	23,1	14,8
	Jahr 11-30	kg/(m²a)	14,8	
	nachher Ø	kg/(m²a)	17,6	14,8
Ergebnisse der Energiebilanz				
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	328	318
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-524	-230
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 118 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Anlage → Baukörper oder Paket für das MFH [eigene Darstellung]

Da kaum Unterschiede der beiden Bilanzen zu erkennen sind, erscheint das Paket sinnvoller, wenn auch etwa 5 % Investitionskostenzuschuss ermittelt werden. Es wird dadurch der zwischenzeitliche Aufbau einer Hybridheizung vermieden – der ja zwangsläufig dazu führen würde, dass nach 10 Jahren der Kessel nicht mehr notwendig wäre.

Eine vergleichende Auswertung folgt in Anhang 3.8.5.

3.8.3 Sanierungsbedarf nur am Baukörper

Da der Baukörper ohnehin saniert werden muss, ergibt sich die Option die Technik vorgezogen mitzusanieren. Alternativ wird der Heizkessel noch weiterbenutzt, bis er selbst abgängig ist.

Auch hier wird angenommen, dass zwischen der Notwendigkeit der beiden Sanierungsschritte 10 Jahre Zeitdifferenz liegen. Damit ist die Techniksanierung als Teil des Paketes entsprechend 10 Jahre vorgezogen (und es gelten für die ersten 10 Jahre der Betrachtung die anteiligen Vollkosten, erst danach die Mehrkosten). Bei der Reihenfolge wird gewartet bis zum ohnehin erforderlichen Zeitpunkt und es gelten ab dann Mehrkosten.

Die Bilanzierung erfolgt weiterhin über 30 Jahre. Es werden gemittelte Kennwerte aus Mehrkosten und Vollkosten gebildet. Auch die Energiemengen und Emissionen werden bei den Reihenfolgen gewichtet angegeben. Informativ werden die Zwischenwerte mit erwähnt.

Beispiel des EZFH

Abbildung 144 zeigt schematisch die Optionen für das EZFH, in Tabelle 119 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

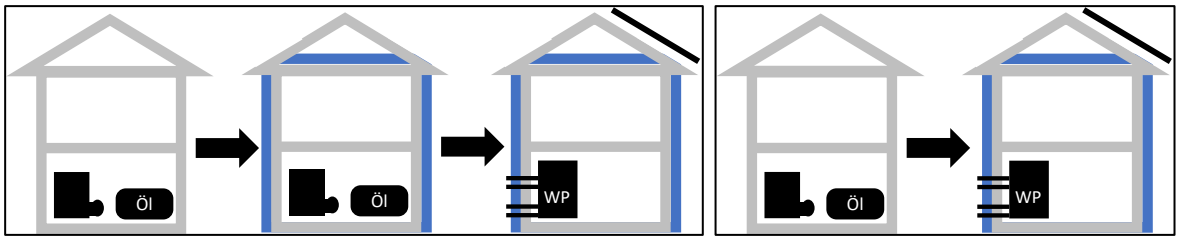


Abbildung 144 Schema – Reihenfolge Baukörper → Anlagentechnik oder Maßnahmenpaket für das EZFH [eigene Darstellung]

Die Energiekosten sinken bei der Reihenbildung zunächst auf etwa ⅔ des früheren Wertes ab. Es wird dabei jedoch durch die Dämmung so viel gespart, dass die Kapitalkosten (nur die Mehrkosten!) refinanziert werden können. Es ist kein Zuschuss notwendig. Der zweite Schritt erhöht die Kapitalkosten weiter und mindert die Energiekosten auf den Endwert. Hierbei zeigt sich ebenfalls ein Überschuss von etwa 340 €/a. Es ist also kein Zuschuss notwendig.

Die Emissionen werden im ersten Schritt etwa halbiert. Da der Umstieg auf die Wärmepumpe aber erst nach 10 Jahren erfolgt, werden in 30 Jahren gemittelt doppelt so viele Emissionen ausgestoßen wie beim Paket.

Bei der Paketlösung mit vorzeitigem Ersatz der Anlagentechnik ergibt sich insgesamt ebenfalls ein positives Bild, ohne Zuschussnotwendigkeit – bezogen auf den Gesamtzeitraum. Es ist etwa Grenzwirtschaftlichkeit erreicht. Diese Version kommt ebenfalls ohne Förderung aus.

Die äquivalenten CO_2-Preise zeigen, dass beim vorzeitigen Erzeugertausch etwa 10 % mehr Geld in die Hand genommen werden muss als bei einer Reihenfolge. Allerdings sind die Gesamtersparnisse an Emissionen deutlich höher.

			EZFH Reihe	EZFH Paket
Maßnahmenbeschreibung				
			sofort Baukörper, in 10 a Technik	alle Maßnahmen sofort
Ergebnisse der Energiebilanz und Energiekosten				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	212	212
	Jahr 1-10	kWh/(m²a)	84	27
	Jahr 11-30	kWh/(m²a)	27	
Energiekosten	vorher	€/a	2866	2866
	Jahr 1-10	€/a	1781	556
	Jahr 11-30	€/a	556	
Investitions- und Kapitalkosten				
Investition	Mehrkosten, sofort	T€	30,8	30,8
	Vollkosten, sofort	T€	-	24,2
	Mehrkosten, Jahr 11	T€	16,8	-
Kapitalkosten	Jahr 1-10	€/a	928	2206
	Jahr 11-30	€/a	1811	1811
Ergebnisse der Emissionsbilanz				
Emissionen Wärme und Strom	vorher	kg/(m²a)	72,7	72,7
	Jahr 1-10	kg/(m²a)	35,4	9,8
	Jahr 11-30	kg/(m²a)	9,8	
	nachher Ø	kg/(m²a)	18,4	9,8
Ergebnisse der Energiebilanz				
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	197	218
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-385	-367
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 119 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Baukörper → Anlage oder Paket für das EZFH [eigene Darstellung]

Da die Variante der Paketbildung ohne Fördermittel auskommt und gleichzeitig zu einer deutlich größeren Emissionsminderung führt, wird sie bevorzugt. Damit sie für den Bauherrn tatsächlich interessant wird, könnte zusätzlich ein (eigentlich nicht notwendiger) Anreiz gezahlt werden.

Beispiel des MFH

Abbildung 145 zeigt schematisch die Optionen für das MFH, in Tabelle 120 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

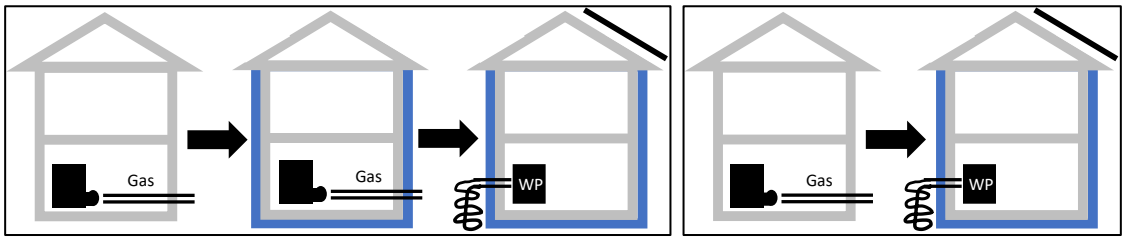


Abbildung 145 Schema – Reihenfolge Baukörper → Anlagentechnik oder Maßnahmenpaket für das MFH [eigene Darstellung]

Die Energiekosten sinken bei der Reihenbildung im ersten Schritt auf etwa 40 % des früheren Wertes ab. Es wird dabei analog des EZFH so viel gespart, dass die Kapitalkosten (nur die Mehrkosten!) refinanziert werden können und darüber hinaus noch ein deutlicher Überschuss von 600 €/a zu verzeichnen ist. Es ist kein Zuschuss notwendig. Der zweite Schritt erhöht die Kapitalkosten weiter und mindert die Energiekosten auf den Endwert. Dieser Schritt für sich ist knapp unwirtschaftlich, es ergibt sich ein Verlust von 100 €/a – somit eine sehr geringe Zuschussnotwendigkeit.

			MFH Reihe	MFH Paket
Maßnahmenbeschreibung				
			sofort Baukörper, in 10 a Technik	alle Maßnahmen sofort
Ergebnisse der Energiebilanz und Energiekosten				
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	167	167
	Jahr 1-10	kWh/(m²a)		25
	Jahr 11-30	kWh/(m²a)	25	
Energiekosten	vorher	€/a	9429	9429
	Jahr 1-10	€/a		4068
	Jahr 11-30	€/a	4068	
Investitions- und Kapitalkosten				
Investition	Mehrkosten, sofort	T€	57,8	57,8
	Vollkosten, sofort	T€	-	71,3
	Mehrkosten, Jahr 11	T€	62,3	-
Kapitalkosten	Jahr 1-10	€/a	1569	5347
	Jahr 11-30	€/a	4865	4865
Ergebnisse der Emissionsbilanz				
Emissionen Wärme und Strom	vorher	kg/(m²a)	49,1	49,1
	Jahr 1-10	kg/(m²a)	33,1	14,8
	Jahr 11-30	kg/(m²a)	14,8	
	nachher Ø	kg/(m²a)	20,9	14,8
Ergebnisse der Energiebilanz				
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	284	311
Dateninterpretation				
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-530	-335
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner

Tabelle 120 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Baukörper → Anlage oder Paket für das MFH [eigene Darstellung]

Bei der Paketlösung mit vorzeitigem Ersatz des Erzeugers ergibt sich ebenfalls ein positives Bild. Trotz deutlich größerer Investitionssummen, ergibt sich genau die Grenzwirtschaftlichkeit ohne Gewinn und Verlust. Die insgesamt erreichbare Emissionsminderung ist im Paket etwas größer, jedoch liegen die beiden Emissionswerte näher beieinander.

Die äquivalenten CO_2-Preise sind insgesamt höher als beim EZFH, was aber daran liegt, dass hier ein Gaskessel vorhanden ist, während in dem EZFH ein Ölkessel ersetzt wird. Es muss also mehr Geld investiert werden, um eine Tonne CO_2 zu sparen.

Da die Paketlösung ohne Förderung auskommt, wird sie empfohlen.

Eine vergleichende Auswertung aller Lösungen folgt in Anhang 3.8.5.

3.8.4 Kein Sanierungsbedarf

Weder der Baukörper, noch die Anlage weisen einen Sanierungsbedarf auf. Es wird angenommen, dass sie beide erst in 10 Jahren zur Sanierung anstehen. Es ergeben sich 4 Optionen, die Abbildung 146 schematisch zeigt.

Es erfolgt jetzt eine Umsetzung des Paketes (und es gelten für die ersten 10 Jahre der Betrachtung die Vollkosten, erst danach die Mehrkosten). Alternativ wird noch 10 Jahre abgewartet (und es gelten dann die Mehrkosten). Darüber hinaus sind die Optionen einer vorgezogenen Anlagentechniksanierung denkbar (Reihenfolge analog Anhang 3.8.2) oder einer vorgezogenen Baukörpersanierung möglich (Reihenfolge analog Anhang 3.8.3).

Die Bilanzierung erfolgt weiterhin über 30 Jahre. Es werden gemittelte Kennwerte aus Mehrkosten und Vollkosten gebildet. Auch die Energiemengen und Emissionen werden bei den Reihenfolgen gewichtet angegeben. Informativ werden die Zwischenwerte mit erwähnt.

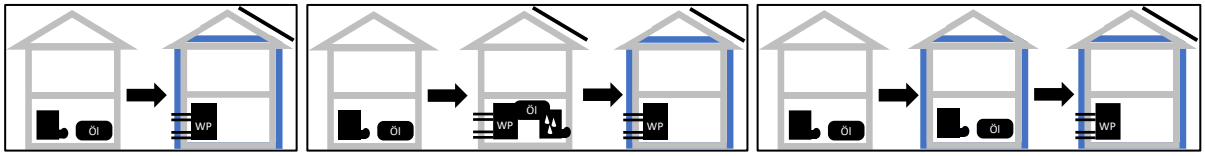


Abbildung 146 Schema – Reihenfolgen oder Maßnahmenpakete für das EZFH [eigene Darstellung]

Tabelle 121 zeigt die Ergebnisse. Die Aussagen aus den Anhängen 3.8.2 und 3.8.3 finden sich in ähnlicher Form wieder.

Wird die Maßnahme verschoben auf den Zeitpunkt, wo sie ohnehin fällig gewesen wäre, ist eine Wirtschaftlichkeit gegeben. Es bedarf keiner Förderung. Über den Zeitraum der nächsten 30 Jahre wird im Mittel drei Mal so viel CO_2 emittiert, als wenn das Paket vorgezogen umgesetzt wird.

Werden die baulichen Investitionen vorgezogen und die Anlage dann erst in 10 Jahren modernisiert, ergibt sich ein großes Defizit an Kosten in den ersten 10 Jahren. Es fehlen fast 1000 €/a, die mit einer Förderung von fast 50 % der Investition auszugleichen wären. Ab dem Jahr 11 wird ein Gewinn von fast 1500 €/a erzielt. Es bedarf dann keines Zuschusses mehr, so dass am Ende eine ausgeglichene Bilanz entsteht. Diese Kombination ist aus Sicht von Bauherren und potentiellem Fördermittelgeber jedoch ungünstig.

Im Umkehrfall, erst die Anlage zu wechseln und die Baukörpersanierung auf den Zeitpunkt zu verschieben, wo sie ohnehin fällig ist, führt zu etwas besseren Ergebnissen. In den ersten Jahren ergibt sich ein Verlust von ca. 360 €/a, jedoch könnte dieser durch Förderung von 21 % ausgeglichen werden – ein mittlerer Wert. Der zweite Schritt ist in sich wirtschaftlich und bedarf keiner Förderung. Da damit nur etwa genauso hohe Emissionen im 30-Jahres-Mittel erreicht werden, würde diese der vorherigen Variante vorgezogen.

Die Option, alles auf einmal vorzuziehen, ist über den Gesamtzeitraum betrachtet wirtschaftlich. Jedoch während des ersten Jahrzehntes nicht. Eine Förderung von etwa 31 % der Investitionskosten würde dieses Problem beheben.

			EZFH Paket später	EZFH Reihe Bau	EZFH Reihe Technik	EZFH Paket sofort
Maßnahmenbeschreibung						
			alle Maß-nahmen in 10 a	sofort Baukör-per, in 10 a Technik	sofort Technik, in 10 a Baukör-per	alle Maß-nahmen sofort
Ergebnisse der Energiebilanz und Energiekosten						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	212	212	217	212
	Jahr 1-10	kWh/(m²a)	212	84	113	27
	Jahr 11-30	kWh/(m²a)	27	27	27	27
Energiekosten	vorher	€/a	2866	2866	2866	2866
	Jahr 1-10	€/a	2866	1781	1509	556
	Jahr 11-30	€/a	556	556	556	556
Investitions- und Kapitalkosten						
Investition	Mehrkosten, sofort	T€	-	-	-	-
	Vollkosten, sofort	T€	-	65,9	32,6	90,0
	Mehrkosten, Jahr 11	T€	47,6	16,8	30,8	-
Kapitalkosten	Jahr 1-10	€/a	0	2057	1720	3335
	Jahr 11-30	€/a	1811	1811	2234	1811
Ergebnisse der Emissionsbilanz						
Emissionen Wärme und Strom	vorher	kg/(m²a)	72,7	72,7	72,7	72,7
	Jahr 1-10	kg/(m²a)	72,7	35,4	37,1	9,8
	Jahr 11-30	kg/(m²a)	9,8	9,8	9,8	9,8
	nachher Ø	kg/(m²a)	30,8	18,4	18,9	9,8
Ergebnisse der Energiebilanz						
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	203	246	271	260
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-333	-9	70	8
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner	9	1
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner	3	ca. 0

Tabelle 121 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Baukörper → Anlage, Anlage → Baukörper oder Pakete für das EZFH [eigene Darstellung]

Von den untersuchten Varianten erscheint den Gutachtern nur die Option der vorgezogenen Techniksanierung sinnvoll – auch sinnvoller als nichts zu tun. Hierbei können die Emissionen deutlich vermindert werden und es bedarf eines Zuschusses von etwa 20 % der Investitionskosten. Die vorgezogene Baukörperverbesserung ohne Technik ist vergleichsweise teuer (es sind Fenster darin enthalten!) und wird – wenn überhaupt – nur mit der Anlage zusammen im Paket umgesetzt.

Beispiel des MFH

Abbildung 147 zeigt abschließend das Schema möglicher Optionen für das MFH, Tabelle 122 die Ergebnisse.

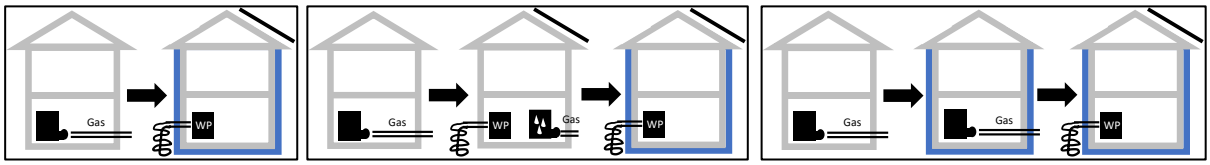


Abbildung 147 Schema – Reihenfolgen oder Maßnahmenpakete für das MFH [eigene Darstellung]

Wird die Maßnahme verschoben auf den Zeitpunkt, wo sie ohnehin fällig gewesen wäre, ist eine Wirtschaftlichkeit gegeben. Es bedarf keiner Förderung. Über den Zeitraum der nächsten 30 Jahre wird im Mittel doppelt so viel CO_2 emittiert, als wenn das Paket vorgezogen umgesetzt wird.

Werden die baulichen Investitionen vorgezogen und die Anlage dann erst in 10 Jahren modernisiert, ergibt sich ein überschaubares Defizit an Kosten in den ersten 10 Jahren. Es fehlen etwa 100 €/a, die mit einer Förderung von etwa 5 % der Investition auszugleichen wären. Dies erscheint sinnvoll. Ab dem Jahr 11 wird ein Gewinn von fast 700 €/a erzielt. Es bedarf keines Zuschusses.

Im Umkehrfall, erst die Anlage zu wechseln und die Baukörpersanierung auf den Zeitpunkt zu verschieben, wo sie ohnehin fällig ist, führt zu schlechteren Ergebnissen. In den ersten Jahren ergibt sich ein Verlust von ca. 830 €/a, jedoch könnte dieser durch Förderung von 35 % ausgeglichen werden – ein eher hoher Wert. Der zweite Schritt ist in sich wirtschaftlich und bedarf keiner Förderung. Da damit nur geringfügig weniger Emission im 30-Jahres-Mittel erreicht werden, würde stattdessen der vorherigen Variante der vorgezogenen Baukörperverbesserung, der Vorzug gegeben.

Die Option, alles auf einmal vorzuziehen, ist über den Gesamtzeitraum betrachtet wirtschaftlich. Jedoch während des ersten Jahrzehntes nicht – analog des EZFH. Eine Förderung von etwa 23 % der Investitionskosten würde dieses Problem beheben.

			MFH Paket später	MFH Reihe Bau	MFH Reihe Technik	MFH Paket sofort
Maßnahmenbeschreibung						
			alle Maßnahmen in 10 a	sofort Baukörper, in 10 a Technik	sofort Technik, in 10 a Baukörper	alle Maßnahmen sofort
Ergebnisse der Energiebilanz und Energiekosten						
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	167	167	167	167
	Jahr 1-10	kWh/(m²a)	167	90	50	25
	Jahr 11-30	kWh/(m²a)	25	25	25	25
Energiekosten	vorher	€/a	9429	9429	9429	9429
	Jahr 1-10	€/a	9429	7261	5978	4068
	Jahr 11-30	€/a	4068	4068	4068	4068
Investitions- und Kapitalkosten						
Investition	Mehrkosten, sofort	T€	-	-	-	-
	Vollkosten, sofort	T€	-	84,6	81,1	155,9
	Mehrkosten, Jahr 11	T€	120,1	62,3	57,8	-
Kapitalkosten	Jahr 1-10	€/a	0	2366	4283	6144
	Jahr 11-30	€/a	4867	4865	5187	4867
Ergebnisse der Emissionsbilanz						
Emissionen Wärme und Strom	vorher	kg/(m²a)	49,1	49,1	49,1	49,1
	Jahr 1-10	kg/(m²a)	49,1	33,1	23,1	14,8
	Jahr 11-30	kg/(m²a)	14,8	14,8	14,8	14,8
	nachher Ø	kg/(m²a)	26,2	20,9	17,6	14,8
Ergebnisse der Energiebilanz						
Äquivalenter CO_2-Preis		€/t	302	304	329	328
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-329	-265	161	-68
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	keiner	keiner	3	keiner
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	keiner	keiner	11	keiner

Tabelle 122 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Baukörper → Anlage, Anlage → Baukörper oder Pakete für das MFH [eigene Darstellung]

Das Vorziehen der Baukörperverbesserung erscheint den Gutachtern am sinnvollsten, vor allem da keine Fenstersanierung enthalten ist. Der Gaskessel würde dann erst verbessert werden, wenn er ohnehin zur Sanierung ansteht. Das Vorziehen allein der TGA ist eine schlechtere Option, weil der Gaskessel ohnehin keine so hohen Verluste hat – und es müsste dann ein Hybridsystem errichtet werden. Mit einer Förderung von etwa 23 % ist das Paket ebenfalls eine denkbare Option.

Eine vergleichende Auswertung aller Lösungen folgt in Anhang 3.8.5.

3.8.5 *Fazit zur Thematik Pakete und Reihenfolgen*

Sofern die Technik das Ende der Lebensdauer erreicht hat, stellt sich die Frage, ob der Baukörper – vorgezogen – zeitgleich mitsaniert wird. Gleiches gilt umgekehrt für die Gebäudehülle auch. Sind jedoch weder Baukörper noch die Anlagentechnik unmittelbar zu sanieren, bleiben deutlich mehr Optionen, Maßnahmen vorzuziehen. Jede vorgezogene Maßnahme erhöht die Investitionskosten (über das ohnehin notwendige Maß), vermindert aber auch die Energiekosten vorzeitig und spart vor allem vorzeitig Emissionen, die sonst erst später gesunken wären.

Für den Betreiber des Gebäudes stellt sich die Frage, wie wirtschaftlich ist das Vorziehen von Maßnahmen. Ist dies allein aus der Einsparung an Energie heraus zu finanzieren. Aus übergeordneter Sicht, z. B. eines Fördermittelgebers stellt sich die Frage, ob die Zuschüsse es wert sind, die zusätzlich erzielten Einsparungen an Emissionen zu rechtfertigen.

Die am Beispiel des EZFH und MFH untersuchten Varianten werden abschließend vergleichend bewertet.

Es gilt folgende Farbgebung zum Lesen der Varianten:

- Sanierungsbedarf an Baukörper und Anlagentechnik gegeben: schwarze Symbole
- Sanierungsbedarf nur an der Anlagentechnik gegeben: dunkelblaue Symbole
- Sanierungsbedarf nur am Baukörper gegeben: hellblaue Symbole
- kein unmittelbarer Sanierungsbedarf gegeben: orangene Symbole.

Je nachdem, wie der Ausgangszustand sich darstellt, sind nicht mehr alle Optionen des Vorziehens von Maßnahmen gegeben. Verglichen werden dürfen daher nur die Symbole derselben Farbgebung.

Pakete und Reihenfolgen: Betriebswirtschaftliche Einschätzung

Abbildung 148 zeigt die über einen Zeitraum von 30 Jahren erzielten Gewinne oder Verluste. Die Maßnahmen unter der Nulllinie rechnen sich ohne Zuschuss. Es zeigt sich, dass nur Varianten in orangener Farbgebung davon betroffen sind. Dies sind alles Maßnahmen, die einen Vorzieheffekt beinhalten.

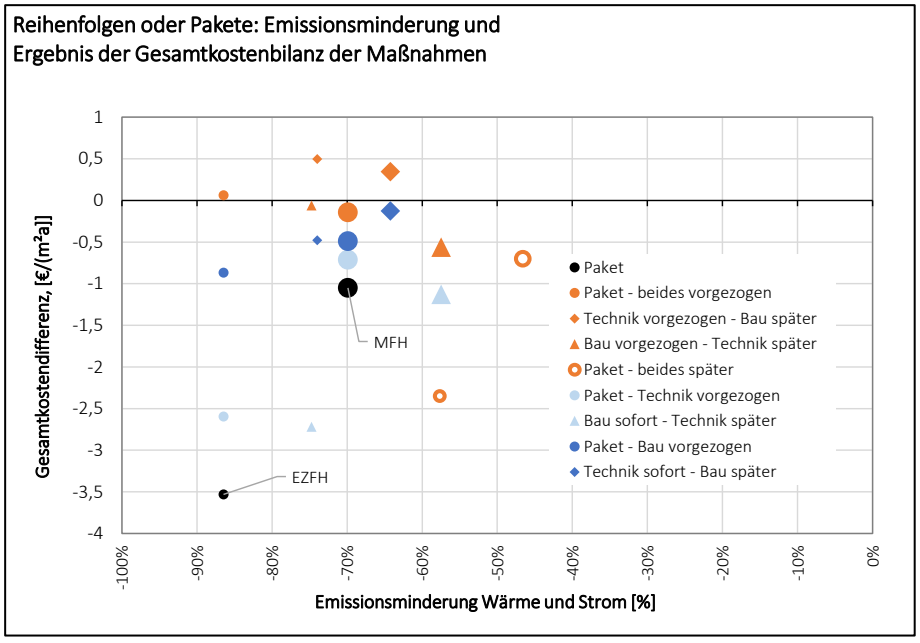


Abbildung 148 Bewertung der Pakte und Reihenfolgen nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung]

Das EZFH weist teurere bauliche Maßnahmen auf (Dach, Fenster), das MFH dagegen die günstigeren (Kellerdecke). Bei der Technik ist im EZFH eine größere Emissionsminderung möglich, weil vorher ein Ölkessel installiert ist. Außerdem profitiert das EZFH mehr von der PV-Anlage (die als „Quersubventionierer“ zählt), weil die Anlage einen größeren Ertrag liefert.

Im Vergleich der Varianten „Sanierungsbedarf an der Anlagentechnik“ (dunkelblau) ist festzustellen:

- für beide Gebäude führt die „Paketlösung“ gegenüber der Version „Technik sofort – Bau später“ zu einer größeren Emissionsminderung und einer größeren Gesamtkostenersparnis; damit ist die dieser vorzuziehen.

Im Vergleich der Varianten „Sanierungsbedarf am Gebäude“ (hellblau) ist festzustellen:

- für beide Gebäude führt die „Paketlösung“ gegenüber der Version „Bau sofort – Technik später“ zu einer größeren Emissionsminderung und einer größeren Gesamtkostenersparnis; damit ist die dieser vorzuziehen.

Im Vergleich der Varianten „kein Sanierungsbedarf“ (orange) ist festzustellen:

- für das MFH erscheint die Lösung „Bau vorgezogen – Technik später“ vorteilhafter als die anderen; die zweitbeste Lösung ist das Paket „später“, weil hier bei fast gleichen Kosten deutlich weniger CO_2 gespart wird
- für das EZFH ist das Paket „beides vorgezogen“ vorteilhafter als die anderen; es ist fast genauso teuer wie die Lösung „Bau vorgezogen – Technik später“, führt aber zu größeren Emissionsminderungen.

Pakete und Reihenfolgen: Maßnahmen zum Ausgleich von Unwirtschaftlichkeiten

Abbildung 149 zeigt die geringen Zuschüsse, die im 30-Jahres-Mittel notwendig sind. Alternativ müssten die Energieträgerpreise steigen, um zu einer Grenzwirtschaftlichkeit zu gelangen.

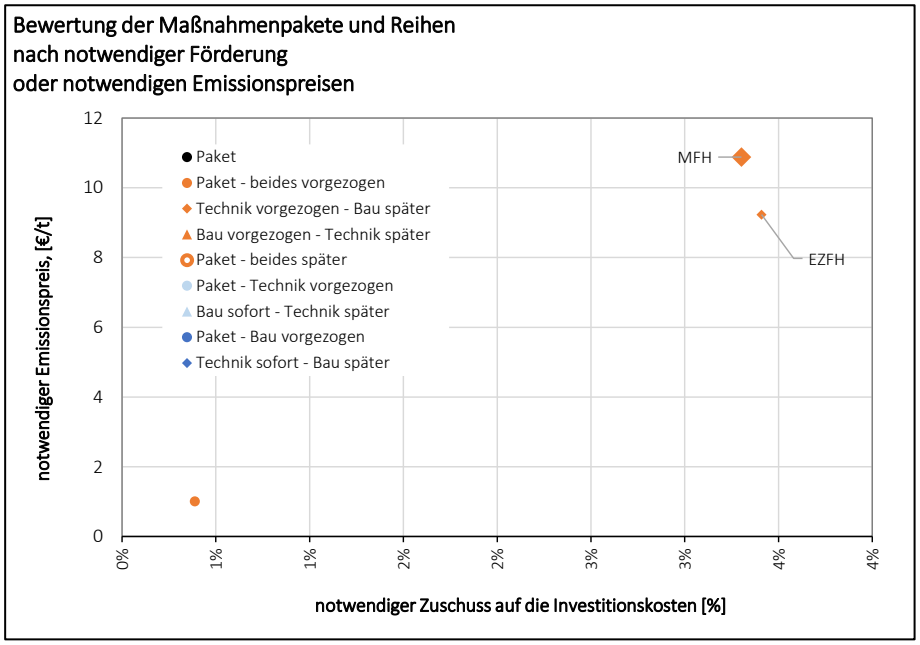


Abbildung 149 Bewertung der Pakte und Reihenfolgen nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung]

Zusätzlich werden hier die Detailerkenntnisse zum ersten 10-Jahres-Zeitraum der jeweiligen Sanierung zusammengefasst (ohne Grafik).

Im Vergleich der Varianten „Sanierungsbedarf an der Anlagentechnik“ (dunkelblau) ist wegen der vorgezogenen Bausanierung festzustellen:

- bei dem EZFH führt das Paket zu einer notwendigen Förderung von etwa 20 %, damit es in den ersten 10 Jahren nicht zu Mehrkosten kommt, der erste Schritt der Reihenfolge kommt ohne Förderung aus
- bei dem MFH führt das Paket zu einer notwendigen Förderung von etwa 5 %, der erste Schritt der Reihenfolge kommt mit 4 % Förderung aus

Im Vergleich der Varianten „Sanierungsbedarf am Gebäude“ (hellblau) ist im Zusammenhang mit der vorgezogenen Anlagensanierung festzustellen:

- weder bei EZFH noch MFH sind in der ersten oder zweiten Sanierungsphase Mehrkosten festzustellen.

Im Vergleich der Varianten „kein Sanierungsbedarf“ (orange) ist festzustellen:

- für das EZFH ist es mit Betrachtung der ersten 10 Jahre am günstigsten, die Anlage vorzuziehen (Zuschuss des ersten Schrittes 21 %), die zweitbeste Lösung ist das Paket (Zuschuss 31 %), die drittbeste ist das Vorziehen des Baukörpers (Zuschuss 47 %)
- für das MFH ist es mit Betrachtung der ersten 10 Jahre am günstigsten, den Baukörper vorzuziehen (Zuschuss des ersten Schrittes 5 %), die zweitbeste Lösung ist das Paket (Zuschuss 23 %), die drittbeste ist das Vorziehen der Anlagentechnik (Zuschuss 35 %)

Eine vorgezogene Baukörpersanierung, die auch die Fenster enthält, ist ungünstig. Ebenfalls der vorgezogene Austausch von Gaskesseln – allenfalls im Rahmen von Paketlösungen.

Pakete und Reihenfolgen: Einschätzung auf Basis der Emissionsminderung

Abbildung 150 zeigt die erzielbaren Emissionsminderungen sowie die äquivalenten CO_2-Preise. Je weiter rechts und gleichzeitig unten eine Maßnahme angeordnet ist, desto interessanter ist sie aus Sicht der Gesamtverbesserung.

Lage unten (gutes Verhältnis von eingesetztem Kapital zur erzielten Emissionsminderung): besser schneiden alle Maßnahmen im EZFH ab, weil hier der Ölkessel mit seinen größeren Emissionen ersetzt wird.

Die Punkte der Pakete (runde Symbole) liegen alle direkt untereinander. Sie führen immer zu derselben Einsparung an Emissionen, nur zu höheren Kosten – je nachdem, wie hoch der Anteil einer vorgezogenen Maßnahme ist. Für das EZFH ist das Vorziehen der Technik (Ersatz Heizöl) deutlich interessanter als das Vorziehen der Gebäudehülle (teure Fenster). Bei dem MFH sind die Maßnahmen fast gleich zu bewerten.

Lage rechts (großer „Hebel“ hinsichtlich der Emissionsminderung in einem Schritt): die Hybridlösungen (Anlagentechnik vorziehen, Rautensymbole) führen im MFH zu einer größeren Emissionsminderung als die baulichen Maßnahmen (Baukörper vorziehen, Dreiecksymbole). Beim EZFH liegen sie gleichauf.

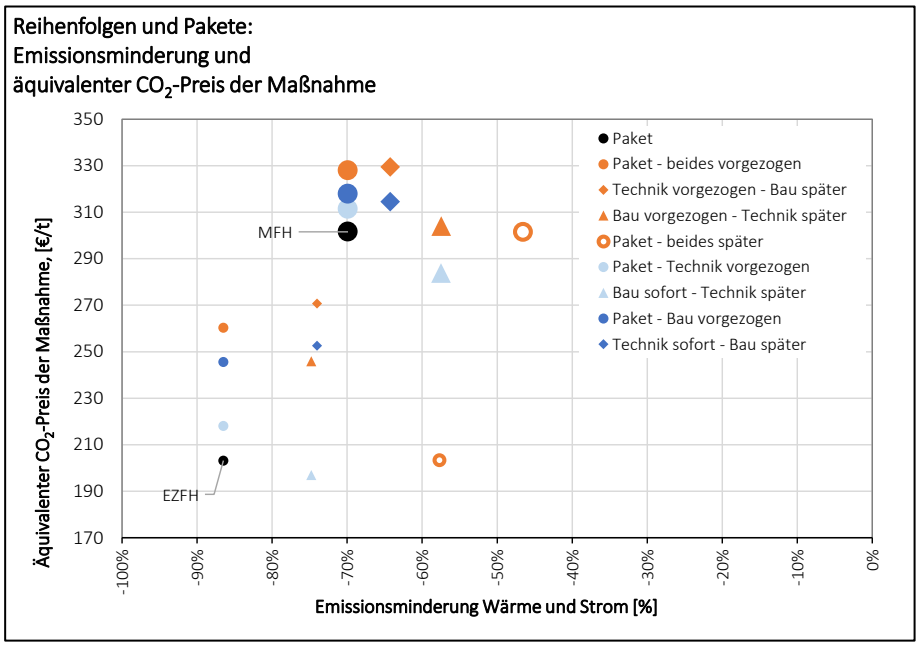


Abbildung 150 Bewertung der Erzeuger nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im guten Gebäude [eigene Darstellung]

Fazit

Eine abschließende pauschale Bewertung, ob Maßnahmenreihenfolgen oder Pakete sinnvoller sind, lässt sich nicht treffen. Es ist eine Einzelfallentscheidung – vor allem abhängig davon, welche Maßnahmen zum Zeitpunkt der Überlegung ohnehin oder in Kürze anstehen und welche ggf. dadurch im Paket vorgezogen werden.

Stehen alle oder mehrere Maßnahmen gleichzeitig an, ist im Paket zu sanieren. Allerdings ist dieser Zustand aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsdauer der einzelnen Bauteile nicht oft im Lebenszyklus eines Gebäudes gegeben, siehe Abbildung 151.

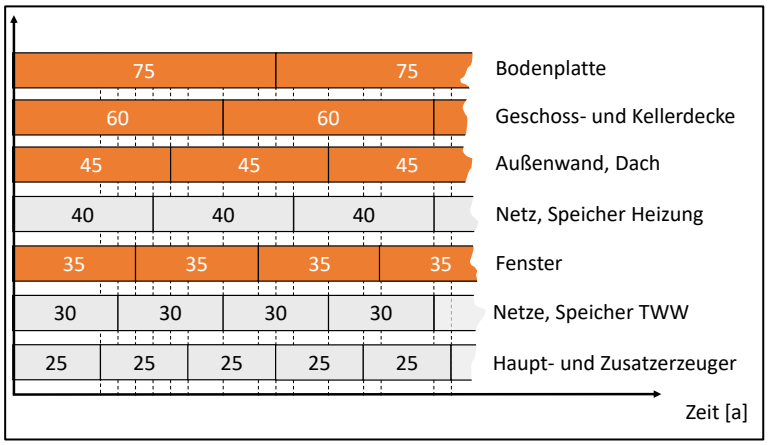


Abbildung 151 Schematische Darstellung der angenommenen Sanierungszyklen auf Basis der Nutzungsdauer [eigene Darstellung]

Stehen Maßnahmen nicht gleichzeitig an, besteht Wahlfreiheit für das Bilden von Paketen. Je ferner der eigentlich notwendige Investitionszeitpunkt liegt, desto unwirtschaftlicher ist eine Paketsanierung mit Vorzieheffekt. Insbesondere Fenster- und Außenwand im Paket führen jeweils zu sehr großen Verschiebungen. Würde die Wand immer im Zusammenmit der Fenstersanierung ertüchtigt, führte dies jedes Mal zu einer Verschiebung von 10 Jahren. Es ist damit nachvollziehbar, dass – obwohl dies baupraktisch auf der Hand liegen würde – häufig in der Praxis die Fenster in einem anderen Turnus und unabhängig von der Wand verbessert werden.

Da die anlagentechnischen Maßnahmen allgemein kurzlebiger sind als bauliche Maßnahmen, stellt sich insgesamt eher die Option einer vorzeitigen Anlagentechniksanierung im Zusammenhang mit einer baulichen Sanierung. Dies konnte auch mit den Typgebäuden herausgearbeitet werden: die vorgezogene Verbesserung des Erzeugers ist deutlich günstiger (im Sinne notwendiger Zuschüsse) als der umgekehrte Fall. Beispielsweise wäre es sinnvoll, mit der 3. Fenstergeneration (nach 70 Jahren) auch den dann 3. Wärmeerzeuger vorzeitig auszutauschen, weil dieser ohnehin nur noch 5 Jahre Nutzungsdauer aufweist.

Bezogen auf die untersuchten Varianten für Reihenfolgen und Pakete des EZFH und MFH ist festzustellen, dass das Vorziehen von anlagentechnischen Maßnahmen günstiger ist, wenn der Energieträger Heizöl gegeben ist. Dann lohnt sich sogar der Aufbau übergangsweiser Hybridlösungen mit Kessel und Wärmepumpe. Das ist bei Gaskesseln nicht der Fall. Sie können eher bis zum Lebensende betrieben werden.

Das Vorziehen baulicher Maßnahmen ist vor allem interessant, wenn in dem Maßnahmenpaket keine Fenster enthalten sind, weil diese vergleichsweise teuer sind und damit hohe Förderquoten erforderlich machen.

Eine weitere Vertiefung der Problematik – vorrangig aus Sicht vermieteter Mehrfamilienhäuser – ist in der Studie von Enseling et al. von 2003 gegeben [253]. Insbesondere auch die Untersuchung anderer Vor- und Nachteile jenseits der energetischen Aspekte (steuerliche Gründe, Vermietbarkeit, Planerhonorare, Mieterbelästigung, Kapitalbeschaffung usw.). Für die energetische Modernisierung wird empfohlen, möglichst folgende Pakete zu bilden: Außenwand plus Fenster, Geschoss- plus Kellerdecken, Kopplung des Einbaus einer Zentralheizung an die Sanierung der Elektrohauptverteilung. Letztgenannter Punkt (Zentralheizung erstmalig einbauen) ist heute – 20 Jahre später – weit weniger relevant.

3.8.6 Entscheidungsfindung im konkreten Einzelfall

Ob der konkrete Handlungsbedarf im Einzelfall eher die Erzeugung, die Gebäudehülle, den Trinkwarmwasserbedarf, das Nutzerverhalten oder die Qualitätssicherung betrifft, kann mit einem groben Mess- und Auswertekonzept nach dem Schema in Abbildung 152 erfolgen.

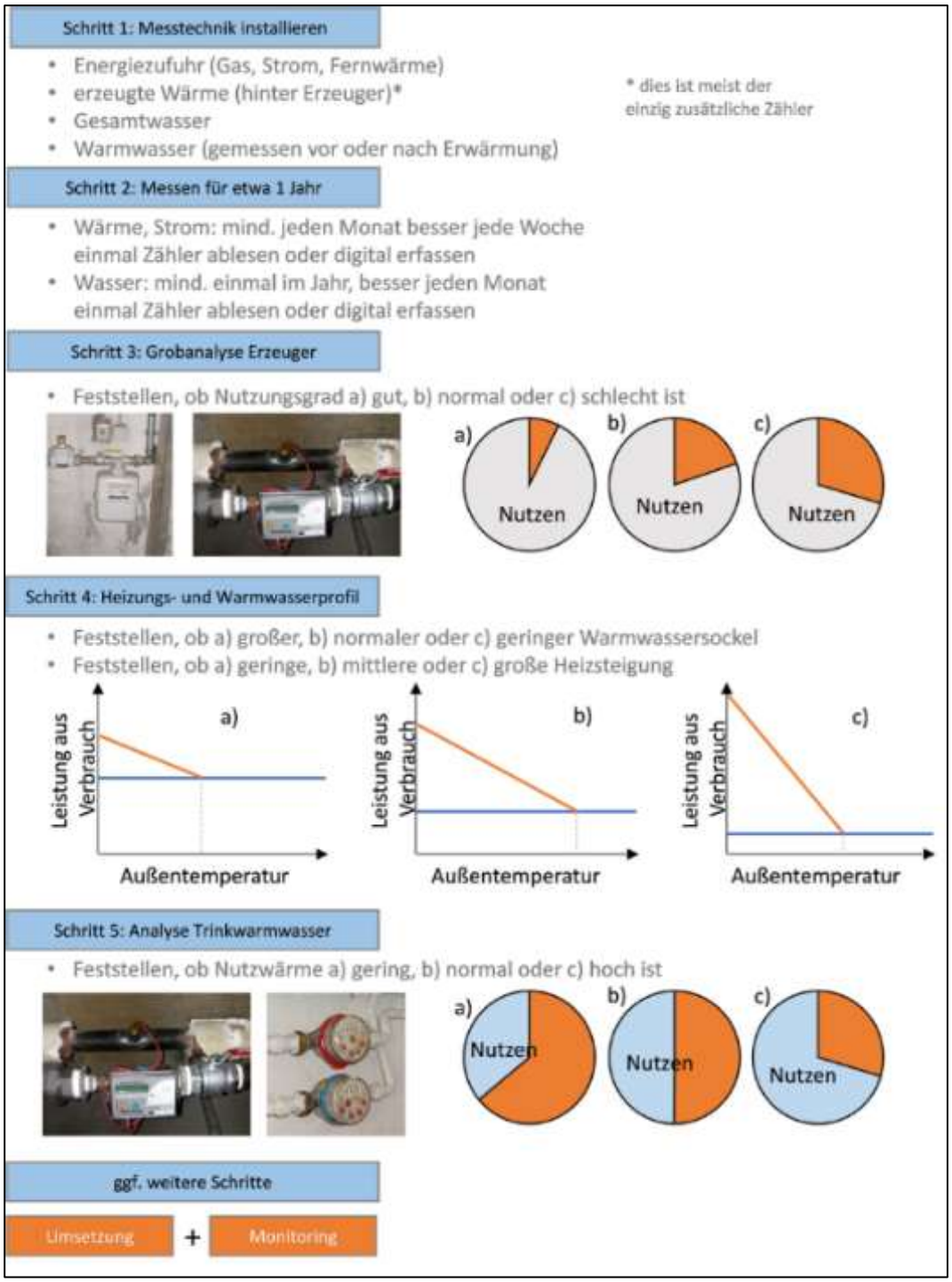


Abbildung 152 Fahrplan für die Entscheidungsfindung im Einzelfall – auf Basis von Messwerten [eigene Darstellung]

Zunächst wird Messtechnik installiert und in Intervallen werden Messwerte erhoben (Schritte 1 und 2).

Es folgt die Grobanalyse des Erzeugers (Schritt 3). Benötigt wird das Verhältnis von eingesetzter Energie (beispielhaft aus einem Gaszähler) und die erzeugte Energie (mit einem Wärmemengenzähler erfasst). Der Nutzungsgrad wird bestimmt und anhand von Vergleichszahlen eingeordnet.

- ist er a) gut, wird die Sanierung mit großer Wahrscheinlichkeit einen anderen Schwerpunkt als die Erzeugung haben
- ist er b) mittel könnte ggf. über den Aufbau eines Hybridsystems unter weiterer Verwendung des Erzeugers nachgedacht werden
- ist er c) schlecht, ist ein Wechsel naheliegend; je nach Ausgang der weiteren Analyse eine reine Wärmepumpenlösung (mit PV) oder ein Hybridsystem

Im vierten Schritt erfolgt die Untersuchung, wo die produzierte Wärme verbleibt. Mit Hilfe des Wärmemengenzählers erfolgt die Aufteilung in Heizung (Steigung) und Trinkwarmwasser (Sockel); das weitere Vorgehen ist in Anhang 5.3.3 ausführlich beschrieben. Zunächst werden anhand von Vergleichskennzahlen die Steigung der Heizkennlinie sowie gleichzeitig auch die Heizgrenztemperatur beurteilt:

- sind sie a) gering, wird die Sanierung mit großer Wahrscheinlichkeit einen anderen Schwerpunkt als die Verbesserung der Wärmedämmung haben (das tritt auch bei schlechten Gebäuden auf, die nur teilbenutzt sind)
- sind sie b) mittel, kann eine Detailbetrachtung einzelner Bauteile erfolgen, die noch ungedämmt sind und/oder erkennbaren Instandhaltungsbedarf aufweisen
- sind sie c) hoch, ist ein Dämmkonzept als Maßnahmenpaket die vermutlich sinnvollste Lösung

Anschließend wird der Trinkwarmwassersockel beurteilt. Ebenfalls kommen Vergleichskennwerte zum Einsatz:

- ist er a) hoch, folgt optimalerweise eine Detailanalyse (Schritt 5)
- ist er b) mittel, kann eine Detailanalyse folgen (Schritt 5)
- ist er c) niedrig, wird die Sanierung mit großer Wahrscheinlichkeit einen anderen Schwerpunkt als die Trinkwassererwärmung haben (das tritt auch bei Gebäuden auf, die nur teilbenutzt sind)

Die Detailanalyse des Trinkwarmwassersystems im fünften Schritt setzt die aufgewendete Wärmemenge (mit einem Wärmemengenzähler erfasst) und die mit dem Wasser gezapfte Energiemenge (bestimmt über einen Wasserzähler) ins Verhältnis. Auf Basis dieses Systemnutzungsgrades kann geurteilt werden:

- ist er a) gering, ist ein Umbau hin zu einer dezentralen Trinkwassererwärmung zu prüfen (vor allem wenn die Belegung dauerhaft unverändert so bleibt)
- ist er b) mittel, ist auf geringinvestive Verbesserungen zu prüfen, z. B. Nachdämmen von Leitungen
- ist er c) hoch, wird die Sanierung mit großer Wahrscheinlichkeit einen anderen Schwerpunkt als die Trinkwassererwärmung haben, jedoch kann das Nutzerverhalten kritisch geprüft werden.

Die notwendigen Vergleichskennzahlen können der Literatur entnommen werden, z. B. diesem Bericht.

Die dann ohnehin vorhandene Messtechnik kann genutzt werden, um die Qualitätssicherung der umgesetzten Modernisierung zu leisten, vgl. auch Anhang 5.3.4.

Auf jeden Fall ist es nach Ansicht der Gutachter sinnvoll, die Entscheidung verbrauchsbasiert zu treffen, nicht allein auf Basis des berechneten Energiebedarfs. Die Meinung der VdZ alle Gebäude verpflichtend mit einem Bedarfsausweis zu versehen und diesen als Grundlage für einen Sanierungsfahrplan zu verwenden [136], teilen die Gutachter nicht, nachfolgend zitiert:

> *„Energieverbrauchsausweise werden auf Grundlage des tatsächlichen Verbrauchs (Messung/Ablesung) erstellt. Sie spiegeln daher die tatsächliche Verbrauchssituation eines Gebäudes bei der real auftretenden Nutzung sehr gut wider. Da das Ergebnis naturgemäß sehr stark durch individuelle Gegebenheiten, insbesondere das Nutzerverhalten, beeinflusst wird, lassen Energieverbrauchsausweise nur sehr bedingt Schlüsse auf die energetische Qualität eines Gebäudes und seiner Anlagentechnik zu.*
> *[…]*
> *Energiebedarfsausweise beschreiben die energetische Qualität eines Gebäudes und seiner Anlagentechnik auf Basis einer Energiebedarfsberechnung unter Annahme einer weitgehend standardisierten Nutzungsweise. Damit sind Schlüsse auf reale Energieverbräuche nur bedingt möglich. Hinsichtlich der energetischen Qualität von Gebäuden/Anlagen durch zeitgemäße Sanierungsmaßnahmen und -technik kann durch die exakte Definition bauphysikalischer, anlagentechnischer und nutzungsseitiger Randbedingungen jedoch ein sehr hoher Grad an Vergleichbarkeit erzielt werden. Der Energiebedarfsausweis stellt damit prinzipiell eine sehr gut geeignete Bewertungsgrundlage im Rahmen eines Gebäudesanierungsfahrplans dar.“*

Insbesondere an der exakten Definition von Randdaten bei einer Bedarfsbilanz scheitert es im Einzelfall, siehe auch Ausführungen zur Thematik „Bedarf und Verbrauch“ in Anhang 5.2.

Beispiel aus der Wohnungswirtschaft

In einem Projekt der Wohnungswirtschaft, an welchem die Gutachter beratend beteiligt sind [95], wurde und wird das Verfahren angewendet.

Die Schritte 1 (Zähler installieren) und 2 (Messwerte erheben) werden seit etwa 2016 umgesetzt. Der Schritt 3 (Nutzungsgrad Erzeuger) führte zu einer mittleren Einschätzung und der Entscheidung, den vorhandenen Brennwertkessel beizubehalten.

Das grafische Ergebnis aus dem Schritt 4 zeigt Abbildung 153.

Es war vor der Sanierung eine hohe Steigung h festzustellen. Die sich anschließende Außenwanddämmung führt zu einer objektbezogenen Verbesserung des h-Wertes von 1,98 auf 1,33 W/(m²K). Diese Maßnahme stellte sich als hochwirtschaftlich heraus, weil die Randbedingungen für eine wirtschaftliche Dämmmaßnahme gegeben waren:

- mehrere baugleiche Gebäude hatten bereits 50 Jahre Nutzung hinter sich,
- es waren Instandsetzungsmaßnahmen an der Außenhülle erforderlich.

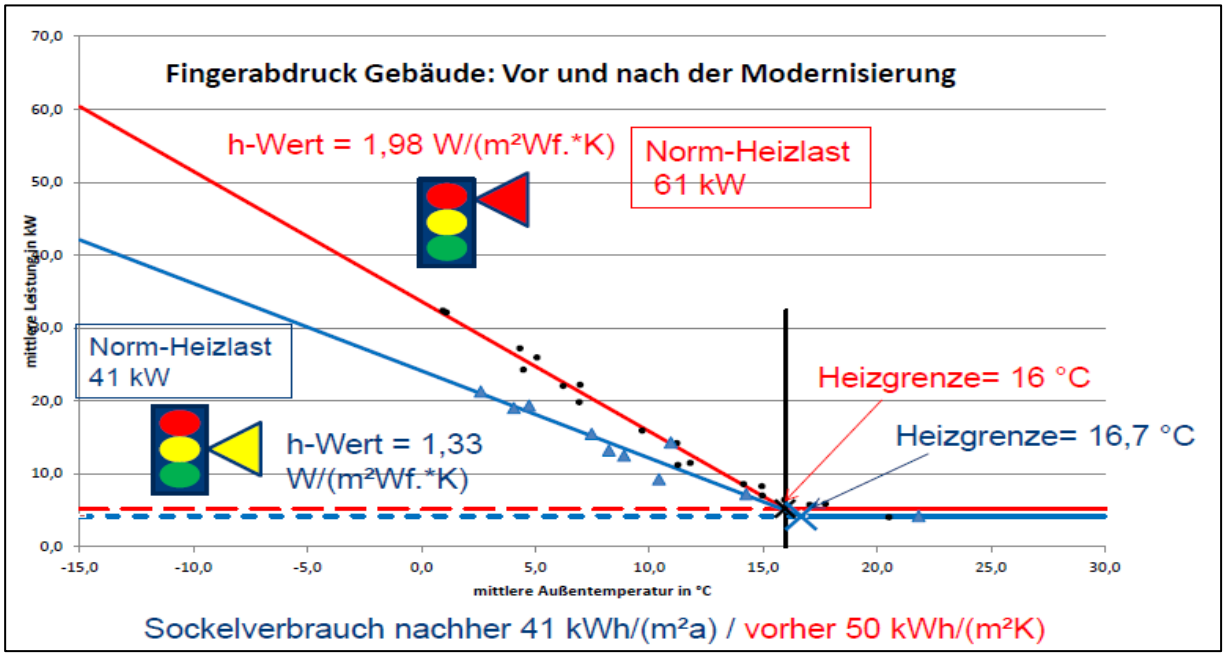


Abbildung 153 Beispielhafte Energieanalyse als Basis der Entscheidungsfindung sowie für das Monitoring, Grafik aus [95]

Anschließend wurde der Trinkwarmwassersockel näher betrachtet. Dieser konnte zwar von 50 auf 41 kWh/(m²a) verbessert werden, ist aber trotzdem um etwa den Faktor 3 höher als der Trinkwarmwassernutzen mit geschätzt 13 kWh/(m²a). Hier ist künftig weiterer Handlungsbedarf.

In einem dieser baugleichen Objekte wird künftig der Einsatz von Wärmepumpen mit Erdreichkollektoren bei gleichzeitigem Ausbau von PV auf den Ost-West-orientierten Dächern analysiert werden. Die Frage einer weiterhin zentralen gegenüber einer einfachen dezentralen Durchlauferhitzerlösung ist noch nicht endgültig geklärt. Auch die Mieterstromnutzung ist noch nicht geklärt. Eine Anfrage beim städtischen Energieversorgungsunternehmen ist seit einem halben Jahr (Stand August 2020) nicht beantwortet worden.

3.9 Sensitivitätsanalysen

Die Maßnahmenbewertung erfolgt unter den in Anhang 6 festgelegten Randdaten zur Bilanzierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung. Werden diese modifiziert, ergeben sich andere Erkenntnisse. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse könnten alle oder einzelne Varianten erneut unter anderen Randdaten durchgerechnet werden.

Darauf wird im Rahmen dieses Gutachtens jedoch verzichtet. Die auch den Gutachtern aus eigenen Konzepten bekannten Einflussgrößen werden stattdessen nachfolgend kommentiert und sanierungsfördernde und hemmende Randdaten benannt. Anschließend wird der Einfluss des Nutzerverhaltens gesondert besprochen.

Das Kapitel widmet sich in seinem zweiten Teil dreier Sensitivitätsanalysen im Detail, d. h. auch rechnerisch: der Frage der Klimaerwärmung und ihrem Einfluss auf den Rückgang der Verbräuche und Emissionen, der Frage einer sparsameren Trinkwarmwassernutzung und der Gestaltung von Netzen sowie der Frage einer Umgestaltung der Energieträgerbepreisung.

3.9.1 Sanierungsfördernde und -hemmende Randdaten

Pehnt et al. zeigen in ihrer Studie zum „Sanierungsfahrplan“ ausführlich die sich fortpflanzenden Bandbreiten von Ergebnissen, wenn sanierungsfördernde und hemmende Randdaten modifiziert werden [34]. In Anlehnung an die genannten Größen, erfolgt eine Übertragung auf dieses Gutachten. Lützkendorf und Enseling deklarieren alle genannten Größen unter dem Stichwort „Transparenzgebot für Annahmen und Randbedingungen“ [254]:

> *„Sie sollten zumindest für mit öffentlichen Mitteln geförderte Studien und Gutachten explizit und gesondert ausgewiesen werden.“*

Endenergie aus der Energiebilanz

Relevant ist die berechnete Endenergie vor und nach einer Maßnahme bzw. deren Differenz, die Endenergieeinsparung. Sie wird benötigt, um die getätigten Investitionen zumindest teilweise zu refinanzieren. Folgende Tendenzen ergeben sich:

- Endenergiedifferenz größer bestimmt → wirtschaftlicher
- Endenergiedifferenz kleiner bestimmt → unwirtschaftlicher

Ein Grund für zu groß bestimmt Endenergiedifferenzen sind zu optimistische Annahmen hinsichtlich der Effizienzmerkmale der Bauprodukte nach der Verbesserung und zu schlechte vorher. Darüber hinaus ist das Ignorieren des Reboundeffektes bzw. zumindest teilweise angepassten Nutzerverhaltens problematisch.

Die Gutachter haben versucht, diese Einflüsse bereits bei der Bilanzierung zu berücksichtigten. Es erfolgte:

- ein Abgleich der einzelnen Effizienzannahmen für die Bauprodukte mit Praxismessungen (Anhang 3.2 bis 3.5),
- ein Abgleich der berechneten Energiemengen mit Messwerten aus der Praxis (Anhang 5.2 und 5.4.1),
- eine Berücksichtigung der Einflüsse der Qualitätssicherung (Anhang 3.6),
- eine Berücksichtigung des veränderlichen Nutzerverhaltens, zumindest hinsichtlich der sich ergebenden Innentemperatur (geringer im Altbau. höher nach der Modernisierung)

Dennoch gilt für alle Maßnahmen: da die Beurteilung an einem Durchschnittsgebäude erfolgte, verschlechtern sich die Ergebnisse, wenn die Gebäude geringer belegt sind. Bei dem EZFH wurde eine Belegung mit 2,7 Personen auf 140 m² Wohnfläche zugrunde gelegt. Für den Fall zweier Personen ergeben sich in etwa vergleichbare Zahlen, die Belegung mit einer Person dürfte bei nahezu allen Maßnahmen – baulichen und anlagentechnischen – zu Unwirtschaftlichkeiten führen.

Energiepreise und Energiepreissteigerung

Den relevantesten Einzeleinfluss auf das Ergebnis haben die Energiepreise bzw. vor allem die Annahmen zu deren zukünftiger Steigerung, v. a. auch mit der geplanten CO_2-Bepreisung. Dies zeigt sich auch in anderen Studien, auch der Gutachter (z. B. [26]).

- hohe Energiepreissteigerung → wirtschaftlicher
- niedrige Energiepreissteigerung → unwirtschaftlicher

Typische Energiepreissteigerungen sind in Anhang 5.5.1 aus der Rückschau abgeleitet. Es ergeben sich aus den statistischen Daten der Endverbraucherpreise nominale Energiepreissteigerungen von etwa 3,0 bis 3,5 %/a für alle Energieträger gleichermaßen, unabhängig von deren Emissionsbewertungen.

Die Gutachter haben zunächst darauf verzichtet, eine Energiepreissteigerung in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einzurechnen, sondern sind bei allen Einzelmaßnahmen und Konzepten von heutigen Preisen ausgegangen. Es zeigt sich dann vielfach eine Unwirtschaftlichkeit.

Aus dieser Unwirtschaftlichkeit heraus wird ein notwendiger zusätzlicher Emissionspreis zum Einhalten des Emissionsbudgets und zum Erreichen von Klimaneutralität berechnet, der auf die heutigen Energiepreise aufgeschlagen werden müsste (Verfahrensbeschreibung siehe Anhang 6.1.2), um eine Grenzwirtschaftlichkeit zu bestimmen. Die Energiepreissteigerung ist in diesem Gutachten daher keine Annahme, sondern ein Ergebnis. Für alle untersuchten Maßnahmen ist er angegeben.

Daraus lässt sich zusammenfassen: viele Maßnahmen benötigen zum Erreichen der Grenzwirtschaftlichkeit einen zusätzlichen Emissionspreis, also eine Preiserhöhung. Für die baulichen Maßnahmen liegt dieser Wert beispielsweise in der Größenordnung 100 €/t CO_2. Das hieße für den Energieträger Erdgas, dass er ca. 30 % teurer werden müsste als heute.

Alternativ wird in Anhang 3.9.5 ein neues Preissystem für die Energiepreise erarbeitet. Es setzt nicht auf die Logik „künftiger Preis = heutiger Preis + Emissionspreis“, sondern geht davon aus, dass gelten muss „künftiger Preis = Emissionspreis“. In diesem System steigen alle emissionslastigen Energieträger stark an – verglichen mit dem heutigen Niveau, aber andere Preise sinken im Sinne der Umverteilung.

Kosten aus der Kostenschätzung

Relevant sind die Investitionskosten der Maßnahme. Sie bestimmen die Kapitalkosten, die den Haushalt anstelle der Energiekosten belasten. Folgende Tendenzen ergeben sich:

- Investitionskosten kleiner bestimmt → wirtschaftlicher
- Investitionskosten größer bestimmt → unwirtschaftlicher

Im Rahmen dieses Gutachtens wurde auf selbst erstellte Kostenfunktionen zurückgegriffen, um die Investitionssummen abzuschätzen, siehe Anhang 5.8.2. Basis sind die Literatur und eigene Projekterfahrungen. Die Kostenfunktionen wurden möglichst realistisch angenommen.

Um eine ausreichende rechnerische Sicherheit für die Umsetzung von qualitätssichernden Maßnahmen zu erzielen, wurde anschließend – konservativ – ein Preisaufschlag für die Kostengruppe 700 auf alle Maßnahmen von 30 % angesetzt. Es ist davon auszugehen, dass die energetische Sanierung zu den genannten Summen umsetzbar ist.

Darüber hinaus ist wesentlich, welche Kosten überhaupt einbezogen werden: die Gesamtkosten oder nur die energiebedingten Mehrkosten, weil ohnehin eine Maßnahme geplant ist (vgl. Hintergrunderläuterungen in Anhang 5.8.4). Es gilt:

- großer Sowiesokostenanteil / kleine energiebedingte Mehrkosten→ wirtschaftlicher
- Vollkosten → unwirtschaftlicher

Die Gutachter haben – sofern immer dies notwendig erschien – jeweils vergleichend zwei Fälle berechnet (Vollkost“ und „Mehrkosten“), um die Konsequenzen dieser Unterscheidung deutlich zu machen. Entsprechend ergeben sich häufig geringere oder gar keine Fördertatbestände, wenn eine Maßnahme ohnehin geplant ist. Andererseits sind größere Unwirtschaftlichkeiten und somit Zuschussnotwendigkeiten zu ermitteln, wenn Maßnahmen vorgezogen erfolgen, obwohl keine Sanierungsnotwendigkeit gegeben ist.

Kalkulationszins

Der Kalkulationszins wird im Rahmen der Berechnungen dieses Gutachtens mit 2 %/a angesetzt. Das ist aus heutiger Sicht ein typischer Wert, jedoch ist er insgesamt – rückblickend betrachtet – gering. Es gab Phasen deutlich höherer Finanzierungszinsen, vgl. Anhang 5.9.2. Folgende Tendenzen ergeben sich:

- Zins kleiner angenommen → wirtschaftlicher
- Zins größer angenommen → unwirtschaftlicher

Noch kleinere Zinsen führen zu besseren Ergebnissen (selbstverständlich auch negative Zinsen).

Steigen die Zinsen jedoch auf deutlich höhere Werte im Bereich > 4 %/a, sind die in diesem Gutachten berechneten Förderquoten zu gering. Sie müssten nach oben korrigiert werden. Alternativ wäre dann ein Ansatz der Förderung auch gegeben, den Zins künstlich (durch staatlichen Eingriff, siehe heutige KfW-Finanzierung) auf dem angenommenen niedrigen Niveau von z. B. 2 %/a zu halten.

Baupreisindex und Lernkurven

Auf eine Berücksichtigung sowohl von Baupreisindex (Verteuerung der Bauprodukte) als auch auf Lernkurven (Vergünstigung der Bauprodukte) wurde im Rahmen dieses Gutachtens im ersten Schrittverzichtet. Es würden sich folgende Tendenzen zeigen:

- positive Lernkurve, negativer Baupreisindex → wirtschaftlicher
- negative Lernkurve, positiver Baupreisindex → unwirtschaftlicher

Der aus der Rückschau positiv festgestellte Baupreisindex (vgl. Anhang 5.8.1) wurde vernachlässigt, weil er in etwa der Inflation folgt. Somit ist davon auszugehen, dass die Bauprodukte langfristig teurer werden, jedoch die Einkommen in etwa der gleichen Geschwindigkeit steigen (oder fallen). Damit ist – inflationsbereinigt – dieser Effekt zu vernachlässigen.

Auf einen Einbezug von Lernkurven für die Produktgruppen, die erkennbar noch starke Dynamik aufweisen (v. a. Wärmepumpen und Photovoltaik) wurde konservativ verzichtet. Zeigen sich künftig nennenswerte Investitionskostenminderungen, können die berechneten Förderquoten nach unten korrigiert werden.

Nutzungsdauer der Bauprodukte und Wartungsaufwand

Als letzte relevante Größe ist die Nutzungsdauer der Bauprodukte zu nennen, vgl. erläuternde Ausführungen in Anhang 5.9.1. Es gilt:

- längere Nutzungsdauer → wirtschaftlicher
- kürzere Nutzungsdauer → unwirtschaftlicher

Die Gutachter sind – der gelebten Praxis vieler Gebäudebesitzer folgend – von vergleichsweise langen Lebensdauern ausgegangen, bis der nächste Sanierungszyklus ansteht. Zum Ausgleich werden die Wartungs- und Instandhaltungskosten in die Wirtschaftlichkeitsbewertung einbezogen, was die Gesamtkosten erhöht. Auf der anderen Seite gehen die Gutachter davon aus, dass – wenn nach langer Zeit – eine Maßnahme angegangen wird, sie auch mit einem anspruchsvollen Standard realisiert wird.

3.9.2 Nutzereinfluss

Dem Nutzereinfluss wird ein separater Anhang gewidmet. Er beeinflusst die Höhe der zu erwartenden Energieeinsparungen und damit einerseits die Erfolge der Wirtschaftlichkeit (ökonomischer Aspekt) sowie auch die Emissionsminderung (ökologischer Aspekt).

Nutzerwünsche an eine Modernisierung

Eine ausführliche Bewertung möglicher positiver Effekte energetischer Modernisierungen auf der mikroökonomischen Ebene findet sich in der Studie zur „Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen“ des IWU für das BBSR [22]:

„Auch für Gebäudeeigentümer und Nutzer entstehen durch energetische Modernisierungen Zusatznutzen verschiedener Kategorien. […] Nachfolgend sind zudem die wesentlichsten Vorteile näher erläutert.

Insbesondere können durch Sanierungsmaßnahmen auch das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bewohner positiv beeinflusst werden. Nach der Erhebung zum Healthy Homes Barometer 2016 wäre es 82 % der in Deutschland Befragten sehr oder extrem wichtig, dass sich nach einer Sanierung das allgemeine Wohlbefinden zu Hause verbessert, während niedrigere Energiekosten von 78 % der Befragten als wichtig angesehen wurden. Dabei sind die Deutschen besonders sensibel für ein gutes Innenraumklima. Für 60 % der Befragten ist die Verbesserung der Innenraumluftqualität sehr oder extrem wichtig.“

Schwerpunkte einer Verbesserung des Standards der Wärmedämmung der Gebäudehülle sind verbesserte Behaglichkeit durch höhere Umgebungsflächentemperaturen auf der Innenseite der Außenwandflächen und höhere Dichtheit sowie geringerer Kaltluftabfall an verbesserten Fensterqualitäten. Auch können energetische Modernisierungen zu einer Verbesserung der sommerlichen Behaglichkeit und auch des Schallschutzes führen.

Für den selbstnutzenden Eigentümer in EZFH und in Eigentumswohnungen sind auch die mit einer Modernisierung einhergehende Wertsteigerung der Immobilie sowie die größere Unabhängigkeit von Energiepreissteigerungen sowie der Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz von Bedeutung.

Dies zeigen auch Befragungen zur Wohnzufriedenheit und Technikakzeptanz [22]. Sie belegen, dass Bewohner hocheffizienter Gebäude mit ihrer Wohnsituation zumeist sehr zufrieden sind. Die aus der Studie zitierte Tabelle 123 fasst den möglichen mikroökonomischen Nutzen energetischer Modernisierungsmaßnahmen zusammen.

Kategorie	Unterkategorie	Beschreibung
Gebäudequalität	Bauphysik	weniger Kondensat-, Feuchte- und Schimmelprobleme
	Einfachere Handhabung und Kontrolle durch den Nutzer	z. B. durch automatisierte Thermostatsteuerungen, einfachere Filterwechsel, schnellere Warmwasserversorgung
	Ästhetik und architektonische Einbindung	Aufwertung des Erscheinungsbildes
	Nutzflächen	Vergrößerung oder Verkleinerung der Nutzflächen
	Sicherheit (Einbruch und Unfälle)	Ersatz von Bauteilen durch solche mit aktuellen Standards, weniger Risiken (Unfall, Feuer, Einbruch)
Ökonomie	Weitestgehende Unabhängigkeit von Preisanstiegen	weitgehende Unabhängigkeit von Preisanstiegen gibt dem Nutzer ein Gefühl der Kontrolle und eine größere Sicherheit, den Level an Komfort halten zu können
	Wertsteigerung der Immobilie	Erzielbarkeit höherer Verkaufs- und Mietpreise aufgrund der ökologischen und ökonomischen Merkmale
Wohlbefinden	Thermischer Komfort	höherer thermischer Komfort aufgrund angenehmerer Raum- und Strahlungstemperaturen, geringerer Temperaturdifferenzen, weniger Zugluft und Luftfeuchte
	Innenraumluftqualität	Bessere Innenluftqualität (weniger Abgase, Feinstaub und mikrobielle Kontaminanten, die sich negativ auf die Gesundheit auswirken), bessere Gesundheit und höherer Komfort
	Lärmschutz	Besserer Lärmschutz gegen Geräusche von außen
	Stolz, Prestige, Ansehen	Gesteigerter Stolz/gesteigertes Prestige/Ansehen, ein besseres Verständnis für Umweltbewusstsein oder ein besseres Gewissen

Tabelle 123 Mögliche mikroökonomische Nutzen energetischer Modernisierungen, eigene Darstellung der Inhalte aus [22]

Rebound und Prebound

Ob der Vorteil einer Sanierung sich in gleicher Weise als entsprechend hohe Verminderung des Raumheizwärme- und des Endenergieverbrauchs niederschlägt, hängt wesentlich vom Nutzerverhalten in Anpassung an den neuen Gebäudestandard ab. Hier wird in der Fachwelt mit einer großen Zahl von theoretischen Studien darüber diskutiert, inwieweit Prebound- und Rebound-Effekt zu Mehrverbräuchen gegenüber den Plandaten führt, vgl. auch vertiefende Hintergrundinformationen in Anhang 5.2.

Einfluss der Nutzeraufklärung

Gegen den Reboundeffekt hilft ein Monitoring nach Abschluss der Modernisierungsmaßnahmen über einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren, um im Dialog zwischen Nutzer und Energieanalyse aus dem Verbrauch EAV den Erfolgsnachweis durch mögliche Anpassungen des Nutzerverhaltens tatsächlich zu erbringen. Diese zukünftig zu kommunizierende Vorgehensweise wird in diesem Gutachten vorausgesetzt, ohne den Nutzereinfluss im Berechnungsverfahren besonders zu berücksichtigen.

Ueno et al. stellen in ihrer japanischen Studie heraus, dass der Einfluss einer Verbrauchsanzeige, die auch unterjährige Verbräuche anzeigt, den Verbrauch um etwa 12 % verminderte – verglichen mit Haushalten ohne eine solche Anzeige [140].

Dies deckt sich grundsätzlich mit der Erfahrung zur Energieeinsparung, die sich allein daraus ergibt, dass eine Zählung überhaupt vorhanden ist. Loga et al. stellen in ihrer Studie für ISTA bereits 2003 fest [255], dass Nutzer im typischen Bestand etwa 20 % weniger Energieverbrauch erreichen, wenn es eine Umlage des Verbrauchs und somit eine separate Messung gibt.

Da die Messung und Dienstleistung der Umlage Geld kosten, auf der anderen Seite eine Einsparung nachweisbar ist, lässt sich eine Obergrenze für die Heizkostenabrechnungskosten ableiten (zu damaligen Preisen je nach Perspektive 1,5 bis 2 €/(m²a)). Anders herum ließen sich Gebäude identifizieren, die bereits so wenig verbrauchen, dass die Heizkostenabrechnung nicht mehr wirtschaftlich darstellbar ist.

Quantifizierung des Nutzereinflusses

Das Thema „Nutzerverhalten und seine Rückwirkung auf den Verbrauch“ ist nicht neu. Bereits 1999 publizierten Deutscher et al. in der damaligen „IKARUS“-Forschungsreihe des BMU dazu [139]. Sie variieren Raumtemperaturen, Luftwechselraten, die räumliche und zeitliche Teilbeheizung – einzeln und summiert. Bezogen auf einen mittleren Fall des Heizwärmebedarfs ergeben sich folgende Einflüsse:

- Einfluss nur der Raumtemperatur: -21 % bis +43 %
- Einfluss nur der Lüftung: -17 % bis + 25 %
- Einfluss nur der Teilbeheizung: 0 % bis -13 %
- Gesamtbandbreite aller Einflüsse: -35 % bis +79 %

Die Autoren stellen abschließend fest [139]:

> *„Die hier ermittelte maximal mögliche Reduktion des spezifischen Heizwärmebedarfs um 35 % hat erhebliche Einschränkungen des Komforts (verminderte Raumtemperatur, eingeschränkte Frischluftzufuhr) zu folge, die nur von wenigen Nutzern toleriert werden dürften. Die Auswirkungen schlechter Verhaltensvarianten sind deutlich großer, +79 % bezogen auf den Standardfall, als die der energiesparenden (-35 %).“*

Ein ähnlicher Ansatz wird in der Dissertation von Osterhage verfolgt, die auch zu ähnlichen Schlussfolgerungen kommt [256]. Sie unterstützt die Auswertungen durch Messwerte.

Stellt man die Ergebnisse von Deutscher et al. sowie von Osterhage unter Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeiten dar, ergibt sich die typische rechtsschiefe Verteilung von Verbrauchsdaten, die auch die großen Abrechnungsdienstleister, z. B. TECHEM publizieren [104]. Neben einem großen Mittelfeld zeigen gemessene Verbrauchskurven auch, dass oberhalb des typischen Verbrauches einzelne Ausreißer noch sehr viel größere Verbräuche aufweisen. Links davon liegen kleinere Verbräuche, die zwangsläufig vom Nullverbrauch begrenzt sind.

Die Thematik des Nutzereinflusses ist auch international von Bedeutung. Palmer et al. fassen die Ergebnisse einer britischen Studie zum Thema Nutzereinfluss mit folgenden Empfehlungen zusammen: die effektivste Einzelmaßnahme ist das Absenken der Raumtemperatur von 19°C auf 18°C, die Verschiebung des Heizbeginns von Oktober auf November, das Abschalten von Heizflächen in niedrig beheizten Räumen, Wasserspararmaturen [257]. Bis auf die Absolutniveaus, die zum Klima und den Bewohnern Großbritanniens passen, sind dies die gleichen Einflüsse wie in unseren Breiten.

Sozioökonomische und sozialpsychologische Aspekte

Eine gute Einordnung der Milieus und des sozioökonomischen Einflusses auf den Energieverbrauch geben Jochum et al. in ihrer Studie zur „Dämmbarkeit des Gebäudebestandes“ [127]. Sie unterscheiden in 10 Gruppen, die geprägt sind durch ihre soziale Lage (Unterschicht/untere Mittelschicht, mittlere Mittelschicht, obere Mittelschicht/Oberschicht) sowie ihre Grundorientierung bzgl. der Werte (traditionelle Werte, Modernisierung, Neuorientierung).

Anhand von typischen Verhaltensweisen der 10 Milieus werden sie dem Gebäude zugeordnet (wer wohnt wo) und auch den Verbrauchsspezifikationen (welche Gruppen sind für die oberen, mittleren und unteren Bereiche der typisch glockenkurvenverteilten Verbräuche verantwortlich). Folgende Aussage ergibt sich [127]:

> *„Es liegt auf der Hand, dass der Nutzenergieverbrauch sowohl von der Größe einer Bevölkerungsgruppe als auch von ihrem Nutzerverhalten abhängt. Während die Größe annähernd proportional auf den Energieverbrauch wirken dürfte, ist der Einfluss des Verhaltens hier nicht abschließend quantifizierbar. Die gezeigten Berechnungen zeigen aber, dass das Verhalten den Energieverbrauch durchaus stärker beeinflussen kann als der Bevölkerungsanteil.“*

Die zahlenmäßigen Erkenntnisse stellt Abbildung 154 dar. Interpretiert werden muss Folgendes: welche Bevölkerungsgruppen haben einen überdurchschnittlichen Verbrauch (unter der Kurve) und wie finanzstark sind sie (je größer und dunkler die Markierung, desto eher sind sie finanzkräftigen Milieus zuzuordnen). Es zeigt sich, dass die unter der Diagonalen liegenden Punkt mehrheitlich wenig finanzkräftig einzuordnen sind. Sie geben viel für Energie aus, haben jedoch weniger Rücklagen für die Modernisierung. Dies ist bei der Erarbeitung von Förderprogrammen zu bedenken.

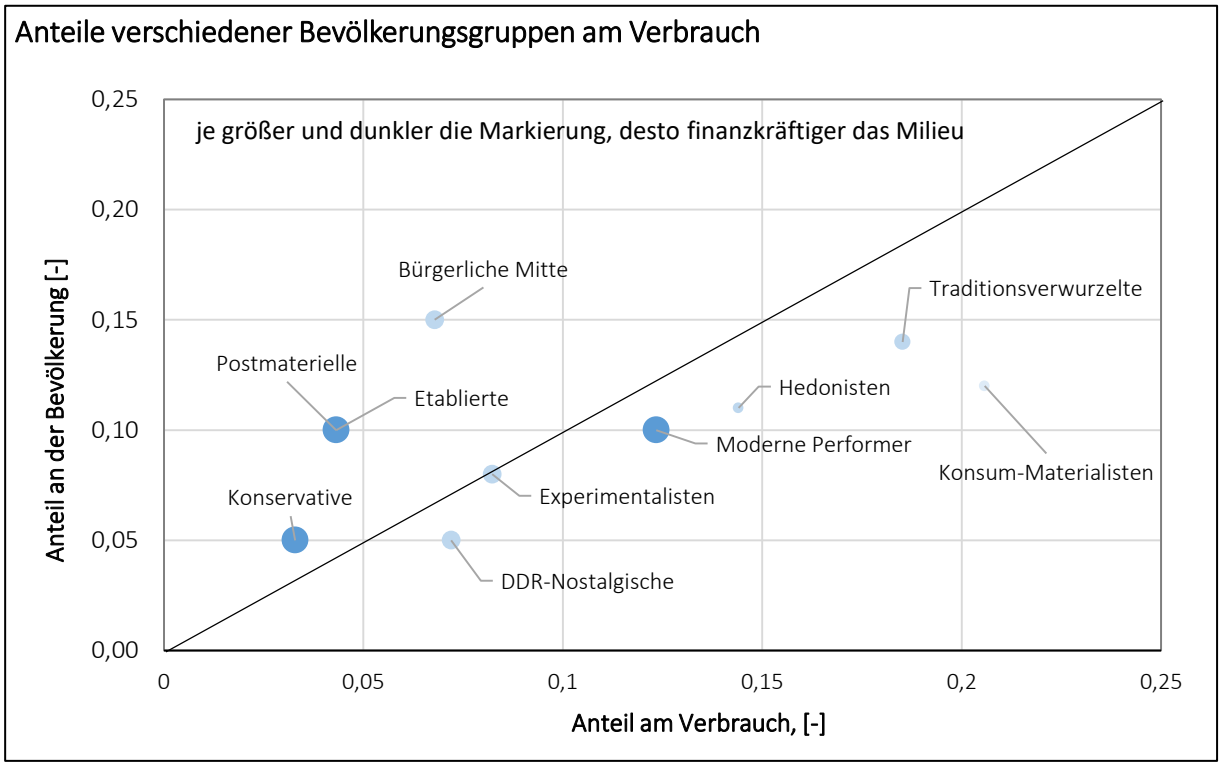


Abbildung 154 Anteile der Bevölkerungsgruppen am Milieu und Verbrauch, eigene Darstellung der Werte nach [127]

Eine sozialpsychologische Untersuchung unter Berücksichtigung des Geschlechts und Alters der Bewohner sind der Veröffentlichung von Cali et al. [210] zum „Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen“ zu finden. Anhand von Befragungen zeigt sich, dass:

- ältere Personen versuchen, die Temperatur in der Wohnung eher konstant zu halten, während jüngere die jeweils benutzten Räume beheizten
- weibliche Bewohner sind schneller demotiviert beim Umgang mit dem Heizsystem, weil es unvorhergesehen reagiert und sich nicht entsprechend den eigenen Wünschen an die Bedürfnisse anpassen lässt.

Das Thema Nutzerakzeptanz in hocheffizienten Gebäuden beleuchten Fisch et al. näher in der Berichterstattung zu den IBA-Projekten in Hamburg [233].

Einbezug veränderten Nutzerverhaltens in das Konzept

Sterchele et al. beziehen den Aspekt veränderten Nutzerverhaltens aktiv in ihre konzeptionellen Überlegungen zur Energiewende ein. Sie zeigen in der aktuellen Studie aus dem Jahr 2020 „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen“, dass durch einen Suffizienzpfad der Bedarf an Endenergie deutlich vermindert werden kann

Das bedeutet vor allem, dass künftig bedeutend weniger Erzeugungsleistung in Form von Windkraft und Photovoltaik ausgebaut werden muss (etwa 2/7 weniger als beim „business-as-usual“) [68].

Politische Instrumente

In einer aktuellen Untersuchung widmen sich Scherf et al. dem „Zusammenspiel von Makro- und Mikro-Instrumenten zur Energieverbrauchsreduktion durch verbrauchsarmes Verhalten“ [258]. Im ersten Teilbericht werden neben den Makro-Instrumenten (Mengensteuerung, Preissteuerung) auch Ansätze besprochen, die auf der Mikro-Ebene zu einer nachhaltigen Verbrauchsreduktion führen. Den jeweiligen Hemmnissen müssen zugeschnittene Instrumente entgegengesetzt werden:

- psychologischen Hemmnissen (Gewohnheiten, fehlende Motivation, Bequemlichkeit, Angst vor Komfortverlust, Unkenntnis zu Kosten und möglichen bzw. relevanten Einsparmaßnahmen, fehlende Wirksamkeitswahrnehmung) kann vor allem mit Informationen entgegengewirkt werden, auch Voreinstellung von Geräten könnten bereits bei Auslieferung energiesparend gewählt werden, intelligente Zähler und Verbrauchskennzeichnung von Geräten wirken entsprechend unterstützend,
- soziale Hemmnisse (gegenläufige soziale Normen, Probleme kollektiven Handelns) werden mit Bildungsmaßnahmen gemindert,
- ökonomische Hemmnisse (fehlende Investitionsmittel, unspezifische und unzureichende Anreize) können mit Mikrokrediten oder finanziellen Mitteln zum Elektrogeräteaustausch ausgeglichen werden.

Die Autorinnen machen deutlich, dass die Verhaltensänderung des Einzelnen zunächst ambitionierte gesellschaftliche Ziele und Visionen benötigt. Da der Einzelne die gesamtgesellschaftliche Energieverbrauchsreduktion jedoch nicht offenkundig sofort mit sich selbst verbindet, braucht es vor allem eine positive Einordnung des eigenen Handelns. Die reale Umsetzung ist beispielsweise durch das Konzept eines „CO_2-Kontos“ erreichbar. Auch unmittelbares Feedback und der Vergleich zu anderen durch z. B. Smart Meter werden als sinnvoll angesehen.

3.9.3 Detailaspekt 1: Klimaerwärmung

Anstelle der mittlere Außentemperaturen des Zeitraumes 1.1.1990 bis 31.12.2019 des Deutschen Wetterdienstes [259], welche dem Gutachten im Allgemeinen zugrunde liegen, wird ein modifizierter Datensatz verwendet. Die Auswirkungen auf das Durchschnittsgebäude (siehe Anhang 3.1) sowie die beiden exemplarischen Sanierungskonzepte aus Anhang 3.8 werden untersucht.

Vorab sei klargestellt, dass die Gutachter sich entschieden dafür einsetzen, dass die Klimaerwärmung begrenzt wird, wenn auch nachfolgend deutlich wird, dass sie den Bedarf der Gebäude „von allein“ mindert.

Modifizierte Randdaten

Aus dem Vergleich der Temperaturen der Zeiträume 1980 - 2009 sowie 1990 - 2019 ergibt sich eine Temperaturerhöhung. Während die Jahresmitteltemperatur für 1980-2009 bei 9,2°C lag, beträgt sie im Zeitraum 1990 - 2019 bereits 9,6°C. Eine lineare Fortschreibung zwei Jahrzehnte in die Zukunft ergäbe für 2020 - 2049 eine Jahresmitteltemperatur von 10,9°C.

Nach diesem Schema können alle Außentemperaturen unterhalb einer bestimmten Heizgrenztemperatur ausgewertet werden. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 124. Es kann unabhängig von der gewählten Heizgrenztemperatur festgestellt werden, dass in dem mittleren Zeitraum die Außentemperaturen etwa 0,2K gestiegen sind. Die Verschiebung ist identisch festzustellen. Die Anzahl der Heiztage nimmt ab. Unabhängig davon, welche Zeile betrachtet wird, in einem Jahrzehnt um 6 bis 8 Tage.

	1980 - 2009		1990 - 2019		2020 - 2049 (Fortschreibung)	
Heizgrenze	$\vartheta_{a,m}$ [°C]	t_{HP} [d/a]	$\vartheta_{a,m}$ [°C]	t_{HP} [d/a]	$\vartheta_{a,m}$ [°C]	t_{HP} [d/a]
12	4,5	223	4,7	217	5,1	193
13	5,0	239	5,2	233	5,6	210
14	5,6	257	5,8	249	6,1	227
15	6,2	275	6,4	267	6,7	243
16	6,7	292	6,9	284	7,2	260
17	7,3	308	7,5	301	7,8	277
18	7,7	321	7,9	315	8,3	293

Tabelle 124 Modifizierter Außentemperaturdatensatz [eigene Darstellung]

Wird diese Erkenntnis über die Jahrzehnte fortgeschrieben, ergeben sich die rechts in Tabelle 124 dargestellten Werte. Sie werden analog der sonstigen Vorgehensweise auch, zunächst durch Regressionsformeln abgebildet und anschließend für die Berechnung verwendet.

- Heizperiodendauer: $-8\frac{d}{a} + 16{,}7\ \frac{d}{a} \cdot\ \vartheta_{HG}[°C]$
- mittlere Außentemperatur in der Heizperiode: $-1{,}4°C + 0{,}54°C \cdot\ \vartheta_{HG}[°C]$

Die Heizperiode verkürzt sich – bezogen auf heute – unabhängig von der Frage unterhalb welcher Temperaturen geheizt wird um 22 bis 25 d/a.

Da die Jahresmitteltemperatur um 1,3 K angestiegen ist, wird dies auch für die jahresmittlere Erdreichtemperatur angenommen. Hinsichtlich der sehr kalten Tage ist festzustellen, dass diese wegfallen. So wird die minimale Außenlufttemperatur, die zur Dimensionierung der Heizungsanlage relevant ist, daher von -12°C auf -10°C angehoben. Im Erdreich werden am kältesten Tag statt -2°C nur noch 0°C angesetzt.

Die Strahlungsdaten werden belassen, wie in Anhang 6.1.3 abgeleitet.

Durchschnittsgebäude

Die Ergebnisse für das Durchschnittsgebäude zeigt Tabelle 125. Der Einfluss auf den Heizwärmebedarf beträgt etwa 14 %, die Endenergie für Heizung sinkt um etwa 13 bis 14 %. Die Energiekosten nehmen nur um 5 bis 7 % ab, weil es konstante Positionen (Trinkwarmwasser, Haushaltsstrom) gibt. Die Heizlast vermindert sich um 6 %.

Der marginale Anstieg der Erzeugereffizienzen ergibt sich aus der Verbesserung der Wärmepumpen (die allerdings in den Typgebäuden nur einen geringen Anteil ausmachen). Die Emissionen vermindern sich um 7 bis 9 % gegenüber heute. Der Einfluss auf das EZFH ist jeweils größer, weil es anteilig mehr Heizenergie aufweist. Der Fingerabdruck h des Gebäudes bleibt unabhängig von der Klimaerwärmung konstant.

Die Energiekosten sinken, was positiv für den Betrieb ist, aber insgesamt die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Maßnahmen verschlechtert. Allerdings sind nicht alle Maßnahmen gleichermaßen betroffen. Für die Erfolge von Sanierungen und deren Kosten kann im Detail Folgendes abgeleitet werden:

- die erzielbaren Ersparnisse von Dämmmaßnahmen und Fenstersanierungen nehmen ab, ihre Wirtschaftlichkeit verschlechtert sich damit
- Erzeuger können kleiner bemessen werden und daher kostengünstiger, was positiv für die Wirtschaftlichkeitsbewertung ist
- die insgesamt zu erzeugende Energiemenge nimmt ab, was die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit aller Wärmeerzeugungstechnologien verschlechtert, da mehr Betriebsbereitschaft festzustellen ist
- Wärmepumpen werden effizienter, weil einerseits die notwendigen Systemtemperaturen im Gebäude sinken und andererseits die Quellentemperaturen steigen
- sofern der Strom einer PV-Anlage auch für den Betrieb der Wärmepumpe benutzt wird, kann (absolut) weniger Strom genutzt werden, weil weniger Bedarf besteht (mehr Rückspeisung); allerdings muss auch weniger Strom zugekauft werden, weil der Bedarf kleiner ist
- der Einfluss der Trinkwassererwärmung auf die Bilanz und das Energiekonzept nimmt zu

	Typgebäude		EZFH		MFH	
				VAR Klima		VAR Klima
Globale Daten	Heizperiode	d/a	277	254	270	246
	mittlere Außentemperatur	°C	6,7	7,0	6,4	6,8
	Baustandard/ Fingerabdruck h	W/(m²K)	2,01	2,01	1,61	1,61
	Heizlast	W/m²	64,4	60,4	51,6	48,4
				-6 %		-6 %
Heizwärme	Transmission	kWh/(m²a)	145	129	113	101
	Lüftung	kWh/(m²a)	20	18	26	23
	Interne Gewinne Personen/Geräte	kWh/(m²a)	19	18	25	23
	Interne Gewinne Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	5	4	5	4
	Solargewinne	kWh/(m²a)	26	26	25	25
	Heizwärme	kWh/(m²a)	115	99	84	72
				-14 %		-14 %
Heizenergie	Heizwärme	kWh/(m²a)	115	99	84	72
	Zuschlag Qualitätssicherung	kWh/(m²a)	1	1	1	1
	Verteilung Heizung	kWh/(m²a)	4	4	5	5
	Speicherung Heizung	kWh/(m²a)	1	1	0	0
	Erzeugernutzwärmeabgabe Heizung	kWh/(m²a)	121	105	91	78
	Erzeugerverlust/gewinn Heizung	kWh/(m²a)	16	14	12	10
	Erzeugereffizienz Heizung	-	0,882	0,882	0,883	0,884
	Endenergie Heizung	kWh/(m²a)	137	119	102	88
				-13 %		-14 %
Trinkwarm-wasser	Trinkwarmwassernutzen	kWh/(m²a)	11	11	15	15
	Endenergie Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	26	26	32	33
Strombilanz	Haushaltsstrom	kWh/(m²a)	24	24	32	32
Endenergie	gesamt	kWh/(m²a)	187,3	169,0	16	152,5
Energiekosten	gesamt	€/a	2651	2467	9754	9259
				-7 %		-5 %
Emissionen	gesamt	t/a	48,9	44,6	46,5	43,2
				-9 %		-7 %

Tabelle 125 Endenergiebilanz für durchschnittliche EZFH und MFH bei heutigem und modifizierten Klimadaten [eigene Darstellung]

Gesamtmodernisierung EZFH und MFH

Die Beispiele zur Komplettmodernisierung des Ein- und Zweifamilienhauses bzw. Mehrfamilienhauses aus Anhang 3.8 werden wieder aufgegriffen. Für diesen Vergleich relevante Ergebnisse werden dargestellt und zeilenweise mit Symbolen kommentiert.

Die vorher beschriebenen Tendenzen sind hier sichtbar, zunächst für das EZFH siehe Tabelle 126. Teilweise heben sich angesprochene Effekte auf: die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe ist beispielsweise insgesamt konstant – sie verbessert sich zwar im Heizfall, dieser nimmt jedoch gegenüber der Trinkwassererwärmung anteilig ab.

Insgesamt sinken die Emissionen, weil weniger geheizt werden muss. Damit nimmt die mögliche prozentuale Emissionsminderung durch die gewählten Maßnahmen ab (Haushaltsstrom und Trinkwarmwasser werden anteilig wichtiger). Aus diesem Grund sind alle Kennwerte, bei denen die Emission eine Rolle spielt, schlechter – vor allem sichtbar am äquivalenten CO_2-Preis (es wird praktisch genauso viel Geld investiert, aber die Einsparung ist geringer).

Die Wirtschaftlichkeit wird schlechter, weil die Energieeinsparung geringer ist. Das zeigt sich am steigenden Fehlbetrag der Jahreskosten. Während – bei der Mehrkostenbetrachtung – heute noch eine sehr geringe Einsparung ermittelt werden kann, ist es unter den veränderten Klimadaten ein geringer Verlust. Die notwendigen Zuschüsse der Investitionen müssen steigen, um das größer gewordene Defizit auszugleichen. Das ist auch am zusätzlich notwendigen Emissionspreis sichtbar.

			EZFH	EZFH VAR Klima	
Maßnahmenbeschreibung					
Außenwandverbesserung von 1,0 auf 0,15 W/(m²K); Dachverbesserung von 0,44 auf 0,15 W/(m²K); Fensteraustausch von 2,7 auf 0,9 W/(m²K); Ersatz eines Öl-NT-Kessels durch eine Außenluftwärmepumpe; Einbau PV					
Detailkennwerte der Wärmebilanz					
Heizwärmebedarf	vorher	kWh/(m²a)	143	123	↘
	nachher	kWh/(m²a)	42	35	↘
Arbeitszahl Heizung	nachher	-	2,79	2,82	↗
Arbeitszahl gesamt	nachher	-	2,54	2,54	→
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	212	287	↘
	nachher	kWh/(m²a)	26,9	23,8	↘
Detailkennwerte Stromerzeugung (nachher)					
produzierter Strom		kWh/(m²a)	55,0	55,0	→
selbst genutzter Strom		kWh/(m²a)	29,0	26,0	↘
zurückgespeister Strom		kWh/(m²a)	26,0	29,0	↗
zusätzlich eingekaufter Strom		kWh/(m²a)	22,1	22,0	→
Ergebnisse					
Emission	vorher	kg/(m²a)	72,7	65,5	↘
	nachher	kg/(m²a)	9,8	9,8	→
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-86	-85	→
Investition	Vollkosten	T€	47,7	47,7	→
	Mehrkosten	T€	90,0	90,0	→
Äquivalenter CO_2-Preis	Vollkosten	€/t	374	425	↗
	Mehrkosten	€/t	252	285	↗
Dateninterpretation (Vollkosten)					
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1026	1199	↗
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	31	36	↗
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	115	152	↗
Dateninterpretation (Mehrkosten)					
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-66	109	↗
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	0	3	↗
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	0	14	↗

Tabelle 126 Bewertung des Maßnahmenpaketes im EZFH bei heutigem und modifizierten Klimadaten [eigene Darstellung]

Tabelle 127 zeigt die vergleichenden Ergebnisse für die Komplettverbesserung des MFH. Grundsätzlich sind dieselben Erkenntnisse wie beim EZFH zu gewinnen. Der klimatische Einfluss auf die Jahresarbeitszahl ist ebenfalls deutlich erkennbar. Die Notwendigkeit von Zuschüssen zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit steigt.

			MFH	MFH VAR Klima	
Maßnahmenbeschreibung					
Außenwandverbesserung von 1,0 auf 0,15 W/(m²K); Verbesserung des unteren Gebäudeabschlusses von 1,0 auf 0,20 W/(m²K); Ersatz eines Gas-NT-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe; Einbau PV					
Detailkennwerte der Wärmebilanz					
Heizwärmebedarf	vorher	kWh/(m²a)	90	77	↘
	nachher	kWh/(m²a)	29	23	↘
Arbeitszahl Heizung	nachher	-	3,63	3,78	↗
Arbeitszahl gesamt	nachher	-	2,94	2,97	↗
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	167	150	↘
	nachher	kWh/(m²a)	24,7	22,2	↘
Detailkennwerte Stromerzeugung (nachher)					
produzierter Strom		kWh/(m²a)	32,0	32,0	→
selbst genutzter Strom		kWh/(m²a)	23,8	21,6	↘
zurückgespeister Strom		kWh/(m²a)	8,2	10,4	↗
zusätzlich eingekaufter Strom		kWh/(m²a)	33,3	33,0	↘
Ergebnisse					
Emission	vorher	kg/(m²a)	49,1	45,6	↘
	nachher	kg/(m²a)	14,8	14,7	→
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-70	-68	↗
Investition	Vollkosten	T€	155,9	152,3	↘
	Mehrkosten	T€	120,1	116,8	↘
Äquivalenter CO_2-Preis	Vollkosten	€/t	381	410	↗
	Mehrkosten	€/t	375	401	↗
Dateninterpretation (Vollkosten)					
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	784	947	↗
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	13	16	↗
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	49	65	↗
Dateninterpretation (Mehrkosten)					
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	692	826	↗
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	11	14	↗
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	43	57	↗

Tabelle 127 Bewertung des Maßnahmenpaketes im MFH bei heutigem und modifizierten Klimadaten [eigene Darstellung]

Fazit Klimaerwärmung

Wird die Klimaerwärmung (hier: Außentemperaturerhöhung, Erdreichtemperaturerhöhung) berücksichtigt, sinken die Emissionen ohnehin um 6 bis 8 %. Dies ist als positiver Beitrag zur anvisierten Emissionsminderung bis 2050 zu verbuchen, jedoch nicht so zu verstehen, dass andere Maßnahmen dafür entfallen könnten.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeiten, die für einzelne Maßnahmen oder Pakete bestimmt werden, sind negative Auswirkungen festzustellen. Da der Verbrauch sinkt, sinken erzielbare Energieeinsparungen und somit Energiekosteneinsparungen, die zum Refinanzieren von Investitionen eigentlich benötigt würden.

Da die Klimaerwärmung vor allem zu veränderten Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten führt, sind Dämmmaßnahmen stärker betroffen als Maßnahmen an der Heizungsanlagentechnik. Nahezu unberührt von der Klimaerwärmung sind die Trinkwassererwärmung sowie die Haushaltsstromnutzung, die daher weiter in den Fokus des Interesses rücken.

Um Maßnahmenpakete nicht unwirtschaftlicher werden zu lassen, müssten beispielsweise Förderprogramme an die künftig geänderten Rahmendaten angepasst werden (anteilig größere Förderquote).

Die Gutachter plädieren in diesem Fall jedoch für einen Ausgleich über die zusätzliche steigende Emissionsbepreisung der Energieträger. Dies hat eine erkennbare Lenkungswirkung – je wärmer es langfristig wird, desto größer die Bepreisung.

Für die untersuchten Paketsanierungen von EZFH und MFH reichen unter den heutigen Randdaten zusätzliche etwa 15 bis 30 €/t aus (heutiges Klima mit Prognosewert für 2050). Das entspräche einer jährlichen zusätzlichen Bepreisung von 0,5 bis 1 €/ (t a).

3.9.4 Detailaspekt 2: Trinkwarmwassernutzen

Anstelle der aus heutiger Sicht festgestellten typischen Trinkwarmwassermengen werden nachfolgend ausgewählte Gebäudebeispiele mit einem geringeren Bedarf betrachtet.

Personenbezogener Warmwasserbedarf

Ausgehend von einem Tagesverbrauch von 30 l/(d·P) ergibt sich als heute typischer Wert eine jährliche Energiemenge von 564 kWh/(P·a) für das gezapfte Warmwasser. Dabei liegt die Kaltwassertemperatur bei 10,6°C (Erdreichtemperatur) und die Warmwassertemperatur bei 55°C. Mit diesem Wert werden standardmäßig die Berechnungen für dieses Gutachten erstellt.

Neuere Messungen zeigen vermehrt eine fallende Tendenz für den Kennwert, beispielsweise eigene Untersuchungen in Gebäuden der Wohnungswirtschaft [95]. Es besteht Forschungsbedarf, vor allem im Sektor Single-Haushalt sowie Einfamilienhaus.

Da belastbare Ergebnisse noch nicht vorliegen, wird als alternativer Kennwert 400 kWh/(P·a) angesetzt. Dieser Wert liegt in der Bandbreite von Verbrauchswerten, welche von TECHEM [141], aber auch co2online, ECOFYS und dem Messdienstleister ISTA [142] festgestellt werden kann.

Ein solcher Wert ergibt sich beispielsweise, wenn 22 l/(d·P) bei 55°C gezapft werden und die Kaltwassertemperatur mit 11,6°C angenommen wird (Erdreichtemperaturerhöhung aufgrund der Klimaerwärmung, siehe Anhang 3.9.4). Der verminderte Verbrauch ließe sich erklären durch den Einsatz sparsamerer Duscharmaturen (Durchfluss 7 bis 8 l/min anstelle durchschnittlichen 12 l/min), einer vermehrten Kaltwassernutzung an Handwaschbecken und Küchenspüle für Kleinzapfmengen, der vermehrten Nutzung von Duschangeboten außerhalb der Wohnung (Fitnessstudio etc.).

Durchschnittsgebäude

Der Einfluss der Trinkwassererwärmung im Durchschnittsgebäude ist überschaubar, siehe Tabelle 128. Da der größte Teil aller Emissionen und Kosten der Heizung zuzuschreiben ist, ergibt sich eine Minderung von etwa 2 %.

	Typgebäude		EZFH		MFH	
				VAR TWW		VAR TWW
Trinkwarmwasser	Trinkwarmwassernutzen	kWh/(m²a)	10,9	7,8	14,6	10,4
	Endenergie Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	25,9	22,3	32,0	27,3
Endenergie	Heizung und Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	163,0	159,5	134,5	129,8
Energiekosten	gesamt	€/a	2651	2605	9754	9519
				-2 %		-2 %
Emissionen	gesamt	t/a	48,9	48,0	46,5	45,3
				-2 %		-3 %

Tabelle 128 Endenergiebilanz für durchschnittliche EZFH und MFH bei heutigem und modifiziertem Trinkwarmwasserbedarf [eigene Darstellung]

Da in dem Durchschnittsgebäude die dezentral versorgten Objekte nur anteilig enthalten sind, ist der Einfluss eines verminderten Verbrauchs nur abgemindert erkennbar. Er ist vor allem dann relevant, wenn – wegen ungünstiger Verteilnetzgeometrie (siehe Anhang 3.4.2) – über eine Dezentralisierung der Trinkwassererwärmung nachgedacht wird.

Gesamtmodernisierung EZFH und MFH

Zur Verdeutlichung der Einflüsse werden die Beispiele zur Komplettmodernisierung des Ein- und Zweifamilienhauses bzw. Mehrfamilienhauses aus Anhang 3.8 wieder aufgegriffen.

Tabelle 129 zeigt die Ergebnisse für das Ein- und Zweifamilienhaus. Zum Vergleich ist eine Variante eingetragen, in der eine elektrische Trinkwassererwärmung (dezentral) anstelle der Wärmepumpe eingesetzt wird.

Erkennbar ist, dass der Systemnutzungsgrad des zentralen Systems mit Kessel sinkt (von 47 % beginnend) und nur noch 40 % beträgt, wenn der Bedarf geringer ist. Die Verteil- und Speicherverluste fallen deutlich mehr ins Gewicht.

Mit der Wärmepumpe steigt der Wert des Systemnutzungsgrads auf 121 % bzw. 103 %. Insbesondere der letztgenannte Wert ist aufschlussreich: er sagt aus, dass trotz des geringeren Nutzwärmebedarfs der Einsatz von Strom für die Wärmepumpe und die am Wasserhahn gezapfte Wärmemenge etwa gleich groß sind.

Mit dem Durchlauferhitzer wird das System energetisch schlechter. Es hat nur noch einen Nutzungsgrad von 81 % bzw. 75 %, weil nun keine Umweltwärme mehr eingebunden wird. Das zeigt sich auch in den steigenden Emissionen. Trotz des prinzipiell geringen Zuschusses würde keine Empfehlung für das System ausgesprochen. In dem EZFH ist das zentrale System ohnehin überschaubar und der Einsatz der Wärmepumpe besser (für die Emissionsminderung) als der eines elektrisch direkt beheizten Speichers.

			EZFH	EZFH VAR TWW	EZFH	EZFH VAR TWW
Maßnahmenbeschreibung						
Außenwandverbesserung von 1,0 auf 0,15 W/(m²K); Dachverbesserung von 0,44 auf 0,15 W/(m²K); Fensteraustausch von 2,7 auf 0,9 W/(m²K); Ersatz eines Öl-NT-Kessels durch eine Außenluftwärmepumpe; Einbau PV			… mit zentraler Trinkwassererwärmung (ohne Zirkulation)		… Trinkwarmwasser elektrisch dezentral	
Detailkennwerte der Wärmebilanz						
Nutzwärmebedarf Trinkwarmwasser		kWh/(m²a)	10,9	7,8	10,9	7,8
Endenergie Trinkwarmwasser	vorher	kWh/(m²a)	23,4	19,4	23,4	19,4
	nachher	kWh/(m²a)	9,1	7,5	13,5	10,4
Systemnutzungsgrad (Nutz-/Endenergie-Verhältnis)	vorher	-	0,47	0,40	0,47	0,40
	nachher	-	1,21	1,03	0,81	0,75
Ergebnisse						
Emission	vorher	kg/(m²a)	72,7	71,6	72,7	71,6
	nachher	kg/(m²a)	9,8	9,5	11,2	10,4
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-86	-87	-85	-85
Investition	Mehrkosten	T€	47,6	47,6	49,1	49,1
Äquivalenter CO_2-Preis	Mehrkosten	€/t	252	255	274	275
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-66	-67	309	242
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	0	0	9	7
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	0	0	35	28

Tabelle 129 Bewertung des Maßnahmenpaketes im EZFH bei heutigem und modifizierten Trinkwarmwasserbedarf [eigene Darstellung]

Tabelle 130 wiederholt die gleichen Überlegungen für das MFH-Sanierungspaket. Zunächst bleibt die zentrale Trinkwassererwärmung erhalten, alternativ wird sie ersetzt. In diesem System zeigt sich, dass bei geringem Trinkwarmwasserbedarf das dezentrale System in der Sanierung praktisch zu gleichen Emissionen führt wie das zentrale.

Es ist vor allem erkennbar: der Systemnutzungsgrad beträgt nur 80 %, wenn wenig Trinkwasser benötigt wird – trotz des Einsatzes einer Wärmepumpe. Die Zirkulationsverluste sind so groß, dass sie auch mit Umweltwärmenutzung nicht ausgeglichen werden. Am Ende ist mehr Strom aufzuwenden als bei dezentraler Trinkwassererwärmung. Das ist energetisch nicht optimal und optimalerweise zu vermeiden.

Der Einsatzbereich dezentraler Trinkwassererwärmung ist in Gebäuden gegeben, deren Systemnutzungsgrade unter 100 % liegt - trotz Einsatz einer Wärmepumpe. So lässt sich auch die sommerliche Überwärmung der Räume durch Leitungsabwärme minimieren (vgl. Anhang 3.4.2 und 3.4.4).

Die Thematik der betriebswirtschaftlichen Verluste sind im Zusammenhang mit der Bewertung von Wärmepumpen mehrfach angesprochen worden. Eine mögliche Lösung für dieses Problem wird im nachfolgenden Anhang 3.9.5. vorgestellt.

			MFH	MFH VAR TWW	MFH	MFH VAR TWW
Maßnahmenbeschreibung						
Außenwandverbesserung von 1,0 auf 0,15 W/(m²K); Verbesserung des unteren Gebäudeabschlusses von 1,0 auf 0,20 W/(m²K); Ersatz eines Gas-NT-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe; Einbau PV			… mit zentraler Trinkwassererwärmung (mit Zirkulation)		… Trinkwarmwasser elektrisch dezentral	
Detailkennwerte der Wärmebilanz						
Nutzwärmebedarf Trinkwarmwasser		kWh/(m²a)	14,6	10,4	14,6	10,4
Endenergie Trinkwarmwasser	vorher	kWh/(m²a)	45,1	39,8	45,1	39,8
	nachher	kWh/(m²a)	14,6	12,9	16,1	10,4
Systemnutzungsgrad (Nutz-/Endenergie-Verhältnis)	vorher	-	0,32	0,26	0,32	0,28
	nachher	-	1,00	0,80	0,91	0,88
Ergebnisse						
Emission	vorher	kg/(m²a)	49,1	48,0	49,1	48,0
	nachher	kg/(m²a)	14,8	14,1	15,8	14,2
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-70	-71	-68	-70
Investition	Mehrkosten	T€	120,1	120,1	128,9	128,9
Äquivalenter CO_2-Preis	Mehrkosten	€/t	375	380	436	431
Dateninterpretation						
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	692	674	2275	1886
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	11	11	33	27
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	43	42	145	119

Tabelle 130 Bewertung des Maßnahmenpaketes im MFH bei heutigem und modifizierten Trinkwarmwasserbedarf [eigene Darstellung]

3.9.5 Detailaspekt 3: Energiepreise

Die Tatsache, dass viele der strombasierten Versorgungsvarianten zwar deutlich emissionsmindernd sind, jedoch nicht wirtschaftlich, wurde mehrfach in Anhang 3.3.1 (Wärmepumpensysteme), Anhang 3.3.2 (Hybridsysteme), Anhang 3.4.2 (dezentrale Trinkwassererwärmung) und Anhang 3.5.1 (Kombisysteme mit Photovoltaik) thematisiert.

Auch Investitionskostenzuschüsse konnten vielfach das Problem nicht mindern, da nicht die jeweilige Investitionssumme problematisch war, sondern die Tatsache, dass die Energiekosten angestiegen waren. Das spricht dafür, dass eine grundlegend andere Energieträgerbepreisung angebracht ist. Das Problem wird im Rahmen dieses Gutachtens gelöst, indem eine optionale Energieträgerbewertung auf Basis der Emissionen erarbeitet und angewendet wird.

Die möglichen Modelle einer CO_2-Bepreisung werden hier nicht wiederholt. Es wird auf die Literatur verwiesen, z. B. die übersichtliche Zusammenstellung für 5 Optionen in der Studie von Lang aus dem Jahr 2017 [260] oder die Überlegungen zur Änderung des Energiesteuerrechts von Fiedler et al. [261]. Der Grundgedanke ist: die zusätzliche Besteuerung der emissionsintensiven Energieträger (eines oder aller Sektoren), wobei die Einnahmen z. B. der Refinanzierung anderer Preisbestandteile dienen. Beispielsweise kann die Stromsteuer entfallen oder die EEG-Umlage, so dass insbesondere der Strom günstiger wird.

Das alternative Bepreisungsmodell dieses Gutachtens verfolgt grundsätzlich dasselbe Ziel. Aber es setzt nicht auf die Logik „künftiger Preis = heutiger Preis + Emissionspreis“, sondern geht davon aus, dass gelten muss „künftiger Preis = Emissionspreis“. In diesem System steigen alle emissionslastigen Energieträger stark an – verglichen mit dem heutigen Niveau, aber andere Preise sinken im Sinne der Umverteilung.

Vorüberlegungen zur Findung modifizierter Preise

Grundlage der Berechnungen sind die Energiemengen, welche an die privaten Haushalte 2019 abgegeben wurden, sortiert nach Energieträger, siehe Anhang 5.4.1. Die Daten werden von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen AGEB bereitgestellt. Darüber hinaus werden die heutigen Endverbraucherenergiepreise verwendet, siehe Anhang 5.5.1 – wie sie vom BMWi für 2019 bekannt gegeben wurden. Der dritte Eingangsdatenpunkt sind die heute typischen Emissionsfaktoren der einzelnen Energieträger, siehe Anhang 5.5.3 – wie von IWU und UBA kommuniziert.

Die modifizierten Energieträgerpreise werden so festgelegt, dass in Summe dieselben Energiekosten entstehen (über alle Gebäude und Energieträger zusammengefasst), zunächst also weder die Verbraucher noch die Versorger insgesamt anders belastet werden. Jedoch sollen die Preise sich strikt aus den Emissionen ableiten lassen.

Die Summe aller Energieträger – jeder multipliziert mit seinem Preis – ergibt heute Gesamtenergiekosten aller Haushalte von 74,3 Mrd. €/a (Abbildung 156 oben). Dabei werden insgesamt 168 Mio. t CO_2-Äquivalent emittiert (Abbildung 155). Folgende Vereinfachungen wurden dabei getroffen: für alle „Gase“ gilt der Preis und Emissionsfaktor für Erdgas, für alle Mineralöle die beiden Kennwerte des Heizöls, für Briketts wurde ein gemittelter Emissionsfaktor aus Stein- und Braunkohle angesetzt, alle regenerativen Energien wurden als Pellets bewertet.

Es zeigt sich eine deutliche Ungleichbewertung der Anteile an den Kosten und Emissionen. Jedoch kann ein gemittelter Emissionspreis über alle Energieträger von 442 €/t CO_2 bestimmt werden.

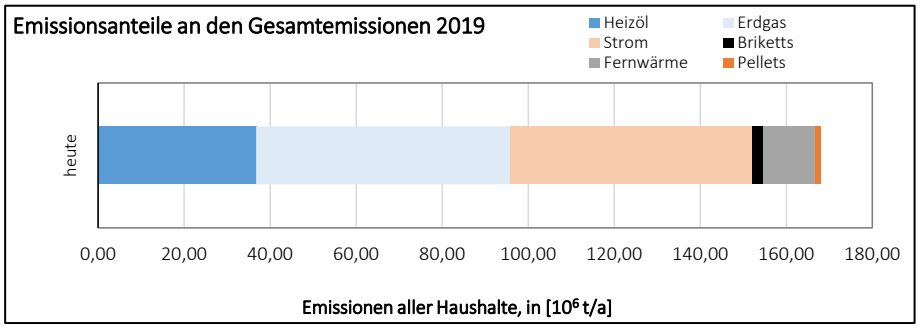


Abbildung 155 Emissionen aller Haushalte nach Energieträger heute [eigene Darstellung]

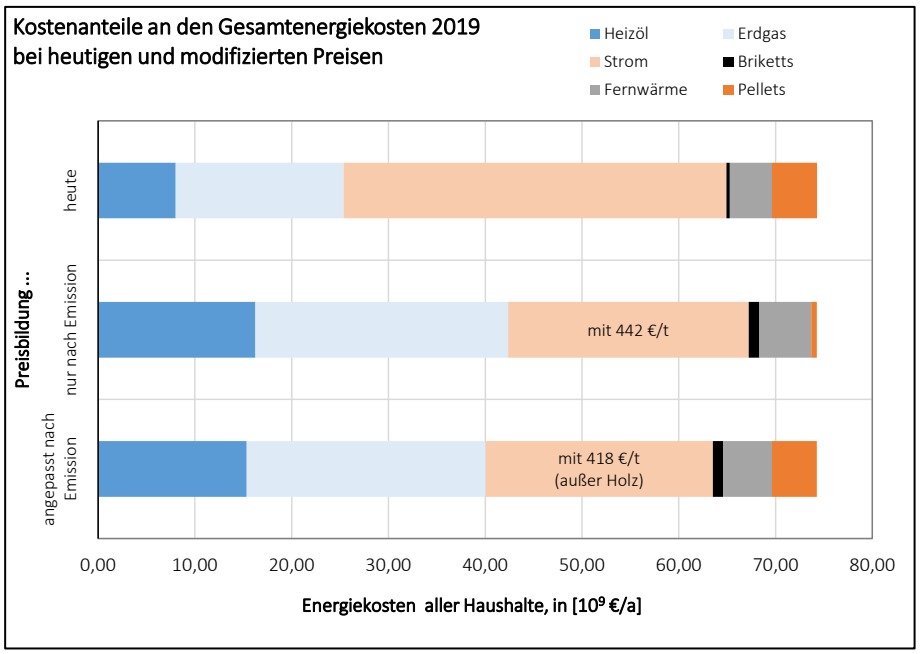


Abbildung 156 Energiekosten aller Haushalte nach Energieträger heute und in modifizierter Bepreisung [eigene Darstellung]

Anhand des so bestimmten mittleren „CO_2-basierten Energiepreises“ werden neue Energiepreise für alle Energieträger ermittelt. Jeder Energieträger wird proportional zu seiner Emissionsmenge bepreist.

Das Resultat zeigt Abbildung 157 (hellblaue Säulen). Die Jahresgesamtkosten sind in Abbildung 156, mittlerer Balken zu sehen. Die Werte sind insgesamt plausibel, jedoch ergibt sich ein sehr geringer Pelletpreis (wegen der sehr geringen Emissionen dieses Energieträgers). Der Wert ist mit 1 Cent/kWh unrealistisch klein. Es ist davon auszugehen, dass dieser unter dem Herstellungspreis liegt. Daher wurde der Pelletpreis von der Betrachtung ausgeschlossen und auf seinen heutigen Wert festgesetzt.

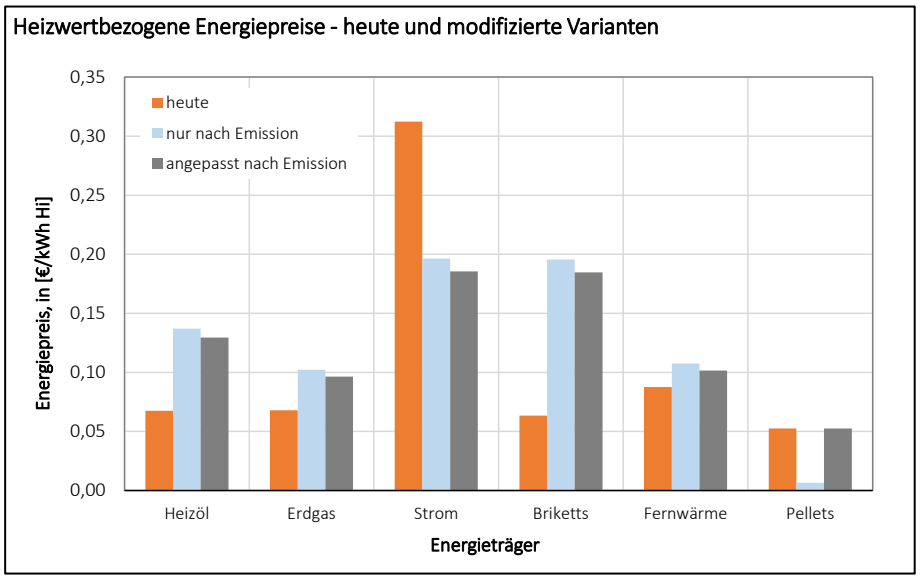


Abbildung 157 Heizwertbezogene Energiepreise – heute und modifizierte Werte [eigene Darstellung]

Anschließend wird die Berechnung analog wiederholt, jedoch ohne den Einbezug von Holz. Für die restlichen Energieträger liegt der sich dann ergebende Emissionspreis bei 418 €/t CO_2. Die einzelnen Energiepreise, die sich daraus ergeben, zeigt Abbildung 157 in den grauen Säulen. Pellets sind – weil so festgelegt – genauso teuer wie heute. Ähnliches gilt für Fernwärme. Briketts sind fast 3 x teurer, Strom dafür mehr als ⅓ günstiger. Erdgas und Heizöl sind entsprechend ca. ⅓ bzw. Faktor 2 teurer. Die sich dann ergebenden Jahresgesamtkosten sind in Abbildung 156, unterer Balken zu sehen.

Abbildung 158 führt die Inhalte aus Abbildung 155 (jährliche absolute Emissionen der Energieträger in [t/a]) und Abbildung 156 (jährliche absolute Kosten der Energieträger in [€/a]) zusammen. Aus den Werten lässt sich ermitteln, wie teuer aus Basis der heutigen Energiepreise die Tonne CO_2-Emission eines jeden Energieträgers ist. Mit dem Erdgaspreis, wenn man ihn als reinen Emissionspreis auffassen würde, kostete die Tonne Emissionen 294 €. Für Strom sind es heute 704 €/t. Die anderen Werte sind (als orange Säulen) dem Bild zu entnehmen. Der Energieträger Holz ist nicht dargestellt, da er die Größenachse sprengen würde: es ergäben sich 3500 €/t.

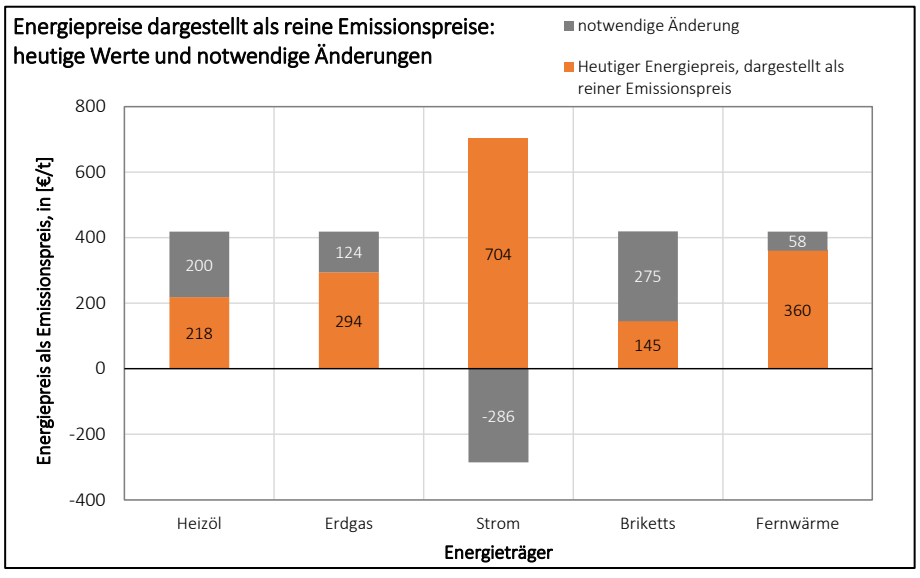


Abbildung 158 Energiepreise auf Basis der reinen Emissionspreise [eigene Darstellung]

Zusätzlich ist die Ziellinie eingetragen: 418 €/t, wie oben geschildert. Dies ist das gewichtete Mittel aller Energieträgerkosten und aller Emissionen. Für jeden Energieträger ist nun in Form des grauen Balkens erkennbar, wie weit er vom Zielwert einer einheitlichen Bepreisung entfernt ist. Im Falle von Erdgas ist ein Zuschlag von gut 40 % auf den heutigen Preis notwendig, bei Strom ein Abschlag von 40 % bezogen auf den heutigen Preis.

Festlegung von Werten

Da die in Abbildung 157 dargestellten Werte heizwertbezogen sind, jedoch alle Berechnungen in diesem Gutachten brennwertbezogen durchgeführt werden, muss eine Umrechnung erfolgen. Das Vorgehen ist analog dem für die heutigen Energiepreise und in Anhang 5.5.1 erläutert.

Tabelle 131 zeigt die Festlegungen für die modifizierten Energieträgerpreise, die im Rahmen des vorliegenden Gutachtens gelten. Es werden keine gesonderten Wärmepumpentarife mehr berechnet.

Energieträger	Energiepreis, ggf. brennwertbezogen, gerundet	informativ: Umrechnung Brennwert/Heizwert	
		Umrechnungsfaktor	Preis, heizwertbezogen
	[€/kWh]	[-]	[€/kWh]
Erdgas	0,087	1,11	0,097
Heizöl	0,122	1,06	0,130
Holz	0,050	1,06	0,052
Fernwärme	0,102	1,00	0,102
Strom (Bezug, Normaltarif)	0,186	1,00	0,186
Strom (Bezug, Wärmepumpe)	0,186	1,00	0,186
Strom (Einspeisung)	0,066	1,00	0,066

Tabelle 131 Energieträgerpreise, modifiziert [eigene Darstellung]

Außerdem wird davon ausgegangen, dass die neue Einspeisevergütung für Photovoltaik nur noch in der Höhe des Gestehungspreises liegt (vgl. Anhang 3.5.1). Der Stromproduzent macht dann mit der Einspeisung weder Gewinn, noch Verlust. Jedoch ist die Selbstnutzung vorteilhafter als die Rückspeisung.

Modifizierte Grundbilanz

Tabelle 132 zeigt die Ergebnisse für das Durchschnittsgebäude, zunächst in der Version der Energiebilanz mit Qualitätssicherung. Mit den angepassten Preisen ergeben sich im durchschnittlichen Ein- und Zweifamilienhaus etwas höhere Energiekosten als vorher. Für das MFH sind etwas geringere Kosten als heute bestimmt worden. Während die Wärmepreise gestiegen sind, sind die Strompreise gefallen. Dadurch profitiert das „stromlastigere“ MFH etwas, während es für das „wärmelastigere“ EZFH ungünstiger wird.

	Typgebäude		EZFH		MFH	
				VAR Preise		VAR Preise
Endenergie	Heizung und Trinkwarmwasser	kWh/(m²a)	163		135	
	Haushaltsstrom	kWh/(m²a)	24		32	
Emissionen	gesamt	kg/(m²a)	48,9		46,5	
Energiekosten	gesamt	€/(m²a)	18,7	20,5	20,8	19,5
		€/a	2651	2903	9754	9186

Tabelle 132 Energiekosten für durchschnittliche EZFH und MFH (qualitätsgesichert), heutige und modifizierte Energiepreise [eigene Darstellung]

Im Mittel aller Gebäude dürften die Energiekosten sich nicht ändern – das war die Ausgangsvoraussetzung der Preisfestlegung. Für die Grundbilanz liegt der über alle Gebäude summierte Wert bei 71,5 Mrd. €/a. In der Variante ergeben sich 75,5 Mrd. €/a. Die Annäherung erscheint nah genug (5 % Fehler). Der Grund für die Abweichungen sind die leicht unterschiedlichen Endenergiemengen, die mit den eigenen Bilanzen bestimmt werden (in den Typgebäuden) verglichen mit der Endenergie der AGEB, die der neuen Preisfindung zugrunde liegt.

Es wird für die weiteren Auswertungen davon ausgegangen, dass die neuen Preise hinreichend genau in das Bilanzierungsmodell passen.

Modifizierter Energiepreis bei der Dämmung

Exemplarisch für alle Varianten von Dämmung der Gebäudehülle wird die Außenwanddämmung analog Anhang 3.2.1 erneut mit den modifizierten Energiepreisen untersucht. Die Varianten einer erstmaligen Außenwanddämmung mit Verwendung der Mehrkosten waren ohnehin bereits wirtschaftlich. Es bleiben die Varianten der Vollkosten im Durchschnittsgebäude. Es zeigt sich, dass:

- bei der Außendämmung der ungedämmten Wand (mit Durchschnittstechnik) vorher ein Zuschuss von 1 bis 7 % der Investition notwendig war; dieser Zuschuss ist mit den neuen Energiepreisen nicht mehr notwendig
- bei der Innendämmung der ungedämmten Wand (mit Durchschnittstechnik) ein Zuschuss von max. 2 % der Investition notwendig war; dieser Zuschuss ist mit den neuen Energiepreisen nicht mehr notwendig

Wird die Dämmung aufgedoppelt, werden keine Zuschüsse von 9 bzw. 22 % berechnet, sondern 0 und 3 %. Es tritt in etwa Grenzwirtschaftlichkeit ein. Weitere Varianten werden nicht näher untersucht: es ist absehbar, mit steigenden Gas- und Ölpreisen, die den Hauptteil der Energieträger im Durchschnittsgebäude ausmachen, stellt sich bei mittlerer Technikausstattung eine Wirtschaftlichkeit ein.

Kritisch ist nur die nachträgliche Außendämmung, wenn eine Wärmepumpe im Gebäude installiert ist. Da hier die Energieträgerpreise sinken, verschlechtert sich das Bild grundsätzlich gegenüber vorher. Das bereits in Anhang 3.2.1 untersuchte Beispiel einer Außenluftwärmepumpe wird erneut untersucht. Es ist immer noch eine Wirtschaftlichkeit ohne Zuschussnotwendigkeit gegeben.

Da die Kellerdecken- und Geschossdeckendämmungen bereits vorher keinen Zuschuss benötigten, ist dies auch nun nicht der Fall. Lediglich die sehr teuren Bodenplattensanierungen, Fenstersanierungen oder auch Dachsanierungen (nur auf Basis der Vollkosten) sind immer noch zuschussbedürftig.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die modifizierten Energiepreise die Zuschussnotwendigkeiten bei den Dämmmaßnahmen, die an eine Sanierung anknüpfen, auf null herabsetzen. Das Nachdämmen von Außenwänden und Dächern wird dadurch ebenfalls grenzwirtschaftlich. Das Dämmen der Decken wird noch wirtschaftlicher als vorher schon. Das gilt auch, wenn das Gebäude mit einer Wärmepumpe versorgt wird.

Modifizierter Energiepreis bei der Fenstersanierung

Die Fenstersanierung nach Anhang 3.2.2 wird erneut untersucht. Es zeigt sich, dass:

- bei der Mehrkostenbetrachtung der notwendige Zuschuss von vorher ca. 20 % auf ca. 15 % sinkt
- bei der Vollkostenbetrachtung der notwendige Zuschuss von vorher ca. 70 % auf ca. 55 % sinkt

Fenstersanierungen werden wirtschaftlicher, erreichen aber keine Grenzwirtschaftlichkeit. Hier wäre tatsächlich eine Bezuschussung von etwa 15 % - bei einer ohnehin erforderlichen Verbesserung – notwendig.

Modifizierter Energiepreis beim Wärmepumpeneinbau

Exemplarisch werden acht Varianten für einen Wärmepumpeneinbau erneut untersucht, welche in Anhang 3.3.1 detailliert besprochen werden.

- Einbau einer Wärmepumpe in ein Durchschnittsgebäude
    - auf Basis der Mehrkosten gerechnet, Ersatz eines Öl-NT-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe; EZFH 0 % (vorher 96 %), MFH 0 % (vorher 105 %)
    - auf Basis der Mehrkosten gerechnet, Ersatz eines Gas-NT-Kessels durch eine Außenluftwärmepumpe; EZFH 10 % (vorher 109 %), MFH 0 % (vorher 138 %)
    - auf Basis der Vollkosten gerechnet, Ersatz eines Ölbrennwertkessels durch eine Erdreichwärmepumpe; EZFH 22 % (vorher 111 %), MFH 0 % (vorher 116 %)
    - auf Basis der Vollkosten gerechnet, Ersatz eines Gasbrennwertkessels durch eine Außenluftwärmepumpe; EZFH 69 % (vorher 158 %), MFH 52 % (vorher 195 %)

Wärmepumpenlösungen im Durchschnittsgebäude werden teilweise auch ohne Betrieb einer eigenen PV-Anlage wirtschaftlich. Dies ist bei Ersatz von Ölkesseln gegeben, die ohnehin getauscht werden müssen. Erdgaskessel, die ohnehin getauscht werden, benötigten einer Förderung in der Größenordnung von max. 20 %. Dieser Zuschuss reicht auch aus, um Ölkessel zu tauschen, die noch nicht für eine Modernisierung vorgesehen sind.

- Einbau einer Wärmepumpe in ein gutes Gebäude
  - auf Basis der Mehrkosten gerechnet, Ersatz eines Öl-NT-Kessels durch eine Außenluftwärmepumpe; EZFH 0 % (vorher 72 %), MFH 0 % (vorher 125 %)
  - auf Basis der Mehrkosten gerechnet, Ersatz eines Gas-NT-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe; EZFH 32 % (vorher 76 %), MFH 39 % (vorher 101 %)
  - auf Basis der Vollkosten gerechnet, Ersatz eines Gasbrennwertkessels durch eine Erdreichwärmepumpe; EZFH 65 % (vorher 104 %), MFH 58 % (vorher 113 %)
  - auf Basis der Vollkosten gerechnet, Ersatz eines Ölbrennwertkessels durch eine Außenluftwärmepumpe; EZFH 5 % (vorher 136 %), MFH 0 % (vorher 178 %)

Wärmepumpenlösungen im guten Gebäude weisen etwas schlechtere Wirtschaftlichkeiten auf, vor allem mit Gaskessel – hier ergeben sich Fördertatbestände von 40 % und mehr. Allerdings der Tausch von defekten Ölkesseln benötigt keine Förderung mehr, der von intakten Ölkessel (vorzeitig) nur eine geringe Förderung.

Modifizierter Energiepreis bei Photovoltaik und Solarthermie

Die modifizierten Energiepreise verbessern nur geringfügig die Bewertung der Solarthermie, vgl. Anhang 3.5.2. Die für das Durchschnittsgebäude berechneten notwendigen Zuschüsse auf die Investitionskosten betragen:

- EZFH 50 % (vorher 57 %) MFH 58 % (vorher 60 %)

Das Bild für die Photovoltaikanlage verschlechtert sich, vor allem da die Einspeisevergütung grenzwertig auf den Gestehungspreis des produzierten Stroms gesetzt wurde. Es werden keine wirtschaftlichen Gewinne mehr erzielt, aber auch keine nennenswerten Verluste. Es ergibt sich anhand des Durchschnittsgebäudes aus Anhang 3.5.1 (Strom wird nur für Haushaltsstromanwendungen eingesetzt):

- EZFH 1 % (vorher 0 %) MFH 0 % (vorher 0 %)

Beim EZFH ist die Grenzwirtschaftlichkeit gut getroffen. Die Wirtschaftlichkeit kann verbessert werden, wenn der Strom für weitere Anwendungen eingesetzt wird.

Die modifizierten Energiepreise ändern das Bild für Solarthermie kaum; sie kann mit PV nicht konkurrieren. PV lohnt sich dagegen immer noch, aber mehr, wenn eine Wärmepumpe oder eine elektrische Trinkwassererwärmung im Gebäude betrieben wird. Es sind keine Zuschüsse notwendig.

Modifizierter Energiepreis bei der Dezentralisierung der Trinkwarmwasserbereitung mit PV

Die Dezentralisierung der Trinkwarmwasserbereitung mit Photovoltaik, wie sie Anhang 3.5.1 untersucht wurde, verschlechtert sich wirtschaftlich. Da mit der PV-Einspeisung nicht mehr so große Überschüsse erwirtschaftet werden können, ist der Effekt der Quersubventionierung geringer. Für das Durchschnittsgebäude, in dem eine zentrale Anlage gegen eine dezentrale ersetzt wird, steigen die notwendigen Investitionskostenzuschüsse sogar an:

- EZFH 40 % (vorher 27 %) MFH 23 % (vorher 17 %)

Wird dagegen nur Netzstrom bezogen, verbessert sich das Bild deutlich, weil die Strompreise sinken. Jedoch ergibt sich – ebenso wie in Anhang 3.4.2 besprochen – keine Wirtschaftlichkeit. Der notwendige Zuschuss wäre sehr groß.

- EZFH 159 % (vorher 357 %) MFH 81 % (vorher 193 %)

Die Dezentralisierung der Trinkwassererwärmung wird weder bevorzugt, noch benachteiligt. Sie ist weiterhin empfohlen für Objekte mit unterdurchschnittlichem Trinkwarmwasserbedarf und ungünstigen Verteilnetzgeometrien.

Modifizierter Energiepreis für Maßnahmenpakete

Abschließend werden die Maßnahmenpakete aus Dämmung, Wärmepumpeneinbau und Photovoltaik für das Ein- und Zweifamilienhauses bzw. Mehrfamilienhauses aus Anhang 3.8 aufgegriffen. Für diesen Vergleich relevante Ergebnisse werden dargestellt und zeilenweise mit Symbolen kommentiert.

Tabelle 133 zeigt die Ergebnisse für das EZFH. Es hat einen Heizölkessel. Das hieße, die neue Energieträgerbepreisung würde zunächst einen massiven Sprung der Energiekosten nach oben bewirken (von 2.900 auf 4300 €/a). Bezogen auf dieses neue Niveau sind die Maßnahmen selbstverständlich wirtschaftlich und kommen ohne Zuschuss aus. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Ölkesselbetreiber tendenziell schnell reagieren müssen und entsprechend das Paket oder Teile davon umsetzen.

Für den Gebäudebesitzer müssten auch die Energiekosten vorher (ca. 2.900 €/a) mit den Energiekosten plus Kapitalkosten nachher verglichen werden (grau markiert). Diese liegen als Mehrkosten gerechnet bei 2.200 €/a oder bei 3.700 €/a als Vollkosten. Die anlasslose Sanierung würde also im Quervergleich immer noch einen Zuschuss benötigen, eine Kopplung an die sowieso anstehenden Maßnahmen aber nicht.

Der Zuschuss wäre allerdings etwas kleiner (bei ca. 25 %), weil durch die geringeren Energiekosten im neuen Bewertungssystem der Verlust etwas kleiner ausfällt.

			EZFH	EZFH VAR Preise	
Maßnahmenbeschreibung					
Außenwandverbesserung von 1,0 auf 0,15 W/(m²K); Dachverbesserung von 0,44 auf 0,15 W/(m²K); Fensteraustausch von 2,7 auf 0,9 W/(m²K); Ersatz eines Öl-NT-Kessels durch eine Außenluftwärmepumpe; Einbau PV					
Detailkennwerte der Wärmebilanz					
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	212	212	
	nachher	kWh/(m²a)	26,9	26,9	
Detailkennwerte der Kostenbilanz					
Energiekosten	vorher	€/a	2.866	4.304	↗
	nachher	€/a	556	340	↘
Kapitalkosten	Vollkosten	€/a	3.335	3.335	
	Mehrkosten	€/a	1.810	1.810	
Ergebnisse					
Emission	vorher	kg/(m²a)	72,7	72,7	
	nachher	kg/(m²a)	9,8	9,8	
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-86	-85	
Investition	Vollkosten	T€	47,7	47,7	
	Mehrkosten	T€	90,0	90,0	
Äquivalenter CO_2-Preis	Vollkosten	€/t	374	374	
	Mehrkosten	€/t	252	252	
Dateninterpretation (Vollkosten)					
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	1026	-629	↘
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	31	0	↘
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	115	0	↘
Dateninterpretation (Mehrkosten)					
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	-66	-1720	↘
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	0	0	↘
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	0	0	↘

Tabelle 133 Bewertung des Maßnahmenpaketes im EZFH bei heutigem und modifizierten Energiepreisen [eigene Darstellung]

Tabelle 134 zeigt die Ergebnisse für das MFH mit recht ähnlichen Aussagen. Zunächst würde die neue Bepreisung einen Sprung der Energiekosten nach oben bewirken. Hier fällt er nur klein aus (von 9.400 auf 9.700 €), weil das Gebäude mit Gas beheizt ist, welches nicht so hoch belastet wird, und gleichzeitig von der Strompreisabsenkung profitiert werden kann.

Die Maßnahme selbst ist dann wirtschaftlich und benötigt weder mit Voll- noch Mehrkosten gerechnet einen Zuschuss. Im Quervergleich vorher – nachher (graue Kästchen) ergibt sich ein deutlicher wirtschaftlicher Vorteil. Nicht einmal die Vollkostenversion schneidet schlechter ab.

			MFH	MFH VAR Preise	
Maßnahmenbeschreibung					
Außenwandverbesserung von 1,0 auf 0,15 W/(m²K); Verbesserung des unteren Gebäudeabschlusses von 1,0 auf 0,20 W/(m²K); Ersatz eines Gas-NT-Kessels durch eine Erdreichwärmepumpe; Einbau PV					
Detailkennwerte der Wärmebilanz					
Endenergie Wärme	vorher	kWh/(m²a)	167	167	
	nachher	kWh/(m²a)	24,7	24,7	
Detailkennwerte der Kostenbilanz					
Energiekosten	vorher	€/a	9.429	9.661	↗
	nachher	€/a	4.068	2.658	↘
Kapitalkosten	Vollkosten	€/a	6.144	6.144	
	Mehrkosten	€/a	4.864	4.864	
Ergebnisse					
Emission	vorher	kg/(m²a)	49,1	49,1	
	nachher	kg/(m²a)	14,8	14,8	
Emissionsminderung, Wärme + Strom		%	-70	-70	
Investition	Vollkosten	T€	155,9	155,9	
	Mehrkosten	T€	120,1	120,1	
Äquivalenter CO_2-Preis	Vollkosten	€/t	381	381	
	Mehrkosten	€/t	375	375	
Dateninterpretation (Vollkosten)					
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	784	-859	↘
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	13	0	↘
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	49	0	↘
Dateninterpretation (Mehrkosten)					
Jahreskosten, Fehlbetrag		€/a	692	-951	↘
notwendiger Investitionskostenzuschuss		%	11	0	↘
notwendiger zusätzlicher Emissionspreis		€/t	43	0	↘

Tabelle 134 Bewertung des Maßnahmenpaketes im MFH bei heutigem und modifizierten Energiepreisen [eigene Darstellung]

Bei Maßnahmenpaketen mitteln sich die Vor- und Nachteile der Varianten. Vor allem die Projekte, bei denen Heizöl eingesetzt wird, würden aufgrund der stark steigenden Energiepreise zur Modernisierung angeregt. Eine Förderungsnotwendigkeit kann immer noch gegeben sein, vor allem wenn Ölkessel vorfristig ersetzt werden. Die exemplarisch bestimmten Fördertatbestände liegen unter denjenigen, die sich im heutigen Energiepreissystem ergeben.

Fazit

Das modifizierte Preissystem der Energieträger ist angelehnt an die Emissionen und erscheint den Gutachtern daher praktikabler zur Durchsetzung von Verbesserungen. Die Gaspreise steigen um etwa 40 % (das entspricht einem zusätzlichen Emissionspreis von etwa 120 €/t), die Ölpreise verdoppeln sich fast (zusätzlicher Emissionspreis 200 €/t). Dafür sinken die Strompreise (geringerer Emissionspreis von -290 €/t) um 40 %.

In Summe unter heutigen Randdaten werden genauso viele Energiekosten gezahlt wie heute. Allerdings werden in erster Instanz die Gebäude mit hohen Emissionen zum Umsetzen von Maßnahmen angeregt, zuallererst die ölbeheizten Gebäude. Die Notwendigkeit der Bezuschussung von Maßnahmen sinkt, wenn die dann erhöhten Energiepreise als Maßstab verwendet werden. Wenn mit dem Zustand der derzeitigen Bepreisung verglichen wird, liegen sie immer noch geringer als berechnet.

Vor allem Wärmepumpensysteme – die im heutigen Preissystem rechnerische Investitionskostenzuschüsse von teils deutlich über 100 % benötigen, liegen danach im „normalen“ Bereich anderer Maßnahmen (max. 30 % Zuschuss auf die Investitionskosten).

Aus Sicht der Gutachter wäre das neue Preissystem eine notwendige Grundlage zur Etablierung einer neuen Förderpolitik, die auf Emissionsminderungen basiert. Es müssten dann nur noch Maßnahmen gefördert werden, die trotz einer großen Emissionsminderung unwirtschaftlich sind, nicht wegen zu hoher Energiepreise.

Finanzierung

Die Frage der langfristigen Finanzierung eines modifizierten Modells wird an dieser Stelle noch nicht diskutiert. Es ist klar, dass – wenn die Anreizfunktion tatsächlich Wirkung zeigt – die Gesamteinnahmen in diesem Modell sinken. Die Energieträger mit den hohen Preisen werden vermieden, die günstigen bevorzugt.

Es ist entsprechend nachzusteuern, beispielsweise durch eine Verteuerung auch der emissionsgünstigen Energieträger (Strom, Holz). Vor allem die Investitionskosten (in Windkraft, Photovoltaik, Energiespeicher) bilden einen Sockel aus, den es zu bezahlen gilt. Diese Infrastrukturkosten ähneln aber eher einem Leistungspreis als einem tatsächlichen Energiepreis.

3.10 Einzelauswertungen

Die Erkenntnisse zu Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpaketen aus den Anhängen 3.2 bis 3.8 werden nachfolgend unter dem Aspekt von „Selbstnutzung“ (Einzelnutzung sowie Wohneigentümergemeinschaften) des betreffenden Gebäudes sowie unter dem Aspekt von „Mieter/Vermieter-Konstellationen“ ausgewertet. Abschließend wird das Sonderthema „Contracting“ behandelt, welches praktisch ausschließlich im vermieteten Wohnungsbau relevant ist.

Eine gute Übersicht nach Lützkendorf zu den Berührungspunkten der einzelnen Akteursgruppen mit den einzelnen Positionen einer Wirtschaftlichkeitsbewertung, einschließlich auch nicht-monetärer Zusatznutzen zeigt Tabelle 135.

Akteursgruppe	Aufwand				Nutzen				Zusatznutzen						
	Bau- und Erwerbskosten	Kosten für Instandsetzung	Energie- und Wartungskosten	Miethöhe (Kaltmiete)	Vermiet-/Vermarktbarkeit	Wert und Wertentwicklung	Mieteinnahme/-steigerung	individueller Komfort	Dauerhaftigkeit	Gestalterische Qualität	Image	Vorbildwirkung	Mieter-/Nutzerzufriedenheit	Energieeinspar-/ Ressourcenschonung	Umweltentlastung/Klimaschutz
Mieter/Nutzer (privat)			■	■				■		□				□	□
Mieter/Nutzer (institutionell)			■	■						■	■	■	■	■	■
Selbstnutzende Eigentümer	■	■	■			■		■	■	■				□	□
Eigentümer (institutionell)	■	■	■			■		□	■	■	■	■	■	■	■
Vermieter	■	■	□	■	■	■	■	□	■	■	□			□	□
Anleger						■								□	□
Immobilienfonds	■	■	□	■	■	■	■	□	□	□	■		■	□	□
Volkswirtschaft			□	□	□				□	□				■	■
□ indirekter Bezug, ■starker/direkter Bezug; weitere Erläuterungen siehe Literaturhinweis															

Tabelle 135 Berührungspunkte einzelner Akteure mit den einzelnen Positionen einer Modernisierung, Bewertung aus [254]

Das IWU beschreibt 2013 zum Thema „Akteursbezogene Wirtschaftlichkeit“ die unterschiedliche Bewertung aus Eigentümer- oder Vermietersicht an ähnlichen zu sanierenden Modellgebäuden wie in diesem Gutachten [62]. Es werden sowohl eine übliche Wirtschaftlichkeitsberechnung mit Unterscheidung nach Sowieso-Kosten und energetisch bedingten Mehrkosten als auch ein vollständiger Finanzplan unter den Randbedingungen eines Selbstnutzers ausführlich vorgestellt.

3.10.1 Selbstnutzung

Für den Fall der Selbstnutzung einer Immobilie durch einen Einzelnutzer gelten die Erkenntnisse (Energieeinsparung, Gesamtkosten) zu Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpaketen aus den Anhängen 3.2 bis 3.8 wie jeweils beschrieben.

Alle als wirtschaftlich erkannten Maßnahmen führen direkt zu einer Gesamtkostenminderung (Summe aus Kapitalkosten, Wartungs- und Unterhaltskosten, Energiekosten).

Ausgleich einer Unwirtschaftlichkeit durch einen Investitionskostenzuschuss

Sofern keine Wirtschaftlichkeit der Maßnahme allein aus der Energiekostenersparnis heraus bestimmt werden konnte, führt der Einbezug eines „Investitionskostenzuschusses“ zu einer Grenzwirtschaftlichkeit. Es gilt dann: die jährlichen Kosten mit der Maßnahme (Kapital plus Energie) sind genauso groß wie die Energiekosten vorher.

Wird der „Investitionskostenzuschuss“ als (förderpolitische) Maßnahme zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit gewählt, ändern sich die jährlichen Ausgaben für den Investor nicht; sie entsprechen dem heutigen Niveau. Der staatliche Anteil liegt in der Bereitstellung der Investitionskostenzuschüsse.

Am Beispiel der Zahlen für das EZFH mit einer Dachsanierung (siehe Anhang 3.2.3) ergeben sich beispielsweise folgende Ergebnisse:

Das Gebäude hat vor der Maßnahme Jahresenergiekosten von 3037 €/a. Diese sinken nachher auf 2462 €/a (es handelt sich um die Summe aus Wärme- und Stromkosten).

Die Sanierung kostet – als Vollkosten gerechnet – 27.983 €. Da für das Dach eine Lebensdauer von 45 Jahren angesetzt wird, ergibt sich unter Berücksichtigung der Annuität ein jährlicher Wert für die Kapitalkosten von 833 €/a (erst nach 45 Jahren ist die Sanierung dann abbezahlt und der Zyklus beginnt von vorn).

Für den Gebäudebesitzer heißt dies: er zahlte vorher (3037+0) €/a und nachher (2462+833) €/a. Ein Fehlbetrag von 258 €/a ist zu ermitteln.

Würde ein Investitionskostenzuschuss von 31 % gewährt, vergünstigten sich die Kapitalkosten auf 575 €/a. Das hieße für den Zuschussgeber eine Absolutsubvention von 8776 € (ausgehend von obigen Gesamtkosten der Dachsanierung).

Anmerkung: dass die Kapitalkosten vorher bei 0 €/a liegen, ist eigentlich nicht möglich. denn formal müsste ja noch die „letzte Rate“ der vorherigen Dachsanierung gezahlt werden. Der „Vollkostenansatz“ besagt, dass ansonsten keine Kosten angefallen wären.

Ausgleich einer Unwirtschaftlichkeit durch einen Emissionspreis

Die alternativ berechnete Version eines „zusätzlichen Emissionspreises“ führt auch zu einer Grenzwirtschaftlichkeit. Allerdings steigen die Gesamtausgaben. Es gilt dann: die jährlichen Kosten mit der Maßnahme (Kapital plus Energie) sind genauso groß wie die Energiekosten vorher – jedoch wären diese bereits vorher höher.

Wird der „zusätzliche Emissionspreis“ als (förderpolitische) Maßnahme zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit gewählt, ändern sich die jährlichen Ausgaben für den Investor; sie liegen über dem heutigen Niveau. Der staatliche Anteil ergibt sich indirekt, z. B. durch anderweitige Entlastungsnotwendigkeiten, v. a. einkommensschwacher Verbraucher.

Am Beispiel der Zahlen für das EZFH mit einer Dachsanierung (siehe Anhang 3.2.3) ergeben sich in Fortführung der obigen Überlegungen folgende Ergebnisse:

Das Gebäude hat vor der Maßnahme Jahresenergiekosten von 3037 €/a. Diese würden zunächst mit einem zusätzlichen Emissionspreis von 142 €/t künstlich erhöht. Da das Gebäude vor der Modernisierung einen Emissionsausstoß von 8008 kg/a aufweist, würden die Ausgaben um 1137 €/a steigen (das entspricht einer Verteuerung der Energie von 37 %).

Mit der Sanierung ergeben sich prinzipiell auf 2462 €/a sinkende Energiekosten. Allerdings würde auch dann die zusätzliche Emissionsbepreisung wirken. Mit der verminderten Emission von 6184 kg/a ergeben sich dann ebenfalls Zusatzkosten, jedoch geringere von 879 €/a.

An den o.g. Kapitalkosten ändert sich nichts.

Für den Gebäudebesitzer heißt dies: er zahlte vorher (3037+1137+0) €/a und nachher (2462+879+833) €/a. Es ist kein Fehlbetrag festzustellen. Allerding liegen die Gesamtkosten nachher immer noch 1137 €/a über dem Wert, der vor der Emissionsbepreisung gegolten hat.

Über die Energiekosten werden nach der Modernisierung immer noch 879 €/a an Einnahmen generiert, die es vorher im System nicht gab.

Dieser Ansatz führt also ebenfalls zu einer Subventionsnotwendigkeit, jedoch anderer Art. Insbesondere einkommensschwache Haushalte werden in einem solchen System ansonsten nicht investieren (können). Diese Subvention kann beispielsweise generiert werden aus den Einnahmen der zusätzlichen Emissionsbepreisung. Mögliche Modelle werden u. a. in der Studie von Lange zur Emissionsbepreisung untersucht [260].

Ausgleich einer Unwirtschaftlichkeit durch Zuschuss und Emissionspreis

In der Realität kann eine Zwischenlösung hilfreich sein – der Fehlbetrag wird über einen zusätzlichen Emissionspreis und einen Investitionskostenzuschuss anteilig ausgeglichen. Die Emissionsbepreisung wird entsprechend etwas geringer gewählt. Damit steigen die Energiekosten, jedoch nicht um so große Beträge. Da sie nun aber etwas höher sind, können bei einer Modernisierung auch etwas höhere Einsparungen erzielt werden. Damit reichen geringere Investitionskostenzuschüsse zum Erreichen der Grenzwirtschaftlichkeit aus.

Beide Werte können so gewählt werden, dass insgesamt betrachtet die Mehreinnahmen der zusätzlichen Emissionsbepreisung die Mehrausgaben der Investitionskostenzuschüsse abdecken. Auch in diesem System steht am Ende der Fehlbetrag von 258 €/a im Raum, der eingangs ermittelt wurde. Er lässt sich nicht durch Umverteilung ausräumen. Es lässt sich nur darüber entscheiden, wer zu welchen Anteilen diesen Betrag trägt.

Alternativ wird eine alternative Bepreisungsart für die Energieträger gewählt, wie in Anhang 3.9.5 vorgestellt.

Die geschilderten Ansätze einer a) Zuschusslösung, b) Lösung über zusätzliche Emissionsbepreisung, c) einer Mischung beider Ansätze sowie d) alternativer Energieträgerpreise werden in der Betrachtung der Makroebene wieder aufgegriffen.

Kopplungsprinzip oder vorgezogene Investition

Das obige Beispiel der Dachsanierung war eine vorgezogene Investition. Es gelten die Vollkosten.

Werden nur Mehrkosten angesetzt, weil das Dach ohnehin einen Instandsetzungsbedarf aufweist, sind die geschilderten Zusammenhänge grundsätzlich identisch. Allerdings ergeben sich in diesem Fall geringere Kapitalkosten, mit denen die Wirtschaftlichkeit durchgeführt wird. Die „Sowieso-Kosten“ entfallen, sind aber selbstverständlich ebenfalls zu bezahlen.

Für einen Selbstnutzer wären sie im Sinne einer „Kaltmiete“ für die (Ab)nutzung des Wohnraums zu verstehen. sie wurden entweder vorher angespart oder müssen nachher zusätzlich aufgebracht werden.

Wohneigentümergemeinschaften

Die o. g. Überlegungen gelten für Wohneigentümergemeinschaften ebenfalls. Nutzer und Investor sind grundsätzlich identisch.

Für die gemeinschaftliche Nutzung von Photovoltaikstrom sind ggf. komplexere technische Strukturen aufzubauen (z. B. eine zweite Zählerebene) oder alternative vertragliche Regelungen (z. B. ein Betreibermodell). Dennoch ließen sich die im Gutachten untersuchten Maßnahmen und Maßnahmenpakete analog einer „Selbstnutzung mit Einzelnutzer“ konzipieren und umsetzen – mit den üblichen Schwierigkeiten, die sich immer im Zusammenhang von Wohneigentümergemeinschaften ergeben.

Hemmnisse und Motivation

Die jenseits der Wirtschaftlichkeit relevanten Faktoren, die aus Sicht selbstnutzender Eigentümer eine Modernisierungsmaßnahme entweder hemmen oder fördern, haben Weiß et al. in einer Bürgerbefragung zur Energiewende systematisch erfasst, siehe [64]. Auch Rehkugler et al. liefern eine detaillierte Auseinandersetzung mit Bezug auf diverser Primärliteratur [117]. Auf eine Wiedergabe wird an dieser Stelle verzichtet.

Bosch-Lewandowski et al. beleuchten in ihrer Studie die „Investitionsprozesse bei Wohnungseigentümergemeinschaften mit besonderer Berücksichtigung energetischer und altersgerechter Sanierungen“ anhand von 20 Fallstudien [262]. Insbesondere die Rolle der Verwaltung wird klargestellt. Zudem werden Erfolgsfaktoren und Hemmnisse genannt und eine umfangreiche Empfehlungsliste zur Erleichterung von Sanierungsinvestitionen gegeben.

3.10.2 Mieter/Vermieter-Strukturen

Für den Fall der Vermietung einer Immobilie sind die Erkenntnisse (Energieeinsparung, Gesamtkosten) zu Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpaketen aus den Anhängen 3.2 bis 3.8 zu modifizieren.

Vom Vermieter sind die (größten Anteile) der Wartungs- und Unterhaltskosten sowie die nicht energetisch bedingten Anteile der Kapitalkosten (also die Sowiesokosten) zu tragen. Der Mieter muss die Energiekosten sowie die energetisch bedingten Anteile der Kapitalkosten – als Kaltmieterhöhung – übernehmen (also die Mehrkosten). In der Studie zum „Zielerreichungsszenario“ des IWU aus dem Jahr 2013 [62] wird das Mieter-Vermieter-Dilemma wie folgt beschrieben [62]:

> *„Die Aufteilung der Gesamtinvestition in eine Instandsetzungsinvestition und eine energetische Modernisierungsinvestition kann auch für den vermieteten Bestand übernommen werden. Anstelle der Energiekosteneinsparungen resultieren aus den energetischen Modernisierungsinvestitionen für den Investor in diesem Fall Mieterhöhungen.*
>
> *Basis für Mieterhöhungen nach § 559 BGB (11 %-Umlage – aktuell 8 % mit Deckelung 2 – 3 €/(m² Monat)) sind die sog. umlagefähigen Modernisierungskosten. Im Referenzfall entsprechen die umlagefähigen Modernisierungskosten genau den energiebedingten Mehrkosten unter der Prämisse des Kopplungsprinzips […]. Dabei werden die Kosten für den Kesselaustausch (Brennwertkessel), die Kosten für den Fensteraustausch (2-Scheiben-Wärmschutzverglasung) und die Kosten der Abluftanlage definitionsgemäß als reine Instandsetzungsinvestitionen angesehen. Aus diesen Maßnahmen resultiert daher keine Mieterhöhung nach § 559 BGB.*
>
> *Bei der Berechnung der Mieterhöhung muss Förderung (Zinsverbilligung bzw. Zuschuss) zum Abzug gebracht werden (§ 559a BGB). Direkte Zuschüsse müssen von den umlagefähigen Modernisierungskosten abgezogen werden. Der Jahresbetrag der laufenden Zinsverbilligung mindert die Modernisierungsmieterhöhung.“*

Alle als wirtschaftlich erkannten Maßnahmen führen zu einer Gesamtkostenminderung (Summe aus Kapitalkosten, Wartungs- und Unterhaltskosten, Energiekosten). Sie sind also zuschussfrei umsetzbar, das bedeutet: es ließe sich eine Kaltmieterhöhung finden, bei der weder der Vermieter noch der Mieter einen Verlust verzeichnen.

Ob dies tatsächlich umsetzbar ist, ergibt sich aus der Deckelung der Mietpreiserhöhung – einerseits durch die prozentuale Umlagefähigkeit, andererseits die örtlichen Vergleichsmieten.

Ausgleich einer Unwirtschaftlichkeit durch einen Investitionskostenzuschuss

Sofern keine Wirtschaftlichkeit der Maßnahme allein aus der Energiekostenersparnis heraus bestimmt werden konnte, führt der Einbezug eines „Investitionskostenzuschusses“ zu einer Grenzwirtschaftlichkeit. Der Zuschuss wird an den Vermieter gezahlt, der daraus einen Teil der Investitionskosten deckt und somit die notwendigen Kaltmieterhöhung etwas geringer ausfallen lassen kann.

Anhand einer Maßnahme am Dach wird dies geschildert. Basis ist ein durchschnittliches MFH. Das Dach ist bereits gedämmt und wird nachgedämmt, siehe Anhang 3.2.3.

Die Gesamtkosten der Maßnahme liegen bei 51.600 €, siehe Tabelle 59. Als Mehrkosten können nach Tabelle 60 etwa 17.700 € angesehen werden.

Ist die Maßnahme an eine ohnehin fällige Dachsanierung gekoppelt, fallen nur die Mehrkosten an. Für das MFH. Der notwendige Investitionskostenzuschuss zum Erreichen einer Wirtschaftlichkeit konnte mit 16 % bestimmt werden. Der absolute Investitionskostenzuschuss beträgt demnach etwa 8.260 €.

→ Restlebensdauer 0 Jahre: 16 % Zuschuss (der Vollkosten)

Der Zuschuss ist geringer als die energetisch bedingten Mehrkosten von 17.700 €. Im Sinne einer Warmmietenneutralität könnte der Zuschuss genutzt werden, um die umlagefähigen Mehrkosten auf etwa die Hälfte zu mindern.

Wird die Dachsanierung ohne Anlass durchgeführt und werden entsprechend die Vollkosten zugrunde gelegt, liegt der berechnete notwendige Zuschuss zum Erreichen einer Grenzwirtschaftlichkeit bei 73 %. Das entspricht einer absoluten Zuschusshöhe von 37.670 €.

→ Restlebensdauer 45 Jahre: 73 % Zuschuss (der Vollkosten)

Diese Summe reicht aus, um einerseits die an die Mieter durchgereichten energetisch bedingten Mehrkosten so zu vermindern, dass eine Warmmietenneutralität eintritt (benötigt werden dazu die o.g. 8.260 €). Der Rest wird verwendet, um die Investition vor Ablauf der Nutzungsdauer vorzuziehen. Hier berechnet ist der ungünstigste Grenzfall, dass ein praktisch neues Dach sofort wieder saniert wird.

Die Realität liegt dazwischen. Es ist ein Unterschied, ob 40 oder 5 Jahre vor Ende der Nutzungsdauer investiert wird. Je näher das Dach seinem Lebensende kommt, desto größer der Betrag, der bereits mit den Kaltmieten vorher eingenommen wurde, um die Instandhaltung des Daches nach Ende der Nutzungsdauer durchzuführen. Gegen Ende der Lebensdauer nähert sich der notwendige Zuschuss daher den oben berechneten 16 % an.

Zwischenwerte können berechnet werden, was im Rahmen dieses Gutachtens nicht systematisch, nur exemplarisch, erfolgt. Eine um 10 Jahre vorgezogene Sanierung würde beispielsweise etwa 28 % Zuschuss benötigen.

Liegt der gezahlte Zuschuss real darüber, findet eine Überzahlung statt, die auch als „Anreiz" aufgefasst werden kann, die Maßnahme überhaupt vorgezogen durchzuführen.

Streng genommen dürften in dem Mieter/Vermieter-Modell die Investitionskostenzuschüsse von Maßnahmen, die nicht vorgezogen werden, nicht größer ausfallen als die energetisch bedingten Mehrkosten. Die ohnehin erforderlichen Sowiesokosten sind über die früher gezahlten Kaltmieten bereits abgegolten.

Dieses Kriterium halten die baulichen Maßnahmen ein, jedoch nicht die Wärmepumpen (separat siehe Anhang 3.3.1 oder Hybrid siehe Anhang 3.3.2) und auch nicht die Holzkessel (siehe Anhang 3.3.3). Hier sind – unabhängig ob als Mehrkosten oder Vollkosten gerechnet – jeweils notwendige Investitionskostenzuschüsse von mehr als 75 % als notwendig berechnet worden. Häufig liegen die Werte sogar über 100 %.

In der Mieter/Vermieter-Konstellation hieße dies: wenn der Vermieter einen Zuschuss von z. B. 110 % der Investitionssumme für den Einbau einer Erdreich-Wärmepumpe erhielte, könnte damit eine Grenzwirtschaftlichkeit hergestellt werden. Jedoch müsste der Vermieter zunächst mit dem Geld alle energetisch bedingten Mehrkosten subventionieren, so dass sich keine Mieterhöhung ergibt. Darüber hinaus müsste sogar eine Kaltmietabsenkung aus dem Zuschuss finanziert werden, damit beim Mieter eine Warmmietneutralität erzielt wird. Dies ist praxisfern.

Wie bereits für den Selbstnutzer festgestellt, bestätigt sich die Problematik in der Mieter/Vermieter-Konstellation noch stärker: für alle Energieträger, deren Einsatz zu einer Energiekostenerhöhung führt, obwohl es zu einer Emissionsminderung kommt – also vor allem Strom – führen Investitionskostenzuschüsse nicht zu einer sinnvollen Herstellung ausgeglichener Kostenbilanzen. Wäre der Zuschuss gedeckelt, beispielsweise auf den Betrag der Mehrkosten (über die ohne erforderlichen Kesselkosten), würde der Mieter Verlust machen – aus den erhöhten Energiekosten. Für den Vermieter käme ein ausgeglichener Haushalt heraus, er müsste – weil subventioniert – auch keine Mieterhöhung veranlassen.

Das bedeutet: alle Maßnahmen und Pakete, für die in den Anhängen 3.2 bis 3.8 Zuschüsse bestimmt wurden, die oberhalb der Investitionskosten liegen, braucht es eine alternative Energieträgerbepreisung. Die Gutachter schlagen ein System nach Anhang 3.9.5 vor. Es wird in der Makroperspektive weiterverfolgt.

Unter den heutigen Randdaten verlangen die Verbände der Wohnungswirtschaft und der Mietervertretungen eine Erhöhung der Förderung energetischer Maßnahmen an Gebäuden, um so die Differenz zwischen der notwendigen Umlage von Modernisierungsinvestitionen und maximal erlaubter Kaltmietenerhöhung (Größenordnung 2 bis 3 €/(m²Monat)) zu finanzieren [143].

Ausgleich einer Unwirtschaftlichkeit durch einen Emissionspreis

Ein zusätzlicher Emissionspreis belastet zunächst einmal nur die Mieter. Diese Einschätzung teilen auch die wohnwirtschaftlichen Verbände (DMB, GDW, DV) [143]:

> *Sollte ein CO_2-Preis eingeführt werden, der über höhere Heizkosten von Mietern gezahlt werden müsste, erhöhen sich deren Wohnkosten und es wäre ein sozialer Ausgleich nötig. Das Verhältnis zwischen Vermieter und Mieter könnte ohne eine sehr sorgfältige Ausgestaltung und förderpolitische Flankierung dadurch sogar weiter belastet werden."*

Würde ein solches System etabliert, braucht es anderweitige Entlastungen der Mieter – dies gilt analog wie für die Selbstnutzer in Anhang 3.10.1 beschrieben.

Kritisch sind Haushalte mit geringem Einkommen bzw. einer Mietbelastung bereits vor der Modernisierung von 40 % oder höher. Vogler fasst wie folgt zusammen [144]:

> *„Während bei den Energiekosten üblicherweise 0,40 bis 0,80 EUR/m² eingespart werden können, betragen vollständige Mieterhöhungen bis über 3 EUR/m². Der hohe Wohnkostensprung führt zu einer deutlichen Erhöhung der Wohnkostenbelastung, die angesichts der erheblichen Komfortverbesserung vermutlich dann getragen wird, wenn die Wohnkostenbelastung nicht zu sehr über 30 % hinausgeht.*
>
> *„Energetische Modernisierung ist bei überdurchschnittlichen Anfangswohnkostenbelastungen keine Lösung gegen steigende Wohnkostenbelastungen durch steigende Energiepreise, wenn nicht Wege gefunden werden, den Sprung in der Wohnkostenbelastung durch energetische Modernisierung für diese Haushalte sehr stark zu vermindern, ohne den Gebäudeeigentümer in wirtschaftliche Schwierigkeiten zu bringen."*

Abgesehen von den absoluten Zahlen, die sich aus der Datenlage von 2010 - 2013 ergeben, ist die Thematik heute unverändert. Sofern die Kaltmietsteigerungen deutlich über den Steigerungen der Realeinkommen liegen, kann keine energetische Sanierung dieses Problem nennenswert begrenzen.

Kopplungsprinzip oder vorgezogene Investition

Diefenbach et al. kommen zu folgendem Fazit bzgl. der Wirtschaftlichkeit von vorgezogenen Maßnahmen im vermieteten Objekt [62]:

> *„Bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit energetischer Sanierungen ist jedoch grundsätzlich das sogenannte Kopplungsprinzip zu beachten: Maßnahmen zur Energieeinsparung sind aus ökonomischer Sicht in der Regel dann attraktiv, wenn am Bauteil ohnehin aus Gründen der Instandhaltung bzw. Instandsetzung größere Maßnahmen erforderlich werden.*
> *[…]*
> *Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen darüber hinaus, dass die energetischen Modernisierungsinvestitionen bei Beachtung des Kopplungsprinzips auch im Vermietungsfall refinanziert werden können. Die Dauerhaftigkeit des zusätzlichen Mietertrags zum Beispiel durch das Vorliegen energetischer Differenzierungsmerkmale im Mietspiegel oder die Reduzierung von Leerstand sind dabei wesentliche Einflussfaktoren für die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmenpakete. Auch Vorzieheffekte können unter diesen Voraussetzungen wirtschaftlich realisiert werden, führen aber im Vergleich zum Referenzfall zu deutlich größeren Mieterhöhungen, die für die Mieter im Jahr der Maßnahmen nicht mehr warmmietenneutral sind."*

Das Vorziehen von Maßnahmen obliegt allein dem Vermieter. Er selbst hat keinen Vorteil von den geringeren Energiekosten. Das Vorziehen lässt sich allein durch höhere Investitionskostenzuschüsse anreizen.

Noch ungeklärt, aber künftig steuerrechtlich klärungsbedürftig ist die Diskrepanz von Abschreibungdauer und Nutzungsdauer der einzelnen Bestandteile einer umfassenden Modernisierung, siehe Hintergrundinformationen in Anhang 5.9.1.

Diefenbach et al. kommen zu folgendem Fazit bzgl. der Wirtschaftlichkeit im vermieteten Objekt [62]:

> *„Generell ist zu beachten, dass in der vorliegenden Studie die Perspektive von Investoren mit einem Betrachtungshorizont von maximal 25 Jahren eingenommen wurde. Bei Wärmedämmmaßnahmen ist aber mit einer Nutzungsdauer von einigen Jahrzehnten, wahrscheinlich 40 Jahre und mehr, zu rechnen. Die Energiesparwirkung der Maßnahmen kommt den Bewohnern während dieser gesamten Zeitdauer zu Gute. Würde man dies in den Betrachtungen berücksichtigen, so ergäbe sich eine noch verbesserte ökonomische Attraktivität der Maßnahmen. Auch der Nutzen der Maßnahmen für den Klima- und Umweltschutz sowie der gesteigerte Wohnkomfort in gedämmten Gebäuden wurden in den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen nicht berücksichtigt."*

Umsetzungsmotivation und Hemmnisse

Die jenseits der Wirtschaftlichkeit relevanten Faktoren, die aus Sicht privater Kleinvermieter eine Modernisierungsmaßnahme entweder hemmen oder fördern, haben Weiß et al. in einer Bürgerbefragung zur Energiewende systematisch erfasst, siehe [64]. Rehkugler et al. liefern einen fundierten Überblick aus Sicht der professionellen Vermieter [117]. Auf eine Wiedergabe wird an dieser Stelle verzichtet.

Wichtig ist die Erkenntnis von Weiss et al, dass private Kleinvermieter in 90 % der Fälle die Sanierung nicht über Kredite, sondern über Mieteinnahmen finanzieren. Der zugehörige Gebäudebestand ist nicht auf einem so hohen energetischen Niveau wie bei den professionellen Vermietern, zudem besitzen sie eher Gebäude der ältesten Baualtersklassen (vgl. Anhang 5.1.4). Für die Erarbeitung von Förderprogrammen ist dies zu berücksichtigen.

Rehkugler et al. kommen aus Sicht der Immobilienwirtschaft zu dem Schluss, dass das „Umwälzungspotential" (also die Umlagefähigkeit der Sanierungskosten) maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit und Umsetzungsbereitschaft aus Sicht der Vermieter ist [117]:

> *„Die Wirtschaftlichkeit fällt umso höher aus, je mehr die Ausgangsmiete unter dem ortsüblichen Durchschnitt liegt. Höhere Sanierungskosten führen zu höheren Mieten, schmälern allerdings die Rendite für den Vermieter. Dabei müssen jedoch die Mietzuschläge in etwa der rechtlich maximal zulässigen Grenze von 11 % der Modernisierungskosten pro Jahr entsprechen. Zudem hat das Gebäudealter einen Einfluss, da sich bei älteren Objekten höhere Mieten und Renditen erzielen lassen. Die Vorteilhaftigkeit energetischer Sanierungsinvestitionen für Vermieter hängt also insgesamt vorrangig von der Überwälzbarkeit seiner Sanierungskosten über eine entsprechende Mieterhöhung ab. Dass bei einer vollen Überwälzbarkeit die Investitionen leicht in den Bereich der Vorteilhaftigkeit kommen, liegt auf der Hand."*

Abgesehen von der Umlagegrenze, die heute nicht mehr bei 11 %/a, sondern bei 8 %/a liegt, dürfte die Aussage aus dem Jahr 2012 auch heute noch zutreffend sein.

Eine detaillierte Auseinandersetzung mit der Fragestellung steigender Wohnkostenbelastung (durch Energiepreissteigerung oder Modernisierung) ist auch in der Dissertation von Vogler [144] zu finden. Sie thematisiert ebenfalls die Problematik von Vergleichsmieten:

> *„Ein weiterer wichtiger Parameter ist neben dem Anteil der Energiekosten an den gesamten Wohnkosten das Verhältnis der Kaltmiete zur Vergleichsmiete. Liegt die Kaltmiete (z. B. durch Modernisierungsmaßnahmen) oberhalb der Vergleichsmiete, kann sie nicht weiter erhöht werden, solange die Vergleichsmiete nicht entsprechend gestiegen ist. Je höher eine Kaltmiete (durch Modernisierung) oberhalb der Mietspiegelmiete liegt, desto geringer steigt die Wohnkostenbelastung in der Zukunft (d. h. desto später wird die Kaltmiete von der Mietspiegelmiete "eingeholt" und steigt wieder). Würde die Vergleichsmiete energetisch modernisierter und energetisch unmodernisierter Gebäude differenziert, so entstünden einerseits wirtschaftliche Vorteile für die Investition in die Maßnahme, andererseits würden sich die Unterschiede in der Wohnkostenbelastung zwischen energetisch modernisierten und nicht modernisierten Gebäuden zu Ungunsten energetisch modernisierter Gebäude erhöhen: die Wohnkostenbelastung stiege für energetisch modernisierte Gebäude weiter an und wäre für energetisch unmodernisierte Gebäude konstant bis sinkend."*

Es wird von IWU 2013 empfohlen, zukünftig verstärkt das Werkzeug eines Mietspiegels mit energetischen Differenzierungsmerkmalen zu nutzen, ein Werkzeug für das sich aus Sicht der Gutachter ein um EAV-Analysen erweiterter Energieausweis sehr gut eignen würde.

3.10.3 Contracting

Eine Lösung, v. a. zur Finanzierung von anlagentechnischen Modernisierungsmaßnahmen besteht in der Möglichkeit eines Liefer- oder eines Energieeinspar-Contractings. Die Gutachter haben sich mit dem Thema „Umstellung von zentraler Wärmeerzeugung auf Wärmelieferung durch einen Contractor“ intensiv auseinandergesetzt [145].

Sie plädieren in diesem Zusammenhang für eine verbrauchsbasierte unterjährige Energieanalyse aus dem Verbrauch EAV (vgl. Anhang 5.3.3), um die vorherige Effizienz des Erzeugers festzustellen. Dies führt zu einer gerechten Herstellung einer Warmmietenneutralität. Werden theoretische Effizienzen der Wärmeerzeugung angenommen, können – für jeweils einen der Vertragspartner Ungerechtigkeiten zu verzeichnen sein.

Stellt ein Vermieter eine über Betriebskosten abgerechnete Versorgung mit Raumwärme und/oder Warmwasser auf gewerbliche Wärmelieferung um, kann dies ohne Zustimmung der Mieter erfolgen, wenn die Kosten der Wärmelieferung die Betriebskosten für die bisherige Eigenversorgung mit Wärme oder Warmwasser nicht übersteigen. Mit der Umstellung wird der Abrechnungspunkt von der Brennstoffmenge auf die vom Wärmeerzeuger gelieferte Nutzwärmemenge verschoben, sodass für den Nachweis der Kostenneutralität der Jahresnutzungsgrad des alten Wärmeerzeugers entscheidend ist.

Der Jahresnutzungsgrad ist ein objektspezifischer Wert und lässt sich mit Ingenieurmethoden nicht genau berechnen, nicht über parameterabhängige Pauschalwerte bestimmen und nicht mit Kurzzeitmessungen hinreichend genau messen. Für den Einzelfall hinreichend genaue Werte lassen sich nach heutigem Erkenntnisstand nur durch die reale unterjährige Messung der zugeführten Brennstoffmenge und der abgegebenen Wärmemenge über mindestens ein Jahr ermitteln.

Im Rahmen des von den Gutachtern begleiteten BMUB-Projekts „Sanierungswirkung“ ausgewertete Feldmessungen und Analysen zur Effizienz von Wärmeerzeugern [27] kommen zu dem Resultat, dass nur die unterjährige Auswertung von Gas- und abgegebenen Nutzwärmemengen gemäß DIN V 18599 Beiblatt 1 eine ausreichend genaue Ermittlung des Nutzungsgrads von Wärmeerzeugern ermöglicht.

Verordnung für die Umstellung auf gewerbliche Wärmelieferung für Mietwohnraum

Die Aufgabenstellung ergibt sich aus: BGB § 556c Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 und 2 BGB, näheres regelt die Verordnung für die Umstellung auf gewerbliche Wärmelieferung für Mietwohnraum (WärmeLV vom 07. Juni 2013). Danach ist der Wärmelieferant verpflichtet, in seiner Vertragserklärung die voraussichtliche Effizienzverbesserung anzugeben. Es gelten folgende Regelungen:

- § 8 Kostenvergleich vor Umstellung auf Wärmelieferung
    - es sind gegenüberzustellen die (realen) Betriebskosten der Eigenversorgung, die der Mieter tatsächlich bislang zu tragen hatte und
    - die (fiktiven) Kosten, die der Mieter zu tragen gehabt hätte, wenn der die den bisherigen Betriebskosten zugrundeliegende Wärmmenge im Form eines Liefercontractings bezogen hätte
    - diese Kosten müssen gleich sein

- § 9 Ermittlung der (realen) Betriebskosten der Eigenversorgung
    - die bisherigen Betriebskosten ergeben sich aus dem gemessenen Verbrauch an Brennstoff multipliziert mit dem durchschnittlichen Brennstoffpreis der letzten 3 Abrechnungszeiträume, hinzuzurechnen sind die sonstigen abgerechneten Betriebskosten für Heizung und Warmwasser
    - wurde zwischenzeitlich modernisiert, gelten die Kosten nach der Modernisierung

- § 10 Ermittlung der (fiktiven) Kosten der Wärmelieferung
    - die (fiktiven) Kosten der Wärmelieferung ergeben sich aus einer Wärmemenge und dem vereinbarten Wärmelieferungspreis (unter Berücksichtigung einer evtl. vereinbarten Preisgleitklausel), wobei die Wärmemenge sich aus dem realen Verbrauch und einem Jahresnutzungsgrad für den Kessel ergibt
    - der Nutzungsgrad wird über lange Zeiträume gemessen, aus einer Kurzzeitmessung abgeleitet oder anhand anerkannter Pauschalwerte bestimmt.

Hier setzt die Kritik der Gutachter an [145]. Um die in § 10 Abs. 2 WärmeLV angesprochenen Pauschalwerte wurde seitens der Vertreter der interessierten Kreise (AGFW, BDEW, B.KWK, VfW, ZVEI) heftig gerungen. Ein hierzu angefertigtes Gutachten der EBZ Business School [146] steht seit Ende 2015 der Öffentlichkeit zur Verfügung.

In dem Gutachten wird festgestellt, dass die bislang verwendeten Jahresnutzungsgrade zu ungenau sind (in der Regel besser als die Praxis, vgl. auch Anhang 3.3.2) und daher ein neues Verfahren zu Berechnung anhand statistisch erfasster Nutzungsgrade abgeleitet. Einflüsse sind die Kesselart (Brennwert, Niedertemperatur), die Art des Brenners (atmosphärisch oder nicht), das Vorhandensein von Warmwasserbereitung, die Leistung und Auslastung.

Ergebnis ist ein rein mathematischer Ansatz (multivariable Regression) – ohne den bekannten Bezug zur Jahresnutzungsgradformel nach Dittrich. Die abgeleitete Formel bildet die Realität im Mittel besser ab als die vorher geltenden Standardwerte des BMVBS. Dass die 500 Werte der Ausgangsstichprobe sehr große Streubreiten aufwiesen, kann sie nicht ausgleichen. Es bleibt die Frage, wie groß der Fehler verglichen mit den realen Messwerten ist.

Wenn für einen nach Regressionsformel berechneten Jahresnutzungsgrad von 85 % real gemessene Werte zwischen 65 bis über 100 % möglich sind, ist die in § 10 gebotene Möglichkeit einer Berechnung mit „anerkannten Pauschalwerten“ zur Bestimmung der Kostenneutralität bei Umstellung auf Wärmelieferung grundsätzlich infrage zu stellen, da dies den Zielen der BGB-Regelung widerspricht.

Am Beispiel des Typgebäudes MFH dieses Gutachtens seien die Einflüsse geschildert. Basis ist das Durchschnittsgebäude mit 470 m² Fläche ohne zusätzliche Sanierungsmaßnahmen. Die Werte sind gerundet.

Ausgehend von einem bisherigen heizwertbezogenen Endenergieeinsatz von 55.000 kWh/a liegen die heutigen Kosten für Heizung und Trinkwarmwasser bei 3650 €/a. Der Nutzungsgrad könnte Werte zwischen 65 und 100 % annehmen. Das bewirkt eine Spannbreite der abgegebenen Nutzwärme zwischen 35.750 und 55.000 MWh/a vor der Umstellung auf Wärmelieferung.

Der Wärmelieferant / Contractor ist für die Kalkulation nach § 10 WärmeLV an einer möglichst schlechten Effizienzbewertung des alten Heizkessels interessiert. Er schätzt den alten Kessel, beispielsweise nach der EBZ-Studie, mit einem Pauschalwert von 70 % ein. Die fiktiv errechnete Nutzwärme vor der Übernahme der Wärmelieferung beträgt somit 38.500 kWh/a bei einem Preis von 10,55 Cent/kWh (ermittelt aus den bisherigen Kosten von 3650 €/a). Der Contractor hat fiktiv auf dem Papier die Kostenneutralität belegt.

Hat er jedoch den Kessel zu schlecht bewertet und dieser wies einen tatsächlichen Nutzungsgrad von 85 % auf, so lag die ursprünglich abgegebene Nutzwärme bei 46.750 kWh/a. Der Wärmepreis dürfte 7,8 Cent/kWh nicht übersteigen.

Für den Mieter bedeutet die Fehlkalkulation: die neuen Energiekosten betragen 46.750 kWh/a · 10,55 Cent/kWh, also 4930 €/a. Das sind 1280 €/a mehr als vorher – was ziemlich genau dem zusätzlichen Gewinn des Contractors entspricht.

Im umgekehrten Fall „zu gut nach den Normen bewerteter Nutzungsgrade“ hätte er Verlust gemacht.

Eine transparente und den Realitäten entsprechende Kostenneutralität kann also sicher nur durch Messung des realen Jahresnutzungsgrads des alten Heizkessels mit Gas- (Brennstoff-) und Wärmemengenzählern erfolgen. Bei der Verwendung von Pauschalwerten für den Jahresnutzungsgrad einer Altanlage sind Streitfälle bei der Umstellung auf Wärmelieferung vorprogrammiert, weil eine Kostenneutralität nicht gewährleistet werden kann. Dabei ist es unerheblich, ob die pauschalen Nutzungsgrade aus der neuen EBZ-Studie, aus den BBSR-Veröffentlichungen oder einer anderen Quelle stammen. Für eine seriöse Betrachtung und als Grundlage für einen Wärmeliefervertrag muss nicht der Mittelwert einer großen Stichprobe passen, sondern der Einzelfall.

Die Ergebnisse der EBZ-Studie mit einer Qualitätsverbesserung für die Abschätzung des Jahresnutzungsgrades sind grundsätzlich hilfreich, solange ihre Anwendung auf die Identifizierung wirtschaftlich umzusetzender Projekte beschränkt bleibt. Als Vertragsgrundlage sind Messungen vorzuziehen. Sie verringern im Übrigen für alle Beteiligten die Kostenrisiken. Zudem kann die Messung den Wettbewerb fördern, denn die Messung kann von unbeteiligten Dritten durchgeführt werden und als Grundlage einer Angebotseinholung oder Ausschreibung dienen.

Wenn im Vorfeld einer Umstellung auf Wärmelieferung / Contracting kein Wärmemengenzähler nach dem alten Heizkessel vorhanden war, lässt sich das oben aufgezeigte Dilemma nur so auflösen, dass der Wärmepreis erst dann (kostenneutral) festgelegt wird, wenn nach dem sowieso erforderlichen Einbau eines Wärmemengenzählers beim Übergang zu Wärmelieferung durch eine Energieanalyse aus dem Verbrauch der Jahresnutzungsgrad des weiter betriebenen (Betriebsoptimierung) oder eines neuen Heizkessels vorhanden ist und damit messbare Werte für die tatsächliche Nutzwärme und die tatsächlichen Kesselverluste vorliegen. Das Risiko des Nachweises der Kostenneutralität liegt dann korrekt bei den Vertragsparteien Vermieter und Wärmelieferant. Der Wärmepreis kann dann erst ca. ein Jahr nach Übergang auf Wärmelieferung genau kalkuliert werden. Da Kostenneutralität aber die Mindestanforderung ist (im BGB heißt es „nicht übersteigen"), muss es der juristischen Klärung vorbehalten sein, ob eine nachträgliche „Punktlandung" dem Gesetz entspricht.

Besser ist es, wenn bereits in der Altanlage ein Wärmemengenzähler mindestens über eine Sommer- und eine Heizperiode installiert wird, um die Chancen und die Einsparpotenziale eines Übergangs zu Wärmelieferung für alle Seiten transparent und frühzeitig sichtbar zu machen.

Weitere Ideen zur Weiterentwicklung von Mini-Contracting-Dienstleistungen sind der Studie von Clausnitzer und von Hebel [263] zu entnehmen.

Die für Selbstnutzer und Mieter/Vermieter-Konstellationen genannten Hemmnisse und Problemstellungen sind davon unberührt.

3.11 Nichtwohnbau und Neubau

Das Energieeffizienzpotenzial von Gebäuden im Nichtwohnbau und im Neubau ist trotz umfassender Regelwerke noch nicht ausgeschöpft. Viele der in diesem Gutachten für den Wohnungsbaubestand erarbeiteten Ergebnisse zur Gebäude- und Anlagentechnik lassen sich zumindest qualitativ übertragen.

3.11.1 Übertragung der Erkenntnisse auf den Nichtwohnbau

Aus einer Rezension zu einem Vortrag des Gutachters Prof. Wolff auf einer Tagung über die Entwicklung der TGA 2015 in München lassen sich die Erkenntnisse zum zukünftig forcierten Ausbau von PV und Windkraft auch für die Versorgung von Nichtwohngebäuden gewinnen [264]:

> *„Im Gegensatz zu manch einem seiner Kollegen und den Erkenntnissen des Referenten Johannes Weitzel von Carpus+Partner, plädiert Prof. Dieter Wolff, Fakultät Versorgungstechnik, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel, für höhere Anforderungen an den Wärmeschutz. Wichtig sei allerdings, die Bauunterhaltskosten systematisch zu erfassen und grundsätzlich mehr Zähler in die gebäudetechnischen Anlagen einzubauen, um damit mehr Informationen über die Effizienz anlagentechnischer Lösungen, Nutzergewohnheiten und damit über die Energieeffizienz bestimmter Verfahren für unterschiedliche Gebäudestandards zu erhalten.*
>
> *Wolff ist – ähnlich wie die Initiative Agora Energiewende – der Auffassung, dass sich die TGA-Branche mehr um Stromanwendungen kümmern müsse, zumal der Anteil von Strom aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen an der Gesamtenergieerzeugung kontinuierlich steige. […] Ein forcierter Ausbau von Fern- und Nahwärmesystemen sowie von Mini-KWK-Anlagen müsse aus wirtschaftlichen und klimapolitischen Gründen kritisch hinterfragt werden, da es durch den weiteren Ausbau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen zu Verschiebungen bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen kommen werde. Wolff sieht folgende Trends:*
>
> - *Solare Nahwärme ist wegen hoher Speicher- und Verteilverlusten (durch Praxisbeispiele bestätigt) kaum mehr wirtschaftlich darstellbar*
> - *träge Wärmeübergabesysteme, wie Fußbodenheizungen und Betonkerntemperiersysteme, sind in hochwärmegedämmten Gebäuden kaum regelbar […]*
> - *Neue Wärmepumpen Anlagen in hochwärmegedämmten Gebäuden: mit Niedertemperatur-Heizkörpern ausstatten, maximale Vorlauftemperatur 45°C"*

Einige dieser Vorschläge sind Stand August 2020 bereits in politische Entscheidungen eingeflossen. So wird nach den Klimaschutzgesetzen der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Hamburg zukünftig eine Pflicht für die Nutzung der Dächer von zunächst Nichtwohngebäuden ausgesprochen. Für die Einführung von BIM wurde eine Schulungskampagne zwischen BMI, Bundesarchitektenkammer und Bundesingenieurkammer gestartet, deren Teilnahmezertifikate zukünftig für Bundesbauten verpflichtend werden soll.

Für den Nichtwohnbau werden somit zukünftig – primär gefordert durch die öffentliche Hand – immer stärker der Einsatz von Building Information Management/Modeling BIM und eine von der Grundlagenplanung bis zum Monitoring im nachfolgenden Betrieb gesamtheitliche integrale Planung gefordert. Hierfür vorbildlich sind als Leitfaden die Leitlinien wirtschaftlichen Bauens der Stadt Frankfurt [35] heranzuziehen.

Weitere Aspekte, die für den Wohnungsbau detailliert in diesem Gutachten untersucht wurden, werden qualitativ auf den Nichtwohnungsbau übertragen. Die Gutachter wählen für die Reihenfolge der Beschreibung die auch im Wohnungsbau etablierte Vorgehensweise: Gebäudehülle, Haupterzeuger, Peripherie, Zusatzerzeuger.

Hintergrundinformationen zu der Frage, welche Nichtwohnbauarten und in welcher Zahl sowie mit welchem Zustand der Gebäudehülle und Versorgungssystemen überhaupt in Deutschland vorhanden sind, geben Anhang 5.6.3 und 5.7.2 Auskunft. Sie basieren aus den sehr ausführlichen Recherchearbeiten von Jochum et al. zum „Dämmpotenzial“ sowie „Anlagenpotenzial“ von Gebäuden [127] [119].

Dämmung der Gebäudehülle und Fensterqualitäten

Die in diesem Gutachten, Anhang 3.2.1, 3.2.3 und 3.2.4 für die Wohnbausanierung vorgeschlagenen „besten“ Dämmqualitäten von Dach, Bodenplatte und Außenwänden können auch auf den Nichtwohnbau übertragen werden. Wichtige Voraussetzung ist: die Gebäude müssen ähnlich hohe Rauminnentemperaturen aufweisen wie Wohnbauten und nicht durch riesige Fremdwärmeaufkommen geprägt sein. Diesen beiden Anforderungen genügen:

- Krankenhäuser, Bildungsbauten, Beherbergungsstätten und Heime, Büros und büroähnliche Betriebe sowie Kultureinrichtungen

Bei anderen Nichtwohnbauten, z. B. dem produzierenden Gewerbe, aber auch Wäschereien und Küchen sind häufig geringere Dämmqualitäten ausreichend, weil große interne Wärmequellen das Objekt beheizen. Sportbauten, Lager und ähnliche Objekte mit geringeren Innentemperaturen können ebenfalls mit weniger Dämmstärke auskommen, z. B. einem „mittleren“ bis „guten“ Standard.

Es ist allerdings zu bedenken – und dies bei allen Objekten – Bodenplatten sind nachträglich praktisch unsanierbar. Sie werden daher im Zweifelsfall sofort besser gestaltet, als die aktuelle Nutzung es erforderlich macht. Außerdem sind bei Dächern ebenfalls eher höhere Qualitäten zu erzielen, als es der Innentemperatur angemessen scheint, um einer sommerlichen Überhitzung vorzubeugen.

Für die Fensterqualitäten gelten analoge Überlegungen. Bei allen wohnähnlichen Nutzungen sind auch wohnähnliche Fenster einzusetzen. Aus Gründen des sommerlichen Wärmeschutzes kommen evtl. auch Sonnenschutzverglasungen zum Einsatz, die im Wohnungsbau eher untypisch wären.

Wärmeerzeuger

Hinsichtlich der Wärmeerzeuger ist die Notwendigkeit eines Ausstieges aus fossilen Energieträgern ebenso notwendig wie im Wohnungsbau. Daher gelten die im Anhang 3.3 getätigten Aussagen entsprechend.

Insbesondere für Nichtwohnbauten mit gleichzeitigem Wärme- und Kältebedarf über weite Teile des Jahres sind Wärmepumpen/Kältemaschinen-Systeme mit Doppelnutzung anzustreben, vgl. auch die Ausführungen von Kalz et al. [265]. Dies sind:

- Krankenhäuser, Hotels, Küchen, Verkaufseinrichtungen

Für Nutzungen ohne nennenswerte Kühlung kommen Wärmepumpen bzw. übergangsweise wie im Wohnungsbau Kessel/Wärmepumpen-Hybridlösungen zum Einsatz:

- Bildungsbauten, Heime, Büros, Kultureinrichtungen, Sportstätten, Lager

In Gebäuden mit nennenswerten Abwärmeströmen, die nicht aus einer Kühlung resultieren (Druckluft, Verbrennung, chemische Prozesse usw.), lassen sich Verbundnetze zur internen Wärmeverschiebung einschließlich kleiner Nahwärmeverbünde aufbauen. Sofern das Temperaturniveau ausreichend ist, kann dies ohne Wärmepumpen erfolgen, sonst mit.

- Wäscherei, Gebäude der Landwirtschaft, produzierendes Gewerbe

Aus industrieller Abwärme heraus ist im Einzelfall auch der Aufbau von Fernwärme sinnvoll, z. B. aus einer Müllverbrennung oder Aluminiumhütte.

Trinkwassererwärmung und Verteilnetze

Für die Trinkwassererwärmung gelten die Aussagen aus dem Wohnungsbau analog, vgl. Anhang 3.4.1 und 3.4.2: jegliche unnötigen Leitungsnetze sind zu vermeiden. Der Zentralisierungsgrad ist auch heute schon eher gering unter den Nichtwohnbauten und wird nach Einschätzung der Gutachter noch abnehmen. Lediglich einzelne Nutzungen mit großen Trinkwarmwasserbedarfen in der Fläche werden zentralisiert – analog dem Wohnungsbau – ausgeführt:

- Krankenhäuser, Hotels, Heime, Beherbergungseinrichtungen

Punktuelle Zentralsysteme mit überschaubarer Ausdehnung in der Fläche können beispielsweise aus einer Wärmepumpe oder einer Abwärmequelle gespeist werden:

- Sportstätten, Produktionsbetriebe, Handelsgebäude, landwirtschaftliche Nutzung, Wäschereien

Klassische dezentrale Systeme, die über die gesamte Fläche verteilt sind, i. d. R. als Elektrokleinspeicher oder Elektrodurchlauferhitzer ausgeführt finden sich in:

- Bildungsbauten, Büros, Kultureinrichtungen

Der Industriesektor lässt sich an dieser Stelle nicht verallgemeinern.

Für die Dämmung der Rohrnetze und die Verwendung mit Strom (z. B. aus einer Photovoltaik) beheizter Speicher gelten die Aussagen des Wohnungsbaus identisch.

Heizkörper, Flächenheizung, Luftheizung

Analog dem Wohnungsbau gelten die gleichen Hinweise zur Regelbarkeit der Systeme, siehe Anhang 3.4.3. Am schnellsten reagieren Luftheizungen, etwas träger sind Heizkörper und die trägsten Systeme sind Flächenheizungen.

Je größer der intermittierende Betrieb, also der Wechsel zwischen Nutzungsphasen und Nichtnutzungsphasen, desto weniger sinnvoll sind träge Heizsysteme. Das gilt auch für alle Nutzungsarten, in denen innerhalb kurzer Zeiträume große Lastwechsel erfolgen (zyklisches Backen, zyklisches Waschen usw.).

Im Gegenzug: je wohnähnlicher eine Nutzung, desto eher ist evtl. die Verwendung einer Flächenheizung gegeben. Das betrifft auch die Überlegung, ob es eine Wochenendabsenkung gibt oder nicht.

Integration von Photovoltaik und Solarthermie

Die Photovoltaik lässt sich in alle Nichtwohnbaunutzungen integrieren, weil überall Strom benötigt wird.

Alle Nutzungen mit deutlicher Ausprägung der „Tagnutzung“ profitieren davon am meisten. Optimal wäre gleichzeitig der Betrieb an jedem Wochentag, wobei solche Ausprägungen selten sind. Auch unter Berücksichtigung einer Nichtnutzung am Wochenende sind folgende Nichtwohnbauten sinnvoll mit PV zu unterstützen:

- Bildungsbauten, Schulen, Krankenhäuser, Handelsgebäude, landwirtschaftliche Gebäude

Ungünstige Voraussetzungen sind gegeben, wenn die Nutzung sehr sporadisch eintritt und zwischenzeitlich keine Nutzung gegeben ist, z. B. in einigen Kultureinrichtungen.

Die Solarthermie kann ggf. gut eingebunden werden, wenn große Trinkwarmwassermengen benötigt werden, im besten Falle täglich und ohne Sommerpause:

- Sportstätten (außerhalb von Schulen), ggf. Krankenhäuser.

Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Aus Gründen der Lufthygiene (Schadstoffe, dichte Belegung mit Personen) oder weil ggf. ohnehin ein schnell reagierendes Heizsystem auf Basis von Luft erwogen wird, ist die Verbreitung von Lüftungsanlagen im Nichtwohnungsbau schon heute größer. Aus Sicht der Gutachter wird die Verbreitung von Anlagen mit Wärmerückgewinnung noch weiter zunehmen, vor allem in:

- Bildungsbauten, Sportstätten, Krankenhäusern

Ob jeweils eine direkte Wärmerückgewinnung mit Erwärmung der Frischluft notwendig ist, ist im Einzelfall zu prüfen. Alternativ lässt sich die Wärme nutzen, um Wasser zu erwärmen. Dies betrifft vor allem antizyklische Nutzungen wie Wäschereien oder Küchen. Hier ist im Moment des größten Wärmeanfalls keine Luftheizung notwendig (weil die Abwärme ohnehin zu groß ist), aber zu anderen Tageszeiten wird Wärme benötigt.

Gebäudekühlung

Nur etwa 2 % der Fläche im deutschen Wohnungsbau sind mit einer Anlage zur Raumkühlung ausgestattet. Zudem werden die Anlagen in einem zeitlich nur sehr geringen Umfang betrieben, so dass sich sehr geringe Endenergieaufwendungen von 1 bis 5 kWh/(m²a) für die Kühlung ergeben.

Dagegen ist die flächenmäßige Durchdringung einerseits, als auch die Nutzungsintensität andererseits im Nichtwohnbau ungleich höher:

- Handel: 66 % gekühlt, Endenergie 33 kWh/(m²a)
- Büro, Verwaltung: 51 % gekühlt, Endenergie 20 kWh/(m²a)
- Hotel, Restaurant: 30 % gekühlt, Endenergie 17 kWh/(m²a)
- Krankenhäuser: 20 % gekühlt, Endenergie 19 kWh/(m²a)
- Bildungsbauten: 14 % gekühlt, Endenergie 11 kWh/(m²a)

Die im Gebäude benötigte Kühlenergiemenge ergibt sich aus der Bilanz der Transmissions- und Lüftungswärmeströme sowie der solaren und inneren Fremdwärme. Im Kühlfall ist ein Überschuss an Wärmeeinträgen in die Räume vorhanden. Bei der energetischen Bilanzierung wird die übliche Kette vom Erzeuger über ggf. Speicher und Verteilnetze bis zur Übergabe an den Nutzer durchlaufen. Ein Teil der eingesetzten Endenergie wird dabei als "technischer Verlust" (bzw. Mehraufwand gegenüber dem Nutzen) verbucht. Dieser Anteil kann mit Hilfe von Kennwerten für die technischen Systemkomponenten beschrieben und eingeschätzt werden.

Stand August 2020 wird im Entwurf des Hamburgischen Klimaschutzgesetzes eine Nachweispflicht für den Einbau von Klimaanlagen mit Kühlfunktion gefordert. Die baulich sinnvolle Begrenzung von Fensterflächen in Büroneubauten ohne Gewährleistung eines ausreichenden sommerlichen Wärmeschutzes ohne Kühlerfordernis könnte damit wieder mehr in die Neubaupraxis Eingang finden.

Beleuchtung und Tageslichtnutzung

Anders als im Wohnungsbau entfallen in vielen Nichtwohnbauten große Anteile des Stromverbrauchs auf die Beleuchtung. Daher ist im effizienten Nichtwohnbau einer optimalen Beleuchtung (Tageslichtnutzung und Kunstlichteinsatz) ein größerer Stellenwert einzuräumen.

Gebäudeautomation

Aufgaben der Gebäudeautomation sind die gewerkeübergreifende Überwachung, Steuerung, Regelung und Optimierung von Gebäuden bzw. Anlagen in Gebäuden. Auch die Verbrauchsüberwachung fällt darunter.

Für die technischen Anlagen eines Gebäudes können mit Hilfe der Gebäudeleittechnik GLT zur Nutzung passende Betriebszeiten vorgesehen werden. Im optimalen Fall werden auch Ferien, Urlaub und Feiertage berücksichtigt. Eine weitere Option sind optimierte (Belegung, thermische Trägheit o. ä.) anstelle fester Ein- und Ausschaltzeiten. Mit Hilfe der GLT können Sollwerte in den Räumen zentral verwaltet, vorgegeben und geändert werden. Ein Beispiel sind an die Außentemperatur angepasste Sollwerte für die Raumtemperatur.

Außerdem kann mit GLT verhindert werden, dass gleichzeitig geheizt und gekühlt wird, bei offenen Fenstern gekühlt (oder geheizt) wird, bei deaktivierter Verschattung gekühlt wird. Weitere Maßnahmen zur Anlagenverriegelung sind denkbar.

Einschränkungen hinsichtlich der Nutzeranforderungen (z. B. thermischer Komfort, Raumluftqualität), die im Zusammenhang mit der Anwendung der Gebäudeautomation stehen, sind nicht zulässig. Daher sind Raumbelegungen zu erfassen und bei der Regelung und Steuerung zu berücksichtigen.

Qualitätssicherung und Einbindung der Nutzer

Die Hinweise dieses Gutachtens zur Qualitätssicherung, vgl. Anhang 3.6, sind auf den Nichtwohnbau übertragbar. Sie können an ein Monitoring und BIM gekoppelt werden.

Die Umsetzung von Building-Information-Management/Modeling BIM in größeren Nichtwohnbaukomplexen in die Praxis, die Einführung von Energiemanagement- und Energiemonitoring-Systemen und die damit verbundene Dokumentation von Gebäude- und Verbrauchsdaten gelten als wichtige Eckpunkte zu mehr Gebäudeenergieeffizienz. Gleichzeitig können damit aussagefähige Daten zur Lebenszyklusbetrachtung und zum Benchmarking von Gebäudetypen generiert werden.

Der Leitfaden „Wirtschaftliches Bauen“ [35] der Stadt Frankfurt kann bei der Umsetzung in Planung, Ausführung und Betrieb nach Ansicht der Gutachter eine große Hilfe sein.

Da auch im Nichtwohnbau ein Rebound-Effekt im Zusammenhang mit Modernisierungsmaßnahmen bekannt ist, vgl. Studie von Weiß et al. [266], sind die Nutzer in den Prozess einzubeziehen.

3.11.2 Übertragung der Erkenntnisse auf den Neubau

Die Erkenntnisse aus der Bestandsmodernisierung lassen sich mit geringen Modifikationen auf den Neubau übertragen. Viele Technologien lassen sich bei der Erstinstallation sehr viel einfacher herstellen als im Sanierungsfall: die Dachintegration einer PV-Anlage, Trinkwarmwasserverteilsysteme mit optimiert kurzen Leitungswegen, Regelungstechnik eines Herstellers, um einige Beispiele zu nennen.

„Zweiter Lösungsansatz“: Bestmöglicher Neubau

In einer umfangreichen Studie haben IWU/BET 2019 [57] Vorschläge für zukunftsfähige Neubauten als Bausteine für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand bis 2050 erarbeitet: „Energieeffizienz und zukünftige Energieversorgung im Wohngebäudesektor: Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage (EE-GebäudeZukunft)“.

In dem hier vorliegenden Gutachten wird zum Vergleich für die Anforderungen an ein neues Gebäude der „Zweite Lösungsansatz“ des IWU herangezogen:

> *Neben diesem ersten wird noch ein zweiter Ansatz für das zukunftsfähige Gebäude verfolgt, der auf die Erstellung einer Energiebilanz völlig verzichtet: Hier wird angenommen, dass sich ein vorbildlicher Neubau auch aufgrund seiner Einzelkomponenten begründen lässt – unter Umgehung aller mit Energiebilanzen zusammenhängenden Bewertungsprobleme und somit für viele Bauherren möglicherweise sogar besser verständlich. Dem Bauherrn wird im Neubau nahegelegt, sich an den aus technischer Sicht besten Lösungen zu orientieren – sowohl beim Wärmeschutz auch bei der Wärmeversorgung. Gleichzeitig werden ihm aber auch Spielräume eingeräumt, das Konzept ist also keineswegs so zu verstehen, dass immer nur das Beste vom Besten sinnvoll ist.*

Konkret wird für den Wärmeschutz der Einzelbauteile im Neubau eine Spannbreite zur Orientierung aufgezeigt. Diese reicht jeweils von einem sehr weitgehenden, am Passivhaus- bzw. Effizienzhaus-40-Standard orientierten Zielwert für den jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizienten bis zu einer weniger weitgehenden Obergrenze, die ungefähr dem Effizienzhaus-55-Standard entspricht.

Weiterhin wurden für die Anlagentechnik Randbedingungen formuliert, damit das Einzelgebäude mit dem Gesamtsystem interagieren kann und dadurch die maximal zur Verfügung stehenden Potenziale nicht überschritten werden. Diese können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- *Jedes zukunftsfähige Gebäude muss in der Lage sein, Sonnenenergie zu nutzen – bevorzugt in Form von Photovoltaikanlagen (PV) […]*
- *[…] Aus diesem Grund müssen die Gebäude in der Lage sein Windstrom zu nutzen, der bis auf wenige Ausnahmen nicht am Gebäude erzeugt wird. Dazu ist in der Regel ein Wärmespeicher zum Ausgleich von Energieangebot und -nachfrage erforderlich, außerdem eine Wärmepumpe oder – weniger effizient – ein Elektroheizstab zur Umwandlung des Windstroms in Wärme […]*
- *Da im Sommer ausreichend Sonnenenergie zur Verfügung steht, sollte das Gebäude keinen Brennstoff (fossil oder regenerativ) im Sommer verbrauchen, weder direkt noch indirekt über das vorgelagerte Energieversorgungssystem. […]*
- *Als Wärmeerzeuger in zukunftsfähigen Gebäuden sind Wärmepumpen besonders geeignet, aber auch mit anderen Systemen können die Klimaziele im Einzelgebäude erreicht werden. In der Fläche werden gegenwärtig keine Alternativen zur Wärmepumpe gesehen.*
- *Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung werden empfohlen, Gebäude mit Fensterlüftung können grundsätzlich aber auch gebaut werden; das führt in der Regel aber zu strengeren Anforderungen an den Wärmeschutz und die übrige Anlagentechnik.*
- *Zukunftsfähige Gebäude benötigen bis zum Jahr 2050 eine Regelung, die die Wärmeerzeugung im Gebäude so weit wie möglich an das Angebot an regenerativen Energien im Netz anpasst […]*
- *Insgesamt liefert dieser zweite Ansatz also eine Art Baukastensystem: Wenn ein guter Wärmeschutzstandard und die beste Systemtechnik kombiniert werden, so ist nach heutiger Kenntnis ziemlich sicher, einen zukunftsfähigen Neubau zu erhalten […].*

Dieses Gutachten versucht, weitgehend die Anforderungen des zweiten Lösungsansatzes nach der IWU/BET-Studie 2019 mit besten Gebäudestandards und beschleunigtem Ausbau von Wärmepumpen nicht nur für neue Gebäude, sondern auch – wenn wirtschaftlich zu rechtfertigen - bei der umfassenden Bestandsmodernisierung zu erfüllen.

4 Anhang: Detaildarstellung zur Untersuchung der Makroperspektive

Dieser Anhang stellt die Inhalte des Kapitel 1.5 und 1.6 detaillierter und mit weiteren Hintergrundinformationen, Beispielen, Tabellen und Abbildungen dar.

Die aus der Betrachtung der Einzelgebäude gewonnenen Erkenntnisse werden nachfolgend auf den Gesamtbestand übertragen. Dies erfordert Annahmen, in welcher Geschwindigkeit und mit welcher Tiefe sich die baulichen Sanierungsmaßnahmen sowie die Anlagentechniken künftig im Markt ausbreiten. Die im Rahmen dieses Gutachtens getroffenen Annahmen werden in Anhang 4.2 erläutert und anhand der verfügbaren Literatur eingeordnet.

Anschließend kann in Anhang 4.3 dargestellt werden, wie sich Endenergie, Primärenergie und Emissionen im Zeitverlauf ändern und mit welchen Kosten der Umbau verbunden ist. Dabei wählen die Gutachter den auch in anderen Veröffentlichungen üblichen Blick bis in das Jahr 2050.

Die vorliegenden Überlegungen beschränken sich dabei auf EIN mögliches Zukunftsszenario. Da jegliche Prognose über den Zeitraum von 5 Jahren hinaus mit sehr großen Unsicherheiten verbunden ist, stellt dieses den nach Ansicht der Gutachter besten Pfad zum Erreichen der Klimaziele dar, wenn auch selbstverständlich ist, dass es alternative Wege gibt.

Dies zeigt die Analyse vorhandener Studien vorab (Anhang 4.1).

Die eigenen Überlegungen gehen strikt davon aus, dass energetischen Verbesserungen sich ergeben, wenn der betroffene Bestandteil der Gebäudehülle oder der Anlagentechnik ohnehin den individuellen Sanierungszyklus erreicht haben. Es werden aus Kostengründen keine Sanierungen vorgezogen und keine größeren Sanierungsraten angenommen als es dem Sanierungszyklus entspricht. Dieser wird – getreu den üblichen Gepflogenheiten der Gebäudebesitzer – vergleichsweise lang gewählt. Allerdings erscheint es sinnvoll, die Maßnahme im Falle der Umsetzung „best practice“ ausgeführt werden, um entsprechend keine wirtschaftlichen Chancen zu vertun. Sie gelten für das „Hauptszenario“ des Gutachtens (für zwei betrachtete Varianten notwendige Modifikationen werden separat erläutert).

Maßnahmen, die einen großen Eingriff in die Substanz bedeuten (bis hin zur zeitweisen Unbewohnbarkeit beim Einbau von Flächenheizungen), werden – ebenfalls getreu der üblichen Baupraxis – mit sehr geringen Umsetzungswahrscheinlichkeiten angenommen. Gegenteilige Maßnahmen, zudem mit guter Wirtschaftlichkeitsprognose, mit sehr hohen (z. B. die Nachrüstung von Photovoltaik).

Durch die Orientierung am Sanierungszyklus aller erforderlichen bzw. ohnehin vorhandenen Bestandteile des Gebäudes vermindern sich die Freiheitsgrade für die Zielerreichung. Letztlich sind es nur die zusätzlichen Erzeuger – namentlich Photovoltaik – deren Einbaugeschwindigkeit gänzlich variabel ist. Diese wird so gewählt, dass das Klimaziel erreicht werden kann. Damit folgt die Festlegung nur dieser einzelnen Komponente der von Rehkugler et al. beschriebenen üblichen Gepflogenheit für die Entwicklung von „Makroperspektiven“ [117]:

> *„[…] Sie stellen keine Prognosen der zu erwartenden Entwicklung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen dar. Vielmehr […] wollen sie Wege aufzeigen, wie im Zeitablauf die gesteckten Ziele erreicht werden können. Sie formulieren hierzu Annahmen bzw. präzise Bedingungen, die eintreten müssen bzw. für deren Eintritt gesorgt werden müsste. Letztlich sind sie eher Rückrechnungen von den Zielen zu den dafür notwendigen Bedingungen.“*

4.1 Einordnung relevanter Quellen

In der Literatur finden sich viele Studien ähnlichen Inhalts, die vorab analysiert werden. Es wird unterschieden in „Makrostudien“ und „Metastudien“. Erstere skizzieren mit einem oder mehreren Szenarien Pfade zur Klimazielerreichung – meist bis 2050. Letztere fassen mehrere solcher Studien bzw. deren Teilaspekte (z. B. nur die prognostizierte Sanierungsrate, die Stückzahlen zu installierenden Wärmepumpen usw.) zusammen.

4.1.1 Makrostudien

Die Autoren haben in Vorbereitung auf die Erstellung des vorliegenden Gutachtens zahlreiche alternative Makrostudien der ca. letzten 10 Jahre gesichtet. Das Hauptaugenmerk lag jeweils bei den nachfolgend aufgezählten Kriterien schwerpunktmäßig darin, in der Einzelanalyse und im Studienvergleich:

- die jeweils vorliegende Datenbasis, insbesondere die Mengengerüste zur Beschreibung des Gebäudebestandes sowie die Kostendaten auf Praxisnähe, Aktualität und notwendige Detailtiefe zu prüfen und eine eigene Datenbasis aufzubauen,
- die von anderen Autoren gewählte Vorgehensweise bei der Bearbeitung zu verstehen und ggf. zu adaptieren, insbesondere die Energiebilanzierung mit Ergebnisabgleich zum realen Verbrauch sowie die Wirtschaftlichkeitsbewertung und ihren Umgang mit ohnehin notwendigen Sanierungstatbeständen,
- die Bandbreiten (Meinungsfelder der Experten) für Zukunftsprognosen abzustecken, z. B. die künftige Marktdurchdringung einzelner Produkte, Markthemmnisse und -restriktionen, natürliche und künstlich hervorgerufene Sanierungsgeschwindigkeiten, und an die eigene Analyse anzupassen.

Studien mit Einbezug aller Sektoren

Tabelle 136 zeigt – absteigend nach Relevanz für das eigene Gutachten sortiert – eine Reihe von Studien, die alle emissionsverursachenden Sektoren umfassen. Es liegt in der Natur der Sache, dass aufgrund der Komplexität die Datendokumentation im Bericht entsprechend sparsamer ausfällt. Daher sind aus den genannten Gutachten eher die globalen Parameter zu recherchieren: Emissionsfaktoren für die Stromerzeugung, Zusammensetzung des Kraftwerksparks usw.

Nr. 1			
Titel	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen		
Verfasser	Fraunhofer ISE	Quelle	[68]
Auftraggeber	Fraunhofer ISE	Jahr	2020
betrachtete Sektoren	alle	Szenarien Anzahl	Ref+5
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2030, 2040, 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	sehr große Ergebnisunterschiede (Art der Technologien und Durchdringung mit Dämmung) in den Szenarien; keine explizite Empfehlung eines Szenarios, jedoch mehrfacher Hinweis, dass „Suffizienz“ zu einem geringeren Erzeugungsaufwand für die regenerativ Energie führt; Photovoltaik ist als Ersatz für Windkraft anzusehen, braucht aber mehr Speicherung		
Art und Umfang Gebäudebilanz	„REMOD“-Simulationsmodell; 9 Wohnbau- und 10 Nichtwohnbautypgebäude; stündliche Berechnung		
Einschätzung der Energiebilanz	eigene Programmierung; Anlagentechnikeffizienzen plausibel, soweit angegeben (außer Holzkessel: zu gut); Wärmepumpeneffizienzen unbekannt; Abgleich Bedarf-Verbrauch nicht thematisiert; Abhängigkeit der Effizienzen von der Verbesserung der Gebäude bzw. im Zeitverlauf nicht prüfbar		
Einschätzung der Kostendaten	Investitionskosten Anlagentechnik sowie deren Wartung/Instandhaltung plausibel; bauliche Modernisierung deutlich zu günstig; Lebensdauern plausibel; starke Lernkurveneffekte u. a. für Wärmenetze, Solarthermie, Wärmepumpen, Photovoltaik – jedoch keine für Wärmedämmung/Fenster		
Art der Energiepreisentwicklung	konstante Energiepreise für die fossilen Importenergieträger; für synthetische Energieträger sinkende Preise		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	ja, eines der Szenarien („Suffizienz“)		
Offenlegung von Daten	Kostendaten und einige Effizienzangaben im Bericht; Mengengerüst nicht im Bericht nachvollziehbar		

Tabelle 136 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende in allen Sektoren [eigene Darstellung]

Nr. 2			
Titel	Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung		
Verfasser	IFEU, Fraunhofer IEE, CONSENTEC	Quelle	[128]
Auftraggeber	AGORA	Jahr	2018
betrachtete Sektoren	alle	Szenarien Anzahl	Ref+5
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2030 / 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	ein Effizienzszenario sollte umgesetzt werden; die weiteren Optionen (Erneuerbare Energien, Wärmepumpen, PtX) sind dann nahezu gleichrangig		
Art und Umfang Gebäudebilanz	„GEMOD"-Simulation (keine weitere Offenlegung)		
Einschätzung der Energiebilanz	angelehnt an EnEV; Bedarfs-Verbrauchsanpassung per Faktor, keine Einschätzung über weitere Detailtiefe möglich; Qualitätssicherung nicht gesondert berücksichtigt		
Einschätzung der Kostendaten	moderate Lernkurven; Lebensdauern nur für bauliche Maßnahmen verfügbar, nicht für Anlagentechnik; Wartungskostenansätze nicht verfügbar		
Art der Energiepreisentwicklung	angelehnt an heutiges Preismodell; Importpreise an IEA Preisszenario angelehnt; deutlich sinkende PtX-Preise; keine separate CO_2-Bepreisung		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein; aber Hinweis auf BNB		
Offenlegung von Daten	Mengengerüst Bau/Anlage nicht verfügbar; gewählte Anlageneffizienzen nicht verfügbar; Investitionskosten sehr gut dokumentiert		
Nr. 3			
Titel	Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor & DENA-Leitstudie Integrierte Energiewende		
Verfasser	EWI, ITG, FIW	Quelle	[157] [67]
Auftraggeber	DENA, GEEA	Jahr	2017/18
betrachtete Sektoren	alle	Szenarien Anzahl	Ref+4
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2030, 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine explizite Empfehlung eines Pfades; Hinweis, dass Technologiemix kostengünstiger hinsichtlich der Investition in die Gebäude ist (das PtX wird weitgehend importiert)		
Art und Umfang Gebäudebilanz	3 Gebäudetypen Wohnbau (EZFH, MFH, GMFH) in 3 Zuständen plus Neubau nach ARGE, 8 Nichtwohnbautypen		
Einschätzung der Energiebilanz	angelehnt an EnEV-Normen (DIN V 4108/4701, DIN V 18599); Bedarfs-Verbrauchs-Korrektur über Faktor; Technikeffizienzen über Gesamtaufwandszahlen (Wärmepumpen und Holz relativ optimistisch); Verbesserungen im Zeitverlauf/bei verbesserter Gebäudeeffizienz plausibel; keine Berücksichtigung weiterer Einflüsse, z. B. Qualitätssicherung		
Einschätzung der Kostendaten	moderate Lernkurven für fast alle Erzeuger (nicht plausibel: auch für Brennwerttechnik); Berücksichtigung von Wartung/Instandhaltung nach BTGA/VDI; plausible Sanierungskosten für Gebäudehülle; Lebensdauer Gebäudehülle und Technik vergleichsweise kurz (40/20 a)		
Art der Energiepreisentwicklung	Berücksichtigung des ETS-Preises; Großhandelspreise der Energieträger mit verschiedenen Steigerungsraten (je nach Szenario) zwischen ca. 3 bis 5 %/a		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	Kostendaten; Anlageneffizienzen nachvollziehbar; Mengengerüst Gebäude (Hüllflächen) sowie deren energetische Eigenschaften nicht verfügbar		

Tabelle 136 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende in allen Sektoren [eigene Darstellung]

Nr. 4			
Titel	Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 (Teilbericht)		
Verfasser	Prognos, Fraunhofer ISI, GWS, IINAS	Quelle	[171]
Auftraggeber	BMWi	Jahr	2020
betrachtete Sektoren	alle	Szenarien Anzahl	Ref+1
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2030		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine Alternativberechnungen vorgesehen; das Szenario enthält alle Maßnahmen, die von den Bundesregierung mit dem „Klimaschutzprogramm 2030“ beschlossen sind und identifiziert weitere Lücken		
Art und Umfang Gebäudebilanz	internes Gebäudemodell (nicht offengelegt)		
Einschätzung der Energiebilanz	keine Einschätzung möglich		
Einschätzung der Kostendaten	im Bericht sind keine Investitions- oder Wartungskosten enthalten; Energiekosten plausibel und nachvollziehbar		
Art der Energiepreisentwicklung	steigende Importpreise (Extrapolation früherer Beobachtungen); ETS-Preis eingeschlossen; Änderungen bei EEG-Umlage berücksichtigt		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	angekündigt für den Endbericht		
Nr. 5			
Titel	Klimaschutzszenario 2050		
Verfasser	Ökoinstitut, Fraunhofer ISI	Quelle	[267]
Auftraggeber	BMU	Jahr	2015
betrachtete Sektoren	alle	Szenarien Anzahl	Ist+2
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine eindeutige Präferenz für eines der Szenarien		
Art und Umfang Gebäudebilanz	„ERNSTL/EE-Lab/INVERT“-Simulation; keine weitere Offenlegung der Daten		
Einschätzung der Energiebilanz	vereinfacht nach den EnEV-Normen (DIN V 4108/4701), unklar ob auch für Nichtwohnbauten; Bedarfs-Verbrauchsanpassung per Faktor; keine detaillierten Einflüsse der Qualitätssicherung; Einfluss des baulichen Standards auf Wärmepumpen gegeben; unklare Parametrierung der anderen Eingangsgrößen (Temperaturen des Heizsystems, Anzahl Flächenheizung usw.)		
Einschätzung der Kostendaten	keine Einschätzung möglich, weil keine Daten zu Investitionskosten, Lebensdauern, Wartung usw. verfügbar sind		
Art der Energiepreisentwicklung	angelehnt an heutiges Preismodell; Importpreise an IEA Preisszenario angelehnt; mit Einbezug der CO_2-Bepreisung		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	sparsameres Nutzerverhalten im Hocheffizienzszenario (auf 19°C abgesenkte Raumtemperatur)		
Offenlegung von Daten	für den Sektor „Gebäude“ sind nur wenige Werte nachvollziehbar		

Tabelle 136 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende in allen Sektoren [eigene Darstellung]

Nr. 6			
Titel	Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global		
Verfasser	DLR, Fraunhofer IWES, Ingenieurbüro für neue Energien	Quelle	[213]
Auftraggeber	BMU	Jahr	2010
betrachtete Sektoren	alle	Szenarien Anzahl	4
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2015, 2020, 2025, 2030, 2040, 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine Präferenz der unterschiedlichen Szenarien erkennbar; im Bereich Gebäude starker Fokus auf Solarthermie und Wärmenetze		
Art und Umfang Gebäudebilanz	kann nicht beurteilt werden (Schwerpunkt ist der Studie ist die Energieerzeugung, nicht Energienutzung)		
Einschätzung der Energiebilanz	kann nicht beurteilt werden, weil nicht komplett offengelegt; Annahmen zu Effizienzen der Erzeuger sind plausibel; Abhängigkeit der Effizienzen von der Verbesserung der Gebäude bzw. im Zeitverlauf gegeben		
Einschätzung der Kostendaten	nur für einzelne Erzeuger vorhanden; sehr starke Lernkurven für Wärmepumpen und Solarthermie vermutet; keine Angaben zu Lebensdauern; Wartungskosten (flächenbezogen) vorhanden, Daten für Pelletkessel sehr gering		
Art der Energiepreisentwicklung	steigende Importpreise (Extrapolation früherer Beobachtungen); ETS-Preis eingeschlossen		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	für den Sektor „Gebäude“ sind nur wenige Werte nachvollziehbar		
Nr. 7			
Titel	Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland		
Verfasser	McKinsey	Quelle	[268]
Auftraggeber	BDI	Jahr	2007
betrachtete Sektoren	alle	Szenarien Anzahl	Ref+1
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2020 (2030)		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine Alternativberechnungen vorgesehen; untersucht werden zunächst alle Maßnahmen; etwa 90 % aller Maßnahmen sind empfehlenswert; Komplettmodernisierungen sind günstiger als Einzelmaßnahmen		
Art und Umfang Gebäudebilanz	keine Einschätzung möglich		
Einschätzung der Energiebilanz	keine Einschätzung möglich		
Einschätzung der Kostendaten	im Bericht sind keine Investitions- oder Wartungskosten enthalten; Energiekosten plausibel und nachvollziehbar		
Art der Energiepreisentwicklung	steigende Importpreise (Extrapolation früherer Beobachtungen); ETS-Preis nicht eingeschlossen, sondern als Vergleichsbasis benutzt		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	für den Sektor „Gebäude“ sind nur wenige Werte nachvollziehbar		

Tabelle 136 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende in allen Sektoren [eigene Darstellung]

Nr. 8			
Titel	Klimapfade für Deutschland		
Verfasser	Boston Consulting Group, Prognos	Quelle	[269]
Auftraggeber	BDI	Jahr	2018
betrachtete Sektoren	alle	Szenarien Anzahl	Ref+4
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2015, 2020, 2030, 2040, 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine Einzelempfehlung verfügbar; insgesamt wird der 80 % Pfad als machbar angesehen (der Gebäudesektor hat dann 30 % der Emissionen von 1990)		
Art und Umfang Gebäudebilanz	internes Gebäudemodell (nicht verfügbar); EZFH und MFH verschiedener Altersklassen; Teilung des Nichtwohnbausektors in 11 Rubriken		
Einschätzung der Energiebilanz	keine Einschätzung möglich, weil keine Offenlegung		
Einschätzung der Kostendaten	keine Einschätzung möglich, Kostendaten (Investition, Wartung) nicht offengelegt; Einbezug von Lernkurven (unklar, ob Gebäude oder Gebäudetechnik davon betroffen ist)		
Art der Energiepreisentwicklung	angelehnt an heutiges Preismodell; Importpreise an IEA Preisszenario angelehnt; mit Einbezug der CO_2-Bepreisung		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	für den Sektor „Gebäude“ sind nur wenige Werte nachvollziehbar		
Nr. 9			
Titel	»Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems		
Verfasser	DECHEMA, RWE, acatech, Wuppertal Institut, Fraunhofer ISE, EnBW, ifo Institut, TU Dortmund, KIT, RWI, Ruhr Universität Bochum, TU München (Nationale Akademie der Wissenschaften, acatech, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften)	Quelle	[270]
Auftraggeber	BMBF	Jahr	2017
betrachtete Sektoren	alle	Szenarien Anzahl	Basis+8
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keines der 8 Szenarien wird explizit empfohlen, sondern nur allgemeine Schlüsse gezogen		
Art und Umfang Gebäudebilanz	keine Berechnung von Einzelgebäuden, sondern Übernahme des Bilanzergebnisses für die „Summe aller Gebäude“ aus anderen Studien; keine Berücksichtigung weiterer Einflüsse, z. B. Qualitätssicherung		
Einschätzung der Energiebilanz	keine Einschätzung möglich		
Einschätzung der Kostendaten	keine Einschätzung möglich		
Art der Energiepreisentwicklung	konstante Preise für Importenergieträger; kein Einbezug von CO_2-Bepreisung o. ä. in die Szenarienbilanz		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	für den Sektor „Gebäude“ sind nur wenige Werte nachvollziehbar		

Tabelle 136 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende in allen Sektoren [eigene Darstellung]

Studien mit Einbezug nur des Gebäudesektors

Tabelle 137 fasst – ebenfalls absteigend nach Relevanz für das eigene Gutachten sortiert – Studien zusammen, die sich im Schwerpunkt dem Gebäudesektor widmen.

Auf Basis des Ergebnisvergleiches der Studien ist zu vermuten, dass es nicht zwangsweise notwendig ist, den Gebäudebestand mit einer großen Detailtiefe abzubilden. Die Simulationsverfahren (auf Basis von Typologien mit vielen Untergruppen von Gebäudearten und Baujahren, jahresweise Prognosen, teilweise Stundensimulationen) gelangen zu ähnlichen Erkenntnissen wie die Verfahren, die auf wenigen Typgebäuden basieren und in 10-Jahresschritten arbeiten. Letztlich sind die Annahmen zur künftigen Technikausbreitung (Art und Geschwindigkeit) sowie Baukörpersanierung (Standards und Geschwindigkeit) sowie die Praxisnähe der berechneten Einsparungen und notwendigen Investitionskosten von größerer Ergebnisrelevanz als das Einzelgebäude.

Daher ist für das vorliegende Gutachten die IWU-Studie von 2013 [62] die relevanteste (aus Sicht der Methodik und den Mengengerüstes für den Gebäudebestand). Eine sehr umfangreiche Analyse für die Korridore künftiger Sanierungen und Standards, mögliche Restriktionen und Potentiale einzelner Techniken sind am besten in den Studien von Jochum et al. dargestellt [127] [119]. Aus den anderen Studien lassen sich vor allem Kostenfunktionen entnehmen.

Nr. 10			
Titel	Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich - Zielerreichungsszenario		
Verfasser	IWU	Quelle	[62]
Auftraggeber	BMVBS	Jahr	2013
betrachtete Sektoren	nur Gebäude	Szenarien Anzahl	Trend+5
betrachtete Gebäudearten	Wohngebäude (Nichtwohnbau grob)		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2020, 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine Präferenz eines der Szenarien; Verdopplung der Modernisierungsrate für die Gebäudehülle wird als sinnvoll angesehen; starker Ausbau von Wärmepumpen und Solarthermie		
Art und Umfang Gebäudebilanz	6 Typgebäude (3 EZFH, 3 MFH), Beschreibung offengelegt		
Einschätzung der Energiebilanz	freie Energiebilanz („TABULA“); Bedarf kalibriert an AGEB-Bilanzen; realistische Annahmen für Effizienzen, jedoch ohne Bezug zur Qualitätssicherung; Rückkopplung von Baukörperverbesserung auf Wärmepumpeneffizienzen		
Einschätzung der Kostendaten	Investitionskosten gut dokumentiert; für die Anlagentechnik flächenbezogene Werte (schlecht vergleichbar); keine systematischen Angaben zu Wartung/Instandhaltung, Lebensdauern		
Art der Energiepreisentwicklung	Fortschreibung der Verbraucherpreise mit 1 %/a; Überlegungen zu einer „Energieabgabe“ (für fossile Energieträger) enthalten – auf Basis der Primärenergie		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	Mengengerüst, energetische Qualitäten Baukörper, Kosten komplett offengelegt		

Tabelle 137 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende im Gebäudesektor [eigene Darstellung]

Nr. 11			
Titel	Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands & Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich		
Verfasser	Beuth Hochschule, IFEU	Quelle	[127] [119]
Auftraggeber	BMWi	Jahr	2015/17
betrachtete Sektoren	nur Gebäude	Szenarien Anzahl	2 (Bau) 2 (Technik)
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2020, 2030, 2040, 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine explizite Empfehlung des jeweiligen Maximalszenarios, da es sich um eine Grenzfallbetrachtung handelt, die das Machbare zeigen soll; Wärmenetzpotential ist vor allem bei fehlender Gebäudeeffizienz groß, das Wärmepumpenpotential bei hoher Gebäudeeffizienz; Empfehlung hoher Gebäudeeffizienz		
Art und Umfang Gebäudebilanz	„GEMOD"-Simulation auf Basis der IWU-Typologie (abgeglichen mit Daten des Zensus) mit 4 Gebäudetypen in 13 Altersklassen, Neuerstellung einer Nichtwohnbautypologie (15 Typen, 13 Altersklassen)		
Einschätzung der Energiebilanz	angelehnt an den EnEV-Normen (DIN V 18599, DIN V 4108/4701); Bedarfs-Verbrauchsanpassung per Faktor; kein gesonderter Einfluss der Qualitätssicherung; Einfluss des baulichen Standards auf Wärmepumpen gegeben; unklare Parametrierung der anderen Eingangsgrößen (Temperaturen des Heizsystems, Anzahl Flächenheizung usw.)		
Einschätzung der Kostendaten	Dämmkosten realistisch; Anlagentechnikkosten nicht im Bericht verfügbar; Lebensdauern für Anlagentechnik nicht ganz plausibel (Wärmepumpen halten länger als Kessel); Ansätze für Wartung/Instandhaltung nicht genannt		
Art der Energiepreisentwicklung	Dämmstudie: Mischpreis für alle Energieträger mit Steigerung von 3 %/a und ohne Einbezug von CO_2-Preis; Anlagenpotential: Endverbraucherpreise mit Steigerung und CO_2-Preis-Komponente		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein, aber für die verschiedenen Dämmstoffe grundsätzlich thematisiert		
Offenlegung von Daten	sehr detaillierte Offenlegung der neu erstellten Nichtwohnbautypologie sowie der Erzeugertypologie und aller Effizienzannahmen; ausreichend genaue Hinweise auf das Mengengerüst der Wohnbautypologie; Kostendaten fehlen weitgehend		
Nr. 12			
Titel	Klimaneutraler Gebäudebestand 2050		
Verfasser	Ökoinstitut, Fraunhofer ISE	Quelle	[252]
Auftraggeber	UBA	Jahr	2016
betrachtete Sektoren	nur Gebäude	Szenarien Anzahl	Ist+3
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2020, 2030, 2040, 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	kein eindeutiges Ergebnis (keine Empfehlung eines der 3 Szenarien)		
Art und Umfang Gebäudebilanz	9 Typgebäude Wohnbau, 10 Typgebäude Nichtwohnbau (Beschreibung offengelegt)		
Einschätzung der Energiebilanz	vereinfacht nach den EnEV-Normen (DIN V 18599, DIN V 4108/4701); Bedarfs-Verbrauchsanpassung per Faktor; keine detaillierten Einflüsse der Qualitätssicherung; Einfluss des baulichen Standards auf Wärmepumpen gegeben; unklare Parametrierung der anderen Eingangsgrößen (Temperaturen des Heizsystems, Anzahl Flächenheizung usw.)		
Einschätzung der Kostendaten	Kostendaten Baukörpersanierung deutlich zu gering; sonst nachvollziehbar und in üblicher Höhe; Lebensdauern und Wartungsansätze nachvollziehbar; keine Lernkurven berücksichtigt		
Art der Energiepreisentwicklung	übliche prozentuale Energiepreissteigerung (3 Szenarien); kein CO_2-Preis		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	Mengengerüst Wohnbau detailliert verfügbar; energetische Standards der Gebäudehülle und Erzeuger angegeben, alle Kostendaten nachvollziehbar		

Tabelle 137 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende im Gebäudesektor [eigene Darstellung] (Fortführung)

Nr. 13			
Titel	Analyse der Energieversorgungsstruktur für den Wohngebäudesektor zur Erreichung der Klimaschutzziele 2050 & Zukunftsfähige Neubauten als Baustein für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand 2050		
Verfasser	IWU, Hochschule Darmstadt, BET	Quelle	[57] [271]
Auftraggeber	BMWi	Jahr	2019
betrachtete Sektoren	nur Gebäude	Szenarien Anzahl	nur Einzeltechnologien
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	die Studie zielt auf die Erstellung des Modells ab, nicht auf ein geschlossenes Modell des Gebäudebestandes; im Einzelnen werden der verbesserte Wärmeschutz und Wärmepumpen positiv herausgestellt; Solarthermie und Photovoltaik werden eher gleichgestellt		
Art und Umfang Gebäudebilanz	„MATLAB"-Simulation auf Stundenbasis, 16 Typgebäude (EZFH/MFH, Bestand/Neubau usw.), 21 Standorte		
Einschätzung der Energiebilanz	freie Bilanzierung, Einzelannahmen (Luftwechsel, Temperatur usw.) sind offengelegt und plausibel; Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich erfolgt nicht; Wärmepumpeneffizienz nicht vom Baustandard abhängig, weitere Einflüsse der Qualitätssicherung nicht beschrieben		
Einschätzung der Kostendaten	Nutzungsdauern sind vergleichsweise kurz gewählt; Anlagentechnikkosten wohnflächenbezogen (daher schlecht vergleichbar und identisch für Neubau und Sanierung), bauliche Kosten plausibel; Lernkurveneinfluss nur exemplarisch (moderat für Wärmepumpen usw., gering für Dämmung u. ä.) als Parametervariante		
Art der Energiepreisentwicklung	keine Preissteigerungen berücksichtigt; Preisanstieg exemplarisch als Parametervariante, kein CO_2-Preis		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	Mengengerüst, Hüllflächeneigenschaften, Effizienzen der Technik; Kostendaten vollständig offengelegt		
Nr. 14			
Titel	100 % Wärme aus erneuerbaren Energien? - Auf dem Weg zum Niedrigstenergiehaus im Gebäudebestand (in 5 Bänden und einer Zusammenfassung)		
Verfasser	IFEU, Bergische Universität, ECOFYS, DENA, TU Darmstadt, Klinski	Quelle	[124]
Auftraggeber	BMWi	Jahr	2014
betrachtete Sektoren	nur Gebäude	Szenarien Anzahl	Trend+5
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2030, 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine eindeutige Empfehlung eines der Szenarien; tendenziell wird die Version netzgebundener Wärmeversorgung in den Auswertungen der Wärmepumpenlösung etwas bevorzugt		
Art und Umfang Gebäudebilanz	„BEAM"-Simulation; insgesamt 10 Gebäudetypen mit je 5 Altersklassen		
Einschätzung der Energiebilanz	konkretes Rechenmodell unklar, aber Kalibrierung der Bedarfsergebnisse an den Verbrauchsdaten der AGEB; Einfluss von Qualitätssicherung sowie Abhängigkeit der Anlageneffizienz vom baulichen Zustand kann nicht beurteilt werden		
Einschätzung der Kostendaten	Grundannahmen der Investitionskosten plausibel; jedoch sehr steile Lernkurven für Lüftungsanlagen und Wärmepumpen, moderate für Dämmung/Fenster und Solarthermie; Instandhaltung pauschal wohnflächenbezogen		
Art der Energiepreisentwicklung	übliche prozentuale Energiepreissteigerung (verschieden für Gas/Öl und Rest); kein separater CO_2-Preis		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	nein		
Offenlegung von Daten	Qualtäten der Gebäudehülle sowie Mengengerüste Technik und Kosten sehr gut dargestellt; Mengengerüst Flächen und bauliche Qualitäten nur sehr grob grafisch im Bericht verfügbar		

Tabelle 137 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende im Gebäudesektor [eigene Darstellung] (Fortführung)

Nr. 15			
Titel	Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich (in 3 Berichten)		
Verfasser	IFEU, ECOFYS, IWU, Universität Bielefeld	Quelle	[34]
Auftraggeber	BMWi	Jahr	2015
betrachtete Sektoren	nur Gebäude	Szenarien Anzahl	Trend+4
betrachtete Gebäudearten	Wohnbau, Nichtwohnbau		
wichtige Zeitpunkte/Meilensteine	2030, 2050		
Empfehlungsrichtung Gebäudesektor	keine eindeutige Empfehlung eines der Szenarien, da die Kosten sehr nahe beieinander liegen		
Art und Umfang Gebäudebilanz	„BEAM“-Simulation; insgesamt 10 Gebäudetypen mit je 5 Altersklassen		
Einschätzung der Energiebilanz	individuelle Programmierung; konkretes Rechenmodell unklar; Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich mit Faktor, jedoch unklar anhand welcher Verbrauchswerte; Einfluss von Qualitätssicherung sowie Abhängigkeit der Anlageneffizienz vom baulichen Zustand kann nicht beurteilt werden		
Einschätzung der Kostendaten	realistische Lebensdauern und Investitionskosten; jedoch sehr steile Lernkurven für Lüftungsanlagen, Solarthermie und Wärmepumpen (moderate für Dämmung/Fenster)		
Art der Energiepreisentwicklung	übliche prozentuale Energiepreissteigerung (verschieden für Gas/Öl und Rest); kein separater CO_2-Preis		
Einbezug von Nachhaltigkeitsaspekten	Berechnung von grauer Energie und Primärenergie für die Herstellung der Baustoffe ist im Bilanzmodell vorgesehen, wird aber nicht ausgewertet		
Offenlegung von Daten	gut nachvollziehbar sind Kostendaten und Wirtschaftlichkeitsranddaten sowie Qualität der Gebäudehülle; keine Daten zu Anlageneffizienzen; Mengengerüst Flächen und bauliche Qualitäten nur sehr grob grafisch im Bericht verfügbar		

Tabelle 137 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende im Gebäudesektor [eigene Darstellung] (Fortführung)

4.1.2 Metastudien

Es ist üblich, dass zur Erstellung von Makrostudien auf ähnliche Quelldaten zurückgegriffen wird, z. B. die statistischen Datenerhebungen des IWU zum Wohngebäudebestand oder des Fraunhofer ISI zum Nichtwohnbaubestand. Auch die zentralen Energiebilanzen der AGEB oder die Daten des statistischen Bundesamtes werden mehrfach referenziert. Dies gilt auch für das vorliegende Gutachten.

Darüber hinaus treten bestimmte Akteure in wechselnden Konstellationen mehrfach als Gutachter/Autoren (IFEU, IWU, mehrere Fraunhofergesellschaften usw.) auf und auch die Auftraggeber wiederholen sich (BMWi, BMU, DENA usw.). Insofern ist es nicht verwunderlich, dass sich Prognosen über Jahre auch ähneln bzw. aneinander angleichen.

Einen vergleichenden Überblick verschiedener Sichtweisen auf dasselbe Thema liefern Metaanalysen. Im Zuge der Verfassung des vorliegenden Gutachtens sind einige recherchiert worden. Nachfolgende Tabelle 138 stellt 6 Studien mit Bezug zur „Energiewende“ und Schwerpunkt „Wärmewende“ zusammen. Benannt sind wichtige Themenschwerpunkte, die jeweils behandelt werden.

Die Zusammenstellung ist nützlich, wenn ein schneller Überblick über Prognosebandbreiten der genannten Themen (Endenergiereduktion, Emissionsverlauf, Ausbau regenerativer Energien usw.) erforderlich ist.

Nr. Meta1			
Titel	Studienvergleich: Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland		
Verfasser	Agentur für Erneuerbare Energien	Quelle	[272]
Auftraggeber	Agentur für Erneuerbare Energien	Jahr	2013
Betrachtete Studien	mehr als 20 verschiedene Studien der Jahre 2009 bis 2013		
Schwerpunkte	Vollbenutzungsstunden u. a. für Photovoltaik bis 2050		
Nr. Meta2			
Titel	Metanalyse: Energiewende im Wärmesektor		
Verfasser	Hamburg Institut Consulting, Agentur für Erneuerbare Energien	Quelle	[273]
Auftraggeber	Agentur für Erneuerbare Energien	Jahr	2015
Betrachtete Studien	mehr als 20 verschiedene Studien der Jahre 2010 bis 2015		
Schwerpunkte	Wärmeenergieverbrauch, Nutzung von Bioenergie, Umweltenergie, Solarthermie, KWK in Gebäuden bis 2050		
Nr. Meta3			
Titel	Metanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr		
Verfasser	Prognos, Agentur für Erneuerbare Energien	Quelle	[274]
Auftraggeber	Agentur für Erneuerbare Energien	Jahr	2016
Betrachtete Studien	mehr als 25 verschiedene Studien der Jahre 2010 bis 2016		
Schwerpunkte	Stromnutzung für Verkehr, PtX-Herstellung, Gesamtstromverbrauch, Stromlast und -leistung bis 2050		
Nr. Meta4			
Titel	Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050		
Verfasser	Ökoinstitut, Fraunhofer ISI, IREES	Quelle	[275]
Auftraggeber	BMU	Jahr	2016
Betrachtete Studien	4 sektorenübergreifende Studien mit Zeithorizont 2050: • Klimaschutzszenario 2050, Öko-Institut, Fraunhofer ISI, 2014 incl. Überarbeitung • Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, UBA, 2013) • Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, Prognos, 2014 • BMU-Leitstudie 2011, DLR, 2012		
Schwerpunkte	Wachstumsrate Wohnfläche, Energiepreisentwicklung, zeitlicher Verlauf der Emissionen/Endenergie/Primärenergie, Strombedarf und Stromverbrauch bis 2050		
Nr. Meta5			
Titel	Wärmewende 2030: Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor		
Verfasser	Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP	Quelle	[156]
Auftraggeber	AGORA	Jahr	2017
Betrachtete Studien	3 Studien zur Abbildung von Referenzszenarien: • Energiereferenzprognose, Prognos et al., 2014 • Projektionsbericht, UBA, 2015 • BWP-Branchenprognose, BWP, 2016 3 Studien zur Abbildung der Zielszenarien: • Klimaschutzszenarien, Öko-Institut et al., 2015 • Interaktion EE-Strom, Wärme, Verkehr, IWES et al., 2015 • Was kostet die Energiewende?, Fraunhofer ISE, 2015		
Schwerpunkte	Wärmenetze vs. Wärmepumpe zur Versorgung der Gebäude bis 2050		
Nr. Meta6			
Titel	Expertise bündeln, Politik gestalten – Energiewende jetzt!		
Verfasser	Leopoldina + acatech + Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften, BDI, DENA	Quelle	[276]
Auftraggeber	Leopoldina + acatech + Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften, BDI, DENA	Jahr	2019
Betrachtete Studien	3 sektorenübergreifende Studien mit Zeithorizont 2050: • ESYS, Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende, 2017 • BDI, Klimapfade für Deutschland, 2018 • DENA, Leitstudie Integrierte Energiewende, 2018		
Schwerpunkte	Wind- und PV-Ausbau, Kraftwerkskapazitäten, synthetische Energieträger, Sanierungsrate der Gebäude, Mehrkosten bis 2050		

Tabelle 138 Übersicht vergleichender Metstudien zur Energiewende [eigene Darstellung]

4.2 Hauptszenario: Zeitvariable Größen und Randdaten

Nachfolgendes Kapitel gibt einen Überblick der getroffenen Annahmen zur zeitlichen Ausbreitung von Maßnahmen der Gebäudesanierung und Technologieausbreitung verbesserter Anlagentechnik. Sie gelten für das „Hauptszenario“ des Gutachtens (für zwei betrachtete Varianten notwendige Modifikationen werden separat erläutert). Darüber hinaus werden auch die veränderten Rahmendaten – die Bevölkerungsentwicklung sowie der zur Einhaltung des Emissionsbudgets notwendige Umbau des Energieträgermixes – beschrieben.

Die Prognose wird in zwei Zeitetappen unterteilt: die Periode (I) deckt den Zeitraum zwischen 2020 und 2035 ab, die Periode (II) den Zeitraum von 2035 bis 2050. Innerhalb dieser beiden 15-Jahreszeiträume wird vereinfachend keine weitere Unterscheidung von Randdaten vorgenommen.

Das in diesem Gutachten angenommene Modell „Hauptszenario“ geht nicht davon aus, dass Maßnahmen vorzeitig umgesetzt (vorgezogen) werden. Es setzt daher eine eher moderate Sanierungsrate an, die sich aus angenommenen (in der Spannbreite der Erwartungen eher langen) Nutzungszeiten ergibt. Tritt der Sanierungsfall jedoch ein, sind sehr ambitionierte Maßnahmen vorgesehen, um aufzuzeigen, welche Emissionsminderungen realistisch erreichbar sind. Es wird kein „business-as-usual“-Szenario aufgestellt. Hierzu wird auf andere Studien verwiesen, vgl. Zusammenstellung in Anhang 4.1.

Die Gutachter gehen davon aus, dass die Sanierungsaktivitäten des Baukörpers, aber auch Wechselaktivitäten bei den Anlagentechniken durch veränderte Rahmendaten gesetzlich gefordert (GEG) und/oder gefördert (z. B. BEG) werden.

4.2.1 Bevölkerung und Flächen

Für die Entwicklung des Endenergiebedarfs der Haushalte sind einerseits die Bevölkerungsentwicklung, andererseits die Wohnflächenentwicklung maßgeblich – wobei diese indirekt voneinander abhängen.

Eine treffsichere Bevölkerungsprognose bis 2050 ist kaum möglich, da z. B. Effekte der Zuwanderung aufgrund von Naturkatastrophen und Kriegen als Migrationsauslöser (siehe 2015) kaum vorhersehbar sind. Ebenfalls ist die Binnenmigration in die Städte (Urbanisierung) oder aus den Kernstädten ins Umland zahlreichen Einflüssen unterworfen, die sich nach der aktuellen Corona-Pandemie durchaus drastisch ändern können. Damit sind typische Wohnungsgrößen verbunden, die in Ballungszentren kleiner ausfallen als auf dem Land. Nicht zuletzt die angesprochene Corona-Krise zeigt, dass auch der nicht vorhersehbare Einfluss dieser Pandemie die Heimarbeit stark erhöht und damit die Entfernung zwischen Wohnort und Arbeitsort weniger relevant werden könnte. Übertragen auf langfristige Strömungen ist dies ein Faktor, der die Urbanisierung abflachen lassen könnte.

Sinkt die Bevölkerung, geht damit eine Einsparung einher, auch ohne dass eine Gebäude- oder Anlagenmodernisierung stattgefunden hat. Allerdings wird ein Teil dieser Einsparung von veränderten Ansprüchen (Nutzerverhalten, Wohnflächenvergrößerung) aufgezehrt.

Bevölkerungsentwicklung

Das statistische Bundesamt prognostiziert in 30 verschiedenen Szenarien die Bevölkerungsentwicklung bis 2050 [101]. Die Werte für 2035 liegen zwischen 77,2 und 85,4 Mio. Einwohnern. Für das Jahr 2050 ergibt sich eine Spannbreite von 70,5 bis 86,7 Mio. Einwohnern.

Für das vorliegende Gutachten wird der Mittelwert aller 30 Szenarien verwendet, so dass die Einwohnerzahl von 81,8 Mio. (2020) zunächst auf 82,0 Mio. (2035) steigt, aber danach auf 80,3 Mio. (2050) sinkt.

In anderen Szenarioberechnungen, vor allem aus dem Zeitraum 2010 - 2015, werden teils sehr starke Bevölkerungsrückgänge prognostiziert. Das DLR Leitszenario von Nitzsch et al. [213] geht für 2050 von nur 73,8 Mio. Einwohnern aus. Pehnt et al. schätzen sogar nur 68,1 Mio. Einwohner [34]. Dies wird von den Gutachtern – auf der sicheren Seite liegend – nicht angenommen, um die Einsparungen für den Gebäudesektor, die sich allein daraus ergeben, nicht zu überschätzen.

Vergrößerung der Wohnflächen

Eine detaillierte Analyse – zusätzlich unterteilt nach Haushaltsgrößen – liefert der Bericht „Wohnungsmärkte im Wandel“ des BBSR [277]. Die Datenlage fällt nur noch teilweise in den Prognosezeitraum des vorliegenden Gutachtens. Jedoch wurde für 2010 bis 2025 eine Erhöhung der Wohnflächen um 6 % prognostiziert, die realistisch einzuschätzen ist. Die Gutachter teilen die Auffassung, dass dieser Trend auch für die Fortschreibung gilt.

Beer et al. prognostizieren im Jahr 2009 auf Basis von ifo-Befragungen einen Anstieg der pro-Kopf-Wohnfläche von ca. 40 m²/P (2005) über 43 m²/P (2018) und 47,5 m²/P (2035) auf ca. 52 m²/P (2050) [278]. Bereits der Wert für das Jahr 2018 betrug in der Realität fast 46 m²/P [101] und liegt damit über der Prognose.

Pehnt et al. gehen in ihrer Studie aus dem Jahr 2015 von einem deutlich flacheren Wohnflächenanstieg aus [34]. Während im ersten Jahrzehnt 2010 - 2020 noch eine Zunahme von 3 m²/P unterstellt wird, so dass 2020 ein Wert von 45 m²/P gegeben ist, flacht die Kurve danach ab. 2050 werden 49 m²/P erreicht. Das schätzen die Autoren des vorliegenden Gutachtens als zu gering ein. Der für 2030 prognostizierte Wert von 46 m²/P wurde bereits 2018 real erreicht [101].

Abbildung 228 aus Anhang 5.1.3 zeigt, dass seit mindestens 25 Jahren keine nennenswerten Einflüsse auf die stetig steigende pro-Kopf-Wohnfläche zu verzeichnen sind. Sofern nicht ein generelles Umdenken – Stichwort Suffizienz – bei der Bevölkerung eintritt, muss von einem weiteren Anstieg ausgegangen werden.

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wird daher davon ausgegangen, dass in jedem Jahr die Wohnfläche um 0,3 m²/Person zunimmt. Das bedeutet für:

- die Ein- und Zweifamilienhäuser ein Anstieg von 51,6 m²/P (2020) über 56,1 m²/P (2035) auf 60,6 m²/P (2050)
- die Mehrfamilienhäuser ein Anstieg von 38,6 m²/P (2020) über 43,1 m²/P (2035) auf 47,6 m²/P (2050).

Mit diesen Werten und der Bevölkerungsprognose ergibt sich der Nettogesamtzuwachs an Fläche (Differenz von Neubauten und Abrissen).

Zubau und Abriss

Der Nettowohnflächenzuwachs ergibt sich aus dem Neubau- und Abrissgeschehen. Wenn zwei der Werte als gegeben angenommen werden, ergibt sich der dritte.

Pehnt et al. setzen in der Studie „Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich“ eine Abrissquote von 0,1 %/a (bis 2020) sowie danach steigende Abrisszahlen von 0,3 %/a (2030) bis 0,71 %/a (2050) an [34]. Außerdem prognostizieren sie sinkende Neubauquoten – von zunächst 0,59 %/a (2010) sinkt der Wert auf 0,3 %/a (ab 2030) und liegt somit ab 2030 unter der Abrissrate, was einer Verringerung des Gesamtflächenbestandes entspricht. Der Nettoflächenzuwachs ist das Ergebnis. Es erscheint den Autoren des vorliegenden Gutachtens zu gering, wie oben unter „pro-Kopf-Wohnfläche“ bereits erläutert.

Auch Hoier und Erhorn schreiben die Rückbauraten des statistischen Bundesamtes zur Abrisstätigkeit fort und gehen davon aus, dass der Rückbau mit der Zeit progressiv ansteigend ist [192]. Da sich in der Fortschreibung für das Jahr 2050 sehr große Abgänge von fast 1 % des dann vorhandenen Gesamtbestandes ergeben, wird diese Vorgehensweise nicht weiterverfolgt.

Die Daten des statistischen Bundesamtes zeigen, dass seit etwa 10 Jahren der Abriss relativ konstant ist [101]. Die gewählte Abrissquote liegt bei 0,1 %/a für EZFH und 0,2 %/a für MFH. Da die in der DENA Leitstudie „Integrierte Energiewende“ [67] dargelegte Argumentationskette plausibel ist, werden die Werte in dieses Gutachten übernommen.

Jochum et al. nutzen das Modell „GEMOD“ und verorten den Abriss bei einzelnen Baualtersklassen [127] [119]. Die Abriss- und Neubauquote wird dabei so gewählt, dass der Nettowohnflächenzuwachs zu den statistischen Prognosen passt, der sich aus Bevölkerungsentwicklung und Wohnflächenzuwachs ergibt.

Dieser grundsätzlichen Vorgehensweise schließen sich die Gutachter an. Das Ergebnis, d. h. der Nettowohnflächenzuwachs wird zuerst bestimmt. Im zweiten Schritt wird die Abrissquote festgelegt. Die Neubauquote bzw. der Zubau in absoluten Zahlen ist somit das Ergebnis der Überlegungen. Tabelle 139 zeigt die Ergebnisse.

Gebäudeart			2020	2035	2050
EZFH	Personen	[Mio. P]	43,445	44,020	42,639
	Gesamtfläche	[Mio. m²]	2.242,3	2.470,1	2.584,5
	Abriss	[Mio. m²]	↳ -33,6 ↴	↳ -45,3 ↴	
	Neubau	[Mio. m²]	+261,4	+209,7	
MFH	Personen	[Mio. P]	38,372	38,880	37,661
	Gesamtfläche	[Mio. m²]	1.511,4	1.675,7	1.792,6
	Abriss	[Mio. m²]	↳ -37,1 ↴	↳ -50,3 ↴	
	Neubau	[Mio. m²]	+151,5	+167,2	

Tabelle 139 Prognose der Personenzahlen und Wohnflächen im Zeitverlauf [eigene Darstellung]

Die sich ergebenden absoluten Wohnflächenzuwächse – grafisch siehe Abbildung 159 und Abbildung 160 – sind Basis aller weiteren Überlegungen. Mit den Neubauflächen lassen sich problemlos neue Technologien und Standards in den Gesamtbestand einbringen, mit den Abrissen nicht zukunftsfähige Eigenschaften von Gebäuden aus dem Markt ausräumen.

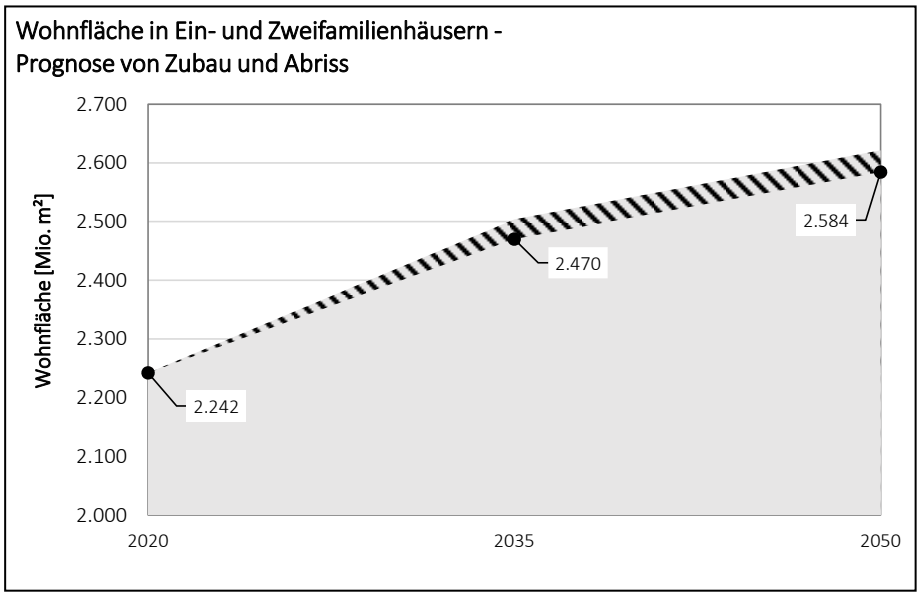


Abbildung 159 Prognose – Wohnflächenentwicklung in Ein- und Zweifamilienhäusern [eigene Darstellung]

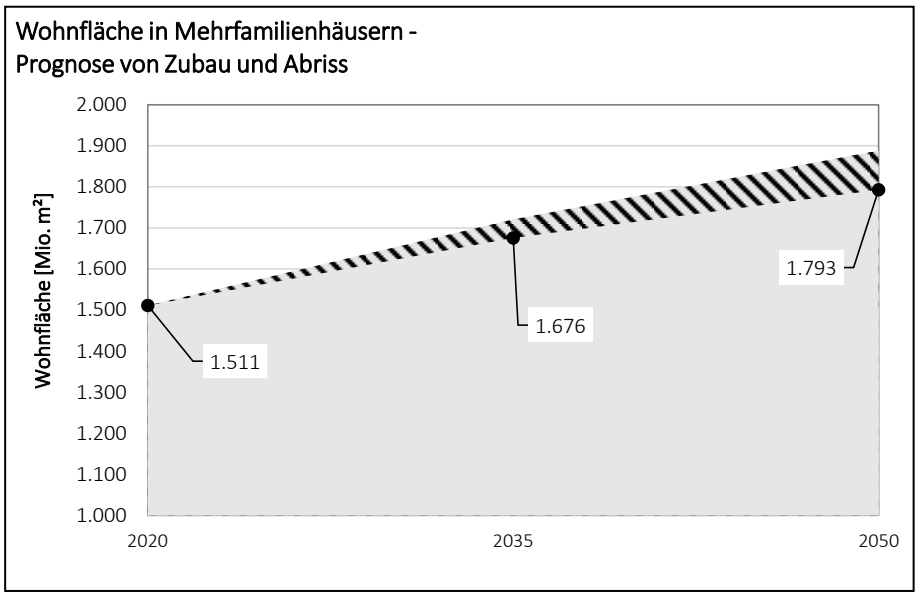


Abbildung 160 Prognose – Wohnflächenentwicklung in Mehrfamilienhäusern [eigene Darstellung]

4.2.2 Sanierungsquoten für den Baukörper

Den Aussagen des IWU aus dem Kurzgutachten zum „Sanierungsahrplan für den Gebäudebestand“ [151] können sich die Gutachter anschließen: benötigt wird eine Sanierungsrate mindestens 2 %/a für den Baukörper. Da bereits einmal energetisch modernisierte Bauteile wirtschaftlich kaum mehrfach verbessert werden – sie werden idealerweise möglichst sofort auf einem hohen Niveau ausgeführt.

Die grundsätzliche Überlegung der Gutachter ist daher für alle Hüllbauteile gleich: alle Maßnahmen werden an den Sanierungszyklus angelehnt (damit liegt die „Sanierungsrate“ fest). Die Nutzungszeiten werden – an den Gewohnheiten der Gebäudebesitzer orientiert – zwar eher lang gewählt (vgl. Anhang 5.9.1). Wenn dann jedoch eine Sanierung ansteht, wird sie zukunftsorientiert („best practice“) ausgeführt, so dass in der langen nachfolgenden Spanne kein Anlass zur weiteren Verbesserung besteht (damit liegt die „Sanierungstiefe“ fest). In der Kombination beider Merkmale („wie häufig“ und „wie gut“) ergibt sich die „Sanierungsquote“, vgl. auch Hintergrundinformationen in Anhang 5.11.

In der Kombination der getroffenen Annahmen wird im vorliegenden Gutachten eine Sanierungsquote von knapp 2 %/a für den Bestand erreicht, Zahlenwerte siehe Anhang 4.5.5. Damit stimmen die Annahmen mit denen des IWU, aber auch anderer Studien und Gutachten (vgl. Zusammenstellung in Anhang 4.1) überein. Wobei selbstverständlich bei Vorhandensein von mehreren Szenarioberechnungen jeweils mindestens eines gut vergleichbar ist.

Die bereits heute in den Monitoringberichten der KfW [15] erkennbaren Wärmedämm- und Fensterqualitäten bzw. deren prozentualer Einsatz in Effizienzhäusern wurden bei der Festlegung typischer künftiger Sanierungszustände berücksichtigt. Mögliche Restriktionen (Innendämmung erhaltenswerter Fassaden usw.) werden berücksichtigt.

Außenwand

Die Qualität der Außenhülle wird – analog der Betrachtungen in der Mikroebene – in vier Klassen geteilt, deren konkrete Wärmedurchgangskoeffizienten in Anhang 3.2.1 tabelliert sind. Die derzeit im Markt befindlichen Gebäude weisen eine definierte Verteilung dieser Standards auf.

Die künftige Verteilung auf die 4 Klassen wird beeinflusst durch die Frage, welche Qualität mit dem Abriss aus dem Markt entnommen wird, welche Qualität mit den Neubauten hinzukommt. Außerdem erfolgt eine Sanierung (hier alle 45 Jahre), welche die Qualität verbessert. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) ⅓ „gute“ und ⅔ „beste“ Außenwände, in der Periode (II) nur noch „beste“ (die Verschiebung hin zu besseren Standards ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken)
- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) zu ⅔ Gebäude mit „schlechten“ und ⅓ mit „mittleren“ Außenwänden (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wieder)
- die energetische Sanierung trifft in Periode (I) proportional die Gebäude mit „schlechten“ und „mittleren“ Außenwänden, in Periode (II) proportional „schlechte“, „mittlere“ und „gute“ Außenwände (letztere aber nur, wenn sie bereits vor 2020 „gut“ waren)
- nach der Sanierung sind in der Periode (I) jeweils 50 % der Außenwände „gut“ und „best“ (erstere z. B., weil es sich um Innendämmung handelt), in der Periode (II) jeweils 25 % der Außenwände „gut“ und 75 % „best“ (die Verschiebung hin zu besseren Standards ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken, außerdem kann auch auf eine bessere Materialverfügbarkeit z. B. für Innendämmung gesetzt werden).

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 161. Der absolute Wohnflächenzuwachs wird dabei berücksichtigt. Dargestellt sind die Wohnflächen, deren Außenwände den genannten Standard aufweisen. Anhand der Eigenschaften der Typgebäude kann die absolute Außenwandfläche bestimmt werden, die an dieser Stelle jedoch nicht relevant ist, weshalb darauf verzichtet wird.

Eine tabellarische Zusammenfassung der sich ergebenden Anteile für „beste“, „gute“, „mittlere“ und „schlechte“ Bauteile findet sich am Ende des Kapitels.

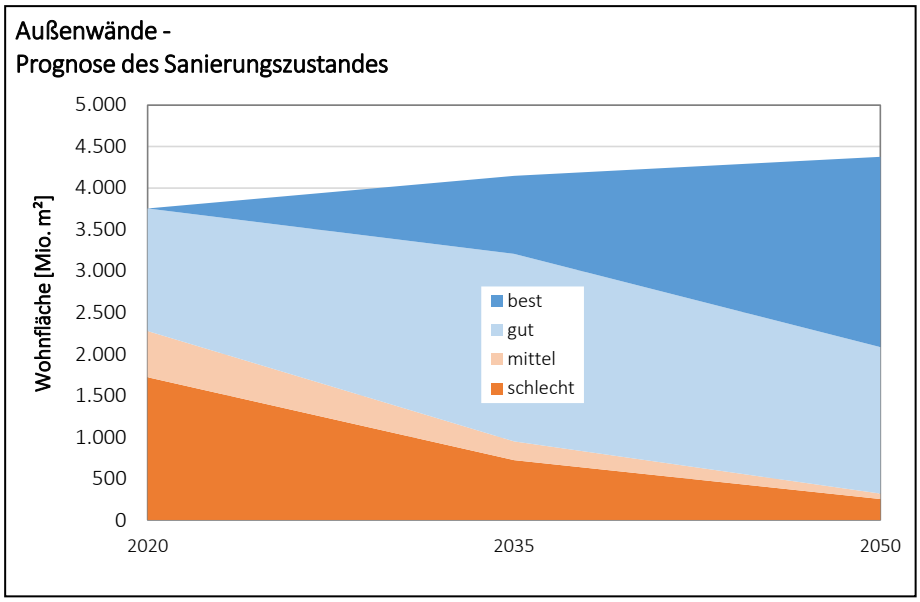


Abbildung 161 Prognose – Sanierungszustand der Außenwände [eigene Darstellung]

Hintergrundinformationen der Annahmen: Die Qualitäten (Wärmedurchgangskoeffizienten) und deren Erreichbarkeit im Einzelfall sowie die Einschätzung anderer Fachleute wird im Kapitel 3.2.1 beschrieben. Die Annahmen zur Häufigkeit der jeweiligen Umsetzung wird am heutigen Neubau- und Sanierungsgeschehen ausgerichtet. Dieses ist eine Mischung aus Maßnahmen nach EnEV (gefordert) und KfW/BAFA (gefördert).

Ein „guter" Standard entspricht in diesem Gutachten einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwände von 0,31 … 0,34 W/(m²). Der „beste" Standard ist mit 0,15 W/(m²K) festgelegt.

Der heute bei einer Sanierung nach EnEV geforderte maximale Wärmedurchgangskoeffizient einer Außenwand liegt bei 0,24 W/(m²K) (Regelfall, Einzelanforderung). Liegen Restriktionen vor (Innendämmung, zweischaliges Mauerwerk) gibt es keine oder geringere Anforderungen. Die KfW-Förderung (Regelfall, Einzelmaßnahme) definiert 0,20 W/(m²K) bzw. für Denkmale, Kerndämmung und Innendämmung sind geringere Anforderungen vorgesehen. Für Außenwände bei erhaltenswerter Substanz und Innendämmung gilt z. B. der Wert 0,45 W/(m²K).

Das Referenzgebäude des Neubaus hat eine Außenwand mit U-Wert von 0,28 W/(m²K). Die KfW definiert keine Einzelanforderungen, aber prozentuale Verbesserungen des Referenzgebäudes. Wird dies auf ein Einzelbauteil zurückgerechnet, ergeben sich im EH40 Maximalwerte von 0,15 W/(m²K) bzw. im EH55 von 0,20 W(m²K).

Die genannten Werte gelten im Sommer 2020. Die Gutachter betrachten jedoch zwei Zeiträume á 15 Jahre, in denen etwa jeweils ca. 2 bis 3 Verschärfungen der Anforderungen für Forderung und Förderung erfolgen können. Es kann also davon ausgegangen werden, dass im Verlaufe der Zeit eine Verschiebung zu besseren Standards erfolgt oder erfolgen kann, so wie dies auch rückblickend erfolgt ist.

Aus diesen Vorüberlegungen: welche Standards gelten heute verpflichtend, welche Standards werden heute von der KfW gefördert und sind der künftige Standard, werden die Festlegungen zum Sanierungsgeschehen abgeleitet. Um nicht noch weitere Rubriken definieren zu müssen, wird allein auf die vorher definierten Standards „gut" und „best" zurückgegriffen. Es wird ggf. sinnvoll auf- und abgerundet, so dass der Mittelwert (mittlerer U-Wert aller Gebäude) realistisch erreichbar ist.

Der Neubau ist bereits heute etwas besser als der Standard „gut" und erreicht in Form des EH40 oder Passivhauses in kleinerer Stückzahl den Zustand „best". Die Masse aller Neubauten liegt heute dazwischen. Wird das gesamte künftige Neubaugeschehen der Periode I (2020 - 2035) betrachtet, gehen die Gutachter davon aus, dass etwa ⅓ der Wände „gut" sind (real wird ein etwas größerer Anteil gegeben sein, mit einer etwas besseren Qualität), aber ⅔ „best" (real wird ein etwas kleinerer Anteil diesen Standard erreichen). Die Annahmen für Periode II (2035 - 2050) ergeben sich durch Verschärfungen der gesetzlichen Anforderungen.

Für die Sanierung in Periode I (2020 – 2035) wird davon ausgegangen, dass etwa 50 % aller Außenwände den Zustand „gut“ erreichen. Dies ist eine Zusammenfassung für Sanierungsfälle mit Restriktionen (Innendämmung, Kerndämmung, Denkmalschutz) über den gesamten Zeitraum. Gegen Ende der Zeitperiode gelten dabei etwas bessere Standards als zu Beginn. Die anderen 50 % der Sanierungen fassen die Fälle ohne Restriktionen zusammen, wobei mehrheitlich von KfW-Standards ausgegangen wird, die sich im Laufe der Zeit verschärfen, weil sich auch die gesetzlichen Standards verschärfen. Die Annahmen für Periode II (2035 - 2050) ergeben sich durch Verschärfungen der gesetzlichen Anforderungen und daraus folgend der Randdaten für die Förderung.

Die Gutachter haben auch die Überlegungen vergleichbarer Studien, insbesondere IWU 2013 [62], Beuth/IFEU 2015 [119] [127], Ökoinstitut/Fraunhofer ISE [252] in die Überlegungen einfließen lassen. Es ist aber anzumerken, dass die getroffenen Annahmen kein „business-as-usual“ abbilden, sondern von einer deutlichen Verbesserung der umzusetzenden Standards ausgehen. Es wurde jedoch darauf geachtet, Restriktionen (Denkmalschutz usw.) zu beachten und nur technisch machbare Standards anzunehmen.

Oberste Geschossdecke

Die für die Außenwände geschilderte Logik wird auch für die oberste Geschossdecke verwendet. Die konkreten Wärmedurchgangskoeffizienten der 4 energetischen Klassen sind in Anhang 3.2.3 nachzulesen. Auch hier gibt es Marktverschiebungen durch Neubau und Abriss sowie die Sanierung (hier alle 60 Jahre). Folgende Annahmen werden getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) ⅓ „gute“ und ⅔ „beste“ Geschossdecken, in der Periode (II) nur noch „beste“ (die Verschiebung hin zu besseren Standards ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken)
- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) zu ⅔ Gebäude mit „schlechten“ und ⅓ mit „mittleren“ Geschossdecken (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wieder)
- die energetische Sanierung trifft in Periode (I) proportional die Gebäude mit „schlechten“ und „mittleren“ Geschossdecken, in Periode (II) proportional „schlechte“, „mittlere“ und „gute“ Geschossdecken (letztere aber nur, wenn sie bereits vor 2020 „gut“ waren)
- nach der Sanierung sind in der Periode (I) jeweils ⅓ der Geschossdecken „gut“ und ⅔ „best“ (die Restriktionen, welche für die Außenwände noch galten – erhaltenswerte Fassaden mit Innendämmung – gelten hier nicht), in der Periode (II) jeweils 25 % der Geschossdecken „gut“ und 75 % „best“ (die Verschiebung hin zu besseren Standards ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken).

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 162. Dargestellt sind die Wohnflächen, deren oberste Geschossdecken den genannten Standard aufweisen. Da nicht alle Gebäude mit einer Geschossdecke nach oben begrenzt sind, ist nicht der Gesamtbestand dargestellt. Der Gesamtzustand ist heute schon besser als der der Außenwände, was vor allem an den obersten Geschossdecken in den MFH liegt, die in den letzten Jahren nach EnEV verpflichtend zu verbessern waren.

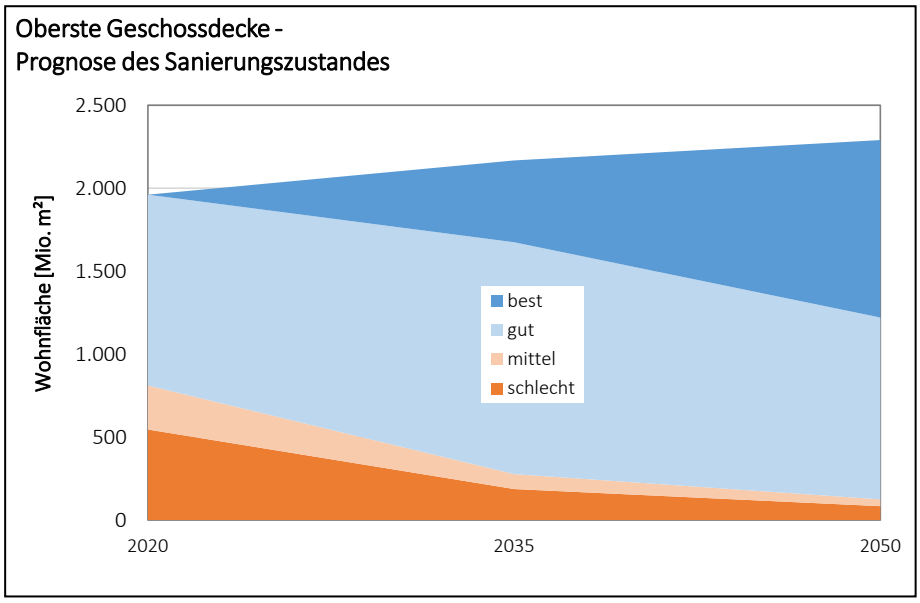


Abbildung 162 Prognose – Sanierungszustand der obersten Geschossdecken [eigene Darstellung]

Eine tabellarische Zusammenfassung der sich ergebenden Anteile für „beste“, „gute“, „mittlere“ und „schlechte“ Bauteile findet sich am Ende des Kapitels.

Die den Sanierungsquoten zugrundeliegenden Hintergrundüberlegungen sind prinzipiell vergleichbar mit denen, die für die „Außenwand“ beschrieben sind. Jedoch – weil der Anteil von Restriktionen sehr viel geringer ist – ähneln die Sanierungsaktivitäten eher dem Neubau.

Dach

Die konkreten Wärmedurchgangskoeffizienten der 4 energetischen Klassen für Dächer sind in Anhang 3.2.3 nachzulesen. Auch hier gibt es Marktverschiebungen durch Neubau und Abriss sowie die Sanierung (hier alle 45 Jahre). Folgende Annahmen werden getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) ⅓ „gute“ und ⅔ „beste“ Dächer, in der Periode (II) nur noch „beste“ (die Verschiebung hin zu besseren Standards ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken)
- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) zu ⅔ Gebäude mit „schlechten“ und ⅓ mit „mittleren“ Dächern (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wieder)
- die energetische Sanierung trifft in Periode (I) proportional die Gebäude mit „schlechten“ und „mittleren“ Dächern, in Periode (II) proportional „schlechte“, „mittlere“ und „gute“ Dächer (letztere aber nur, wenn sie bereits vor 2020 „gut“ waren)
- nach der Sanierung sind in der Periode (I) jeweils ⅓ der Dächer „gut“ und ⅔ „best“ (insbesondere bei der Neueindeckung sind nur geringe Restriktionen zur Erreichung eines optimalen Standards zu erwarten), in der Periode (II) jeweils 25 % der Dächer „gut“ und 75 % „best“ (die Verschiebung hin zu besseren Standards ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken).

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 163. Dargestellt sind die Wohnflächen, deren Dächer den genannten Standard aufweisen. Da nicht alle Gebäude mit einem Dach nach oben begrenzt sind, ist nicht der Gesamtbestand an Wohngebäuden dargestellt, d. h. die Absolutzahl geringer als bei den Außenwänden.

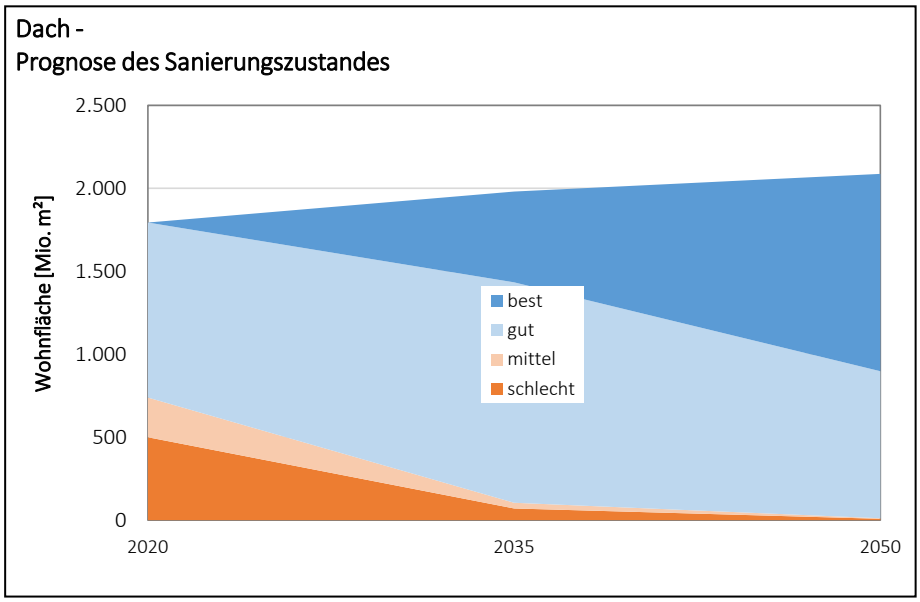


Abbildung 163 Prognose – Sanierungszustand der Dächer [eigene Darstellung]

Eine tabellarische Zusammenfassung der sich ergebenden Anteile für „beste“, „gute“, „mittlere“ und „schlechte“ Bauteile findet sich am Ende des Kapitels.

Die den Sanierungsquoten zugrundeliegenden Hintergrundüberlegungen sind prinzipiell vergleichbar mit denen, die für die „Außenwand“ beschrieben sind. Jedoch – weil der Anteil von Restriktionen sehr viel geringer ist – ähneln die Sanierungsaktivitäten eher dem Neubau.

Kellerdecke

Die konkreten Wärmedurchgangskoeffizienten der 4 energetischen Klassen für Kellerdecken sind in Anhang 3.2.4 nachzulesen. Auch hier gibt es Marktverschiebungen durch Neubau und Abriss sowie die Sanierung (hier alle 60 Jahre). Folgende Annahmen werden getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) ⅓ „gute“ und ⅔ „beste“ Kellerdecken, in der Periode (II) nur noch „beste“ (die Verschiebung hin zu besseren Standards ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken)
- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) zu ⅔ Gebäude mit „schlechten“ und ⅓ mit „mittleren“ Kellerdecken (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wieder)
- die energetische Sanierung trifft in Periode (I) proportional die Gebäude mit „schlechten“ und „mittleren“ Kellerdecken, in Periode (II) proportional „schlechte“, „mittlere“ und „gute“ Kellerdecken (letztere aber nur, wenn sie bereits vor 2020 „gut“ waren)
- nach der Sanierung sind in der Periode (I) und (II) jeweils ⅔ der Kellerdecken „gut“ und ⅓ „best“ (insbesondere die Restriktion der verfügbaren Deckenhöhe spielt bei dieser Annahme eine Rolle).

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 164. Dargestellt sind die Wohnflächen, deren Kellerdecken den genannten Standard aufweisen. Da nicht alle Gebäude mit einer Kellerdecke nach unten begrenzt sind, ist nicht der Gesamtbestand dargestellt. Anders als bei den Dächern und obersten Geschossdecken ist auch 2050 der „gute“ Zustand hauptsächlich anzutreffen.

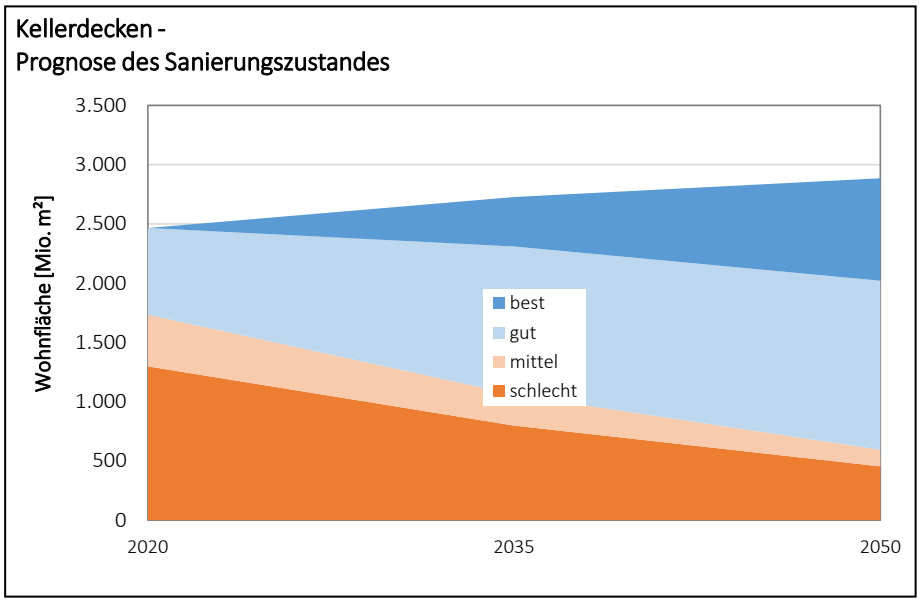


Abbildung 164 Prognose – Sanierungszustand der Kellerdecken [eigene Darstellung]

Eine tabellarische Zusammenfassung der sich ergebenden Anteile für „beste“, „gute“, „mittlere“ und „schlechte“ Bauteile findet sich am Ende des Kapitels.

Die den Sanierungsquoten zugrundeliegenden Hintergrundüberlegungen sind prinzipiell vergleichbar mit denen, die für die „Außenwand“ beschrieben sind. Jedoch – weil der Anteil von Restriktionen sehr viel größer sind (fehlende Geschosshöhe im Kellergeschoß usw.) – gibt es deutlich weniger „beste“ Sanierungen.

Bodenplatte

Die konkreten Wärmedurchgangskoeffizienten der 4 energetischen Klassen für Bodenplatten sind in Anhang 3.2.4 nachzulesen. Auch hier gibt es Marktverschiebungen durch Neubau und Abriss sowie die Sanierung (hier alle 75 Jahre). Folgende Annahmen werden getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) ⅓ „gute“ und ⅔ „beste“ Bodenplatten, in der Periode (II) nur noch „beste“ (die Verschiebung hin zu besseren Standards ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken)
- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) zu ⅔ Gebäude mit „schlechten“ und ⅓ mit „mittleren“ Bodenplatten (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wieder)

- die energetische Sanierung trifft in Periode (I) proportional die Gebäude mit „schlechten“ und „mittleren“ Bodenplatten, in Periode (II) proportional „schlechte“, „mittlere“ und „gute“ Bodenplatten (letztere aber nur, wenn sie bereits vor 2020 „gut“ waren)
- nach der Sanierung sind in der Periode (I) und (II) jeweils ⅔ der Bodenplatten „gut“ und ⅓ „best“ (insbesondere die Restriktion der Bauausführung limitieren den Erfolg; die Maßnahme erfolgt in der Regel von oben, so dass auch hier begrenzte Raumhöhen zur Verfügung stehen).

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 165. Dargestellt sind die Wohnflächen, deren Bodenplatten den genannten Standard aufweisen. Da nicht alle Gebäude mit einer Bodenplatte nach unten begrenzt sind, ist nicht der Gesamtbestand dargestellt. Wie bei den Kellerdecken überwiegt der „gute“ Zustand, nicht der „beste“ – auch nicht nach sehr langer Zeit, was der angesetzten Nutzungsdauer von 75 Jahren geschuldet ist. Letztlich bedeutet diese, dass innerhalb einer 15-Jahres-Periode nur in 20 % aller Gebäude eine Maßnahme ansteht.

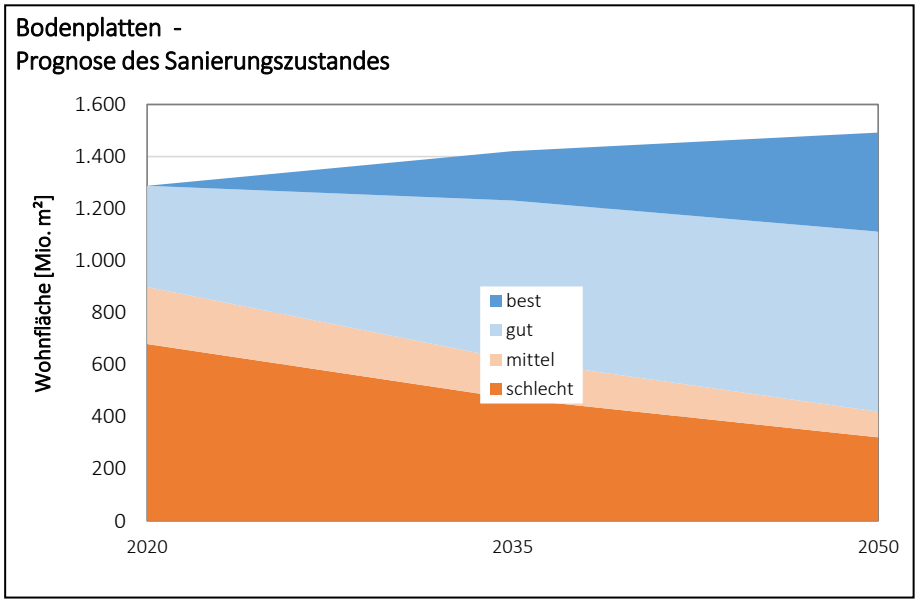


Abbildung 165 Prognose – Sanierungszustand der Bodenplatten [eigene Darstellung]

Eine tabellarische Zusammenfassung der sich ergebenden Anteile für „beste“, „gute“, „mittlere“ und „schlechte“ Bauteile findet sich am Ende des Kapitels.

Die den Sanierungsquoten zugrundeliegenden Hintergrundüberlegungen sind prinzipiell vergleichbar mit denen, die für die „Außenwand“ beschrieben sind. Jedoch – weil der Anteil von Restriktionen sehr viel größer sind (fehlende Geschosshöhe im bewohnten Kellergeschoss usw.) – gibt es deutlich weniger „beste“ Sanierungen.

Fenster

Die konkreten Wärmedurchgangskoeffizienten der 4 energetischen Klassen für Fenster sind in Anhang 3.2.2 nachzulesen. Auch hier gibt es Marktverschiebungen durch Neubau und Abriss sowie den Austausch (hier alle 35 Jahre). Folgende Annahmen werden getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) ⅓ „gute“ und ⅔ „beste“ Fenster, in der Periode (II) nur noch „beste“ (die Verschiebung hin zu besseren Standards ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken)
- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) zu ⅔ Gebäude mit „schlechten“ und ⅓ mit „mittleren“ Fenstern (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wieder)
- die energetische Sanierung trifft in Periode (I) und (II) alle Fenster, beginnend mit den „schlechten“ (bis zur völligen Entfernung aus dem Markt), gefolgt von den „mittleren“ usw.
- bei der Sanierung wird der Standard erreicht, der auch für den Neubau gilt.

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 166. Dargestellt sind die Wohnflächen, deren Fenster den genannten Standard aufweisen. Anders als bei anderen Hüllbauteilen erfolgt hier die Entfernung von Standards aus dem Markt sowie die Einführung in den Markt sehr viel unmittelbarer. Mit der angenommenen Nutzungsdauer von 35 Jahren werden bis 2050 (also in 30 Jahren ab heute) fast alle Fenster einmal angefasst. Der „beste“ Standard überwiegt folgerichtig.

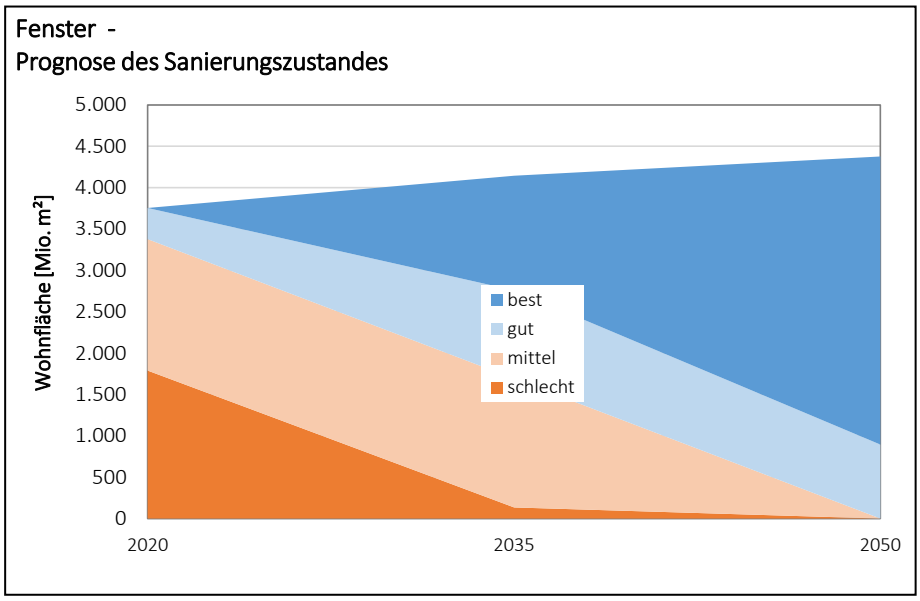


Abbildung 166 Prognose – Sanierungszustand der Fenster [eigene Darstellung]

Eine tabellarische Zusammenfassung der sich ergebenden Anteile für „beste“, „gute“, „mittlere“ und „schlechte“ Bauteile findet sich am Ende des Kapitels.

Die den Sanierungsquoten zugrundeliegenden Hintergrundüberlegungen sind prinzipiell vergleichbar mit denen, die für die „Außenwand“ beschrieben sind. Da es – bis auf die Ausnahme denkmalgeschützter Gebäude – praktisch keinen Unterschied zwischen Neubau und Bestand gibt, wird kein Unterschied zwischen diesen beiden Projektarten gemacht. Der Anteil „bester“ Fenstertausche ist gleich hoch. Die angenommene Quote bedeuten, dass etwa noch für 5 Jahre der heutige EnEV-Standard gilt (U-Wert ca. 1,3 W/(m²K) – definiert als „gut“) und danach näherungsweise der heutige KfW-Standard (U-Wert ca. 0,9 W/(m²K) – definiert als „best“).

Zusammenfassung

Tabelle 140 fasst die anteiligen Sanierungszustände der Hüllbauteile im „Hauptszenario“ zusammen, die sich aus den Annahmen der Gutachter ergeben. Dabei sind die Werte für oberste Geschossdecken und Dächer nach Häufigkeit des Auftretens gewichtet. Gleiches gilt für die Bodenplatten und Kellerdecken. Da die Sanierungsansätze für EZFH und MFH identisch gewählt wurden, ergeben sich fast gleiche Ergebnisse. Die schnellere Verbesserung ergibt sich bei den kürzerlebigen Komponenten (Fenster, Außenwand, Dach) sowie bei Bauteilen ohne oder mit geringen Restriktionen (oberer Gebäudeabschluss, Fenster).

Das in diesem Gutachten angenommene Modell geht im Regelfall nicht davon aus, dass Maßnahmen vorzeitig umgesetzt (vorgezogen) werden; im Gegensatz zu anderen Studien und Gutachten. Dennoch ist die Marktdurchdringung mit „guten“ und „besten“ Standards nach dem obigen Modell nur erreichbar, wenn entsprechend „best practice“ Sanierungen deutlich zahlreicher stattfinden. Die Erreichung der gewählten Standards wäre zu fordern (GEG usw.) und/oder zu fördern (BEG).

Die Annahmen zum Gebäudezustand 2050 sind etwas ambitionierter als die Werte der IWU-Studie zum Zielerreichungsszenario aus dem Jahr 2013 [62]. Dabei werden von Diefenbach et al. sehr ähnliche Zielstandards definiert, jedoch eine geringere Sanierungsrate angenommen. Die gewählten Annahmen passen dagegen gut zu dem mittleren Pfad („Effizienz plus EE-Wärme bzw. EE-Strom“) aus der Studie von Pehnt et al. von 2015 [34]. Dies betrifft die angenommene Sanierungsgeschwindigkeit als auch die erreichten Standards. Auch die Annahmen von Jochum et al. in der Studie „Dämmpotential“ fallen ähnlich aus [127].

Bauteil	Standard	Anteil der Ausbreitung in EZFH, in [-]			Anteil der Ausbreitung in MFH, in [-]		
		2020	2035	2050	2020	2035	2050
Außenwand	best	0,00	0,22	0,51	0,00	0,23	0,55
	gut	0,39	0,54	0,40	0,40	0,56	0,40
	mittel	0,15	0,06	0,02	0,15	0,05	0,01
	schlecht	0,47	0,18	0,07	0,45	0,16	0,04
oberer Gebäudeabschluss	best	0,00	0,25	0,51	0,00	0,25	0,53
	gut	0,59	0,66	0,46	0,58	0,65	0,44
	mittel	0,13	0,03	0,01	0,14	0,03	0,01
	schlecht	0,28	0,06	0,02	0,28	0,06	0,02
unterer Gebäudeabschluss	best	0,00	0,14	0,26	0,00	0,16	0,32
	gut	0,31	0,45	0,49	0,29	0,45	0,48
	mittel	0,17	0,10	0,06	0,18	0,10	0,05
	schlecht	0,53	0,31	0,19	0,52	0,29	0,15
Fenster	best	0,00	0,33	0,78	0,00	0,34	0,81
	gut	0,10	0,26	0,22	0,10	0,26	0,19
	mittel	0,40	0,36	0,00	0,46	0,40	0,00
	schlecht	0,50	0,06	0,00	0,44	0,00	0,00

Tabelle 140 Prognose des anteiligen Sanierungszustandes der Gebäudehülle [eigene Darstellung]

Eine zeitliche Ungleichgewichtung von baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen, wie z. B. in der Studie des IEK Jülich [150] vorgeschlagen, verfolgen die Gutachter nicht. Die von Robinius et al. beschriebene Idee: zuerst verstärkt bauliche Maßnahmen (solange die Energiewirtschaft noch umgebaut wird) und danach verstärkt anlagentechnische (insbesondere der Einbau von Wärmepumpen) ist grundsätzlich nachvollziehbar. Jedoch halten die Autoren des vorliegenden Gutachtens es für schlüssiger, den Sanierungszyklus der Bau- und Anlagenteile zugrunde zu legen. Eine gezielte Ungleichgewichtung bedeutet letztlich immer, dass es vorgezogene Sanierungen gibt, die zwangsläufig insgesamt teurer sind.

4.2.3 Marktdurchdringung der Haupterzeuger

Die grundsätzliche Überlegung ist identisch wie für die Gebäudehülle: alle Maßnahmen werden an den Sanierungszyklus angelehnt. Die Nutzungszeiten der Erzeuger werden dabei – an den Gewohnheiten der Gebäudebesitzer orientiert – eher lang gewählt (vgl. Anhang 5.9.1).

Wenn dann jedoch eine Sanierung ansteht, wird angenommen, dass sie zukunftsorientiert („best practice“) ausgeführt wird, so dass in der langen nachfolgenden Spanne kein Anlass zur weiteren Verbesserung besteht. Der Sanierungszyklus wird gewählt, um einen Umstieg von emissionslastigen auf emissionsärmere Technologien zu erreichen.

Erzeuger

Die Effizienzen der Erzeuger werden langfristig so angenommen, wie dies für die Mikroebene beschrieben wurde, vgl. Anhang 3.3.1 bis 3.3.4. Es wird von sich verändernden Marktanteilen im Zeitverlauf ausgegangen. Die derzeit im Markt befindlichen Gebäude weisen eine definierte Verteilung von Erzeugern auf; vgl. die Beschreibung der Typgebäude in Anhang 3.1. Im Rahmen dieses Gutachtens werden die möglichen Erzeugerkonstellationen zu insgesamt 9 Gruppen zusammengefasst.

Die künftige Verteilung auf die 9 Gruppen wird beeinflusst durch die Frage, welche Erzeuger mit dem Abriss von Gebäuden aus dem Markt entnommen werden und welche Erzeuger mit den Neubauten hinzukommen. Außerdem erfolgt eine Sanierung (hier regulär alle 25 Jahre, bei Fernwärme und Stromdirektheizung alle 40 Jahre), welche die Marktanteile verändern. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) keine Wärmepumpen (Annahme, dass dies eine noch sehr junge Technologie ist), in Periode (II) trifft der Abriss alle Erzeuger nach ihrer statistischen Verbreitung im Markt
- Neubau
    - in EZFH: 6 % Holzkessel in Periode (I) und (II), Gasbrennwertkessel 24 % in Periode (I) vor, keine in Periode (II), der Rest sind jeweils Wärmepumpen (⅓ Erdreich, ⅔ Außenluft)
    - in MFH: 3 % Holzkessel in Periode (I) und (II), Gasbrennwertkessel 30 % in Periode (I) vor, keine in Periode (II), Fernwärme findet in 20 % der Gebäude Anwendung in Periode (I), keine in Periode (II), der Rest sind jeweils Wärmepumpen (⅔ Erdreich incl. „kalte Fernwärme“, ⅓ Außenluft)
- die Sanierung trifft alle Gebäude gleichermaßen, aber nicht alle Erzeuger werden jeweils 1:1 ersetzt oder gegen andere Technologien getauscht; für beide Perioden (I) und (II) gilt:
    - in allen Gebäuden: Wärmepumpen und Holzkessel werden durch die gleiche Technologie ersetzt und Stromdirektheizungen werden zurückgebaut,
    - in EZFH: Fernwärme wird zurückgebaut
    - in MFH: Fernwärme wird in 10 % der Sanierungsfälle ersetzt durch eine andere Technologie
    - in allen Gebäuden: die Sanierung von Kesseln trifft zuerst die NT-, dann die Brennwertkessel
- für den Sanierungsfall mit Energieträgerwechsel sieht der neue Erzeuger wie folgt aus:
    - in EZFH: 10 % Holzkessel in Periode (I) und (II), Gasbrennwertkessel 34 % in Periode (I) vor, keine in Periode (II), der Rest sind jeweils Wärmepumpen (⅓ Erdreich, ⅔ Außenluft)
    - in MFH: 4 % Holzkessel in Periode (I) und (II), Gasbrennwertkessel 40 % in Periode (I) vor, keine in Periode (II), Fernwärme findet in 2 % der Gebäude Anwendung in Periode (I), keine mehr in der Periode (II), der Rest sind jeweils Wärmepumpen (⅔ Erdreich incl. „kalte Fernwärme“, ⅓ Außenluft)

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 167. Der absolute Wohnflächenzuwachs wird dabei berücksichtigt. Dargestellt sind die Wohnflächen, die mit der genannten Technologie ausgestattet sind. Den größten Zuwachs erfahren die Wärmepumpen – in beiden Zeitperioden. Die maximale Einzeldurchdringung weisen die Gasbrennwertkessel 2035 auf, vor allem, weil zunächst noch sehr viele NT-Kessel in der Sanierung mit Brennwertkesseln ersetzt werden, bis der Wärmepumpenhochlauf sein Maximum erreicht hat.

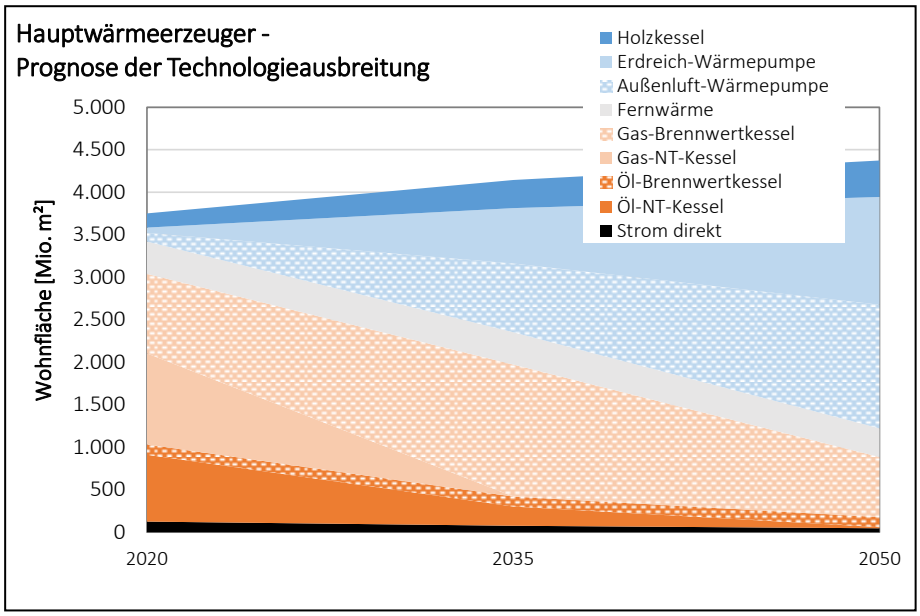


Abbildung 167 Prognose – Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung]

In der ersten Zeitperiode von 2020 bis 2035 ergeben sich im Durchschnitt (und auf Basis der Typgebäude, die jeweils eine Wärmepumpe je Gebäude erhalten) ca. 500.000 zu installierende Wärmepumpen pro Jahr. Davon sind 360.000 St/a aufgrund eines Energieträgerwechsels, 100.000 St/a im Neubau und 40.000 St./a in der Sanierung (als Austauschgerät vorheriger Wärmepumpen) zu verzeichnen. In der zweiten Periode steigen die Werte auf insgesamt 730.000 Wärmepumpen pro Jahr mit 330.000 St/a durch Erzeugerwechsel, 90.000 St/a im Neubau und 310.000 St/a als Austauschgeräte.

Die jährlichen Werte liegen etwa 50 % über den von Jochum et al. angegebenen maximalen Marktkapazitäten [119], vgl. Anhang 3.3.1. Da die Zahlen des Bundesverbandes Wärmepumpen (BWP) aus Sicht des Jahres 2015 prognostiziert wurden, seitdem der Markt aber einen deutlichen Zuwachs erfahren hat und unterdessen alle großen (ehemaligen) Kesselhersteller auch Wärmepumpen im Programm haben, gehen die Gutachter davon aus, dass dieser Markthochlauf erreichbar wäre.

Die Stückzahl der Holzkessel hat sich des zum Ende der Prognosezeiträume etwa um den Faktor 2,5 erhöht. Wenn davon ausgegangen wird, dass auch die mit Holz beheizten Gebäude mindestens teilweise bauliche Verbesserungen erfahren haben, ist der Energieeinsatz um den Faktor 1,5 bis 2,0 gestiegen. Damit ist das Biomassebudget (vgl. Anhang 3.3.3) nicht überschritten.

Alle Hybridsysteme sind in der obigen Darstellung als „Wärmepumpensysteme“ geführt, da diese den ausschlaggebenden Deckungsanteil im Einzelgebäude aufweisen.

Hintergrundinformationen der Annahmen: Grundlage der Überlegungen sind die Annahmen zur Technologieausbreitung verschiedener Studien – siehe Erläuterungen in der „Zusammenfassung“ unten. Außerdem wurde der heutige Wärmeerzeugermarkt (siehe Anhang 5.6) berücksichtigt. Allerdings sind dies nur Startwerte für sich ändernde Märkte. Die Gutachter betrachten zwei Zeiträume á 15 Jahre, in denen etwa jeweils ca. 2 bis 3 Verschärfungen der Anforderungen für Forderung und Förderung erfolgen können. Es kann also davon ausgegangen werden, dass im Verlaufe der Zeit eine Verschiebung zu besseren Standards erfolgt oder erfolgen kann, so wie dies auch rückblickend erfolgt ist.

Der Holzkesselanteil wurde im Neubau in etwa so belassen wie er heute ist. In der Sanierung wurde er etwas höher angenommen, da vor allem im ländlichen Raum Heizölkessel durch Holzkessel ersetzt werden könnten.

Für Gaskessel wurde im Neubau von anfangs heute zu beobachtenden Anteilen (ca. 35 … 40) ausgegangen, die jedoch im Verlauf der nächsten 15 Jahre sinken – z. B. durch angepasste gesetzliche Regelungen (GEG) oder Förderbedingungen. In der Sanierung wurde der Wert etwas nach oben korrigiert, weil durch mangelnde Wärmedämmung weniger Wärmepumpen (und daher größere Anteile aller anderen Erzeuger) umsetzbar sind.

Bei der konventionellen Fernwärme wurde anfangs noch von heutigen Anteilen (ca. 25 … 30 % im MFH ausgegangen), die im Verlaufe der nächsten 15 Jahre zugunsten kalter Fernwärme (dann unter „Wärmepumpe“ geführt) abgelöst wird.

Bein den Wärmepumpen werden in EZFH eher Außenluftgeräte eingebaut (aus Kostengründen), das entspricht dem heutigen Marktgeschehen. Bei den MFH werden größere Anteile Erdreichwärmepumpen angenommen, da auch Geräte für den Betrieb in „kalter Fernwärme“ darunter fallen. Diese Annahmen gelten für Neubau und Sanierung gleichermaßen.

Die Gutachter haben auch die Überlegungen vergleichbarer Studien, insbesondere IWU 2013 [62], Beuth/IFEU 2015 [119] [127], Ökoinstitut/Fraunhofer ISE [252] in die Überlegungen einfließen lassen. Es ist aber anzumerken, dass die getroffenen Annahmen kein „business-as-usual“ abbilden, sondern von einer deutlichen Verbesserung der umzusetzenden Standards ausgehen. Es wurde jedoch darauf geachtet, Restriktionen (Flächenverfügbarkeit für Erdreichwärmepumpen, Biomassebudget usw.) zu beachten und nur technisch machbare Standards anzunehmen.

Zusammenfassung

Tabelle 141 fasst die Anteile der Technologieausbreitung zusammen. Die Ölkessel werden schnell aus dem Markt gedrängt, weil nicht mehr nachinvestiert wird (außer als Hybridsystem, was nicht separat dargestellt wird). Auch die Erdgas-NT-Kessel sind schnell ersetzt, weil sie ein größeres Alter aufweisen.

Die klassische Fernwärme behält zunächst noch ihren Anteil unter den MFH, wird dann aber zunehmend durch „kalte Fernwärme“ ersetzt (und wird dann unter „Erdreichwärmepumpe“ geführt). Wie in allen Studien und Gutachten zum Thema „Wärmewende und Klimaneutralität“ [79] sind diese Prognosen aus der Gutachtersicht geprägt.

System		Anteil der Ausbreitung in EZFH, in [-]			Anteil der Ausbreitung in MFH, in [-]		
		2020	2035	2050	2020	2035	2050
Stromdirektheizung		0,033	0,018	0,011	0,034	0,018	0,010
Heizölkessel	NT	0,249	0,066	0,004	0,151	0,038	0,002
	Brennwert	0,039	0,035	0,033	0,023	0,020	0,018
Erdgaskessel	NT	0,275	0,000	0,000	0,301	0,000	0,000
	Brennwert	0,241	0,363	0,161	0,261	0,391	0,162
Fernwärme		0,040	0,022	0,013	0,192	0,195	0,170
Wärmepumpe	Außenluft	0,038	0,256	0,424	0,011	0,104	0,201
	Erdreich	0,023	0,132	0,221	0,007	0,195	0,389
Holzkessel		0,061	0,107	0,132	0,021	0,039	0,049

Tabelle 141 Prognose der anteiligen Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung]

Das in diesem Gutachten angenommene Modell geht im Regelfall nicht davon aus, dass Maßnahmen vorzeitig umgesetzt (vorgezogen) werden; im Gegensatz zu etlichen anderen Studien und Gutachten. Dennoch ist die Marktdurchdringung der Hauptwärmeerzeuger nach dem obigen Modell nur erreichbar, wenn entsprechend „best practice“ Sanierungen und Technologiewechsel hin zu emissionsärmeren Technologien deutlich zahlreicher stattfinden. Die Erreichung der gewählten Standards wäre zu fordern (GEG usw.) und/oder zu fördern (BEG).

Die Studie von Prognos et al. [171] geht von einer deutlich geringeren Verbreitung der Wärmepumpen und gleichzeitig einem deutlich höheren Restbestand an Ölkesseln aus als die Autoren des hier vorliegenden Gutachtens dies prognostizieren. Es sind Zahlen für 2030 verfügbar: der Anteil der Wärmepumpen wird bei etwa 14 % vermutet, die Heizölkessel versorgen immer noch 15 % der Fläche.

Mellwig et al. gehen – je nach Szenario – im Jahr 2050 von 37 bis 81 % Marktanteil für Wärmepumpen aus [128]. Eine ähnlich große Spannbreite ergibt sich auch aus der DENA-Studie von Hecking et al. [157]: je nach Szenario liegt der Wert für 2030 zwischen 30 bis 78 % (am Beispiel der Bestands-EZFH). Innerhalb der genannten sehr großen Spannbreiten ist auch der hier vorgelegte Vorschlag angesiedelt.

Gerhardt et al. fassen in ihrer Metastudie die Bandbreiten 5 anderer Studien aus dem Zeitraum 2014/15 zusammen. Es werden für 2050 zwischen ca. 10 und 17 Millionen Wärmepumpen im Markt prognostiziert [156]. Das entspricht einer Marktdurchdringung von knapp 40 bis über 70 %. Die Überlegungen des hier vorliegenden Gutachtens finden sich in der genannten Bandbreite im oberen Drittel wieder. Die Gutachter folgen den Annahmen von AGORA [170], dass bis 2030 etwa 5 bis 6 Mio. Wärmepumpen installiert sein werden (davon viele als Hybridlösungen).

Die in diesem Gutachten angenommene Ausbaurate liegt jedoch unter der von Robinius et al. getroffenen Annahme, wonach 2050 etwa 14 Mio. Wärmepumpen für mehr als 80 % der Wärmeversorgung zuständig sind [150]. Auch die Annahmen von Jochum et al. für 2050 von 73 bis 83 % werden nicht ganz erreicht [119].

Einen Biomasseanteil von maximal ca. 18 % (2030) bis knapp 26 % (2050), wie z. B. in der Studie von Mellwig et al. [128] (Szenario „Effizienz+EE“) vermutet, halten die Gutachter als zu hoch – in Anbetracht des zur Verfügung stehenden Biomassebudgets, siehe Anhang 5.5.2. Der von Jochum et al. genannte Wert von 8,5 % für zentrale Holzkessel im Wohnungsbau deckt sich sehr gut mit den Annahmen der Gutachter [119].

Die größte Diskrepanz verschiedener Studien liegt bei der Prognose der Fernwärmeverbreitung bzw. der Verbreitung von Wärmenetzanschlüssen. Dazu ist anzumerken, dass nicht eindeutig ist, wo die „kalte Fernwärme“ sich wiederfindet (im vorliegenden Gutachten wird sie unter „Erdreichwärmepumpe“ geführt).

Mellwig et al. gehen – je nach Szenario – im Jahr 2050 von knapp 2 bis ca. 17 % Marktanteil für Wärmenetze aus [128]. Gerhardt et al. fassen in ihrer Metastudie die Bandbreiten 5 anderer Studien aus dem Zeitraum 2014/15 zusammen. Es werden für 2050 zwischen 14 und 23 % Versorgung über Wärmenetze prognostiziert [156]. Pehnt et al. prognostizieren für die „wärmelastigen Szenarien“ 25 bis 35 % und für die „stromlastigen Szenarien“ 5 % (jeweils 2050) [124]. Von Jochum et al. [119] wird bis 2030 der Fernwärmeanteil etwa als konstant angenommen, nach einem kleinen Anstieg folgt ab 2040 ein Rückgang. Das deckt sich mit den Annahmen der Gutachter.

4.2.4 Sanierungsquoten für die Peripherie

Die grundsätzliche Überlegung ist auch für die wesentlichen energierelevanten Bestandteile der Peripherie gleich: alle Maßnahmen werden an den Sanierungszyklus angelehnt. Die Nutzungszeiten werden somit eher lang gewählt (vgl. Anhang 5.9.1). Wenn dann eine Sanierung ansteht, geht sie ggf. mit einem Technologiewechsel einher.

Systeme der Trinkwassererwärmung

Zur Trinkwassererwärmung kommen die in der Mikroebene – siehe Anhang 3.4.1 und 3.4.2 – beschriebenen diversen Varianten zum Einsatz. Sie werden zur Vereinfachung zu folgenden 3 Systemen zusammengefasst:

- „dezentral elektrisch“: in der Regel keine Ankopplung an den Haupterzeuger; kurze Leitungswege; Durchlauferhitzer und Kleinspeicher bzw. auch Elektrozentralspeicher in Bad oder Küche; auch wohnungsweise Auskopplung von Trinkwarmwasser aus geregelten Heizungsnetzen (2-Leiter, nur in der Heizperiode) mit dezentral elektrischer Nacherwärmung fallen darunter
- „zentral ohne Zirkulation“: Ankopplung an den Haupterzeuger; längere Leitungswege; Zentralspeicher im Gebäude; auch wohnungsweise Auskopplung von Trinkwarmwasser aus ungeregelten Heizungsnetzen (2-Leiter, ganzjährig) fallen darunter
- „zentral mit Zirkulation“: Ankopplung an den Haupterzeuger; lange Leitungswege; Zentralspeicher im Gebäude; klassische 4-Leiter-Systeme mit Hochtemperaturbetrieb zur Legionellenvermeidung; auch Systeme mit etwas geringeren Temperaturen aufgrund von Ultrafiltration fallen darunter

Die künftige Verteilung auf die 3 Systeme wird beeinflusst durch die Frage, welche Systeme mit dem Abriss aus dem Markt entnommen werden und welche mit dem Neubau hinzukommen. Außerdem erfolgt eine Sanierung (hier alle 30 Jahre im Zusammenhang mit einer Sanierung des Leitungsnetzes), welche zum Systemwechsel genutzt werden kann. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) alle Systeme gleichermaßen – je nach ihrer statistischen Verteilung im Markt
- der Neubau kann genutzt werden, um verlustarme Technologien umzusetzen
    - im EZFH: die dezentral elektrische Trinkwassererwärmung wird in Periode (I) und (II) in 10 % aller Fälle gewählt; in den restlichen Fällen ist eine zentrale Trinkwassererwärmung gegeben; eine Zirkulation wird in Periode (I) zu 25 % gewählt, in Periode (II) nur noch mit 5 % Anteil
    - im MFH: die dezentral elektrische Trinkwassererwärmung wird in Periode (I) mit 30 % Anteil und in Periode (II) mit 40 % Anteil gewählt; in den restlichen Fällen ist eine zentrale Trinkwassererwärmung gegeben; eine klassische Zirkulation wird in Periode (I) zu 60 % gewählt, in Periode (II) nur noch mit 40 % Anteil
- die energetische Sanierung trifft alle Gebäude gleichermaßen, dabei kann das System umgebaut werden
    - im EZFH: mit 10 % Anteil wird bei der Sanierung eines zentralen zu einem dezentralen System gewechselt – sowohl in Periode (I) wie (II); außerdem wird in zentralen Systemen mit Zirkulation diese nur zu 25 % in Periode (I) bzw. zu 5 % in Periode (II) beibehalten; ansonsten wird sie zurückgebaut
    - im MFH: mit 25 % Anteil in Periode (I) und 35 % Anteil in Periode (II) wird bei der Sanierung von einem zentralen zu einem dezentralen System gewechselt; außerdem wird in den zentralen Systemen mit Zirkulation diese nur zu 60 % in Periode (I) bzw. zu 40 % in Periode (II) beibehalten; ansonsten wird sie zurückgebaut

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 168. Der absolute Wohnflächenzuwachs wird dabei berücksichtigt. Dargestellt sind die Wohnflächen, die mit dem genannten System ausgestattet sind. Insbesondere die Verwendung der klassischen Zirkulationssysteme nimmt ab und wird ersetzt durch Alternativen. Die dezentralen Systeme im MFH finden sich künftig in Gebäuden mit ungünstiger Geometrie wieder, um lange Leitungsnetze zu vermeiden.

Ein verstärkter Ausbau dezentraler elektrischer Systeme mit Kleinspeichern in jeder Wohnung bzw. jedem EZFH hängt von politischen Entscheidungen zum EEG bzw. zu Netznutzungsentgelten ab. Die Anteile nach Abbildung 168 könnten sich dann wesentlich verschieben. Auch Seefeld sieht in der Prognos-Studie von 2011 eine mittelfristige Verschiebung hin zu dezentraler Trinkwassererwärmung auf Basis von Strom [152].

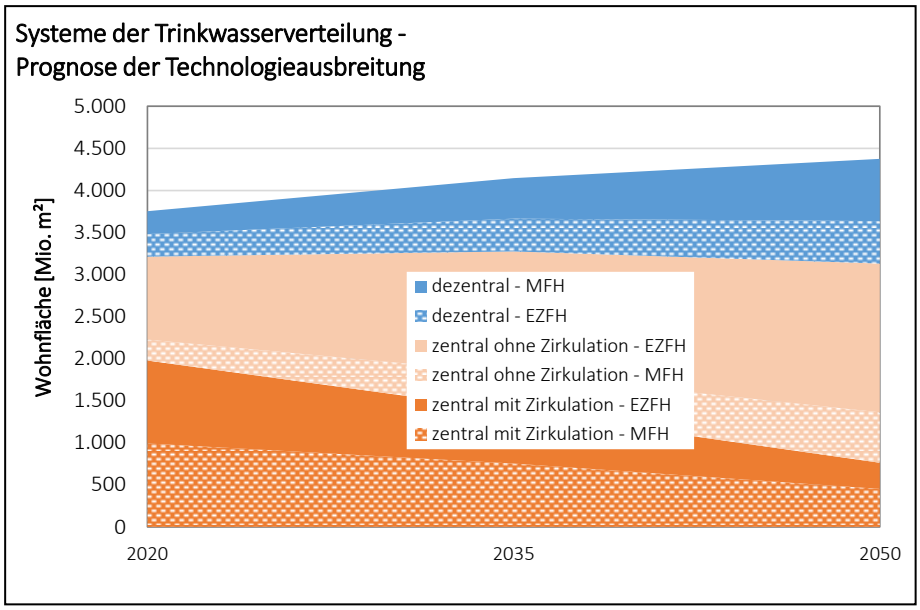


Abbildung 168 Prognose – Technologieausbreitung der Trinkwarmwassersysteme [eigene Darstellung]

Übergabesysteme

Die derzeit im Markt befindlichen Gebäude weisen eine definierte Verteilung von Übergabesystemen auf; vgl. die Beschreibung der Typgebäude in Anhang 3.1. Der Anteil von Flächenheizungen ist vergleichsweise gering. In Systemen mit Flächenheizung können Wärmepumpen effizienter arbeiten, jedoch ist ein nachträglicher Wechsel von Heizkörper auf Fußbodenheizung sehr aufwändig, weil das Gebäude in einen rohbauähnlichen Zustand versetzt wird, siehe Erläuterungen in Anhang 3.4.3. Der Neubau ist eher geeignet, um eine größere Verbreitung der Systeme voranzutreiben. Die Thematik der schlechten Regelbarkeit nassverlegter Flächenheizungen ist dabei zu bedenken.

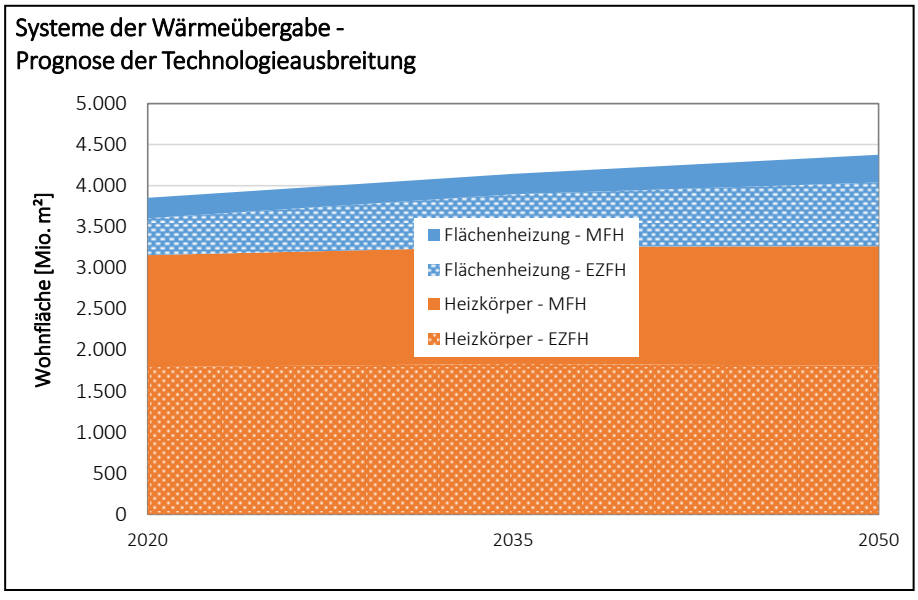


Abbildung 169 Prognose – Technologieausbreitung der Wärmeübergabesysteme [eigene Darstellung]

Die künftige Verteilung wird beeinflusst durch die Frage, welche Übergabesysteme mit dem Abriss von Gebäuden aus dem Markt entnommen werden und welche mit den Neubauten hinzukommen. Außerdem erfolgt eine Sanierung (hier regulär alle 40 Jahre), welche die Marktanteile verändern kann. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) alle Systeme gleichermaßen – je nach ihrer statistischen Verteilung im Markt
- im Neubau wird in beiden Perioden (I) und (II) davon ausgegangen, dass in einem EZFH mit 50 % Wahrscheinlichkeit eine Flächenheizung installiert wird, im MFH wird ihr Anteil auf 25 % geschätzt (insbesondere für die sehr guten Baustandards reglementiert die schlechtere Regelbarkeit des Systems den Einsatz)
- bei der Sanierung des Verteilnetzes wird für alle Gebäude und in beiden Perioden (I) und (II) davon ausgegangen, dass in nur 10 % aller Fälle ein Systemumbau von Heizkörpern auf Flächenheizung erfolgt.

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 169. Der Anteil der Flächenheizungen nimmt stetig zu, aber vor allem durch die Neubautätigkeit.

Verteilleitungen im Keller

Fast ebenso aufwändig wie der Umbau von Heizkörper- zu Flächenheizung ist die Veränderung der Rohrnetzverlegung. Klassisch sind die Hauptverteilleitungen im Keller angeordnet und weisen dort Verluste auf, wie in Anhang 3.4.4 am Beispiel erläutert.

Im Neubau sind alle Freiheitsgrade gegeben, oftmals wird sowieso ohne Keller gebaut. In der Sanierung (hier regulär alle 40 Jahre) kann ebenfalls die Chance auf eine energetische Verbesserung genutzt werden. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) alle Systeme gleichermaßen – je nach ihrer statistischen Verteilung im Markt
- im Neubau wird in beiden Perioden (I) und (II) davon ausgegangen, dass in einem EZFH mit 10 % Wahrscheinlichkeit Leitungen im Keller installiert wird, im MFH wird ihr Anteil auf 30 % geschätzt (insbesondere da hier häufiger ein Keller vorhanden ist)
- bei der Sanierung des Verteilnetzes im Keller wird in beiden Perioden (I) und (II) davon ausgegangen, dass in 20 % aller EZFH und in 10 % aller MFH die Lage des Verteilnetzes geändert wird und das System in den beheizten Bereich verlegt wird.

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 170. Es ist nur eine langsame Verbesserung hin zu der energetisch günstigeren Variante der Leitungen im beheizten Bereich realistisch.

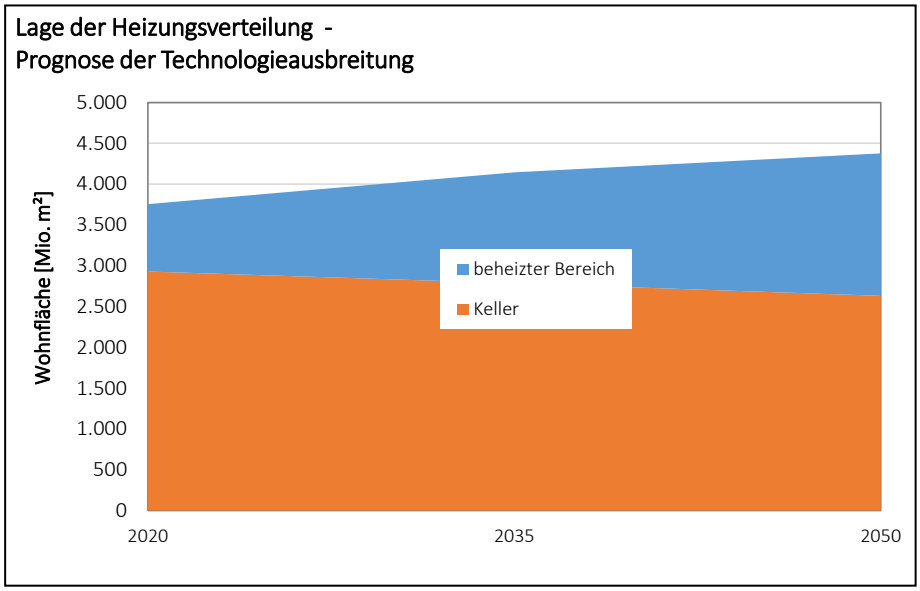


Abbildung 170 Prognose – Technologieausbreitung der Lage von Verteilnetzen [eigene Darstellung]

Zusammenfassung

Tabelle 142 fasst die Anteile der Technologieausbreitung zusammen. Die Verbesserung energetisch günstigerer Systeme bzw. Verteilsysteme für die Trinkwassererwärmung wird nach Ansicht der Gutachter schneller möglich sein – vor allem der Zirkulationsverzicht im EZFH oder ein Wechsel auf 2-Leiter-Systeme im MFH sind einfach umzusetzende Optionen.

Der Umbau der Übergabesysteme im Bereich Heizung sowie die Veränderung der Lage von Rohrnetzen (aus dem Keller in den beheizten Bereich) ist – baupraktisch gesehen – deutlich komplexer, so dass der Systemumbau eher aus dem Neubau heraus erfolgt.

System		Anteil der Ausbreitung in EZFH, in [-]			Anteil der Ausbreitung in MFH, in [-]		
		2020	2035	2050	2020	2035	2050
Trinkwasser-erwärmung	dezentral elektrisch	0,12	0,16	0,19	0,18	0,29	0,41
	zentral	0,88	0,84	0,81	0,82	0,71	0,59
	mit Zirkulation	0,50	0,30	0,15	0,80	0,63	0,43
	ohne Zirkulation	0,50	0,70	0,85	0,20	0,37	0,57
Heizung	Fußbodenheizung	0,20	0,26	0,30	0,10	0,15	0,19
	Heizkörper	0,80	0,74	0,70	0,90	0,85	0,81
Heizung	Keller	0,70	0,59	0,52	0,90	0,79	0,72
	beheizter Bereich	0,30	0,41	0,48	0,10	0,21	0,28

Tabelle 142 Prognose der anteiligen Technologieausbreitung der Peripherie [eigene Darstellung]

Mit Detailfragen der Peripherie beschäftigen sich nur wenige Makrostudien. Den von Jochum et al. [119] genannten Anteil von 80 % für ein Temperaturniveau „35/28°C“ (Flächenheizungsniveau) im Jahr 2050 halten die Autoren für unrealistisch.

4.2.5 Technologieausbauquoten für Zusatzerzeuger

Die grundsätzliche Überlegung ist für die Zusatzerzeuger ähnlich wie bei den Haupterzeugern: es bietet sich im Neubau eine Option zu deren verstärkter Markteinführung, es können aber auch Sanierungsanlässe (an anderen Systemen oder Bauteilen) genutzt werden, um das System einzubauen. Da die Zusatzerzeuger nicht für den Betrieb des Gebäudes erforderlich sind, ergeben sich in der Regel Vollkosten.

Photovoltaik

Der nachträgliche Einbau einer Photovoltaikanlage kann im Zusammenhang mit einer Dachsanierung erfolgen, aber auch mit einer Außenwanddämmung oder dem Fenstertausch (das Gerüst wird mitbenutzt). Aber auch der Einbau einer Wärmepumpe ist ein geeigneter Anlass – neben dem Neubau eines Gebäudes.

Die diversen Anlässe werden zu einer typischen „Nutzungsdauer“ von 30 Jahren zusammengefasst, so dass davon ausgegangen wird, dass ein beliebiger Sanierungsanlass, der zu einem Nachdenken über PV führt mit 3,33 %/a Wahrscheinlichkeit jedes Jahr in jedem Gebäude gegeben ist. In einer Periode von 15 Jahren Länge ergibt sich so für 50 % aller Gebäude einmal die Gelegenheit, über einen Einbau nachzudenken. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) nur Gebäude ohne PV (weil die Technologie noch zu jung ist), in Periode (II) ist die PV betroffen, aber mit halb so hoher Wahrscheinlichkeit wie es ihrer Marktverbreitung betrifft
- im Neubau wird für alle Gebäude gleichermaßen davon ausgegangen, dass in Periode (I) 75 % aller Gebäude eine PV erhalten; in Periode (II) sind es alle Gebäude (dies ließe sich über eine Fortschreibung des GEG bewirken)
- in der Sanierung entscheiden sich 50 % aller Gebäudebesitzer für eine PV-Anlage in Periode (I), aber 75 % in Periode (II) – dies gilt für alle Gebäude (der Anteil wird steigend erwartet, weil die Selbstnutzung des Stroms interessanter wird, je mehr Wärmepumpen im Markt betrieben werden; außerdem wird davon ausgegangen, dass bei den MFH künftig plausible gesetzliche Konzepte für die Mieterstromnutzung gegeben sind)

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 171. Die Gutachter gehen davon aus, dass die Nutzung von Photovoltaik der am stärksten wachsende Einzeltechnologiemarkt ist und auch künftig sein wird. Dies ist insbesondere dadurch erklärbar, dass jeder Haushalt unmittelbar davon profitieren kann, weil immer mindestens Haushaltsstrom benötigt wird.

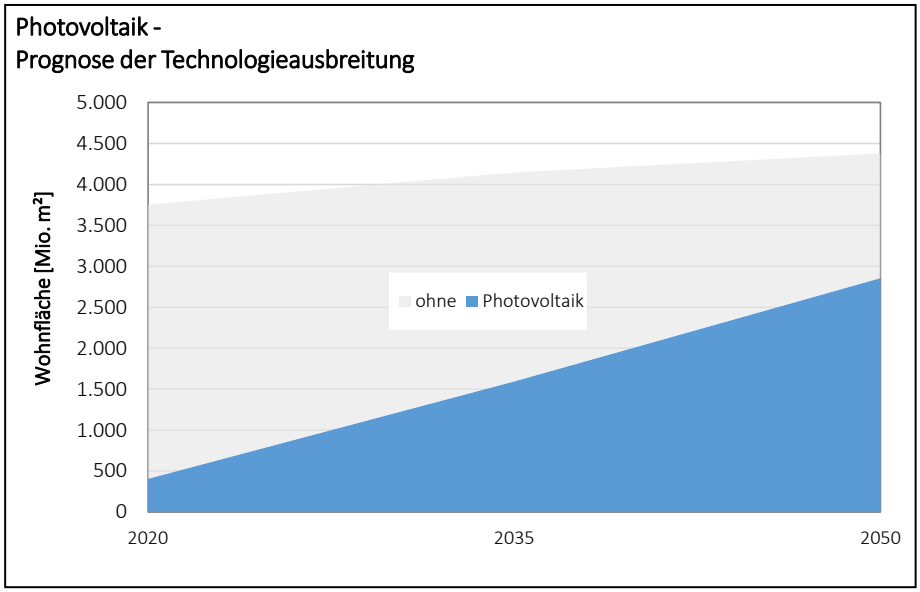


Abbildung 171 Prognose – Technologieausbreitung der Photovoltaik [eigene Darstellung]

Es ist künftig bei dieser Technologie von einer weiteren Effizienzverbesserung auszugehen. Allerdings werden langfristig auch ungünstigere Lagen (Fassaden, Ost-West-Dächer) ausgestattet werden. Die positiven und negativen Effekte heben sich somit teilweise auf. Daher werden die flächenbezogenen Erträge, die in Anhang 3.5.1 für die Mikroperspektive angenommen wurden, auch in der langfristigen Makroperspektive als realistisch angesehen.

Solarthermie

Der nachträgliche Einbau einer Solarthermieanlage (Nutzungsdauer 25 Jahre) kann im Zusammenhang mit der anstehenden Sanierung des Trinkwarmwassernetzes erfolgen. Die Photovoltaikanlage ist als unmittelbare Konkurrenz anzusehen, wie in Anhang 3.5.2 beschrieben. Dennoch sind vor allem in Neubauten, bei denen ein Holzkessel zum Einsatz kommt, sinnvolle Einsatzbedingungen gegeben. Langfristig gehen die Gutachter von einer Verdrängung der Solarthermie durch Photovoltaik aus, insbesondere im MFH. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) Systeme mit und ohne Solarthermie gleichermaßen – je nach ihrer statistischen Verteilung im Markt
- im Neubau wird für EZFH davon ausgegangen, dass Solarthermie in 10 % aller Fälle zum Einsatz kommt – in Periode (I) und (II); bei den MFH wird in Periode (I) von einer Verbreitung mit 5 % ausgegangen, in Periode (II) kommt keine Solarthermie mehr zum Einsatz (weil das Platzangebot auf dem Dach vollständig von PV aufgebraucht wird, die zu günstigeren Gestehungskosten arbeitet).
- bei der Sanierung von Gebäuden mit Solarthermie wird davon ausgegangen, dass
    - in EZFH: in Periode (I) alle Solarthermiebesitzer wieder eine Anlage einbauen, jedoch in Periode (II) nur jeder zweite die Solarthermieanlage ersetzt
    - in MFH: in Periode (I) jeder zweite Solarthermiebesitzer wieder eine Anlage einbaut, jedoch in Periode (II) die Solarthermieanlage nicht ersetzt wird
    - keine sonstigen Anlässe dazu führen, dass eine Solarthermie eingebaut wird (zugunsten von PV)

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 172. Die Gutachter gehen davon aus, dass die Nutzung von Solarthermie ein sinkender Markt ist, da das Dachflächenpotential universeller durch PV nutzbar ist.

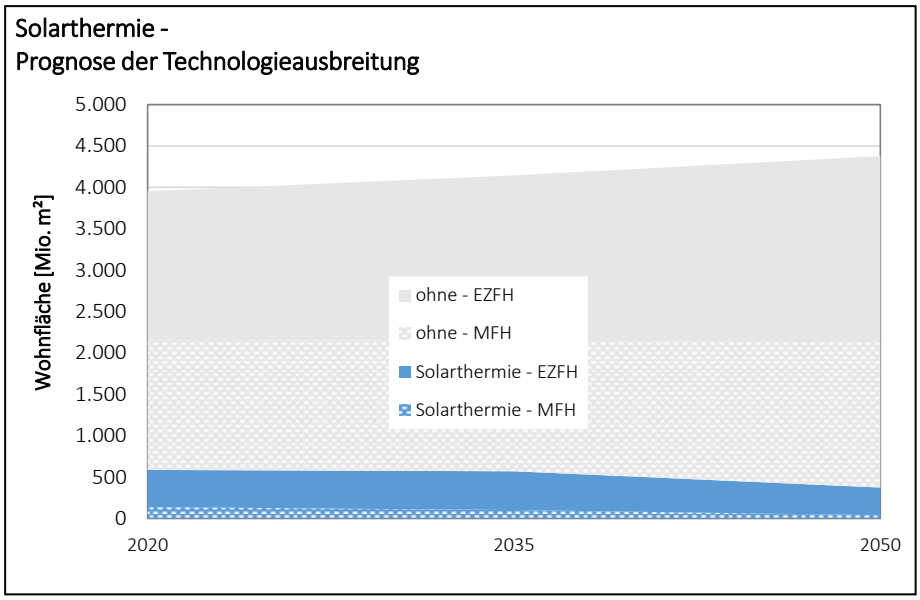


Abbildung 172 Prognose – Technologieausbreitung der Solarthermie [eigene Darstellung]

Allerdings kann sich in klassischen Fernwärmesystemen ggf. übergangsweise Großflächensolarthermie etablieren, um fossile Energieträger zu ersetzen. Außerdem sehen die Gutachter die Solarthermienutzung auch als evtl. ergänzende Wärmequelle für Wärmepumpen, wie in Anhang 3.5.2 beschrieben (Fassadenkollektor, Einspeisung in „kalte Nahwärme“).

Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Der nachträgliche Einbau einer Lüftungsanlage ist vergleichsweise aufwändig. Zumindest als Zentralanlage ist ein unbewohntes Gebäude die günstigste Gelegenheit. Auch eine Kopplung an die Innendämmung oder Sanierung von Heizungsnetzen (jeweils rohbauähnliche Zustände) sind denkbar. Weitere „standardmäßige“ Sanierungsanlässe sehen die Gutachter nicht.

Die genannten Anlässe werden zu einer typischen „Nutzungsdauer“ von 50 Jahren zusammengefasst, so dass davon ausgegangen wird, dass ein beliebiger Sanierungsanlass, der zu einem Nachdenken über Lüftung mit WRG führt mit 2 %/a Wahrscheinlichkeit jedes Jahr in jedem Gebäude gegeben ist. In einer Periode von 15 Jahren Länge ergibt sich so für 30 % aller Gebäude einmal die Gelegenheit, über einen Einbau nachzudenken. Anders sieht es im Neubau aus, wo die energetischen Vorteile – siehe Anhang 3.5.3 – leicht zu erschließen sind. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Abriss von Gebäuden trifft in Periode (I) und (II) keine Lüftungsanlagen mit WRG (weil deren Marktdurchdringung gering ist und sie eher in jungen Gebäuden anzutreffen sind)
- im Neubau wird für alle Gebäude davon ausgegangen, dass Lüftung mit WRG in Periode (I) bei 50 % aller Fälle zum Einsatz kommt, in Periode (II) steigt der Wert auf ⅔ (vor allem die positive Auswirkung auf die verminderte Leistung von Wärmepumpen ist als Treiber anzusehen)
- bei der Sanierung von Gebäuden mit Solarthermie wird davon ausgegangen, dass
- in der Sanierung entscheiden sich 10 % aller Gebäudebesitzer für eine Lüftung mit WRG in Periode (I) und (II) und allen Gebäuden.

Das Resultat dieser Annahmen zeigt Abbildung 173. Die Gutachter gehen davon aus, dass vor allem der Neubau die Technologieausbreitung vorantreibt. Sofern sich deutlich günstigere – vor allem wirtschaftliche Randdaten – zu verzeichnen sind als die in Anhang 3.5.3 angegebenen, ist eine Neubewertung vorzunehmen.

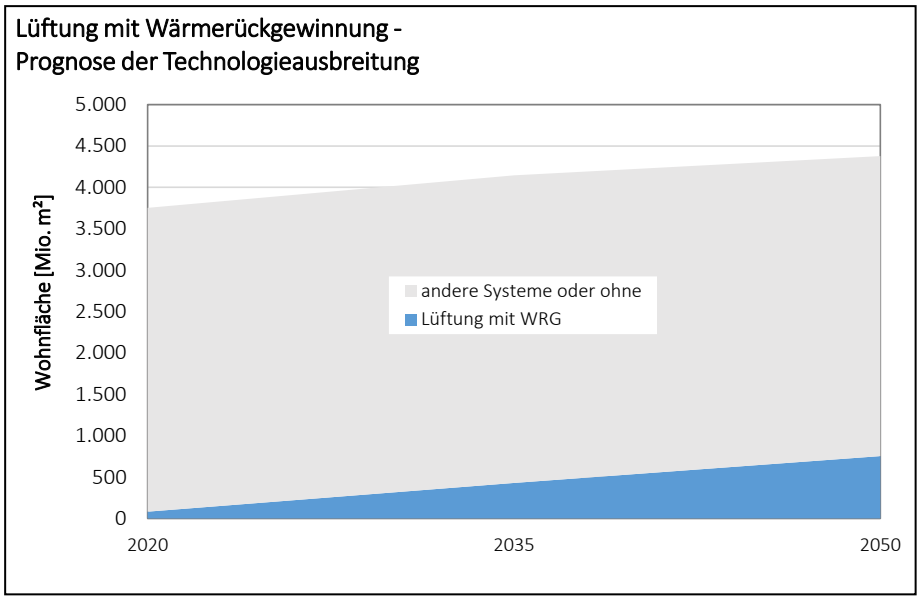


Abbildung 173 Prognose – Technologieausbreitung der Lüftung mit Wärmerückgewinnung [eigene Darstellung]

Zusammenfassung

Tabelle 143 fasst die Anteile der Technologieausbreitung der Zusatzerzeuger zusammen. Während Photovoltaik in allen Gebäuden einfach nachzurüsten ist, gehen die Gutachter von nur moderaten Zuwächsen bei der Lüftung mit WRG und fallender Marktdurchdringung bei Solarthermie aus.

System	Anteil der Ausbreitung in EZFH, in [-]			Anteil der Ausbreitung in MFH, in [-]		
	2020	2035	2050	2020	2035	2050
Photovoltaik	0,14	0,40	0,65	0,06	0,36	0,65
Solarthermie	0,20	0,19	0,13	0,09	0,06	0,02
Lüftung mit Wärmerückgewinnung	0,03	0,11	0,17	0,01	0,10	0,18

Tabelle 143 Prognose der anteiligen Technologieausbreitung der Zusatzerzeuger [eigene Darstellung]

Für die Lüftungsanlagen kommt die eigene Schätzung durchaus auf die Werte anderer Studien, z. B. des Zielerreichungsszenario von IWU 2013 [62] – dort wird von 20 % ausgegangen.

Die Durchdringung des Marktes mit Lüftungsanlagen vermuten Mellwig et al. [128] im Jahr 2050 je nach Szenario bei ca. 14 bis ca. 37 %. Die ebenfalls unter IFEU-Beteiligung bearbeitete Studie von Pehnt et al. [124] geht in allen Szenarien von 50 bis 75 % aus. Die genannten Werte setzen eine deutlich höhere Umsetzungsrate voraus als die Praxis der letzten Jahrzehnte dies zeigte. Die Gutachter halten höhere Werte als maximal 30 % für unrealistisch.

Eine große Diskrepanz zwischen dem vorliegenden Gutachten und anderen Szenarien besteht in der Annahme der Verbreitung von Solarthermie. In der Studie von Pehnt et al. [124] liegen die Ausbauquoten 2050 zwischen 30 % („stromlastige“ Szenarien) und 80 % („wärmelastige“ Szenarien). Mellwig et al. [128] nehmen je nach Szenario an, dass zwischen 11 % und knapp 75 % aller Gebäude mit einer Solarthermieanlage ausgestattet werden (Photovoltaik ist in der genannten Studie explizit als Gebäudetechnik nicht enthalten). Der geringste Wert deckt sich etwa mit der Vermutung des vorliegenden Gutachtens. Auch Hecking et al. eröffnen eine sehr große Spannbreite, z. B. für EZFH unter das Jahr 2050: die Solarisierung liegt zwischen ca. 7 und 50 % (je nach Szenario) [157].

Diefenbach et al. sehen bereits 2013 in ihrem Kurzgutachten zum Sanierungsfahrplan in der PV eine Alternative für Solarthermie. Sie empfehlen für 2020 und Folgejahre die jährliche Installation von Solarthermie in 2 bis 2,5 % der Gebäude und merken an, dass auch Photovoltaik ersatzweise in Betracht kommen kann [151]. Die Autoren des vorliegenden Gutachtens sehen die Haupt- und Ersatzlösung aus heutiger Sicht in ihrer Bedeutung umgekehrt und gehen selbst von einer jährlichen Zuwachsrate von 1,8 %/a der Photovoltaik aus.

4.2.6 *Baupreise und -finanzierungszins*

Aus der zeitlichen und anteiligen Technologieausbreitung bzw. Umsetzung baulicher Sanierungen kann ein Mengengerüst für den Gesamtbestand ermittelt werden. Es ist die Basis der Kostenschätzung. Daneben sind Festlegungen zur Preisentwicklung der Bauprodukte sowie der Finanzierung zu treffen. Beide Größen sind kaum prognostizierbar, zumal von Zeithorizonten bis 2050 ausgegangen wird.

Investitions- und Wartungskosten

Für die Betrachtungen in der Makroebene gelten die in Anhang 5.8.2 festgesetzten Kostenfunktionen. Sie werden identisch angenommen wie bei der Mikrobetrachtung.

Es ist prinzipiell von allgemeinen Kostensteigerungen für Bauprodukte auszugehen, wie in Anhang 5.8.1 für „Baupreisindex“ und „Baukostenindex“ angezeigt. Allerdings wird im Rahmen dieses Gutachtens darauf verzichtet, diese explizit einzurechnen – dies gilt für alle Steigerungsraten (Kapital, Energie, Wartung). Es wird davon ausgegangen, dass die Steigerung näherungsweise mit der Inflation gleichläuft und entsprechend im Zuge einer Inflationsbereinigung entfällt.

Analoge Überlegungen gelten für die Wartungs- und Instandhaltungskosten. Die in Anhang 5.8.3 getroffenen Ansätze gelten gleichermaßen auch für die Makrountersuchung.

Lernkurven

Eine detaillierte Beschreibung, welche Einflüsse für eine Lernkurve gegeben sind, ist der Studie „100 % Wärme aus erneuerbaren Energien?“ von Pehnt et al. zu entnehmen [124]. Von Belang sind „Lernprozesse“ (steigende Ausführungsfertigkeiten auf der Baustelle, Skaleneffekte bei der Produktion der Industrieprodukte) und „Marktbedingungen“ (Margen, Rohstoffpreise, Kapazitätsentwicklungen). Die Datenlage ist als lückenhaft einzuschätzen [124]:

> *„Grundsätzlich wurde bei der Recherche nach historischen Kostendaten deutlich, dass nur vereinzelnd retrospektive Daten zur Kostenentwicklung vorliegen. Die angestrebten Zeitreihen zur Ermittlung der Kosten enthalten für alle Technologien erhebliche Lücken.“*

Bürger et al. fassen in ihrer Studie 2016 ebenfalls treffend zusammen [252]:

> *„Die Lernrate reflektiert die langfristige Entwicklung der Material- und Arbeitskosten für eine bestimmte Technik. Konkret gibt sie an, wie sich die spezifischen Kosten einer bestimmten Technik entwickeln, wenn sich das umgesetzte Volumen der betroffenen Technik verdoppelt. Lernrateneffekte resultieren dabei z. B. aus Mengen- oder Innovationseffekten. Mangels einer breiten empirischen Basis, die eine ausreichend lange Zeitreihe abdeckt, handelt es sich bei den in Tabelle […] dargestellten Werten um eigene Schätzwerte.“*

Für die in diesem Gutachten betrachteten Technologien und baulichen Sanierungsmaßnahmen werden keine zeitlichen Vergünstigungen – über Lernkurven – angenommen.

Dieser Ansatz findet sich auch z. B. in den Überlegungen von Pfnür und Müller [279]. Es erscheint den Gutachtern nicht gerechtfertigt, die Preise für Holzkessel, Solarthermie oder Dämmmaßnahmen nennenswert günstiger anzusetzen, als dies heute der Fall ist. Insbesondere da diese Baustoffe bzw. Technologien bereits sehr lange am Markt verfügbar sind und sich in den letzten 20 Jahren keine Kostendegression gezeigt hat.

Mellwig et al. [128] gehen aufgrund von Skaleneffekten für Dämmstoffe davon aus, dass diese ca. 2 bis 5 % günstiger werden zwischen 2020 und 2050. Staniaszek et al. vermuten die Degression für anspruchsvolle Sanierung der Gebäudehülle bei 15 bis 23 % im Zeitraum 2015 bis 2030 [280].

Sterchele et al. [68] gehen von einer Minderung der Kosten für Solarthermie zwischen 2020 und 2050 auf 56 % des heutigen Preises aus. Henning und Palzer betrachten den Sprung zwischen 2013 und 2050 und legen 40 % des Anfangspreises zugrunde [281]. Staniaszek et al. vermuten die Degression für Solarthermie bei 6 bis 9 % zwischen 2015 und 2030 [280]. Dies erscheint den Autoren des vorliegenden Gutachtens als nicht plausibel, da sich in den letzten 10 Jahren keine Änderung ergeben hat. Kah et al. gehen 2008 von den gleichen Kosten aus, die auch heute noch anzusetzen sind [282].

Im Falle der jüngeren Technologien, z. B. Wärmepumpen oder Photovoltaik, könnte eine Preisminderung gerechtfertigt werden.

Sterchele et al. [68] gehen von einer Minderung der Investitionskosten bei Wärmepumpen in der Größenordnung von 30 % zwischen 2020 und 2050 aus, für Photovoltaik liegt sie bei knapp 40 % im genannten Zeitraum. Henning und Palzer prognostizieren zwischen 2013 und 2050 eine Kostenersparnis von 55 % bei Photovoltaik und ca. 20 % bei Wärmepumpen [281]. Mellwig et al. [128] sehen für Wärmepumpen zwischen 2020 und 2050 eine Kostensenkung von ca. 15 bis 25 % aufgrund von Skaleneffekten. Staniaszek et al. vermuten die Degression für Photovoltaik bei 25 bis 38 % und bei Wärmepumpen bei 6 bis 9 % im Zeitraum 2015 und 2030 [280].

Die Gutachter verzichten für diese Technologien auf einen Degressionsansatz. Zum einen, weil eine Schätzung insbesondere für die Periode 2035 - 2050 aus heutiger Sicht extrem unsicher ist, zum anderen aufgrund des allgemeinen marktwirtschaftlichen Gedankens, dass mit steigender Nachfrage die Preise steigen.

Zeigt die künftige Marktbeobachtung, dass diese Technologien langfristig tatsächlich nennenswert günstiger werden – was nachfragebedingt nicht unbedingt eintritt – kann dies ausgeglichen bzw. nachgesteuert werden durch:

- zuerst die Minderung oder den Verzicht auf Fördermittel,
- danach durch die verpflichtende Vorgabe, diese Technologien einzusetzen (GEG o. ä.).

Finanzierungszinsen

Auch in der Makroperspektive wird der für die Mikroperspektive gewählte Zins von 2 %/a (Erläuterungen siehe Anhang 5.9.2) gewählt. Den Gutachtern ist bewusst, dass insbesondere der Prognosezeitraum 2035 - 2050 auch von deutlich anderen Randdaten geprägt sein kann. Es wäre in diesem Fall eine Neubewertung vorzunehmen.

Eine Analyse zum Einfluss des Zinses auf die Ergebnisse von Wirtschaftlichkeitsbewertungen ist in der Metastudie von Erdmann et al. zu finden [283]. Auch Offermann et al. zeigen in ihrer Makroanalyse den Unterschied für beide Zinssätze 0 und 3 %/a [284].

Kapazitäten im Baugewerbe

Die Gutachter sehen bei den getroffenen Annahmen für die bauliche Sanierung keine Engpässe bei den Kapazitäten im Baugewerbe. Die Maßnahmen sind an den Sanierungszyklus gekoppelt. Die Maßnahmen selbst zielen verstärkt auf eine größeren Sanierungstiefe ab (siehe Anhang 5.11.2, besserer U-Wert, also größere Dämmdicke), als von einer größeren Sanierungsrate (siehe Anhang 5.11.1, Fallzahlen pro Jahr).

Die anlagentechnische Sanierung geht ebenfalls von einer an den Sanierungszyklus gekoppelten Umsetzung aus. Daraus ergibt sich keine nennenswert notwendige höhere Ausführungsgeschwindigkeit. In der Periode 2020 - 2035 werden 730.000 Erzeugersanierungen pro Jahr berechnet (einschließlich ca. 30.000 Fernwärmeanschlüsse pro Jahr). Das bedeutet ca. 700.000 Erzeugertausche pro Jahr – etwa so viele wie heute.

Es wird allerdings eine Umstellung der bisherigen Praxis von 1:1 Kesseltauschen auf Wärmepumpen notwendig.

Dies erfordert einerseits eine ausreichende Qualifikation der Fachunternehmen, incl. Systemen zur Qualitätssicherung und andererseits auch Kapazitäten zur Erschließung von Erdreich als Wärmequelle. Für die Mehrfamilienhäuser wird ein professioneller Einstieg in die „kalte Nahwärme“ benötigt. Diese Aufgabe könnte Teil der Umstrukturierung von Energieversorgungsunternehmen sein. Auch über Contractinganbieter ließe sich dieser Umstieg generieren (als Kompensationsgeschäft für wegfallende Öl- und Gasmärkte).

Eine tatsächlich nennenswerte zusätzliche Kapazität im Baugewerbe stellen die zu installierenden PV-Anlagen dar. In der ersten Periode 2020 - 2035 sind – wenn jedes Gebäude einfach gezählt wird und nicht mehrere Anlagen erhält – ca. 640.000 Anlagen pro Jahr neu zu installieren. Diese Werte liegen um etwa den Faktor 4 über den Werten ‚die sich aus der aktuellen Hochrechnung der Bundesnetzagentur für 2020 zu erwarten sind [285] (registriert wurden ca. 76.000 Anlagen im ersten Halbjahr 2020 ohne Freiflächenanlagen).

Beschäftigungseffekte

Auf die Herleitung von Beschäftigungseffekten wird im Rahmen dieses Gutachtens verzichtet. Eine Abschätzung lasst sich anhand der Ausführungen in den KfW-Monitoring-Berichten, z. B. [15], vornehmen. Eine Studie des DIW widmet sich dem Thema ausführlicher [286]:

> *„Entscheidend für die Einkommenssteigerungen ist, dass in Verbindung mit den Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zusätzliche volkwirtschaftliche Produktionsfaktoren mobilisiert werden können, um zusätzlichen inländische Wertschöpfung zu erstellen. Dies kann durch eine Aktivierung zusätzlicher Arbeitskräfte oder durch eine Beschleunigung des Produktivitätsfortschritts […] geschehen. Zusätzliche Arbeitskräfte können aus der Arbeitslosigkeit oder dem Potential der Nicht-Erwerbspersonen kommen. Wenn angesichts struktureller Diskrepanzen von Arbeitskräfteangebot und -nachfrage Lohnsteigerungen drohen, kann dies Unternehmen veranlassen, Potentiale für Produktivitätssteigerungen verstärkt zu nutzen. Längerfristig kann ein simultaner Anstieg von Produktion und Produktivität auch durch eine bei höherem Wachstum beschleunigte Diffusion von Innovationen erklärt werden.“*

4.2.7 Energie- und CO_2-Preise

Nachfolgende Abschätzungen der Entwicklung von Endenergieverbräuchen und damit verbundenen CO_2-Emissionen orientieren sich an den aktuellen, im Juli 2020 vom DIW in einer Studie zum „European Green Deal“ [42] veröffentlichten Prognosen.

Es wird für das Jahr 2035 ein zusätzlicher Emissionspreis von 180 €/Tonne und für das Jahr 2050 von maximal 640 €/Tonne gemäß den Vorschlägen des UBA [21] zugrunde gelegt und unter Anpassungen der Gutachter in den zukünftigen Energiepreisen in Tabelle 144 berücksichtigt.

Die größten Unsicherheiten – in den vorliegenden Studien ebenso wie im Gutachten – bestehen in der Abschätzung der Energiepreisentwicklung für Fernwärme und Strom. Ausschlaggebend für die zukünftige Entwicklung der Preise für elektrische Energie sind die politischen Entscheidungen im Herbst 2020 zum zukünftigen EEG sowie zum Umbau der bzw. zu den geplanten Subventionen auch für die regional sehr unterschiedlichen Netznutzungsentgelte im Stromsektor [158].

Vorschläge finden sich in einer Kurzstudie der DENA [153] und in Gäthke [154] sowie in einer Veröffentlichung der Verbraucherzentrale Bundesverband zur Netzentgeltreform [155].

System	Energiepreis, in [€/kWh]		
	2020	2035	2050
Erdgas	0,06	0,10	0,18
Heizöl	0,06	0,12	0,24
Holz	0,05	0,06	0,07
Fernwärme	0,09	0,15	0,20
Strom (Bezug, Normaltarif)	0,31	0,18	0,24
Strom (Bezug, Wärmepumpe)	0,22	0,18	0,18
Strom (Einspeisung)	0,09	0,07	0,05

Tabelle 144 Prognose der brennwertbezogenen Energiepreise [eigene Darstellung]

Bekräftigt werden diese Abschätzungen zusammen mit den Prognosen dieses Gutachtens auch durch die Vorschläge von Gerhardt in der AGORA-Studie zur Wärmewende 2030 [156] sowie auch von Sterchele et al. in der Fraunhofer ISE-Studie [68]. Hingegen vertritt die DENA eine technologieoffene Prognose [157] [67] mit einem Technologiemix bei überwiegendem Bezug synthetische erzeugter Brennstoffe durch Import. In diesem Fall ergeben sich deutlich andere Energiepreise.

4.2.8 Emissions- und Primärenergiefaktoren der Energieträger

Die Abschätzung der Emissions- und Primärenergie-Faktoren orientiert sich an den aktuellen Daten des UBA [14], an der Kurzstudie von Fritsche für die HEA [159] sowie an den Makro-Prognosen des DIW von 07/2020 [42]. Weiterhin werden eigene Vorschläge der Ostfalia von Schünemann et al. aus dem Jahre 2014 aufgegriffen [160], um den Umstieg vom Primärenergiebezug auf eine CO_2-Bewertung zu begründen.

Die größten Unsicherheiten bestehen auch hier in der Abschätzung der Ausbaugeschwindigkeit erneuerbaren Stroms, siehe vorheriges Anhang 4.2.7. Eine weitgehende Umstellung auf erneuerbare Stromerzeugung aus PV und Windkraft sowie ein beschleunigter Ausbau von Elektrowärmepumpen anstelle konventioneller Verbrennungstechniken wird in den hier vorliegenden Gutachten vorausgesetzt.

Energieträger		Emissionsfaktor, brennwertbezogen, in [g/kWh]			Primärenergiefaktoren, nicht erneuerbarer Anteil		
		2020	2035	2050	2020	2035	2050
Fossile Brennstoffe	Erdgas	208	190	110	1,1	1,00	0,60
	Heizöl	292	275	160	1,1	1,05	0,75
	Steinkohle	429	429	429	1,1	1,1	1,1
	Braunkohle	421	421	421	1,2	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Holz	15	15	15	0,2	0,10	0,00
Strom	allgemeiner Strommix	444	250	50	1,8	1,00	0,20
Fernwärme	allgemeiner Fernwärmemix	243	150	60	0,8	0,50	0,20
Umweltwärme, Solarthermie, Photovoltaik		0	0	0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 145 Prognose der Emissions- und Primärenergiefaktoren [eigene Darstellung]

Aktuell wird diese Sichtweise auch durch Lüking und Karg in Sonnenenergie „Wärme ohne Feuer“ nachvollziehbar dargestellt [161]. Dies entspricht der gleichen nachvollziehbaren Argumentation wie von Kuck [132] (siehe auch Anhang 3.3.6). Auch Schulze-Darup fordert einen bevorzugten Elektropfad [90].

Demgegenüber setzt die DENA auf technologieoffenen Lösungen mit erhöhtem Import synthetisch erzeugter Brennstoffe PtX [67].

4.3 Hauptszenario: Ergebnisse für die Gesamtbestandsentwicklung

Anhand der Annahmen zur Entwicklung der Gebäude durch Sanierung und Technologiewechsel sowie Neubau und Abriss aus Anhang 4.2 kann eine Energiebilanzprognose – hier „Hauptszenario“ genannt – erfolgen. Dabei wird zunächst die Gesamtbestandsentwicklung einschließlich aller Neubauten betrachtet, nicht nur die Sanierungsobjekte, um eine Aussage zum Erreichen der Klimaziele geben zu können.

Aus der Endenergie – als wichtigster Eingangsgröße – ergeben sich die Primärenergie und die Emissionen sowie die Energiekosten. Diese werden nachfolgend vorgestellt und erläutert. Dabei sind die drei Zeitpunkte: 2020, 2035 und 2050 die Eckwerte der Betrachtung. Die Zwischenwerte werden linear interpoliert.

Das Kapitel wird abgeschlossen mit Detailbetrachtungen zur Energiebilanzierung sowie einer gesonderten Betrachtung der Qualitätssicherung.

4.3.1 Endenergie

Endenergieeinsatz nach Anwendungen

Der Endenergieaufwand für alle Anwendungen – Heizung, Trinkwarmwasser, Haushaltsstrom – sinkt in diesem Szenario von 757 TWh/a im Jahr 2020 auf 322 TWh/a im Jahr 2050. Dabei bleibt der Haushaltsstrom nahezu konstant. Die Aufwendungen für Heizung sinken auf 30 % des Ausgangsniveaus, die Trinkwarmwasseraufwendungen halbieren sich. Abbildung 174 zeigt die Zusammenhänge.

Es ist anzumerken, dass die Grafik die gesamte Endenergie zeigt, incl. der gebäudenah aus Solarthermie und Photovoltaik regenerativ erzeugten Mengen. Die sichtbare, erzielte Verringerung ergibt sich aus einer Verringerung des Bedarfs an Heizwärme (Dämmung, Fenstertausch) sowie der Verwendung effizienterer Erzeuger (größtenteils Wärmepumpen).

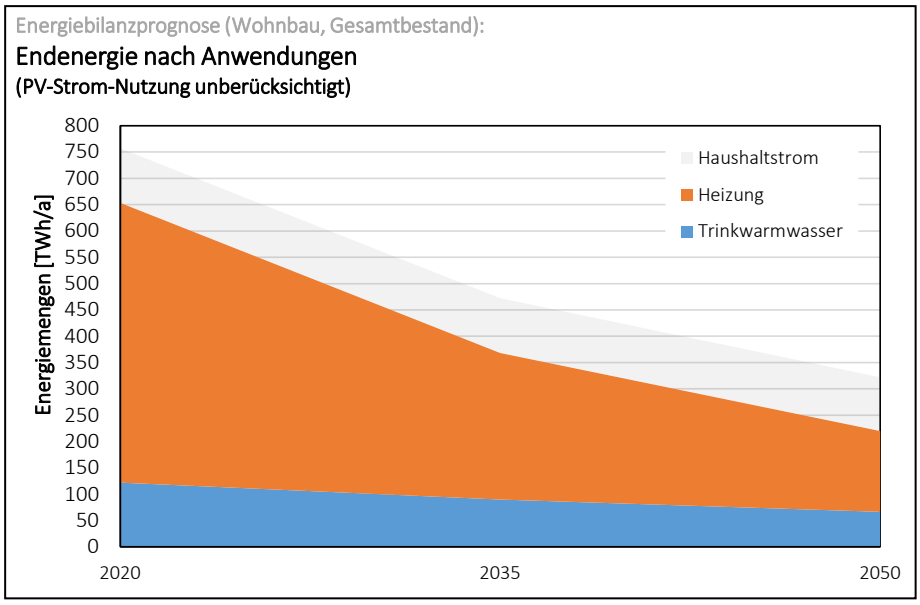


Abbildung 174 Prognose Gesamtbestand – Endenergie nach Anwendung [eigene Darstellung]

Endenergie nach Erzeugern und Energieträgern

Werden die Endenergien nach Erzeugern aufgeschlüsselt, ergibt sich die Darstellung nach Abbildung 175. Der Einsatz der Solarthermie ist nun separat erkennbar (er ist allerdings gering). Der Einsatz von gebäudenah erzeugtem Strom allerdings noch nicht – dargestellt ist der Strom zunächst unabhängig von seiner Herkunft.

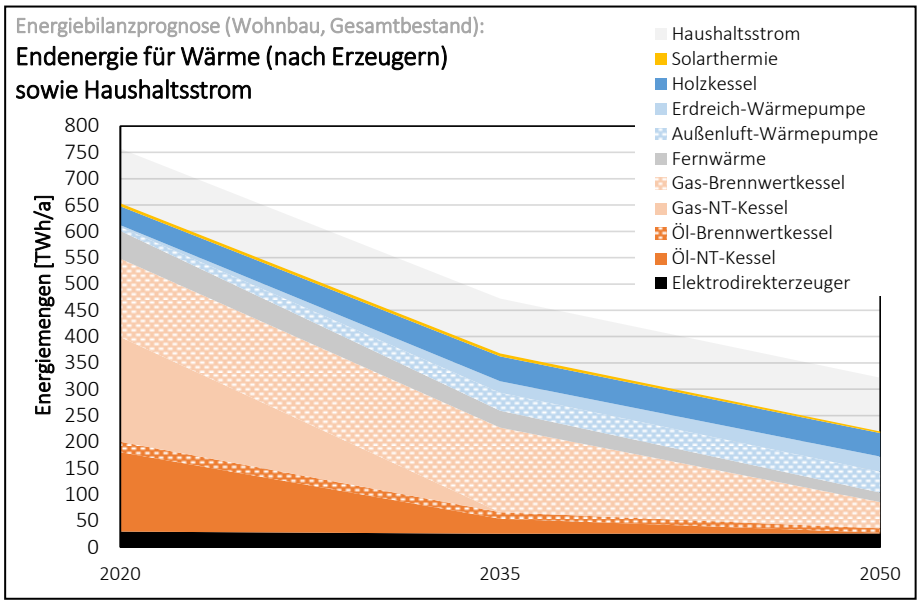


Abbildung 175 Prognose Gesamtbestand – Endenergie nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung]

Der Einsatz von Niedertemperaturkesseln mindert sich stark. Bis auf Restbestände von Heizölkesseln, sind diese Erzeuger bereits größtenteils 2035 aus dem Markt verschwunden. Die Brennwertkessel sind dagegen noch im Markt verfügbar. Ihr Endenergieeinsatz ist zunächst konstant, sinkt erst nach 2035 auf ein Drittel des heutigen Wertes.

Der Energieeinsatz in Holzkessel steigt zwischen heute und 2050 in diesem Szenario um ca. 25 % an. Das Biomassebudget ist damit noch gut erfüllt.

Der klassische Fernwärmeeinsatz sinkt auf etwa ein Drittel des heutigen Wertes. Einerseits, weil „kalte Fernwärme“ zum Einsatz kommt (dann wird das Gebäude unter „Erdreichwärmepumpe“ geführt), andererseits, weil die zu versorgenden Gebäude baulich verbessert werden und somit ihr Bedarf sinkt.

Die Elektrodirekterzeugung ist fast konstant. Es wird zwar Elektroheizung zurückgebaut, jedoch im gleichen Zuge die direkt elektrische Warmwassererzeugung ausgebaut (in den Gebäuden mit ungünstigen Verteilnetzen).

Den größten Zuwachs erfahren Wärmepumpen (Faktor 5 bis 8 des heutigen Endenergieeinsatzes). Einerseits als gebäudezentrale Geräte mit lokaler Erdwärme und Außenluftnutzung, andererseits – wie geschildert – als Teil eines Systems aus „kalter Fernwärme“.

Abbildung 176 fasst die Energieträger zusammen. Für Heizöl wird angenommen, dass es bis 2050 fast vollständig aus dem Markt verdrängt wird – es bleiben noch 6 % des heutigen Aufwandes erhalten. Der Erdgaseinsatz sinkt entsprechend der Annahmen auf 1/7 des heutigen Wertes.

Wärmepumpenstrom und der Strom der Elektrodirekterzeugung werden zusammengefasst. Seine Menge verdoppelt sich unter den getroffenen Annahmen bis 2035 und steigt auf schließlich das 2,35-fache des heutigen Wertes an. Der Haushaltsstrom wird allerdings weiterhin separat geführt, damit die Auswirkungen der energetischen Gebäudesanierung sowie des Technologiewechsels besser sichtbar sind.

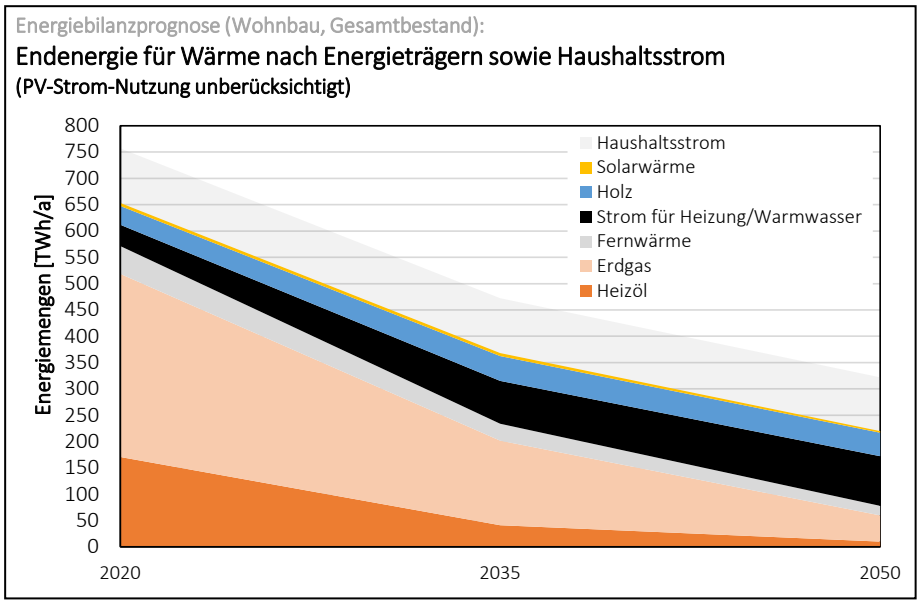


Abbildung 176 Prognose Gesamtbestand – Endenergie nach Energieträgern [eigene Darstellung]

Die vorherigen Grafiken zeigten noch nicht umfänglich, welche elektrischen Energiemengen durch PV-Anlagen und welche Wärmemengen durch Solarthermie gebäudenah erzeugt und verbraucht werden und demzufolge nicht eingekauft werden. Mit dieser Betrachtung wird der Blick auf die Endenergie abgeschlossen.

Endenergie unter Einbezug der Eigenerzeugung

GebäuDENAhe wird Solarwärme nutzbar gemacht, aber auch Photovoltaikstrom. Während erstere Menge komplett aufgebraucht wird bzw. nicht in Netze zurückgespeist, erfolgt die Einspeisung aber zu hohen Anteilen bei der Photovoltaik. Abbildung 177 zeigt die betreffenden Mengen.

Da die Gutachter die Photovoltaik als aussichtsreicher ansehen – und die Dachflächen begrenzt sind – ist das Potential der Solarthermie entsprechend begrenzt. Die erzeugte Menge Solarwärme wird zugunsten der Photovoltaik bis 2050 halbiert.

Die insgesamt gebäudenah erzeugte Energiemenge aus Photovoltaik steigt von 20 auf 130 TWh/a in diesem Szenario an (Faktor 6,5). Allerdings kann – solange die lokale Stromspeicherung über Batterien nicht abschließend technisch und ökologisch ausgereift ist – dieser Strom vor Ort nur anteilig verbraucht werden. Mit steigender Durchdringung der Wärmepumpentechnologie steigt die Selbstnutzung von 10 % (heute) auf knapp 40 % (2050).

Über den Gesamtzeitraum betrachtet, kann von den insgesamt erzeugten 2235 TWh PV-Strom dann immerhin ein prognostizierter Anteil von 774 TWh (ca. ⅓) gebäudenah genutzt werden, die restliche Menge von 1461 TWh (ca. ⅔) wird ins Netz zurückgespeist. Im Sinne des vorliegenden Gutachtens wird diese Energiemenge dem Gebäudesektor nicht gutgeschrieben. Sie verbessert aber den „Strommix“ der Energiewirtschaft.

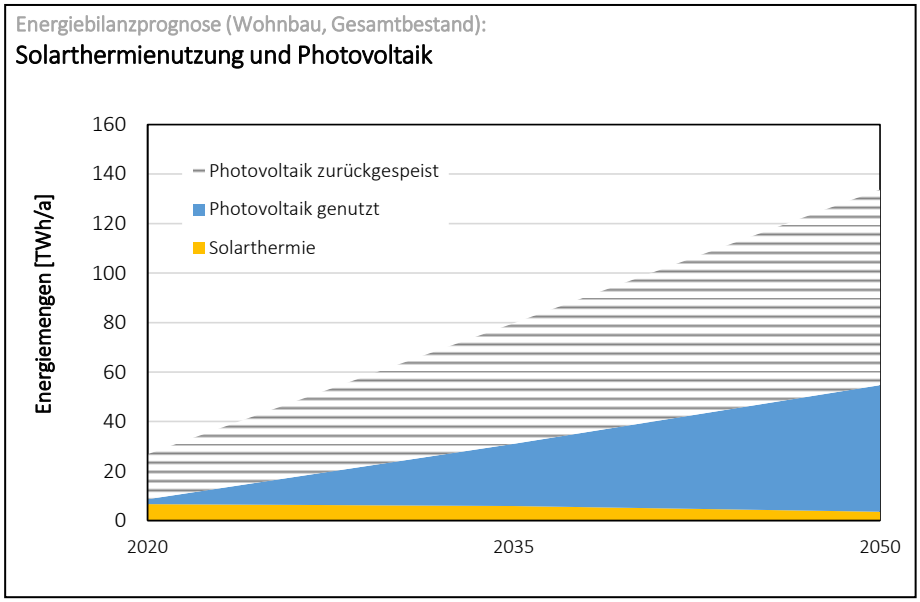


Abbildung 177 Prognose Gesamtbestand – GebäuDENAh erzeugte Endenergie [eigene Darstellung]

Die Nutzung von Solarthermie und Photovoltaikstrom vermindert den notwendigen Bezug von Energieträgern entsprechend, siehe Abbildung 178. (Informativ ist auch der überschüssige Photovoltaikstrom gestrichelt eingezeichnet, um die Größenordnung zu verdeutlichen).

Es ergeben sich zahlenmäßig folgende Verhältnisse: heute wird der Gesamtbedarf von 757 TWh/a anteilig zu 99 % aus Energieeinkäufen gedeckt (749 TWh/a). Im Jahr 2035 ergibt sich aus der getroffenen Prognose bereits eine Eigenversorgung zu 6 % (442 TWh/a werden fremdbezogen bei einem Gesamtbedarf von 472 TWh/a). Am Ende des Prognosezeitraumes 2050 wird von einem Gesamtbedarf von 322 TWh/a bereits eine Selbstversorgung von 17 % erreicht, d. h. nur noch 267 TWh/a aus dem Netz bezogen.

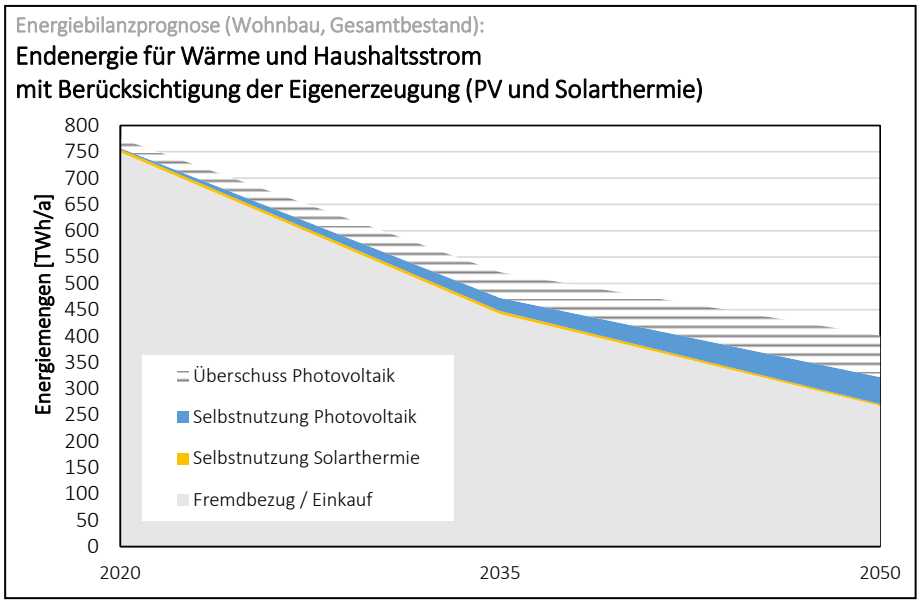


Abbildung 178 Prognose Gesamtbestand – Endenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

Die fremdbezogene Energiemenge des Jahres 2050 liegt bei nur 36 % des heutigen Wertes. Dabei ist zu bedenken, dass auch alle Neubauten sowie die Wohnflächenvergrößerung in diesem Wert enthalten sind.

4.3.2 *Energiekosten*

Aus den Energiemengen können Energiekosten bestimmt werden. Abbildung 179 zeigt die Prognoseverläufe dieses Szenarios. Ausgehend von heute 81,2 Mrd. €/a (davon 49,2 Mrd. für Heizung und Trinkwarmwasser) sinken die Werte bis 2035 zunächst (auf ¾ der heutigen Kosten). Es werden dann 62,1 Mrd. €/a (davon 43,3 Mrd. H+TWW) erreicht, weil die Art der Energieträgerbepreisung verändert wird und die Einsparungen ihre Wirkung zeigen. Danach bleiben die Kosten bis 2050 fast konstant – und erreichen zum Schluss 61,0 Mrd. €/a (davon 36,6 Mrd. H+TWW). Das nicht mehr weitere Absinken ist dadurch begründet, dass mit Emissionsbepreisungen aller Energieträger Umweltfolgekosten eingepreist werden, vgl. Anhang 4.2.7.

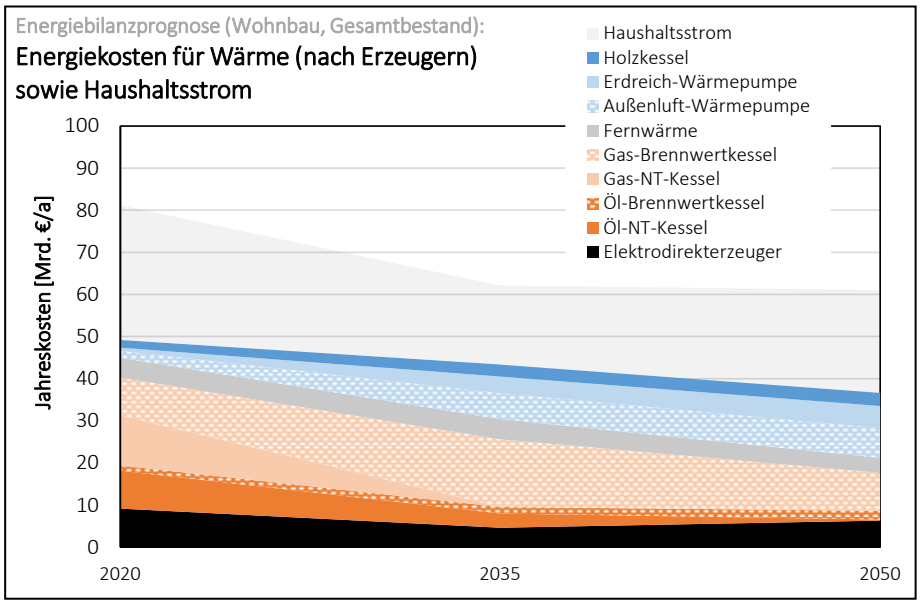


Abbildung 179 Prognose Gesamtbestand – Energiekosten nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung]

Abbildung 180 fasst die Prognosen sortiert nach Energieträger zusammen. Es wirken bei den fossilen Energieträgern gegenläufige Effekte: die als Endenergie umgesetzten Mengen sinken, aber die Preise steigen. Besonders deutlich ist dies bei Heizöl festzustellen. Der Verbrauch beträgt 2050 zwar nur noch 6 % des heutigen Wertes (siehe Anhang 4.3.1), jedoch fallen immer noch 23 % der heutigen Kosten an. Die Erdgaskosten sinken auf 43 % der heutigen Werte (Endenergie: 14 %).

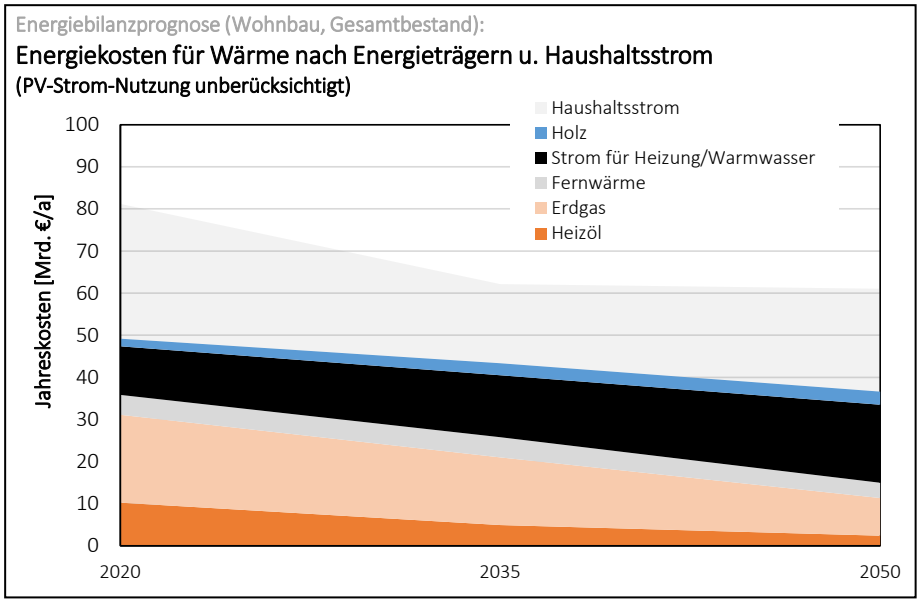


Abbildung 180 Prognose Gesamtbestand – Energiekosten nach Energieträgern [eigene Darstellung]

Die Kosten für Strom hingegen sinken aufgrund der angenommenen Preisentlastung dieses Energieträgers deutlich. Der Preiseffekt ist am Haushaltsstrom gut erkennbar, dessen Menge sich kaum ändert. Die Preisreduktion führt auch dazu, dass trotz massiven Wärmepumpenausbaus, am Ende nur etwa 60 % höhere Stromkosten für Heizung und Warmwasser festzustellen sind als heute.

Energiekosten unter Einbezug der Eigenerzeugung

Wird der Kostenvorteil der Eigenstromerzeugung bewertet, ergeben sich die Prognoseverläufe nach Abbildung 181. Es zeigen sich ähnliche Zusammenhänge wie bei der Endenergie. Allerdings: während aus der Rückspeisung des überschüssigen Stroms dem Gebäudesektor kein energetischer Vorteil zugeschrieben wurde, ist ein monetärer Vorteil sehr wohl ersichtlich.

Im Jahr 2020 ergäben sich Kosten von 81,2 Mrd. €/a für den Fremdbezug von Energie für Wärme und Haushaltsstrom – dies sind die oberhalb der Nulllinie eingetragenen Werte. Gleichzeitig können aus der Selbstnutzung von PV-Strom Kosten vermieden werden sowie aus der vergüteten Rückspeisung von PV-Überschüssen Erträge erzielt werden – dies sind die unterhalb der Nulllinie eingetragenen Werte der beiden Flächen (in Summe 2,9 Mrd. €/a). Damit liegen die resultierenden Nettoenergiekosten im Jahr 2020 bei 79,0 Mrd. €/a.

Die Verhältnisse verbessern sich im Zeitverlauf. Für das Jahr 2035 ergibt die Prognose eine Minderung der Bruttokosten von 62,1 Mrd. €/a, die sich ohne Photovoltaik einstellen würden – auf netto 54,2 Mrd. €/a. Im Jahr 2050 können mit insgesamt 16,2 Mrd. €/a an Einnahmen bzw. vermiedenen Ausgaben die Nettoenergiekosten auf 44,8 Mrd. €/a minimiert werden.

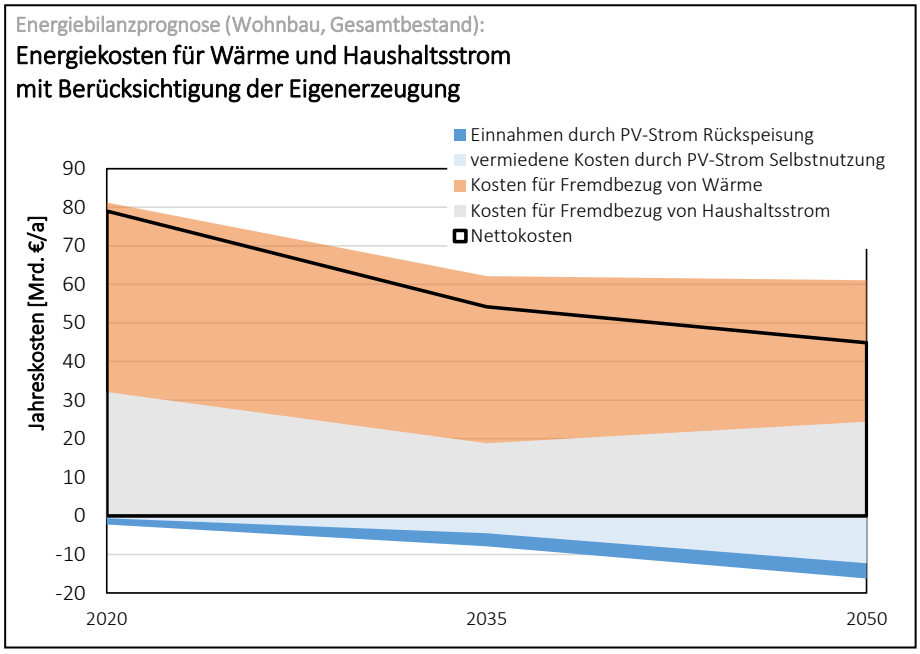


Abbildung 181 Prognose Gesamtbestand – Energiekosten mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

Die Vergütung des rückgespeisten PV-Strom beläuft sich insgesamt über die 30 Jahre auf 258 Mrd. €. Diese Zahl ist ein Anhaltswert für eventuell weitere Überlegungen zur Überarbeitung des EEG.

4.3.3 Primärenergie

Abbildung 182 zeigt die Prognosen zum Primärenergieeinsatz. Einerseits sinken die Endenergiemengen (siehe Anhang 4.3.1), andererseits ändert sich die Herkunft der Energieträger und damit verbessert sich für alle Energieträger der zugehörige Primärenergiefaktor (siehe Anhang 4.2.8). Dies betrifft auch die heute noch fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl, die künftig Mischprodukte von natürlich-fossilem Brennstoff und künstlich-regenerativem PtX sind.

Der Haushaltsstrom führt zu einem Restprimärenergieeinsatz von 11 % (bezogen auf den heutigen Wert). Die Mengen sinken kaum, die Verbesserung ergibt sich praktisch ausschließlich durch die zukünftig wachsende regenerative Stromproduktion.

Niedertemperaturkessel sind im „Hauptszenario“ praktisch komplett aus dem Markt verschwunden. Die sonstigen Gas- und Ölkessel sind Brennwertkessel, deren Beitrag zur Primärenergiebilanz sinkt, weil hauptsächlich die eingesetzten Stückzahlen abnehmen, aber andererseits sich in geringerem Ausmaß auch die Brennstoffe verbessern (und künftig teilweise PtX enthalten).

Der geringe Primärenergieeinsatz der Holzkessel heute ist begründet durch die fossilen Zusatzaufwendungen für die Holzaufbereitung und den Transport. Es wird davon ausgegangen, dass dies bis 2050 vollständig regenerativ möglich ist, so dass der Primärenergieaufwand dann null ist.

Die Primärenergie für Fernwärme sinkt auf 9 % des heutigen Wertes. Neben der Verringerung der Endenergiemenge wirkt auch hier eine günstigere Herkunft der Fernwärme.

Alle Stromanwendungen steigen im Umfang teils deutlich an, jedoch bei zunehmend günstigerem Primärenergiefaktor. Nach einem zwischenzeitlichen Anstieg der Primärenergie im Jahr 2035 nimmt sie dann wieder ab. Hier zeigt sich ein Ungleichhochlauf der Wärmepumpeninstallation und des Ausbaus der regenerativen Energieerzeugung.

Werden alle Energieträger betrachtet sinkt die Primärenergie von 878 TWh/a insgesamt (davon 692 TWh/a für Heizung und Trinkwarmwasser) auf 80 TWh/a (60 TWh/a für H & TWW), also auf 9 % des heutigen Niveaus ab.

Eine Drittelung ergibt sich in etwa aufgrund der Gebäudeverbesserung sowie des Technologiewechsels in den Gebäuden (vgl. Anhang Endenergie 4.3.1), grob die weitere Drittelung liegt in der veränderten Energieträgerbereitstellung (Strom und PtX).

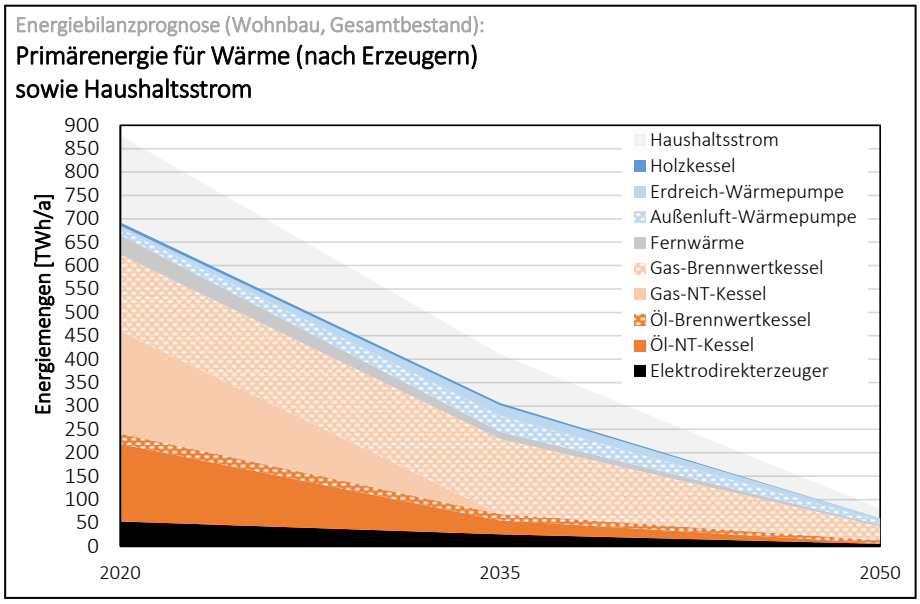


Abbildung 182 Prognose Gesamtbestand – Primärenergie nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung]

Abbildung 183 fasst die Ergebnisse energieträgerbezogen zusammen. Die Primärenergien für Erdgas und Heizöl (bzw. deren künftige Mischprodukte) sinken auf 8 % bzw. 4 % des heutigen Wertes. Der Strom für alle Anwendungen der Heizung und Trinkwassererwärmung sinkt auf 26 % des heutigen Wertes.

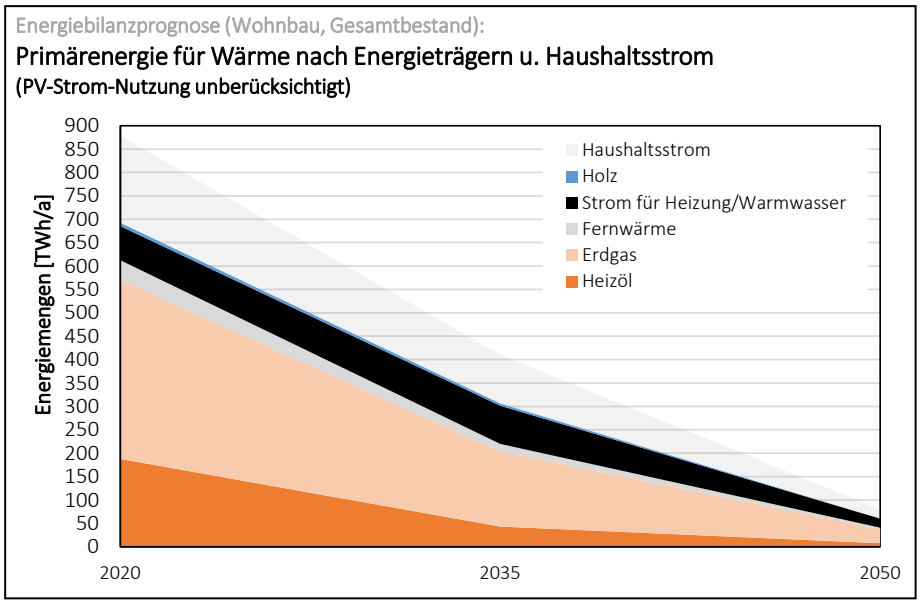


Abbildung 183 Prognose Gesamtbestand – Primärenergie nach Energieträgern [eigene Darstellung]

Primärenergie unter Einbezug der Eigenerzeugung

Selbst erzeugte Solarwärme mindert die zu produzierende Wärme der Erzeuger. Selbst erzeugter und genutzter Photovoltaikstrom reduziert entsprechend den Fremdbezug von Energie. Die Ergebnisse der Primärenergieminderung im Zeitverlauf zeigt Abbildung 184.

Aus heutiger Sicht werden unter 1 % der benötigten Primärenergie gebäudenah erzeugt und genutzt (3,6 TWh/a). Für das Jahr 2020 ergibt sich daher eine Primärenergie für Fremdbezug von 874,8 TWh/a. Am Ende des Prognosezeitraumes 2050 liegt die Selbstnutzung bereits bei 13 %, so dass anstelle von 80,2 TWh/a Primärenergie effektiv nur 69,6 TWh/a fremdbezogen werden.

Der überschüssige Photovoltaikstrom wird dem Gebäudesektor auf Ebene der Primärenergie nicht gutgeschrieben, daher taucht er in der Abbildung 184 nicht auf.

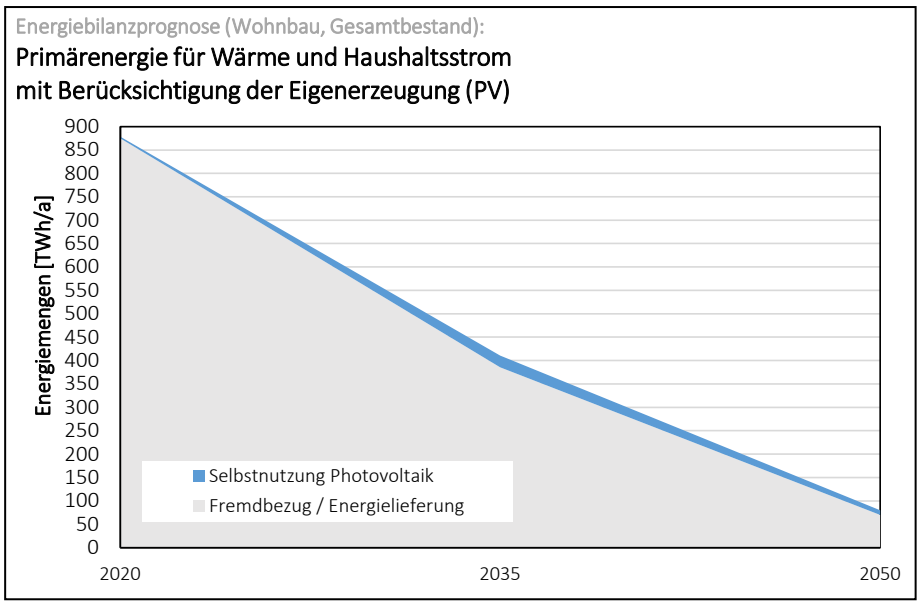


Abbildung 184 Prognose Gesamtbestand – Primärenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

4.3.4 Emissionen

Für die Emissionen gelten sehr ähnliche Tendenzen wie für die Primärenergie. Abbildung 185 zeigt die Auswertung aus Sicht der eingesetzten Erzeuger. Der Haushaltsstrom ist ebenfalls mit ausgewertet.

Die Emissionen aus der Sicht der NT-Kessel sinken auf fast null ab, da diese Technologien bis 2050 fast vollständig zurückgebaut sind. Die Emissionen der Brennwertkessel liegen bei ¼ bis ⅕ der heutigen Werte. Bei Heizöl ist ein weitreichender Rückbau maßgeblich, bei den Gaskesseln eine Mischung aus Rückbau und teilregenerativem Gaseinsatz (PtX-Gasgemische).

Die Emissionen für Fernwärme sinkt auf 9 % des heutigen Wertes. Neben der Verringerung der Endenergiemenge wirkt auch hier eine günstigere Herkunft der Fernwärme. Die Primärenergie und die Emissionen werden hier proportional verlaufend angenommen.

Für die Holzkessel steigen die Emissionen proportional zum Endenergieeinsatz an (plus ca. 24 %). Anders als bei der Primärenergievorkette ist keine Reduktion der sonstigen Schadstoffe der Holzverbrennung zu erwarten. Daher sinken die Emissionen nicht auf null.

Bei den Stromanwendungen laufen die beiden Trends gegeneinander: die immer regenerativer werdende Herkunft des Stroms und der zunehmende Umfang von Stromeinsatz im Gebäudesektor. Wie für die Primärenergie (Anhang 4.3.3) geschildert, ergibt sich ein zwischenzeitlicher Anstieg der Emissionen im Jahr 2035. Hier zeigt sich ein Ungleichhochlauf der Wärmepumpeninstallation und des Ausbaus der regenerativen Energieerzeugung.

Insgesamt vermindern sich die Emissionen auf etwa 9 % des heutigen Wertes in diesem Prognosemodell (unabhängig ob mit oder ohne Einbezug des Haushaltsstroms). Sie sinken von heute 199 Mt/a auf 19 Mt/a im Jahr 2050.

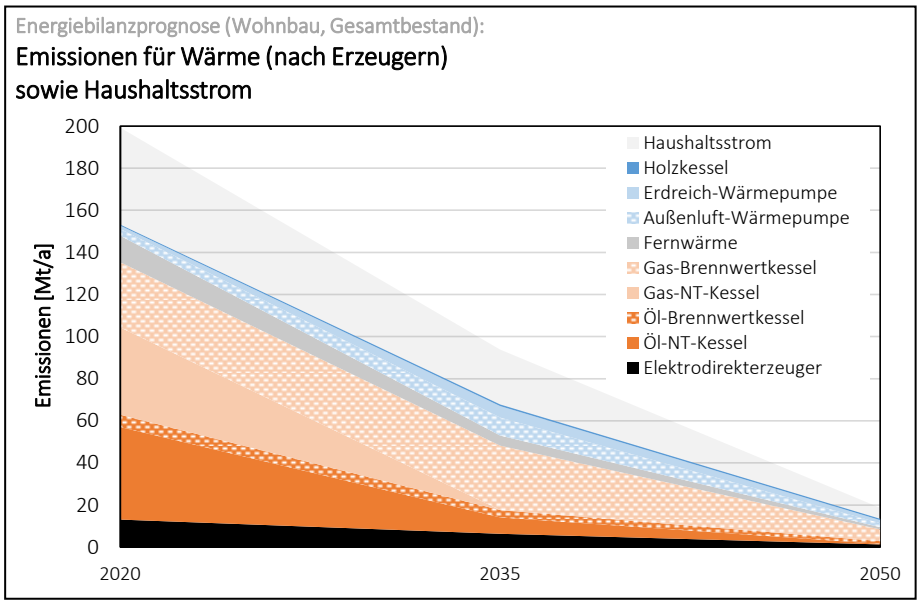


Abbildung 185 Prognose Gesamtbestand – Emissionen nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung]

Werden die Energieträger zusammengefasst, ergibt sich die vereinfachte Grafik nach Abbildung 186. Die Aussagen zum Haushaltsstrom, zur Fernwärme und zum Holz sind identisch. Für die Energieträger Erdgas und Heizöl zeigt sich bis 2050 eine Emissionsverminderung auf 8 % bzw. 3 % der heutigen Werte. Die Emissionen aufgrund des Stromeinsatzes für Heizung und Trinkwarmwasser (Wärmepumpen plus Elektrodirektanwendungen) vierteln sich in etwa.

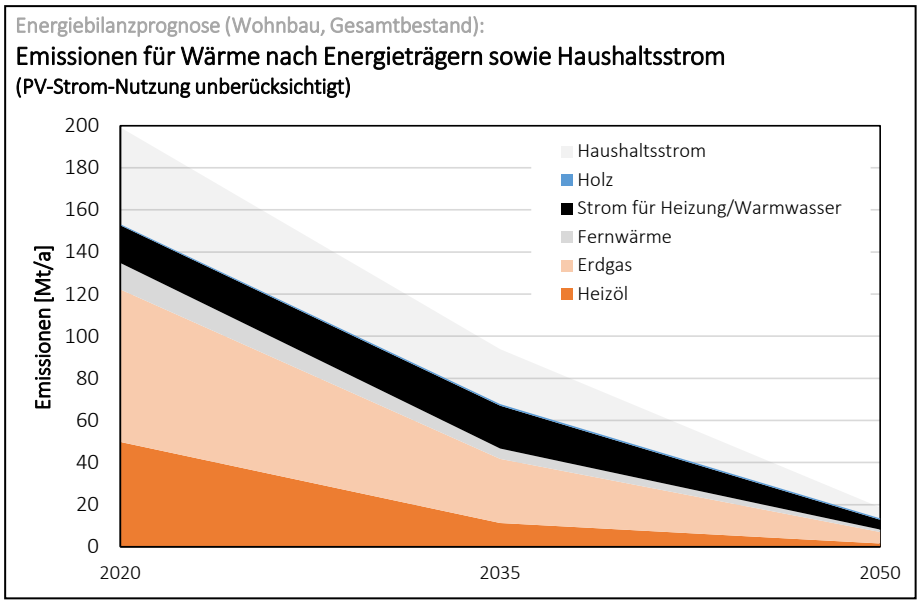


Abbildung 186 Prognose Gesamtbestand – Emissionen nach Energieträgern [eigene Darstellung]

Emissionen unter Einbezug der Eigenerzeugung

Selbst erzeugte Solarwärme mindert die zu produzierende Wärme der Erzeuger. Selbst erzeugter und genutzter Photovoltaikstrom reduziert entsprechend den Fremdbezug von Energie. Die Ergebnisse der Emissionsminderung unter Berücksichtigung dieser Effekte im Zeitverlauf zeigt Abbildung 187.

Aus heutiger Sicht (2020) werden etwa 1 % der Emissionen durch gebäudenah erzeugten und genutzten Strom vermieden (ca. 0,9 Mt/a). Für das Jahr 2020 ergibt sich daher eine Gesamtemission für Fremdbezug von 198 Mt/a (davon etwa ¼ Haushaltsstrom und ¾ Wärme). Am Ende des Prognosezeitraumes 2050 liegt die Emissionsvermeidung aufgrund von Eigenproduktion und Selbstnutzung bereits bei 23 %. Es werden nur noch etwa 16 Mt/a emittiert (ca. ⅓ Haushaltsstrom und ⅔ Wärme).

Das weitere Vermeidungspotential des überschüssigen Photovoltaikstrom wird dem Gebäudesektor auf Ebene der Emissionen nicht gutgeschrieben, daher taucht es in der Abbildung 187 nicht auf.

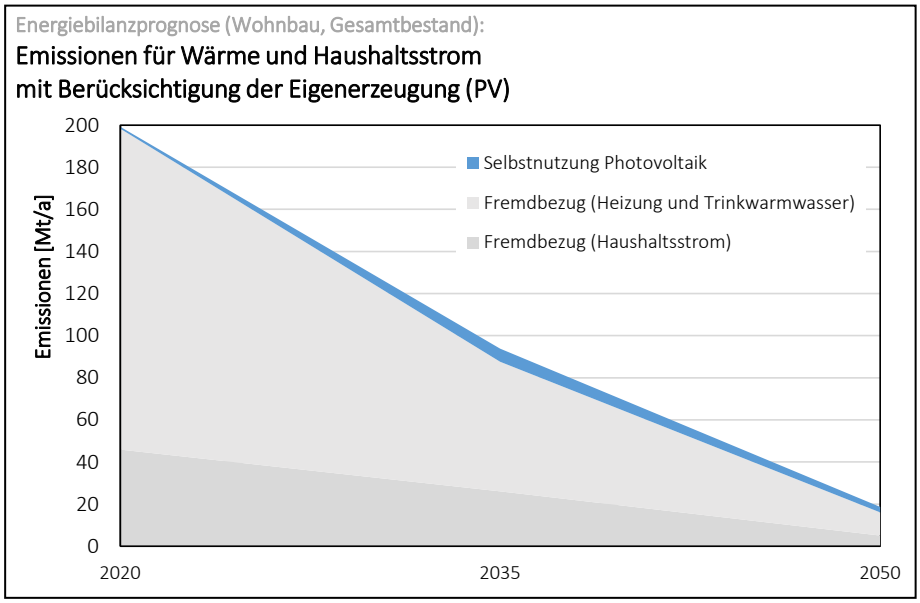


Abbildung 187 Prognose Gesamtbestand – Emissionen mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

4.3.5 Details der Energiebilanz

Ergänzend zu den Hauptergebnissen der Bilanzierung – Endenergie, Emissionen, Kosten – werden nachfolgend einzelne Detailaspekte der Bilanzierung besprochen.

Verluste und Gewinne

Werden separat nur die Verluste der Gebäudehülle betrachtet, ergibt sich die Grafik nach Abbildung 188. Sie sinken von insgesamt 581 TWh/a im Jahr 2020 auf 348 TWh/a im Jahr 2050. Die Summe aller baulichen Maßnahmen sowie in geringem Umfang auch der Einfluss von Lüftungsanlagen für Wärmerückgewinnung führt somit zu einer Minimierung der Verluste um 40 %.

Die Relation der Einzelverluste der Transmission (Blautöne in Abbildung 188) zueinander ist im gesamten Zeitraum sehr ähnlich – alle profitieren mit der Zeit von Sanierungsmaßnahmen und verringern sich.

Der Anteil der Lüftungswärmeverluste (grau in Abbildung 188) nimmt im Vergleich zur Transmission zu. Es dominiert die Fensterlüftung. Verbesserungen sind nur in geringem Maße sichtbar, weil die Ausbreitung von Lüftungsanlagen nur sehr langsam vermutet wird. Der Einfluss von Wärmebrücken (schwarz in Abbildung 188) nimmt zu, weil sich – trotz positiver Berücksichtigung der Qualitätssicherung – Wärmebrückeneffekte in gedämmten Gebäuden erhöhen.

Die größten Minderungen lassen sich bei den Außenwänden erzielen. Der Verlust halbiert sich. Bei den Kellerdecken und Bodenplatten ergibt sich 2050 ein zusammengefasster Verlust, der bei etwa ⅔ des heutigen Wertes liegt.

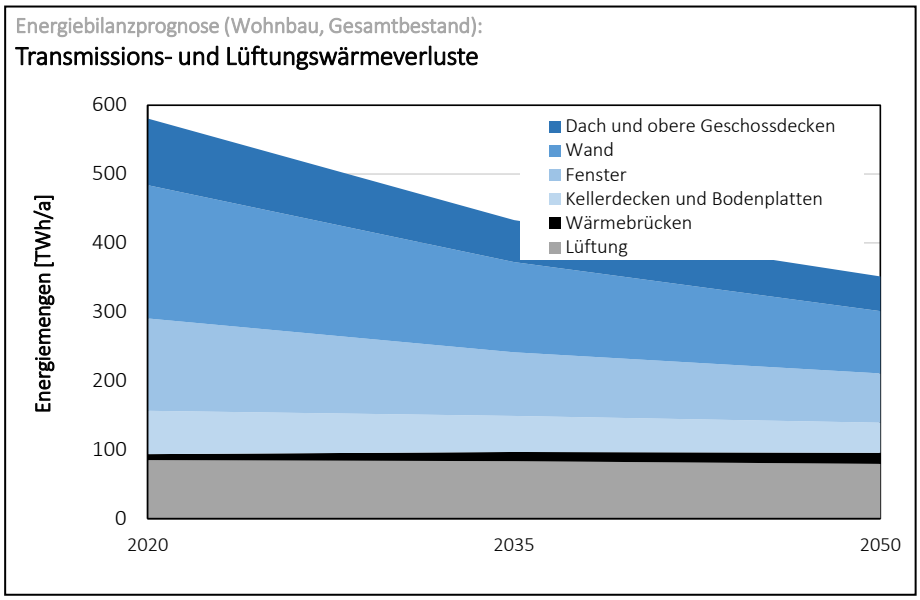


Abbildung 188 Prognose Gesamtbestand – Zusammensetzung der Transmissions- und Lüftungsverluste [eigene Darstellung]

Auf der anderen Seite profitieren die Gebäude von Wärmegewinnen. Abbildung 189 liefert eine Zusammenstellung der in diesem Gutachten bilanzierten Mengen (Hinweis: die Wärmeabgabe der im beheizten Bereich angeordneten Heizleitungsnetze wird nicht separat bilanziert, vgl. Anhang 3.4.4). Es wurde zum Vergleich ein identischer Maßstab wie für die Verluste gewählt.

Die Wärmegewinne verringern sich insgesamt um 16 % von 196 auf 165 TWh/a. Die inneren Gewinne aus Personenabwärme und Gerätenutzung gehen nur leicht zurück, was vor allem der steigenden Pro-Kopf-Wohnfläche zuzuschreiben ist (Extensivierung der Gerätenutzung).

Die Solargewinne aus Einstrahlung durch die Fenster sinkt etwas stärker (um 15 TWh/a im Gesamtzeitraum), weil vor allem bessere Fenster weniger Strahlung in das Gebäude passieren lassen. Das ist ungünstig, jedoch zum Vergleich: die Verluste durch die Fenster können im gleichen Zeitraum um 62 TWh/a verringert werden.

Die am stärksten sinkenden Gewinne sind die Abwärmemengen aus der Trinkwassererwärmung. Aufgrund von Dezentralisierung sehr ungünstiger Verteilnetze sowie den Abbau von Zirkulationsleitungen – wo immer möglich – halbieren sich diese Energiemengen in etwa.

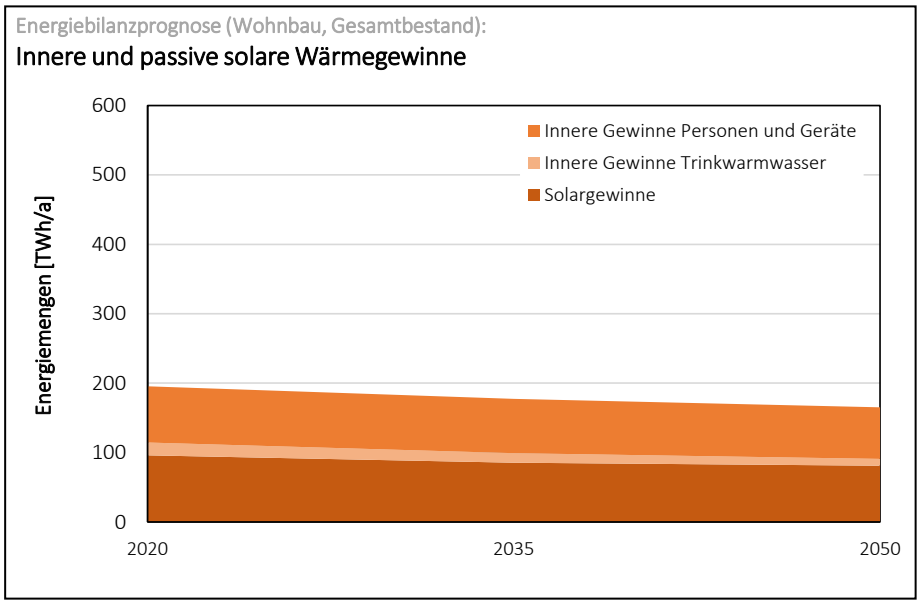


Abbildung 189 Prognose Gesamtbestand – Zusammensetzung der inneren und solaren Gewinne [eigene Darstellung]

Nutzwärmebedarf

Aus der Bilanz der Verluste und Gewinne der beheizten Räume ergibt sich der Heizwärmebedarf (orangene Fläche in Abbildung 190). Er kann von 2020 bis 2050 mehr als halbiert werden: von 385 TWh/a auf 183 TWh/a. Dagegen bleibt der Nutzwärmebedarf für Trinkwarmwasser (gezapftes Warmwasser) nahezu konstant. Er hängt unmittelbar mit der Bevölkerungsentwicklung zusammen. Insgesamt verschiebt sich der Fokus in Richtung „Trinkwarmwasser“, aber auch 2050 liegt der Fokus auf der Heizwärme – sofern der Gesamtbestand betrachtet wird.

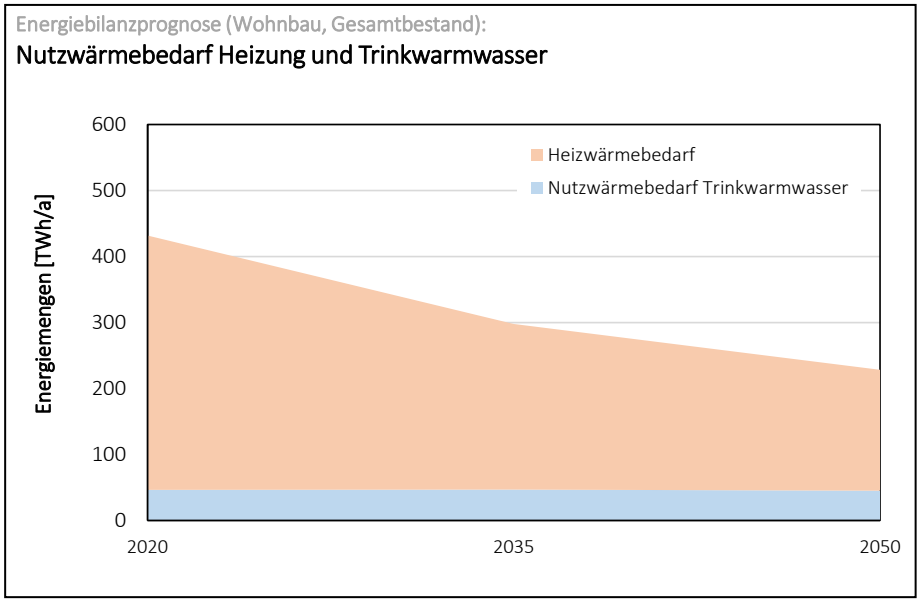


Abbildung 190 Prognose Gesamtbestand – Nutzwärmebedarf für Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung]

Wärmeabgabe der Erzeuger

Während in Anhang 4.3.1 der Fokus auf der Endenergie liegt – also den Energiemengen, die den Wärmeerzeugern zugeführt wird – wird nachfolgend die von diesem Erzeugern produzierte Wärme näher betrachtet. Abbildung 191 zeigt die anteilig von den einzelnen Erzeugergruppen abgegebenen Wärmemengen. In dieser Darstellung sind die Zuwachsraten der Wärmepumpen sehr viel deutlicher zu erkennen.

Während 2020 noch 75 % der gesamten Wärmeproduktion auf Gas- und Ölkessel entfällt, nimmt dieser Anteil bis 2050 auf 17 % ab. Umgekehrt prognostiziert dieses Gutachten einen Anstieg der Wärme aus Wärmepumpen von heute 4 % auf knapp 60 % in 30 Jahren.

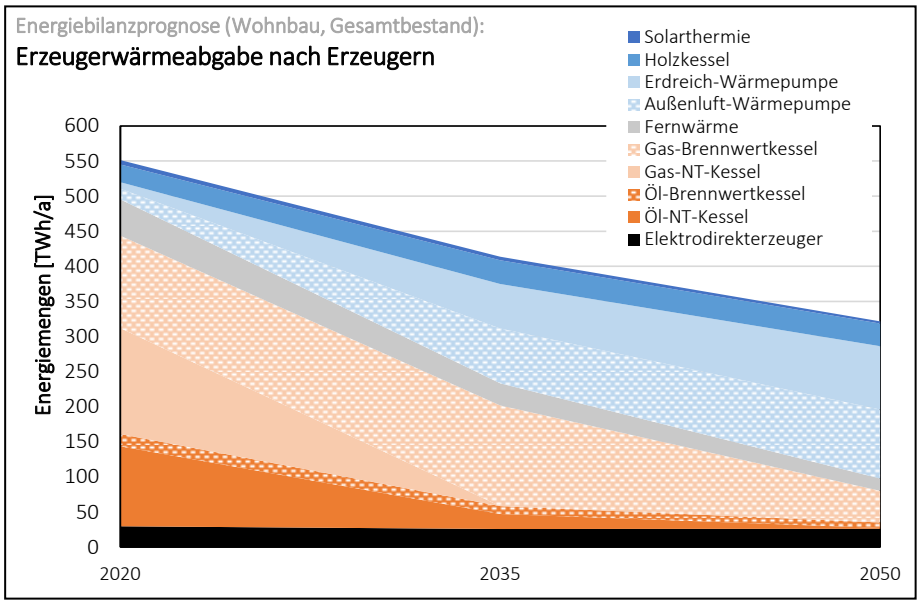


Abbildung 191 Prognose Gesamtbestand – Herkunft der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung]

Den Verbleib der produzierten Wärmemengen zeigt Abbildung 192. Heute werden etwa 80 % aller Wärmemengen dem Heizsystem zugeführt, die restlichen 20 % dienen der Trinkwassererwärmung. Diese Verhältnisse verschieben sich leicht: im Jahr 2050 beträgt das Verhältnis etwa 75 % zu 25 %.

Die Trinkwassererwärmung selbst ist sehr stark von Verlustgrößen geprägt. So nimmt die Nutzwärme heute nur etwa 44 % der eingesetzten Wärmemengen ein. Die restlichen 56 % sind den Verlusten zuzuschreiben. Bis 2050 lässt sich dies in etwa umkehren – durch konsequenten Rückbau ungünstiger Leitungsnetze. Hinweis: für die Heizung lässt die gewählte Bilanzierung keine Untersuchung dieser Art zu. Da nur Leitungen im Keller als „Verteilverlust" bilanziert wurden, ist nicht darstellbar, wie groß die Rohrwärmeabgabe insgesamt überhaupt ist.

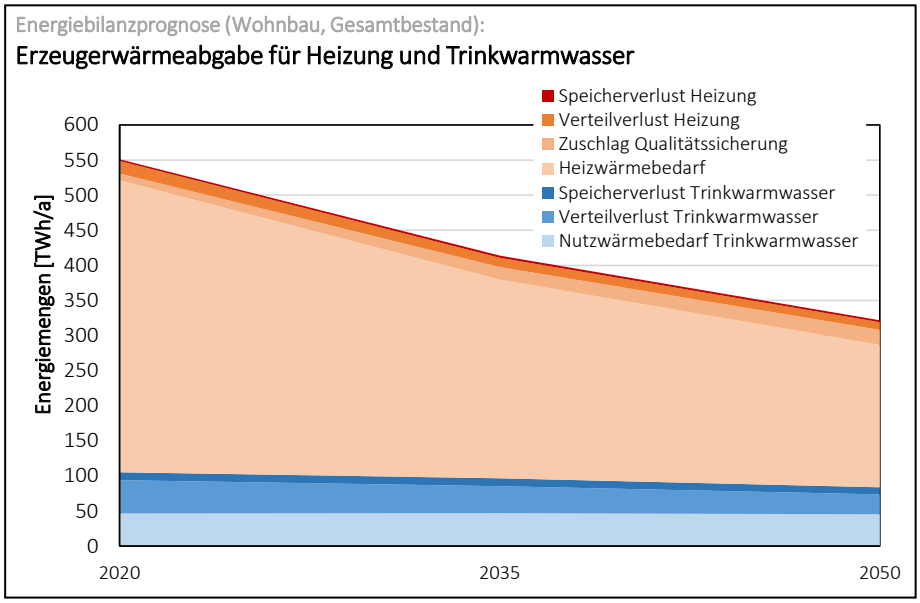


Abbildung 192 Prognose Gesamtbestand – Verwendung der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung]

4.3.6 *Einfluss der Qualitätssicherung*

Der Einfluss der Qualitätssicherung – mit ihren drei Anteilen: Baukörper, Peripherie, Erzeuger – wird nachfolgend näher beleuchtet. Für den Gesamtbestand und alle vorherigen Auswertungen galt: es wurden gemittelte Kennwerte bestimmt. Dabei nehmen die Gebäude mit Qualitätssicherung nach den Abschätzungen dieses Gutachtens 15 % Anteil (2020), 30 % Anteil (2035) bzw. 60 % Anteil (2050) ein. Entsprechend wird der Vorteil einer umgesetzten Qualitätssicherung im Verlaufe der Zeit immer höher angesetzt. Die Gesamtbandbreiten einer durchgeführten oder unterlassenen Qualitätssicherung zeigen die nachfolgenden Grafiken, jeweils getrennt für Ein- und Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser.

Baukörper

Abbildung 193 zeigt allein den Einfluss der Wärmebrücken auf den mittleren Transmissionswärmeverlust der Gebäudehülle. Wird der schlechtere Fall als Referenz angenommen, so kann mit Qualitätssicherung – also einer Wärmebrückenoptimierung – der Wert heute um 2 bis 3 % verbessert werden. Das Potential steigt an, je besser die Gebäude werden. Unterstellt man den Baustandard von 2050 liegt das Einflusspotential bereits bei 8 %.

Darüber hinaus kann in dieser Grafik noch einmal nachvollzogen werden, dass die Wärmeverluste aus Transmission etwa halbiert werden können, wobei die Mehrfamilienhäuser immer etwas schlechter abschneiden als die EZFH. Dies liegt daran, dass anteilig aufgrund der Gebäudegeometrie wärmetechnisch ungünstigere Flächen vorhanden sind, vor allem Fenster. Aber die Minderung der Verluste ist etwas einfacher im MFH zu realisieren, weil etliche Flächen einfacher sanierbar sind (z. B. Kellerdecken statt Bodenplatten).

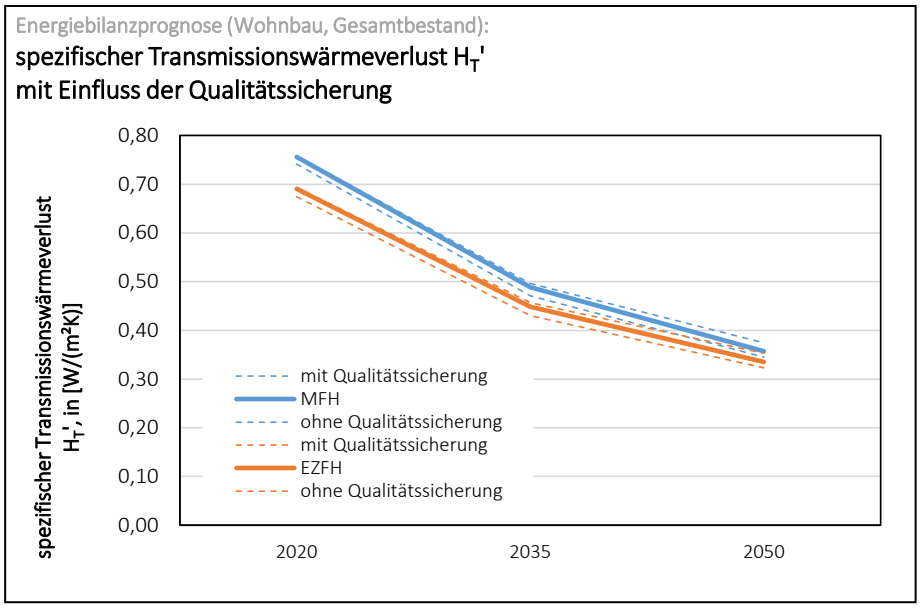


Abbildung 193 Prognose Gesamtbestand – Qualitätssicherung und Transmissionswärmeverlust [eigene Darstellung]

Wird die Lüftung mit einbezogen, ergibt sich die Darstellung nach Abbildung 194. Die Kennwerte sind hier auf die Wohnfläche bezogen (nicht auf die Hüllfläche). Da es im EZFH mehr Hüllfläche je Quadratmeter Wohnfläche gibt, schneidet in dieser Betrachtung das EZFH entsprechend schlechter ab.

Die Qualitätssicherung umfasst in dieser Betrachtung die Wärmebrücken plus die Thematik der Luftdichtheit. Wird auch hier der schlechtere Fall als Referenz angenommen, so kann der h-Wert als Fingerabdruck des Gebäudes mit Qualitätssicherung bei heutigen Gebäuden um 6 bis 7 % verbessert werden. Das Potential steigt an, je besser die Gebäude werden. Unterstellt man den Baustandard von 2050 liegt das Einflusspotential bereits bei 13 bis 14 %.

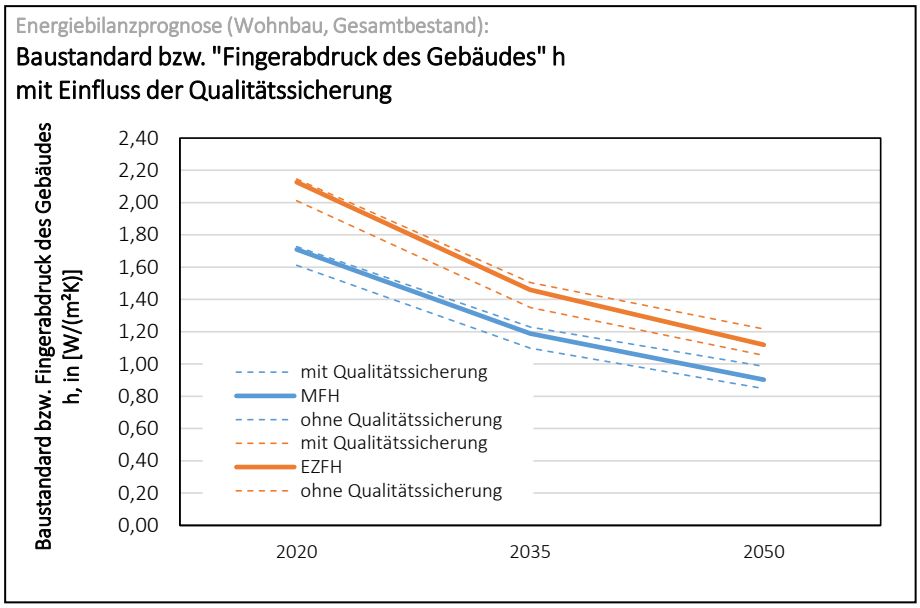


Abbildung 194 Prognose Gesamtbestand – Qualitätssicherung und Baustandard [eigene Darstellung]

Endenergie und Emissionen

Wenn alle Aspekte der Qualitätssicherung in ihrer Gesamtbandbreite untersucht werden, ergeben sich die Werte nach Abbildung 195. Dargestellt ist die Endenergie, welche den Einfluss der Wärmebrücken, Luftdichtheit, Anlagenoptimierung (hydraulischer Abgleich usw.) einschließlich Erzeugereffizienz enthält. Die Schwankungsbreite potenziert sich.

Wird auch hier der schlechtere Fall als Referenz angenommen, so kann die Endenergie mit Qualitätssicherung bei heutigen Gebäuden um etwa 12 bis 13 % vermindert werden. Das Potential steigt an, je besser die Gebäude werden. Unterstellt man den Baustandard von 2050 liegt das Einflusspotential bereits bei 24 bis 35 %. Letztlich kann dies gleichzeitig als Indikator für die Energiekosten angesehen werden.

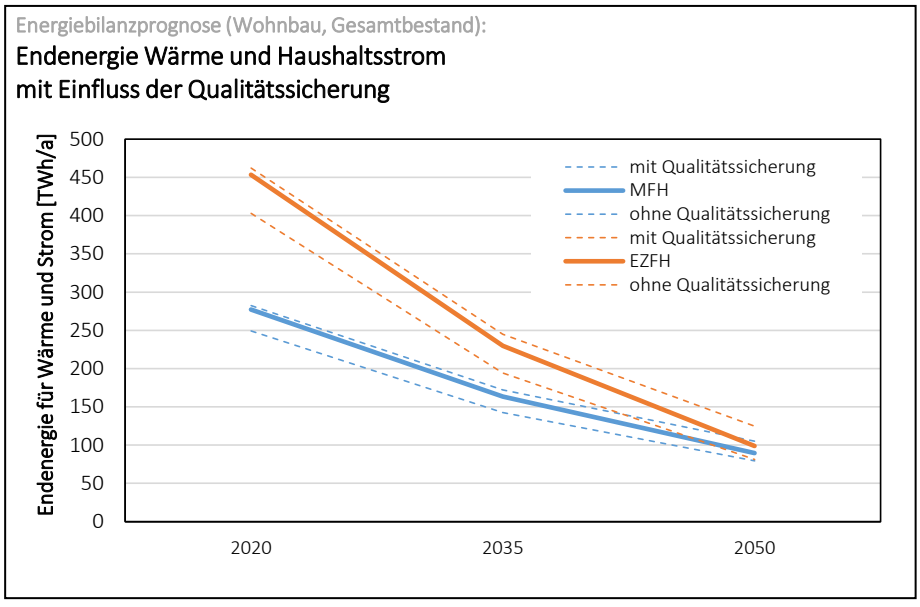


Abbildung 195 Prognose Gesamtbestand – Qualitätssicherung und Endenergie [eigene Darstellung]

Abbildung 196 zeigt den Einfluss der Qualitätssicherung auf die Emissionen. Da alle Energieträger sich auf die Nullemission zubewegen, kann die Spannbreite in dieser Darstellung nicht so gut eingeschätzt werden. Die Grafik sagt aus: 2050 ist es aus Sicht der Emissionen fast gleichgültig, ob eine Qualitätssicherung vorhanden ist oder nicht – denn die Emissionen sind so oder so nahe bei null. Allerdings ist die Frage einer guten Qualität nicht gleichgültig, denn ein Mehrverbrauch führt zu einer höheren Notwendigkeit, die regenerative Energieerzeugung mehr als nötig auszubauen.

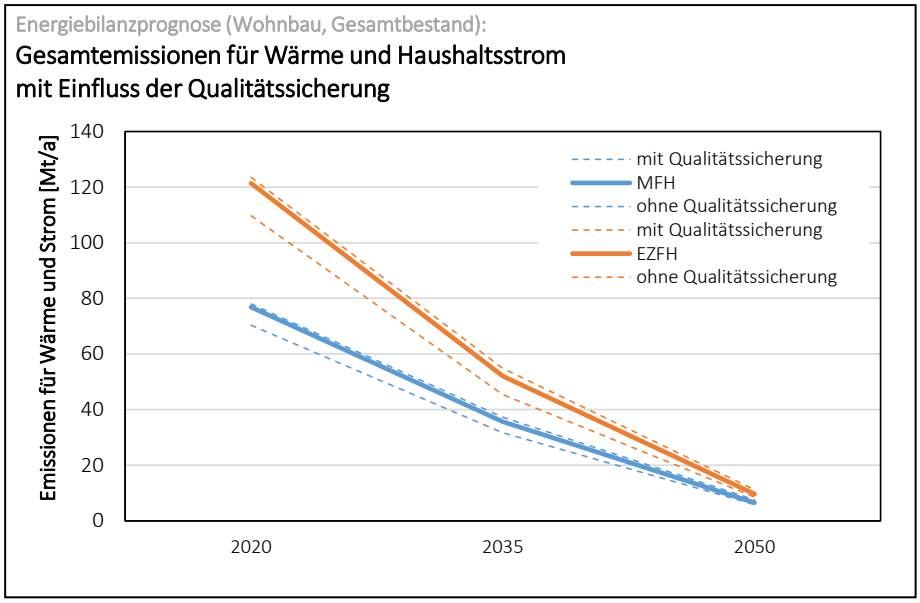


Abbildung 196 Prognose Gesamtbestand – Qualitätssicherung und Emissionen [eigene Darstellung]

4.3.7 Fazit zur Entwicklung des Wohnbaugesamtbestandes

Mit den in Anhang 4.2 vorgeschlagenen Maßnahmen zur baulichen Sanierung sowie zum Umbau der Anlagentechnik ist das „Hauptszenario" für die künftige Gebäudeentwicklung gegeben. Es zielt darauf ab, jeden Anlass einer Sanierung zu nutzen und dann jeweils sehr ambitionierte Maßnahmen umzusetzen. Es werden keine Maßnahmen vorgezogen und die Sanierungszyklen sind vergleichsweise lang gewählt – an den Gepflogenheiten der Gebäudebesitzer angelehnt. Hinsichtlich der Wärmeerzeugung wird ein Umbau auf Wärmepumpen anvisiert, der jedoch realistische Markthochlaufraten berücksichtigt.

Es zeigt sich im Ergebnis für den Gesamtbestand, dass zwischen 2020 und 2050:

- die Wohnfläche um insgesamt 17 % ansteigt (als Nettobilanz von Bestand, Abriss und Neubau),
- die in den Gebäuden fremdbezogene Endenergie für Wärme (Heizung und Trinkwarmwasser) sowie Haushaltsstrom sich von 749 TWh/a auf 267 TWh/a mindern lässt (-64 %),
- die damit freigesetzten Emissionen sich von 198,3 Mt/a auf 16,1 Mt/a (-92 %) mindern lassen.

Emissionsbudget

Aus den vorherigen Überlegungen zum „Hauptszenario" lässt sich eine Prognose für das Emissionsbudget treffen. Werden die jährlichen Emissionen kumuliert, entsteht die sich abflachende Kurve nach Abbildung 197. Es kann näherungsweise extrapoliert werden, dass der Endwert der Kurve sich bei 3000 Mt einstellt und dieser Zeitpunkt im Jahrzehnt 2050 - 2060 liegt. Erst dann ist der Wohnbaugesamtbestand klimaneutral.

Für die Temperaturerhöhung der Atmosphäre ist aber nicht in erster Linie der Zeitpunkt der Zielerreichung relevant, sondern die bis dahin emittierte Menge. Das für den Wohngebäudesektor verbleibende Restbudget zum Einhalten des 2°C Ziels liegt bei näherungsweise 1800 Mt für den Zeitraum nach 2020 (Ableitung des Wertes siehe Anhang 4.4). Die im „Hauptszenario" berechneten 3000 Mt überschreiten den Zielwert deutlich. Die in Anhang 4.2 getroffenen Entwicklungsmaßnahmen – so ambitioniert sie sind – reichen nicht, um das Emissionsbudget einzuhalten.

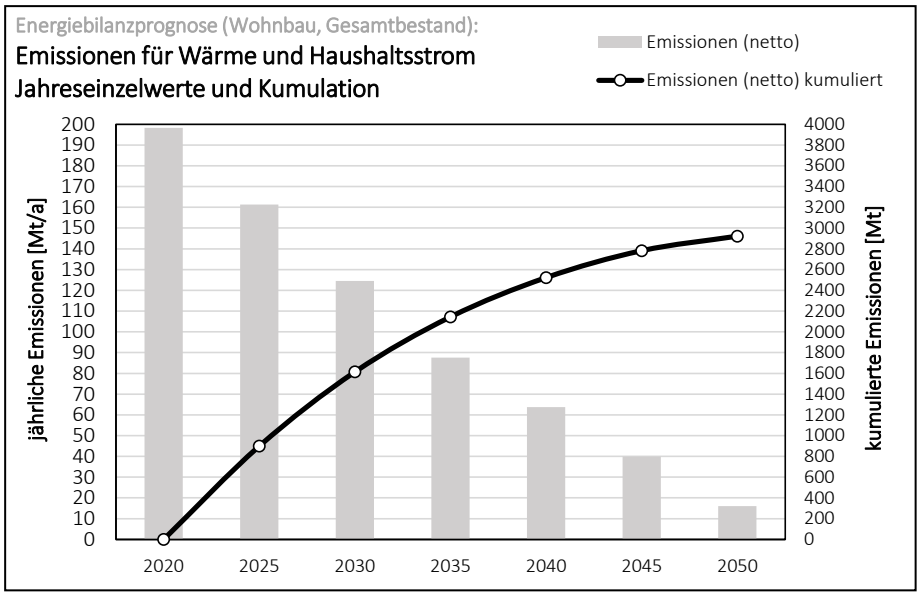


Abbildung 197 Prognose Gesamtbestand – Emissionsbudget [eigene Darstellung]

Aus diesem Grund wird in einer Variante 1 „Beschleunigung“ (Anhang 4.4) aufgezeigt, wie ein möglicher Pfad aussehen könnte.

Einordnung der Erkenntnisse im Vergleich zu anderen Studien

Das finale Ergebnis – d. h. der Rückgang der Emissionen – ist vergleichbar mit praktisch allen anderen Studien ähnlichen Auftrags (insbesondere die in Anhang 4.1 besprochenen). Dies ist dadurch begründet, dass der Zielwert für das Jahr 2050 weitgehend vorgegeben ist. Allerdings sind die Wege dorthin vielfältig, weil es sich um Maßnahmenkombinationen handelt, die aus vielen Einzelmaßnahmen in unterschiedlicher Gewichtung kombinierbar sind.

Es lässt sich jedoch übereinstimmend in allen Studien und Gutachten – das vorliegende eingeschlossen – feststellen, dass:

- Maßnahmen allein im Sektor „Gebäude“ nicht zielführend sind, sondern auch die „Energiewirtschaft“ parallel umgebaut wird (die Herkunft und Zusammensetzung der an Gebäude gelieferte Energieträger ist langfristig regenerativ); mit Einsparung an den Gebäuden allein kann das Klimaziel nicht erreicht werden
- Maßnahmen allein im Sektor „Energiewirtschaft“ (bei unveränderten Gebäuden) nur theoretisch denkbar sind; sobald die gelieferten Energieträger vollregenerativ sind, weist auch der Sektor „Gebäude“ zwar keine Emissionen mehr auf, allerdings wäre der notwendige Ausbau der Erzeugungs- und Speicherungskapazitäten so immens, so dass diese Option aus wirtschaftlicher Sicht ausscheidet.

Allerdings sind die Wege dorthin vielfältig, weil es sich um Maßnahmenkombinationen handelt, die aus vielen Einzelmaßnahmen in unterschiedlicher Gewichtung kombinierbar sind. Zudem lässt sich der Sektor „Gebäude“ nur gekoppelt mit der „Energiewirtschaft“ betrachten. Im Resultat bedeutet dies, dass – grob zusammengefasst – folgende Maßnahmen (es sind bereits Pakete gebildet, um die Übersichtlichkeit zu wahren) umzusetzen wären:

1. Verminderung des Gebäudewärmebedarfs durch Dämmung und Wärmerückgewinnung
2. Erhöhung der Gebäudeeffizienz durch angepasste Peripherie (Verteilnetze, Pumpen, Regelung usw.)
3. Ausbau der regenerativen Energien am Gebäude
4. Wahl effizienter Erzeuger für Gebäude
5. Suffizienzmaßnahmen des Nutzerverhaltens einschließlich Flächeneffizienz

6. Umbau der Stromwirtschaft hin zu einem System von zunächst teil- dann vollregenerativen Strom
7. Umbau der stofflichen Energiewirtschaft hin zu einem System von zunächst teil- und später vollregenerativen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen
8. Umbau der wärmenetzbasierten Energiewirtschaft hin zu Systemen mit Abwärme und Umweltwärme als Primärquellen bzw. Rückbau von Netzen

Die genannten 8 Punkte weisen gegenseitige Abhängigkeiten auf. Vor allem Mengenabhängigkeiten sind festzustellen. Sinkt beispielsweise der Gebäudewärmebedarf weniger, muss die Energiewirtschaft regenerativer sein (und umgekehrt), um das Emissionsziel einzuhalten. In gewisser Weise herrscht also ein Kompensationsprinzip zwischen den Maßnahmen.

Allerdings ist auch festzustellen, dass – je weiter die Zeit fortschreitet – die Anzahl der Kompensationsmöglichkeiten schwindet. Außerdem müssen immer mehr Maßnahmen gleichzeitig und nicht alternativ durchgeführt werden. Dies ist im direkten Vergleich von Studien aus der Jahrtausendwende („IKARUS" 2003 [72]) mit neueren Veröffentlichungen (siehe Anhang 4.1) festzustellen. Vor allem zeitaufwendige Maßnahmen, z. B. der schnelle Aufbau einer teil- oder vollregenerativen Brennstoffwirtschaft werden unrealistischer.

Zudem ist der Handlungsdruck unterdessen so groß, dass auch Suffizienzmaßnahmen diskutiert werden (z. B. Sterchele et al. 2020 [68]), weil alle anderen Maßnahmen aufgrund des fast aufgebrauchten Budgets unrealistisch teuer werden.

Sehr große Differenzen zwischen Studien ergeben sich für die im Sektor „Gebäude" umzusetzenden Maßnahmen, wenn komplett andere Handlungspfade für die „Energiewirtschaft" vorausgesetzt werden – dies sehen die Autoren dieses Gutachtens als den größten Einzeleinfluss.

Wird beispielsweise der Fokus auf den Erhalt der stofflichen Energiewirtschaft gesetzt (Einführung von PtX), ergeben sich entsprechend mehr Kessel als Wärmeerzeuger (z. B. DENA-Leitstudie [67]). Der Fokus der Handlungsstränge wird vom Sektor „Gebäude" in die „Energiewirtschaft" verschoben. Für die Gebäude bleibt die grobe Versorgungsstruktur dann fast erhalten. Allerdings ist der notwendige Ausbau der regenerativen Energiewirtschaft dann höher, weil die Lieferung regenerativen Gases verlustbehafteter ist als die regenerativen Stroms. Wird eine strombasierte Energiewirtschaft vorausgesetzt, stehen Wärmepumpen im Fokus (z. B. Robinius et al. 2019 [150]).

Wird auf netzbasierte Wärmelieferung gesetzt, erhalten die Gebäude lediglich einen Netzanschluss. Außerdem sind geringere Ausbauanteile gebäudeweiser regenerativer Energien möglich. Die Erzeugung über z. B. Wärmepumpen, Photovoltaik oder Solarthermie ist in diesem Fall nicht mehr dem Sektor „Gebäude" zugeordnet. Sie findet aber dennoch statt – nun aber als Teil der „Energiewirtschaft". Es ergeben sich Kostenvorteile aufgrund von Skaleneffekten. Allerdings sind dann Netzverluste zu beklagen, die es sonst nicht gäbe.

Zusammenfassend lässt sich sagen: der Ausbau von regenerativen Energiequellen ist in allen Studien und Gutachten notwendig. Die Frage ist nur, ob diese als Teil der „Energiewirtschaft" geführt werden (überwiegend zentrale Aufbereitung der regenerativen Energien und dann Lieferung als PtX oder Fernwärme), oder als Teil des Sektors „Gebäude" (überwiegend dezentrale Aufbereitung und Nutzung). Aufgrund der Verlustvermeidung und damit geringerer notwendiger Ausbaukapazitäten von Photovoltaik und Windkraft tendieren die Verfasser dieses Gutachtens zu der zweiten Lösung.

Hinsichtlich der notwendigen Gebäudedämmung gibt es weniger Diskrepanz in den Empfehlungen der verschiedenen Studien und Gutachten. Die bauliche Sanierungstätigkeit und ihr Erfolg sollen gesteigert werden. Es ist nicht immer eindeutig, ob „Sanierungsrate" oder die „Sanierungstiefe" oder eine Kombination aus beidem – hier „Sanierungsquote" genannt – gemeint ist. Lediglich die Frage, ob an vielen Gebäuden geringe Dämmdicken (große „Sanierungsrate" bei geringer „Sanierungstiefe") oder an wenigen Gebäuden eine dickere Dämmung (geringe „Sanierungsrate" bei hoher „Sanierungstiefe") hilfreicher ist, steht dann zur Diskussion. Für erstere spricht, dass die Durchdringung schneller geht, weil die Bauabläufe unkomplizierter sind. Für letzteres spricht, dass keine erneute Dämmung notwendig wird (die unwirtschaftlicher wäre als die erste) und am Ende „mit einem Durchlauf" ein geringerer Wärmebedarf erzielbar ist. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens tendieren zu dieser Variante.

Hinweise für den Neubau

Der Neubau ist in dem beschriebenen „Hauptszenario" eingeschlossen. Die gewählten Eigenschaften sind Anhang 4.2 zu entnehmen; Kurzzusammenfassung:

- bis 2035: Übergang vom heutigen Niveau auf das ab 2035 geschilderte Niveau; in MFH noch 20 % konventionelle Fernwärme
- ab 2035: Hülle in Passivhausniveau; etwa ⅔ der Gebäude mit Lüftung mit Wärmerückgewinnung; Trinkwassererwärmung im EZFH zentral, aber nur in Ausnahmefällen mit Zirkulation; im MFH etwa ⅓ dezentral, ⅓ zentral mit Zirkulation, ⅓ zentral ohne Zirkulation; überwiegend Wärmepumpen, wenige Holzkessel, keine fossilen Erzeuger mehr; keine konventionelle Fernwärme mehr (nur noch „kalte Fernwärme"); PV für alle Gebäude, Solarthermie nur im EZFH und überwiegend zusammen mit Holz

In den Einzelaspekten ähnelt der Standard dem heutigen Effizienzhausniveau 40 bis 55. Die beschriebenen Technologien sind insgesamt erprobt. Es ist nur eine systematische Umsetzung in allen Neubauprojekten erforderlich. Zudem ist – ebenfalls flächendeckend – ein durchgehendes System der Qualitätssicherung zu etablieren, um die Effizienzstandards auch nachweislich einzuhalten.

4.3.8 Übertragung der Erkenntnisse Nichtwohnungsbau

Die in der Mikroperspektive (Anhang 3.11.1) erläuterte Übertragung der Erkenntnisse zur Sanierung des Wohnungsbaus auf den – wohnbauähnlichen – Nichtwohnungsbau gelten analog.

Der Bestand an Nichtwohnbauten (siehe Typologie in Anhang 5.7.2) kann grob in zwei Kategorien gegliedert werden. Als „wohnbauähnliche Gebäude" können fast die Hälfte der Flächen angesehen werden (Büro, Krankenhaus, Hotel, Bildung, mit Abstrichen auch Handel, Kultur, Sport), die restlichen Objekte sind „nicht wohnbauähnlich". Die Versorgungsstruktur der erstgenannten Gruppe ist dem Wohnungsbau sehr ähnlich, wie in Anhang 5.6.3 ausgeführt.

Daher lässt sich für die „wohnbauähnlichen Gebäude" schlussfolgern: die erzielbaren Einsparungen an Endenergie, Primärenergie und Emissionen sind in diesen Objekten in ähnlicher Weise und zu ähnlichen wirtschaftlichen Rahmendaten erreichbar.

Die gewählten Maßnahmen müssen ggf. geringen Modifikationen unterzogen werden. Es ist die die Ausgangsenergiebilanz zu berücksichtigen, d. h. die Anteile von Transmission, Lüftungswärmeverlusten, Trinkwarmwasserbedarf, interne Gewinne, Erzeugerverluste usw. In den Bilanzrubriken, die ein größeres Gewicht als im Wohnungsbau haben, besteht ein größeres Einsparpotential durch technische Effizienzmaßnahmen und bauliche Sanierung und umgekehrt).

Beispiel: in allen Objekten mit großer Belegungsdichte und folglich großem Lüftungswärmebedarf sind Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung bedeutsamer als im Wohnungsbau (z. B. Schulen, Veranstaltungsgebäude). In Objekten mit geringem Trinkwarmwasserbedarf wird eine dezentrale Trinkwassererwärmung stärker umgesetzt als im Wohnungsbau (z. B. Handels- und Bürogebäude).

Der verstärkte Einsatz von Wärmepumpen ist gleichermaßen auch in Nichtwohnbauten möglich. Vor allem in Gebäuden ohne nennenswerte Trinkwarmwassernutzung sind sehr günstige Einsatzbedingungen gegeben (weil das Hochtemperaturniveau entfällt). Besteht gleichzeitig Heiz- und Kühlbedarf kann die Wärmepumpe gleichzeitig als Kältemaschine genutzt werden; besteht alternativ Wärme- oder Kältebedarf kann sie umschaltbar als Wärmepumpe oder Kältemaschine eingesetzt werden.

Der verstärkte Einsatz von Photovoltaik ist in allen Nichtwohnbauten ebenso sinnvoll wie im Wohnungsbau (bei den Gebäudearten mit ausgeprägter Tagnutzung sogar noch sinnvoller). Vom Umbau der Energiewirtschaft – ausgedrückt durch veränderte Emissions- und Primärenergiefaktoren – profitieren die Objekte ähnlich wie die Wohnbauten.

Da die Abrissquote bei Nichtwohnbauten im Mittel über dem des Wohnbaus liegt, vgl. Jochum et al. [127], sind insgesamt schnellere Durchdringungen besserer Standards möglich.

4.4 Variante 1: Beschleunigtes Erreichen der Klimaneutralität

Die Variante 1 „Beschleunigung“ zeigt auf, welche zusätzliche Anstrengungen materieller Art (mehr Dämmung, bessere Fenster, größere PV-Flächen usw.) zu unternehmen sind und wie die zeitliche Umsetzung zu beschleunigen wäre, um das Emissionsbudget für das 2°C-Ziel einzuhalten. Die Variante beruht wie beim „Hauptszenario“ auf der Betrachtung des Wohnbaugesamtbestandes, einschließlich aller Neubauten und Abrissaktivitäten.

Nachfolgend werden zunächst die notwendigen Modifikationen für die zeitveränderlichen Größen beschrieben. Anschließend werden relevante Ergebnisabweichungen zum „Hauptszenario“ aufgezeigt.

Diese Überlegungen decken sich prinzipiell mit denen anderer aktueller Studien, z. B. der des Wuppertalinstitutes 2020 für Fridays for Future [73], der aktuellen Studie „Klimaneutrales Deutschland“ von AGORA und Stiftung Klimaneutralität [74] sowie der Studie „European Green Deal“ des DIW [42] von 2020. Eine Grafik aus der letztgenannten Studie zeigt Abbildung 198. Sie zeigt anschaulich, dass die jährlichen Emissionen sehr viel schneller sinken müssen, um das Budget einzuhalten. Die eigene Auswertung wird an diese Darstellung angelehnt.

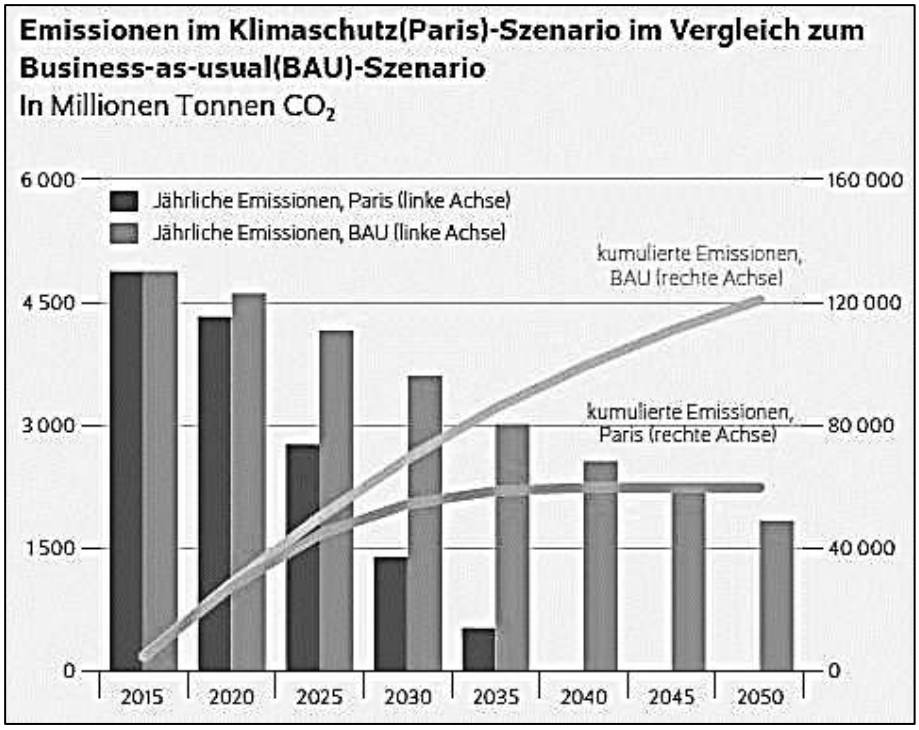


Abbildung 198 Emissionen im Klimaschutzszenario im Vergleich zum Business-as-usual-Szenario [42]

4.4.1 Modifikation zeitvariabler Größen

Die Variante 1 „Beschleunigung“ zielt darauf ab, bis 2050 das Emissionsbudget von ca. 1800 Mt (absolut) für den Wohnungsbau einzuhalten. Dieses ergibt sich wie folgt aus den Daten zum noch verfügbaren Emissionsbudget:

- weltweit verfügbar im Jahr 2020: 705.000 Mt
- davon 1 %, also 7050 Mt für Deutschland (proportional zum Anteil der deutschen Bevölkerung)
- davon Anteil von 25 % für die Wohngebäude (für Wärme und Strom), also ca.1800 Mt.

Der Anteil von 25 % für den Wohnungsbau ergibt sich aus heutigen jährlichen Emissionen von ca. 200 Mt/a CO_2 für den Wohnungsbau (siehe Anhang 4.3.4) sowie konservativ für alle Sektoren im Jahr 2020 geschätzten Emissionen von 800 Mt/a CO_2 [13].

Suffizienzmaßnahmen

Die erste berücksichtigte Suffizienzmaßnahme ist ein künftig gebremster Wohnflächenzuwachs. Die Beschreibung der Wohnflächenermittlung für 2035 und 2050 folgt den unter Anhang 4.2.1 benannten Randdaten. Ausgangsbasis ist das Bevölkerungswachstum. Der Anstieg der pro-Kopf-Wohnfläche wird jedoch mit 0,1 m²/(P · a) festgelegt. Im Hauptszenario waren es 0,3 m²/(P · a). Damit ergeben sich folgende neue Eckwerte (in Klammern die Zahlen des Hauptszenarios):

- 2020: 3.754 Mio. m² (3.754 Mio. m²)
- 2035: 3.897 Mio. m² (4.146 Mio. m²)
- 2050: 3.895 Mio. m² (4.377 Mio. m²)

Die Wohnflächen nehmen im Gesamtzeitraum nur um 4 % zu, nicht um 17 %. Insbesondere in der betrachteten Periode (I) von 2020 bis 2035 ist der Unterschied erheblich. In diesem Zeitraum weisen sowohl die Gebäude einen noch vergleichsweise hohen Verbrauch auf, die Erzeuger befinden sich noch in der Umstellungsphase und auch die gelieferten Energieträger (v. a. Strom) weisen noch höhere Emissionsfaktoren auf. Daher ist diese Maßnahme – unter Budgetgesichtspunkten – effektiv.

Darüber hinaus wird ein sparsameres Nutzerverhalten angenommen als im Anhang 6.1.3 beschrieben. Es wird angenommen, dass:

- 2035: der pro-Kopf-Verbrauch für Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom 10 % geringer sind als 2020
- 2050: der pro-Kopf-Verbrauch für Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom 20 % geringer sind als 2020

Sanierungsquoten für den Baukörper

Der Neubau wird in allen Merkmalen und bereits ab 2020 in der Version „best“ ausgeführt. Das war im Hauptszenario erst ab 2035 vorgesehen (bis dahin ⅔ „best“ und ⅓ „gut“), siehe Anhang 4.2.2.

Die Nutzungsdauern für die Sanierung sind identisch zum Hauptszenario, so dass die Sanierungsraten identisch sind (Häufigkeiten). Jedoch werden die Sanierungstiefen in beiden Zeitperioden (I) und (II) wie folgt angepasst (Werte aus dem Hauptszenario in Klammern):

- Außenwand: (I) 70 % (50 %) (II) 75 % (75 %)
- Dach, Geschossdecke: (I) 80 % (67 %) (II) 80 % (75 %)
- Bodenplatte: (I) 80 % (67 %) (II) 80 % (67 %)
- Fenster: (I) 90 % (67 %) (II) 100 % (100 %)

Es sind nur die „best“-Anteile genannt, der Rest zu 100 % ist jeweils „gut“; schlechtere Ausführungen sind nicht vorgesehen. Für die Kellerdecke wurden aufgrund der Restriktionen (fehlende Deckenhöhe usw.) keine Änderungen vorgenommen.

Marktdurchdringung der Haupterzeuger

Es sind insgesamt keine Gas- und Ölkessel im „Eins-zu-Eins-Tausch“ – nur noch als Hybrid mit Wärmepumpen - ab 2020 vorgesehen, weder im Neubau, noch in der Modernisierung. Sie werden nur noch in der Modernisierung als Teil von Wärmepumpen-Hybridanlagen neu eingebaut.

- Neubau
    - in EZFH: 10 % Holzkessel in Periode (I) und 20 % in Periode (II), der Rest sind jeweils Wärmepumpen (⅓ Erdreich, ⅔ Außenluft)
    - in MFH: 5 % Holzkessel in Periode (I) und 10 % in Periode (II), Fernwärme findet in 10 % der Gebäude Anwendung in Periode (I), keine in Periode (II), der Rest sind jeweils Wärmepumpen (⅔ Erdreich incl. „kalte Fernwärme“, ⅓ Außenluft)

- für den Sanierungsfall mit Energieträgerwechsel sieht der neue Erzeuger wie folgt aus:
    - in EZFH: 15 % Holzkessel in Periode (I) und 25 % in Periode (II), der Rest sind jeweils Wärmepumpen (⅓ Erdreich, ⅔ Außenluft)
    - in MFH: 10 % Holzkessel in Periode (I) und 15 % in Periode (II), Fernwärme findet in 2 % der Gebäude Anwendung in Periode (I), keine mehr in der Periode (II), der Rest sind jeweils Wärmepumpen (⅔ Erdreich incl. „kalte Fernwärme“, ⅓ Außenluft)

Insgesamt findet eine Erhöhung des Holzkesseleinsatzes statt (unter Wahrung des Biomassebudget, siehe Anhang 5.5.2), was u. a. deshalb möglich ist, weil die Gebäude in dieser Variante weniger Bedarf haben. Das Resultat der Technologieausbreitung zeigt Abbildung 199. Es ist direkt vergleichbar mit Abbildung 167 aus Anhang 4.2.3.

Während im Hauptszenario im Jahr 2035 noch 46 % der Gebäudeflächen mit einem Gas- oder Ölkessel versorgt werden, sind es in der Variante nur noch 28 %. Im Jahr 2050 werden aus 19 % in der Variante 11 %. Der Wärmepumpenanteil beträgt im Jahr 2035 nicht mehr 35 %, sondern 50 %. Im Jahr 2050 liegt Sie bei 65 % statt 62 %. Der veränderte Systemumbau findet also vor allem in der Zeit bis 2035 statt.

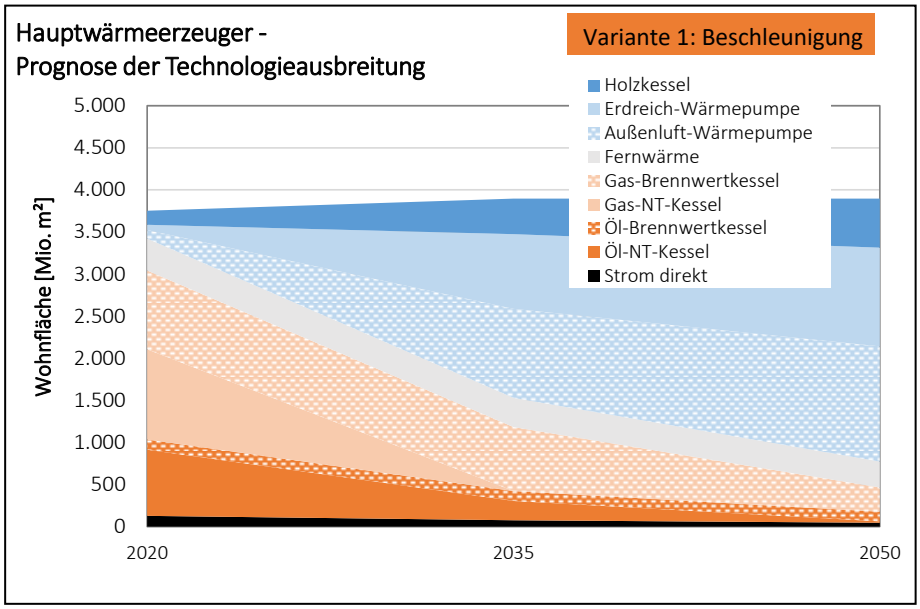


Abbildung 199 Variante 1 Gesamtbestand – Prognose der Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung]

Sanierungsquoten für die Peripherie

Für die Peripherie, d. h. die Art der Trinkwassererwärmung, den Rückbau von Zirkulationssystemen, die veränderte Lage von Heizungsverteilungsleitungen sowie die Ausbreitung der Flächenheizung gelten unveränderte Annahmen (siehe Anhang 4.2.4).

Technologieausbauquoten für Zusatzerzeuger

Vor allem der Ausbau der Photovoltaik wird gegenüber dem Hauptszenario beschleunigt, jedoch nur in der Zeitperiode (I) von 2020 bis 2035. Folgende veränderte Randdaten gelten (in Klammern zum Vergleich die Annahmen aus Anhang 4.2.5):

- Neubau: Periode (I) 100 % (75 %) Periode (II) 100 % (100 %)
- Sanierung: Periode (I) 75 % (75 %) Periode (II) 75 % (75 %)

Das Resultat zeigt Abbildung 200 (zum direkten Vergleich siehe Abbildung 171 in Anhang 4.2.5). Während im Hauptszenario im Jahr 2035 etwa 38 % aller Wohnbauten eine PV-Anlage aufweisen, sind es in Variante 1 bereits 48 %. Am Ende sind die Werte nur geringfügig verschieden (69 % statt 65 %).

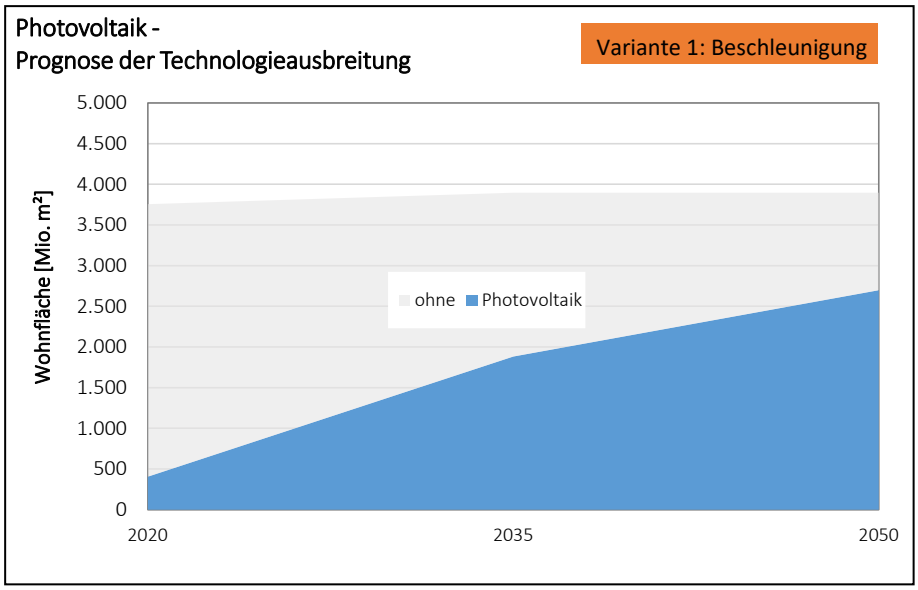


Abbildung 200 Variante 1 Gesamtbestand – Prognose der Technologieausbreitung der Photovoltaik [eigene Darstellung]

Für die Solarthermie gelten fast identische Annahmen wie im Hauptszenario. Lediglich der Rückbau von Solarthermie bei der Sanierung der EZFH entfällt (alle EZFH-Besitzer, die eine Solarthermieanlage haben, behalten diese auch).

Die Einbauwahrscheinlichkeit einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung wird im Neubau identisch angenommen wie im Hauptszenario. Allerdings entscheiden sich in der Variante 1 „Beschleunigung" 3-mal mehr Gebäudebesitzer bei einer Sanierung für eine Lüftungsanlage. Im Jahr 2050 haben somit 23 % aller Wohnflächen eine solche Anlage (anstelle von 17 %).

Emissionsfaktoren

Der Umbau der Energiewirtschaft erfolgt schneller, als in Anhang 4.2.8 beschrieben. Tabelle 146 fasst die beispielhaften Annahmen zusammen. Die anderen Energieträger sind unverändert (z. B. Holz) oder für die Betrachtung nicht relevant.

Energieträger	Emissionsfaktor, brennwertbezogen, in [g/kWh]					
	„Hauptszenario"			Variante 1: „Beschleunigung"		
	2020	2035	2050	2020	2035	2050
Erdgas	208	190	110	208	104	52
Heizöl	292	275	160	292	146	73
allgemeiner Strommix	444	250	50	444	22	1
allgemeiner Fernwärmemix	243	150	60	243	60	15

Tabelle 146 Prognose der Emissionsfaktoren für das Szenario 1 „Beschleunigung" [eigene Darstellung]

Insbesondere für Strom und Erdgas ist eine schnelle Emissionsminderung im Zeitraum 2020 - 2035 relevant. Da in der Zeitperiode (I) noch viele Erdgaskessel in Betrieb sind, aber auch schon ein deutlicher Zuwachs an Wärmepumpen zu verzeichnen ist.

Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung wird in der Variante 1 ebenfalls beschleunigt umgesetzt. Es wird angenommen, dass folgende Anteile von Gebäuden eine Qualitätssicherung aufweisen (Werte des „Hauptszenarios" in Klammern):

- 2020: 15 % (15 %)
- 2035: 85 % (30 %)
- 2050: 100 % (60 %)

Auch hier erfolgt die Beschleunigung vor allem in der ersten Phase bis 2030, weil die Emissionsminderungseffekte in dieser größer sind.

4.4.2 *Details der Energiebilanz*

Die modifizierten Randdaten äußern sich bei der Bilanzierung in veränderten Energiekennwerten. Nicht die gesamte Bilanz wird an dieser Stelle dargestellt, jedoch 3 Abbildungen, deren Original des „Hauptszenarios“ in Anhang 4.3.5 zu finden ist.

Abbildung 201 zeigt die Zusammensetzung der Transmissions- und Lüftungsverluste in der Variante „Beschleunigung“ (Darstellung für das „Hauptszenario“ siehe Abbildung 188). Die schraffierte Fläche macht die Einsparungen sichtbar, die sich aus der Suffizienz (weniger Wohnfläche) sowie der besseren Dämmung für Neubauten und die Sanierung ergeben.

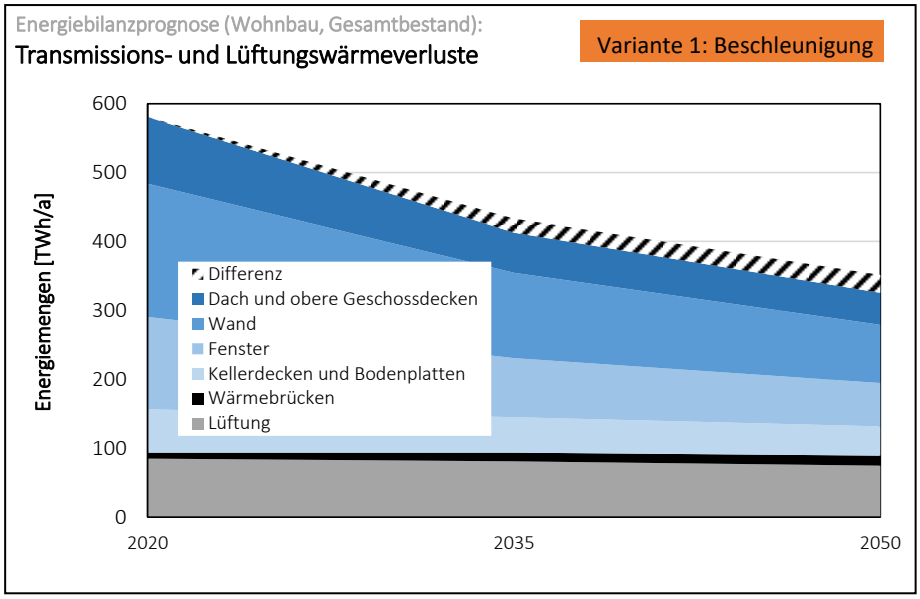


Abbildung 201 Variante 1 Gesamtbestand – Zusammensetzung der Transmissions- und Lüftungsverluste [eigene Darstellung]

Abbildung 202 zeigt die summierte Wärmelieferung aller Erzeuger in der Variante „Beschleunigung“ (Darstellung für das „Hauptszenario“ siehe Abbildung 191). Gut erkennbar ist bis 2035 die Umkehr der Bedeutung von Gas- und Ölkesseln sowie Wärmepumpen. Aber auch der stärkere Einfluss von Holzkesseln und Solarthermie ist nachvollziehbar.

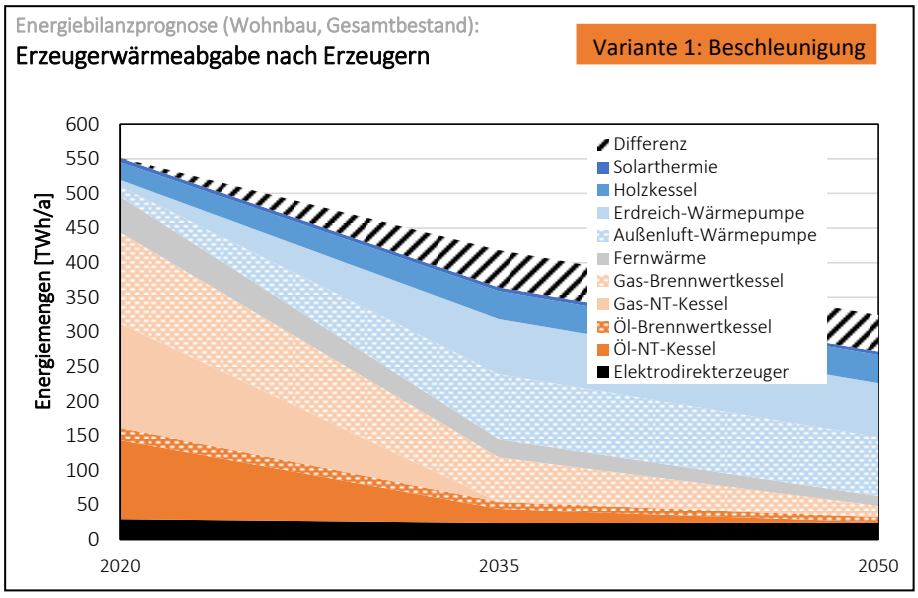


Abbildung 202 Variante 1 Gesamtbestand – Herkunft der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung]

Abbildung 203 gibt wieder, für welche Zwecke die erzeugte Wärme in der Variante „Beschleunigung“ eingesetzt wird (Darstellung für das „Hauptszenario“ siehe Abbildung 192). Im Detail ist eine deutliche Einsparung erkennbar, die sich ergibt, weil die zu versorgende Wohnfläche geringer ist und der Trinkwarmwasserbedarf sinkt (Suffizienz), die Qualitätssicherung konsequenter umgesetzt wird und zusätzliche bauliche Maßnahmen den Bedarf vermindert haben.

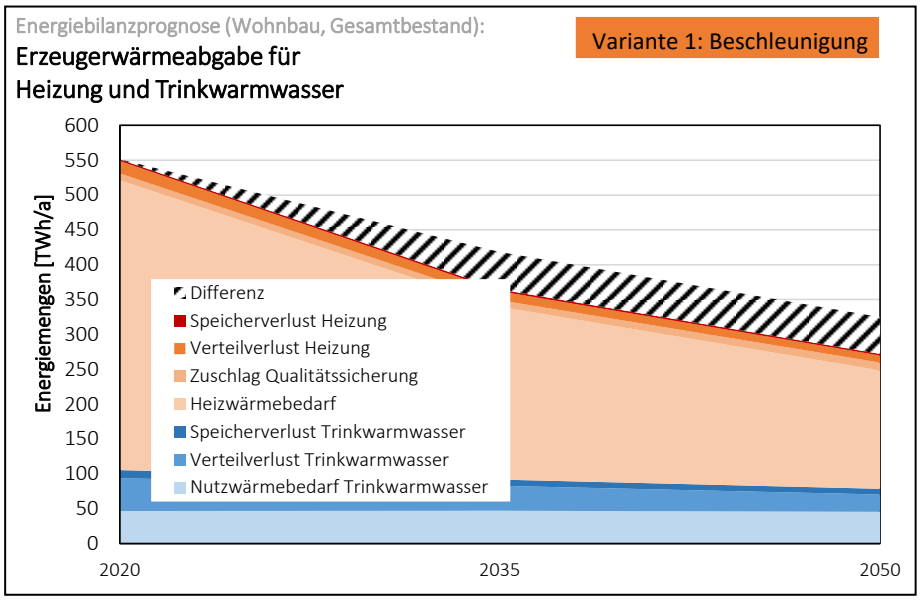


Abbildung 203 Variante 1 Gesamtbestand – Verwendung der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung]

4.4.3 *Endenergie und Energiekosten*

Die in der Variante 1 „Beschleunigung“ verminderte Endenergie zeigt Abbildung 204 (direkter Vergleich: siehe Abbildung 178 in Anhang 4.3.1). Die schraffierte Fläche entspricht der Einsparung. Über den Gesamtzeitraum betrachtet (Fläche unter den Kurven) ist eine Einsparung von 14 % gegenüber dem „Hauptszenario“ zu erzielen.

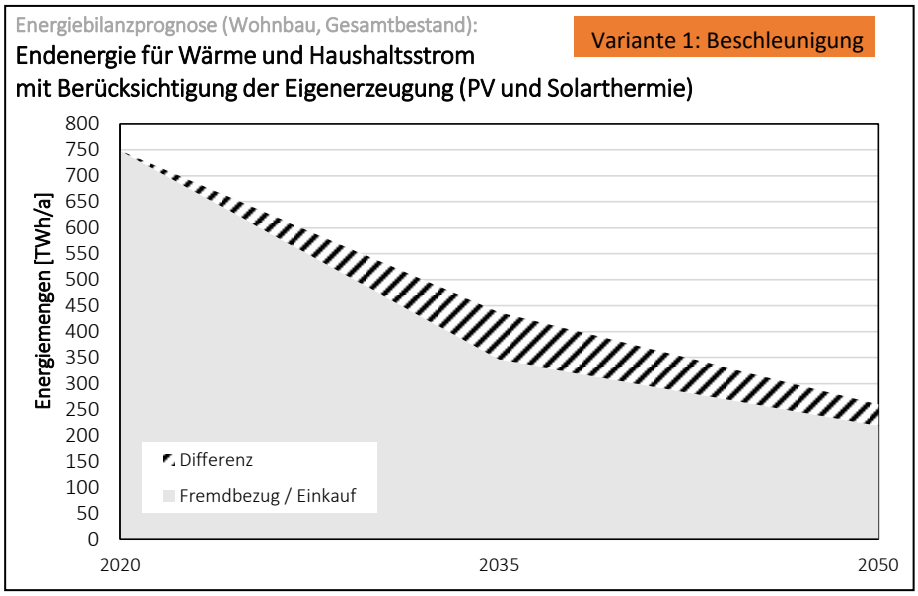


Abbildung 204 Variante 1 Gesamtbestand – Endenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

Die analoge Betrachtung gilt für die Energiekosten. Direkt vergleichbar ist Abbildung 205 mit Abbildung 181 (aus Anhang 4.3.2). Über den Gesamtzeitraum kumuliert ergibt sich eine Einsparung von knapp 350 Mrd. € (schraffierte Fläche) bzw. 20 % gegenüber dem „Hauptszenario“.

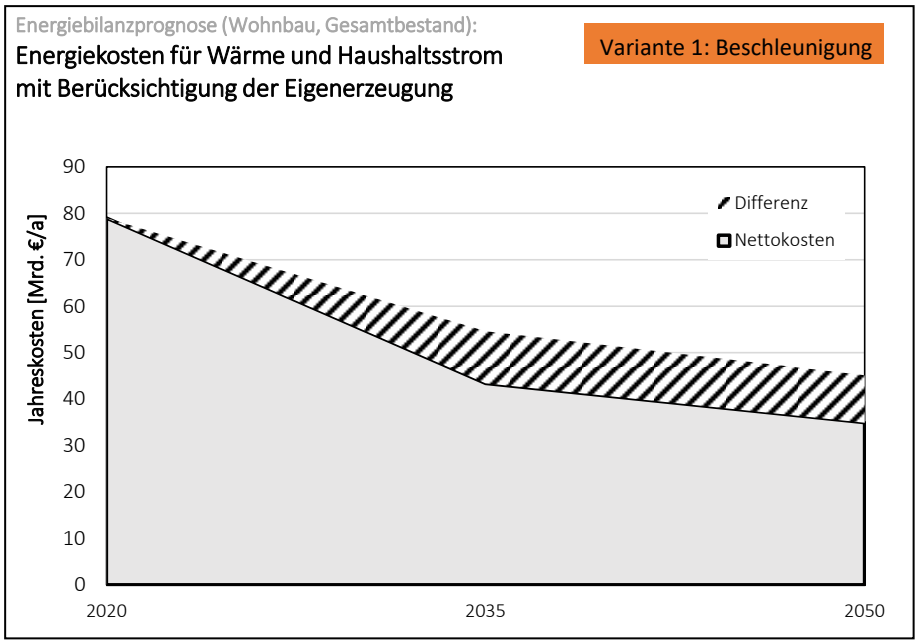


Abbildung 205 Variante 1 Gesamtbestand – Energiekosten mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

4.4.4 Emissionsminderung und Fazit

Der Auslöser zur Erstellung des Szenarios 1 „Beschleunigung“ war die nicht ausreichende Emissionsminderung zum Einhalten des Emissionsbudgets. Abbildung 206 zeigt im direkten Vergleich zu Abbildung 187 (aus Anhang 4.3.4) die erzielbaren Einsparungen. Die Emissionen sinken in der ersten Zeitperiode 2020 - 2035 sehr viel stärker als die Endenergie. Das lässt sich nur erreichen durch die Annahmen zum beschleunigten Umbau der Energiewirtschaft (PV und Windkraft).

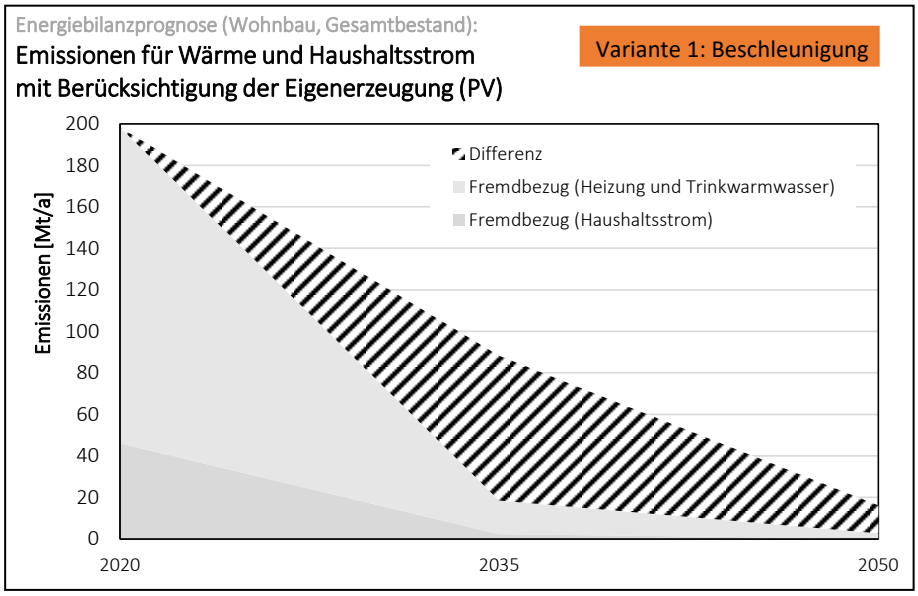


Abbildung 206 Variante 1 Gesamtbestand – Emissionen mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

Abbildung 207 zeigt die daraus ableitbare kumulierte Darstellung der Emissionen für die Variante 1 „Beschleunigung“. Das Gegenstück ist Abbildung 197 für das „Hauptszenario“ in Anhang 4.3.7. Der alte und neue Verlauf der Budgetausschöpfung sind vergleichend in dem Bild eingetragen. In der Summe der Maßnahmen kann auch mit Variante 1 ab etwa 2060 von einer „näherungsweisen Klimaneutralität“ ausgegangen werden, wobei bis dahin etwa 1800 Mt an Emissionen durch den Wohnbausektor ausgestoßen wurden. das Ziel wird nicht vollständig erreicht.

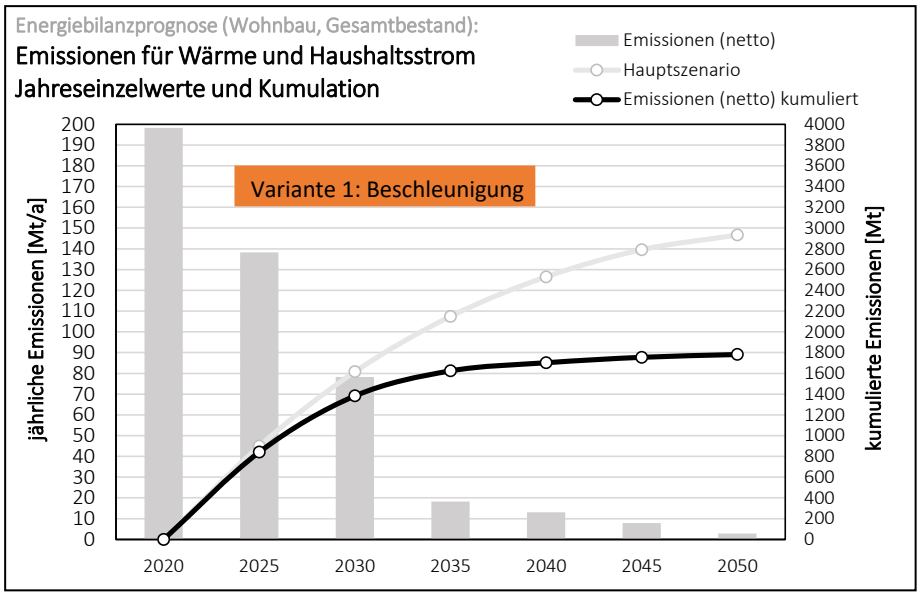


Abbildung 207 Variante 1 Gesamtbestand – Emissionsbudget [eigene Darstellung]

Mit der Variante 1 „Beschleunigung" konnte nachgewiesen werden, dass das Emissionsbudget zum Erreichen des 2°C-Ziels einzuhalten ist, wenn:

- ab sofort Maßnahmen zur Suffizienz umgesetzt werden (stark gebremstes Wachstum der pro-Kopf-Wohnfläche, moderate Einsparungen des pro-Kopf-Wasser- und Haushaltsstromverbrauchs),
- ab sofort praktisch alle Neubauten etwa (bauliches) Passivhausniveau aufweisen, keinen fossil befeuerten Kessel aufweisen sowie mit Photovoltaik ausgestattet werden,
- ab sofort die Sanierungen der Gebäudehülle zu etwa 80 % dem Passivhausniveau entsprechen (nur, wenn Restriktionen gegeben sind, werden Abstriche gemacht), fossil befeuerte Kessel nur noch eingebaut werden, wenn eine Hybridanlage mit Wärmepumpe aufgebaut wird, jedes Jahr 2 % aller Wohnbauten mit einer PV-Anlage ausgestattet werden,
- ab sofort Maßnahmen umgesetzt werden, die in den nächsten 15 Jahren die Emissionsfaktoren für Erdgas und Heizöl halbieren (etwa 50 % Beimischung von PtX) und den darauffolgenden 15 Jahren erneut eine Halbierung bewirken
- ab sofort Maßnahmen umgesetzt werden, die in den nächsten 15 Jahren den Emissionsfaktor für Strom um den Faktor 20 dezimieren, so dass er bereits 2035 fast regenerativ ist
- ab sofort Maßnahmen umgesetzt werden, die in den nächsten 15 Jahren den Emissionsfaktor für Fernwärme vierteln und in den darauffolgenden 15 Jahren noch einmal eine Viertelung bewirken.

Werden diese Maßnahmen (oder alternative mit vergleichbarer Wirkung für den Wohnungsbau) nicht umgesetzt, ist das 2°C-Ziel nicht zu halten. Es ist zumindest jetzt schon erkennbar, dass es nicht darum geht, die eine ODER andere Maßnahme zu ergreifen, sondern dass es ein UND ist.

4.5 Hauptszenario: Ergebnisse für die Sanierung

Das nachfolgende Kapitel bezieht sich auf das „Hauptszenario" und die Festlegungen aus Anhang 4.2. Anders als vorher, erfolgt eine separate Betrachtung nur der Bestandsgebäude.

Nur für die Gebäude, die energetisch verbessert werden – ohne Einbezug der neu erstellten Gebäude – werden daher Kosten und Nutzen näher betrachtet. Dazu werden einerseits die Investitionskosten geschätzt, andererseits die Einsparungen nur an den Bestandsgebäuden (ohne Neubau) berechnet.

Damit sinkt die betrachtete Wohnfläche von heute 3,754 Mrd. m² Wohnfläche auf 3,587 Mrd. m² Wohnfläche im Jahr 2050. Die Minderung ist durch Abriss zu erklären. (Zum Vergleich: der Gesamtbestand entwickelt sich im gleichen Zeitraum von 3,754 Mrd. m² auf 4,377 Mrd. m² Wohnfläche.)

Die Berechnungsabläufe zur Ermittlung der Endenergie und Emissionen sind ansonsten analog Anhang 4.3.

4.5.1 Abschätzung der Investitionskosten

Die Grundlagen der Sanierungskostenberechnung sind Anhang 4.2 zu entnehmen. Es sind jeweils nur die Festlegungen relevant, die die energetische Sanierung betreffen (nicht den Abriss und den Neubau). Außerdem sind nur diejenigen Maßnahmen relevant, die zu einer Verbesserung des energetischen Standards oder eine Minderung der Emissionen führen. Wird beispielsweise eine Wärmepumpe nach 25 Jahren durch eine neue Wärmepumpe ersetzt, sind die Kosten nicht relevant.

Die für das gewählte Szenario relevante Datengrundlage zeigt Tabelle 147. Unter den „Wohnflächen" sind diejenigen zu verstehen, die in dem jeweiligen 15-Jahresintervall einer Verbesserung unterzogen werden. In etlichen Rubriken nimmt die Fläche in der Periode (II) ab. Das ist ein Indiz dafür, dass dann auch Gebäude saniert werden, die keine weitere energetische Verbesserung mehr erfahren.

Periode	(I) 2020 - 2035			(I) 2020 - 2035			Kostenkennwerte	
Maßnahme	Wohnfläche	VK	EMK	Wohnfläche	VK	EMK	VK	EMK
	[Mio. m²]	[Mio. €]	[Mio. €]	[Mio. m²]	[Mio. €]	[Mio. €]	[€/m²]	[€/m²]
Außenwand	1.251	145.890	77.762	947	123.925	67.276	123	66
obere Geschossdecke	490	18.261	18.261	384	13.466	13.466	36	36
Dach	598	73.919	24.902	443	53.024	15.892	122	39
Kellerdecke	616	17.334	17.334	259	12.381	12.381	34	34
Bodenplatte	258	27.105	27.105	97	12.902	12.902	113	113
Fenster	1.609	175.365	48.331	1.575	171.664	47.311	109	30
Lüftung mit WRG	110	8.260	8.260	104	7.835	7835	75	75
Photovoltaik	837	45.450	45.450	912	49.646	49.646	54	54
Gas-Brennwertkessel	668	33.799	0	112	5.115	0	50	0
Holzkessel	142	18.583	12.174	86	9.256	5.557	122	78
Fernwärmeanschluss	14	541	-369	0	0	0	39	-26
Erdreichwärmepumpe	465	65.720	52.131	433	48.874	37.356	128	100
Außenluftwärmepumpe	553	55.982	36.830	491	39.216	22.868	91	57
VK: Vollkosten (jedoch noch ohne Zuschlag für Kostengruppe 700), EMK: energiebedingte Mehrkosten (dto.)								

Tabelle 147 Prognose Sanierungsobjekte – Grundlagen der Kostenschätzung für die Bestandssanierung [eigene Darstellung]

Zur Einschätzung der Größenordnung sind die Kostenkennwerte – bezogen auf die entsprechend sanierte Wohnfläche – zusätzlich angegeben. Es handelt sich um einen Mittelwert über alle Gebäude und beide Zeitperioden. Würde in einem Gebäude eine Vollmodernisierung stattfinden – bestehend aus Dämmung der Außenwand, der oberen Geschossdecke, und Kellerdecke, dem Einbau neuer Fenster, einer Photovoltaikanlage und Außenluftwärmepumpe – summieren sich die Werte auf: 447 €/m² (davon 277 €/m² energiebedingte Mehrkosten).

Vollkosten

Eine grafische Aufbereitung der Werte zeigt Abbildung 208. Es wird vereinfachend bei der Darstellung davon ausgegangen, dass innerhalb der beiden 15-jährigen Perioden die Höhe der Investition jedes Jahr identisch ist. Der Zuschlagsfaktor von 1,3 für die Kostengruppe 700 (siehe Anhang 5.8.2) ist in den Werten berücksichtigt.

Insgesamt werden nach Berechnung der Gutachter in den betrachteten 30 Jahren 1604 Mrd. € als Vollkosten investiert, die zu einer energetischen Verbesserung der Gebäude beitragen (Flächenintegral in der Grafik). Das sind jedes Jahr durchschnittlich 53 Mrd. € über den Gesamtzeitraum von 30 Jahren bzw. von im Mittel 59 Mrd. € im ersten und von im Mittel 47 Mrd. € im zweiten Zeitraum. Die Kosten der baulichen Verbesserung betragen dabei 69 % der genannten Summe, die Hauptwärmeerzeuger führen zu 22 % der Kosten, die Investition in die Zusatzerzeuger führt zu den restlichen 9 % der angegebenen Kosten.

Darüber hinaus sind – hier nicht dargestellt – weitere Kosten zu erwarten, die zum üblichen Bestandserhalt eingesetzt werden, z. B. der Sanierung von Rohrleitungen usw., aber nicht zu einer energetischen Verbesserung führen.

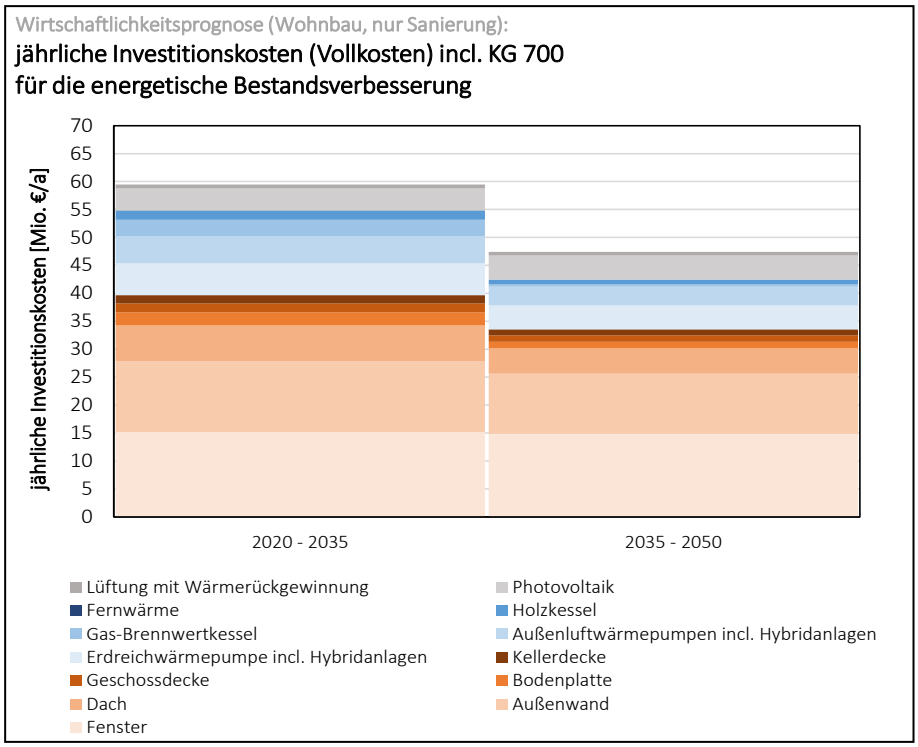


Abbildung 208 Prognose Sanierungsobjekte – Jährliche Investitionskosten: Vollkosten [eigene Darstellung]

Energiebedingte Mehrkosten

Die energiebedingten Mehrkosten sind – unter Verwendung des gleichen Maßstabes – in Abbildung 209 dargestellt. Es gelten die gleichen Randdaten wie für die Erstellung der vorherigen Grafik.

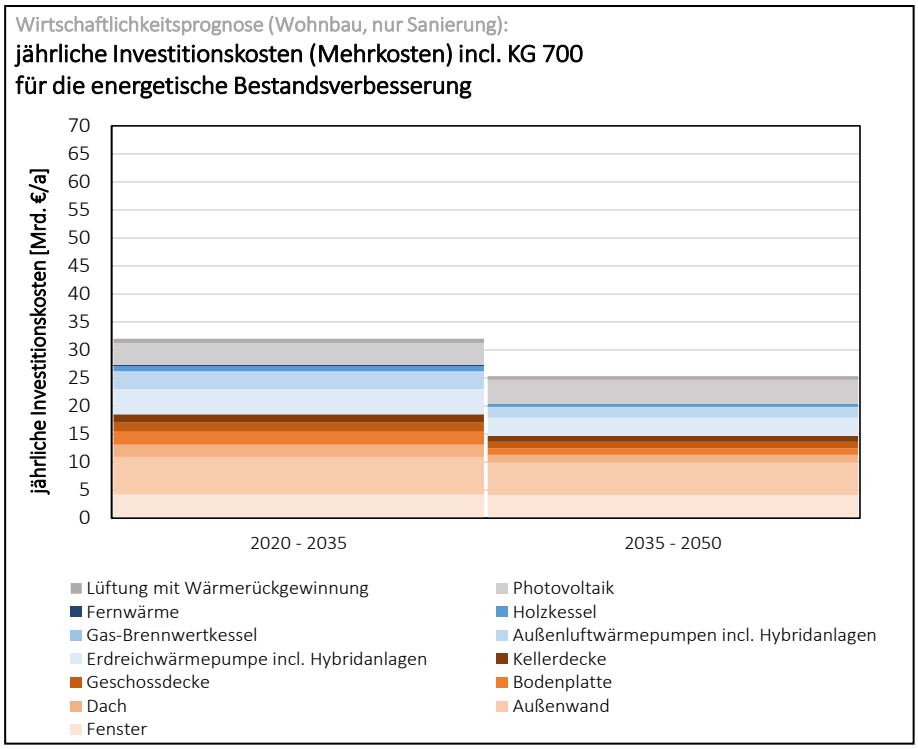


Abbildung 209 Prognose Sanierungsobjekte – Jährliche Investitionskosten: Anteil der energiebedingte Mehrkosten [eigene Darstellung]

Über die 30 Jahre werden 859 Mrd. an energiebedingten Mehrkosten berechnet, d. h. durchschnittlich 29 Mrd. €/a (auch hier im ersten Zeitintervall mit 32 Mrd./a etwas mehr als im zweiten Zeitintervall mit 25 Mrd./a). Da die Kosten für die Zusatzerzeuger in kompletter Höhe den energiebedingten Mehrkosten zuzuordnen sind, liegt ihr Anteil an den Kosten bei 17 %. Entsprechend geringer sind die beiden anderen Rubriken.

4.5.2 *Endenergie*

Wird nur der „Wohnbaubestand“ im Zeitverlauf betrachtet, d. h. alle Gebäude, die bereits vor 2020 vorhanden waren, ergibt sich die Endenergie nach Abbildung 210. Der Startwert der Darstellung ist identisch zu der Abbildung 175 in Anhang 4.3.1: es werden 2020 für Wärme und Haushaltstrom insgesamt 757 TWh/a Endenergie aufgewendet. Während der Gesamtbestand – aufgrund des inkludierten Neubaus – bis 2050 auf einen Wert von 322 TWh/a zustrebt, beträgt der Wert nur für den Bestand am Ende der Betrachtung 285 TWh/a. Der Anteil der Wärmepumpen ist in den älteren Gebäuden geringer, als wenn der Neubau einbezogen werden würde. Insgesamt sind die Darstellungen aber sehr ähnlich

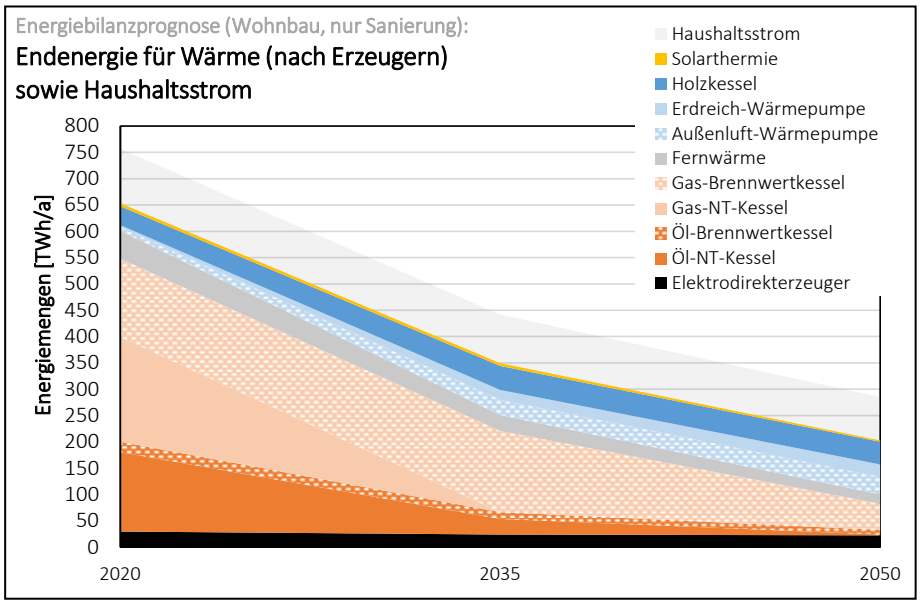


Abbildung 210 Prognose Sanierungsobjekte – Endenergie nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung]

Wird die gebäudenah erzeugte und genutzte Endenergie berücksichtigt, fällt der Bedarf etwas geringer aus, siehe Abbildung 211. Die Darstellung ist vergleichbar mit der Abbildung 178 aus Anhang 4.3.1 – jeweils nur der Neubau unterscheidet die Darstellungen. Der Startwert der Endenergie beträgt – unter Berücksichtigung der Solarthermie und Photovoltaik – nur 749 TWh/a. Für die bestehenden Gebäude strebt der Wert am Ende der Betrachtungen 2050 auf 244 TWh/a zu. Wird der Neubau mit berücksichtigt liegt der Endwert bei 267 TWh/a. Die Durchdringung des Bestandes mit Photovoltaik verläuft zwar etwas langsamer als beim Neubau, dennoch sind die Verhältnisse 2050 sehr ähnlich.

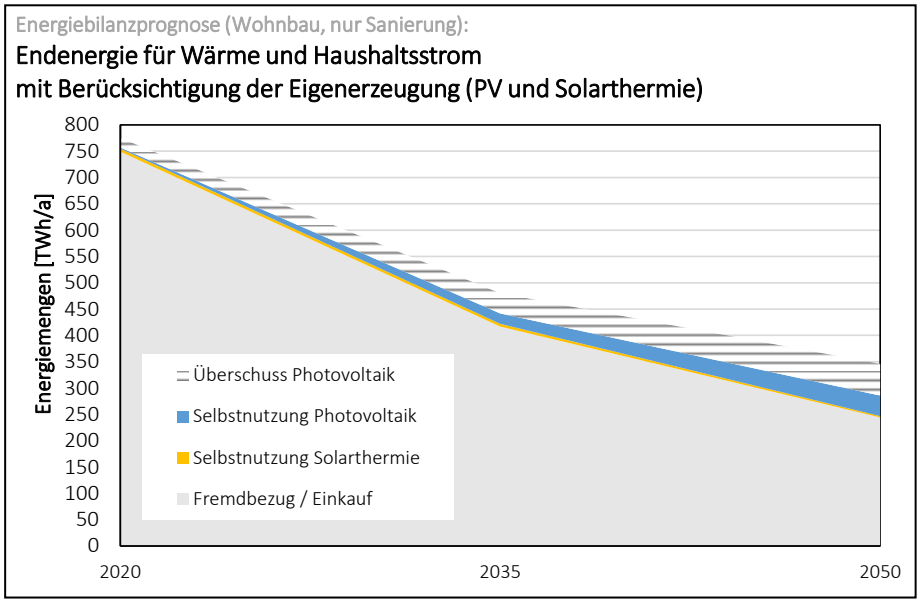


Abbildung 211 Prognose Sanierungsobjekte – Endenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

4.5.3 Primärenergie und Emissionen

Die Primärenergie und die Emissionen für die bereits vor 2020 gebauten Gebäude ohne Neubau zeigen die nachfolgenden Abbildungen. Die Vergleichsdarstellungen des Gesamtbestandes sind Anhang 4.3.3 und 4.3.4 zu entnehmen.

Abbildung 212 zeigt die Prognose der Emissionen zwischen 2020 und 2050. Für den Anteil der fremdbezogenen Energien sinkt der Wert von heute 198 Mt/a auf 15 Mt/a. Der Anteil der durch PV-Stromerzeugung und -nutzung vermiedenen Emissionen liegt bei 18 %. (Wird der Gesamtbestand betrachtet, sinken die Emissionen auf 16 Mt/a (siehe Anhang 4.3.4). Der Neubau macht zwar einen hohen Flächenanteil aus, ist aber energetisch besser ausgestattet, so dass er den Gesamtschnitt unterdurchschnittlich prägt.

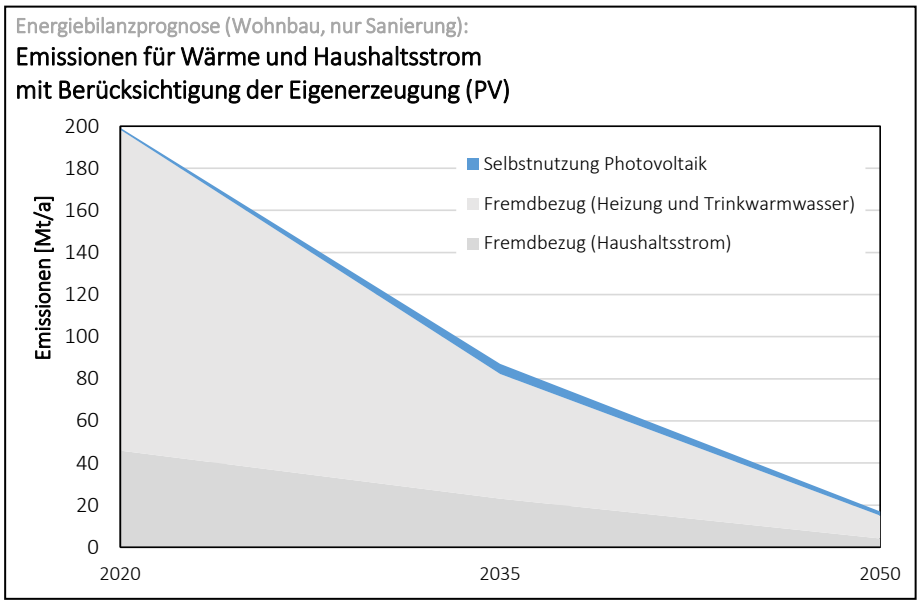


Abbildung 212 Prognose Sanierungsobjekte – Emissionen mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

Abbildung 213 zeigt die entsprechende Grafik für die Primärenergie. Der Primärenergieeinsatz sinkt in den bestehenden Gebäuden von heute 875 TWh/a auf 66 TWh/a im Jahr 2050. Wird der Neubau mit berücksichtigt, liegt der Wert bei 70 TWh/a (siehe Anhang 4.3.3).

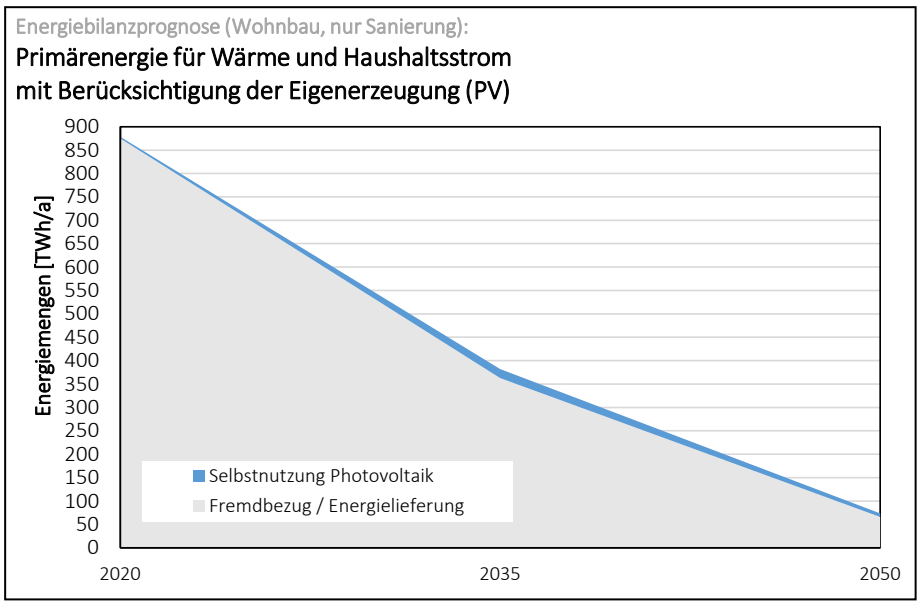


Abbildung 213 Prognose Sanierungsobjekte – Primärenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

4.5.4 Gesamtkosten

Für den Bestand mit Baujahr bis 2020 kann eine Gesamtkostenberechnung der energetischen Sanierung erfolgen. Berücksichtigt werden die in Anhang 4.5.1 geschätzten Investitionskosten (aus denen auch Wartungs- und Unterhaltskosten abgeleitet werden können) sowie die Endenergien aus Anhang 4.5.2, die in Energiekosten umgerechnet werden.

Energiekosten

Abbildung 214 zeigt die Energiekosten für die Bestandsgebäude mit Baujahr bis 2020. Die Nettoenergiekosten ergeben sich aus den Kosten für Wärme und Strom (Ausgaben), die es ohne gebäudenahe Stromerzeugung geben würde, abzüglich der Einnahmen aus dem Verkauf von PV-Überschüssen und abzüglich der vermiedenen Kosten durch die Selbstnutzung von PV-Strom. Das Bild ist vergleichbar mit Abbildung 181 aus Anhang 4.3.2 (welches auch den Neubau enthält).

Für den Bestand belaufen sich die Nettoenergiekosten heute auf 79,0 Mrd. €/a. Sie sinken über 51,0 Mrd. €/a im Jahr 2035 auf 41,1 Mrd. €/a am Ende des Prognosezeitraumes. (Wird der künftige Neubau mitberücksichtigt, lauten die beiden Werte 54,2 Mrd. €/a und 44,8 Mrd. €/a).

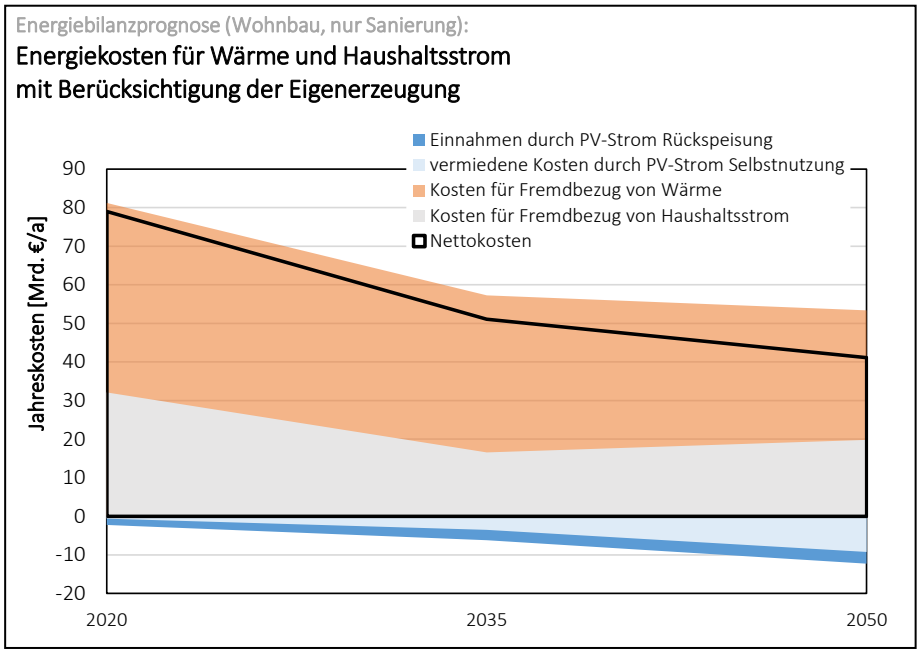


Abbildung 214 Prognose Sanierungsobjekte – Energiekosten mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

Werden aus den Energiekosten (Wärme und Strom) und den Wohnflächen Kennwerte gebildet, lassen sich Neubau und sanierter Bestand gegenüberstellen – hier nur vergleichsweise:

- Gesamtbestand 2050 (alle Gebäude): 44,8 Mrd. €/a, 4377 Mrd. m² → 10,2 €/(m²a)
- nur Altbestand 2050 (alle Gebäude): 41,1 Mrd. €/a, 3587 Mrd. m² → 11,5 €/(m²a)
- Neubau 2050 (alle Gebäude): 3,7 Mrd. €/a, 790 Mrd. m² → 4,7 €/(m²a).

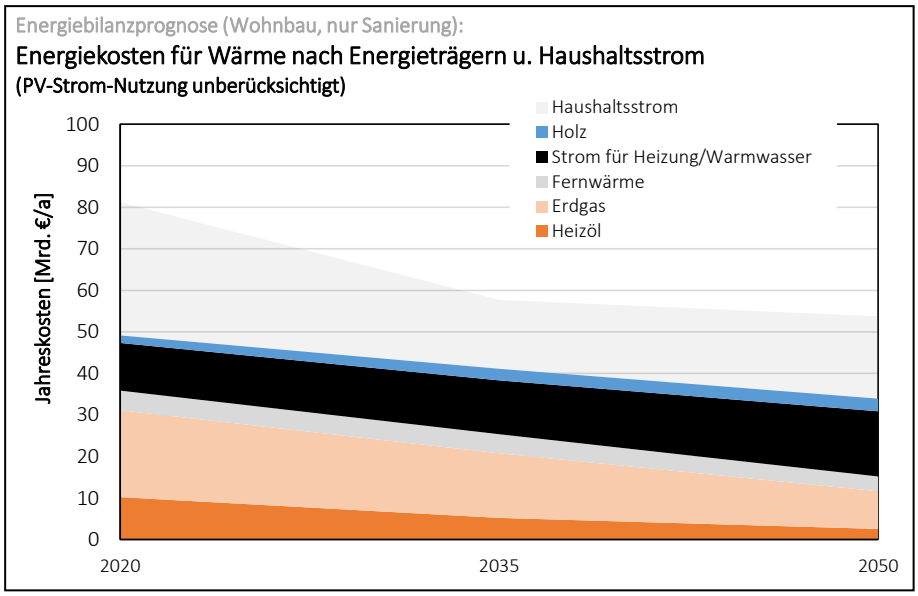


Abbildung 215 Prognose Sanierungsobjekte – Energiekosten nach Energieträgern [eigene Darstellung]

Kapital- sowie Wartungs- und Unterhaltskosten

Aus den Investitionskosten werden Jahreskosten ermittelt. Da jeweils nur ohnehin erforderliche Sanierungsanlässe als Investitionszeitpunkte gewählt werden, gelten die energiebedingten Mehrkosten. Das Verfahren ist in Anhang 6.1.8 beschrieben (es ist identisch wie für die Mikroperspektive). Berücksichtigt werden die unterschiedlichen Nutzungsdauern der einzelnen Bauprodukte sowie der Finanzierungszins. Da in diesem Gutachten keine Lernkurven berücksichtigt werden, gibt es keine veränderlichen Investitionskosten.

Aus einem typischen Jahr der Periode (I) 2020 - 2035 und der investierten Summe von jährlich 59,5 Mrd. € sind energiebedingte Investitionsmehrkosten von 31,9 Mrd. € relevant. Sie werden kapitalisiert und führen zu Kapitalkosten von 1,25 Mrd. €/a (in rechnerisch 25,5 Jahren ist die Investition abbezahlt). Da im Folgejahr gleiches erneut passiert, summieren sich die Ausgaben jeweils, siehe Abbildung 216 (blaue Fläche).

Für die Periode (II) von 2035 bis 2050 ist dies vergleichbar, jedoch mit etwas geringeren Investitionssummen. Es kommen dann jährlich 1,01 Mrd. €/a an Kapitalkosten auf den Vorjahreswert hinzu. Am Ende des Prognosezeitraumes liegen die jährlichen energiebedingten Kapitalkosten bei 34,0 Mrd. €/a.

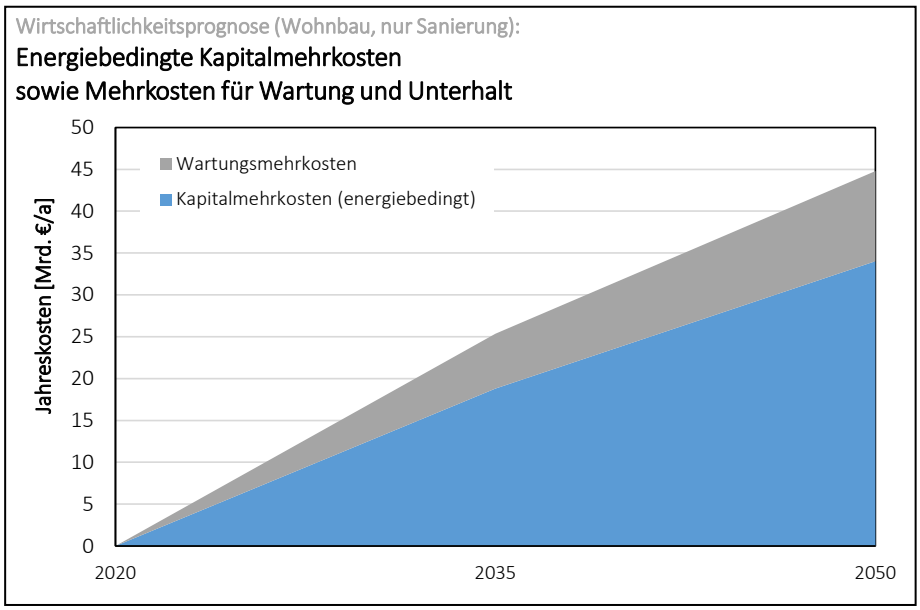


Abbildung 216 Prognose Sanierungsobjekte – Mehrkosten für Kapital sowie für Wartung/Unterhalt [eigene Darstellung]

Die Ermittlung der Wartungskosten folgt der Beschreibung aus Anhang 5.8.3. Es werden prozentuale Ansätze der Investitionskosten geltend gemacht. Allerdings sind nur die Mehrkosten relevant, die sich aus der energetischen Verbesserung ergeben. In den ersten 15 Jahren kommen jährlich jeweils 0,35 Mrd. €/a hinzu, in den weiteren 15 Jahren 0,28 Mrd. €/a. Auch diese Werte kumulieren sich über die Zeit – analog den Kapitalkosten.

Gesamtkosten

Aus den Energiekosten des Bestandes, den energiebedingten Mehrkosten (die zu einer energetischen Verbesserung geführt haben) und den zugehörigen Mehraufwendungen an Wartung (z. B. für die Photovoltaik) ergeben sich Gesamtkosten. Sie sind in Abbildung 217 dargestellt.

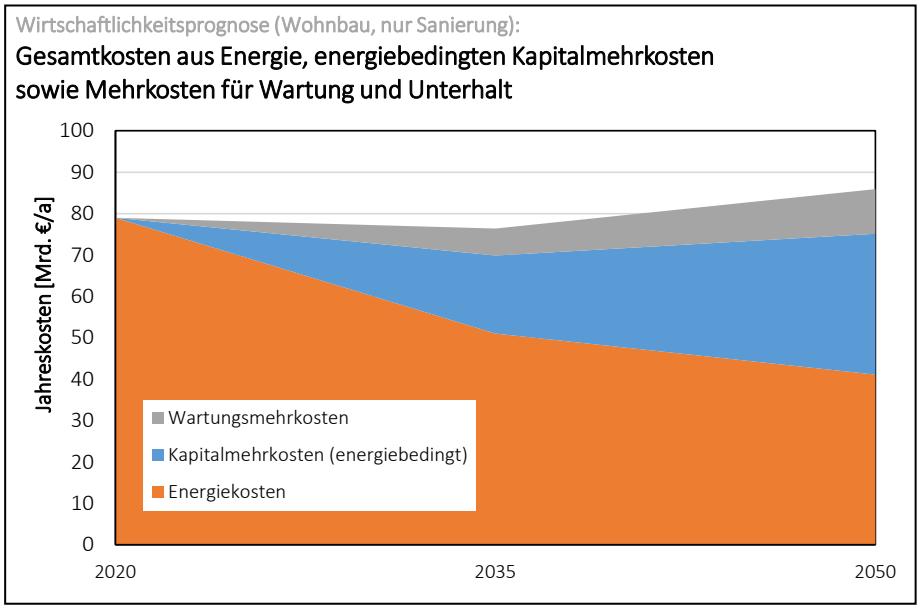


Abbildung 217 Prognose Sanierungsobjekte – Gesamtkosten der energetischen Modernisierung [eigene Darstellung]

Es zeigt sich, dass eine Kostenkonstanz zumindest in den nächsten 15 Jahren realisierbar ist. Erst in der Zeit nach 2035 steigen die Gesamtkosten leicht an. Dies ließe sich auffangen, wenn die Energiepreise nach 2035 nicht mehr steigen würden.

4.5.5 Fazit zur Sanierung

Für die Sanierung kann – unter den gegebenen Annahmen eine Grenzwirtschaftlichkeit festgestellt werden. Dennoch werden nachfolgend Abschätzungen zur Förderung getroffen. Vorab werden zwei Aspekte – die Sanierungsrate und -tiefe sowie der äquivalente CO_2-Preis näher beleuchtet.

Sanierungsrate und -tiefe bzw. Sanierungsquote für den Baukörper

Werden die Transmissions- und Lüftungsverluste des Baukörpers auf die Wohnfläche bezogen, ergibt sich die Darstellung nach Abbildung 218. Da es im EZFH mehr Hüllfläche je Quadratmeter Wohnfläche gibt, schneidet in dieser Betrachtung das EZFH entsprechend schlechter ab. Alle Maßnahmen zur Dämmung und zum Fenstertausch spiegeln sich in dem Kurvenverlauf wieder.

Aus dem Kennwert für den „Baustandard h“, der auch einfach messtechnisch zu bestimmen ist (vgl. Anhang 5.3.3) kann auch ein Monitoringziel für die Überprüfung der Sanierungsziele abgeleitet werden. Es bündelt die beiden Aspekte der „Sanierungsrate“ und „Sanierungstiefe“ (vgl. Anhang 5.11.1 und 5.11.2) in einer Größe, dieser könnte beispielsweise der Begriff „Sanierungsquote“ zugeordnet werden (vgl. Anhang 5.11).

Die dargestellte Verminderung von 2,13 auf 1,19 W/(m²K) bei den EZFH bzw. von 1,71 auf 0,97 W/(m²K) bei den MFH entspricht einer Sanierungsquote (Kombination von Sanierungsrate und -tiefe) von 1,9 %/a.

Die zeitliche Sanierungsrate ist zwar vergleichsweise gering, weil die gewählten Nutzungsdauern lang sind. Jedoch ist die gewählte Sanierungstiefe groß, weil überwiegend „best practice“-Maßnahmen umgesetzt werden.

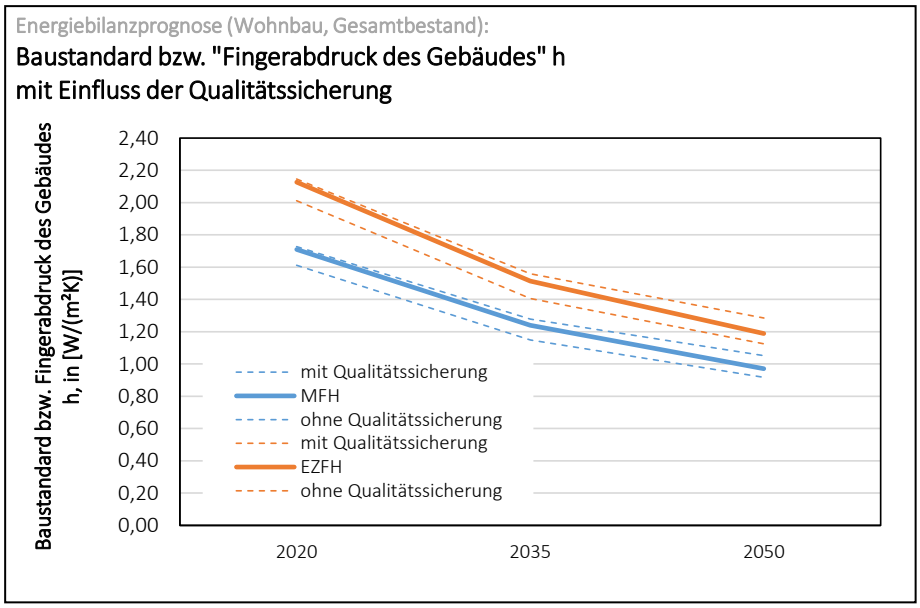


Abbildung 218 Prognose Sanierungsobjekte – Qualitätssicherung und Baustandard [eigene Darstellung]

Äquivalenter CO_2-Preis aller Maßnahmen

Die bis 2050 insgesamt erzielten Emissionsminderungen betragen kumuliert über den Zeitraum von 30 Jahren 3115 Mt (10^6 t). Referenz ist die Annahme, dass der Wert von 2020 unverändert (konstant) erhalten bliebe. Das prognostizierte Szenario ist in Abbildung 212 dargestellt (die hier genannte Zahl ist der Flächeninhalt unter der Kurve).

Im gleichen Zeitraum von 30 Jahren ergeben sich kumulierte Kapitalkosten für die energiebedingten Investitionen von 540 Mrd. € sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten, die daraus erwachsen, von 180 Mrd. € (10^9 €). Beide Werte ergeben sich aus der Darstellung nach Abbildung 216 (die hier genannten Zahlen sind die Flächeninhalte unter der Kurve).

Der äquivalente CO_2-Preis wird berechnet, wie in Anhang 6.1.2 für die Mikroperspektive erläutert. Er ist das Verhältnis von jährlichen Mehrkosten zu jährlichen Emissionsminderungen einer Maßnahme oder Maßnahmenkombination. Dabei sind alle Kosten und Emissionen vollständig zu erfassen.

Mit obigen Zahlen liegt der gemittelte CO_2-Preis aller Maßnahmen bei 259 €/t. Dieser Wert ist allerdings nicht regelkonform bestimmt. Denn die berücksichtigten Kosten im Zähler sind nicht vollständig. Es fehlen die Kosten für den Umbau der Energiewirtschaft (Minderung der Emissionsfaktoren des gelieferten Stroms oder der gelieferten Wärme), deren Emissionsvorteil aber im Nenner enthalten ist. Der korrekte Wert ist im Rahmen dieses Gutachtens nicht bestimmbar; es wird auf andere Makrountersuchungen, z. B. die Studie von Sterchele et al. verwiesen [68].

Eine Abschätzung des CO_2-Preises nur für die Maßnahmen am Gebäude und der Technik im Gebäude – ohne den Einfluss veränderter Energieträger – könnte näherungsweise erfolgen. Die Emissionsfaktoren der gelieferten Energieträger werden dafür konstant gehalten. (Allerdings ist dieses Vorgehen nur akademischer Natur, da das Einhalten der Klimaziele mit den Energieträgern von heute unmöglich ist.)

Es kann abgeschätzt werden, dass der sich ergebende gemittelte CO_2-Preis aller Maßnahmen etwa 50 % höher liegt als oben angegebener, d. h. in der Größenordnung von 350 bis 400 €/t. Denn aus den Untersuchungen wurde bereits deutlich, dass ein Drittel der insgesamt erzielbaren Emissionsminderung sich aus Maßnahmen am Gebäude ergibt, die anderen zwei Drittel aus dem Umbau der Energiewirtschaft.

Mögliche Investitionskostenzuschüsse

Für die bis 2050 zu sanierenden Gebäude wird ein Investitionskostenzuschuss abgeschätzt. Anhaltswerte zu einer quantitativen Abschätzung notwendiger Investitionskosten liefern die Betrachtungen in der Mikroebene des Anhangs 3. Basis der weiteren Überlegungen ist, dass Maßnahmen immer dann umgesetzt werden, wenn ohnehin eine Sanierung nach der Nutzungsdauer ansteht, daher gelten „Mehrkostenbetrachtungen".

Es lässt sich zunächst qualitativ auf Basis der Mikroebene schlussfolgern:

- Die Maßnahmen an der Gebäudehülle der Periode (I) und ein Großteil der Maßnahmen in Periode (II) betreffen Hüllbauteile des Ausgangszustandes „schlecht" oder „mittel".
    - Die meisten Dämmmaßnahmen an Wänden, Dächern, Geschoss- und Kellerdecken sind auch ohne Fördermittel oder mit sehr geringen Zuschüssen (unter 10 %) wirtschaftlich, siehe Anhang 3.2.5.
    - Lediglich die nachträgliche Dämmung von Bodenplatten erfordert einen Zuschuss von etwa 30 %, weil das Verhältnis von Investitionskosten und Einsparung ungünstiger ist.
    - Die Fenstersanierung ist nicht von allein wirtschaftlich (Zuschuss > 50 %); allerdings könnte ein möglicher Zuschuss nicht in voller Höhe ausgeschüttet werden, da dieses Bauteil ohnehin getauscht wird, auch wenn keine Wirtschaftlichkeit erreicht wird.
- Die Maßnahmen an den Hauptwärmeerzeugern erfordern – je nach Erzeugertyp und Ausgangslage im Gebäude – Zuschüsse von mindestens 75 % bis weit über 100 % (Komplettzuschuss und trotzdem kein Erreichen der Wirtschaftlichkeit), siehe Anhang 3.3.7; allerdings ist zum Erreichen der Emissionsziele ein Wärmeerzeugerumbau notwendig.
- Die Photovoltaik benötigt keine Investitionskostenzuschüsse, solange die Einspeisevergütung über das EEG geregelt ist und mindestens die Gestehungskosten gezahlt werden, siehe Anhang 3.5.4.
- Für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung konnte eine Wirtschaftlichkeit nur nachgewiesen werden mit Zuschüssen von ca. 50 bis 90 % der Investitionskosten, weshalb entsprechende Ausbauanteile im Rahmen des „Hauptszenarios" als eher gering angenommen wurden.
- In Maßnahmenpaketen subventionieren die günstigen Maßnahmen die ungünstigen, siehe Anhang 3.8,
    - wobei jeweils Teile des Paketes vorgezogene Maßnahmen sind, für die strenggenommen dann die Vollkosten gelten (zumindest anteilig),
    - die untersuchten exemplarischen Pakete der Vollsanierungen für EZFH und MFH kommen mit Zuschüssen von deutlich unter 10 % aus.

Um für den Investor tatsächlich einen Anreiz zu bieten, erscheint für die baulichen Maßnahmen – vor allem an Bauteilen mit sehr langen Nutzungsdauern, die „von allein" nicht angefasst werden würden – eine Förderquote von 10 bis 20 % als sinnvoll (Annahme: 15 %). Dies liegt in der Größenordnung heutiger Einzelmaßnahmenförderungen der KfW und würde die Umsetzung beschleunigen. Dieser Wert wird auch für Fenster angenommen, auch wenn die zur Erreichung einer Wirtschaftlichkeit tatsächlich notwendige Förderung damit nicht erreicht wird (aufgrund der oben gegebenen Begründung). Lediglich für Bodenplatten liegt der Wert mit 40 % deutlich höher.

Bei den Haupterzeugern könnte ein Zuschuss bei etwa 50 % liegen (für die Kostenschätzung relevant). Damit ist zwar noch keine Wirtschaftlichkeit erreicht, aber der Wert erscheint den Gutachtern als Umsetzungsanreiz hoch genug. Alternativ wird beim Aufbau des Hybridsystems die Wärmepumpe bezuschusst, wenn der Bauherr den Kessel zahlt, was einen Zuschuss von 60 bis 75 % der Gesamtinvestition bedeutet (hier nicht weiterverfolgt).

Es besteht keine Notwendigkeit, die Photovoltaik separat zu bezuschussen. Solarthermie und Lüftungsanlagen könnten im Rahmen eines Maßnahmenpaketes bezuschusst werden (daher gelten etwa 25 % Zuschuss).

Für Maßnahmenpakete mit dem Ziel einer Vollmodernisierung ergeben sich Mischkalkulationen analog der bisherigen KfW-Effizienzhaus-Förderung. Für die in diesem Gutachten definierten Maßnahmen (die einem der besseren Effizienzhausniveaus von etwa EH55 entsprechend dürften) werden etwa 20 bis 30 % als realistisch angesehen (Annahme 25 %).

Aus den in Anhang 4.5.1 zusammengestellten Investitionskosten (incl. der Kostengruppe 700, damit sicher eine Qualitätssicherung finanzierbar ist), ergeben sich unter Berücksichtigung der genannten Einzelförderquoten und als Summe von Einzelmaßnahmen jährlich erforderliche Gesamtzuschüsse von:

- Periode (I): Investition 59,5 Mrd. €/a → Zuschuss 12,8 Mrd. €/a (mittlere Förderquote 22 %)
- Periode (II): Investition 48,1 Mrd. €/a → Zuschuss 10,0 Mrd. €/a (mittlere Förderquote 21 %)

Würden alle Maßnahmen Teil von Maßnahmenpaketen sein, lägen bei dem angenommenen Fördersatz von 25 % die jährlichen Gesamtausgaben bei:

- Periode (I): Investition 59,5 Mrd. €/a → Zuschuss 14,9Mrd. €/a (mittlere Förderquote 25 %)
- Periode (II): Investition 48,1 Mrd. €/a → Zuschuss 12,0 Mrd. €/a (mittlere Förderquote 25 %)

Hinzu kommt evtl. eine Neubauförderung – die hier nicht näher spezifiziert werden kann, weil keine Kostenschätzung für die Neubauten erfolgt. Alternativ werden die Neubauanforderungen vorgeschrieben und keine Förderung ausgeschüttet. Eine eventuell sich ergebende Unwirtschaftlichkeit könnte der Bauherr durch Suffizienzmaßnahmen (Wahl einer geringeren Wohnfläche) ausgleichen.

Darüber hinaus fällt die Vergütung des überschüssigen Photovoltaik-Stroms an, siehe Anhang 4.3.2. Es handelt sich um jährlich weitere ca. 4,2 Mrd. €/a in Periode (I) und 9,2 Mrd. €/a in Periode (II). Außerdem wird der Umbau der Energiewirtschaft anteilig zu subventionieren sein, wobei eine Kostenschätzung nicht Umfang des vorliegenden Gutachtens ist.

Entwicklung der Energieträgerbepreisung

Die im Rahmen dieses Gutachtens berechnete Fördermittelquote hängt direkt mit den Energiepreisen zusammen.

Je höher die Energiepreise sind, desto geringer ist ein notwendiger Zuschuss zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit. Die Investition rechnet sich allein aus den Einsparungen. Das gilt für alle baulichen Maßnahmen und alle Zusatzerzeuger, bei denen kein Energieträgerwechsel gegeben ist. Dies ist heute bei den Gas- und Ölpreisen noch nicht ganz gegeben. Sie müssten ca. 8 … 9 Cent/kWh kosten.

Für die Haupterzeuger und einen möglichen Technologiewechsel gilt: je preisgünstiger die emissionsärmeren Energieträger (regenerativ) gegenüber den emissionslastigen Energieträgern (fossil) sind, desto geringer fällt ein notwendiger Investitionskostenzuschuss aus. Allein aus der Energiekostenersparnis refinanziert sich die Anlage. Die Emissionsminderung ist dann ein positiver Nebeneffekt.

Beides ist heute nicht gegeben. Für die baulichen Maßnahmen würde allein eine zusätzliche Bepreisung der fossilen Energieträger Abhilfe schaffen. Die Preisdiskrepanz zwischen Gas/Heizöl auf der einen und Strom auf der anderen Seite ist damit aber nicht behoben. Die heute gegebene Energieträgerbepreisung reizt nicht dazu an, in emissionsärmere Energieträger zu investieren.

Diese Problematik führt in der Mikroperspektive zu den Überlegungen einer „alternativen Bepreisung“, siehe Anhang 3.9.5.

4.6 Variante 2: Alternative Energiepreise

Bereits das „Hauptszenario“ geht von einer künftig veränderten Energieträgerbepreisung aus, siehe Beschreibung in Anhang 4.2.7. Der Energieträger Strom ist dabei um die EEG-Umlage entlastet und langfristig werden alle Energieträger mit zusätzlichen Emissionspreisen versehen.

Die nachfolgende Variante 2 „Alternative Energiepreise“ geht einen Schritt weiter. Sie greift die Idee des rein emissionsbasierten Energiepreises aus Anhang 3.9.5 wieder auf.

4.6.1 Modifikation Energiepreise

Die Energiebilanz sowie Investitionskostenermittlung erfolgt komplett wie im „Hauptszenario“. Lediglich die im Anhang 4.2.7 genannten Energiepreise gelten nicht. Sie werden ersetzt durch die in Tabelle 148 zusammengestellten Werte.

Die Preise für das Jahr 2020 werden bereits modifiziert. Der Ansatz ist in der Mikroperspektive, dort in Anhang 3.9.5, beschrieben. Die Preise basieren – außer bei dem Energieträger Holz – auf einem für alle Energieträger gleichen Emissionspreis von derzeit 418 €/t.

System	Energiepreis, in [€/kWh]		
	2020	2035	2050
Erdgas	0,087	0,121	0,157
Heizöl	0,122	0,172	0,224
Holz	0,050	0,053	0,060
Fernwärme	0,102	0,129	0,140
Strom (Bezug, Normaltarif)	0,186	0,231	0,218
Strom (Bezug, Wärmepumpe)	0,186	0,231	0,218
Strom (Einspeisung)	0,066	0,066	0,066

Tabelle 148 Prognose der Energiepreise für das Szenario 2 „Alternative Energiepreise“ [eigene Darstellung]

Ebenfalls für alle Energieträger gleichermaßen (auch den Energieträger Holz) werden künftige Preissteigerungen angesetzt. Sie sind rein emissionsbasiert. Dabei wird für das Jahr 2035 ein zusätzlicher Emissionspreis von 180 €/Tonne und für das Jahr 2050 von 640 €/Tonne (jeweils auf die Preise von 2020) gemäß den Vorschlägen des UBA [21] zugrunde gelegt.

Der Strom für die Einspeisung wird konstant belassen, da der Wert sich nicht am geltenden EEG orientiert, sondern an den Gestehungskosten für den Strom – welche sich rein an den Investitionskosten in die PV orientieren. Da keine Lernkurve für PV angesetzt wird, bleibt dieser Preis konstant.

Bei näherer Betrachtung der Werte fällt auf, dass der Netzstrom zunächst teurer, aber dann wieder günstiger wird. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die – bis dahin sehr regenerative Stromherkunft zu einem so geringen Emissionsfaktor führt, dass ein Abschlag berechnet wird.

4.6.2 Energie- und Gesamtkosten

Mit den alternativen Energiepreisen ergeben sich die Energiekosten, wie sie in Abbildung 219 dargestellt sind. Eine direkte Vergleichbarkeit ist mit Abbildung 215 aus Anhang 4.5.4 gegeben.

Der Startwert für das Jahr 2020 liegt leicht über dem des „Hauptszenarios“ (81,2 Mrd. €/a). Der Wert für das Jahr 2035 liegt deutlich über dem Wert des „Hauptszenarios“ (70,6 Mrd. €/a). Am Ende des Prognosezeitraumes sind beide Werte wieder sehr ähnlich (Hauptszenario: 53,7 Mrd. €/a).

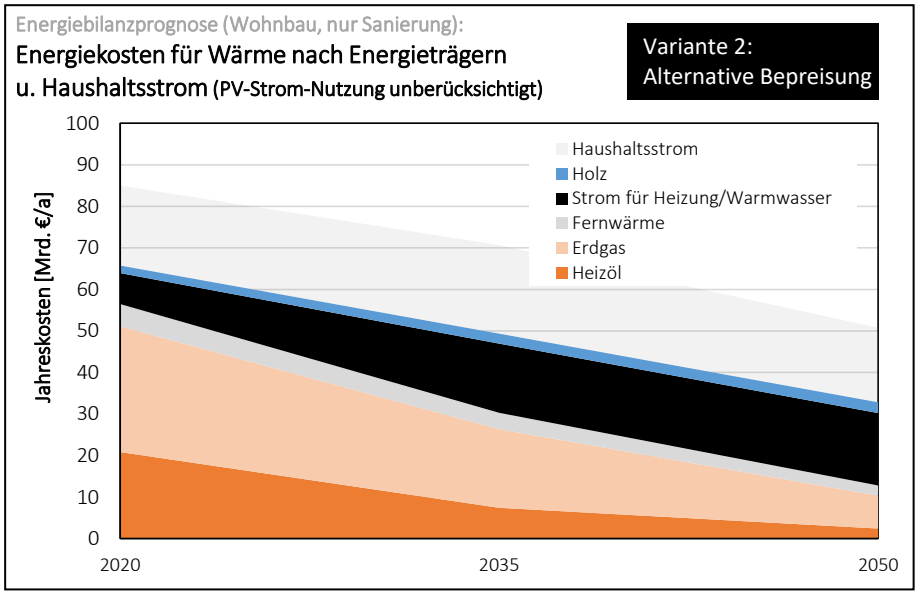


Abbildung 219 Variante 2 Sanierungsobjekte – Energiekosten nach Energieträgern [eigene Darstellung]

Die „künstliche“ Verteuerung aller Energieträger reizt die energetische Modernisierung grundsätzlich an – wobei die anfänglichen Mehrkosten insgesamt nur 5 % betragen. Es findet vor allem eine deutliche Verschiebung hin zu einer Verteuerung der fossilen Energieträger statt.

Wärmepumpen und Holzkessel werden ohne Zuschuss wirtschaftlich. Die Investitionskostenzuschüsse können deutlich geringer ausfallen – letztlich bliebe die Anreizfinanzierung der baulichen Maßnahmen erhalten. In ähnlicher Größenordnung (10 bis 20 % statt 50 %) könnten dann auch Erzeuger sowie Maßnahmenpakete bezuschusst werden.

Die somit nicht notwendigen Investitionskostenzuschüsse könnten oder müssten teilweise in eine Unterstützung einkommensschwacher Haushalte fließen, wie in Anhang 3.9.5 beschrieben.

Werden die Erträge aus der Nutzung der Photovoltaik berücksichtigt, ergibt sich ein ähnliches Bild. Direkt vergleichbar sind nachfolgende Abbildung 220 mit Abbildung 214 aus Anhang 4.5.4.

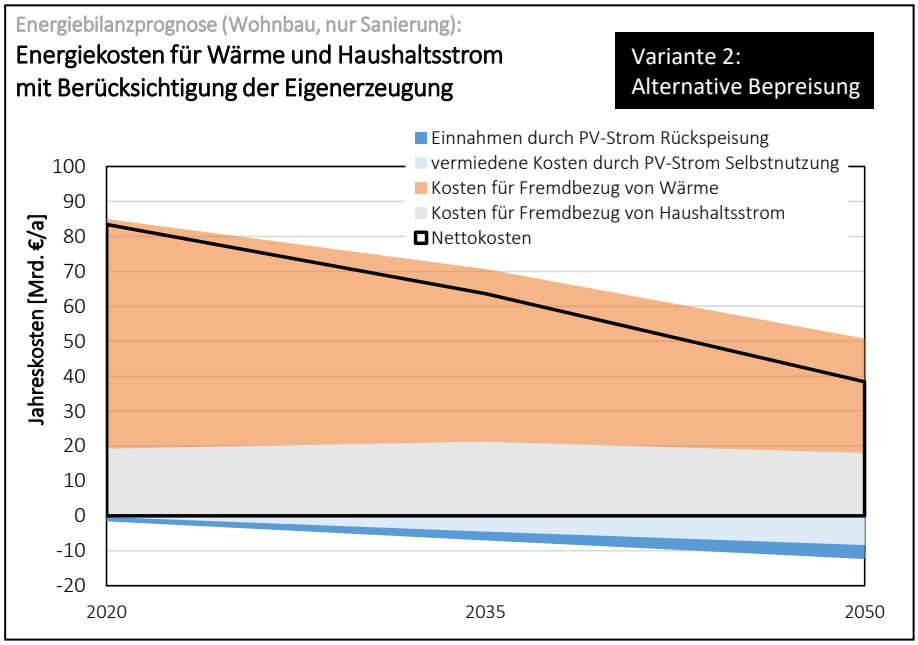


Abbildung 220 Variante 2 Sanierungsobjekte – Energiekosten mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung]

Gesamtkosten

Die Kapital- und Wartungskosten sind identisch zu denen des „Hauptszenarios“ aus Anhang 4.5.4. Werden sie zu den Energiekosten der Variante 2 „Alternative Energiepreise“ addiert, ergibt sich der Verlauf nach Abbildung 221 (die Darstellung ist direkt vergleichbar mit Abbildung 217 aus Anhang 4.5.4).

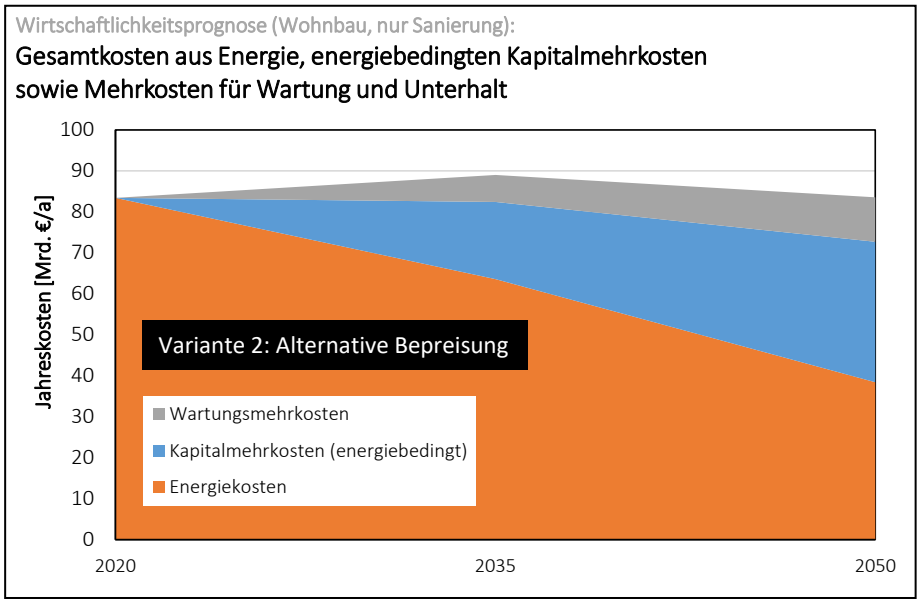


Abbildung 221 Variante 2 Sanierungsobjekte – Gesamtkosten der energetischen Modernisierung [eigene Darstellung]

Es ergibt sich auch mit den alternativen Energiepreisen ein sehr konstanter Gesamtkostenverlauf, der näherungsweise zu einer Grenzwirtschaftlichkeit führt. In der Anfangszeit liegen die Gesamtkosten der „Variante 2“ über der des „Hauptszenarios“, am Ende kehrt sich dies um.

Insgesamt ließe sich durch weitere Variation auch ein Modell der Energieträgerbepreisung finden, bei dem eine Kostengleichheit festzustellen ist. Darauf wird verzichtet. Mit der Variante 2 „Alternative Bepreisung“ konnte grundsätzlich gezeigt werden, dass eine Preisgestaltung rein nach Aspekten der Emissionen zu realistischen Gesamtkosten führen kann und, dass sich auch Preissteigerungen an den Emissionen festmachen lassen, ohne dass „utopische“ Ergebnisse ermittelt werden.

Abschließend sei angemerkt, dass das Problem der Überschreitung des Emissionsbudgets mit dieser Variante 2 nicht gelöst ist. Dazu wären die Varianten 1 und 2 zu kombinieren. Darauf wird im Rahmen dieses Gutachtens verzichtet, weil diese Überlegung den Rahmen der Aufgabenstellung deutlich sprengt.

5 Anhang: Hintergrundinformationen

Dieser Anhang stellt die Inhalte des Kapitel 1.3 detaillierter und mit weiteren Hintergrundinformationen, Beispielen, Tabellen und Abbildungen dar.

Das nachfolgende Kapitel erläutert die Datenlage, welche dem Bericht und den Berechnungen zugrunde liegt. Dies ist primär der Gebäudebestand der Wohn- und Nichtwohnbauten im heutigen Zustand mit Flächen, baulichen und anlagentechnischen Qualitäten sowie Verbrauchsdaten. Diese Daten bilden gemeinschaftlich Wohn- bzw. Nichtwohnbautypologien. Ergänzt werden die energetischen Daten um die Hintergrundinformationen zu Kosten und Preisen.

Aus den verfügbaren Literaturstellen werden die nach Ansicht der Verfasser relevanten zugrunde gelegt. Falls in der Literatur gegensätzliche Auffassungen herrschen, ordnen die Verfasser des Gutachtens diese ein. Dies betrifft Sachverhalten und Annahmen, die zu stark abweichenden Empfehlungen bei der energetischen Modernisierung führen.

Am Ende des Abschnittes wird das im Rahmen des vorliegenden Gutachtens gewählte Bilanzierungsmodell beschrieben.

5.1 Flächen und Belegung

In Deutschland gibt es etwa 2,7 Mio. Nichtwohnbauten mit 1,35 Mrd. m² Nettogrundflächen [3]; die daraus ableitbare Typologie findet sich in Anhang 5.7.2 wieder.

Dem Wohnungsbau sind insgesamt 19,05 Mio. Gebäude mit rund 3,75 Mrd. m² Wohnfläche zuzuordnen [101]. Nachfolgend wird der Bestand hinsichtlich seiner Struktur – Zahlen von Wohneinheiten, Flächen, Belegung und Eigentümerstruktur – näher beschrieben. Eine Wohnbautypologie, die sich daraus ableitet, wird in Anhang 5.7.1 vorgestellt.

5.1.1 Gebäude und Wohneinheiten

Gebäude

Von den insgesamt etwa 19 Mio. Gebäuden sind Ende 2018 etwa ⅔ Einfamilienhäuser, siehe Abbildung 222. Werden Ein- und Zweifamilienhäuser zusammengefasst, liegt deren Anteil bei 83 %. Nur 0,1 % aller Gebäude sind Wohnheime. Sie werden erst seit 2010 separat in der Statistik erfasst. Im weiteren Verlauf werden Sie mit den Mehrfamilienhäusern zusammengefasst betrachtet. Der mittlere Nettozuwachs an Gebäuden (Neubau minus Abriss) in den Jahren seit 2010 liegt bei durchschnittlich 103.000 jedes Jahr.

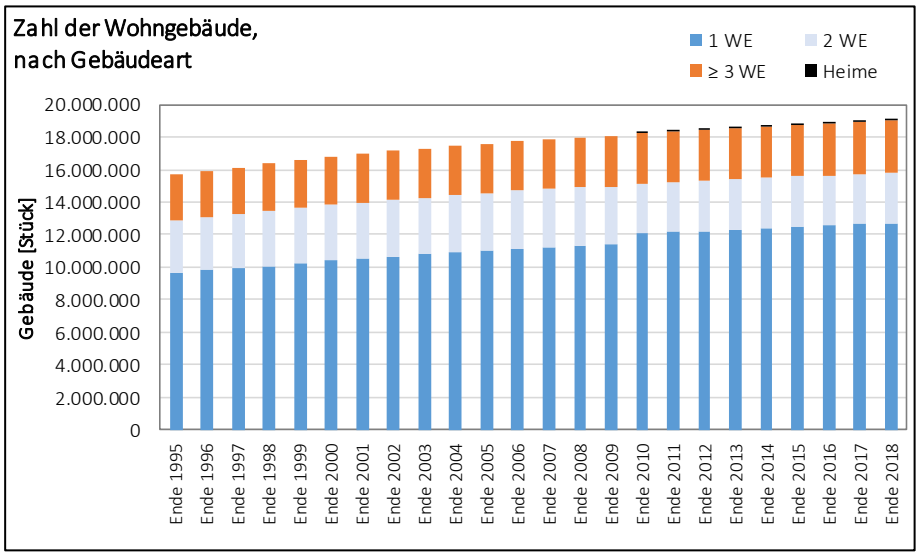


Abbildung 222 Zuwachs an Wohngebäuden im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1]

Wohneinheiten

Wird nach Wohneinheiten ausgewertet, ergibt sich die Darstellung in Abbildung 223. Für das Jahr 2018 gilt: 31 % aller neuen Wohneinheiten sind Einfamilienhäuser, 15 % sind in Doppelhäusern angeordnet und 53 % in Mehrfamilienhäusern. Der mittlere Nettozuwachs an Wohneinheiten (Neubau minus Abriss) in den Jahren seit 2010 liegt bei durchschnittlich 217.000 jedes Jahr.

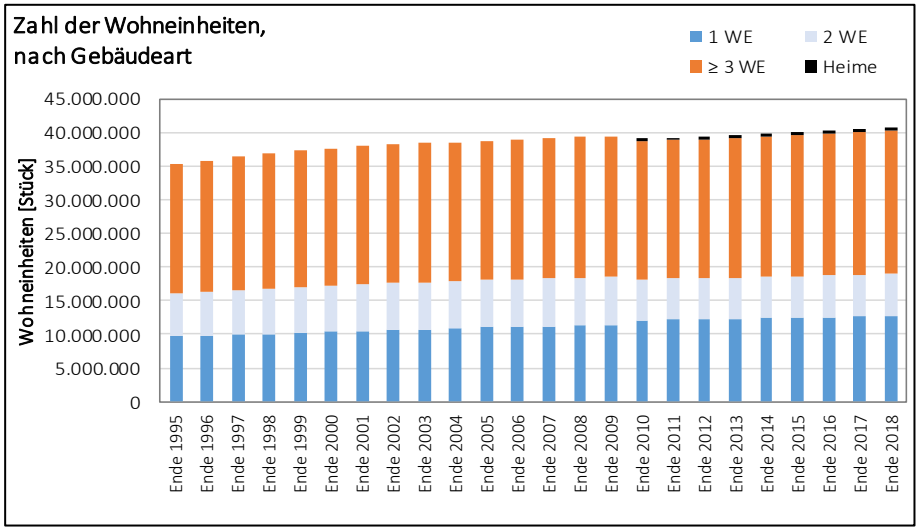


Abbildung 223 Zuwachs an Wohneinheiten im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1]

Eine Untersuchung des Mikrozensus 2018 [101] zeigt für die bewohnten Wohneinheiten hinsichtlich der Einbindung in die Umgebung: 54 % sind in freistehenden Gebäuden angeordnet, die restlichen in ein- oder beidseitig angebauten Gebäuden. Unter den Einfamilienhäusern sind 78 % freistehend, unter den Mehrfamilienhäusern liegen 56 % der Wohneinheiten in freistehenden Gebäuden. Diese und andere Merkmale sind Bestandteile der Gebäudetypologien, siehe Anhang 5.7.1

Die Untersuchung liefert zudem Erkenntnisse bezüglich des Baualters der Wohneinheiten [1]: 25 % vor 1948, 42 % von 1949 bis 1978, 12 % von 1979 bis 1990, 16 % von 1991 bis 2010, die restlichen 3 % danach. Da die Baujahresabgrenzung kaum mit der Entwicklung der energetischen Verordnungen übereinstimmt, ist die Auswertung nur bedingt für eine Typologisierung des Bestandes brauchbar. Sowohl die Typologien des IWU [102] als auch der ARGE [8] — nehmen eine feinere Unterteilung der Gebäude in die einzelnen Baualtersklassen vor.

5.1.2 Wohnbauflächen

Die Entwicklung der Wohnflächen zeigt Abbildung 224. Der mittlere jährliche Zuwachs an Wohnflächen liegt bei knapp 25 Mio. Quadratmetern. Es ist kein exponentielles Wachstum festzustellen.

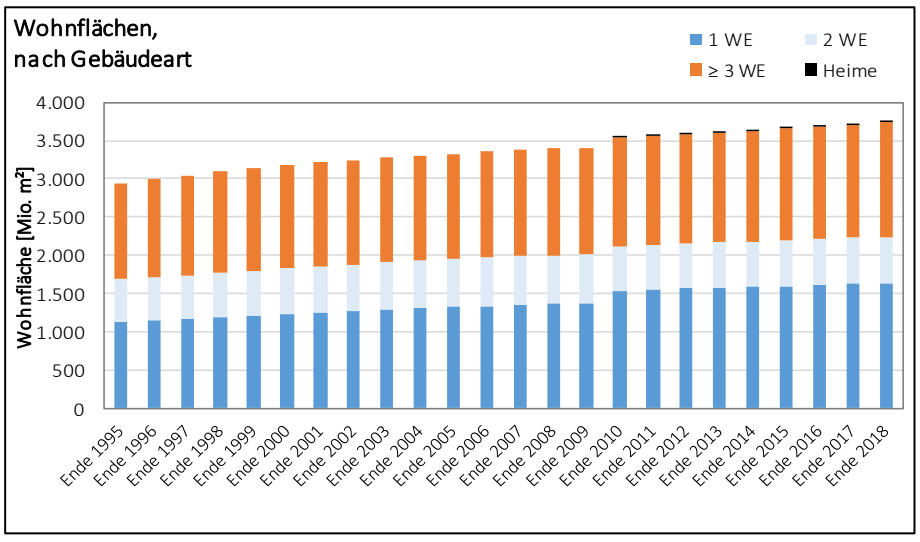


Abbildung 224 Wohnflächenzuwachs im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1]

Etwa 44 % aller Wohnflächen liegen in einem Einfamilienhaus. Fasst man die Ein- und Zweifamilienhäuser zusammen sind es knapp 60 %. Der Rest liegt entsprechend in Mehrfamilienhäusern und zu eher geringen Anteilen (unter 1 %) in Wohnheimen.

Durchschnittliche Wohneinheit

Die durchschnittliche Wohneinheit wird immer größer, siehe Abbildung 225. Mit der Änderung der Datenerfassung im Jahr 2010 ergeben sich Unstetigkeiten für die Auswertung (Abweichungen bei der Erfassung von Wohneinheiten in Wohnheimen usw.). Ende 2018 ist eine Wohneinheit im EFH knapp 129 m² groß, in einem Zweifamilienhaus liegt der Wert bei gut 96 m², im Mehrfamilienhaus bei knapp 70 m² und im Wohnheim bei 43 m². Über alle Gebäudetypen gemittelt liegt der Wert bei knapp 92 m².

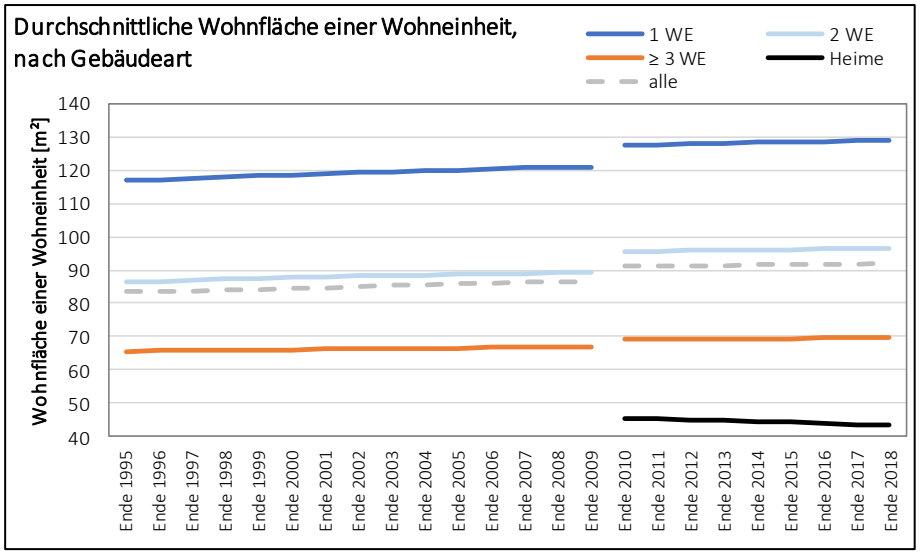


Abbildung 225 Durchschnittliche Wohnfläche je Wohneinheit im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1]

TECHEM ermittelt in seinem Abrechnungsbestand keine relevanten Unterschiede für die durchschnittliche Wohnfläche einer Wohneinheit zwischen den Energieträgern Erdgas, Heizöl und Fernwärme [104].

Durchschnittliches Gebäude

Das durchschnittliche Gebäude ist mit Datenstand 2018 etwa 197 m² groß, siehe Abbildung 226. Dabei liegen Einfamilienhäuser bei 129 m², Zweifamilienhäuser bei 193 m², Mehrfamilienhäuser bei 467 m² (das entspricht im Durchschnitt 6,7 Wohneinheiten) und Wohnheime bei 958 m² (22,1 Wohneinheiten).

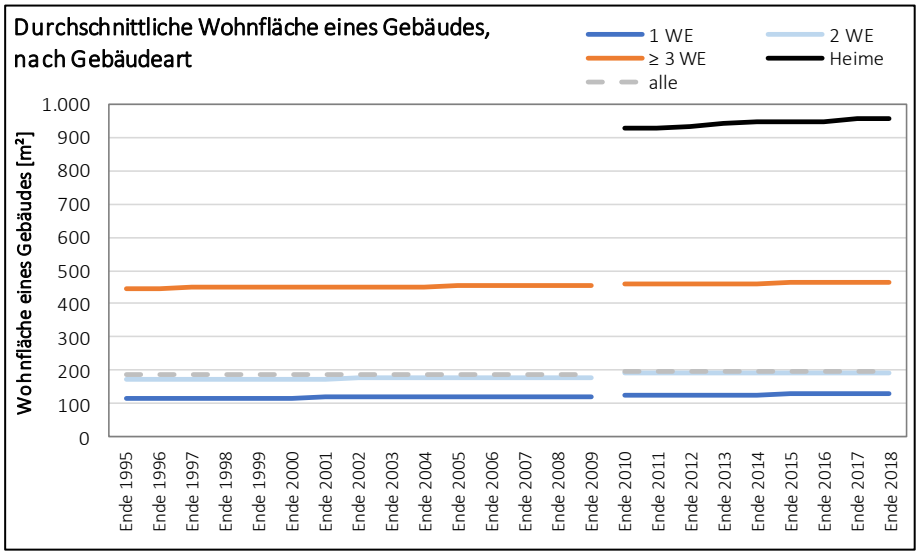


Abbildung 226 Durchschnittliche Wohnfläche je Gebäude im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1]

5.1.3 *Personenbelegung*

Die Kennwerte für die durchschnittliche Belegung der Gebäude hängen neben der Bau- und Abrisstätigkeit von der Bevölkerungsentwicklung ab. Da bei der Volkszählung 2011 deutlich abweichende Werte von den Vorjahren ermittelt wurden – siehe Abbildung 227 – ergibt sich für alle Kennwerte an dieser Stelle eine Unstetigkeit.

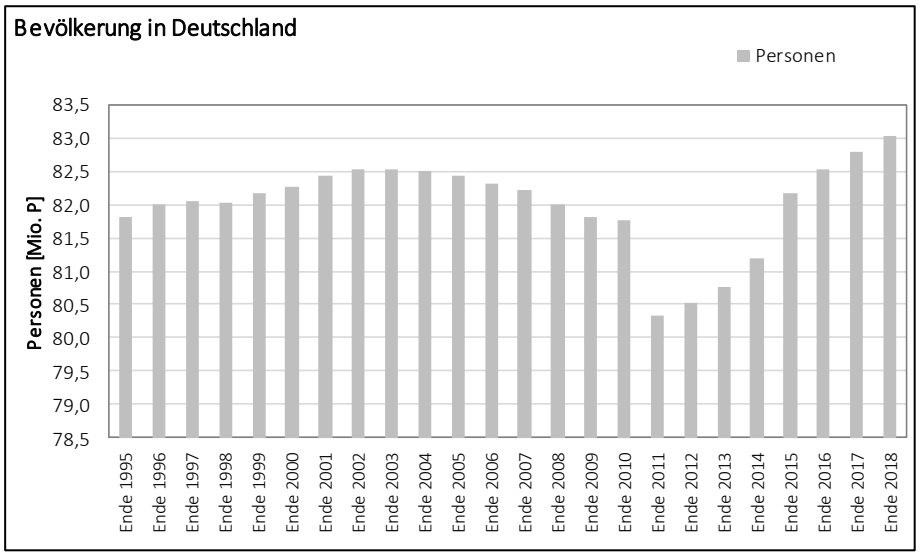


Abbildung 227 Bevölkerungsentwicklung im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1]

Seit 2011 liegt der jährliche Zuwachs bei ca. 434.000 Personen. Schreibt man die Zahlen des letzten Jahrzehnts linear fort, hat Deutschland im Jahr 2050 etwa 95 Mio. Einwohner. Ob dieser Wert eintritt oder die Zahlen konstant bleiben, kann man nur schwerlich prognostizieren. Auch der Anstieg seit 2011 wurde in Langzeitszenarien nicht vorhergesagt.

Die Flächenzuwächse sind seit Jahren etwas höher als die Personenzuwächse. Der personenbezogene Kennwert steigt. Er liegt derzeit bei 45,9 m²/P – siehe Abbildung 228.

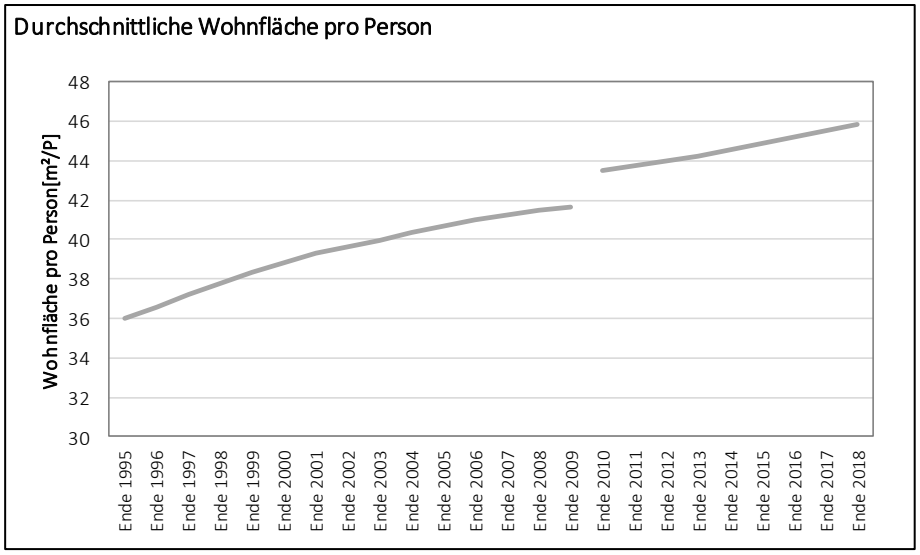


Abbildung 228 Pro-Kopf-Wohnfläche im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1]

In jedem Jahr seit 2010 steigt die Wohnfläche um 0,3 m²/P an. Das ist einem Jahrzehnt entsprechend ein Zuwachs von 3 m²/P. Im Jahr 2050 läge der Wert entsprechend bereits bei 55 m²/P. Selbstverständlich haben die neu hinzukommenden Flächen einen geringeren Verbrauch als abgerissene oder bereits bestehende. Jedoch vermehren Sie den Verbrauch insgesamt.

Die Vergrößerung der Wohnfläche pro Kopf sowie die ggf. weiter steigende Bevölkerungszahl zehren einen deutlichen Teil der Einsparbemühungen im Bestand auf, die entsprechend eine Kompensation erforderlich machen.

Einflussmerkmale

Eine weitere Analyse der Wohnfläche pro Kopf erfolgt im Rahmen einer Mikrozensuserhebung [1]. Für das Jahr 2014 ergibt sich folgende Datenlage (Werte in Klammern Anzahl der Wohneinheiten an allen Wohneinheiten):

- alle Haushalte: 43,8 m²/P
- Einfamilienhaus (32 %): 51,2 m²/P | Zweifamilienhaus (15 %): 49,2 m²/P | Mehrfamilienhaus (52 %): 38,6 m²/P
- 1 Person (40 %): 66,7 m²/P | 2 Personen (35 %): 48 m²/P | 3 und mehr Personen (25 %): 30,6 m²/P
- Senioren (25 %) 62,0 m²/P | Paare (35 %) 45,2 m²/P | Familie (20 %) 30,0 m²/P
- selbst genutztes Eigentum (46 %): 49,9 m²/P | Mietwohnung (54 %): 37,4 m²/P

Eine weitere Unterteilung nach den einzelnen Merkmalen ist vorhanden, wird hier jedoch nicht weiter dargestellt. Das mit Abstand größte Ergebnis liefert die Kombination: 1 Person & Senior & Eigentümer mit 100,0 m²/P. Das kleinste Ergebnis ergibt sich bei der Familie mit 3 oder mehr Personen zur Miete mit 23,9 m²/P. Die Unterscheidung in die einzelnen Baualtersklassen liefert die Erkenntnis, dass nur wenig Abhängigkeiten bestehen – allerdings ist die Belegung in der Baualtersklasse 1979 - 1990 leicht geringer als in anderen Altersklassen.

Eine Auflösung bis auf Ebene der Landkreise liefert der Landatlas des BMEL [287]. Es zeigt sich, dass in nahezu allen Großstädten die Wohnfläche bei unter 40 m²/P liegt. Die Regionalverteilung deckt sich in etwa mit der Erkenntnis von TECHEM zu durchschnittlichen Wohnungsgrößen in ihrem Datenbestand von abgerechneten Heizkosten [104], siehe Abbildung 229.

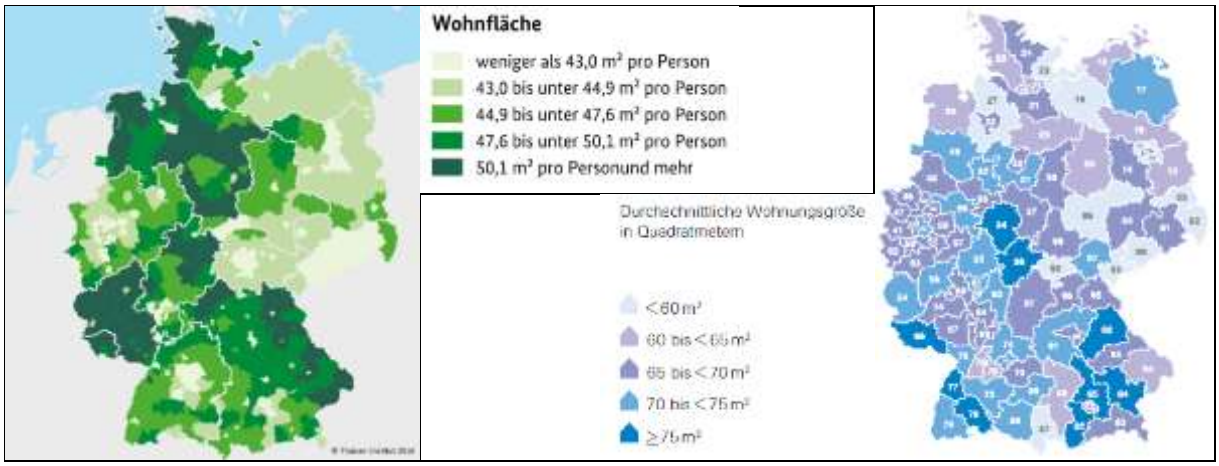


Abbildung 229 Pro-Kopf-Wohnfläche, Grafik aus [287] und Wohnungsgröße, Grafik aus [104]

Für den städtischen und den ländlichen Raum – und die damit einhergehende Ungleichbelegung der Wohnungen – ergeben sich unterschiedliche Konzepte bei der Sanierung. Das betrifft die Verbesserung der Gebäudehülle ebenso wie die technischen Anlagen (insbesondere die Trinkwassererwärmung).

5.1.4 Eigentumsstruktur

Mit den Zahlen zum Ende das Jahres 2018 veröffentlicht das statistische Bundesamt [1] eine Eigentumsquote an den Wohneinheiten von 46,5 %, Tendenz steigend (1998: 40,9 %). In den Flächenländern ergeben sich höhere Werte (Sachsen 34,6 % bis Saarland 64,7 %) als in den Stadtstaaten. Der Osten Deutschlands weist weniger selbst nutzende Eigentümer auf als der Westen.

Die Eigentümerquote des deutschen Bestandes an Wohngebäuden ist insgesamt niedrig – verglichen mit anderen europäischen Ländern [117].

Allerdings ist der Anteil der Wohneinheiten, die in privater Hand sind, mit 78 % vergleichsweise hoch, siehe Abbildung 230. Nur 22 % aller Wohneinheiten sind im Besitz professioneller Vermieter. Unter diesen halten Genossenschaften mehr als die Hälfte der Wohneinheiten, die Privatwirtschaft ein gutes Drittel.

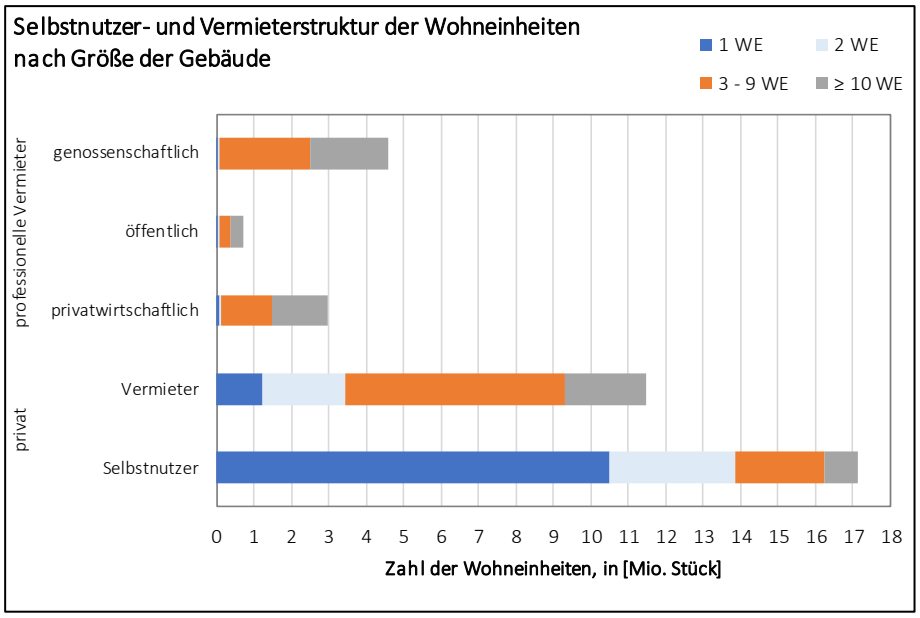


Abbildung 230 Selbstnutzer- und Vermieterstruktur nach Wohneinheiten 2018, eigene Darstellung nach [101]

Die privaten Vermieter halten einen sehr großen Bestand der kleinen Mehrfamilienhäuser mit 3 bis 9 Wohneinheiten. Auch die Wohnungen in großen Mehrfamilienhäusern werden zu mehr als 40 % von Privatpersonen gehalten.

Künftige Elemente der Forderung und Förderung nehmen bestenfalls darauf Rücksicht, wie die Ausgangslage in punkto Fachwissen zur energetischen Sanierung und deren Vorteile, aber auch zu Baukosten, Ausschreibungen, dem Einholen von Angeboten, die Bauüberwachung und die Qualitätssicherung aussieht. Die Mehrheit der Wohneinheiten – auch bei den Mehrfamilienhäusern – sind im Besitz von Privatpersonen.

Altersstruktur und Wohnflächengröße

In Anlehnung an Weiß et al. [64] werden die Daten des statistischen Bundesamtes zur Eigentümerstruktur wie folgt zusammengefasst, um eine bessere Dateninterpretation zu erreichen:

- Selbstnutzer
- private Vermieter (Personen ohne Gesellschaften)
- professionelle Vermieter (Wohnungsgenossenschaften, Kommunen oder kommunale Wohnungsunternehmen, privatwirtschaftliche Wohnungsunternehmen, Bund und Land, Organisationen ohne Erwerbszweck, z. B. Kirchen)

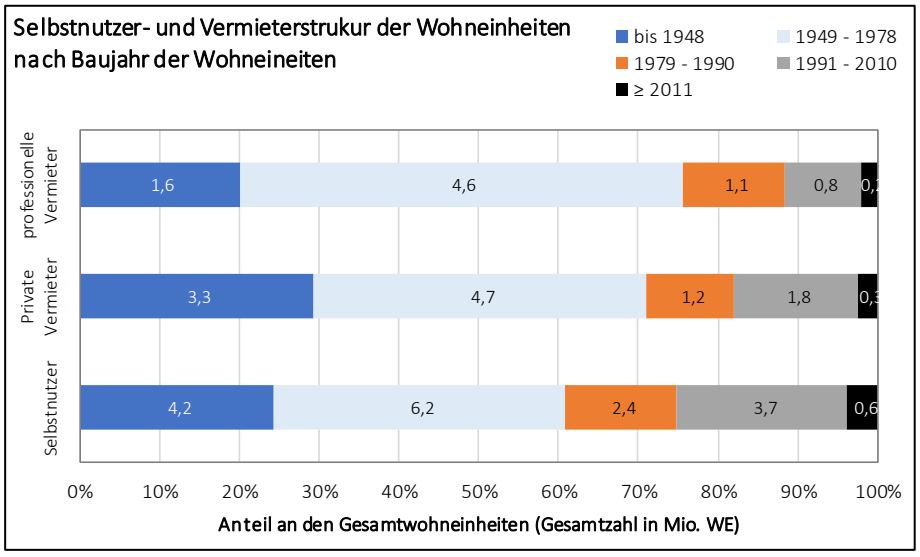


Abbildung 231 Selbstnutzer- und Vermieterstruktur – Auflösung nach Baujahren 2018, eigene Darstellung nach [101]

Abbildung 231 liefert die Erkenntnis, dass vor allem die privaten Vermieter und Selbstnutzer überproportional viele Vorkriegsimmobilien besitzen, deren Fassaden sich erfahrungsgemäß schwieriger energetisch verbessern lassen. Die professionellen Vermieter besitzen große Anteile der Nachkriegsmehrfamilienhäuser, die einfacher strukturiert sind und daher auch schon vielfach energetisch verbessert sind. Jüngere Gebäude (nach Inkrafttreten der 1. Wärmeschutzverordnung) sind sowohl absolut als auch prozentual eher im Privatbesitz.

Insbesondere die energetische Verbesserung der Vorkriegsgebäude erscheint unter der gegebenen Eigentümerstruktur als Herausforderung. Das baulich anspruchsvollere Segment (erhaltenswerte Fassade, Denkmalschutz, Fachwerkhäuser usw.) liegt in Händen von Kleinst- und Einzeleigentümern mit zu vermutender geringerer Expertise und finanzieller Ausstattung. Dies ist bei der Entwicklung von Förderprogrammen zu berücksichtigen.

Abbildung 232 zeigt die Flächenstruktur, die grundsätzlich der Erwartung entspricht. Die professionellen Vermieter sind im Besitz der flächenmäßig kleineren Wohneinheiten. Die privaten Selbstnutzer leben in ca. 120 m² großen Wohneinheiten, die privaten Vermieter stellen 80 m² große Wohneinheiten zur Verfügung, die professionellen Vermieter sind im Besitz von 65 m²-Wohneinheiten (Werte näherungsweise abgeschätzt).

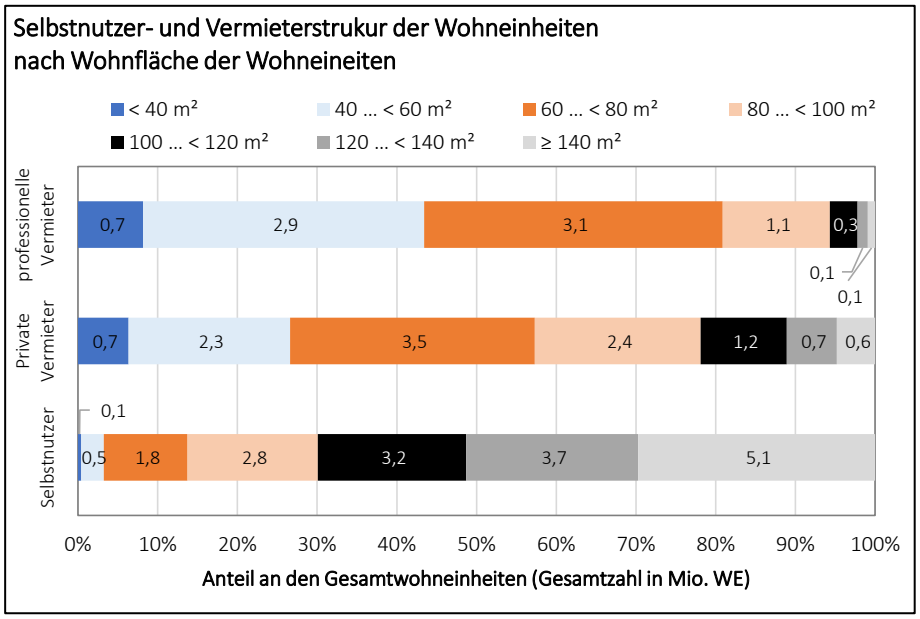


Abbildung 232 Selbstnutzer- und Vermieterstruktur – Auflösung nach Wohnflächengröße 2018, eigene Darstellung nach [101]

Gepaart mit den Standorten der Gebäude – je urbaner der Ballungsraum, desto höher der Anteil professioneller Vermieter - resultieren daraus andere Belegungsdichten. Dies hat Einfluss auf Energiekonzepte, insbesondere unter folgenden Aspekten, aus Sicht der städtischen Räume und professionellen Vermieter (ansonsten umgekehrt):

- Trinkwassererwärmung (je höher die Belegung, desto höher die Sinnhaftigkeit zentraler Systeme)
- Nutzung von Solarthermie und Photovoltaik (je geringer die verfügbaren Dachflächen pro Person, desto kleiner die Produktionsmengen und Deckungsanteile)
- Nutzung von Wärmepumpen (weniger Platz im Gelände oder an Fassaden für Flächenkollektoren, ungünstigere Aufstellbedingungen für Außenluftwärmepumpen)
- Fassadendämmung (kompakte Gebäude, hoher Vollbeheizungsanteil der Gebäude als günstige Randdaten)

5.1.5 Bezugsgrößen

Zielen Untersuchungen zur energetischen Sanierung auf absolute Endenergie-, Primärenergie- oder Emissionsminderungen sowie auf Kostenreduzierungen, kann auf einen Flächenbezug (oder Personenbezug) auch gänzlich verzichtet werden (z. B. in [57]).

Für die Darstellung und zum Vergleich von Energiemengen werden jedoch üblicherweise Energiekennwerte eingesetzt. Ihnen dienen häufig Flächen, seltener andere Größen (Personen, Stückzahlen) als Bezugsmaß. Zum Vergleich von Kennwerten müssen identische Bezugsgrößen gewählt werden.

Flächen im Wohnbau

Folgende Bezugsflächen werden bei der Bewertung von Wohnbauten verwendet [78]:

- die Wohnfläche (WF) A_{Wohn} nach BGBl. II „Verordnung über wohnungswirtschaftliche Berechnungen“, sie enthält ggf. anteilig die Flächen der Balkone und unbeheizte Keller, vermindert Flächen unter Schrägen, jedoch keine Flächen für beheizte Treppenräume im Geschosswohnungsbau
- die Energiebezugsfläche A_{EB} als Summe aller Wohn- bzw. Nutzflächen eines Gebäudes, für deren Nutzung eine Beheizung notwendig ist; die beheizte Nutzfläche ergibt sich nach DIN 277-2 „Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau; Gliederung der Nutzflächen, Funktionsflächen und Verkehrsflächen“; hierin sind Treppenräume enthalten, jedoch Balkone und unbeheizte Keller nicht
- die Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV und begleitenden Normen; sie wird aus dem äußeren Gebäudevolumen V_e berechnet; maßgeblich ist dazu das Gebäudevolumen, das den beheizten Bereich umschließt, also üblicherweise der gedämmte Bereich des Gebäudes

Darüber hinaus sind Brutto- und Nettogrundfläche (BGF, NGF) definiert. Abbildung 233 zeigt typische Umrechnungsfaktoren, ausgehend von der Bruttogrundfläche als Bezugswert. Die fiktive Fläche A_N ist mit einsortiert, um die Größenverhältnisse zu verdeutlichen.

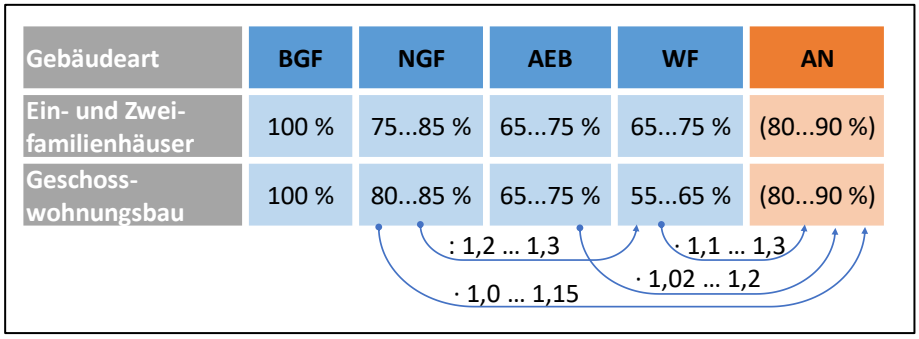


Abbildung 233 Umrechnung für Flächen im Wohnbau, eigene Darstellung nach [78]

Die EnEV-Fläche A_N ist größer als die beheizte Energiebezugsfläche, wie auch die statistische Auswertung des IWU in Abbildung 234 zeigt. In der untersuchten Stichprobe liegt der Umrechnungsfaktor bei ca. 1,2.

Die Bestimmungsgleichung für A_N nutzt als Basiswert das umbaute Volumen, welches neben dem bewohnten Raum die gesamte Konstruktion und daher auch den Dämmstoff mit einschließt. Daher ist festzustellen, dass mit jünger werdenden Gebäuden – die nach strengeren energetischen Anforderungen konzipiert wurden und daher größere Dämmstoffdicken – die Diskrepanz zwischen Wohnfläche und EnEV-Fläche stetig größer wird. Auch hat ein Gebäude nach einer Hüllflächenmodernisierung (mit Außendämmung oder Aufsparrendämmung im Dach) eine größere EnEV-Fläche A_N als vorher, was dem Gebäudebesitzer nicht leicht zu vermitteln ist [78].

Der Bezug auf die Wohnfläche (oder den beheizten Anteil der Wohnfläche, d. h. die Energiebezugsfläche) ist in Makrostudien bereits heute deutlich etablierter (z. B. in [119], [288], [62]) als bei Einzelfallbetrachtungen, welche an den Endkunden gerichtet sind. Insbesondere alle Aktivitäten, welche im Zusammenhang mit der Förderung (KfW-Effizienzhaus, iSFP des BAFA) stehen und auf EnEV-Normen zurückgreifen, nutzen die für den Gebäudebesitzer unbekannte Gebäudenutzfläche A_N.

Für die Einzelfalluntersuchung (Energiekonzept auf Mikroebene) sowie makroskopische Hochrechnungen des Gesamtgebäudebestandes erscheint die beheizte Wohnfläche sinnvoller als die EnEV-Fläche A_N.

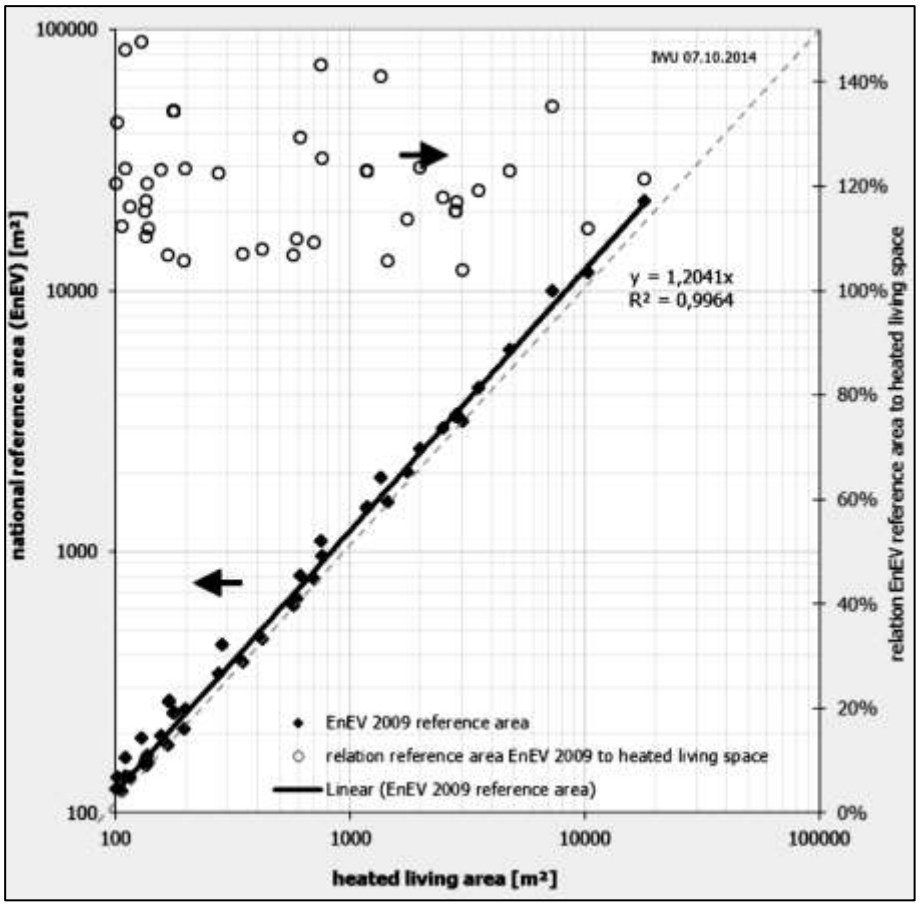


Abbildung 234 Unterschied zwischen EnEV-Nutzfläche (Ordinate) und beheizter Wohnfläche (Abszisse), Grafik aus [102]

Personenbezug im Wohnbau

Da die Belegungsdichte der Gebäude ständig sinkt, siehe Anhang 5.1.1, sind Flächen nicht in jedem Fall die optimalen Bezugsgrößen. Mindestens alternativ sind pro-Kopf-Angaben sinnvoll; siehe auch [289].

Dies gilt vor allem für die Energieaufwendungen der Trinkwassererwärmung, die teils von den Personen (Nutzwärmemengen) als von Gebäudeflächen (Verteilverluste) oder einer Kombination beider Einflüsse (näherungsweise Speicher- und Erzeugerverlust) abhängen.

Mit einer zunehmenden Dezentralisierung der Trinkwassererwärmung entfallen größtenteils die flächenbezogenen Anteile.

Zur Bewertung der Trinkwassererwärmung – insbesondere perspektivisch bei makroskopischen Hochrechnungen und Langzeitszenarien – ist der Personenbezug die plausiblere Vorgehensweise. So werden keine Korrekturen an den Energiemengen erforderlich, die sich aufgrund von geringeren Personenbelegungen ergeben.

Auch zur Angabe des Stromverbrauchs eignet sich der Personenbezug besser.

Flächen im Nichtwohnbau

Bezugsflächen im Nichtwohnbau sind – absteigend nach Größe sortiert – die Bruttogrundfläche (BGF), die Nettogrundfläche (NGF), die Nutzfläche (NF) und die Hauptnutzfläche (HNF). Die genauen Definitionen sind VDI 3807 [290] zu entnehmen.

Typische Kennwerte für Nichtwohnbauten, ausgehend von der Bruttogrundfläche als Bezugswert zeigt Tabelle 149.

Gebäudeart	BGF	NGF	NF	HNF
Wohnheime, Betreuungseinrichtungen	100 %	85...87 %	60...66 %	43...56 %
Ausstellungsgebäude, Veranstaltungsgebäude	100 %	87...90 %	65...69 %	60...65 %
Bereitschaftsdienste, Feuerwehren	100 %	86...87 %	75...76 %	57...58 %
Bibliotheken	100 %	90 %	68 %	63 %
Gebäude für Produktion, Werkstätten	100 %	89...91 %	77...79 %	63...75 %
Gericht	100 %	83...91 %	53...60 %	42...51 %
Hochschulen, wiss. Lehre und Forschung	100 %	81...89 %	52...61 %	45...53 %
Justizvollzugsanstalten	100 %	84 %	58 %	51 %
Kindertagesstätten	100 %	84...90 %	63...66 %	53...59 %
Krankenhäuser und Unikliniken, Gesundheitswesen	100 %	79...86 %	47...58 %	37...52 %
Lager	100 %	89 %	84 %	80 %
Mensen	100 %	91 %	62 %	55 %
Polizei	100 %	83...84 %	59...61 %	47 %
Rechenzentrum	100 %	88 %	57 %	51 %
Schulen	100 %	88...90 %	64...66 %	56...59 %
Schwimmhallen	100 %	87...88 %	56...63 %	45...51 %
Sporthallen, Sportbauten	100 %	90...93 %	68...78 %	60...66 %
Verkaufsstätten, Warenhäuser	100 %	87...88 %	70...73 %	60...66 %
Verwaltungsgebäude, Ämter	100 %	84...87 %	61...65 %	48...51 %

Tabelle 149 Umrechnung für Flächen im Nichtwohnbau, eigene Darstellung nach [78]

Bei der Energiekonzepterstellung – sowohl in der Mikro-, als auch der Makroperspektive hat sich der Bezug auf die Nettogrundfläche etabliert. Dies wird als sinnvoll erachtet, weil diese Fläche am ehesten den Bereichen entspricht, die für einen Energieverbrauch verantwortlich sind.

5.2 *Bedarf und Verbrauch*

Für Energiemengen, z. B. Endenergien, gelten in Normen und Regelwerken seit etwa 20 Jahren innerhalb des deutschen Sprachraums folgende flächendeckend zur Anwendung kommenden Definitionen [78]:

- Energiebedarf: ist eine rechnerisch bestimmte Energiemenge unter Annahme von geometrischen und physikalischen (energetischen) Eigenschaften des Baukörpers, der Nutzung und Anlagentechnik
- Energieverbrauch: ist eine gemessene Energiemenge.

Sofern die Nutzungsranddaten (z. B. Raumtemperaturen bei der Bewertung eines Gebäudes, Häufigkeiten bestimmter Teillastzustände bei der Bewertung eines Ventilators), die dem rechnerischen Energiebedarf zugrunde liegen auch den realen Randdaten entsprechen, können Bedarf und Verbrauch zahlenmäßig gleich sein. Gleiches gilt für andere äußere Randdaten (z. B. Außentemperaturen, Solarstrahlung für die Gebäudebewertung) [78].

Abbildung 235 zeigt schematisch verschiedene Arten von Bedarfs- und Verbrauchsenergiemengen, wie sie bei der Energiebilanzierung und in Energiekonzeptstudien vorkommen. Die Darstellung ist vereinfacht; nicht alle Möglichkeiten von Standardranddaten und individuellen Vorgaben sind kombiniert, sondern nur häufig vorkommende Fälle.

Der Energiebedarf kann mit standardisierten Annahmen zur Nutzung und zum Klima ermittelt sein (Fall a), weil das Ergebnis z. B. dem öffentlich-rechtlichen Nachweis dient. Er kann aber auch individuell bestimmt werden, indem abgestuft die Eingangsparameter der Nutzung, des Baukörper/der Technik oder des Klimas an die Realität angepasst werden (Fälle b bis d). Die Version a) bezeichnen Loga et al. als „Normbilanz“, die Version b)/c) als „Individuelle Bilanz“ [22].

Insbesondere die Nachrechnung von Bilanzen unter Berücksichtigung gemessener Klimaranddaten (Fall d) erfordert eine Softwarelösung, die entsprechend offen für Messwerte ist; häufig ergibt sich dann die Anwendung einer Simulationssoftware. Da dies aufwändig ist, wird regulär darauf verzichtet. Um dennoch eine näherungsweise Übereinstimmung von Bedarf und Verbrauch zu generieren, wird zunächst der gemessene Verbrauch (Fall e) zuerst einer Witterungskorrektur unterzogen (Fall f).

Das Ergebnis ist mit einer Bedarfsbilanz vergleichbar (Fall c), wenn möglichst realistische Annahmen zur Nutzung sowie zur Effizienzbeschreibung von Baukörper und Technik gewählt werden. Es ergibt sich auch beim Vergleich des witterungskorrigierten Verbrauchs (Fall f) mit dem Bedarf nach b) noch eine gute Übereinstimmung.

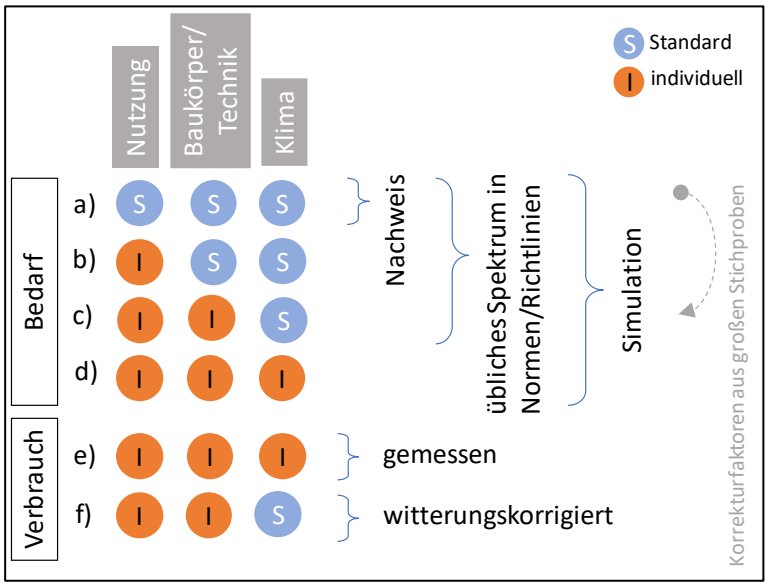


Abbildung 235 Individualisierungs- und Standardisierungsgrad bei Bedarfs- und Verbrauchsanalysen [eigene Darstellung]

Eine Leerstandsbereinigung des Verbrauchs ist ebenfalls möglich, aber in der Grafik nicht dargestellt. Auch hier lässt sich ein Abgleich mit dem Bedarf erzielen.

Die Angleichung der Bedarfsberechnung an die Verbrauchsmessung im Einzelfall (Mikrountersuchung) setzt eine genaue Auseinandersetzung mit der gegebenen Nutzung, Bausubstanz und Technik voraus. Für Makrountersuchungen ist dies nicht leistbar. Dennoch besteht der Anspruch, dass zumindest im statistischen Mittel die Bedarfsprognosen mit den Verbrauchswerten übereinstimmen. Da dies regelmäßig nicht der Fall ist, ergibt sich folgende Näherungsüberlegung: auf Basis von Stichproben wird versucht, einen Korrekturfaktor oder eine Korrekturgleichung zu finden, mit der aus einem „Normbedarf“ (Fall a) ein „individueller Bedarf“ (Fall c) entsteht. Dieser entspricht einem zu erwartenden Verbrauch (Fall f). Konkrete Ansätze werden weiter unten benannt.

Die Praxis zeigt Unterschiede zwischen berechneten Energiebedarfen und gemessenen Energieverbräuchen. Eine Option des Abgleichens beider Ergebnisse ist eine Umrechnung mit Faktoren/Funktionen auf Basis statistischer Erkenntnisse (geeignet für Makroanalysen), die Alternative ist die individuelle Anpassung von Bilanzranddaten an die Realität (geeignet für Mikroanalysen).

Kritik: Der Entwurf der neuen VDI-Richtlinie 3808 zur „Energetischen Bewertung von Gebäuden und der Gebäudetechnik“ thematisiert das gegebene Problem überhaupt nicht und stellt wenig hilfreich fest [291]:

> *„In den Bedarf fließen bestimmte Annahmen beispielsweise über die Nutzung des Gebäudes, die Witterungs- und andere Nutzungsbedingungen ein, aber er ist völlig unabhängig vom Nutzerverhalten. Der Verbrauch gilt ausschließlich für die tatsächlich erfolgte Nutzung. Er variiert von Jahr zu Jahr, von Nutzer zu Nutzer und charakterisiert daher die Gesamtheit von Gebäude, Gebäudetechnik, Nutzungsbedingungen und Nutzern sowie Witterungseinflüssen. Ein direkter Vergleich zwischen Bedarfs- und Verbrauchwerten ist daher nicht möglich.“*

Es ist anzumerken, dass in der Realität viele Energiebedarfsverfahren offen sind für individuelle Randdaten – vor allem die Nutzung betreffend. Insofern ist ein berechneter Energiebedarf nicht „völlig unabhängig vom Nutzerverhalten“. Er kann es im Modus des EnEV-Nachweisverfahrens sein, muss es aber nicht. Das gilt auch und insbesondere für Simulationsverfahren (welche ebenfalls zu den Bedarfsrechnungen zählen), die regelmäßig immer dann zum Einsatz kommen, wenn sehr spezielle technische Konzepte, aber auch stark differenzierte Nutzungen berechnet werden.

Trotz dieser – nach Ansicht der Verfasser falschen – Betrachtung empfiehlt die Richtlinie am Ende insbesondere Simulationen als Grundlage für die Energieberatung und stellt die EnEV-Normen (Bedarf) sowie die VDI 3807 (Verbrauchsanalyse) als gleich gut für eine Energieanalyse dar, was so nicht nachvollziehbar ist.

Festgestellte Abweichungen von Bedarf und Verbrauch im Wohnungsbau

Dass die Verwendung von Standardranddaten bei der energetischen Bewertung von Wohnbauten auch zu deutlichen Abweichungen zwischen der berechneten Endenergie (Abszisse) und dem witterungskorrigierten Verbrauch (Ordinate) führen kann, zeigen diverse Auswertungen [78]. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens haben 2006 eine kleinere Stichprobe untersucht, siehe Abbildung 236. Es lassen sich Abweichungen bis zum Faktor 4 in beide Richtungen feststellen.

Die dargestellten Zahlen der Bedarfsrechnung basieren auf den Standardnutzungsranddaten eines EnEV-Nachweises (DIN V 4108/4701). Außerdem wurden, sofern einzelne technische Komponenten vor Ort nicht korrekt einschätzbar waren, der Berechnung Standardmerkmale für die Gebäudehülle und Anlagentechnik zugrunde gelegt. Dies wäre ebenfalls im Rahmen der Energieausweiserstellung (Bedarfsausweis) zulässig. Die Verbrauchsdaten sind einer Witterungskorrektur unterzogen, wobei als Standardklima ein mittleres deutsches Klima gewählt wurde, so dass die Werte ebenfalls für die Energieausweiserstellung (Verbrauchsausweis) zugrunde gelegt werden könnten. Abweichend zum EnEV-Nachweis dient für beide Achsen die reale Wohnfläche als Basis [78].

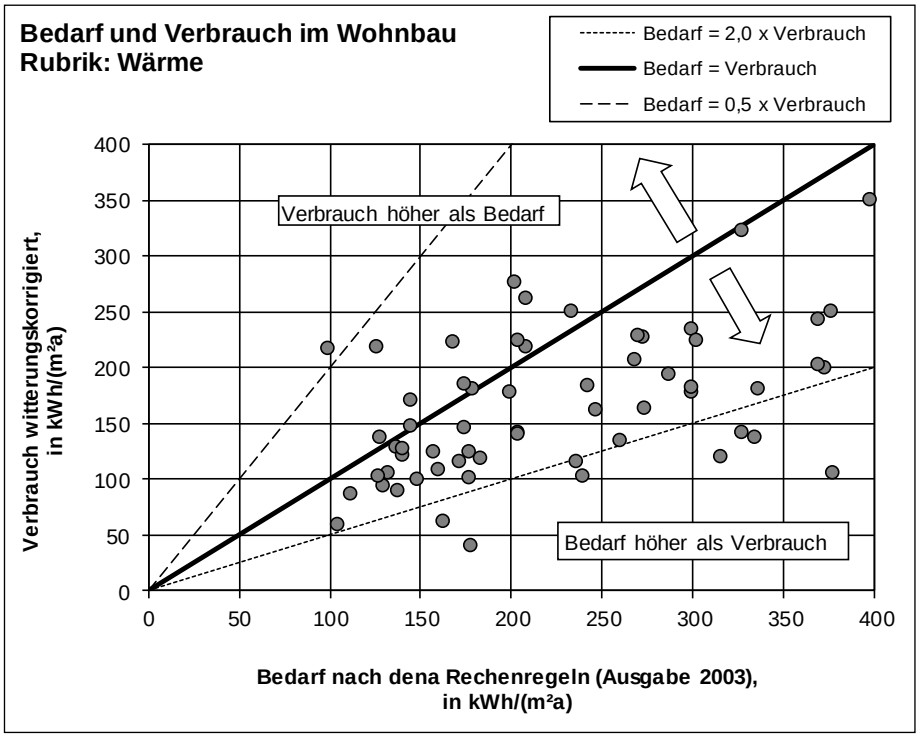


Abbildung 236 Endenergiebedarf und -verbrauch Wärme für eine Stichprobe von ca. 60 Wohnbauten, eigene Darstellung nach [23]

Als Basis eines Energiekonzeptes im Einzelfall (Mikroanalyse) sind viele Datenpunkte unbrauchbar – jedenfalls wenn es um eine realistische Abschätzung der Einsparungen durch Verbesserungsmaßnahmen geht. Insbesondere beim Altbau mit Verbrauchskennzahlen über ca. 150 kWh/(m²a) und Bedarfskennzahlen über ca. 200 kWh/(m²a) geht die Schere weit auseinander. Der rechnerische Kennwert liegt weit über dem gemessenen.

Diese Erkenntnis können alle Auswerter großer Datensätze bestätigen, z. B. die DENA Gebäudereports 2012 und 2016 [118] [9]. Die Werte in Tabelle 150 entstammen letztgenannter Quelle. Während bei den Verbrauchswerten die Effizienzklassen D und E am häufigsten auftritt, ist es beim Bedarfskennwert die Rubrik H.

	Häufigkeitsverteilung der Effizienzklassen im Energieausweis [%]								
Klasse	A+	A	B	C	D	E	F	G	H
Verbrauch	2	2	7	12	20	20	19	12	7
Bedarf	3	2	4	10	13	12	15	16	25

Tabelle 150 Häufigkeitsverteilung der Effizienzklassen im Energieausweis, Werte nach [9]

Eine hier nicht grafisch dargestellte Detailuntersuchung nach Baujahren zeigt darüber hinaus, dass für Gebäude vor etwa der 1. Wärmeschutzverordnung der Bedarf 30 % höher liegt als der Verbrauch, während die Werte bei Gebäuden nach 2001 (Einführung der EnEV) Kennwerte sehr nahe beieinander liegen [24]. Dies bestätigen auch die Untersuchungen aus der Wohnungswirtschaft. So leitet TECHEM in der Verbrauchsdatenstudie von 2019 [104] einen Umschlagpunkt bei ca. 110 kWh/(m²a) ab. Für Gebäude mit diesem Kennwert liefern Bedarf- und Verbrauchsbewertung im Durchschnitt das gleiche Ergebnis (größte Treffsicherheit).

Die Datenlage für bessere Gebäude ist insgesamt dünner, da diese Gebäude weniger häufig vorkommen. Es handelt sich um Neubauten bzw. den sehr gut sanierten Bestand. In der „Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizienter Wohngebäude“ von IWU und DENA zeigt sich, dass etwa 35 … 40 % der Gebäude einen Verbrauch aufweisen, der geringer ist als der vorher berechnete Bedarf, bei ca. 55 … 60 % der Stichprobe ist es anders herum [24].

Eine tiefergehende detaillierte Auswertung – auch zeitlich bis in die 1990er zurückgehender Literatur bzw. Daten aus dem europäischen Ausland – enthält die Dissertation von Vogler [144]. Prinzipiell belegen alle ausgewerteten Studien die Phänomene von „Rebound“ und „Prebound“.

Rebound und Prebound

Eine schematische Erläuterung der Begriffe liefert Abbildung 237: Gebäude mit geringem Bedarf, d. h. Neubauten oder modernisierte Bestandsbauten verbrauchen mehr als berechnet (Rebound-Effekt), aber der unsanierte Bestand verbraucht weniger als berechnet (Prebound-Effekt). Das damit einhergehende Problem, dass die rechnerische Einsparung zu groß ausfällt, ist in der Grafik offensichtlich. Bezogen auf die schematische Skizze ist die Differenz der beiden blauen Balken gut doppelt so hoch wie der der orangenen.

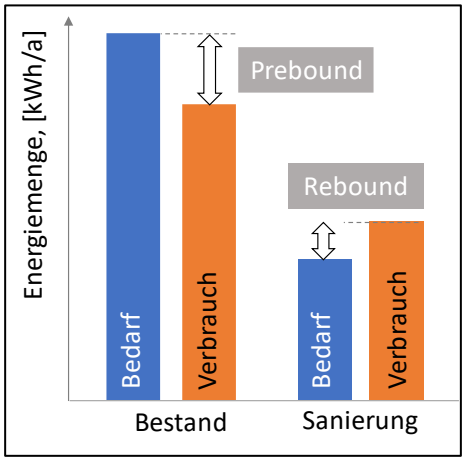


Abbildung 237 Schematische Erläuterung der Begriffe „Prebound“ und „Rebound“ [eigene Darstellung]

Relevante Einflüsse auf die Abweichungen

Eine detaillierte Analyse des Rebound- und Prebound-Effektes incl. systematischer Analyse der Primärliteratur ist zu finden in dem Aufsatz von Hoffmann und Geissler [292]. Einschränkend sei angemerkt, dass die Parameteruntersuchung nur den Heizwärmebedarf betrifft, nicht die Anlagentechnik (Erzeugereffizienz, Verteilverluste usw.) und nicht den kompletten Bereich Warmwasser (Nutzen und Verluste).

IWU analysiert in einer multivariaten Regression anhand von ca. 1700 Gebäuden den Einzel- und Summeneinfluss verschiedener Einflussparameter auf die Diskrepanz zwischen Bedarf und Verbrauch [293]. Der Nutzereinfluss ist insgesamt am größten, allerdings ist ein abnehmender Einfluss des Nutzerverhaltens bei größeren Gebäuden zu erkennen. Das IWU verfeinert etliche Jahre später die Untersuchung anhand größerer Stichproben und kommt zu ähnlichen Schlüssen [22]:

- im unsanierten Altbau sind die maßgeblichen Unsicherheiten
    - bei unbekanntem Nutzerverhalten: die nutzungsbedingte Raumtemperatur
    - bei bekanntem Nutzerverhalten: die thermische Qualität der Hülle (Wärmedurchgangskoeffizienten, Wärmebrücken)
- im baulich modernisierten Altbau oder Neubau sind die maßgeblichen Unsicherheiten
    - bei unbekanntem Nutzerverhalten: der Luftwechsel, gefolgt von der Warmwassermenge
    - bei bekanntem Nutzerverhalten: die thermische Qualität der Hülle (Wärmedurchgangskoeffizienten, Wärmebrücken) und die Effizienz der Anlagentechnik.

Aus eigener Projekterfahrung werden die größten Fehlerpotentiale und Fehlannahmen bei der Berechnung des Energiebedarfs – in der Reihenfolge einer für den Wohnbaubestand typischen Ergebnisrelevanz der Einflussparameter wie folgt eingeschätzt [78]:

- Innentemperatur (incl. räumliche und zeitliche Teilbeheizung des Gebäudes),
- wärmetechnische Qualität der Regelbauteile (U-Werte) und Wärmebrücken,
- Annahmen zur Temperatur in unbeheizten Nebenräumen (insbesondere Keller),
- Luftwechsel (incl. räumliche und zeitliche Teilbelüftung des Gebäudes),
- Warmwasserbedarf,
- Qualitätssicherung in Planung und Ausführung (z. B. Hydraulischer Abgleich),
- Leitungslängen und Temperaturen der Wärmeverteilnetze für Heizung und Trinkwarmwasser,
- Erzeugereffizienz (bei Anlagen älter 20 bis 30 Jahre ggf. relevanter als die vorgenannten Einflüsse)
- Einflüsse des Mikroklimas.

Systematisierung und Formelableitung

Im Verlaufe der letzten Jahre wurden mehrfach Versuche zur statistischen Anpassung des Energiebedarfs (nach DIN V 4108/4701) an den realen Verbrauch unternommen. Primäres Ziel ist die Angleichung der Kennwerte – Energiemenge vor Sanierung, nach Sanierung, Einsparung – im statistischen Mittel (Makroebene); sekundär ist ggf. weiterhin die Problematik zu lösen, auch den konkreten Einzelfall hinsichtlich der genannten 3 Mengen korrekt zu bewerten (Mikroebene).

Drei exemplarische Ansätze des IWU werden nachfolgend vorgestellt. Die Wahl fällt auf die Untersuchungen des IWU, da hier die größte fachliche Vertiefung in die Materie sowie auch die größten Stichproben festzustellen sind.

In einer Untersuchung von 2006 [293] zu der Problematik wird kein signifikanter Einfluss des Energieträgers festgestellt, jedoch ein deutlicher Zusammenhang mit der Anzahl der Wohneinheiten. Es ergeben sich folgende Umrechnungsfaktoren für eine Stichprobe von ca. 1700 Gebäude:

- Gebäude mit 1 - 2 Wohneinheiten: Bedarf/Verbrauch = 1,78
- Gebäude mit 2 - 7 Wohneinheiten: Bedarf/Verbrauch = 1,62
- Gebäude mit ≥ 8 Wohneinheiten: Bedarf/Verbrauch = 1,36

Eine weitere Detaillierung erfolgt u. a. im Jahr 2015 [34] auf Basis der gleichen Stichprobe von Gebäuden. Anhand eines Faktors erfolgt die Anpassung an typische Verbrauchswerte. Der Zusammenhang mit der Gebäudegrößte wird nicht weiterverfolgt, sondern die Abhängigkeit der absoluten Höhe des berechneten Kennwertes. Basis ist der berechnete Endenergiekennwert q_{ber} nach den EnEV-Normen, bezogen auf die Fläche A_N:

$$q_{typ} = f_1 \cdot q_{ber}\ ;\ f_1 = -0{,}2 + \frac{1{,}44}{1 + \frac{q_{ber}}{425}};\ 0{,}5 \leq f_1 \leq 1{,}1$$

Der Korrekturfaktor gilt für die kombinierte Heizung und Trinkwassererwärmung. Er soll sich innerhalb der genannten Grenzen bewegen. Der typische Verbrauch ergibt sich durch Multiplikation mit dem Korrekturfaktor. Aufgrund der Stichprobengebäude sind Aussagen für Wärmepumpen und Gebäude mit Elektrodirektheizung oder Öfen nur bedingt möglich.

Aus dem Verhältnis des individuellen Verbrauchs zum typischen Verbrauch der Gesamtstichprobe wird ein weiterer Faktor (f_2) ermittelt. Es wird unterstellt, dass dieses Verhältnis f_2 auch nach einer Modernisierung gilt. War der Nutzer vorher 10 % sparsamer als die Gesamtstichprobe, ist er es auch nachher. Mit seiner Hilfe wird die zu erwartende individuelle Einsparung bestimmt wird. Auch dafür werden Grenzen festgesetzt:

$$q_{ind} = f_2 \cdot q_{typ} \; ; \; 0{,}75 \leq f_2 \leq 1{,}25$$

Das genannte Vorgehen wird für die Erstellung eines individuellen Sanierungsfahrplans für das betreffende Gebäude vorgeschlagen: grundsätzlich bleibt die Anwendung der Bedarfsnormen (DIN V 4108/4701) erhalten, auch die Förderung bezieht sich weiterhin auf die entsprechenden Werte unter Normbedingungen, jedoch werden die Ergebnisse zum Schluss nutzerfreundlich aufbereitet und zumindest ansatzweise in realitätsnahe Werte umgerechnet. Entweder nur mit dem Faktor f_1, so dass zumindest statistisch eine plausible Einsparung ermittelt wird, oder mit Verwendung der Faktoren f_1 und f_2, so dass auch das reale Verbrauchsverhalten einfließt. Problematisch ist nur, dass die fiktive Nutzfläche A_N der EnEV als Bezugsfläche bleibt.

Im Jahr 2019 hat das IWU einen weiteren Vorschlag vorgelegt [22]. Diesmal auf Basis von etwa 2900 Gebäuden als erweiterte Stichprobe, siehe Abbildung 238. Es werden zwei Verfahren zur Annäherung des berechneten Bedarfs an den gemessenen Verbrauch abgeleitet. Beide zielen nur auf den typischen Verbrauch, nicht auf einen individuell angepassten. Die Werte sind wohnflächen- und brennwertbezogen.

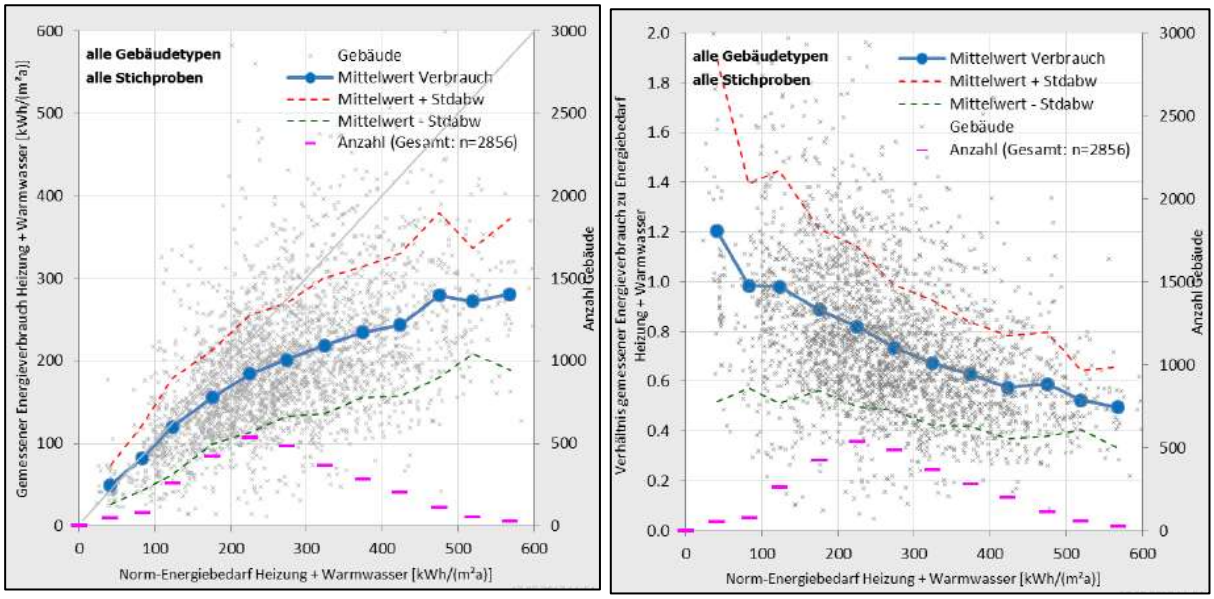


Abbildung 238 Wohnflächenbezogener Verbrauch sowie Verhältnis von Verbrauch zu Bedarf, Grafik aus [22]

Aus der Grafik leiten sich die Kalibrierungsfaktoren und auch Streubreiten ab, welche in Abbildung 239 tabellarisch zusammengefasst sind. Auch hier gilt: aufgrund der Stichprobengebäude sind Aussagen für Wärmepumpen und Gebäude mit Elektrodirektheizung oder Öfen nur bedingt möglich.

Eine vereinfachte Formel zum Umrechnung des berechneten Bedarfs (B) in einen typischen Verbrauch (V) ergibt sich wie folgt:

$$V = 4{,}86 \cdot B^{0{,}65}$$

Wie in Abbildung 238 zu erkennen und aus der Formel zu bestimmen, liegt der Punkt von Gleichheit zwischen Bedarf und Verbrauch bei etwa 90 kWh/(m²a). Verbräuche besserer Gebäude – insbesondere mit sehr kleinem Bedarf – werden entsprechend weit nach oben korrigiert. Bei etwa 50 kWh/(m²a) beträgt die Korrektur bereits mehr als 20 %. Da die Datenlage in dem Bereich nicht ausreichend groß ist, aber Gebäude künftig diese Verbrauchswerte aufweisen sollen, ergibt sich weiterer Forschungsbedarf.

Auswertung von Analysen zum Verhältnis aus Verbrauch zu Bedarf

Anlagen mit Kombi-Betrieb für Heizung und Warmwasser

Verbrauch Erdgas / Heizöl / Fernwärme für Heizung und Warmwasser
(bei Brennstoffen bezogen auf Brennwert H_s)

Norm-Energiebedarf** bezogen auf beheizte Wohnfläche		Norm-Energiebedarf** nach Energiebedarfsausweis (bezogen auf "Gebäudenutzfläche" A_N nach EnEV)		Stichprobe	gemessener Verbrauch, bezogen auf beheizte Wohnfläche			
					Mittelwert	Kalibrierungsfaktor: Verhältnis Verbrauch zu Bedarf		Streubreite* zugeordneter Verbrauch
Intervall	Mittelwert	Intervall	Mittelwert	Anzahl Gebäude		Mittelwert	relative Streubreite*	
kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)		kWh/(m²a)			kWh/(m²a)
1 ... 50	41	1 ... 42	34	n=48	50	1,20	±57%	± 24
51 ... 100	83	43 ... 83	68	n=76	82	0,98	±42%	± 40
101 ... 150	123	84 ... 125	103	n=257	121	0,98	±48%	± 58
151 ... 200	176	126 ... 167	147	n=421	156	0,89	±37%	± 57
201 ... 250	225	168 ... 208	187	n=534	184	0,82	±39%	± 71
251 ... 300	274	209 ... 250	228	n=482	201	0,74	±34%	± 68
301 ... 350	324	251 ... 292	270	n=364	218	0,67	±37%	± 82
351 ... 400	374	293 ... 333	311	n=281	234	0,63	±33%	± 79
401 ... 450	424	334 ... 375	352	n=199	244	0,58	±36%	± 86
451 ... 500	475	376 ... 417	396	n=109	280	0,59	±35%	± 100
501 ... 550	519	418 ... 458	433	n=52	272	0,52	±23%	± 64
551 ... 600	568	459 ... 500	474	n=25	281	0,49	±33%	± 91

**) Bedarf berechnet nach DIN V 4108-6 & DIN V 4701-10 (bzw. ähnliche Verfahren)
*) „Streubreite" = Standardabweichung

n=2849

Abbildung 239 Kalibrierungsfaktoren für die Umrechnung von Bedarf in Verbrauch, Grafik aus [22]

Ein zweites Rechenmodell versucht, diese Problematik zu lösen und definierte eine Formel mit Fallunterscheidung. Unterhalb eines Bedarfs von 66 kWh/(m²a) ergibt sich ein anderer Formeltyp ohne exponentiellen Anstieg. Der erweiterte Ansatz geht allerdings davon aus, dass die Endenergiemengen für die Trinkwassererwärmung im statistischen Mittel korrekt ermittelt werden. Da die Verfasser nach eigener Projekterfahrung nicht der gleichen Ansicht sind, wird dieses Modell im Rahmen dieses Gutachtens nicht weiterverfolgt.

Ebenso wird darauf verzichtet, eine weitere Regression für die Bedarfswerte nach DIN V 18599 an dieser Stelle aufzuführen, da der Wohnungsbau insgesamt seltener nach der Norm bilanziert wird. Sie ist in der Studie nachzulesen [22].

Die Gutachter verwenden – sofern erforderlich die genannte Potenzfunktion und begrenzen den Umrechnungsfaktor auf einen Maximalwert von 1,2 (analog Abbildung 239).

Umgang mit der Problematik in Makrountersuchungen

Die Makrountersuchung folgt prinzipiell einem immer gleichen Schema:

1. es wird zunächst festgestellt, welche Gebäude (Stückzahlen, Flächen) in Deutschland zurzeit vorhanden sind,
2. anschließend wird daraus eine Typologie entwickelt, die ähnliche Objekte (Baualtersklasse, Sanierungsgrad) zusammenfasst; aus jeder Rubrik der Typologie wird ein Gebäude als exemplarischer Vertreter für die entsprechende Teilmenge abgeleitet,
3. jedes Typgebäude wird im Bestand bilanziert (Bedarfsbilanz),
4. die Betrachtung aller Typgebäude, hochgerechnet mit der jeweiligen Anzahl von Objekten in dieser Rubrik der Typologie liefert einen Gesamtbedarf für die Endenergie,
5. anschließend werden für die Typgebäude Verbesserungsmaßnahmen bilanziert und entsprechend über den Gesamtbestand wieder ein Summenprodukt gebildet,
6. die Differenz der beiden Endenergiebilanzen nach 4. und 5. ist die Gesamteinsparung für den deutschen Gebäudebestand.

Die verfügbaren Makrostudien unterscheiden sich jeweils im Detaillierungsgrad, d. h. der Kleinteiligkeit bei der Bildung von Teilgruppen, die separat betrachtet werden (Schritt 2). Außerdem wird die Annäherung an den realen Verbrauch unterschiedlich gehandhabt. Die im Schritt 4 entstehende Summe entspricht idealerweise auch dem gemessenen Summenverbrauch aller Gebäude, welcher z. B. von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) angegeben wird, siehe Anhang 5.4.

Enseling und Hacke formulieren nach Ansicht der Gutachter treffend für die Makrountersuchung [126]:

> *„Der große Vorteil der Berechnungen nach statischen Energiebilanzverfahren […] liegt in der vereinfachten Datenaufnahme. […] Jedoch kann der Energieverbrauch unter konkreten Nutzungsbedingungen stark von dem unter Normbedingungen berechneten Bedarf nach EnEV abweichen. Daher ist dieses Verfahren zur Abschätzung realistischer Energieeinsparpotenziale nur geeignet, wenn ein Abgleich des Normbedarfs mit durchschnittlichen Verbrauchswerten von Gebäuden ähnlicher Qualität vorgenommen wird. Eine Alternative zu den standardisierten Rahmenbedingungen nach EnEV ist z. B. eine Energiebedarfsberechnung nach dem Energiepass Heizung/Warmwasser (EPHW), der eine Anpassung der Rahmenbedingungen in sinnvollen Grenzen ermöglicht. Einsparpotenziale werden deshalb realistischer abgeschätzt.*

Ideal ist die Bedarfsbilanz, die von vornherein zum Verbrauch passende Ergebnisse liefert. Wenn schon nicht im Einzelfall, dann zumindest im statistischen Mittel einer größeren Gruppe von Gebäuden, d. h. z. B. für jede Gebäuderubrik der Typologie. Ein Korrekturfaktor zwischen Bedarf und Verbrauch ist dann verzichtbar.

Dieses Vorgehen wird beispielsweise in der Studie des IWU zum Zielerreichungsszenario 2050 [62] praktiziert. Es erfolgt eine Bilanzierung mit angepassten Einzelparametern – Innentemperatur, Luftwechsel, Wärmebrückenzuschläge usw. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens sehen diese Vorgehensweise als zielführend an.

Erhorn und Hauser wählen 2008 den rein bedarfsbasierten Ansatz nach DIN V 4108/4701 [288], Sie erhalten bei der Modellierung ihrer Typologie eine Abweichung zum gemessenen gesamtdeutschen Verbrauch des Jahres 2005 von 3 %. Weil diese Annäherung als genau genug angesehen wird, verzichten sie auf eine weitere Bedarf-Verbrauchs-Anpassung. In der überwiegenden Zahl, vor allem späterer Studien wird diese Übereinstimmung nicht erreicht. Es wird davon ausgegangen, dass es sich um einen Zufall handelt, der der Datenlage zum Zeitpunkt der Erstellung geschuldet war.

IFEU, ECOFYS, IWU und Universität Bielefeld [34] verwenden als Basis aller Betrachtungen einen Energiebedarf, der jedoch mit einem Korrekturfaktor versehen wird, so dass ein „Erwartungswert des Verbrauchs“ entsteht. Dieser ist zumindest im statistischen Mittel vieler Gebäude korrekt. Damit ist das Verfahren grundsätzlich standardisiert, d. h. unabhängig von der konkreten Nutzung ergibt sich ein identischer Bedarfswert. Jedoch ist das Problem systematisch zu hoher Kennwerte – vor allem Einsparungen – näherungsweise eliminiert.

Angewendet wird das Faktorenverfahren nach IWU auch von anderen Forschern in Makroanalysen, z. B. von Jochum und Kollegen in der Studie von Beuth Hochschule und IFEU [119].

Die Studie des Fraunhofer ISE 2016 [252] rechnet zunächst den Bedarf mit einer vereinfachten Bilanz nach DIN V 4108/4701. Anschließend wird anhand der Umrechnungsfaktoren aus dem DENA-Gebäudereport korrigiert. Über alle Gebäude betrachtet bleibt allerdings ein Gesamtfehler von 20 % (Bedarf höher als Verbrauch) bezogen auf die veröffentlichten Verbräuche der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen AGEB.

Im Einzelfall wird das Problem gar nicht thematisiert, z. B. in der Studie von Holm, Mayer und Sprengard [201]. Die Hochrechnung der Ersparnisse durch Wärmedämmung der Gebäude für Gesamtdeutschland folgt dem Modell der Typologie und Typgebäude. Allerdings wird einheitlich für alle Gebäude sowohl vor als auch nach der Modernisierung von einem identischen Nutzerverhalten, dem nach DIN V 4108-6 ausgegangen. Dies ist als kritisch zu betrachten.

Umgang mit der Problematik in Mikrountersuchungen

Für die Einzelfalluntersuchung in der Mikroperspektive – hier dem individuellen Sanierungsfahrplan (iSFP) der Fördermittelgeber – wird nach Pehnt et al. (IFEU, IWU, ECOFYS) empfohlen: Bedarf und Verbrauch möglichst parallel anzugeben [34]. Dem schließen sich die Verfasser des vorliegenden Gutachtens uneingeschränkt an.

Exemplarisch werden nach Simons Einzelgebäude in [120] auf die Wirtschaftlichkeit von Energieeinsparmaßnahmen hin untersucht: mit der berechneten Einsparung (rein bedarfsbasiert) und der tatsächlich gemessenen Einsparung (verbrauchsbasiert) sowie mit Vollkosten und energiebedingten Mehrkosten. Die Auswirkungen beider Effekte sind gut nachvollziehbar zusammengestellt.

Für den konkreten Einzelfall in der Modernisierung lässt sich ableiten: ein konkretes Konzept berücksichtig den Verbrauch. Idealerweise liegt er als EAV (Energieanalyse aus dem Verbrauch) vor, siehe Anhang 5.3. Damit kann ggf. auf eine Bedarfsbilanz des Bestandes komplett verzichtet werden. Auf jedem Fall lassen sich hilfreiche Erkenntnisse über das Gebäude und die Nutzung ableiten, die es ermöglichen, eine angepasste Bedarfsbilanz zu erstellen.

Für das vorliegende Gutachten werden typische Vertreter von Gebäuden (EZFH, MFH) herangezogen. Sie dienen der Erläuterung von Problemstellungen in der Modernisierung. Damit dies einprägsam erfolgen kann, sind es fiktive Gebäude. Jedoch wird darauf Wert gelegt, dass sie hinsichtlich ihres Verbrauches repräsentativ sind. In Ausnahmefällen werden die Gebäude modifiziert – und künstlich zum Vielverbraucher oder Sparer – umgewandelt, um spezielle Problemlagen zu erläutern.

Bedarfs- und Verbrauchsausweis

Die Diskrepanz der Energieeffizienzklassen in Energieausweisen wurde in Abbildung 236 dargestellt. Interessant sind die Einstellung der Ausweisersteller und der Ausweisempfänger in diesem Zusammenhang. Eine Befragung von etwa 600 verschiedenen Energieausweiserstellern aus dem Jahr 2010 [294] liefert dazu Erkenntnisse.

Etwa 75 % aller in dieser Studie befragten Aussteller erstellen prinzipiell sowohl Energiebedarfs- als auch Verbrauchsausweise. Fast 90 % empfehlen ihren Kunden den Bedarfsausweis, vor allem nach dem vereinfachten Verfahren (abgekürzte Ermittlung von Eigenschaften der Gebäudehülle und Technik, vereinfachtes Aufmaß). Gegeben werden dafür mehrere Begründungen, u. a. weil das „Ergebnis genau genug ist“ und „das Kosten-Nutzen-Verhältnis gut ist“. Etwa 7 bis 8 % der Aussteller empfehlen den Bedarfsausweis mit ausführlicher Erfassung, weil u. a. „andere Verfahren unsicher sind und zu falschen Informationen führen“ oder „er das Gebäude abbildet und nicht das Nutzerverhalten“. Nur etwa 3 bis 4 % der Aussteller empfehlen den Verbrauchsausweis, weil u. a. „es die preisgünstigere Variante ist“, „die meisten Kunden nicht mehr brauchen, wenn sie nur dem Gesetz Genüge tun und nicht sanieren wollen“ und „sein Ergebnis näher an der Wirklichkeit ist“.

Unabhängig von dieser Empfehlungsstrategie wurde in der befragten Stichprobe von knapp 100.000 Ausweisen festgestellt, dass etwa knapp ⅔ aller ausgestellten Ausweise Verbrauchsausweise waren und der Rest Bedarfsausweise. Unter diesen wiederum zu mindestens ¾ nach dem detaillierten Verfahren. Folgendes Fazit ziehen die Forscher:

> *„Die Aussagekraft der beiden Ausweisarten hinsichtlich der energetischen Qualität des Gebäudes wird unterschiedlich eingeschätzt.*
>
> *Aussteller, private Auftraggeber und Wohnungsunternehmen bewerten den Bedarfsausweis im Durchschnitt gut. Sie sind der Meinung, dass er gut über die energetische Qualität eines Gebäudes informiert. 34 Prozent der privaten Auftraggeber fühlen sich mit ihrem Bedarfsausweis sogar sehr gut informiert.*
>
> *Der Verbrauchsausweis wird anders beurteilt: Die Fachleute finden, dass er schlecht über die energetische Qualität der Gebäude informiert. Die privaten Auftraggeber sind beim Verbrauchsausweis geteilter Meinung. 38 Prozent der Auftraggeber fühlen sich mit ihrem Verbrauchsausweis sehr gut oder gut informiert, 30 Prozent dagegen schlecht oder sehr schlecht. Die Wohnungsunternehmen sehen den Verbrauchsausweis kritischer als die privaten Eigentümer. 42 Prozent der Wohnungsunternehmen denken, dass er schlecht oder sehr schlecht Auskunft über die energetische Qualität eines Gebäudes gibt, 24 Prozent sagen aber auch sehr gut oder gut.*
>
> *Der Bedarfsausweis zeigt die Theorie – den berechneten Wert –, der Verbrauchsausweis die Praxis – den tatsächlichen Verbrauch – und die beiden Werte stimmen nicht immer überein. Der tatsächliche Verbrauch ist in der Praxis meist geringer als der berechnete Wert. Das macht es sehr schwierig, wenn Mieter und Käufer die energetische Qualität verschiedener Gebäude vergleichen wollen. Laien sind sich sicher oft nicht bewusst ist, dass es zwei unterschiedliche Ausweistypen gibt, deren Werte nicht vergleichbar sind. Damit ist die beabsichtigte Transparenz für Mieter und Käufer eingeschränkt.“*

Das grundsätzliche Problem wurde 2010 nicht gelöst: einerseits die massive Diskrepanz zwischen Bedarf und Verbrauch im Energieausweis (auf Basis absoluter Zahlen), andererseits auch der ungünstige Flächenbezug auf die Nutzfläche, welche dem Gebäudebesitzer oder Mieter nicht bekannt ist. Einen Vorschlag zur deutlichen Minimierung des damit einhergehenden Akzeptanzproblems liefert das IWU 2019, siehe Abbildung 240.

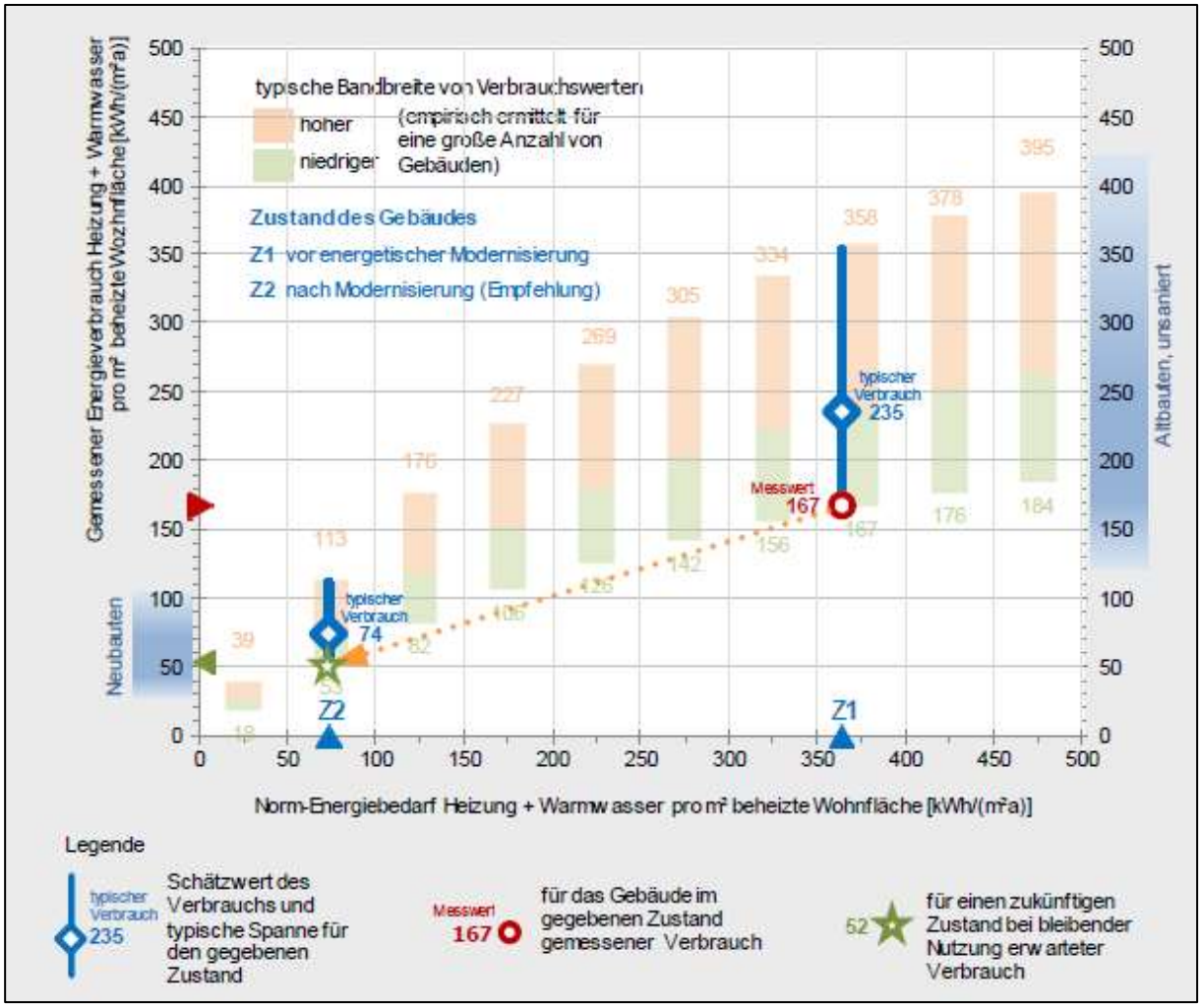


Abbildung 240 Alternativvorschlag für die Darstellung von Energiebedarfs- und Verbrauchskennwerten, Grafik aus [22]

Es ist ein Wohnflächenbezug vorhanden. Auch wird dem Leser ein Eindruck davon gegeben, welche systematische Diskrepanz zwischen Bedarf und Verbrauch gegeben ist und in welcher Bandbreite sich typische Verbräuche bewegen. Somit kann der eigene Verbrauch eingeordnet werden. Auch Pehnt et al. [34] schließen sich dem Vorschlag an, dass sich im Rahmen des öffentlich-rechtlichen Nachweises und in Berechnungen für die Förderung (hier individueller Sanierungsfahrplan) mittelfristig nur Bedarfswerte wiederfinden sollten, die ein typisches Verbrauchsniveau widerspiegeln.

Die Gutachter plädieren für eine rein verbrauchsbasierte Darstellung von Kennwerten, Konzeptvorschlag siehe Abbildung 241. Dabei ist die Bewertung der Kennwerte erweitert und bezieht sich auch auf andere Medien (Strom und Wasser) und basiert auf der Energieanalyse aus dem Verbrauch, siehe Anhang 5.3.

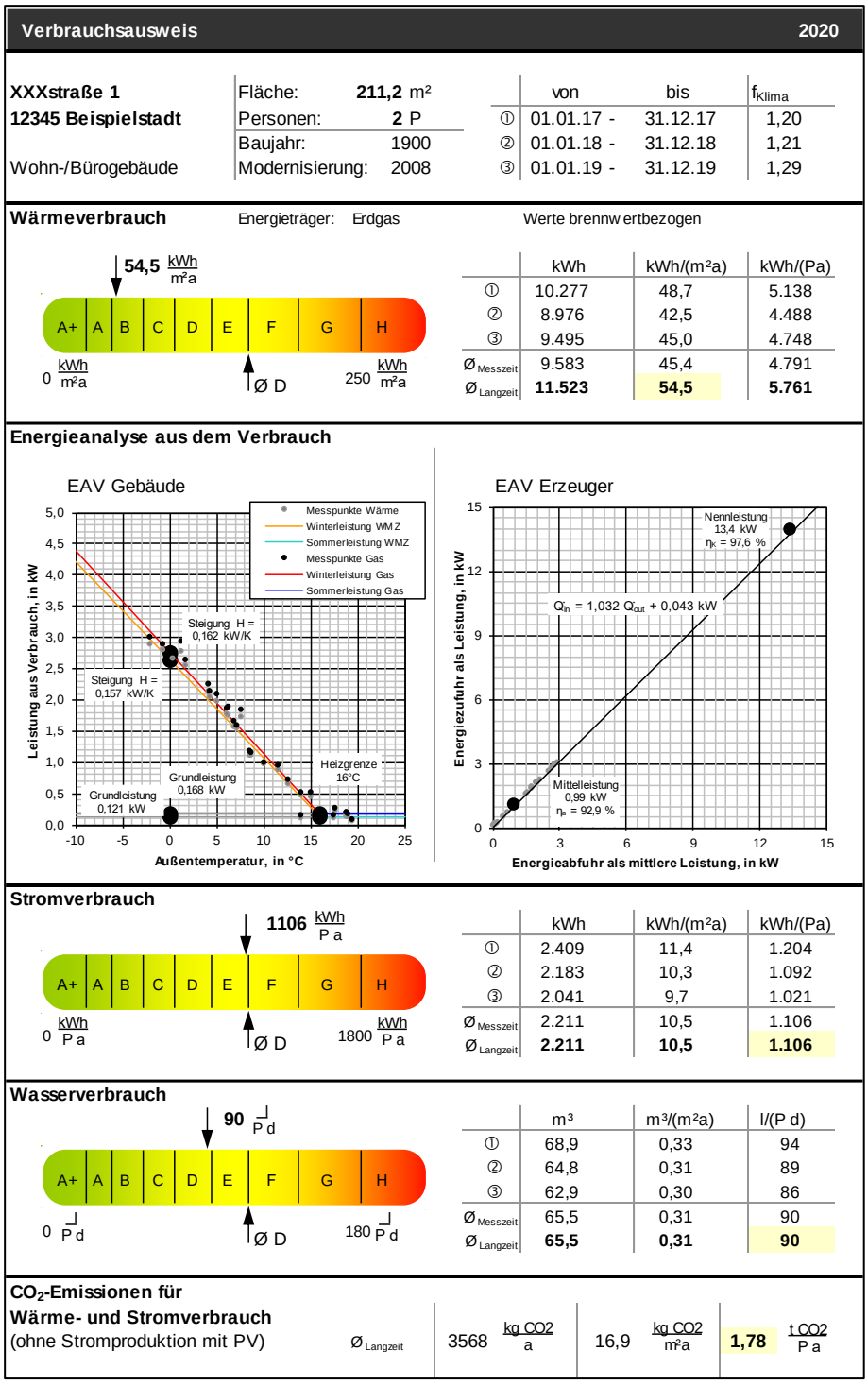


Abbildung 241 Alternativvorschlag für die einen reine Verbrauchsdarstellung [eigene Darstellung] aus [78]

Übertragung auf den Nichtwohnungsbau

Die Problematik ist im Nichtwohnbau grundsätzlich ähnlich gelagert [78]. Abbildung 242 zeigt eine Übersicht von Wärmeenergiebedarf und -verbrauch, Abbildung 243 entsprechend für den Energieträger Strom. Sowohl die Verbrauchswerte als auch die Bedarfswerte wurden so ermittelt, dass sie einem Energieausweis zugrunde gelegt werden könnten. Es gelten also u. a. Standardannahmen für das Nutzerverhalten als auch die Klimadaten.

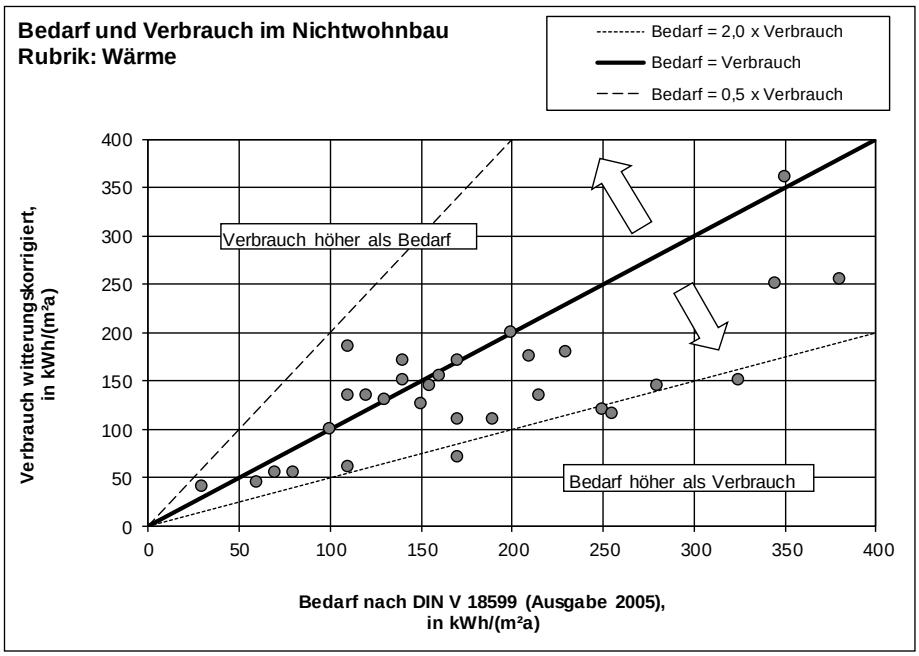


Abbildung 242 Endenergiebedarf und -verbrauch Wärme für ca. 30 Nichtwohnbauten, eigene Darstellung nach [295]

Die Tendenzen sind ähnlich denen im Wohnungsbau. Insbesondere bei Gebäuden im Bestand wird mit schlechter werdender Substanz die Schere zwischen Wärmebedarf und Wärmeverbrauch immer größer (Bedarf ist größer als Verbrauch). Die Einflüsse auf den Energiebedarf für Wärme sind vergleichbar mit denen bei Wohnbauten, jedoch wird die Ergebnisrelevanz der Einflüsse etwas anders eingeschätzt [78]:

- Innentemperatur (incl. räumliche und zeitliche Teilbeheizung des Gebäudes),
- Luftwechsel (incl. räumliche und zeitliche Teilbelüftung des Gebäudes),
- wärmetechnische Qualität der Regelbauteile (U-Werte) und Wärmebrücken,
- Qualitätssicherung in Planung und Ausführung (z. B. Hydraulischer Abgleich)
- Leitungslängen und Temperaturen der Wärmeverteilnetze,
- Erzeugereffizienz (bei Anlagen älter 20 bis 30 Jahre ggf. relevanter als die vorgenannten Einflüsse).

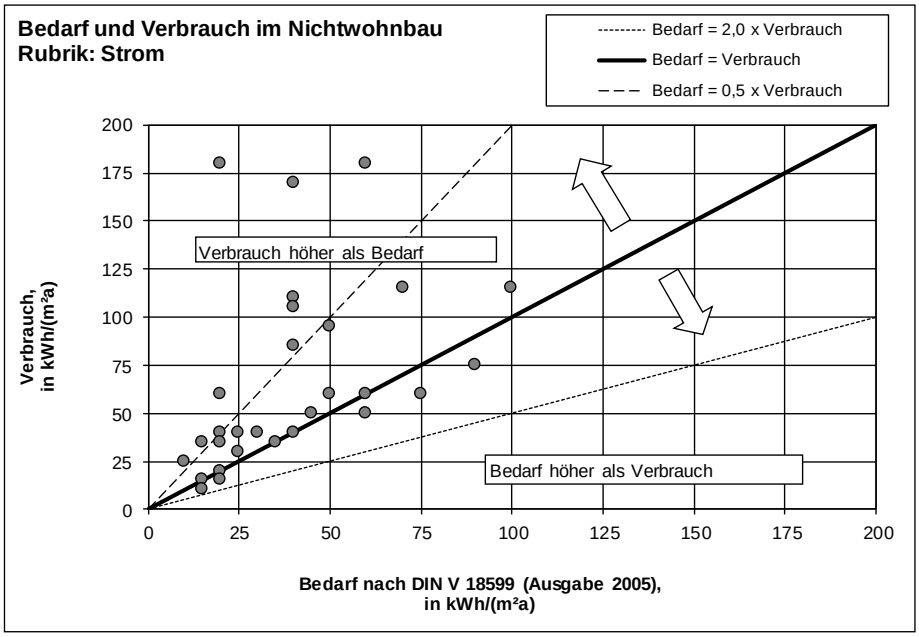


Abbildung 243 Endenergiebedarf und -verbrauch Strom für ca. 30 Nichtwohnbauten, eigene Darstellung nach [295]

Der Stromenergiekennwert enthält – rechnerisch – die Aufwendungen für die Beleuchtung, ggf. mechanische Lüftung, Heizung und Trinkwarmwasserbereitung und alle Hilfsaufwendungen der Wärme-, Kälte- und Lüftungsanlagen (Pumpen, Regelung usw.). Das erklärt den sehr großen Unterschied zum Verbrauch, der auch alle anderen Stromnutzungen enthält. Dies führt zu einer teilweise riesigen Abweichung (bis Faktor 9 in Abbildung 243) zwischen Bedarf und Verbrauch, wenn Produktions- und Werkstätten bewertet werden. Ein direkter Vergleich zwischen Stromverbrauch und -bedarf kann nicht gezogen werden, da keines der üblichen Bilanzverfahren es vorsieht, alle Stromverbraucher zu bilanzieren. Ist dies erwünscht, ergibt sich die Notwendigkeit einer individuellen Bilanzierung [78].

Eine Auswertung von Bundesliegenschaften zu Prebound- und Rebound-Effekten nach Weiß et al. (RWTH Aachen, BTU Cottbus für BBSR) zeigt keine systematisierbare Erkenntnis zum Bedarfs-/Verbrauchsabgleich [266], jedoch bezieht sich die Untersuchung auch nur auf 4 Liegenschaften. Insgesamt lässt sich daher aufgrund mangelnder Datenlage feststellen: eine systematische Bewertung der Diskrepanz zwischen Bedarf und Verbrauch ist nicht möglich und bedarf vertieften Forschungsbedarfs.

Die zusammengefasste Erkenntnis lautet zu diesem Zeitpunkt:

Offener Diskussionsbedarf und Zukunftsaufgaben

Viele Unterschiede zwischen Bedarf und Verbrauch resultieren aus einem falsch eingeschätzten Nutzerverhalten bei der Bedarfsbilanzierung. Hier ist insbesondere die Innentemperatur als relevant einzustufen. Sie ist nicht konstant und vielen Einflüssen unterworfen.

Die Innentemperatur ist zunächst geprägt durch unterschiedliche Sollwerte der Innentemperatur je nach Nutzung der Räume und Nutzerverhalten, wobei die sich ergebenden Temperaturen benachbarter Räume auch von der thermischen Kopplung der Räume untereinander abhängen. Weiterhin ist der Einfluss von zeitlichen Absenk- und Abschaltphasen gegeben; Auskühl- und Aufheizvorgänge werden von der Zeitkonstante des Gebäudes beeinflusst. Darüber hinaus ergibt sich eine Temperatur aufgrund der Güte der realen, mit Regelabweichungen verbundenen Raumregelung im Zusammenspiel mit der zentralen Vorregelung. In Phasen mit starkem Fremdwärmeaufkommen (Sonneneintrag o. ä.) ist darüber hinaus auch eine lokale und kurzzeitige Überschreitung des Temperatursollwertes festzustellen; wiederum auch beeinflusst von der Bauschwere und den Regelungseinrichtungen [78].

Die üblichen zur Bilanzierung angewendeten Verfahren nutzen folgende Größen zur Beschreibung der Innentemperatur [78]:

1. die Sollinnentemperatur
2. zeitliche Teilbeheizung
3. räumliche Teilbeheizung
4. Wärmeübergabe
5. Fremdwärmenutzungsgrad

Aus genannten Phänomenen 1 bis 3 resultiert regulär eine „Bilanzinnentemperatur“, während die Phänomene 4 und 5 bei der Bilanzierung separat belassen werden, z. B. in dem Normpaket DIN V 4108/4701, aber auch in der DIN V 18599. Ein Messwert enthält (mindestens) alle 5 der genannten Einflussgrößen.

Sofern über real gemessene Temperaturen eine Bedarfsbilanz nachträglich kalibriert werden soll, ist keine in den Normen beschriebene Größe direkt vergleichbar und durch den Messwert zu ersetzen. Erfolgt dies trotzdem, wie in der Untersuchung des IWU von 2019 [22], treten zwangsläufig Unschärfen auf.

Verschärft wird die Überlegung, wenn Fragestellungen der Qualitätssicherung einbezogen werden. Sofern eine nicht qualitätsgesicherte Anlagentechnik (fehlende Rohrleitungsdämmung im beheizten Bereich, fehlender hydraulischer Abgleich usw.) zu einem Mehrverbrauch führt, sind jeweils mehrere Bilanzgrößen davon betroffen: Verteilverluste, Erzeugereffizienzen, Innentemperaturen, ggf. Luftwechsel (wenn die Überwärmung von Räumen zu groß wird und Nutzer entsprechend reagieren). Die Querverbindungen der Größen sind sehr vielschichtig.

In der Dissertation der Gutachterin aus dem Jahr 2004 [91] wurde daher der Vorschlag unterbreitet, die Bedarfsbilanzverfahren grundsätzlich bzgl. der Eingangsgrößen zu vereinfachen und zusätzlich eine Differenzenergiemenge „ΔQ“ einzuführen, um alle Effekte mangelnder Qualitätssicherung gebündelt zu erfassen (ohne sie auseinander rechnen zu müssen). Dies setzt allerdings größere Stichproben mit Messwerten voraus (mit und ohne Qualitätssicherung im Vergleich), welche zurzeit nicht verfügbar sind.

Zukunftsaufgaben, die sich aus der Thematik „Bedarf vs. Verbrauch“ ableiten, lauten daher nach Ansicht der Verfasser des vorliegenden Gutachtens:

- statistische Erhebung von Verbrauchsdaten als Jahresdaten und unterjährig (siehe Anhang 5.3)
- Erfassung typischer Energiekennwerte für Gebäude mit und ohne Qualitätssicherung (ggf. verschiedener Abstufungen von Qualitätssicherung für bauliche und anlagentechnische Elemente)
- Bestimmung typischer Einsparpotentiale der Qualitätssicherung
- Kalibrierung der Bedarfsverfahren (öffentlich-rechtlicher Nachweis) anhand der gefundenen Erkenntnisse

5.3 Energieanalyse aus dem Verbrauch

Auf Basis von Jahresverbrauchswerten der Endenergie lassen sich (grobe) Klassifizierungen und Einstufungen für Energieverbraucher vornehmen. Das betrifft Einzelverbraucher und Geräte, aber auch Gebäude bis hin zu komplexen Liegenschaften. Voraussetzung ist eine gemeinsame Vergleichsbasis: Flächen- oder Personenbezug, gleicher Zeitraum, ähnliche Klimabedingungen, bei Brennstoffen die Festlegung von Heiz- oder Brennwert. Nachfolgend werden Auswerte- und Korrekturverfahren, auch für unterjährige Messwerte beschrieben.

5.3.1 Erfassung von Energiemengen

Erfasst werden in einem Gebäude alle Energieträger über Zähler oder Einkaufsbelege. Um mehr als einen Gesamtkennwert je Untersuchungsobjekt zu erhalten, empfiehlt sich die in Abbildung 244 beispielhaft an einem Wohngebäude (mit Heizung und Trinkwassererwärmung) dargestellte Ausstattung mit Zählern. Dies ist auch auf andere Medien (Strom, Kälte) und Erzeuger übertragbar.

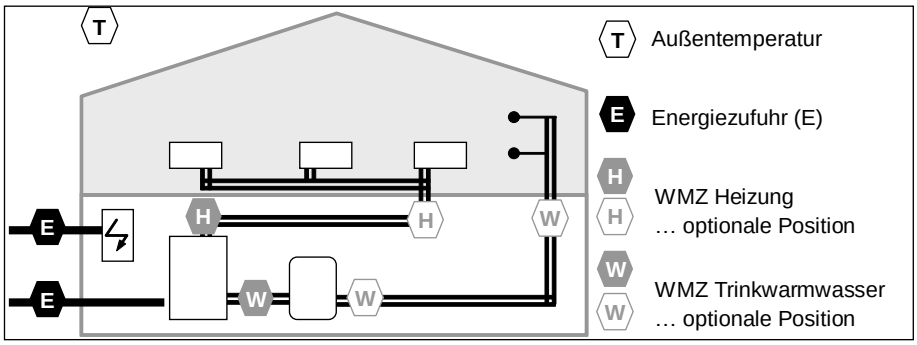


Abbildung 244 Positionierung von Zählern am Beispiel eines Wohngebäudes [eigene Darstellung] aus [78]

Neben einem Primärzähler gibt es zwei Unterzähler für die vom Erzeuger abgegebenen Wärmemengen für Trinkwarmwasser und Heizung. Mit dem Unterzähler für Heizung kann in erster Näherung die dem beheizten Bereich zugeführte Wärmemenge bestimmt werden. Je nach Lage inklusiv oder exklusiv der Leitungsverluste im Keller. Analoges gilt für die Trinkwarmwasserbereitung. Aus der Differenzbildung zwischen Primärzähler und Unterzählern ergeben sich die Wärmeverluste des Erzeugers [78].

Ein witterungsabhängiger Verbraucher kann problemlos mit einem witterungsunabhängigen Verbraucher gemeinsam gezählt werden, z. B. ein Heizkreis und die Trinkwassererwärmung. Sind dagegen verschiedene Verbraucher gegenläufig von der Witterung abhängig, wie z. B. Heizung und Kälteerzeugung aus Wärme, ist es zielführend, diese getrennt zu erfassen. Weitere Hinweise zum Zählerkonzept sind aus eigenen Arbeiten der Gutachter [108] zu entnehmen. Ebenso Arbeitshilfen zur Abschätzung nicht thermischen Verbrauchs (z. B. Kochgas im Wohnungsbau) und Hinweise zum Umgang mit Lageranfangs- und Endbeständen bei nicht leitungsgebundenen Energieträgern [78].

Der Mengenerhebung folgt die Umrechnung in Energiemengen. Bei Brennstoffen (Erdgas, Flüssiggas, Heizöl, Holz, Kohle) wird die verbrauchte Menge in eine Energiemenge umgerechnet – sofern dies nicht schon seitens des Versorgers erfolgt ist. Es empfiehlt sich der Brennwertbezug, siehe auch Anhang 5.5.

5.3.2 Witterungs- und Zeitkorrektur

Um den Energieverbrauch eines Gebäudes mit dem Verbrauch anderer (ähnlich genutzter) Gebäude oder anderer Zeiträume zu vergleichen, ist (für die witterungsabhängigen Verbrauchsanteile) eine Witterungskorrektur erforderlich. Diese gleicht zum einen unterschiedliche Außentemperaturen, zum anderen unterschiedlich lange Messintervalle aus. Streng genommen handelt es sich also nicht nur um eine reine Witterungskorrektur, sondern um eine Zeit- und Witterungskorrektur. Das Nutzerverhalten wird nicht korrigiert [78].

Gradtagszahl und Heizgradtage

Zur Erläuterung der Thematik wird eine Unterscheidung von Gradtagszahlen Gt und Heizgradtagen G vorangestellt, siehe Abbildung 245. Die Gradtagszahlen Gt sind das Flächenintegral zwischen der Innentemperatur ϑ_i und der Außentemperatur ϑ_e im Verlauf einer Heizperiode t_{HP}. Heizgradtage G sind das Flächenintegral zwischen der Heizgrenztemperatur ϑ_{HG} und der Außentemperatur ϑ_e in einer Heizperiode t_{HP} [78].

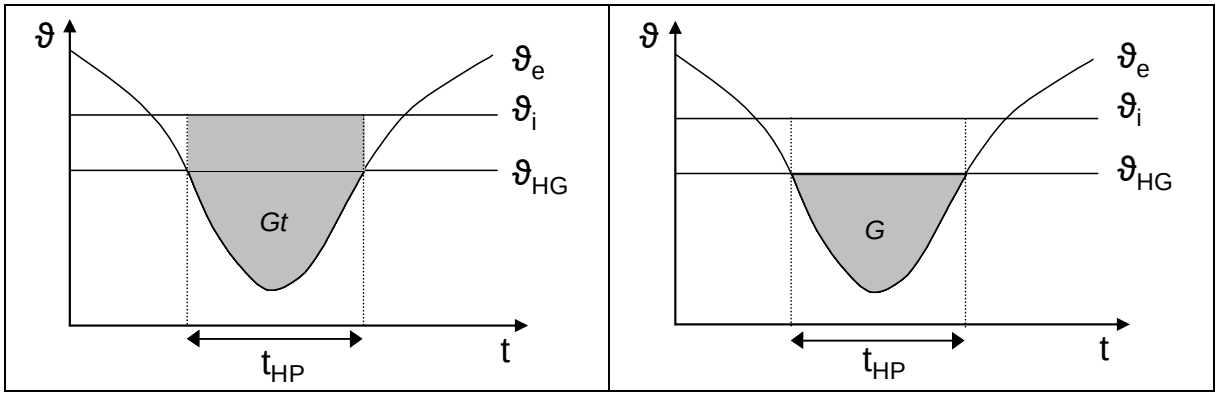


Abbildung 245 Schematische Darstellung von Gradtagszahlen und Heizgradtagen [eigene Darstellung] aus [78]

Im Sinne der Energiebedarfsbilanzierung ist die Gradtagszahl proportional zu der Energiemenge, die ein Gebäude in der Heizzeit aufgrund von Wärmeverlusten für Transmission und Lüftung verliert. Diese Verluste werden gedeckt aus zwei Quellen: der aktiven Beheizung (Heizkörper o. ä.) sowie die passive Versorgung aus inneren und solaren Fremdwärmequellen [78].

Den „Umschlagpunkt“ zwischen einer Versorgung des Gebäudes ausschließlich über Fremdwärmequellen beschreibt die Heizgrenztemperatur. Liegt die Außentemperatur oberhalb der Heizgrenztemperatur werden die Verluste des Gebäudes allein von den Wärmegewinnen gedeckt. Liegt sie darunter, wird zusätzlich aktiv geheizt. Die Heizgradtage sind daher proportional zu der Energiemenge, die dem Gebäude aktiv als Nutzwärmemenge zuzuführen ist [78].

Witterungskorrektur

Der allgemeine Korrekturansatz für eine gemessene Heizenergiemenge $Q_{H,mess}$ lautet:

$$Q_{H,korr} = Q_{H,mess} \cdot f_{Klima}$$

Formal korrekt müsste die Witterungskorrektur mit dem Verhältnis von Heizgradtagen (Standard/Messwert) als Umrechnungsfaktor f_{Klima} erfolgen. In der Praxis werden jedoch beide Ansätze – Heizgradtage und Gradtagszahl – parallel nebeneinander benutzt [78].

Dies ist vor allem durch statistische Test mit großen Datenmengen begründet. Das „korrekte Witterungskorrekturverfahren“ liefert für eine große Anzahl von Objekten in mehreren aufeinander folgenden Jahren identische witterungskorrigierte Verbräuche bzw. die kleinste Standardabweichung. Die VDI 3807-1 verwendet die Gradtagszahl mit einer standardisierten Heizgrenze von 15°C und einer Standardinnentemperatur von 20°C [290].

Die Gutachter haben mit solchen Versuchen in einem Forschungsvorhaben [23] keine eindeutige Tendenz für das optimale Verfahren gefunden. Es zeigte sich, dass unter den vier grundsätzlichen Ansätzen (Korrektur mit Heizgradtage vs. Gradtagszahl, Verwendung einer individuellen Heizgrenze vs. Standardheizgrenze von 15°C) das Verfahren „Heizgradtage mit individueller Heizgrenze“ marginal besser abschnitt als die beiden Versionen mit Gradtagszahl.

In der Praxis zeigt sich, dass jedes Korrekturverfahren Grenzen in sehr warmen und kalten Jahren aufweist (Prinzip: „Überkompensation“). Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens werten im Rahmen eines Langzeitmonitorings Verbrauchsdaten von etwa 50 Gebäuden seit mehr als 15 Jahren aus [26]. In sehr kalten Jahren führt die Witterungskorrektur regelmäßig zu einem geringeren korrigierten Verbrauch als bei Durchschnittsjahren. Eine sinnvolle Erklärung ist das sparsamere Lüftungsverhalten bei kalter Witterung. In warmen Jahren kehrt sich der Effekt um.

Der Nutzereinfluss auf den Verbrauch (insbesondere durch das Lüftungsverhalten) kann nicht in einer Witterungskorrektur ausgeglichen werden. Ein abweichendes Lüftungsverhalten kann jedoch in unterjährigen Messwerten erkannt werden.

Es ist beim Vergleich verschiedener Primärdaten zu beachten, dass das langjährige Klima (als Gradtagszahl oder Heizgradtage) nicht identisch angenommen wird. Zurzeit werden häufig – in Anlehnung an die EnEV – die Daten der Referenzstation „Potsdam“ (Jahre 1981 - 2010) zugrunde gelegt. Die VDI 3807-1 verwendet den früheren EnEV-Referenzstandort „Würzburg“ [290].

Heizgrenztemperatur

In der Energiebedarfsbilanzierung gilt: je geringere Wärmeverluste und je höhere Wärmegewinne ein Gebäude hat, desto niedriger liegt die rechnerische Heizgrenze. In der Praxis verwischen die gemessenen Grenzwerte. Bei unbekannten Verhältnissen wird daher von 15°C als Heizgrenze ausgegangen, da dies in der Mehrzahl untersuchter, auch sehr gut gedämmter Gebäude anzutreffen ist [78].

Die Höhe der Heizgrenztemperatur hängt stark von der Innentemperatur im Gebäude ab. Die real feststellbaren höheren mittlere Innentemperaturen in Gebäuden mit guter Dämmung führen zu nur geringen Unterschieden von Heizgrenztemperaturen im Alt- und Neubau, siehe Abbildung 246.

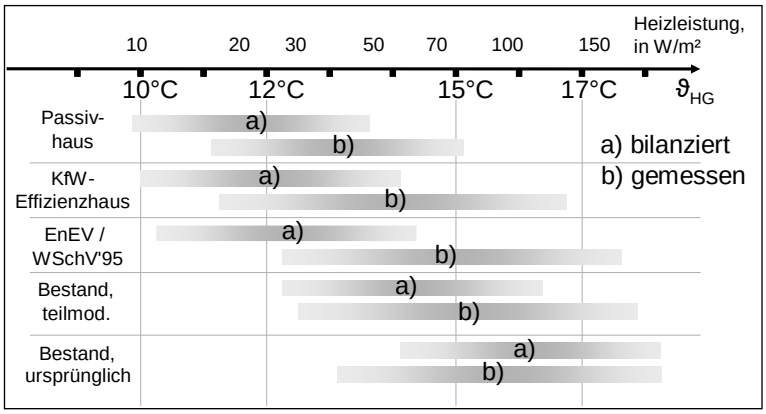


Abbildung 246 Typische Heizgrenztemperaturen [eigene Darstellung] aus [78]

Eine Heizgrenztemperatur kann im konkreten Einzelfall auch messtechnisch bestimmt werden, siehe Anhang 5.3.3.

Die messtechnische Bestimmung der Heizgrenztemperatur im Einzelfall ist ein kostengünstiges Hilfsmittel zur Qualitätssicherung.

Zeitkorrektur

Für den gemessenen Anteil am Gesamtverbrauch eines Gebäudes, der nicht von der Witterung abhängt, gilt folgende Korrekturgleichung:

$$Q_{W,korr} = Q_{W,mess} \cdot f_{Zeit}$$

Der Index „W“ wurde gewählt, weil beispielsweise der Warmwasseranteil an der Gebäudeversorgung nahezu witterungsunabhängig ist. Aber auch Stromverbrauchskennwerte für Elektrogeräte, viele Prozessenergien u. ä. fallen darunter. Korrigiert wird im Verhältnis eines Standardzeitraum (meist ein Jahr) zum Messzeitraum, ausgedrückt durch das Verhältnis f_{Zeit} [78].

Verbrauchsanteile

Die getrennte messtechnische Erfassung von witterungsabhängigen und witterungsunabhängigen Verbrauchsanteilen mit je einem Zähler ist optimal. Ist nur ein gemeinsamer Zähler vorhanden, ist die Bestimmung des witterungsunabhängigen Grundverbrauchs durch eine Sommermessung oder Energieanalyse möglich, vgl. Anhang 5.3.3. Fehlen Messungen, kann standardmäßig aufgeteilt werden, siehe auch Anhang 5.4.2.

5.3.3 Energieanalyse aus dem Verbrauch

Jahresverbrauchswerte führen zu einer Gesamtbewertung von Gebäuden und Liegenschaften. Detailliertere Informationen liefern Messwerte aus kürzeren Zeiträumen, z. B. aus wochen- oder monatsweisen Intervallen. Solche Verfahren werden „Energieanalyse aus dem Verbrauch“ (EAV) oder „Energiesignatur“ genannt. Die Verbrauchswerte sind dabei in Korrelation mit der zugehörigen Belastung (Außentemperatur, mittlere Kesselbelastung usw.) zu bringen [78].

Zwei Detailverfahren sind nach den Arbeiten der Gutachter vor allem für die Qualitätssicherung von Energieeinsparkonzepten und das Monitoring geeignet:

- die EAV des Gebäudes mit Auswertung des Wärmeverbrauchs über der Außentemperatur; zur Beurteilung der Heizgrenze, lastabhängiger und lastunabhängiger Energiekennwerte, siehe auch [92]
- die EAV des Erzeugers mit Auswertung der Erzeugernutzwärmeabgabe und der zugeführten Endenergie; zur Gewinnung lastunabhängiger Verluste sowie der Effizienz der Energieumwandlung; siehe auch [25]

Die erfassten Energiemengen entstammen Zählern. Das Zählerschema aus Abbildung 244 in Anhang 5.3.1 sowie zugehörige Erläuterungen gelten entsprechend. Wichtig ist: für Erzeuger sind Input- und Outputzähler vorzusehen, wobei letzerer gleichzeitig der Inputzähler für das Gebäude ist. Die Ausstattung entspricht somit auch dem Konzept, welches in der „Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung“ (EnSanMV) [106] für Wärmepumpen bereits vorgesehen sowie im Entwurf für die künftige „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ [107] im Falle von Einzelmaßnahmen an Erzeugern vorgesehen ist.

Die Energiemengen werden in mittlere Leistungen umgerechnet und anschließend grafisch aufbereitet. Das konkrete Verfahren ist in mehreren Regelwerken beschrieben, z. B. in der VDI 3807-5 [108], aber auch im Beiblatt 1 zur DIN V 18599 [109]. Die mittleren Außentemperaturen entstammen denselben Datenquellen wie im Falle der Witterungskorrektur (z. B. dem Datenbestand des Deutschen Wetterdienstes).

Gebäude-EAV aus Wärmemengenzählerwerten

Abbildung 247 zeigt eine beispielhafte Gebäude-EAV. Der ausgewertete Wärmemengenzähler erfasst die Energiemengen für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung (gemeinsam). Er ist hinter dem Erzeuger angeordnet, dessen Verluste entsprechend nicht in den Werten enthalten ist. Es gibt insgesamt 14 Messintervalle und damit Messpunkte. Es ergibt sich ein charakteristisches Bild des Verbrauchers mit folgenden wichtigen Detailerkenntnissen:

- die Grundleistung $\dot{Q}$ (in kW), welche zusätzlich auf die Gebäudefläche bezogen werden kann ($\dot{q}$ in W/m²), als Maß für den witterungsunabhängigen Verbrauch, i.a. die Trinkwassererwärmung,
- die Heizgrenze (in °C), oberhalb der kein Heizungsverbrauch mehr erkennbar ist,
- die Steigung H (in kW/K), welche zusätzlich auf die beheizte Gebäudefläche (Wohnfläche, Nettogrundfläche) bezogen werden kann (h in W/m²K), als Maß für den witterungsabhängigen Verbrauch.

Als Kernheizzeit wird ein Bereich angesehen, in dem (ohne Unterbrechungen) alle Tage im jeweiligen Messintervall unter der Heizgrenze lagen. Bei ca. 3- bis 4-wöchigen Messintervallen endet die Kernheizzeit bei geschätzt 8 bis 9°C Außentemperatur. Es schließt sich bis zur Heizgrenze eine Übergangszeit an, dann der heizfreie Sommer.

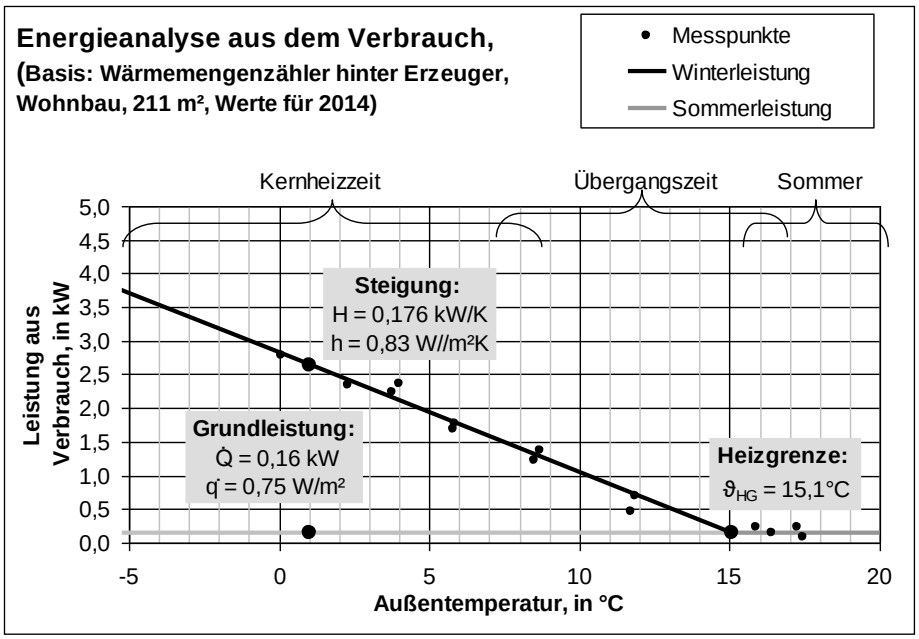


Abbildung 247 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Wärmemengenzählerwerten [eigene Darstellung] aus [78]

Aus der Grundleistung ergibt sich der Anteil witterungsunabhängigen Verbrauches (bezogen auf den Jahresverbrauch). Der witterungsabhängige Heizungsverbrauch kann als Differenz zum Gesamtverbrauch bestimmt werden. Es können anschließend folgende Einzelaspekte interpretiert und analysiert werden [78]:

1. Steigung: sie ist in erster Linie ein Maß für die Güte des Gebäudes; es wird ein Verlustkennwert h [in W/(m²·K)] gebildet, indem die Steigung H der Regressionsgeraden [in W/K] auf die Wohnfläche A_{Wohn} [in m²] bezogen wird; niedrigere Werte ergeben sich bei guten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) der Gebäudehülle, kompakter und luftdichter Bauweise sowie bei höherer Teilbeheizung und damit sparsamerer Lüftung; der Heizwärmeverbrauch q_h (in [kWh/(m²)] ergibt sich auch als Produkt des Verlustkennwertes h [in W/(m²K)] und den Heizgradstunden G [in kKh/a]
2. Sockelleistung: sie ist in erster Linie ein Maß für die Trinkwassererwärmung (Nutzen plus Netz-/Speicherverlust); niedrige Werte ergeben sich mit sparsamem Nutzerverhalten und optimierten Verteilnetzen; ein niedriger flächenbezogener Wert ergibt sich ebenfalls bei einer geringen Personenbelegung, eine bessere Einordnung liefert daher der Personenbezug; wenn gleichzeitig auch noch der Wasserverbrauch (für Warmwasser) bekannt ist, kann der Messwert in Nutzen und Verluste (Verteilnetz, Speicher) aufgeteilt werden
3. Heizgrenze: sie ist ein Maß für den baulichen Wärmeschutz in Kombination mit dem Nutzerverhalten; niedrige Werte ergeben sich bei geringen Innentemperaturen und geringer nutzungsbezogener Lüftung sowie gleichzeitig gutem Wärmeschutz; höhere Werte können auch ein Indiz für fehlende Wärmegewinne (z. B. aufgrund von Verschattung) sein
4. Ausreißerpunkte an sehr kalten Tagen: Punkte unter der Steigungsgeraden; sind ein Indiz für den Abbruch von „normalem“ (aktivem) Lüftungsverhalten und geben Aufschluss über die Aufteilung zwischen Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten
5. Ausreißerpunkte in der Nähe der Heizgrenze: Punkte über der Steigungsgeraden; sind ein Indiz für überproportionales Lüftungsverhalten, z. B. aufgrund von Überversorgung der Räume bei fehlender Qualitätssicherung, v. a. der Anlagentechnik (unkontrollierte Rohrwärmeabgabe, fehlender hydraulischer Abgleich, schlechte Regelgenauigkeit der Thermostatventile).

Typische Vergleichswerte zur Einordnung der Kennwert 1 bis 3 sind Tabelle 151 oder der Literatur zu entnehmen, z. B. [78]. Sie stammen der Projekterfahrung der Gutachter [23] [26] [95] [27].

Klassifizierung	Steigung	Sockel		Heizgrenze
	h, H je Wohnfläche	q̇ je Person	q̇ je Wohnfläche	
	[W/(m²K)]	[W/P]	[W/m²]	[°C]
sehr hoch	2 - 3	> 180	> 5,0	≥ 18°C
hoch	1,5 - 2,5	130 - 180	3,1 - 4,9	16 - 17°C
mittel	1,0 - 2,0	90 - 130	2,0 - 3,0	15°C
gering	0,7 - 1,3	50 - 90	1,1 - 1,9	13 - 14°C
sehr gering	0,5 - 1,0	< 50	< 1,0	≤ 12°C

Tabelle 151 Einordnung der Kennwerte aus der Energieanalyse EAV des Gebäudes [eigene Darstellung]

Gebäude-EAV aus Endenergiezählern

Aus Werten der Endenergiezähler lässt sich ebenfalls eine Energieanalyse des Gebäudes erstellen, siehe Abbildung 248. Es kann eine Aufteilung in die beiden Verbrauchsanteile: witterungsabhängig- und unabhängig vorgenommen werden.

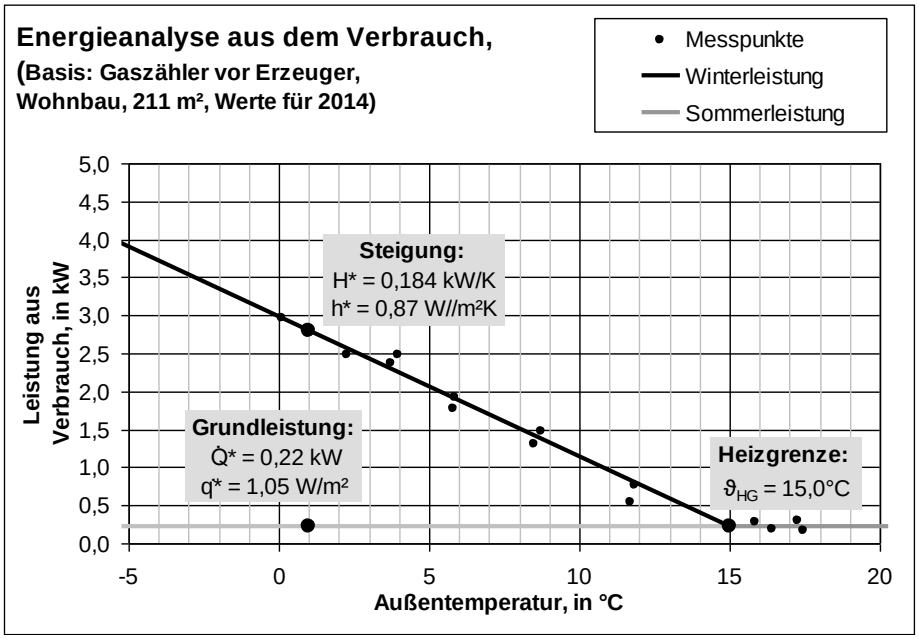


Abbildung 248 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Gaszählerwerten [eigene Darstellung] aus [78]

Alle Kennwerte (Grundleistung, Steigung und daraus abgeleitete Größen) lassen sich ebenso bestimmen, jedoch enthalten sie die (unbekannte) Effizienz des Erzeugers – was bei der Interpretation zu bedenken ist. Ist ein sehr guter Kessel vorhanden, dessen Effizienz nahe 100 % liegt, ergeben sich ähnliche Zahlwerte wie bei der Auswertung von Wärmemengenzählerwerten. Dies ist aber auf keinen Fall verallgemeinerbar, da der Nutzungsgrad von Kesseln oder die Arbeitszahl von Wärmepumpen weder über der Außentemperatur konstant sind und die Jahreswerte in der Praxis sehr stark schwanken können [78].

Erzeuger-EAV

Die dem Kessel zugeführte Energie verlässt diesen als: Nutzenergieabgabe (Zählermesswert), weitgehend lastunabhängige Verluste (Betriebsbereitschaftsverluste) sowie lastabhängige Verluste (Abgas- und Strahlungsverluste). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 249 als Diagramm dargestellt (gleiches Gebäude wie in Abbildung 247 und Abbildung 248). Der Aufwand ist über dem Nutzen aufgetragen. Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die Effizienz der Umwandlung von Energie im Betrieb, der Achsenabschnitt ist ein Maß für die Betriebsbereitschaftsverluste [78].

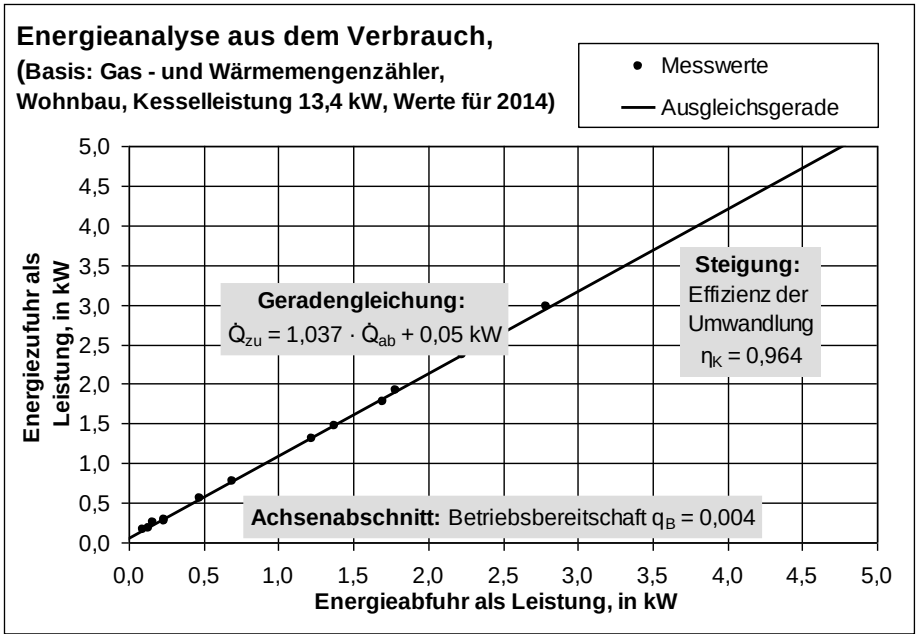


Abbildung 249 Energieanalyse eines Kessels auf Basis von Wärmemengen- und Gaszählerwerten [eigene Darstellung] aus [78]

Für den Gasbrennwertkessel ergibt sich aus 14 Messpunkten ein Achsenabschnitt von 50 W (Betriebsbereitschaft bei Nulllast) sowie die Erkenntnis, dass jeweils 3,7 % mehr Energie für die Umwandlung aufgewendet wird als nutzbar gemacht wird.

5.3.4 Qualitätssicherung mit Verbrauchsdaten

Das Verfahren der EAV oder Energiesignatur eignet sich als Mittel der Qualitätssicherung (in der Planung sowie im Betrieb) und zur Einschätzung des Nutzerverhaltens [78].

Nutzerverhalten

Aus der Extrapolation der Verbrauchswerte in der Kernheizzeit (etwa November bis Februar) kann eine theoretisch erreichbare Heizgrenze bestimmt werden. In der Kernheizzeit ist die innere und solare Fremdwärme fast konstant, so dass auch viele Realprojekte eine sehr gute Regression der Messwerte zeigen [23] [26].

In der Übergangszeit sind die Verbrauchswerte sehr viel stärker dem Einfluss des Nutzerverhaltens und der solaren Einstrahlung unterworfen. Sie liegen i. d. R. nicht mehr so eindeutig auf der „Kernheizzeit-Regressionsgeraden“, sondern streuen mehr. Es gibt folgende Tendenzen:

- in den Übergangszeiten Frühjahr und Herbst entsteht durch die höheren Solareinstrahlungen eine erhöhte mittlere Fremdwärmeleistung; dies führt bei unverändertem Nutzerverhalten zu einer niedrigeren Heizgrenztemperatur; die Verbrauchswerte liegen tendenziell unter der „Kernheizzeit-Regression“,
- da in den Übergangszeiten aus den verschiedensten Gründen aber häufig viel stärker gelüftet wird, kann jedoch auch der gegenteilige Effekt auftreten; die Verbrauchswerte liegen tendenziell über der „Kernheizzeit-Regression“,
- die zusätzlichen solaren Lasten ermöglichen etwas höhere Lüftung, wobei die beiden Effekte sich in etwa aufheben.

Durch einen Vergleich aus der theoretisch erreichbaren Steigung und den zugehörigen Heizgradtagen (die Heizgrenze ergibt sich als Nullstelle der Regression oder vereinfacht für eine automatische Auswertung festgelegt auf 15°C) mit dem echten Heizwärmeverbrauch kann ein Verschwendungspotential ΔQ abgeschätzt werden.

Diese Überlegungen gehen davon aus, dass das Nutzerverhalten in der Kernheizzeit korrekt und angemessen ist. Die Verschwendung in der Übergangszeit entsteht überwiegend durch Lüftung, da der Transmissionsanteil an der Steigung kaum veränderliche Größen aufweist. Die Lüftung kann durch den Nutzer selbst motiviert sein („den Frühling in die Wohnung lassen“), aber auch durch die Anlage aufgezwungen (hohe nicht regelbare Wärmeabgabe von Rohrleitungen, z. B. Etagenringleitungen). Mehrere Praxisbeispiele dieser Art sind im Projekt „Optimus“ dokumentiert [23].

Luftwechsel und Wärmedurchgangskoeffizienten, Innentemperatur und Fremdwärme [78]

Die Steigung H entspricht der Summe aus Transmissionsheizlast H_T und Lüftungsheizlast H_V einer Energiebedarfsrechnung. Wichtig für weitergehende Überlegungen ist die Tatsache, dass die Steigung der Regressionsgeraden von einer mittleren Raumtemperatur unabhängig ist. Eine veränderte Innentemperatur verschiebt die Gerade parallel, siehe Abbildung 250.

Die gemessene Steigung lässt sich mit der berechneten im Rahmen einer Energiekonzepterstellung vergleichen (Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich). Alternativ und den Prozess stark vereinfachend wird bei der Bestandsbewertung, z. B. im Rahmen einer Energieberatung, komplett auf die detaillierte Aufnahme und Abschätzung der Güte der Gebäudehülle verzichtet und nur auf Basis des Messwertes gerechnet.

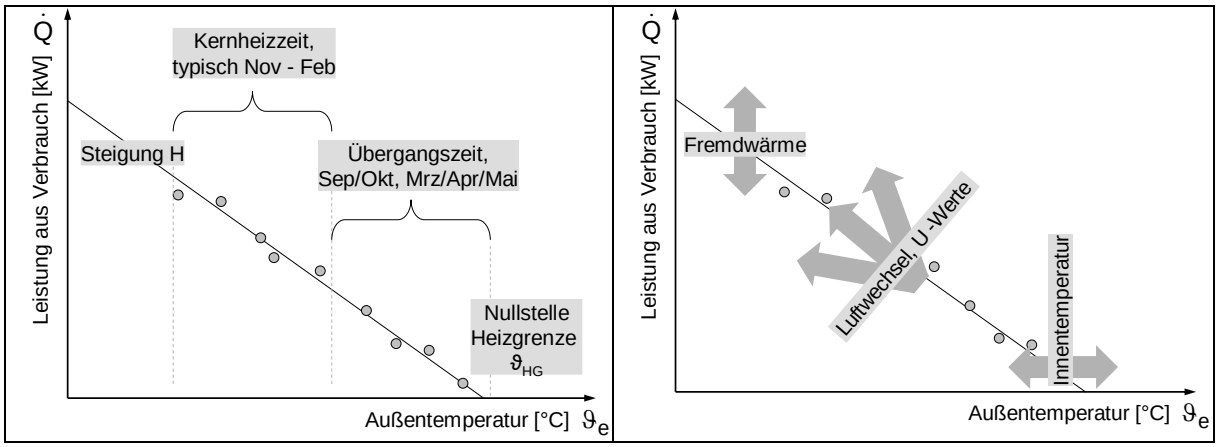


Abbildung 250 Übergang EAV zur Bedarfsberechnung des Gebäudes [eigene Darstellung] aus [78]

Gäbe es keine Fremdwärme, wären Heizgrenztemperatur und Innentemperatur identisch. Die im Gebäude freiwerdende Fremdwärme verschiebt die Gerade in erster Näherung parallel – unter der Annahme über das Jahr konstanter interner und solarer Lasten. Dieser Ansatz ist eine Näherung, da die solare Last in der Übergangszeit steigt, wobei die internen Lasten nachweislich leicht sinken.

Auch die gemessenen Werte für die Heizgrenztemperatur und ggf. die Grundleistung (für die Trinkwarmwasserbereitung) lassen sich – ebenso wie die Fremdwärmeleistung – mit den Annahmen der Bedarfsbilanz abgleichen.

Die messtechnische gegebene EAV des Gebäudes kann rechnerisch nachgebildet werden. Allerdings ist die Lösung nicht eindeutig. Die Außentemperatur, die Hüllflächen und das Luftvolumen des Gebäudes werden zunächst als bekannt vorausgesetzt. Darüber hinaus gilt:

- ein mittlerer Luftwechsel und die Wärmedurchgangskoeffizienten bestimmen die Steilheit der Kurve; es gibt mehrere Wertepaare, die zur gleichen Steigung führen (geringe Luftwechsel + schlechte U-Werte und umgekehrt),
- die Innentemperatur und die Fremdwärme verschieben die Ergebniskurve parallel nach oben und unten; es gibt mehrere Wertepaare, die zur gleichen Parallelverschiebung führen (kleine Innentemperatur + kleine Fremdwärmemenge und umgekehrt).

Es lassen sich also jeweils nur (mehr oder weniger wahrscheinliche) Paare dieser Größen finden, für welche die gemessene und die rechnerische Kurve deckungsgleich sind. Das Verfahren wurde u. a. in einem Forschungsvorhaben zur Bewertung des Lüftungsverhaltens eingesetzt [230].

Wirkungsgrad und Betriebsbereitschaftsverluste [78]

Der Zusammenhang in der Kessel-EAV bzw. Energiesignatur des Kessels lässt sich in einer Gleichung darstellen. Der Achsenabschnitt (Parallelverschiebung aus dem Ursprung nach oben) ist ein Maß für die lastunabhängigen Verluste (Bereitschaftsverluste). Die Steigung ist das Maß für die Effizienz der Energieumwandlung (Wirkungsgrad). Je steiler der Anstieg, desto ineffizienter die Energieumwandlung, siehe Abbildung 251.

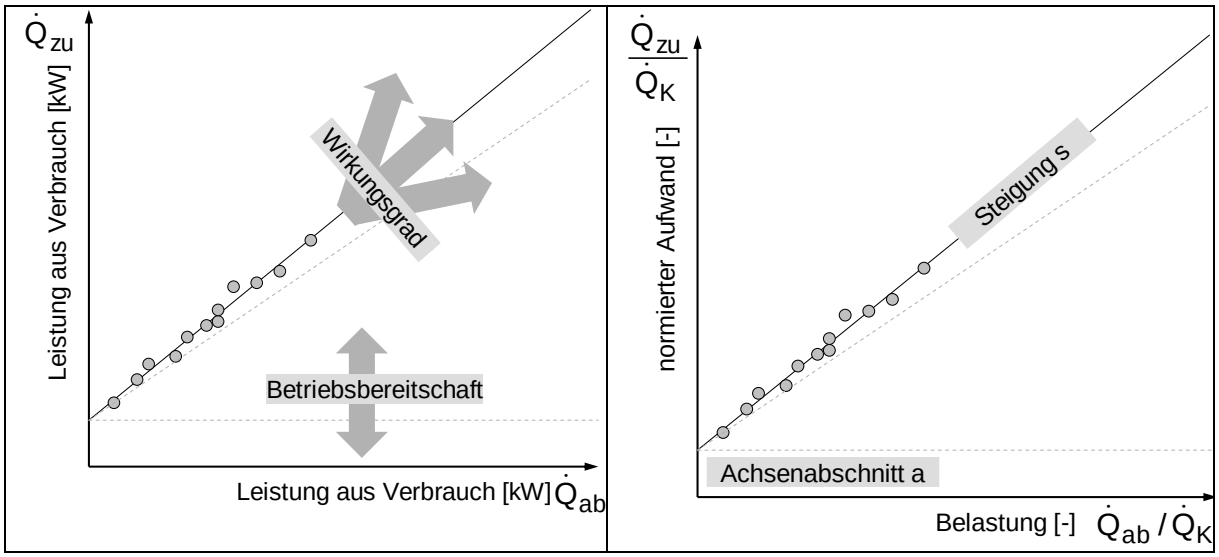


Abbildung 251 Übergang EAV zur Bedarfsberechnung des Erzeugers [eigene Darstellung] aus [78]

Beide Achsen können normiert werden, indem auf die Kesselnennleistung bezogen wird. Die Abszisse zeigt dann die Belastung des Kessels (Nulllast bis Volllast). Aus Steigung und Achsenabschnitt lassen sich Bereitschaftsverlust des Kessels sowie der Kesselwirkungsgrad bestimmen. Die gewonnenen Erkenntnisse können mit Herstellerwerten oder typischen Werten verglichen werden.

Eine Qualitätssicherung kann für einzelne Kessel erfolgen. Alternativ lassen sich über große Stichproben Einflüsse von Einzelmerkmalen herausarbeiten. Mehr als 60 Kesselanlagen wurden nach dem genannten Schema im Projekt „Brennwertkessel“ analysiert [194]. Abbildung 252 zeigt eine beispielhafte Auswertung.

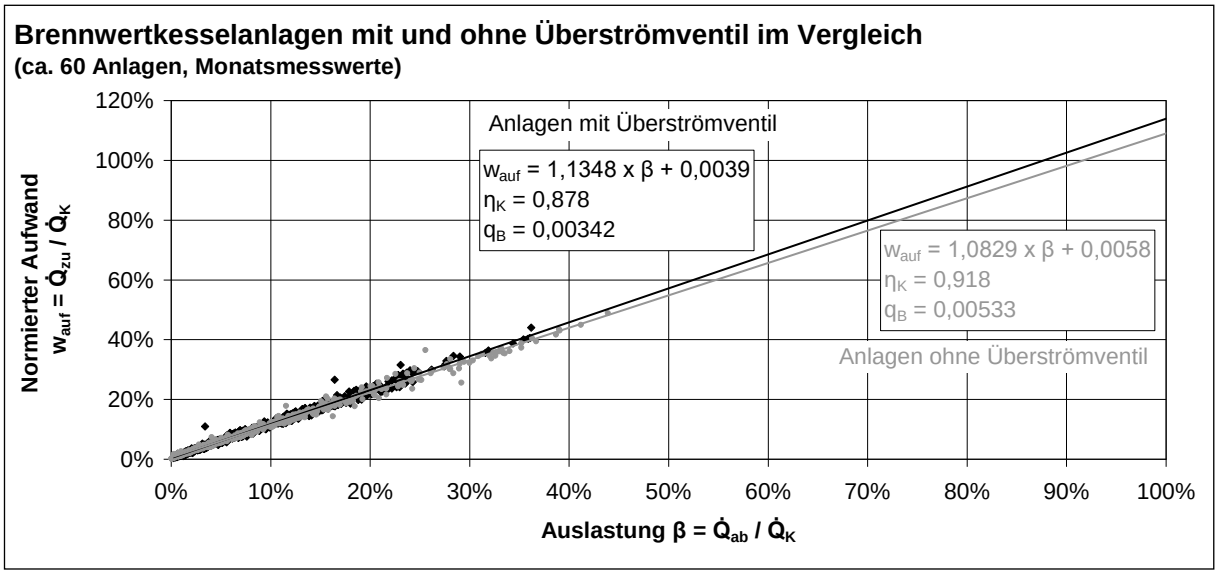


Abbildung 252 Beispielhafte Erzeugeranalysen – Einfluss von Überströmventilen auf Brennwertkessel, Grafik aus [194]

Die Steigung der Regressionsgeraden für die Thermen mit Überströmventil (35 Anlagen) ist höher als bei den Geräten ohne Überströmventil (23 Anlagen). Das ergibt einen 4 Prozentpunkte schlechteren Kesselwirkungsgrad.

Sommerheizung und Zwangswärmekonsum [78]

Abbildung 253 zeigt die Auftragung eines reinen Heizwärmezählers als Gebäude-EAV. Erkennbar ist eine eindeutig definierte Steigung, aber auch ein undefinierter Sockel von Verbrauchswerten im Sommer (oberhalb ca. 16°C). Hier wurde mit der EAV ein vermeidbarer Sommerverbrauch sichtbar gemacht, der sich aus einer direkten Nahwärmeversorgung (ohne Systemtrennung) ergab. Phänomene wie diese lassen sich nur erkennen, wenn die Heizwärme (mit einem Wärmemengenzähler) separat erfasst wird. Anderenfalls werden sie als Trinkwarmwasseranteil im Sommer eingestuft (Leistung im Sockel).

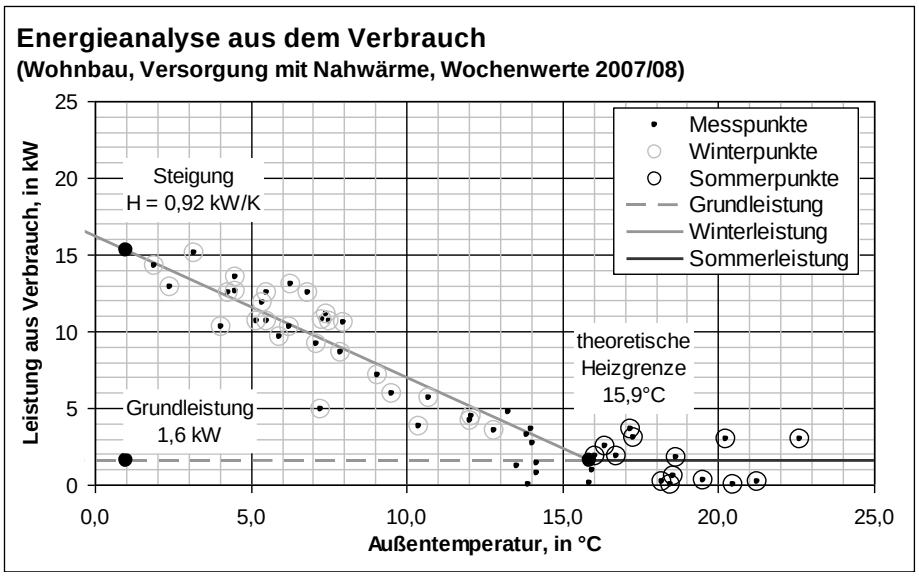


Abbildung 253 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Sommerheizung, Grafik aus [26]

Abbildung 254 zeigt die EAV für eine Einrohrheizung mit „Zwangswärmekonsum“. Unabhängig von der tatsächlichen Notwendigkeit wird das Objekt bis zu einer theoretischen Heizgrenztemperatur von 22°C (zwangsweise) mit Wärme versorgt, so dass die Nutzer weiterheizen (müssen).

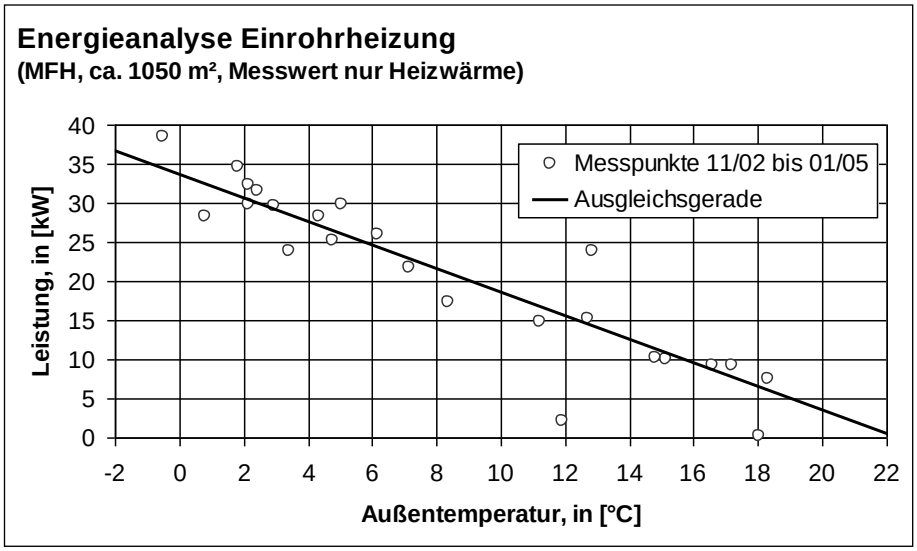


Abbildung 254 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Zwangswärmekonsum, Grafik aus [194]

Analyse komplexer Systeme [78]

Große Liegenschaften lassen sich – eine entsprechende Zählerstruktur vorausgesetzt – ebenfalls mit EAV untersuchen. Abbildung 255 zeigt die Analyse einer Nahwärme mit zwei Erzeugern: einer Gaskesselzentrale und einer Abwärmeeinspeisung aus einem Biogas-BHKW. Es lassen sich in dem Diagramm die Netzverluste als Differenz zwischen Netzzufuhr und Gebäudewärmeabnahme erkennen.

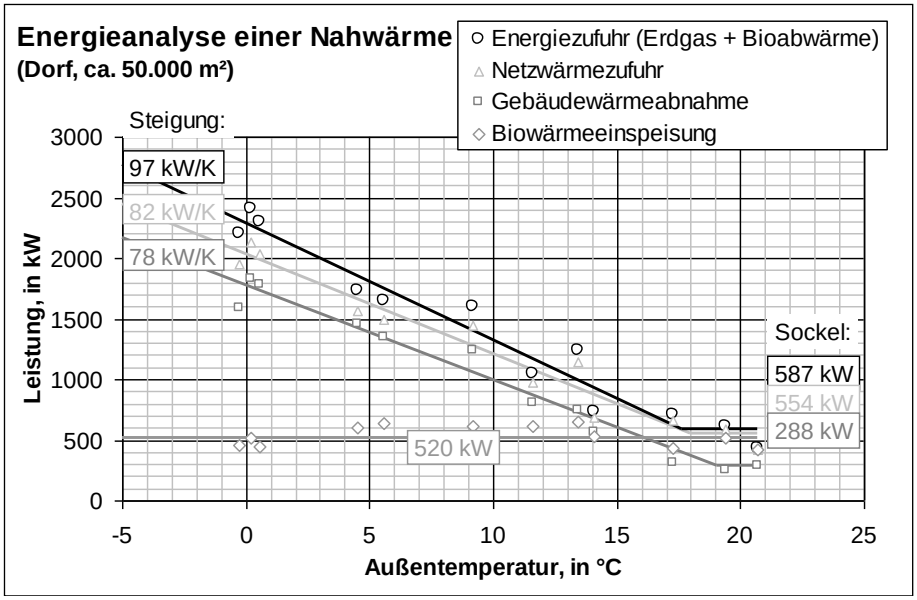


Abbildung 255 Beispielhafte Systemanalysen – Nahwärme, Grafik aus [26]

Nachverfolgungen von Modernisierungen [78]

Die EAV kann auch verwendet werden, um die Erfolge von Modernisierungen sichtbar zu machen. Abbildung 256 zeigt die Nahwärmemesswerte eines Pflegeheimes aus den 1970er Jahren, welches mit Passivhauskomponenten modernisiert wurde. Sowohl die Steigung als auch die Grundleistung sind gesunken. Durch den sehr flachen Verlauf nach der Modernisierung ist der Übergang von Heiz- zu Sommerperiode nicht mehr gut erkennbar.

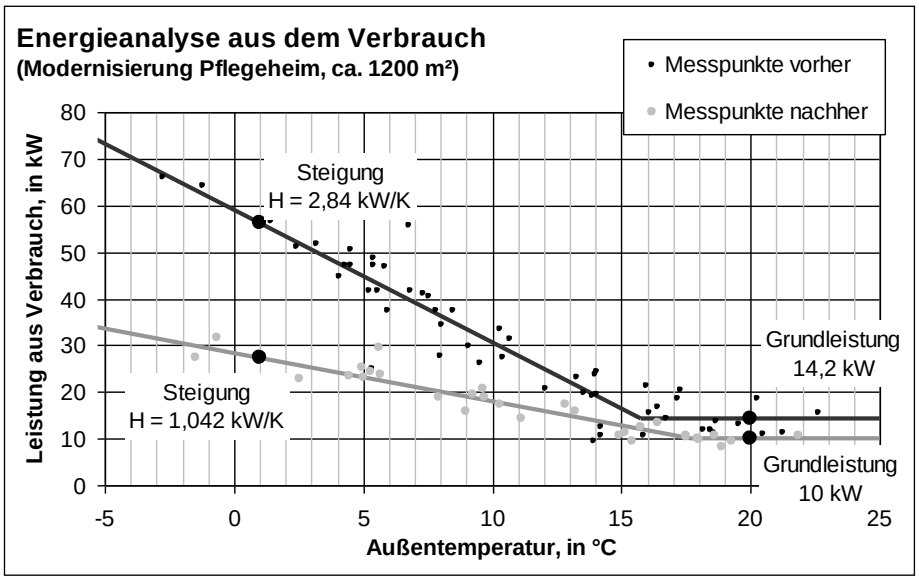


Abbildung 256 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Nachverfolgung Modernisierung, Grafik aus [26]

Angenäherte Heizlast aus der EAV [78]

Die Daten der EAV lassen sich auch für die Planung einsetzen. Da die Steigung H ein Maß für die Verluste aus Transmission und Lüftung ist, kann eine maximale Heizlast angenähert abgeschätzt werden. Es ist mit der maximalen Temperaturdifferenz bei der Auslegung zu multiplizieren. Für die mittleren Regionen Deutschlands sind dies bislang beispielsweise 34 K (20°C Innentemperatur und -14°C Außentemperatur). Für das Beispiel nach Abbildung 247 ergibt sich eine Heizlast von 176 W/K · 34 K ≈ 6 kW. Die gerade neu veröffentlichte Planungsnorm DIN EN 12831 korrigiert die minimalen Außentemperaturen – zu Recht – nach oben.

Die korrekte Datenbasis zur Bestimmung der Heizlast liefert nur ein Wärmemengenzähler hinter dem Erzeuger. Die genäherte Heizlast ist ein Anhaltswert für die maximal notwendige Erzeugerleistung (zur Gebäudebeheizung). In Sanierungskonzepten, in denen nur der Erzeuger getauscht wird, ist der Wert im Vorfeld der Sanierung sinnvollerweise zu bestimmen.

Angenäherte Jahresdauerlinie aus der EAV [78]

Dauerlinien (nach Häufigkeit absteigen sortierte Leistungen) sind ein Planungsinstrument, z. B. für Systeme mit Wärmenetz oder Mehrerzeugeranlagen. Durch Auswertung von Flächenanteilen wird bestimmt, welche Arbeitsanteile unterhalb oder oberhalb bestimmter Leistungen liegen. Üblicherweise entstammen Dauerlinien aus Simulationsprogrammen und sind mit einer stündlichen Genauigkeit erstellt.

Die Energieanalyse aus dem Verbrauch liefert den messtechnischen Zusammenhang von Leistung und Außentemperatur. Die Überführung in eine Jahresdauerlinie ist daher möglich, wenn die zeitliche Häufigkeit bestimmter Außentemperaturen berücksichtigt wird. Das Verfahren ist in [78] beschrieben, eine beispielhafte Auswertung zeigt Abbildung 257.

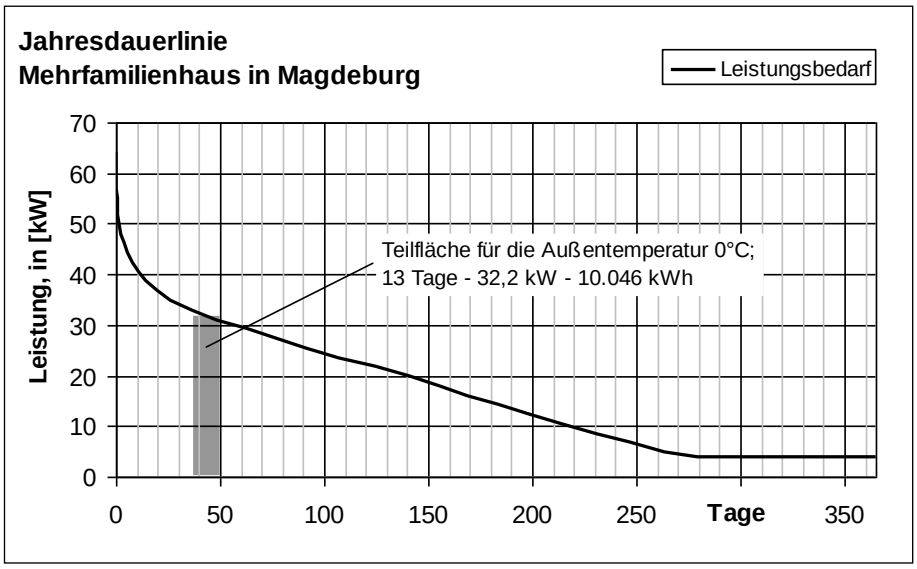


Abbildung 257 Beispielhafte Jahresdauerlinie für ein Mehrfamilienhaus [eigene Darstellung] aus [78]

Diese Art der Reproduktion der Jahresdauerlinie liefert sehr gleichförmige Leistungsverläufe, da von tagesmittleren Außentemperaturen ausgegangen wird und auch die internen und solaren Lasten vereinfacht ganzjährig konstant angesetzt werden. Es ist eine Näherung, die als praktikable Planungshilfe verwendet werden kann [26].

Auswertung von Wasser-, Strom- und Kälteverbräuchen

Wasser- und Stromverbräuche lassen sich sehr gut mit der Gebäude-EAV auswerten und über der Außentemperatur auftragen, wobei regulär keine nennenswerten Witterungsabhängigkeiten erkennbar sind bzw. sein sollten.

Das Verfahren für Kälteauswertungen funktioniert grundsätzlich, jedoch sind kaum Feldmessungen dokumentiert. Hier sind künftig noch Bewegungen im Monitoringmarkt zu erwarten.

5.4 Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch der Gebäude könnte aus Einzelmessungen aller Gebäude addiert werden (Buttom-Up-Modell). Da die Messung bzw. die Archivierung der Messwerte nicht flächendeckend gegeben sind, finden real Näherungsberechnungen statt. Aus dem Gesamtverbrauch wird durch Sektorenaufteilung der Gebäudeverbrauch bestimmt, welcher dann auf Wohn- und Nichtwohngebäude verteilt wird, dann auf die Wohngebäude unterschiedlicher Größe, auf Heizung und Trinkwarmwasseranwendungen usw. (Top-Down-Modell). Maßgeblich ist die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen AGEB mit dieser Aufgabe betraut (Ergebnisse siehe [18]).

Eckwerte des Modells sind unter anderem gegeben durch Einzelmessungen kleiner Stichproben sowie aus der statistischen Ergebung zu Wohneinheitenzahlen, Wohnungsgrößen, Versorgungs- und Erzeugerstrukturen, Umsatz an zentralen Wärmeerzeugern und anderen Branchendaten, die u. a. das Statistische Bundesamt erhebt (Ergebnisse siehe [101]). Außerdem sind die gehandelten Energiemengen (Einkauf, Verkauf) bekannt.

Die AGEB-Verbrauchsanalyse (Top-Down) des bundesdeutschen Gesamtverbrauchs nutzt in weiten Teilen die gleichen statistischen Eingangsdaten wie Bedarfsprognosen (Buttom-Up), welche mit Hilfe von Typologien den Gesamtbestand aus einer Summe von Einzelgebäuden nachbilden. Die beiden grundsätzlichen Modelle und deren Ergebnisse nähern sich über die Zeit zwangsläufig aneinander an. Das ist über die letzten 20 Jahre zu beobachten und als positiv zu bewerten. Allerdings kann eine Validierung der beiden Modelle nur noch bedingt erfolgen. Alle Fehler, die durch Fehlannahmen in beiden Modellen vorhanden sind, können nicht ohne neue Messungen (neuer Dateninput von außen) gefunden werden.

Das betrifft insbesondere Inputgrößen, die sich schwer messen lassen (Luftwechsel, realer Einfluss von Wärmebrücken). Aber auch Größen, die messbar wären, jedoch zu einer sehr kleinteiligen Messung führen würden (einzelne Stromverbraucher, einzelne Erzeuger).

Die Nutzung regenerativer Wärmemengen fällt auch in diesen Themenkreis. Sie wird größtenteils nicht gemessen. Allerdings treffen die AGEB-Energiebilanzen hierzu Aussagen in jedem Jahresbericht. Hier erfolgt zwangsläufig eine reine Berechnung, z. B. über die bei den Fördermittelgebern oder im Rahmen von Bauanträgen registrierten Erzeugerzahlen an Wärmepumpen oder Kollektorflächen. Für die Kollektorflächen werden allenfalls Stichprobeneffizienzmessungen gemacht; in der Masse erfolgt eine Hochrechnung auf Basis angenommener kollektorflächenbezogener Erträge. Es handelt sich um dieselben Annahmen, die auch in Typologien zu finden sind. Bei den Wärmepumpen werden Arbeitszahlen angenommen, ggf. durch kleine Stichproben plausibilisiert, um die nutzbar gemachte Umweltwärme abzuschätzen.

Sowohl die Buttom-Up-Modelle, als auch die Top-Down-Bewertung kommen – bei gleicher Annahme von kollektorflächenbezogenen Erträgen und Arbeitszahlen zum selben Ergebnis. Ob dies der Wirklichkeit entspricht, kann weder bestätigt, noch wiederlegt werden. Viele Praxisuntersuchungen der Gutachter lassen vermuten, dass eine Reihe von Fehlannahmen besteht, da die reale Qualität schlechter ist als die angenommene.

Mindestens ausgewählte Stichprobenuntersuchungen zu bestimmten Themen wären daher angebracht, z. B. Detailanalysen von gemessenen Verlusten bei der Verteilung von Energie – so dass an dieser Stelle keine theoretisch/rechnerischen Annahmen erforderlich sind. Notwendig erscheinen auch Effizienzuntersuchungen aller Erzeuger (auch der regenerativen!) sowie eine statistische Auswertung der Daten.

5.4.1 Endenergieverbrauch der Gebäude

Der Endenergieverbrauch der Gebäude liegt nicht flächendeckend vor. Die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen ordnet den Gesamtverbrauch 4 Sektoren zu. Der Verbrauch der „privaten Haushalte“ enthält alle Wohnbauen, aber auch den Anwendungsstrom für Geräte. Die anderen Gebäudeverbräuche (also der Nichtwohnbauten) sind in den Sektoren „Industrie“ und „Gewerbe, Handel, Dienstleistung“ mit enthalten.

Die Endenergieverbräuche der AGEB anhalten auch erneuerbare Energien. Sie werden nicht witterungskorrigiert veröffentlicht. Eine Weiterverarbeitung der Daten – z. B. durch die DENA – beginnt regulär mit einer Witterungskorrektur. Dabei sind die Anteile von witterungsabhängigen Verbrauchswerten (Heizung) und witterungsunabhängigen entsprechend Annahmen, da keine genauen Messwerte bekannt sind. Daher unterscheiden sich die Ergebnisse verschiedener Auswerter leicht.

Für künftige Auswertungen und Statistiken ist eine gemessene (nicht rechnerisch abgeschätzte!) Zuordnung von Verbrauchswerten in witterungsabhängige und -unabhängige Anteile sinnvoll. So ließe sich eine realistische Aufteilung in Heizungs- und Warmwasserverbräuche vornehmen. Dies ist relevant für konzeptionelle Überlegungen. Entsprechend wird die Getrenntmessung von Endenergien oder ersatzweise die Monatsmessung empfohlen, siehe Anhang 5.3.

Verbrauch des Gesamtsektors „Private Haushalte“

Der Verbrauch der privaten Haushalte machte nach AGEB im Jahr 2018 (aktuellstes verfügbares Jahr) 18 % des Gesamtenergieeinsatzes aus. Aus Sicht der 4 als Abnehmer der Endenergie genannten Sektoren liegt der Anteil bei 28 %, siehe Abbildung 258. Die Differenz zwischen dem Endenergieverbrauch der 4 Sektoren und der Zufuhr sind einerseits Umwandlungsverluste, aber auch nicht energetischer Verbrauch.

Die Werte sind nicht witterungskorrigiert, daher fallen einzelne warme Jahre (z. B. 2007, 2014) auf. Der Trend des Gebäudeverbrauchs – über die letzten 2 Jahrzehnte betrachtet – ist leicht rückläufig. Da die Darstellung auch regenerative Energien enthält, ist der Umbau der Gebäudeversorgung nur bedingt erkennbar, sondern die tatsächliche Einsparung von Energie bzw. die Minderung der an die Haushalte gelieferten Energien.

Die Vorverluste von Strom und Fernwärme sind im Gesamtwert enthalten, jedoch nicht Teil der „Endenergie Haushalte“. Ein Wechsel zu diesen beiden Energieträgern vermindert die sektoralen Anteile (und suggeriert optisch eine Einsparung), jedoch nicht zwangsläufig die Gesamtmenge an Aufwand.

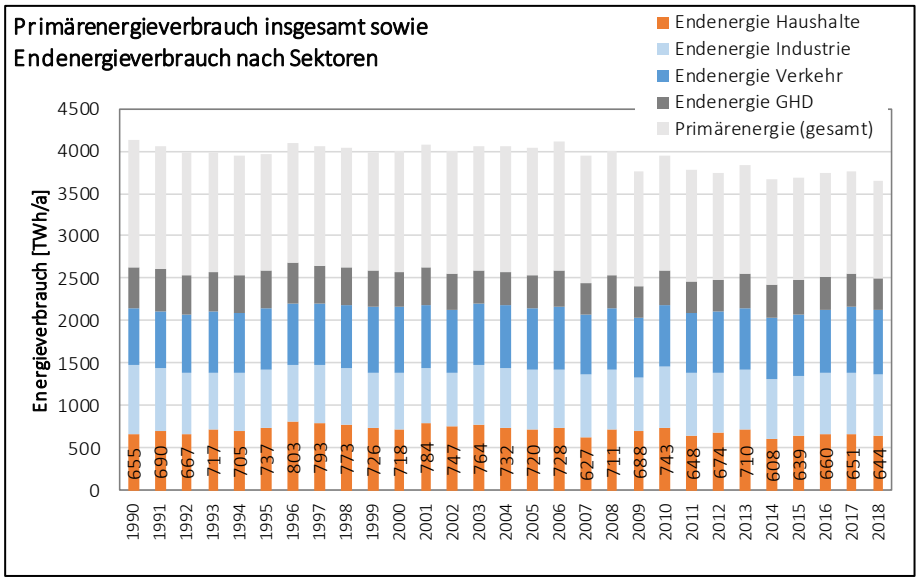


Abbildung 258 Primärenergieverbrauch sowie Endenergieverbrauch nach Sektoren, eigene Darstellung nach AGEB [12]

Die privaten Haushalte machen einen Großteil der Gebäude aus. Im Abgleich mit einer Gebäudetypologie „Wohnbau“ (siehe Anhang 5.7.1) müsste die Summation des gesamten Mengengerüstes an Energiebedarf näherungsweise zu den Werten der „Endenergie Haushalte“ in Abbildung 258 führen. Der Strom für jegliche Anwendung in den Haushalten (strombetriebene Endgeräte, Heizung, Trinkwarmwasser) ist ebenfalls enthalten und müsste beim Vergleich berücksichtigt werden. Das gleiche gilt für regenerative Energien, die üblicherweise nicht Teil der Bedarfsbilanzierung sind.

Alle Aufwendungen für die Gebäude des Nichtwohnbaus sind anteilig in den anderen Sektoren enthalten, z. B. die Produktionsgebäude in „Industrie“ oder Hotels in „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)“.

Betrachtet man allein die privaten Haushalte, deren Belegung mit Personen und Wohnflächen, ergeben sich die Kennwerte in Abbildung 259. Der Verbrauch ist nicht witterungskorrigiert und enthält alle Anteile elektrischen Stroms (unabhängig von der Art der Anwendung). Der wohnflächenbezogene Mittelwert für Raumheizung und Trinkwarmwasser der letzten Jahre liegt bei ca. 170 kWh/(m²a) Endenergie bzw. personenbezogen bei 7800 kWh/(Pa). Während der flächenbezogene Kennwert erkennbar sinkt (vor allen da die Flächen steigen), stagniert der personenbezogene Wert fast bzw. sinkt nur leicht.

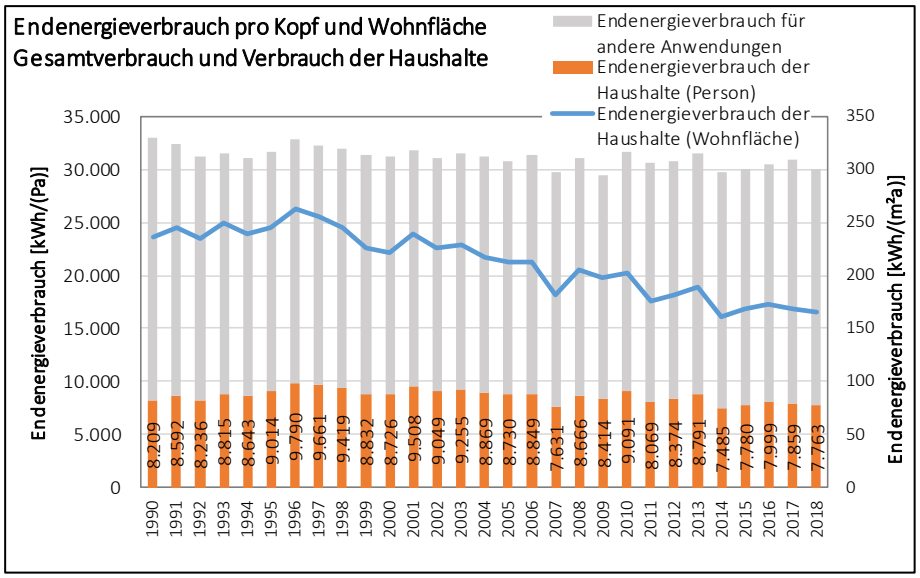


Abbildung 259 Endenergieverbrauch pro Kopf und Wohnfläche, eigene Darstellung nach AGEB [12]

Energieträgermix

Die privaten Haushalte beziehen Brennstoffe oder erneuerbare Energien direkt an der Gebäudegrenze. Für diesen Verbrauchsanteil fallen innerhalb des Gebäudes Verluste bei der Umwandlung, Verteilung und Speicherung an. Eine Zusammensetzung sowie Veränderungstrends zeigt Abbildung 260. Der erneuerbare Anteil steigt über die Zeit, dennoch machen die fossilen Energieträger noch immer den größten Anteil aus. Darüber hinaus werden vorverlustbehaftete Energieträger – Strom und Fernwärme – geliefert, die ihrerseits selbst aus einem Mix von Energieträgern bestehen. Allerdings ist auch zu sehen, dass das Verbrauchsniveau zwischen 1990 und 2018 kaum eine Änderung erfahren hat.

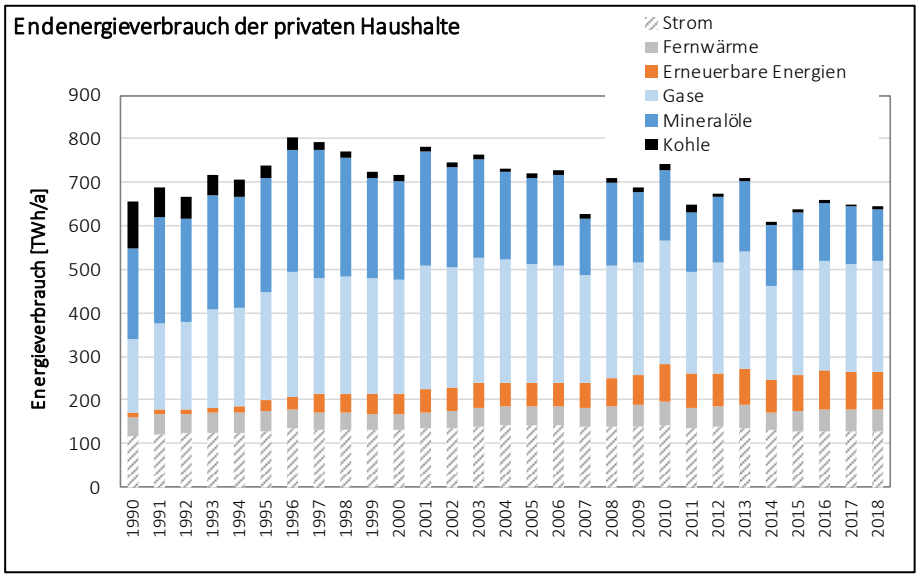
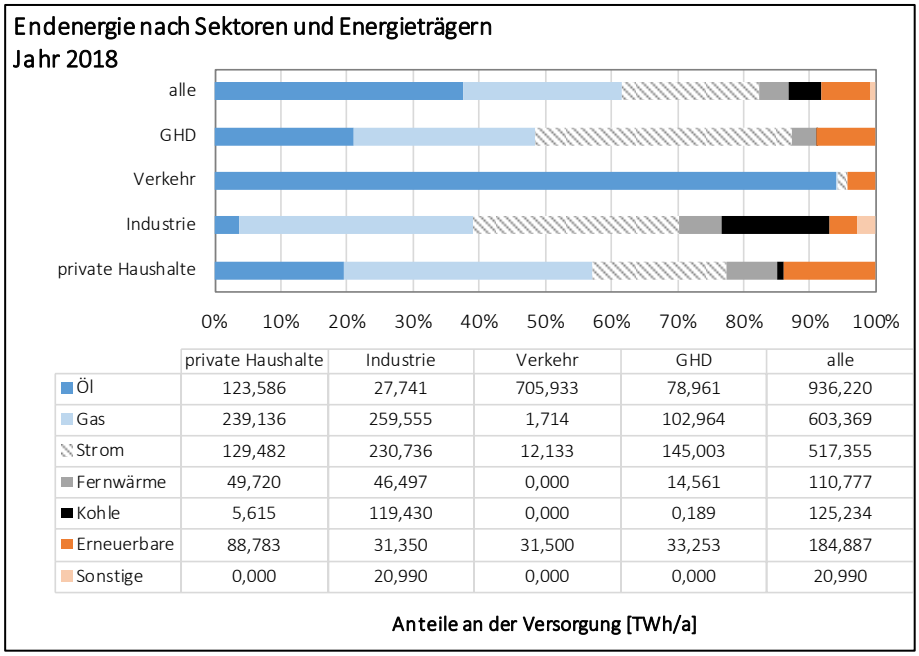


Abbildung 260 Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern, eigene Darstellung nach AGEB [12]

Abbildung 261 zeigt für das Jahr 2018 – das letzte in der Zeitreihe – erneut die Kennwerte für den Sektor „private Haushalte“, jedoch auch das Bild der anderen 3 Sektoren sowie die Gesamtheit. Dem Wohnbau am nächsten ist der Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“, zu dem die überwiegende Anzahl der Bürogebäude zählen. Allerdings ist der Stromverbrauchsanteil deutlich größer.



	private Haushalte	Industrie	Verkehr	GHD	alle
Öl	123,586	27,741	705,933	78,961	936,220
Gas	239,136	259,555	1,714	102,964	603,369
Strom	129,482	230,736	12,133	145,003	517,355
Fernwärme	49,720	46,497	0,000	14,561	110,777
Kohle	5,615	119,430	0,000	0,189	125,234
Erneuerbare	88,783	31,350	31,500	33,253	184,887
Sonstige	0,000	20,990	0,000	0,000	20,990

Abbildung 261 Endenergie nach Sektoren und Energieträgern, eigene Darstellung nach AGEB [18]

Abbildung 262 und Abbildung 263 zeigen die Zusammensetzung des gelieferten Stroms und der Fernwärme (jeweils Netzmix). Der erneuerbare Anteil steigt bei beiden Energieträgern, wenn auch hier ebenfalls die fossilen Energieträger noch deutlich in der Überzahl sind.

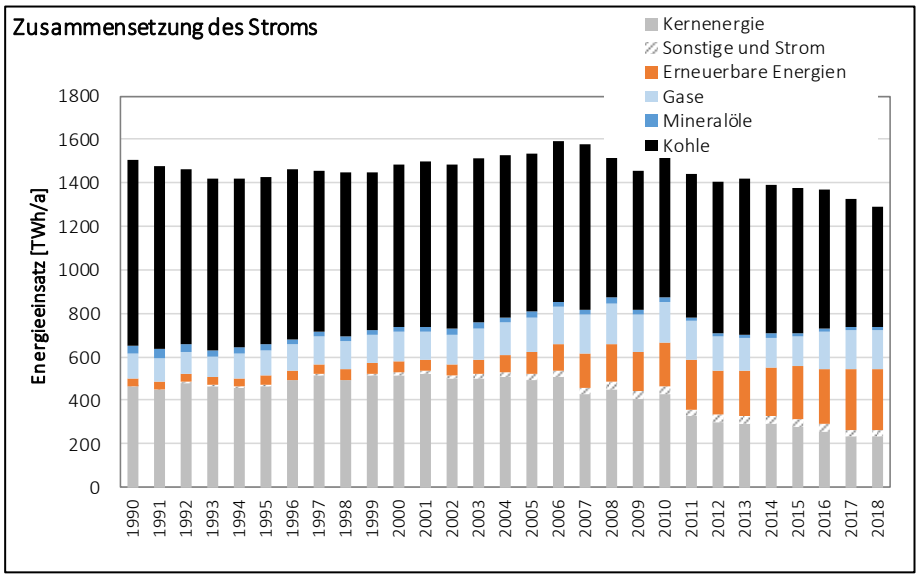


Abbildung 262 Stromzusammensetzung nach Energieträgern, eigene Darstellung nach AGEB [12]

Zu der Zusammensetzung der Fernwärme ist anzumerken, dass es zum Jahr 2003 eine Umstellung der Datenerhebung gegeben hat, was zu dem Bruch der Datenreihen führt.

Aus dem Energieträgermix für Strom und Fernwärme lassen sich deren Emissionen bestimmen. Aus dem Mix der beiden genannten mit allen anderen Energieträgern lässt sich das Gesamtsystem bewerten.

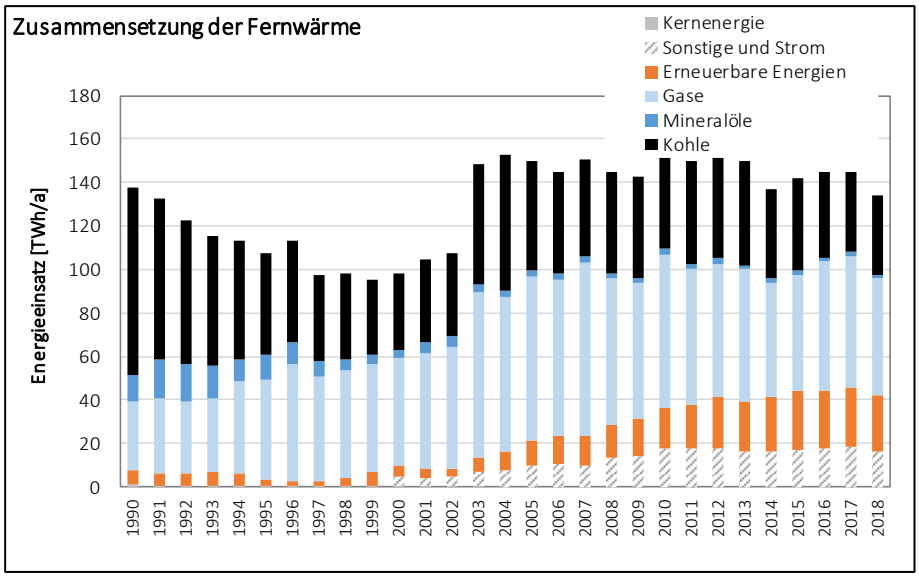
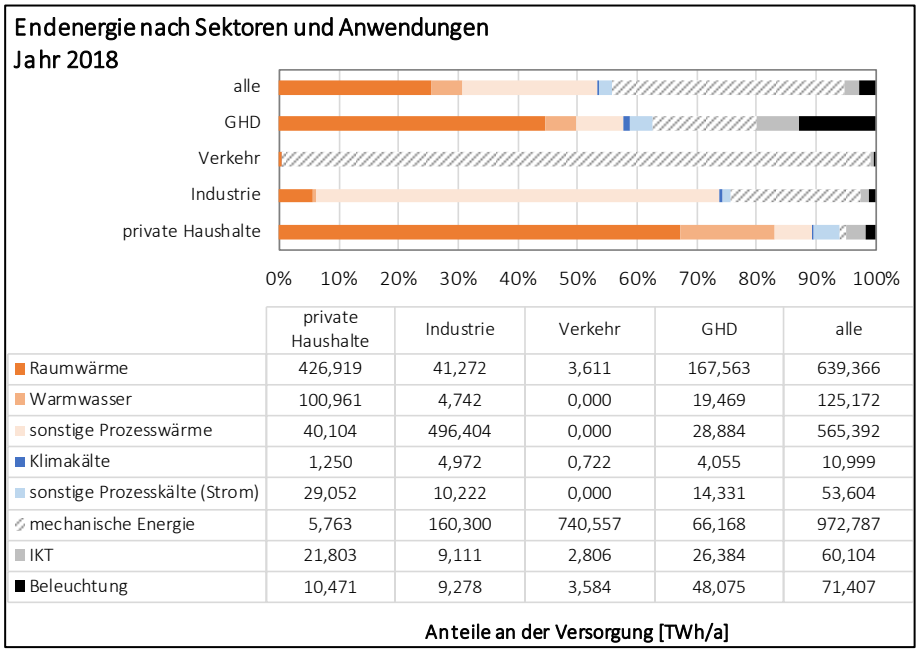


Abbildung 263 Fernwärmezusammensetzung nach Energieträgern, eigene Darstellung nach AGEB [12]

Verbrauch nach Anwendungen

Die AGEB ordnet den Gesamtverbrauch nicht nur Sektoren und Energieträgern zu, sondern auch Anwendungen, siehe Abbildung 264. Da keine flächendeckende Messung vorhanden ist, erfolgt dies ebenfalls in Form einer rechnerischen Aufteilung anhand von statistischen Eckwerten.



	private Haushalte	Industrie	Verkehr	GHD	alle
Raumwärme	426,919	41,272	3,611	167,563	639,366
Warmwasser	100,961	4,742	0,000	19,469	125,172
sonstige Prozesswärme	40,104	496,404	0,000	28,884	565,392
Klimakälte	1,250	4,972	0,722	4,055	10,999
sonstige Prozesskälte (Strom)	29,052	10,222	0,000	14,331	53,604
mechanische Energie	5,763	160,300	740,557	66,168	972,787
IKT	21,803	9,111	2,806	26,384	60,104
Beleuchtung	10,471	9,278	3,584	48,075	71,407

Anteile an der Versorgung [TWh/a]

Abbildung 264 Endenergie nach Sektoren und Anwendungen, eigene Darstellung nach [18]

In den privaten Haushalten ist die Klimakälte derzeit noch vernachlässigbar gering. Etwa ⅔ des Endenergieeinsatzes wird für die Heizung verwendet, weitere 16 % für Trinkwarmwasser. Das Kochen und Waschen („sonstige Prozesswärme“) trägt mit 6 % zum Verbrauch bei, die Kühlung mit 5 %. Die anderen Aufwendungen für Antriebe (Pumpen, Staubsauger usw.), Informations- und Kommunikationstechnik sowie Beleuchtung sind zusammen für 6 % des Verbrauchs verantwortlich.

Verbrauch nach Baualter und Gebäudeart

Eine weitere (flächendeckende Top-Down) Aufsplittung der Verbrauchsdaten nach Gebäudearten und Baualtersklassen liefern weder die Daten der AGEB, noch die des statistischen Bundesamtes.

Das Ergebnis einer Stichprobenuntersuchung der DENA zeigt Abbildung 265. Die Daten sind Energieausweisen entnommen und entsprechend witterungskorrigiert (mittlerer Standort Deutschland). Da die Originaldaten bezogen auf die EnEV-Fläche A_N waren, erfolgte nachträglich für das vorliegende Gutachten eine Umrechnung auf die Wohnfläche anhand typischer Umrechnungsfaktoren (siehe Anhang 5.1.5). In der Mehrzahl der Gebäude ist ein Anteil für die zentrale Trinkwarmwasser enthalten. Die dezentrale Trinkwarmwasserbereitung ist entweder pauschal enthalten (neuere Energieausweise) oder nicht enthalten. Die Kennwerte sind daher mit Unsicherheiten behaftet. Vor allem in den Baualtersklassen, die nennenswerte Anteile an elektrischer Warmwasserbereitung aufweisen (eher Altbau). Die Werte sind heizwertbezogen.

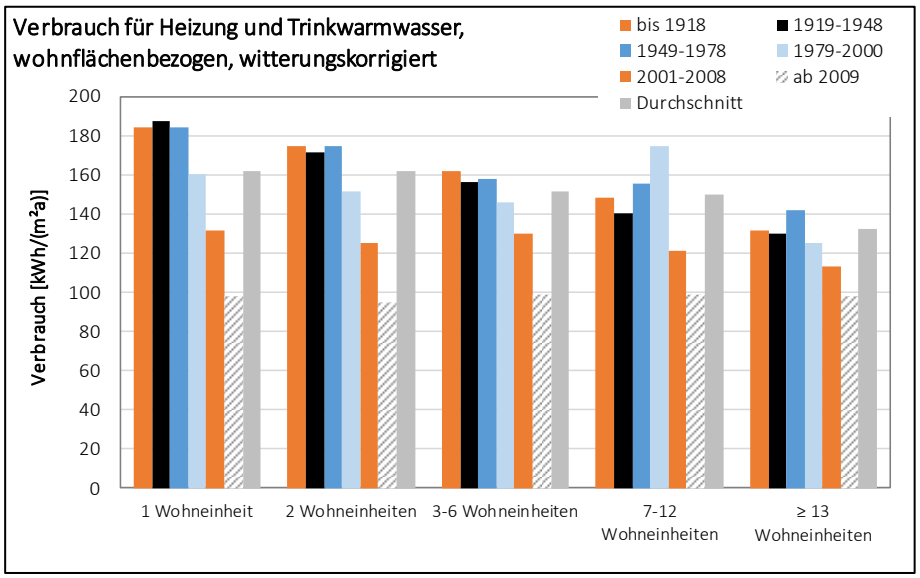


Abbildung 265 Verbrauch Heizung und Trinkwarmwasser nach Gebäudeklassen, Werte nach DENA [9] umgerechnet

Die Auswertung zeigt, dass im Neubau kaum eine Abhängigkeit des Verbrauchs von der Gebäudegröße gegeben ist. Im Bestand ist dies deutlicher gegeben. Vor allem die Mehrfamilienhäuser, die noch vor größeren Sanierung stehen (Baujahre 1979 - 2000) schneiden vergleichsweise schlecht ab.

Der heizwertbezogene Durchschnittsverbrauch über alle Altersklassen liegt bei ca. 162 kWh/(m²a) (EZFH) und 147 kWh/(m²a) (MFH). Die brennwertbezogenen Werte liegen etwa 7 % höher bei 173 kWh/(m²a) (EZFH) und 158 kWh/(m²a) (MFH).

Für künftige statistische Erhebungen – auch ggf. nur repräsentativer Stichproben – erscheint zur Erhöhung der Datenqualität eine Erfassung der Verbrauchswerte unterteilt nach den Baualtersklassen sinnvoll. Dies bietet die Option langfristige Energiekonzepte unter Berücksichtigung von typischen Sanierungszyklen treffsicherer zu erarbeiten.

Der Wert der AGEB-Erhebung liegt mit 160 kWh/(m²a) (heizwertbezogen) etwas höher, allerdings enthält er auch regenerative Energien. Die Daten werden grundsätzlich als plausibel angesehen.

Plausiblere Vergleiche lassen sich unter Kenntnis auch der regenerativen Energie ziehen. Das spricht dafür, dass Energieausweise die Mengen ausweisen und auch messtechnisch eine flächendeckende Erfassung (oder zumindest repräsentativer Anteile) erfolgt.

Auch die Energiedienstleister sind im Besitz größerer Datenmengen; allerdings nicht für Einfamilienhäuser. Dennoch lassen die Werte eine statistische Auswertung zu, siehe Tabelle 152. Es liegt zwar eine andere Teilung hinsichtlich der Baualtersklassen vor sowie in Hinblick auf die Gebäudegrößen, dennoch sind die Zahlen mit denen der DENA und der AGEB näherungsweise vergleichbar.

Endenergie	Fernwärme		Gas/Öl	
[kWh/(m²a)]	2 Wohneinheiten	>16 Wohneinheiten	2 Wohneinheiten	>16Wohneinheiten
Altbau bis 1977	> 126	> 94	> 147	> 130
1977 - 1994	126 - 102	94 - 80	147 - 127	130 - 110
1995 - 2001	102 - 78	80 - 70	127 - 103	110 - 91
2002 - 2008	78 - 56	70 - 57	103 - 76	91 - 66
2009 und jünger	< 56	< 57	< 76	< 66
Werte witterungskorrigiert, heizwertbezogen, bezogen auf die Wohnfläche				

Tabelle 152 Heizenergieverbrauch nach Gebäudegröße, Energieträger und Baustandard, eigene Darstellung nach [78] [103] [104]

Anmerkung zur Witterungskorrektur: die Werte der Energiedienstleister sind üblicherweise standortbezogen korrigiert, d. h. nicht auf das mittlere Klima „Deutschland“. Durch die Verwendung großer Stichproben in der gesamten Republik ergibt sich jedoch ebenfalls eine Mittelung.

Heiz- und Brennwertbezug

In statistischen Veröffentlichungen werden regelmäßig heizwertbezogenen Energiemengen, Preise sowie Faktoren zur Umweltbewertung dargestellt. Die Versorgungsunternehmen verwenden für die Abrechnung von Erdgas hingegen den Brennwert. Die Energiedienstleister und Abrechnungsunternehmen ggf. eine Mischung (TECHEM verwendet den Heizwert für Heizöl, aber den Brennwert für Erdgas). Kessel- und BHKW-Hersteller geben in der Mehrzahl der Fälle Effizienzangaben der Produkte heizwertbezogen (dann mit Werten > 100 %) an.

Um Kennwerte untereinander vergleichbar zu machen, ist jeweils umzurechnen. Die Umrechnungsfaktoren für die einzelnen Energieträger sind Tabelle 158, S. 486 zu entnehmen.

Zur Vermeidung der Umrechnungsnotwendigkeit sowie von Effizienzangaben über 100 % für die Erzeuger wird in diesem Bericht brennwertbezogen gerechnet.

Aufgrund der Häufigkeiten der Energieträger (ca. 50 % Erdgaseinsatz, ca. 25 % Heizöl/Holz und ca. 25 % Fernwärme/Strom) ergibt sich ein pauschaler Umrechnungsfaktor zwischen heiz- und brennwertbezogenen Energiemengen mit $f_{Hs/Hi}$ = 1,07. Die brennwertbezogenen Mengen sind entsprechend zahlenmäßig 7 % größer als die heizwertbezogenen.

5.4.2 Heizungs- und Trinkwarmwasseraufwendungen sowie Haushaltsstrom

Hinsichtlich des Vergleiches von Energiekennwerten aus unterschiedlichen Datenquellen ist im Wohnungsbau zu beachten:

- die Mehrzahl der in der Literatur veröffentlichten Kennwerte sind heizwertbezogen angegeben, nur sehr selten gibt es brennwertbezogene Werte,
- es existieren parallel nebeneinander wohnflächenbezogene Kennwerte (regulär von Abrechnungsunternehmen oder aus der Wohnungswirtschaft veröffentlicht) und gebäudenutzflächenbezogene Werte (regulär im Zusammenhang mit der EnEV veröffentlicht, z. B. von der Deutschen Energieagentur),

Überblick

Abbildung 266 zeigt für das Jahr 2018 die Ergebnisse der Bilanzierung aller Haushalte, welche von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen erstellt wurde. Etwa 17 % der gesamten eingesetzten Mengen entfallen auf Warmwasser, der Rest auf Heizung.

Da das Jahr 2018 überdurchschnittlich warm war, liegt ein typischer witterungskorrigierter Vergleichswert etwa 15 bis 20 % höher (je nach Standort und Referenzklima) als die Werte, welche sich aus der Grafik ergeben. Unter Berücksichtigung der gesamten verfügbaren Wohnfläche des Jahres 2018 sowie eines Witterungskorrekturfaktors von 1,18 ergeben sich folgende heizwertbezogenen Kennwerte:

- Gesamte Endenergie: 161 kWh/(m²a)
  davon Heizung 134 kWh/(m²a) und Trinkwarmwasser 27 kWh/(m²a)
- Endenergie ohne erneuerbare Energien: 134 kWh/(m²a)
  davon Heizung 110 kWh/(m²a) und Trinkwarmwasser 24 kWh/(m²a)

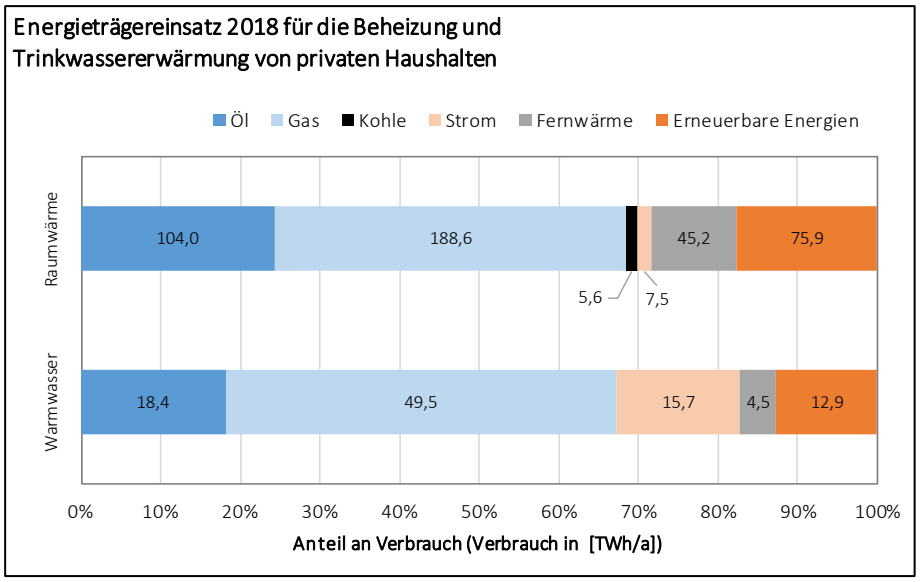


Abbildung 266 Energieträger für Heizung und Trinkwarmwasser in privaten Haushalten, eigene Darstellung nach [18]

Unter dieser Maßgabe sind die Daten plausibel und lassen sich mit einigermaßen Sicherheit mit anderen Datenquellen vergleichen, z. B. den Werten der Messdienstleister als auch den Daten der Energieausweise. Abgrenzungsschwierigkeiten ergeben sich durch die „erneuerbare Energie". Diese enthält sowohl die unendlichen (Solarthermie, Umweltwärme usw.) als auch die endlichen (Holz, Biogas) Energieträger. Letztere sind im Energieausweis und bei der Verbrauchsabrechnung erfasst, erstere nicht. Der „abgerechnete" Verbrauch (ohne Solarthermie, aber incl. aller anderen Energieträger) liegt vermutlich dazwischen.

Ein großer Energiedienstleister liefert die Werte nach Tabelle 153 für Gebäude mit 2 (kleiner Anteil an der Stichprobe) und mehr Wohneinheiten. Der typische mittlere Verbrauch mit vollständig zentraler Versorgung durch einen Kessel liegt bei knapp 160 kWh/(m²a), wovon etwa 30 kWh/(m²a) auf die Trinkwarmwasserbereitung entfallen. Wenn ein Gebäude keine zentrale Warmwasserbereitung aufweist, ist sein Raumheizungsbedarf um etwa 16 kWh/(m²a) höher. Es gibt mehrere Gründe, unter anderem auch die fehlende Abwärme der Trinkwarmwasserzirkulationsleitungen, die in der genannten Größenordnung liegt.

Endenergie, in [kWh/(m²a)]	Gebäude mit dezentraler Warmwasserbereitung	Gebäude mit zentraler Warmwasserbereitung	
Energieträger	Raumheizung	Raumheizung	Warmwasser
Erdgas	142	127	32
Heizöl	140	129	28
Fernwärme	112	91	26
Werte witterungskorrigiert, heizwertbezogen, bezogen auf die Wohnfläche			

Tabelle 153 Energieverbrauch MFH nach Energieträger und Art der Warmwasserbereitung, eigene Darstellung nach [78] [103] [104]

Die gemessenen Trinkwarmwasseraufwendungen sind größer als im Durchschnittskennwert der AGEB. Grund ist: es sind keine dezentral versorgten Gebäude darunter, die den Schnitt nach unten drücken.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Höhe der Warmwasserbereitung am Gesamtverbrauch häufig unterschätzt wird. Rehberg fasst treffend aus Sicht der Wohnungswirtschaft zusammen [245]:

> *„Der Warmwasseranteil am Energieverbrauch, der nach der Optimierung aufgrund von Messungen nach Einbau der Wärmemengenzähler ermittelt werden konnte, ist mit Verbrauchswerten zwischen 24 und 33 kWh/m² im Jahr mit 25 bis über 30 Prozent deutlich höher, als bisher berechnet. Der Energieverbrauch für Warmwasser rückt damit zukünftig stärker in den Fokus von Optimierungsmaßnahmen."*

Struktur der Heizenergieversorgung

Abbildung 267 zeigt die prozentuale Häufigkeit von Hauptenergieträgern für die Heizung in den Wohneinheiten. Gas ist sowohl in Ein- und Zweifamilienhäusern als auch in Mehrfamilienhäusern der am häufigsten anzutreffende Energieträger (52 %). Während in den Mehrfamilienhäusern der Fernwärmeanteil den zweiten Platz ausmacht (24 %), ist es bei den kleinen Gebäuden das Heizöl (32 %). Mit Strom heizen noch 4 % aller Wohneinheiten (direkt).

Eine weitere Unterteilung in Eigentümer- und Mietwohnungen sowie in Sammel- und Einzelheizung wäre verfügbar. Sie wird nicht weiterverfolgt, da die resultierenden Erkenntnisse nicht weiter ausgewertet werden bzw. verfolgt werden können.

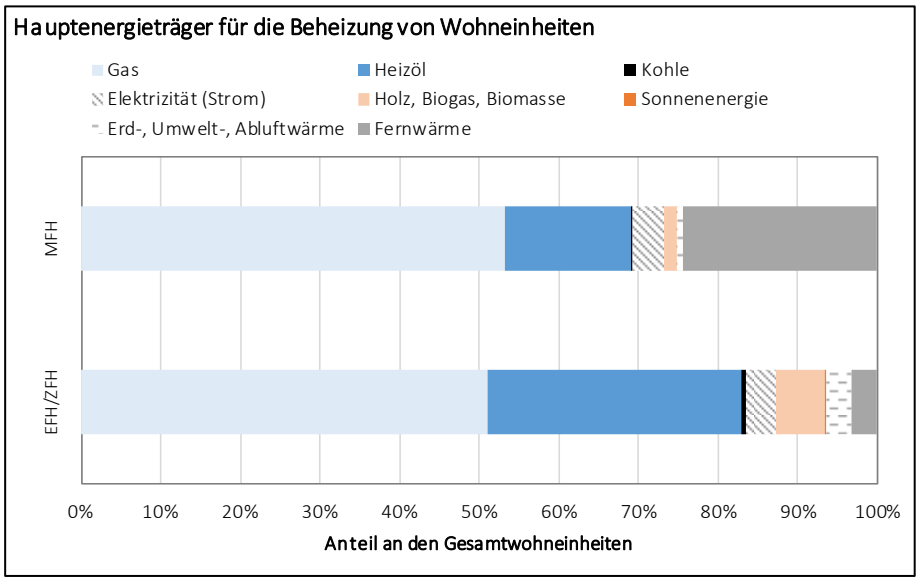


Abbildung 267 Hauptenergieträger für die Beheizung von Wohneinheiten, eigene Darstellung nach [101]

Solarthermie kommt als Hauptenergieträger nur selten vor; ebenso die Kohle. Für diese beiden Energieträger lässt sich in Abbildung 268 erkennen, dass sie hauptsächlich in Kombination mit einem weiteren Energieträger vorkommen. Dagegen ist Fernwärme in der Regel der alleinige Energielieferant für die Heizung. Der zweite oder dritte Energieträger sind Solarthermie (zentral) oder Kamine/Öfen (dezentral) sowie elektrische Heizungen (zentral oder dezentral).

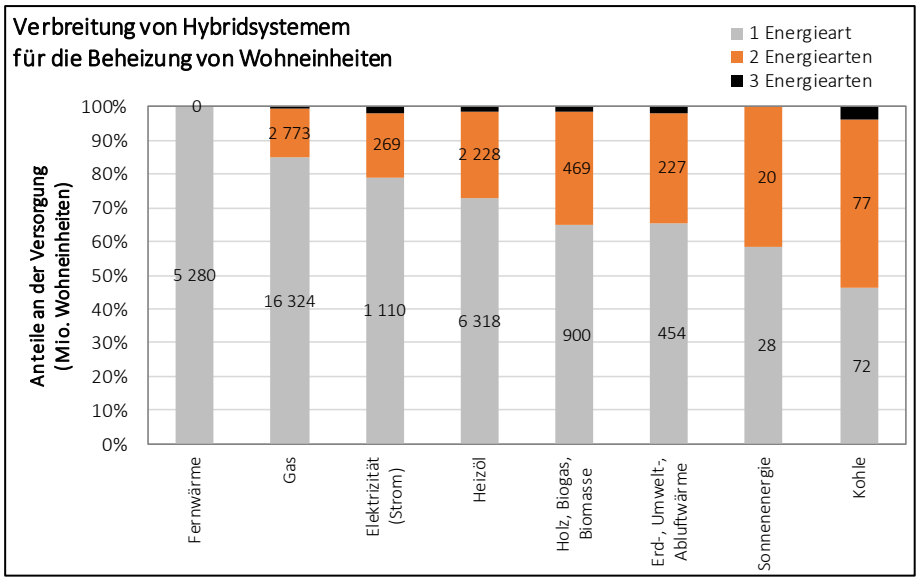


Abbildung 268 Verbreitung von Hybridsystemen bei der Beheizung, eigene Darstellung nach [101]

Aufgrund der möglichen Kombination verschiedener Versorgungssysteme ergeben sich entsprechend große Spannbreiten von Versorgungssystemen. In 82 % aller Systeme gibt es nur einen Erzeuger. Das mit Abstand am häufigsten vorkommende System ist die Gasheizung mit einem Gaskessel als alleiniger Erzeuger.

Struktur der Trinkwassererwärmung

Abbildung 269 zeigt die Häufigkeiten der Hauptenergieträger für die Trinkwassererwärmung. Die Fernwärmeanteile sind ähnlich wie bei der Heizung, so dass man von verbundenen Anlagen ausgehen kann.

Auffällig ist der deutlich größere Anteil elektrischer Versorgung - etwa 15 % aller Wohneinheiten. In den Beständen der Wohnungswirtschaft ermittelt Vogler den Anteil der dezentralen Trinkwassererwärmung mit 25 % [144]. Es handelt sich vermutlich um die Gebäude, die mit Kohle und Holz heizen (geringer Anteil) sowie gas- und ölbeheizte Objekte. Das ist für die Erstellung von Energiekonzepten eine nützliche Erkenntnis.

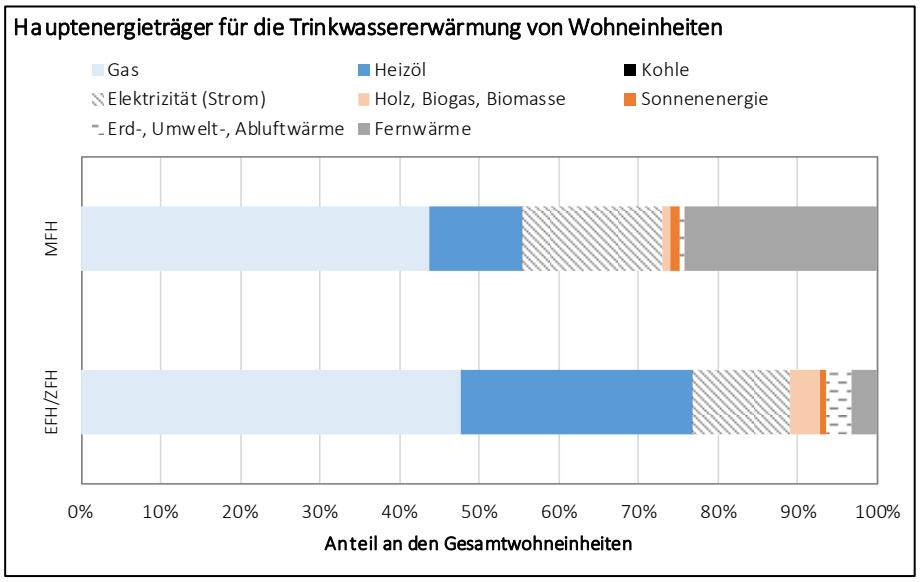


Abbildung 269 Hauptenergieträger für die Trinkwassererwärmung in den Wohneinheiten, eigene Darstellung nach [101]

Abbildung 270 zeigt das Vorkommen von Systemen mit mehr als einer Energieart. Hybridsysteme sind in nur 9 % aller Wohneinheiten vorhanden (zum Vergleich: Heizung 18 %). Da die Statistik knapp in jeder zehnten Heizungsanlage eine Solarthermie erfasst, ist der zweite Erzeuger mit großer Wahrscheinlichkeit eine solche Anlage. Allenfalls bei der Kohleversorgung ist ein Badeofen plus eine elektrische Versorgung zu vermuten.

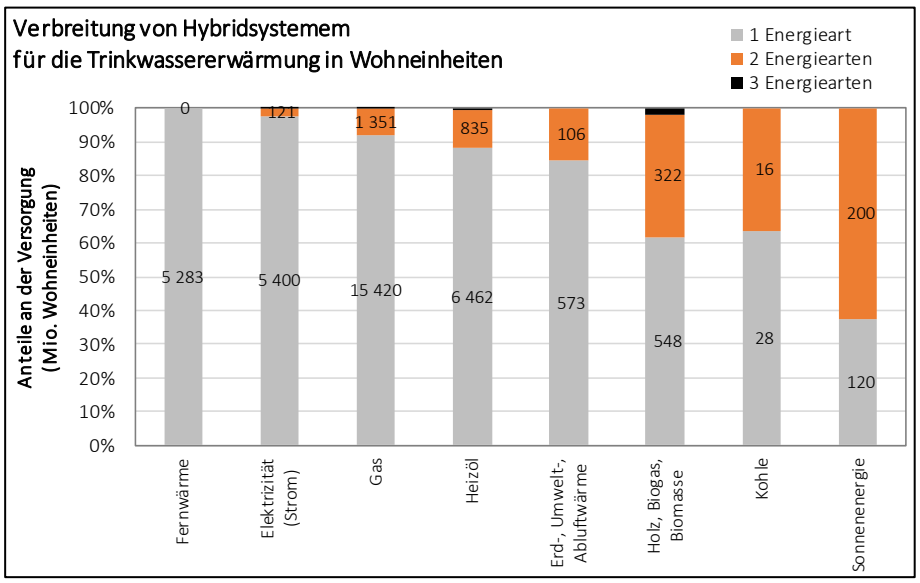


Abbildung 270 Verbreitung von Hybridsystemen bei der Trinkwassererwärmung, eigene Darstellung nach [101]

Endenergie für Trinkwarmwasser

Kennwerte für die Endenergie des Trinkwarmwassers werden nicht häufig veröffentlicht. Häufig sind Messwerte nach dem Erzeuger verfügbar (aus Gründen der Heizkostenabrechnung). Sofern ein Erzeugernutzungsgrad angenommen oder gemessen wird, ergeben sich daraus die Endenergien. Da diese Kennwerte sowohl den Nutzen als auch die meisten Verluste (Netz, Speicher) enthalten, sind die eine gute Basis für alle Überlegungen zum Wärmeerzeugertausch.

Abbildung 271 zeigt gemessene Verbrauchswerte aus einer kleinen Stichprobe von etwa 50 Gebäuden, welche die Verfasser des vorliegenden Gutachtens 2006 erfasst haben.

Die Auswertung zeigt zum einen den flächenbezogenen Trinkwasserwärmeverbrauch für Gebäude mit Zirkulation (EFH, MFH) und ohne Zirkulation (nur EFH). Hier ist deutlich zu sehen, dass der Zirkulationseinfluss etwa 11 kWh/(m²a) für die EFH beträgt.

Die im Bild dargestellten MFH sind alle mit Zirkulation ausgestattet und können daher nur mit den gleichartig ausgestatteten EFH verglichen werden (Auswertung elektrisch versorgter Gebäude liegen nicht vor). Der flächenbezogene Wärmeverlust ist im MFH größer. Dies wird vor allem auf die höhere Personenbelegung zurückgeführt. Diese Aussage wird von der Darstellung des personenbezogenen Trinkwasserwärmeverbrauchs untermauert. Dort schneiden die MFH besser ab.

Im EFH kommen somit zum flächenbezogenen Nutzen von etwa 12 kWh/(m²a) noch einmal Verteilverluste (mit Speicher) von etwa 6 kWh/(m²a) in Netzen ohne Zirkulation oder 17 kWh/(m²a) in Netzen mit Zirkulation hinzu. Der Verteilungsnutzungsgrad liegt entsprechend bei 67 bis 42 %.

Im MFH ergibt sich ein flächenbezogener Nutzen von etwa 19 kWh/(m²a). Hinzu kommen weitere etwa 19 kWh/(m²a) als Verteilverluste (mit Speicher), womit der Verteilungsnutzungsgrad bei 50 % liegt.

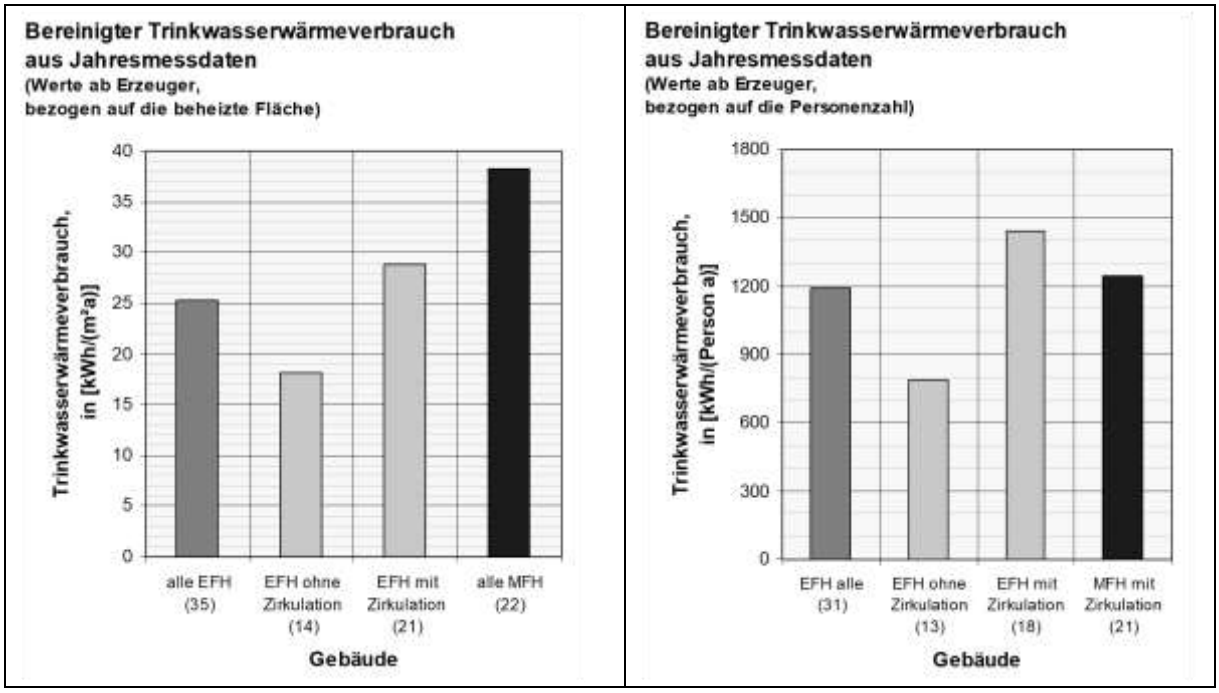


Abbildung 271 Trinkwasserwärmeverbrauch in Gebäuden mit und ohne Zirkulation, Grafik aus [23]

Die Größenordnungen von Energiemengen bei den Mehrfamilienhäusern konnten auch in anderen Messungen der Gutachter bestätigt werden [105] [95]. Auch Messdienstleister TECHEM ermitteln in den Beständen der Wohnungswirtschaft ähnliche Zahlen, siehe Tabelle 154. Die Gesamtnutzungsgrade enthalten Annahmen zur Kesseleffizienz bzw. den Verlusten der Erzeugung im Gebäude.

		Fernwärme	Erdgas	Heizöl
Nutzenergie	[kWh/(m²a)]	14,5	14,5	13,2
Verteil- und Speicherverlust	[kWh/(m²a)]	15,3	16,8	27,8
Verteil/Speichernutzungsgrad	[%]	48,5	46,4	41,0
Endenergie	[kWh/(m²a)]	29,8	38,0	43,6
Gesamtnutzungsgrad	[%]	48,5	38,1	30,4
Werte heizwertbezogen, bezogen auf die Wohnfläche				

Tabelle 154 Systemeffizienz der Trinkwassererwärmung im MFH, eigene Darstellung nach [104]

Aufgrund der großen Verlustketten und gleichermaßen der abnehmenden Belegungsdichten in den Gebäuden rückt die Trinkwassererwärmung – und ggf. eine Dezentralisierung – in den Fokus der Betrachtungen eines Energiekonzeptes. Damit stehen auch für die Heizung andere Optionen offen.

Nutzwärme Trinkwarmwasser

Da das Trinkwarmwasser im zukünftigen Gebäude von Bedeutung gewinnt, wird abschließend die Nutzwärmemenge näher beleuchtet. Für den Wohnungsbau ist festzustellen, dass der typische Anteil des Warmwassers (60°C) am Gesamtwasser bei 30 % liegt. Dies gilt für kleine und große Wohngebäude gleichermaßen als typischer Mittelwert. Der typische personenbezogene Wasserverbrauch, der sich aus den Daten eines Abrechnungsunternehmens ergibt [104], liegt bei:

- 11,5 m³/a (32 l/d) für Warmwasser je Person
- 27,0 m³/a (74 l/d) für Kaltwasser je Person

Es ergibt sich eine starke Abhängigkeit von der Größe der einzelnen Wohneinheit, also der Belegungsdichte mit Personen. Es ergehen sich die in Tabelle 155 angegebenen flächenbezogenen Kennwerte im Wohnbau aus den Kennwerten der VDI 3807.

[m³/(m²a)]	Mittel	Wohnung mit Wohnfläche		
		25…55 m²	70…100 m²	140…180 m²
Warmwasser	0,24…0,26	0,25…0,28	0,23…0,26	0,13…0,16
Kaltwasser	0,54…0,60	0,57…0,63	0,54…0,59	0,40…0,42
Gesamtwasser	0,78…0,86	0,82…0,91	0,77…0,87	0,53…0,58

Tabelle 155 Typische wohnflächenbezogenen Wasserverbrauchskennwerte, eigene Darstellung nach [141] [108]

Werden die Wasserverbrauchskennwerte umgerechnet in Energiemengen, ergeben sich unter Annahme typischer Kalt- und Warmwassertemperaturen pro Kopf etwa 500 bis 600 kWh/(Pa) mit einer Streubreite von 400 bis 800 kWh/(P · a). Ein flächenbezogener Kennwert lässt sich anhand der Personenbelegung ermitteln. Es ergeben sich Unterschiede zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern, siehe Anhang 5.1.3.

Neuere Messungen zeigen vermehrt eine fallende Tendenz [95] für den Kennwert, daher besteht einerseits Forschungsbedarf, vor allem im Sektor Single-Haushalt sowie Einfamilienhaus.

Außerdem zeigen Untersuchungen von ECOFYS, co2online und dem Messdienstleister ISTA, dass auch die gezapfte Trinkwarmwassermenge nicht systemunabhängig ist [142]. Für insgesamt 10 verschiedene Lösungen (von Elektrokleinspeicher und Gasdurchlauferhitzer bis Gaskessel und Wärmepumpe) wurde eine Gesamtstichprobe von über 320 Gebäuden untersucht. Die Forscher haben Nutzwärmebedarfswerte von 6,6 bis 12,4 kWh/(m²a) vorgefunden (bezogen auf die EnEV-Fläche). Die Werte für brennstoffbefeuerte Badeöfen werden an dieser Stelle wegen statistisch zu geringer Menge vernachlässigt.

Die Gründe für die Spannbreite sind nicht abschließend zu klären, jedoch kann vermutet werden, dass bei den (aus objektiver oder subjektiver Einschätzung der Nutzer) ökologischen, kostengünstigen und bequemen Erzeugungssystemen insgesamt mehr warmes Wasser gezapft wird. In jedem Fall sind die Verbräuche bei Fernwärme (teuer) sowie stufige Durchlauferhitzer (unbequem) deutlich unterdurchschnittlich, während sie sowohl bei Holzkesseln und Wärmepumpe überdurchschnittlich ausfallen.

Haushaltsstromaufwendungen

Abbildung 272 zeigt eine Aufschlüsselung des Stromverbrauchs der privaten Haushalte aus der Bilanzierung der AGEB. Ohne die Anteile für Heizung, Trinkwarmwasser und Klimakälte liegt der Wert bei 28 kWh/(m²a) bzw. 1260 kWh/(Pa) (nur die grauen Flächenanteile).

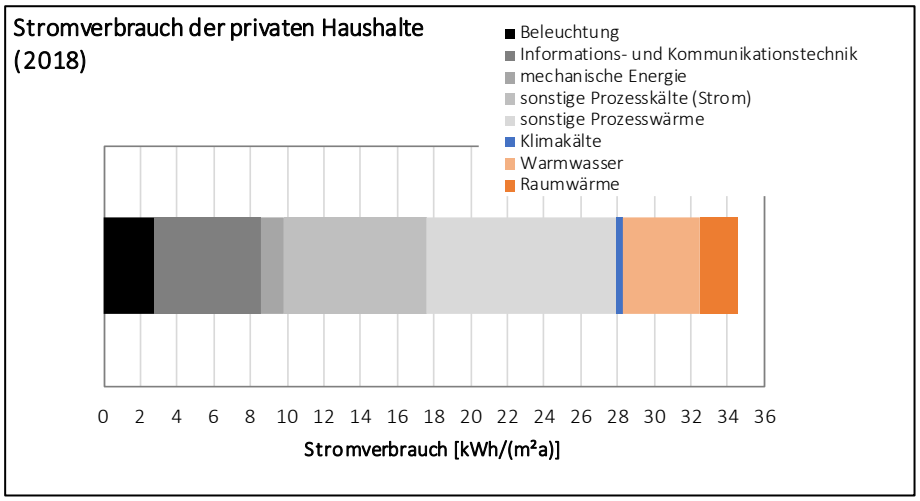


Abbildung 272 Stromverbrauch der privaten Haushalte, eigene Darstellung nach [18]

Zum Vergleich: Der Pro-Kopf-Verbrauch betrug in Westdeutschland 1980 etwa 1390 kWh/(Pa), 1990 in Gesamtdeutschland etwa 1560 kWh/(m²a) [289]. Letztgenannter Wert gilt auch heute noch, wenn man alle Stromaufwendungen einbezieht, d. h. anteilig berücksichtigt, dass mit Strom auch geheizt wird oder das Trinkwasser erwärmt [18].

Nichtwohnbau

Die Datenlage im Nichtwohnungsbau ist insgesamt deutlich schlechter als im Wohnungsbau. Folgendes ist festzustellen:

- sehr gute Datenlage: öffentliche Verwaltung, Schulen und Kindergärten, Rathäuser und Gerichte,
- gute Datenlage: Universitäten, Krankenhäuser, Sport- und Schwimmhallen, Polizei und Bereitschaftsdienste, Heime, Justizvollzugsanstalten, Museen und Bibliotheken, Opernhäuser und Theater
- mittlere Datenlage: private Büros, Banken, Hotels, Arztpraxen, Weiterbildungseinrichtung, Kantinen und Restaurants, Theater und Kinos, private Dienstleistungen
- schlechte Datenlage: Einzel- und Großhandel, Kirchen, private Gästehäuser, verarbeitendes Gewerbe, Tierhaltung und Pflanzenaufzucht
- sehr schlechte Datenlage: industrielle Produktionsgebäude, Werkstätten und Lagergebäude

Hinsichtlich des Vergleiches von Energiekennwerten aus unterschiedlichen Datenquellen ist im Nichtwohnungsbau zu beachten:

- die Mehrzahl der in der Literatur veröffentlichten Kennwerte sind heizwertbezogen angegeben, nur sehr selten gibt es brennwertbezogene Werte (bei Unklarheit der Datenlage: Heizwert annehmen),
- es existieren parallel nebeneinander unterschiedliche flächenbezogene Kennwerte; sehr weit verbreitet sind die Bruttogrundfläche (bei Interessensverbänden, Abrechnungsunternehmen oder Liegenschaftsmanagement) und die Nettogrundfläche (regulär im Zusammenhang mit der EnEV veröffentlicht, z. B. von der Deutschen Energieagentur und in Studien der Ministerien).

Tabelle 156 gibt einen Überblick über Teilkennwerte für die Hauptenergieanwendungen (im Bereich Wärme). Die Zahlen stammen aus der VDI 3807-5. Aufgrund der sehr großen Streubreiten der Zahlenwerte sind die Werte nur als grobe Einschätzungen anzusehen.

Energiekennwerte [kWh/(m²a)] Gebäudegruppe	Gesamtverbrauch	Brennstoffdirektnutzung	Erzeugerverlust	Nutzwärme Heizung (incl. Netzverluste im Gebäude)	Nutzwärme Trinkwarmwasser (incl. Netzverluste im Gebäude)	Nutzwärme für Prozesse	Erläuterung der Prozesse
Schulen gesamt mit Schwimmbad	130		13	81	5	31	Schwimmbad
Schulen gesamt mit Turnhalle	96		10	81	5		
Kindertagesstätten	116		12	99	5		
Kindergärten	129		13	111	5		
Weiterbildungseinrichtungen	122		12		2		
Mehrzweckhallen	155		16		2		
Wohnheime	140		14	101	25		
Gemeinschaftsunterkünfte	185		19	126	40		
Betreuungseinrichtungen	126		13	78	35		
Verpflegungseinrichtungen	195	12	18	20	50	95	Zentralküche
Beherbergungseinrichtungen	129		13	91	25		
Ausstellungsgebäude	67		7	58	2		
Veranstaltungsgebäude	141		14	125	2		
Werte witterungskorrigiert, heizwertbezogen, bezogen auf die Bruttogrundfläche, Stand 2014							

Tabelle 156 Teilenergiekennwerte nach VDI 3807-5, Werte aus [108]

5.4.3 Ausgleich von Angebot und Nachfrage

Sowohl Angebot als auch Nachfrage an Endenergie schwanken, teils unvorhersehbar, teils zyklisch. Es ist ein Ausgleich von Angebot und Nachfrage herzustellen, was regulär ein Prozess der Speicherung ist.

Angebotsschwankung

Die meisten der heute genutzten Energieträger sind gespeicherte Kohlenwasserstoffe. Es bestand daher seit der Industrialisierung weitgehend keine Notwendigkeit, weitere Speicherungsarten zu etablieren. Die gespeicherten Energieträger werden bedarfsgemäß umgewandelt.

Das wird sich künftig ändern (müssen), wenn regenerative Energien die Basis nahezu aller Versorgung sind. Dabei ist die Speicherungsart (chemisch, elektrochemisch, mechanisch, thermisch usw.) und der Speicherungsort zunächst unerheblich. Allerdings ergeben sich verschiedene Verlustketten und damit Kosten.

Nachfrageschwankung

Aus Sicht der Nachfrage und Energienutzung im Gebäude ergeben sich folgende relevante Schwankungen, unabhängig vom Sanierungszustand der Gebäude:

- Heizung: Tagesverlauf (Nachtabsenkung), Wochenverlauf im Nichtwohnbau (Wochenendabsenkung), Jahresverlauf (Witterung)
- Trinkwassererwärmung: Tagesverlauf (Nutzungszyklen), ggf. Wochenverlauf (Nutzungszyklen)
- sonstige Stromverwendung: Tagesverlauf (Nutzungszyklen), ggf. Wochenverlauf (Nutzungszyklen)
- Kühlung: Tagesverlauf (Nachtabschaltung), Wochenverlauf im Nichtwohnbau (Wochenendabschaltung), Jahresverlauf (Witterung)

Jeglicher Schwankung in der Nachfrage kann begegnet werden entweder mit einer lokalen Speicherung von Energie oder mit einer bedarfsgerechten Umwandlung erst zum Zeitpunkt des Bedarfs.

Je nachdem, welche Phasen ausgeglichen werden sollen, ergeben sich Speicher für Tage, Wochen oder Jahreszeiten. Die bedarfsgerechte Umwandlung setzt voraus, dass der Energieträger selbst keine Limits in der zeitlichen und mengenmäßigen Verfügbarkeit aufweist – zumindest in den Mengen und Leistungen, die im Gebäude benötigt werden.

Heute erfolgt der Nachfrageausgleich für die Trinkwassererwärmung größtenteils mit thermischen Speichern (im Gebäude), seltener ausschließlich mit bedarfsgerechter Umwandlung (z. B. Durchlauferhitzern). Schwankungen der Heizung und des Stromverbrauchs werden heute innerhalb des Gebäudes kaum homogenisiert; hier wird aus Sicht des Gebäudes bedarfsgerecht umgewandelt. Das heutige System setzt somit weitgehend auf eine zentralisierte Speicherung (außerhalb des Gebäudes) und den chemischen Speicher der fossilen Brennstoffe.

Mit den oben genannten Notwendigkeiten, künftig die regenerativen Energieträger zu speichern, wird auch die lokale Speicherung (thermisch, elektrochemisch) zunehmen. Dies betrifft insbesondere die Homogenisierung der Tag-Nacht- oder Woche-Wochenend-Zyklen. Die dazu erforderlichen Speicher sind von überschaubarer Größe. Sie gleichen entsprechend den üblichen Haushaltsstromverbrauch sowie die Trinkwarmwasserbedarfe aus.

Heizungs- und Kälteanwendungen führen zur Notwendigkeit einer saisonalen Speicherung. Es ist – unabhängig von der Art der Speicherung – festzustellen, dass Gebäude mit geringerem Bedarf kleinere saisonale Speicherungsbedarfe aufweisen. Das spricht für eine Verbrauchsreduktion im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung der zukünftigen Energieversorgung.

Mögliche Lösungen

Mit dem Ausgleich von schwankenden Tagesverläufen befassen sich diverse Studien. Eine übersichtliche Zusammenfassung findet sich in dem Papier von Kalz et al. zur Netzdienlichkeit von Gebäuden und Quartieren [296].

Zum Ausgleich von Sommer und Winterperiode werden Speicher oder Speichermedien mit großer Energiedichte benötigt. Realistisch erscheint Power-to-X, d. h. die Speicherung von gasförmigen oder flüssigen synthetischen Brennstoffen. Mehrere Studien widmen sich der Thematik [297] [213] [150] [68] [157] [298], teils aus Sicht der verfügbaren, teils aus Sicht der notwendigen Speicherkapazitäten.

Da die Gutachter die Thematik aus Kapazitätsgründen nicht vertiefen können, wird auf die genannte Literatur verwiesen. Wesentliche Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden – mit einem Zitatauszug aus der Studie von IWU, Hochschule Darmstadt und BET von 2019 [57]:

> *„Bei der Langzeitwärmespeicherung und direkten Wärmeerzeugung aus Tiefengeothermie, für die es bereits verschiedene Anwendungsbeispiele gibt, existieren offensichtlich Hemmnisse, die eine breitere Markteinführung bisher verhindern […] Festzustellen bleibt, dass diese beiden national verfügbaren Optionen aufgrund ihrer Bindung an Nah-/Fernwärmenetze (bei der Tiefengeothermie darüber hinaus an regionale Potentiale) grundsätzlich einen begrenzten Wirkungskreis bei der Gebäude-Wärmeversorgung aufweisen.*
>
> *Dagegen verspricht die Erzeugung von synthetischen Brennstoffen (insbesondere Methan) aus Solar- und Windstrom universelle Anwendungsmöglichkeiten. Allerdings existiert dieses Konzept, das das grundsätzliche Potential eines kompletten Ersatzes der bisherigen fossilen Brennstoffe in sich trägt, bisher weitgehend nur auf dem Papier.*
>
> *Ein wesentlicher Nachteil gegenüber der direkten Solar- und Windstromnutzung ist die circa um den Faktor 3 schlechtere Effizienz der Energieausnutzung, so dass bei hohen Deckungsbeiträgen angesichts begrenzter nationaler Solar- und Windenergiepotentiale voraussichtlich weitgehend eine Gewinnung im Ausland und womöglich außerhalb Europas notwendig wäre. Damit stehen alle Fragen und Unsicherheiten im Raum, die mit der Installation einer neuen und weitgehend unbekannten Großtechnologie im internationalen Rahmen zusammenhängen.“*

Die Notwendigkeit einer Speicherung ist indiskutabel, insbesondere gegen Ende des Umbaus des Energiesystems. daher schließen sich die Verfasser des vorliegenden Gutachtens der Erkenntnis von Diefenbach et al. [57] an:

> *„Vor diesem Hintergrund bietet sich für eine robuste Klimaschutzstrategie im Wohngebäudesektor […] ein gestaffeltes Vorgehen an, bei dem zunächst auf den Einsatz der verfügbaren Technologien zur Brennstoffminimierung gesetzt wird (Wärmeschutz, effiziente Wärmeversorgung und direkte Solar- und Windenergienutzung insbesondere durch Wärmepumpen). Gleichzeitig sollten die Zukunftstechnologien schnell und konsequent weiterentwickelt und in den Markt eingeführt werden, damit sie rechtzeitig zur Verfügung stehen, um die noch bestehenden Lücken bei der Erreichung der Klimaziele zu füllen. Insbesondere könnte der anfängliche Pfad der Brennstoffminimierung später sinnvoll mit der zukünftigen Option der Brennstoffsubstitution durch synthetisches Erdgas ergänzt werden.*
>
> *Eine Klimaschutzstrategie dagegen, die ausschließlich oder überwiegend auf bisher nicht ausreichend bekannte Zukunftstechnologien setzt, trüge die Gefahr des Scheiterns in sich, wenn diese Technologien die Erwartungen nicht bzw. nicht schnell genug erfüllen können.“*

5.5 Energieträgerbewertung

Die eingesetzten Energieträger werden in Mikro- und Makrobetrachtungen üblicherweise zunächst als Energiemengen bilanziert. Anschließend kann eine Umrechnung erfolgen:

- mit Heiz- und Brennwerten, um stoffliche Mengen zu bestimmen,
- mit Preisen in Energiekosten zur wirtschaftlichen Bewertung bzw. ggf. Lebenszyklusanalyse,
- mit Primärenergiefaktoren oder CO_2-Äquivalenten zur Umweltbewertung des Energiekonsums.

Den genannten Bewertungsgrößen gemein ist regulär der Bezug auf eine Kilowattstunde Endenergie des betreffenden Energieträgers. Die Verwendung von heiz- und brennwertbezogenen Größen ist zu beachten.

Insbesondere für die Umweltbewertung stellt sich regelmäßig das Problem, wie mit gekoppelten Prozessen umzugehen ist, bei denen anteilig eine Gesamtemission (oder Gesamtprimärenergiemenge) auf zwei Verursacher oder zwei Nutzer zu verteilen ist. Dies ist beispielsweise bei allen Prozessen der Kraft-Wärme-Kopplung gegeben. Eine Erläuterung der Problematik erfolgt im Zusammenhang mit dem Primärenergiefaktor.

5.5.1 Energiepreise

Abbildung 273 zeigt die Energiepreise der letzten 30 Jahre. Die Werte enthalten alle Steuern und Abgaben sowie anteilig auch Grund-, Leistungs-, Messpreise usw. für einen mittleren Haushalt bzw. typische Abnahmemengen (für die genauen Randdaten der Ermittlung wird auf Erläuterungen der Datenlieferanten verwiesen).

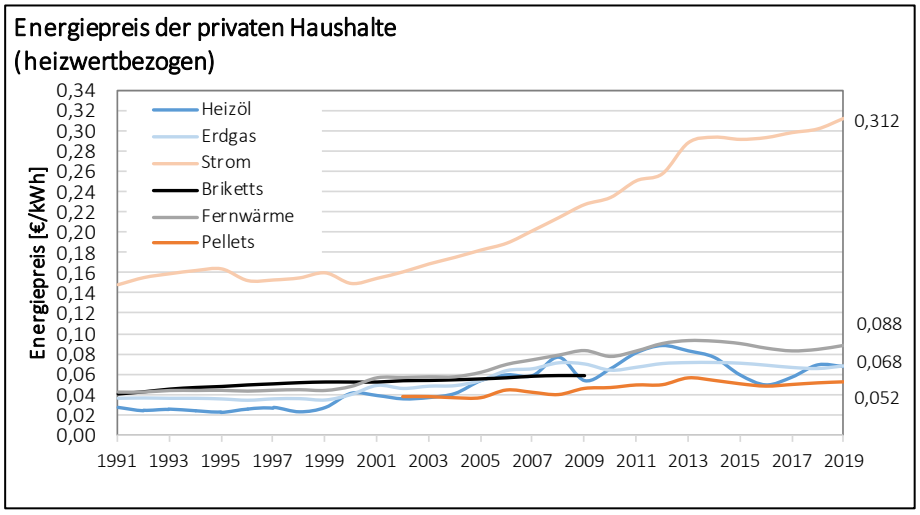


Abbildung 273 Endverbraucherpreise, eigene Darstellung nach [18] [19]

Passend zu den Energiebilanzen und entsprechenden Energiemengen werden die Preise seitens AGEB bzw. des BMWi heizwertbezogen angegeben. Somit liegen sie für die Brennstoffe bilanziell höher als bei einer Angabe durch den Energieversorger, der brennwertbezogen abrechnet. Eine Umrechnung erfolgt entsprechend mit dem Umrechnungsfaktor Heizwert/Brennwert (vgl. Ausführungen in [78]).

Um die heiz- und brennwertbezogenen Umrechnungsnotwendigkeiten künftig zu verhindern, empfiehlt sich die Verwendung einer einheitlichen Bezugsbasis. Physikalisch sinnvoll ist eine Umstellung auf den Brennwert vorzunehmen, um auch Effizienzangaben für Erzeuger (über 100 %) zu vermeiden. Berechnungen im Rahmen des vorliegenden Gutachtens erfolgen daher brennwertbezogen.

Aus den Daten ergibt sich eine nominale Energiepreissteigerung von etwa 3,0 bis 3,5 %/a für alle Energieträger gleichermaßen. Der Preisanstieg von Strom unterscheidet sich – abgesehen von den üblichen Schwankungen – nicht nennenswert von den anderen Energieträgern, trotz der EEG-Umlage.

Umlagen und Preisbestandteile

Eine detaillierte Untersuchung zur Preiszusammensetzung für die einzelnen Energieträger erfolgt in einer Studie von AGORA aus dem Jahr 2017. Zwei wesentliche Grafiken sind nachfolgend eingefügt. Die Erkenntnis lautet [299]:

> *„Aus beiden Vergleichen ergibt sich dasselbe Bild: Treten im Zuge der Energiewende die Energieträger über die Sektorengrenzen hinweg gegeneinander in den Wettbewerb, gibt es kein Level Playing Field. Der Stromverbrauch wird momentan sowohl bezogen auf den Energiegehalt als auch bezogen auf den CO_2-Ausstoß durch die staatlich veranlassten Strompreisbestandteile gegenüber den anderen Energieträgern deutlich überproportional belastet. Zudem führen die niedrigen Abgaben auf Heizöl und Erdgas dazu, dass sich die energetische Gebäudesanierung in vielen Fällen kaum rechnet*
> *[…]*
> *Im Verlauf der vergangenen Jahre ist die Komplexität des Systems aus Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen auch durch viele Ausnahmetatbestände stark angestiegen. Dies ist bereits für sich genommen, also unabhängig von der Bewertung der Regelungsgehalte, problematisch, zum Beispiel aufgrund von nicht intendierten Anreizen.“*

	Stromerzeugung		Stromverbrauch (Haushalte)		Erdgas (Haushalte)		Heizöl (leicht)	
	Ct/kWh	€/t_{CO2}	Ct/kWh	€/t_{CO2}	Ct/kWh	€/t_{CO2}	Ct/kWh	€/t_{CO2}
Abgaben und Entgelte für Infrastruktur, Staatsfinanzierung etc.	0,0	-	9,1	-	1,8	-	0,4	-
	keine		Konzessionsabgabe, Netzentgelt, Haftungsumlage etc.		Bilanzierungsumlage, Netzentgelt, Konzessionsabgabe, Anteil Staatsfinanzierung		Anteil Staatsfinanzierung	
Abgaben und Umlagen mit klimapolitischem Bezug	0,3	5,26	9,6	185,40	0,4	20,14	0,2	7,68
	CO_2-Zertifikate		CO_2-Zertifikate, KWKG-Umlage, EEG -Umlage, Stromsteuer		Anteil Ökosteuer		Anteil Ökosteuer	

Tabelle 157 Staatlich veranlasste Preisbestandteile und CO_2-Belastung der Energieträger nach AGORA 2017, Grafik aus [299]

Das künftiges Entflechten des Systems der Umlagen, Steuern und Abgaben birgt Potentiale: künftig könnten alle Energieträger nur nach der Umweltwirksamkeit nachvollziehbar bewertet werden. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens verweisen dazu auf Vorschläge anderer Studien, z. B. von AGORA [299].

Eine alternative Bepreisung, die allein die Emissionen als Grundlage der Preisfindung nutzt, wird in diesem Gutachten erarbeitet und angewendet, siehe Anhang 3.9.5 und 4.6.

Annahmen von Energiepreisen in der Literatur

In vielen Studien, welche sich der Makroperspektive widmen, sind keine Endverbraucherpreise genannt (z. B. [68], [57], [121]) – die Untersuchungen befassen sich entsprechend mit dem insgesamt notwendigen Energieimport bzw. der innerdeutschen Produktion und nicht mit den Kosten für das einzelne Objekt.

Für die Mikroperspektive ist – auch aus eigener Projektarbeit der Gutachter – festzustellen, dass Annahmen zum Energiepreis sich teils an der aktuellen Marktlage, teils auch an den rückliegenden zwei bis 5 Jahren orientieren. Es findet in gewisser Weise eine „Glättung“ des aktuellen Marktgeschehens statt. In Jahren mit sehr niedrigen Energiepreisen wird eher aufgerundet, in Hochpreisphasen eher abgerundet. Insgesamt wird dieses Vorgehen in Anbetracht der nicht Vorhersehbarkeit künftiger Entwicklungen als gute Vorgehensweise angesehen.

Nachfolgend sind einige Angaben aus der Literatur zusammengestellt. Das Jahr der Veröffentlichung ist angegeben, um den verwendeten Preis mit der realen Preislage (ein oder zwei Jahre Zeitversatz zum realen Marktgeschehen sind zu beachten) zu vergleichen. Sofern in den zitierten Quellen mehrere Varianten verfügbar waren, ist nur der Preis für den Endverbraucher und Wohngebäude dargestellt. Der Datenauszug beschränkt sich auf die wichtigsten Energieträger.

- 2012: Erdgas 0,070 €/kWh | Heizöl 0,070 €/kWh [122]
  - 2010 real: Erdgas 0,064 €/kWh | Heizöl 0,066 €/kWh
  - 2011 real: Erdgas 0,067 €/kWh | Heizöl 0,082 €/kWh
  - 2012 real: Erdgas 0,070 €/kWh | Heizöl 0,089 €/kWh

- 2013: Erdgas 0,064 €/kWh | Heizöl 0,087 €/kWh | Strom 0,26 €/kWh | Fernwärme 0,083 €/kWh [284]
  - 2011 real: Erdgas 0,067 €/kWh | Heizöl 0,082 €/kWh | Strom 0,251 €/kWh | Fernw. 0,082 €/kWh
  - 2012 real: Erdgas 0,070 €/kWh | Heizöl 0,089 €/kWh | Strom 0,258 €/kWh | Fernw. 0,089 €/kWh
  - 2013 real: Erdgas 0,071 €/kWh | Heizöl 0,083 €/kWh | Strom 0,288 €/kWh | Fernw. 0,092 €/kWh

- 2015: Energiepreis für Wärme: 0,080 €/kWh [201]
- 2015: Erdgas 0,07 €/kWh | Heizöl 0,09 €/kWh | Strom 0,30 €/kWh | Fernwärme 0,08 €/kWh [34]
  - 2013 real: Erdgas 0,071 €/kWh | Heizöl 0,083 €/kWh | Strom 0,288 €/kWh | Fernw. 0,092 €/kWh
  - 2014 real: Erdgas 0,071 €/kWh | Heizöl 0,077 €/kWh | Strom 0,294 €/kWh | Fernw. 0,092 €/kWh
  - 2015 real: Erdgas 0,071 €/kWh | Heizöl 0,059 €/kWh | Strom 0,292 €/kWh | Fernw. 0,089 €/kWh

Vom Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Gutachtens aus lässt sich ggf. 5 Jahre in die Zukunft blicken. Insbesondere ein starker Preisverfall eines Energieträgers ist kaum vorhersehbar, z. B. der des Heizöls in den Jahren 2009 und 2016 und aktuell 2020. Generell betrifft dies – auf lange Sicht gesehen – alle Energieträger; nur zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Für den Umbau des Energiesystems ist es wichtig, dass langfristig einigermaßen treffsicher die Relation der Preise der Realität nahekommt.

Eine (ggf. auch nur geringfügige) Verschiebung der Energiepreise zwischen den Energieträgern verschiebt die Aussage von Konzepten. Die entsprechend kostengünstigeren Energieträger dominieren das Konzept, insbesondere wenn die Energieträger im Verlauf der Zeit Preissteigerungen erfahren.

Analoges gilt auch für die Nutzungsdauern der Bauprodukte, siehe Anhang 5.9.1.

Im Langzeitmittel der letzten 3 Jahrzehnte war Heizöl etwa 9 % günstiger als Gas, Strom um fast den Faktor 3,9 teurer, Fernwärme 23 % teurer. Für Holz ergibt sich aus den letzten 20 Jahren ein Preis, welcher 28 % unter dem Gaspreis lag.

Festlegung von Werten

Tabelle 158 zeigt die Festlegungen für die Energieträgerpreise, die im Rahmen des vorliegenden Gutachtens als Standardfall gilt. Abweichende Werte (z. B. im Rahmen von Variationsrechnungen) werden – sofern notwendig – separat gekennzeichnet.

Energieträger	Energiepreis, ggf. brennwertbezogen, gerundet	informativ: Umrechnung Brennwert/Heizwert	
		Umrechnungsfaktor	Preis, heizwertbezogen
	[€/kWh]	[-]	[€/kWh]
Erdgas	0,06	1,11	0,068
Heizöl	0,06	1,06	0,068
Holz	0,05	1,06	0,052
Fernwärme	0,09	1,00	0,088
Strom (Bezug, Normaltarif)	0,31	1,00	0,312
Strom (Bezug, Wärmepumpe)	0,22	1,00	0,220
Strom (Einspeisung)	0,09	1,00	0,090

Tabelle 158 Energieträgerpreise [eigene Darstellung]

Die Festlegung für den zurückvergüteten Strom ergibt sich auf Basis des aktuellen EEG. Der Wärmepumpentarif ergibt sich aus der neuesten Veröffentlichung des Bundesverbandes Wärmepumpen [20].

5.5.2 Primärenergie und Primärenergiefaktoren

Der Primärenergieeinsatz für Deutschland ist in Abbildung 258 auf S. 470 im Zeitverlauf dargestellt. Allerdings definiert die Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen AGEB „Primärenergieverbrauch“ ohne Vorketten der Energieträger. Gemeint ist hier die Summe aus Import und Eigenförderung von Energieträgern.

Abweichend davon kann zusätzlich auch der Aufwand für die Förderung und den Transport außerhalb der Landesgrenzen berücksichtigt werden. Dieser Logik folgt die Datenbereitstellung in dem Modell „GEMIS“ [110]. Die Größe heißt dann strenggenommen nicht mehr „Primärenergie“, sondern „kumulierter Energieaufwand“ bzw. „kumulierter Energieverbrauch“. Großklos definiert wie folgt [111]:

> *„Bei der Berechnung der Umweltwirkungen von unterschiedlichen Energieträgern für die Beheizung von Gebäuden ist es wichtig, die Verluste zu kennen, die während der Gewinnung und Weiterverarbeitung in der vorgelagerten Kette auftreten […] Diese Verluste sind im kumulierten Energieaufwand (KEA) bzw. kumulierten Energieverbrauch (KEV) zusammengefasst, der der besseren Vergleichbarkeit unterschiedlicher Energieträger dient.*
>
> *Der KEA beinhaltet alle energetischen Aufwendungen bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Produkten oder Dienstleistungen und ist somit umfassender als der früher verwendete Primärenergieaufwand.*
>
> *KEA und KEV unterscheiden sich nur hinsichtlich der energetischen Berücksichtigung der verwendeten Baumaterialien und Produkte (KEV z. B. ohne Energieinhalt für Bauholz) und der Entsorgung (KEV ohne Entsorgung). Die Unterschiede beider Verfahren sind bei den hier dargestellten Energieversorgungsketten gering und liegen innerhalb der Grenze der Genauigkeit bei der Abbildung der Prozessketten. Im Folgenden wird nur der KEV-Wert dargestellt.“*

Die abweichenden Begrifflichkeiten für die Primärenergie (AGEB, „GEMIS“) oder den Umrechnungsfaktor (KEV, Primärenergiefaktor) existieren parallel nebeneinander.

Im Rahmen dieses Gutachtens verwenden die Verfasser des vorliegenden Gutachtens den „KEV“ stellvertretend als „Primärenergiefaktor“ analog wie IWU dies für die Bilanzierung vorschlägt [76]. Auch in der EnEV und ihren Normen (DIN V 4701-10 und DIN V 18599) kommt diese Logik zum Einsatz. Basis sind die Daten des Bilanzmodells „GEMIS“.

Der Primärenergiefaktor ist kein Maß für die Emissionen, welches es zu begrenzen gilt. Daher erscheint er als ungeeigneter Parameter. Die Umweltbewertung erfolgt im Rahmen des vorliegenden Gutachtens nicht auf Basis der Primärenergie, sondern auf Basis der Emissionen. Die Primärenergie wird dennoch informativ angegeben. Eine Umstellung des GEG auf diese Größe als Anforderungswert sehen die Verfasser des vorliegenden Gutachtens als logische Konsequenz an (die zugehörige Norm DIN V 18599 sieht die Berechnung der Emissionen bereits seit 2018 vor).

Für jeden Energieträger gibt es einen Gesamtaufwand (oder Gesamtprimärenergiefaktor), der sich aus zwei Anteilen zusammensetzt: dem Regenerativanteil und dem Fossilanteil. Bei der Umweltbewertung kommt regulär nur der Fossilanteil (oder Nichtregenerativanteil) zum Einsatz.

Primärenergiefaktoren im Zeitverlauf

Abbildung 274 zeigt die Entwicklung der Primärenergiefaktoren, welche das IWU aus der Datenbank „GEMIS“ abgeleitet hat. Die Aufstellung ist grundsätzlich chronologisch, jedoch sind nicht alle veröffentlichten Zwischenwerte genannt, sondern nur die für die Gutachter aus den letzten Jahrzehnten verfügbaren. Dargestellt ist der gesamte kumulierte Energieaufwand, d. h. die Summe aller eingesetzten Energiemengen (regenerativ und fossil).

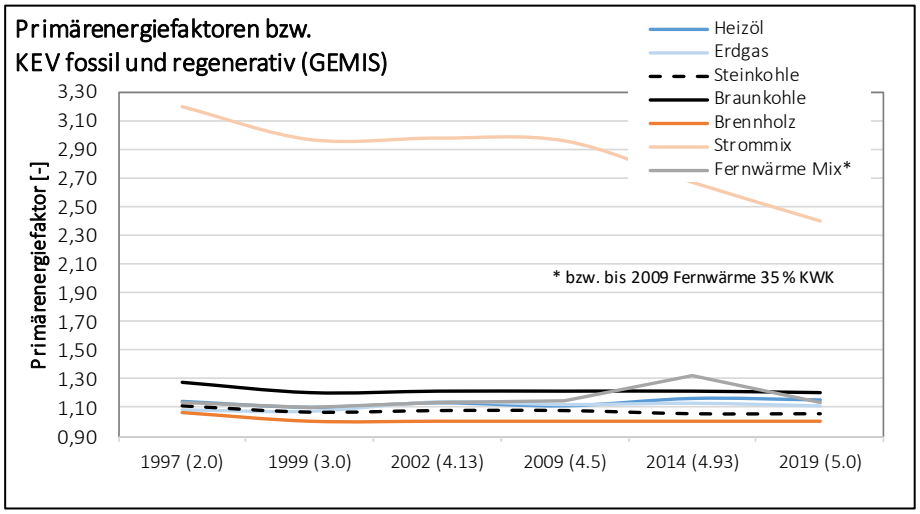


Abbildung 274 Primärenergiefaktoren (gesamt) aus Daten von „GEMIS“ [eigene Darstellung] nach [75] [76] [111]

Bei den fossilen Energieträgern (Erdgas, Heizöl, Steinkohle, Braunkohle) sind im Laufe der Jahre kaum Änderungen festzustellen. Minimale Schwankungen ergeben sich, weil die Herkunftsländer der Stoffe in ihrer Zusammensetzung leicht variieren. Der Regenerativanteil der genannten Energieträger ist nahezu null.

Für Brennholz ist ebenfalls kaum eine Änderung festzustellen. Der in Abbildung 274 dargestellte Gesamtfaktor besteht fast vollständig aus einem regenerativem Anteil. Der fossile Anteil ergibt sich aus der Aufbereitung und dem Transport. Die zahlenmäßige Aufteilung folgt weiter unten.

Strom und Fernwärme sind die veränderlichen Energieträger, welche einerseits aus diversen Ausgangsprodukten hergestellt werden (deren Zusammensetzung schwankt), andererseits werden sie teilweise auch gekoppelt erzeugt. Letztgenannte Thematik – einschließlich der Fernwärme – wird unten separat besprochen.

Für Strom ist zu sehen, dass der Gesamtaufwand für die Produktion einer Kilowattstunde in den letzten 20 Jahren deutlich gesunken ist. War 1997 noch ein Faktor von 3,2 festzustellen, liegt er 2019 bei 2,4. Auch Fritsche ermittelt für das Jahr 2018 einen kumulierten Energieverbrauch von Strom, welcher 2,41 (verbraucherseitig) bzw. 2,33 (erzeugerseitig) beträgt, davon liegt der nicht erneuerbare Anteil bei 1,72 bzw. 1,66 [159].

Das Absinken ist begründet einerseits durch eine verbesserte Kraftwerkstechnik, andererseits durch einen höheren Regenerativanteil. Dieser geht nach dem Wirkungsgradprinzip mit 100 % Wirkungsgrad bzw. einem Gesamtprimärenergiefaktor von 1,0 in die Bilanz ein.

Problematik: endliche regenerative Brennstoffe

Zu den endlichen regenerativen Brennstoffen zählen alle Biomassen, deren Fossilanteil aller kumulierten Energieaufwendungen sehr gering ist. Für die Umweltbewertung hat das zur Folge, dass in Gebäuden, die mit Biomassen (insbesondere Holz) versorgt sind, sehr geringe nichtregenerative Primärenergiemengen bestimmt werden und somit kein Anreiz zum sparsamen Umgang mit Holz besteht.

Für Holz und andere regenerative Brennstoffe ermittelt Diefenbach (IWU) daher bereits 2002 ein wohnflächenbezogenes Biomassebudget von 35 kWh/(m²a) [300]. Bis zu einem Energiekennwert in dieser Höhe zählt der regenerative Primärenergiefaktor, darüber der Gesamtfaktor so der Vorschlag. Das Wuppertalinstitut schließt sich 2015 in einer Untersuchung zur Weiterentwicklung der Primärenergiefaktoren diesen Überlegungen an [115]).

In neueren Studien mit Beteiligung des IWU wird der Budgetwert nur noch halbiert angenommen [57]. Eine detaillierte Erläuterung ist in der genannten Literaturquelle nachzulesen. Vor allem wird der Druck auf die Nutzung der Landflächen aus anderen Branchen genannt.

Problematik: Allokation bei gekoppelten Prozessen

Bei gekoppelten Prozessen – ein Aufwand und mehrere Nutzen – ist eine Festlegung zu treffen, welcher Anteil des Aufwandes den jeweiligen Nutzen zuzuordnen ist. Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit ihre beiden Nutzenergien Wärme (häufig als Nah- und Fernwärme) und Strom fällt unter diese Problematik der „Allokation“. Die Problematik der verschiedenen Allokationsmethoden ist nicht neu. Zur Verfügung stehen mindestens die folgenden Methoden

1. Zuordnung aller Emissionen zum Strom, Wärme emissionsfrei
2. exergetische Aufteilung (Aufteilung im exergetischen Verhältnis der Nutzenergien)
3. Finnische Methode (Vergleich mit Referenzkraftwerk und Referenzwärmeerzeuger)
4. Gutschriftmethode Strom (Hauptprodukt = Strom, Nebenprodukt Wärme; Modell: Referenzkraftwerk)
5. Wirkungsgradmethode (Wärmeanteil proportional Stromwirkungsgrad und umgekehrt)
6. IEA Methode (50:50)
7. Gutschriftmethode Wärme (Hauptprodukt = Wärme, Nebenprodukt Strom; Modell: Referenzwärmeerzeuger)
8. energetische Aufteilung (Aufteilung im energetischen Verhältnis der Nutzenergien)
9. Zuordnung aller Emissionen zur Wärme, Strom emissionsfrei

Von oben nach unten wird der Wärme tendenziell ein steigender Anteil der Emissionen zugeordnet und dem Strom entsprechend ein geringerer. Eine abschließende Sortierung kann nicht vorgenommen werden, weil die Ergebnisse von den gewählten Randdaten (Referenztechniken, Wirkungsgrade/Stromkennzahlen) der zu bewertenden KWK abhängen. (Für die CO_2-Bewertung gelten die Zusammenhänge analog, weshalb eine grafische Darstellung in Anhang 5.5.3 erfolgt).

Die Normen zur EnEV verwenden seit ihrer Einführung 2002 unverändert die Gutschriftmethode. Kompatibel zu dieser Allokation zertifiziert die AGFW. Das Wuppertalinstitut hat 2015 [115] untersucht, wie sich die etwa 500 gelisteten und nach AGFW zertifizierten Faktoren der Fernwärmenetze darstellen. Knapp 30 % wiesen einen Primärenergiefaktor von null auf. Der ungewichtete Mittelwert lag bei 0,36. In diesem Zusammenhang wird festgestellt [115]:

> *„Diese bilanztechnisch sehr niedrigen PEF für ausgekoppelte Fernwärme (bis hin zu Null) können sich aber aus folgendem Grund mittel- und langfristig als klimapolitisch problematisch erweisen: Ein PEF nahe oder gleich Null bedeutet in der Praxis, dass bei der Anwendung der EnEV auf eine energetisch anspruchsvolle Gebäudehülle verzichtet werden kann […] Architekten, Bauträger und FW-Versorger werben z.T. eben mit diesem Umstand. Der Effekt mag für den Nutzer bzw. Bauherrn finanziell (zumindest kurzfristig) von Vorteil sein, da er Kapitalkosten für zusätzliche Dämmung einspart. Der Endenergiebedarf - und damit die aufzuwendenden Kosten für den Energieträger Fernwärme - sinkt jedoch nicht […] Zudem zementiert der Verzicht auf eine Wärmedämmung möglicherweise auf Jahrzehnte einen im Sinne der Klimaschutzanforderungen unzureichenden Wärmeschutz im Gebäudebestand. Dies betrifft sowohl den Neubau als auch die energetische Sanierung.“*

Das Wuppertalinstitut bevorzugt dennoch die Gutschriftmethode, Exergie- oder finnische Methode und hält den IEA-Ansatz sowie die Wirkungsgradmethode für nicht geeignet zur KWK-Bewertung [115]. Fritsche und Rausch führen 2008 diverse Vergleichsrechnungen für KWK bzw. Fernwärme durch und schlagen nach Abwägung der Vor- und Nachteile die Wirkungsgradmethode zur KWK-Bewertung vor [110]. Das UBA verwendet für seine Berechnungen und Bilanzierungen die finnische Methode [114]. Auch Diefenbach (IWU) plädiert 2002 für diese Methode [300].

Die eigene Beschäftigung mit der Problematik im Rahmen der Quartierssanierung führte 2014 zu der Erkenntnis, dass die „energetische Allokation“ (gleichwertige Aufteilung) am geeignetsten ist, jedoch wenn möglich überhaupt keine Allokationen vorgenommen werden, sondern eine Gesamtbilanz des Systems „Wärme + Strom“ erfolgt [116].

PER-Bewertung

Das Wuppertalinstitut kommt 2015 bei seiner Analyse zum Status-Quo der Verwendung von Primärenergiefaktoren zu folgender Erkenntnis [115]:

> *„Insgesamt bleibt festzuhalten, dass in der Vergangenheit der Primärenergiefaktor (nichterneuerbarer Anteil) für Strom sehr stark abgesenkt wurde und - und bei fortgeschriebener Methodik - in der Zukunft dieser Trend sich fortsetzen wird. Von dieser Entwicklung profitieren strombasierte Heizungssysteme wie Wärmepumpen, Nachtspeicherheizungen, Elektro-Direktheizungen oder auch mechanische Belüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung. Im Rahmen der EnEV 2014 wurden zwar einerseits die Grenzwerte für den Primärenergieverbrauch um 25 % abgesenkt. Gleichzeitig wird jedoch PEF_{ne} für Strom von 2,6 (2009) auf 1,8 (2016) um 30,8 % reduziert. De facto bedeutet dies ab 2016 eine Herabsetzung der primärenergetischen Anforderungen für Stromheizungssysteme […] Dies betrifft im Neubau mehr als jedes dritte Heizungssystem. Perspektivisch würde bei einer vollständig dekarbonisierten Stromerzeugung unter Beibehaltung des gegenwärtigen Ansatzes der PEF_{ne} gegen Null konvergieren. Auch wenn die Stromerzeugung dann nahezu CO_2-frei wäre, so wären dennoch andere Umwelteinwirkungen wie z. B. Flächeninanspruchnahme durch Windkraftanlagen und Ausbau von Stromtrassen gegeben […] Die Steuerungswirkung des Indikators „PEF“ in Richtung energieeffiziente Gebäude ginge dann verloren.“*

Auch das Passivhausinstitut hat diese Problematik erkannt und zur Gegensteuerung die „PER-Bewertung“ eingeführt. Auch die erneuerbare Energieerzeugung wird dabei bewertet. Grundüberlegung ist, dass nur noch erneuerbare Energieträger zur Verfügung stehen, diese jedoch verschieden effizient erzeugt, direkt verwendet und vor allem gespeichert werden. Krick [80] führt aus:

> *„Im Modell des Passivhaus Instituts gibt es Kurzzeit- und Langzeitspeicher. Diese haben Speicherverluste. Beim Kurzzeitspeicher (z. B. Pumpspeicherkraftwerke) sind diese Verluste mit ca. 20-30 % gering, beim Langzeitspeicher (aus Strom wird Methan erzeugt und dieses bei Bedarf rückverstromt) sind sie mit ca. 70 % sehr hoch“*

Stromanwendungen ohne ausgeprägten Jahresgang, z. B. die Haushaltsstromverwendung, schneidet insgesamt besser ab (PER = 1,3) als Heizungsanwendungen, die größere Speicheraufwendungen nach sich ziehen (PER = 1,8). Im Vergleich ist die Wärmepumpenanwendung dennoch besser als ein mit synthetischem Methan (PER = 1,75) betriebener Kessel, weil bei letzterem nie eine Direktnutzung eintritt, sondern immer Umwandlungsketten und

Speicher zwischengeschaltet sind. GebäuDENAh erzeugter Strom einer Photovoltaikanlage wird nicht direkt mit dem Bedarf des Gebäudes verrechnet, um Fehloptimierungen zu vermeiden [80].
Ein Gebäude wird – um dennoch die Eigenstromerzeugung zu würdigen – in zwei Kategorien bewertet: dem PER-Bedarf (optimierbar durch gute Dämmung, effiziente Wärmepumpe usw.) und der PER-Erzeugung (optimierbar durch PV-Erzeugung usw.). Dabei wird die PER-Erzeugung auf die überbaute Bodenfläche bezogen, um mehrgeschossige Gebäude nicht zu benachteiligen [80].

Die entkoppelte Betrachtung von „Bedarf" und „Erzeugung" des PER-Ansatzes halten die Verfasser des vorliegenden Gutachtens zur Vermeidung von Fehloptimierungen für sinnvoll. Allerdings erscheint – angesichts der Vermeidungsdiskussion – eine CO_2-Bewertung insgesamt zielführender. Zumindest solange das Energiesystem nicht vollständig dekarbonisiert ist. Anschließend könnte die Primärenergie wieder ein Bewertungs- oder Regulierungsmaßstab sein, aber auch die Wirtschaftlichkeit.

Festlegung von Werten

Da das Gutachtens explizit eine Primärenergiebewertung enthalten soll, legt nachfolgende Tabelle 156 die Werte für die Berechnung fest.

Energieträger		Primärenergiefaktoren	
		insgesamt	nicht erneuerbar
Fossile Brennstoffe	Heizöl, Erdgas, Flüssiggas, Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Holz	1,2	0,2
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	1,8
Umweltenergie	Solar-, Umgebungs-, Erdwärme, Geothermie	1,0	0,0
Fernwärme	allgemeiner Netzmix	1,1	0,8

Tabelle 159 Primärenergiefaktoren, eigene Darstellung, Werte gekürzt nach DIN V 18599 bzw. IWU 2020 [112] [111]

Eine separate Betrachtung von Biogas entfällt aus Gründen der Komplexität. Das Wuppertalinstitut hat anhand der Zahlen aus dem Bilanzjahr 2013 festgestellt, dass sich der Primärenergiefaktor des Erdgas/Biogas-Mixes nur im 1 %-Bereich ändern würde. Das meiste Biogas wird – der Qualität halber – direkt verstromt und ist entsprechend im Primärenergiefaktor für Strom enthalten [115].

Abweichend von der DIN V 18599, der die Werte entnommen sind, erfolgt die Bewertung der KWK mit einer Gesamtbilanzierung von Wärme und Strom. Falls eine Allokation notwendig wird, greifen die Verfasser des vorliegenden Gutachtens auf die „energetische Bewertung" zurück.

Für Holz gilt der vom IWU vorgeschlagene aktualisierte [57], wohnflächenbezogene Budgetansatz von gerundet 20 kWh/(m²a. Energiemengen oberhalb dieses Wertes werden mit dem „Gesamtfaktor" bewertet, bis dahin gilt der „nicht erneuerbare Anteil".

5.5.3 Emissionen und Emissionsfaktoren

Bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit reinem Sauerstoff entstehen Kohlendioxid und Wasserdampf. Die üblichen Brennstoffe enthalten neben Kohlen- und Wasserstoff weitere Elemente und werden mit Luft verbrannt. Das resultierende Abgas kann neben CO_2 und H_2O daher viele weitere Stoffe enthalten, u. a. Kohlenmonooxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (unvollständige Verbrennung), Stickoxide und Lachgas (Reaktion mit dem Luftstickstoff), Schwefelverbindungen usw. Einige der realen Abgasbestandteile sind schädlicher für die Atmosphäre, andere unschädlicher als CO_2. Zusammengefasst sind sie im „CO_2-Äquivalent" bzw. dem Emissionsfaktor. Diese Größe enthält die bei der Verbrennung der Endenergie entstehenden CO_2-Mengen, aber auch alle anderen Treibhausgase entsprechend ihrer Klimawirksamkeit auf CO_2 umgerechnet (Bezugszeitraum 100 Jahre) [78].

Die CO_2-Mengen, die nachwachsende Rohstoffe in ihrer Wachstumsphase gespeichert haben, werden jedoch nicht bilanziert. Auch das UBA stützt sich in seinen Berechnungen unter anderem auf das Datenmodell von „GEMIS" [114].

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens ist die Treibhausgasemission das primäre Werkzeug zur Einschätzung der Umweltwirksamkeit von Gebäudesanierungen. Die Primärenergie wird informativ angegeben.

Gesamtemissionen Deutschland

Abbildung 275 zeigt die Treibhausgasemissionen in Deutschland seit 1990. Etwa ⅔ der Emissionen für den Sektor „Gebäude“ des Jahres 2019 entfallen auf die privaten Haushalte. Das verbleibende Drittel sind Gebäude für Gewerbe, Handel und Dienstleistung sowie Militär (ohne Gebäude der Industrie und Landwirtschaft) [13].

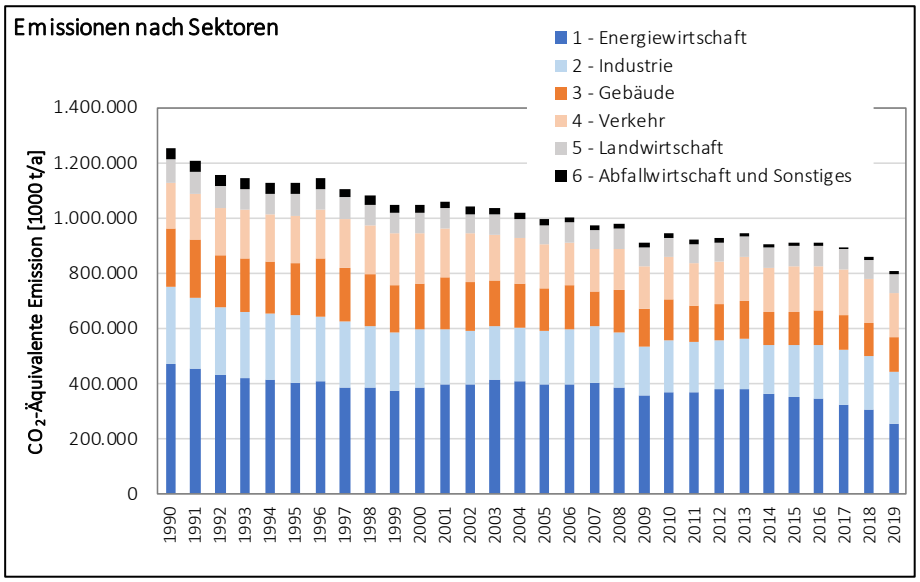


Abbildung 275 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren, eigene Darstellung nach UBA [13]

Werden lineare Trends unterstellt, ergeben sich folgende Erkenntnisse: die Energiewirtschaft reduziert ihre Emissionen um 10,8 Mio. t/a, der Gebäudesektor um 9,1 Mio. t/a, die Industrie um 7,2 Mio. t/a, die Abfallwirtschaft und sonstige um 3,4 Mio. t/a, der Verkehr um 1,8 Mio. t/a und die Landwirtschaft um 0,9 Mio. t/a. Ausgehend vom ersten und letzten Dreijahresmittelwert im Gesamtzeitraum 1990 bis 2019: Die Emissionen des Verkehrssektors stagnieren dabei auf hohem Niveau; die Landwirtschaft hat ihre Emissionen um 15 % reduziert, die Industrie um 27 %, die Energiewirtschaft um 34 %, der Gebäudesektor um 41 %, die Abfallwirtschaft und sonstige um 76 %.

Wird extrapoliert („business-as-usual“) kann eine Erreichung oder Nichterreichung der gesteckten Klimaziele mit einigermaßen Sicherheit prognostiziert werden – abgesehen von den Auswirkungen einschneidender Einzelereignisse wie Fukushima, die Finanzkrise oder die Corona-Pandemie. Die DENA schätzt die Fehlmenge zu den gesteckten Klimazielen des Jahres 2030 mit bis zu 28 Mio. Tonnen ab [3].

Emissionsfaktoren im Zeitverlauf

Abbildung 276 zeigt die Entwicklung der Emissionsfaktoren, welche das IWU aus der Datenbank „GEMIS“ abgeleitet hat. Die Aufstellung ist grundsätzlich chronologisch, jedoch sind nicht alle veröffentlichten Zwischenwerte genannt, sondern nur die für die Gutachter aus den letzten Jahrzehnten verfügbaren. Dargestellt ist der „Gesamtfaktor“, d. h. die Vorketten bei der Rohstoffgewinnung, dem Transport und ggf. die Umwandlung sind enthalten, einschließlich aller Hilfsenergien.

Bei den fossilen Energieträgern (Erdgas, Heizöl, Steinkohle, Braunkohle) sind im Laufe der Jahre kaum Änderungen festzustellen. Minimale Schwankungen ergeben sich, weil die Herkunftsländer der Stoffe in ihrer Zusammensetzung leicht variieren.

Strom und Fernwärme sind die veränderlichen Energieträger. Im Zeitverlauf ändert sich die Mixzusammensetzung der primären Energieträger. Bei Strom ist der Wert von knapp unter 700 g/kWh auf heute ca. 400 (Erwartungswert der Gutachter 2020) bis 500 g/kWh gesunken.

Fritsche ermittelt für das Jahr 2018 einen Emissionsfaktor von Strom, welcher 502 (verbraucherseitig) bzw. 489 g/kWh (erzeugerseitig) beträgt [159]. Das Umweltbundesamt leitet verschiedene Faktoren ab – jeweils unter Berücksichtigung des Inlandsverbrauchs und der Außenhandelsbilanz. Es ergeben sich 474 g/kWh (gesamt) bzw. 518 g/kWh (unter Berücksichtigung des Handelssaldos) im Jahr 2018 [301].

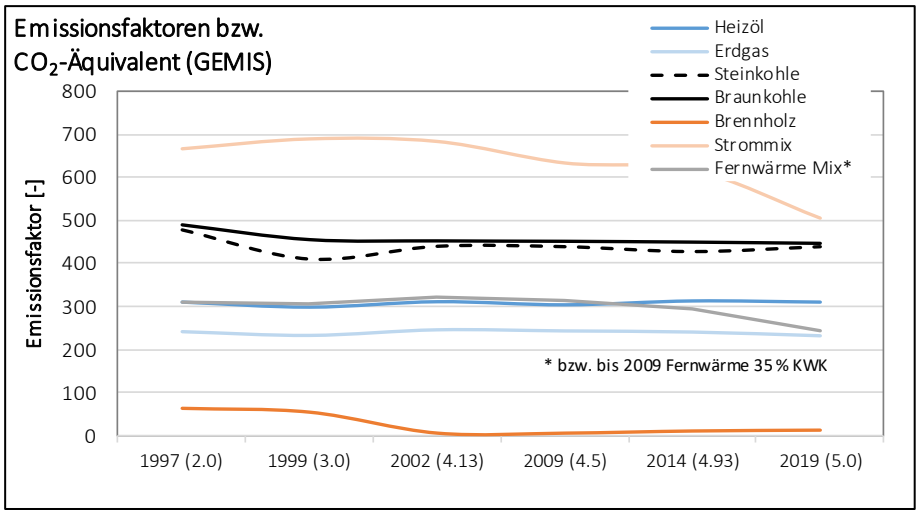


Abbildung 276 Emissionsfaktoren bzw. CO_2-Äquivalent aus Daten von „GEMIS“, eigene Darstellung nach [75] [76] [111]

Problematik: Allokation bei gekoppelten Prozessen

Das Problem der Allokation bei gekoppelten Prozessen – konkret Kraft-Wärme-Kopplung – ist identisch wie für die Primärenergiefaktoren in Anhang 5.5.2 beschrieben. Je nachdem, nach welcher der dort genannten Methoden die Emissionen entweder der Wärme oder dem Strom zugeordnet werden, variieren die Ergebnisse. Entsprechend schneidet entweder das eine oder andere Endprodukt überdurchschnittlich ab. Abbildung 277 verdeutlicht das Problem beispielhaft.

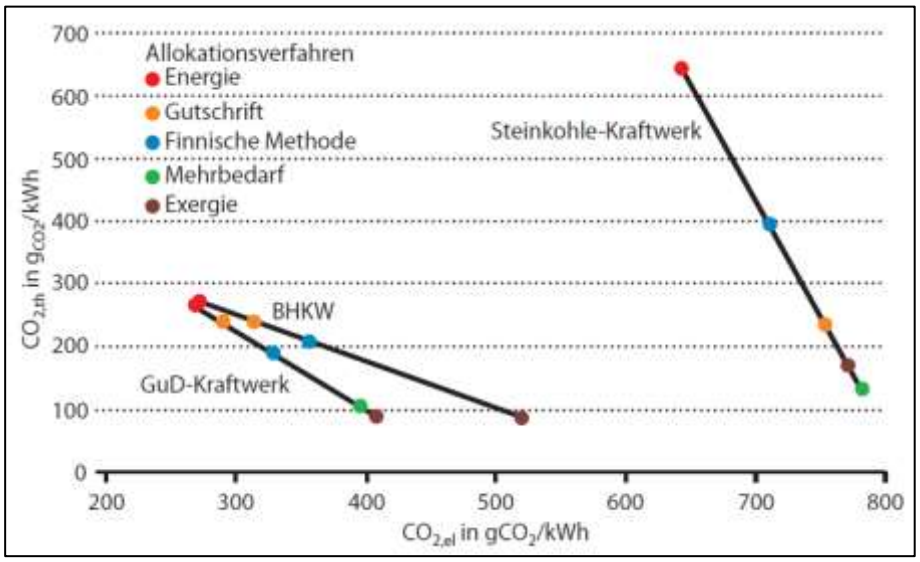


Abbildung 277 Beispielhafte Allokationen verschiedener KWK-Systeme, Grafik aus [116]

Heute typisch in der Bewertung für den Sektor der Gebäudebilanzen ist die Gutschriftmethode (orange in Abbildung 277). Unter Verwendung der „exergetischen Allokation“ liegt der Emissionsfaktor für Wärme bei etwa 230 bis 240 g/kWh. Die Fernwärme aus einem Steinkohlekraftwerk ist damit fast genauso gut als würde Erdgas zum Einsatz kommen. Strom aus diesem Kraftwerk schneidet entsprechend schlecht mit 750 g/kWh ab. Er ist deutlich schlechter als der Netzmix-Strom (verschlechtert also anteilig den Mix).

Insbesondere für Kohlekraftwerke liefert die Gutschriftmethode einen – nach Ansicht der Verfasser des vorliegenden Gutachtens – nicht gerechtfertigten Anreiz der Fernwärmenutzung. Sie halten die „energetische Allokation“ für die geeignetste Methode der Bewertung. Im Falle der GUD-Kraftwerke und der BHKW ergeben sich ähnliche Werte wie bei der Gutschriftmethode (siehe Abbildung 277); jedoch bei den Kohlekraftwerken entfällt das Anreizsystem des Fernwärmenetzausbaus.

Wenn möglich, sollte nach Ansicht der Gutachter überhaupt keine Allokationen vorgenommen werden, sondern eine Gesamtbilanz des Systems „Wärme + Strom“ erfolgen.

Mauch und Kollegen enden ihren Aufsatz zu der Thematik „Allokation“ treffend [302]:

> *„Laut VDI 4661 gibt es ‚keine Methode, die insgesamt, d. h. nach thermodynamischen, wirtschaftlichen und ökologischen Kriterien, gleichermaßen zwingend anzuwenden wäre‘ und somit existiert keine eindeutige naturwissenschaftlich richtige Lösung. Die verschiedenen Allokationsmethoden sind demnach für den jeweils betrachteten Fall und den daraus resultierenden Aussagen besser oder schlechter geeignet. Es ist somit Aufgabe des Autors, eine geeignete Methode auszuwählen, diese transparent darzustellen und zu begründen, warum die Methode für den betrachteten Anwendungsfall gewählt wurde.“*

Festlegung von Werten

Tabelle 160 legt die Werte für die Berechnung fest. Sie sind heiz- und brennwertbezogen angegeben, wobei im Rahmen des vorliegenden Gutachtens die brennwertbezogenen Werte zum Einsatz kommen. Zur Umrechnung zwischen beiden Größen wird auf die Erläuterungen im Anhang 5.4.1 verwiesen.

Energieträger		Emissionsfaktor bzw. CO_2-Äquivalent, in [g/kWh]	
		heizwertbezogen	brennwertbezogen
Fossile Brennstoffe	Erdgas	231	208
	Heizöl	310	292
	Steinkohle	438	429
	Braunkohle	446	421
Biogene Brennstoffe	Holz	16	15
Strom	allgemeiner Strommix	444	
Fernwärme	allgemeiner Fernwärmemix	243	
Umweltwärme, Solarthermie, Photovoltaik		0	

Tabelle 160 Emissionsfaktoren, eigene Zusammenstellung (unter Berücksichtigung von [111] [112] [113])

Der Wert für Strom ist eine Mittelwertbildung der beiden vom UBA 2020 [113] angegebenen Werte für die Jahre 2018 und 2019 (beide noch vorläufig). Der Wert ist konservativ gewählt, da der Wert für 2019 deutlich besser ist als für 2018.

Eine separate Betrachtung von Biogas entfällt, siehe Anhang 5.5.2. Die Bewertung der KWK erfolgt mit einer Gesamtbilanzierung von Wärme und Strom. Falls eine Allokation notwendig wird, greifen die Verfasser des vorliegenden Gutachtens auf die „energetische Bewertung“ zurück.

Abweichend zu den Annahmen des UBA [114] wird für die gebäudenahe oder gebäudeintegrierte Solarthermie sowie die Photovoltaik im Rahmen des vorliegenden Gutachtens kein Emissionsfaktor angenommen.

5.5.4 Äquivalenter CO_2-Preis

Im Rahmen der energetischen Bewertung von Gebäuden und zugehöriger betriebswirtschaftlicher Untersuchungen hat sich der „äquivalente Energiepreis $k_{äqu}$“ etabliert [78] [125] [126]. Er wird auch unter dem Begriff „spezifische Gestehungskosten“ der Sanierung geführt. Nach derselben Methodik lässt sich auch eine Emissionsbewertung durchführen.

Äquivalenter Energiepreis $k_{äqu}$

Der Wert gibt an, wie teuer es ist, eine Kilowattstunde (meist Endenergie) zu sparen; es handelt sich daher um die Kosten für die eingesparte Kilowattstunde (Einheit [€/kWh]).

Es werden vorab ein Betrachtungszeitraum und eine Basisvariante (bei der Modernisierung regulär der Zustand vor der Modernisierung) festgelegt. Ins Verhältnis gesetzt werden anschließend die jährlichen Mehrkosten aufgrund der Investition und ggf. Wartung einer Verbesserungsmaßnahme zu den jährlichen Energieeinsparungen, siehe Prinzipskizze in Abbildung 278. Das Ergebnis ist günstiger:

- je länger der Betrachtungszeitraum bzw. der Zeitraum, in welcher die Maßnahme wirkt, bis sie zu wiederholen ist (größere Beträge im Nenner),
- je geringer die zusätzlichen Investitionskosten für die energetische Verbesserung, d. h. je geringer die Investitionskosten der Verbesserungsmaßnahme und je höher die ohne fälligen Anteile an Instandhaltung des Bestandes (geringe Wert im Zähler).

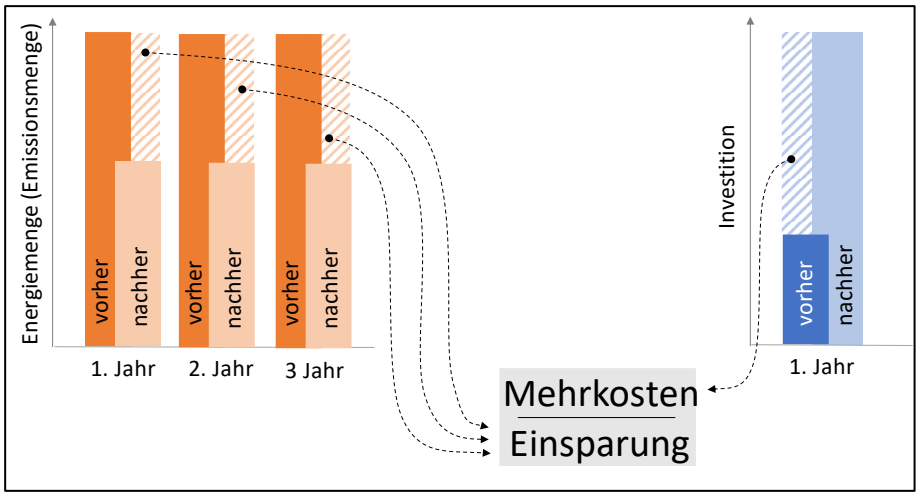


Abbildung 278 Prinzip des äquivalenten Energiepreises [eigene Darstellung]

Die Energiemengen können über den Zeitraum kumuliert werden (in Abbildung 278 beispielhaft über 3 Jahre) und die Kapitalkosten als Absolutwert incl. der Kapitaldienstleistung (Investitionssumme plus Zinsen im Gesamtzeitraum) eingesetzt werden. Alternativ wird zunächst ein typischer jährlicher Kapitaldienst (Tilgung und Zins für ein Jahr, anhand der Annuität berechnet) gebildet und die jährliche Energieeinsparung als Bezugsgröße gewählt. Das Ergebnis ist davon unberührt. Es ergibt sich ein Preis in „€/kWh“.

$$k_{äqu} = \frac{\Delta I \cdot a_{p,n}}{\Delta Q}; \quad k_{äqu} \leq k_{e,m}$$

Laufende Wartungskosten werden – sofern sich im Rahmen der Maßnahme Änderungen hieran ergeben – ebenfalls berücksichtigt (aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in Abbildung 278 dargestellt).

Die Einsparmaßnahme ist wirtschaftlich, wenn der sich ergebende äquivalente Energiepreis $k_{äqu}$ geringer ist als der mittlere künftige Energiepreis $k_{e,m}$ (die Kilowattstunde sparen ist preiswerter als sie zu verbrauchen). Das Verfahren eignet sich, um Maßnahmen miteinander zu vergleichen, ohne zunächst über die Steigerungsraten der Energiepreise selbst zu spekulieren.

Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens haben in früheren Veröffentlichungen [78] die eigenen Projekterfahrungen komprimiert zusammengefasst, siehe Tabelle 161. Als Betrachtungszeiträume für die Umrechnung der Investitionskosten in jährliche Kapitalkosten wurde die typische Nutzungsdauer der Komponente verwendet.

Maßnahme	Energieeinsparung [kWh/(m²a)]*	Investition [€/m²]*	äquivalenter Energiepreis [€/kWh]
Heizungsoptimierung nach baulicher Modernisierung	15...20	1...6	0,02...0,04
Dämmung Kellerdecke, Geschossdecke	50...100	50...150	0,02...0,12
Kesseltausch	20...120	20...80	0,02...0,20
Dämmung Dach, Außenwand	100...150	100...250	0,08...0,20
Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung	10...30	20...70	0,08...0,25
Fenstertausch	20...50	30...150	0,06...0,30
solare Trinkwassererwärmung	5...20	35...50	0,10...0,30
solare Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung	10...25	50...80	0,10...0,40
*Werte bezogen auf die beheizte Wohnfläche			

Tabelle 161 Typische äquivalente Energiepreise für Modernisierungen im Wohnbau, Stand 2015 [eigene Darstellung] nach [78]

Unwirtschaftliche Maßnahmen lassen sich durch folgende Maßnahmen verhindern:

- künstliche Erhöhung der mittleren Energiepreise $k_{e,m}$, mit denen verglichen wird (Besteuerung, zusätzliche Zertifikate o. ä.),
- Zuschüsse zur Investition ΔI, günstigere Zinsen und damit eine geringere Annuität $a_{p,n}$.

Der Faktor Zeit wird als gegeben angenommen. Auch wird vorausgesetzt, dass die erzielbare Einsparung ΔQ mit Hilfe von Qualitätssicherung optimiert wurde.

Äquivalenter CO_2-Preis

Der „äquivalente CO_2-Preis k_{CO2}" lässt sich unmittelbar aus den Überlegungen zum äquivalenten Energiepreis ableiten – daher gilt zur Darstellung der Zusammenhänge auch hier Abbildung 278. Für die zu bewertende Energieeinsparmaßnahme auf Mikro- oder Makroebene wird ermittelt, wie teuer ist es, eine Tonne CO_2 (bzw. korrekt CO_2-Äquivalent) zu vermeiden.

$$k_{CO2} = \frac{\Delta I \cdot a_{p,n}}{\Delta Q \cdot e_{CO2}} = \frac{k_{äqu}}{e_{CO2}}$$

Übertragen auf die vorherigen Überlegungen sind folgende Eingangsgrößen gegeben, wenn diese Größe im Rahmen eines Gebäudeenergiekonzeptes berechnet wird:

- Betrachtungszeitraum n [a] als Lebensdauer oder Nutzungsdauer der Einsparmaßnahme oder als frei definierter Wert (z. B. Zeitraum bis zur Erreichung eines bestimmten Klimaziels); findet sich indirekt in der Annuität wieder
- Höhe der zusätzlichen Investitionen, die nicht ohnehin zum Bestandserhalt angefallen wären bzw. die zu einer Emissionsminderung führen ΔI [€]
- Berücksichtigung der Kapitaldienstleistungskosten; üblicherweise werden Zinskosten und Tilgung gemeinschaftlich ausgedrückt durch die Annuität $a_{p,n}$ [1/a]
- ggf. Berücksichtigung geänderter Kosten für Wartung und Instandhaltung (evtl. berücksichtigt durch erhöhte oder verminderte Annuität in Form der auf die Investitionskosten bezogenen prozentualen Instandhaltungsraten)
- Höhe der erzielten jährlichen Einsparung an Endenergie ΔQ [kWh/a]
- Emissionsfaktor des oder der eingesetzten Energieträger e_{CO2} [g/kWh]

Die größte Schwierigkeit bei der Anwendung besteht in der Prognose von künftig veränderlichen Emissionsfaktoren, vor allem für Strom. Abhängig vom Zeitpunkt der Betrachtung ergeben sich unterschiedliche äquivalente Emissionspreise. Dies lässt sich nur durch eine Integration und Mittelwertbildung über zukünftige Zeiträume annähern. Es sind Annahmen zur zeitlichen Entwicklung der Emissionsfaktoren zugrunde zu legen.

Der äquivalente CO_2-Preis kann zur Sortierung von Einsparmaßnahmen hinsichtlich ihrer Umweltwirkung verwendet werden – günstigstes Verhältnis von Investition zu Emissionsminderung. Aufgrund der veränderlichen Herkunft von Energieträgern (Strom, Fernwärme) und damit zeitlich veränderlicher Emissionsfaktoren, ist die Bewertung in Abständen zeitlich zu wiederholen und anzupassen.

Aufgrund der Geschwindigkeit und der Nachlaufzeit, mit der jeweils deutschlandweite Energieverbrauchsdaten und somit auch aktualisierte Emissionsfaktoren verfügbar sind („GEMIS", AGEB), erscheint ein 3- bis 5-Jahresrhythmus sinnvoll.

Für die Maßnahmen ist im Nachgang zu prüfen, welche Förderung- und Forderungsmaßnahmen sich ableiten lassen. Sind die Maßnahmen gleichzeitig wirtschaftlich, können sie gesetzlich gefordert werden. Sind Fehlbeträge zur Wirtschaftlichkeit festzustellen, ergibt sich die Notwendigkeit eines finanziellen Ausgleichs, siehe „äquivalenter Energiepreis".

Der Kennwert ist auch in älteren Veröffentlichungen zu finden. Der BDI nutzt das Instrument in einer Studie von 2007 [268] zur als Sortierkriterium für Maßnahmen im Gebäudesektor. AGORA stellt in einer aktuellen Studie von 2019 auf Basis von äquivalenten CO_2-Preisen drei Kategorien von Potenzialen zusammen (wirtschaftliche Potenziale, marktnahe Potenziale, Innovationspotenziale) [303].

Preis der CO_2-Zertifikate in der Vergangenheit

Seit 2005 ist der Emissionshandel in der EU eingeführt. Er erfasst etwa 40 % der Gesamtemissionen (Energiewirtschaft, energieintensive Industrie und innereuropäischer Luftverkehr). Abbildung 279 zeigt den Zertifikatepreis von der Einführung bis Anfang 2020. Seit 2009 war ein Überschuss an Zertifikaten gegeben, was zu einem praktisch lenkungswirkungsfreien Preis von ca. 5 €/t führte. Grund war vor allem die Überschussmenge an im Umlauf befindlichen Zertifikaten, die weit größer als die zu deckenden Emissionen war [304]. Erst eine Reform des Emissionshandels im Jahr 2018 führte zu Preisen über 20 €/t.

Abbildung 279 Preis der europäischen CO_2-Zertifikate, Verlauf nach [305] geglättet

Preis der CO_2-Zertifikate in der Zukunft

Das Bundeskabinett hat im Mai 2020 eine Bepreisung von 25 €/t für das Jahr 2021 beschlossen. Ein Anstieg auf 55 €/t bis 2025 ist vorgesehen. Anschließend soll 2026 der Preiskorridor auf 55 bis 65 €/t angehoben werden. Erst nach der Einführungsphase, also frühestens ab 2027, müssen die Zertifikate per Auktion bei gleichzeitig begrenzter Menge ersteigert werden.

Damit liegen die Beschlüsse der Bundesregierung deutlich unter den Empfehlungen einerseits des DIW, andererseits des Sachverständigenrats für Wirtschaftsfragen (PIK/MCC), siehe Abbildung 280. Und sie kommen fast zwanzig Jahre später als die erstmaligen Diskussionen hierzu. AGORA forderte ebenfalls für das Jahr 2020 einen Einstiegswert von 50 €/t sowie ein jährliche Erhöhung von 10 bis 15 €/t, falls das Emissionsbudget nicht eingehalten wird [303].

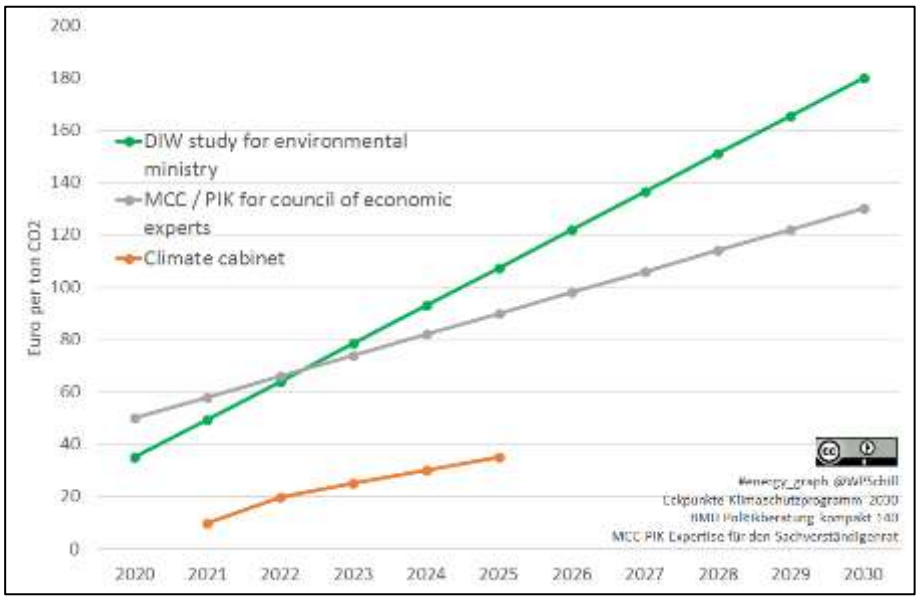


Abbildung 280 Vergleich verschiedener CO_2-Preise, Grafik aus [306]

5.6 Versorgungsstruktur und Wärmeerzeuger

Im Bestand sind etwa 20,7 Millionen Wärmeerzeuger in Gebäuden installiert [2]. Nachfolgend wird die Verteilung auf die einzelnen Erzeugerarten sowie die Ausstattung der Gebäude näher erläutert. Die Datenbasis dient der Festlegung von Typgebäuden und ist gleichermaßen Grundlage für Makroszenarien.

Ein vertiefender historischer Abriss zur Entwicklung der Versorgungsstrukturen in Deutschland, u. a. mit dem Blick auf den Ausbau der zentralen Infrastruktur an Gas- und Fernwärmenetzen, wurde komprimiert von Wagner et al. 2008 [307] im Zusammenhang mit einem Energiewendeprojekt gegeben.

5.6.1 Installierte Wärmeerzeuger

Im Bestand sind etwa 20,7 Millionen Wärmeerzeuger in Gebäuden installiert; diese Zahl hat sich in den letzten Jahren wenig geändert [2] [3] [4], allerdings hat sich die Zusammensetzung der Gesamtmenge in Richtung Brennwerttechnik verschoben, siehe Abbildung 281. Der Markt ist dennoch dominiert von fossilen Energieträgern.

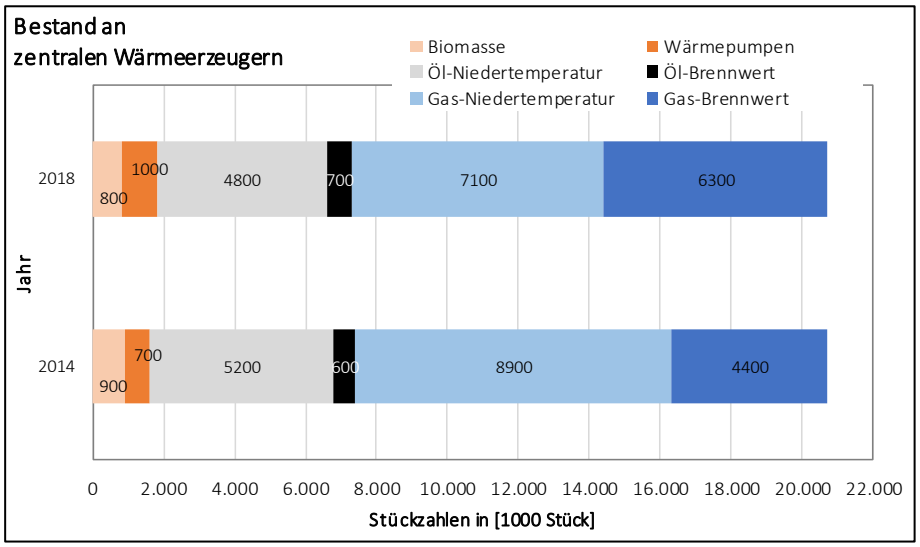


Abbildung 281 Gesamtbestand der Wärmeerzeuger, eigene Darstellung nach [2] [4]

Zum Vergleich werden die Zahlen einer früheren Prognosestudie – exemplarisch für viele frühere Studien – kommentiert. Die BDH/Shell-Studie aus dem Jahr 2013 [308] schätzte auf Basis von Zahlen der Jahre 2010/11, wie der Bestand im Jahr 2020 aussehen könnte. Die realen Zahlen von 2018 werden als Vergleichsbasis verwendet.

Die BDH/Shell-Studie lag in der Prognose der Wärmepumpenzahlen für 2020 leicht unter der tatsächlichen Entwicklung (geschätzt wurden 0,95 Mio. Stück). Bei Biomasseanlagen wurde von 0,98 Mio. Anlagen ausgegangen, der tatsächliche Wert ist erkennbar geringer (0,80 Mio.). Die Verschiebung zwischen Gas- und Ölkesseln wurde vorausgesagt, aber ebenfalls nicht so hoch eingeschätzt, wie sie sich tatsächlich ergeben hat.

Der Anteil von ca. 42 % Brennwertkesseln im Bereich der Gasgeräte wurde etwas unterschätzt; bereits mit den Daten von 2018 wurden real 47 % erreicht. Bei Heizöl ist es anders herum. Für das Jahr 2020 wurden 28 % Brennwertkessel prognostiziert, real sind es im Jahr 2018 nur etwa 12 %.

Absatzzahlen

Abbildung 282 zeigt die Absatzzahlen der zentralen Wärmeerzeuger (ohne Fernwärmeübergabestationen und Einzelheizungen). Es zeigt sich, dass in den letzten 10 Jahren die Gesamtabsatzzahl an Erzeugern gestiegen ist. Da das Neubaugeschehen insgesamt nur ein Bruchteil des Marktgeschehens ausmacht, kann von einer gestiegenen Sanierungsaktivität ausgegangen werden.

Die Hauswärme-Studie von Shell und BDH [308] unterscheidet zudem bei den Absatzzahlen der Gasgeräte in Wandgeräte (Thermen) und bodenstehende Kessel. Letztere machen zum Heizpunkt der Datenerhebung (Stand 2011) weniger als 10 % der Gesamtmenge abgesetzter Gasgeräte aus; bereits damals mit fallender Tendenz. Dieser Trend dürfte sich fortgesetzt haben.

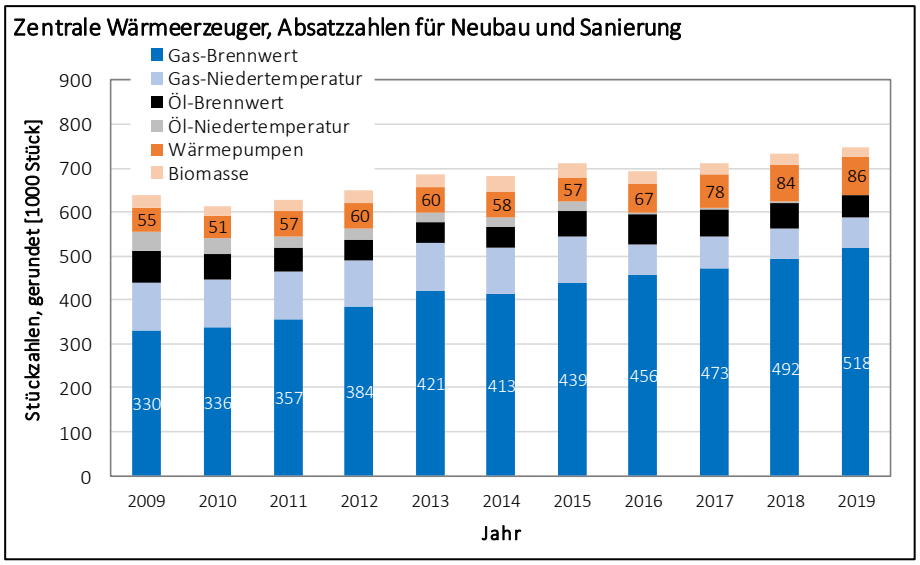


Abbildung 282 Absatzzahlen der zentralen Wärmeerzeuger, eigene Darstellung nach BDH [2]

Altersstruktur und Modernisierungsraten der Bestandserzeuger

Eine BDEW-Studie kommt [5] auf Basis der Zahlen bis zum Jahr 2018 zu einem mittleren Alter der Gebäudewärmeerzeuger von 17,0 Jahren. In Mehrfamilienhäusern liegt der Wert (17,8 Jahre) noch etwas über dem Wert für Einfamilienhäuser (16,3 Jahre).

Weitere Details zeigt Abbildung 283. Knapp 40 % aller Erzeuger sind älter als 20 Jahre, ein Viertel ist sogar älter als 25 Jahre. Fernwärmeanschlüsse in Gebäuden wurden dabei nicht erfasst; ebenso keine Einzelheizungen, wie Kachelöfen oder Elektrospeicherheizungen.

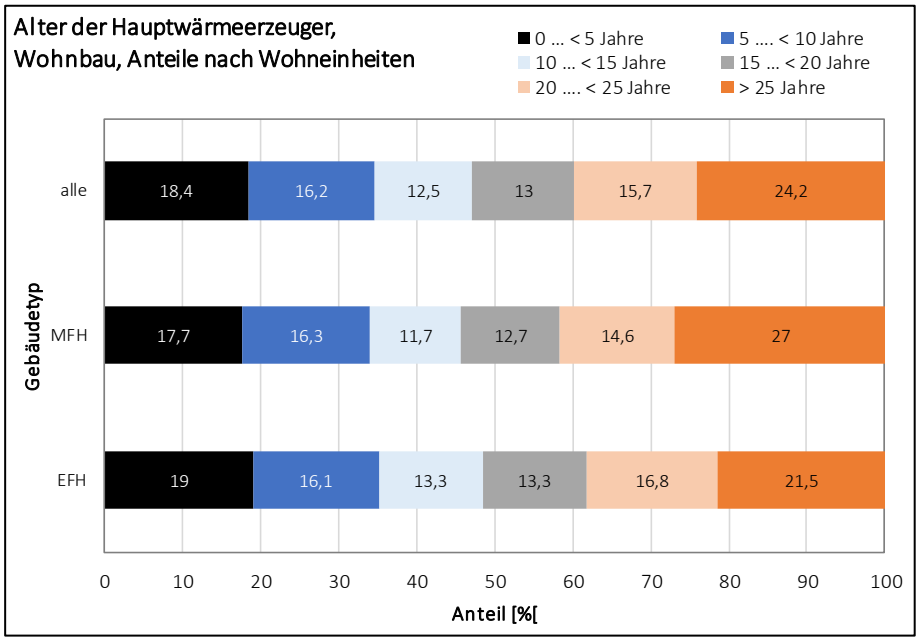


Abbildung 283 Altersstruktur der zentralen Erzeuger, eigene Darstellung nach BDEW [5]

Da die genannten Zahlen das Durchschnittsalter anzeigen, kann schnell abgeschätzt werden, dass das mittlere Alter der Heizung beim Austausch entsprechend hoch ist. Die Modernisierungsrate von Hauptwärmeerzeugern wird im Datenbasisprojekt des IWU [7] mit ca. 3 %/a festgestellt – das spricht für eine durchschnittliche Betriebsdauer von 33 Jahren. Der Wert deckt sich mit der Erkenntnis des BDEW.

Eine Differenzierung in Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Mehrfamilienhäuser liefert keine signifikanten Unterschiede (3,1 %/a bzw. 2,9 %/a). In Altbauten bis Baujahr 1978 liegt sie bei 3,3 %/a, in jüngeren Gebäuden bei 2,7 %/a [7].

Das Alter eines Wärmeerzeugers – und die damit einhergehende zu vermutende verminderte Effizienz – ist kein ausreichender Sanierungsanlass für Betreiber. Die „natürliche" Reproduktionsgeschwindigkeit wird nicht ausreichen, einen Systemwechsel bis 2030 zu bewirken. Ein Systemumbau bis 2050 wäre denkbar, wenn ab sofort alle Erzeuger in der Sanierung dem Wechselgedanken unterliegen und kein 1:1 Austausch mehr stattfinden würde.

Erzeuger bei der Bestandssanierung und Wechselraten

Der Energieträgerwechsel – zumeist im Rahmen einer ohnehin anstehenden Modernisierung – ist insgesamt nicht stark verbreitet. Die größten Änderungen ergeben sich durch Abwanderung von Heizöl zu Erdgas oder Fernwärme.

In einem Zeitraum von 2009 bis 2018 stellt die BDEW-Studie zum Heizungsmarkt [5] einen Gesamtanteil von 4,2 % aller Wohneinheiten fest, bei denen ein Energieträgerwechsel stattgefunden hat. Einen relevanten Teil aller Wechselaktivitäten zeigt Tabelle 162.

Umstellbewegungen von zentralen Erzeugern von 2009 bis ca. 2018; Angaben in [1000 Anlagen] und in [%] des Gesamtbestandes von 40,6 Mio. Wohnungen		Energieträger nach Wechsel		
		Erdgas	Fernwärme	Strom
Energieträger vor Wechsel	Erdgas		72 (0,2 %)	k. A.
	Heizöl	530 (1,3 %)	115 (0,3 %)	24 (0,06 %)
	Strom	117 (0,3 %)	k. A.	

Tabelle 162 Ausgewählte Wechselaktivitäten zentraler Heizwärmeerzeuger, eigene Darstellung nach BDEW [5]

Die Daten decken sich mit den Erkenntnissen aus der IWU-Studie zur Datenbasis für den Wohngebäudebestand [7]. Für die Bestandsgebäude und darin erfasste Wärmeerzeugermodernisierungen (im Zeitraum 2010 bis ca. Mitte 2016) ergibt die Erhebung:

- Erdgas- und Flüssiggasheizkessel: 65,2 % (55,4 %)
- Fernwärme: 5,5 % (1,4 %)
- Öl- und Kohleheizkessel: 18,1 % (30,2 %)
- Holz- und Biomassekessel: 7,2 % (2,5 %)
- strom- und gasbetriebene Wärmepumpe: 1,5 % (0,6 %)
- elektrische Direkt- oder Speicherheizung: 0,8 % (4,8 %)
- brennstoffbetriebene Öfen: 1,6 % (5,2 %)
- BHKW: 0,3 % (0,0 %)

Die in Klammern angegebenen Werte beziehen sich auf das System, welches vor der Modernisierung vorhanden war.

Ein Grund für die überschaubaren Wechselaktivitäten ist die Nutzerzufriedenheit, siehe Abbildung 284. Befragt wurde in der BDEW-Studie zum Heizungsmarkt [5] nach der Handhabung, dem Preisniveau, der langfristig gesicherten Energieversorgung, dem Sicherheitsstandard, der Modernität und Fortschrittlichkeit sowie der Umweltbelastung.

Ausgehend von der Einschätzung der Nutzer und deren Zufriedenheit mit dem Status Quo besteht kein Handlungsbedarf, den Energieträger oder das Heizungssystem zu wechseln.

Die grundsätzlichen Optionen zur weiteren Umstellung auf leitungsgebundene Energieträger schätzt der BDEW so ein [5]:

- 75 % aller Gebäude befinden sich in Gebieten mit verfügbarem Gasnetz; ca. 15 % der Gebäude sind jedoch nicht daran angeschlossen
- weitere etwa 9 % aller Gebäude befinden sich in Fernwärmegebieten und sind nicht daran angeschlossen
- von den etwa 5,8 Mio. Haushalten mit Heizölversorgung ließen sich 2,7 Mio. an Erdgas oder Fernwärme anschließen; entsprechend 3,1 Mio. nicht wegen nicht verfügbarer Netze.

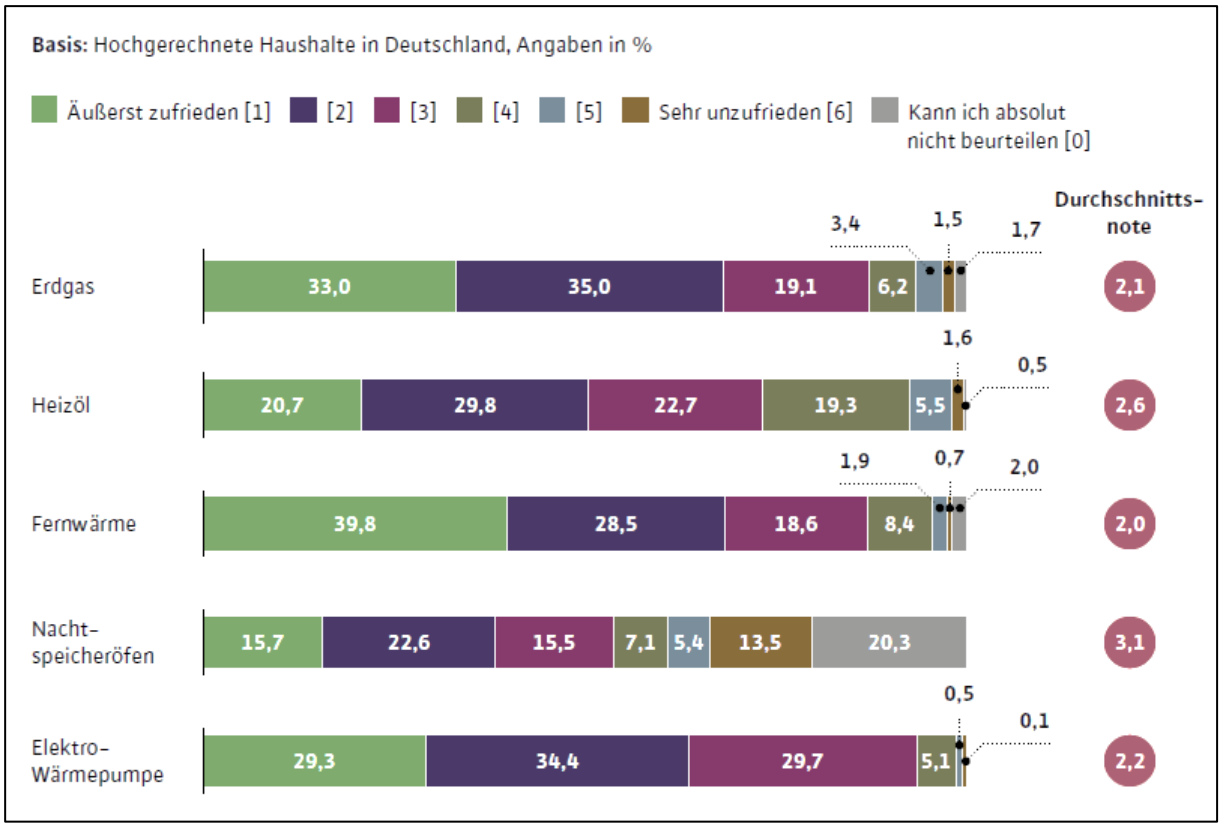


Abbildung 284 Nutzerzufriedenheit mit der vorhandenen Heizungsanlage, Grafik aus [5]

5.6.2 *Bestehende Versorgungsstruktur der Wohngebäude*

Die Beheizungsstruktur der Gebäude lässt sich über die Anzahl installierter Erzeuger darstellen. Alternativ werden versorgte Wohneinheiten, Wohngebäudestückzahlen oder Flächen als Basis verwendet. Bei der Wahl von Gebäuden oder Erzeugern (Stückzahlen) als Bezugsgröße sind Mehrfamilienhäuser optisch unterrepräsentiert. Daher ist die am weitesten verwendete Bezugsbasis die Wohneinheit, auch in Abbildung 285.

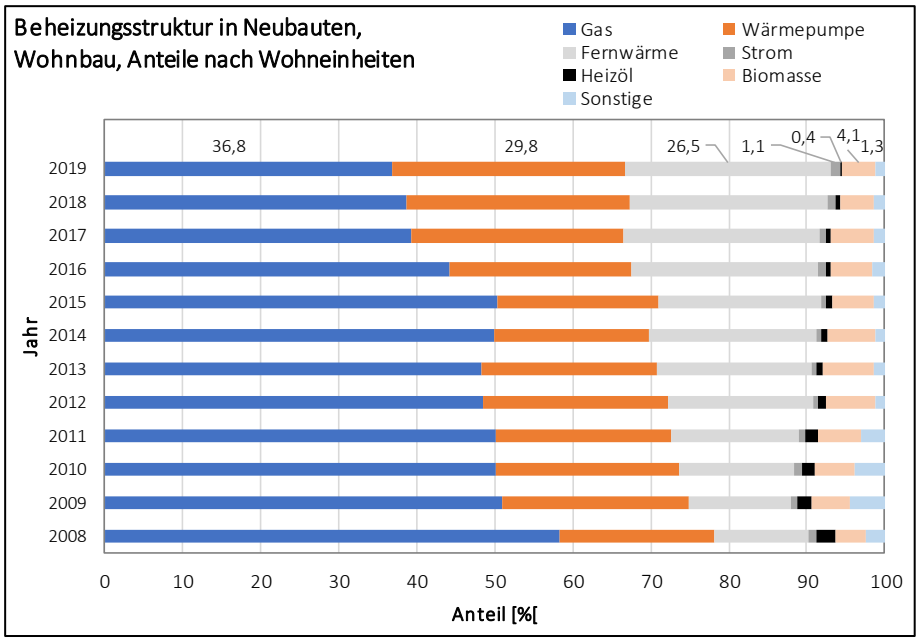


Abbildung 285 Beheizungsstruktur im Neubau nach Wohneinheiten, eigene Darstellung nach BDEW [54]

Die Grafik zeigt eine Verteilung der unterschiedlichen Energieträger im Neubau. Im Zeitverlauf der letzten 12 Jahre ist erkennbar, dass der Wärmepumpenanteil stetig zunimmt (in kleinen Gebäuden). Gleiches gilt für Fernwärme (in großen Gebäuden).

Die drei Energieträger Erdgas, Wärmepumpe und Fernwärme sind fast auf identischem Niveau angelangt. Erdgas büßt im Neubau zugunsten von Wärmpumpen und Fernwärme Marktanteile ein. Alle anderen Energieträger machen zusammen weniger als 10 % der Versorgungsstruktur aus.

Durch stetigen Neubau und auch Modernisierungsvorgänge ändert sich langfristig die Versorgungsstruktur des Gesamtbestandes, siehe Abbildung 286. Erdgas wächst seit Jahrzehnten, im Gesamtbestand vor allem durch Rückbau von Öl- und Stromheizung. Aufgrund des Neubaugeschehens ist ein Ende des Wachstums zu vermuten. Die Marktdurchdringung von Wärmepumpen ist jedoch immer noch äußerst gering. Der Biomasseanteil hält sich seit Jahren konstant um 6 %.

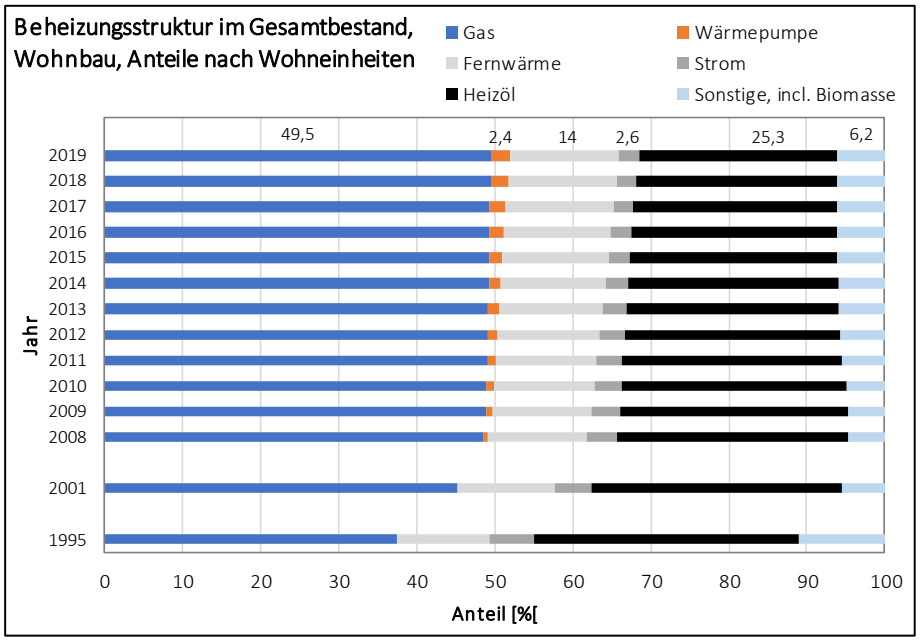


Abbildung 286 Beheizungsstruktur im Gesamtbestand nach Wohneinheiten, eigene Darstellung nach BDEW [54]

Verteilung nach energetischem Standard

Der DENA Gebäudereport 2016 enthält eine Untersuchung zur Verbreitung der Erzeuger in Gebäude mit unterschiedlichem Standard [24]. Erdgaskessel sind über alle Altersklassen ähnlich verbreitet (> 50 %), nur in Gebäuden mit sehr gutem Standard kommen sie weniger häufig vor. Heizölkessel sind häufiger in Gebäuden mit hohem Heizwärmebedarf zu finden; Nahe-null-Energiestandard versorgen sie zu weniger als 10 %. Bei Anwendungen mit Wärmepumpe ist der Trend umgekehrt; bei Biomasseerzeugern ebenso.

Regionale Unterschiede

Die Energieträgerverbreitung ist in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich. In den Stadtstaaten sowie den östlichen Bundesländern ist Fernwärme häufiger anzutreffen. Heizöl ist im Süden weiter verbreitet, Erdgas hat einen Schwerpunkt im Norden und Westen der Republik, siehe Abbildung 287.

Bei einer Makroanalyse werden diese regionalen Besonderheiten regulär nicht berücksichtigt. Auch die Verfasser des vorliegenden Gutachtens verzichten darauf.

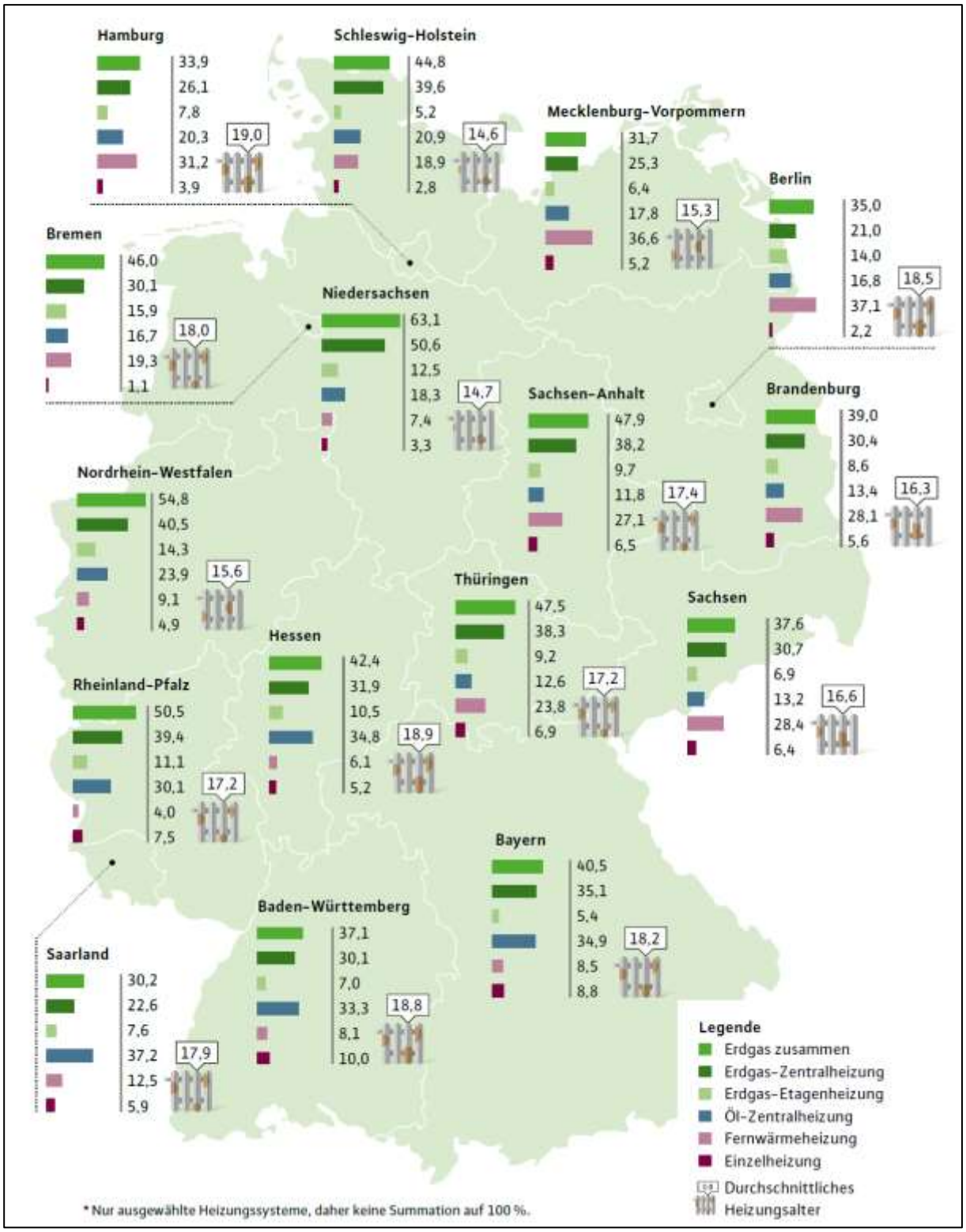


Abbildung 287 Regionale Verteilung der Versorgungssysteme, Grafik aus [5]

Verteilung nach Beheizungsart und Hauptenergieträger der Beheizung nach IWU

Eine detaillierte Analyse der verfügbaren Datengrundlage zur Versorgungsstruktur der Gebäude ist der Makrostudie von Jochum et al. enthalten [119]. Dazu wird verschiedene Primärliteratur querverglichen und Fehlerbandbreiten identifiziert. Für die Detailerkenntnisse wird auf den Bericht verwiesen.

In der Schlussfolgerung wird die Datenbasis aus der IWU-Grundlagenstudie zum Wohngebäudebestand aus dem Jahr 2016 [7] als plausibler und handhabbarer für Mikro- und Makrobetrachtungen eingeschätzt. Die Gutachter teilen diese Ansicht und greifen ebenfalls auf diese Daten zurück.

Auf die Angabe der Fehlerbandbreiten, wie sie im Bericht von Cischinsky und Diefenbach [7] enthalten sind, wird der Übersichtlichkeit halber verzichtet; gleiches gilt für die Darstellung der Regionalverteilung (Ost-, Nord/West-, Süddeutschland).

Tabelle 163 fasst die unterschiedlichen Arten der Beheizung, welche sich aufgrund der räumlichen Größe der Netze ergeben, zusammen. Die Block- und Zentralheizung dominiert. Ihr Anteil steigt mit sinkendem Baualter. Entsprechend sinken die Anteile von raumweiser Heizung.

Angaben in [%]	Bezugsmaß		Gebäudeart		Gebäudealter		
	Wohngebäude	Wohnungen	Ein-/Zweifamilienhäuser	Mehrfamilienhäuser	Altbauten bis Baujahr 1978	Baujahr 1979–2009	Neubauten ab Baujahr 2010
Fernwärme	6,4	16,6	3,9	18,6	6,7	5,9	7,1
Block- und Zentralheizung	82,7	70,5	86,7	63,0	79,0	87,9	89,8
Wohnungs-/Etagenheizung	5,7	8,0	4,0	14,1	6,9	4,2	1,7
Ofen-/Raumheizung	5,2	4,9	5,3	4,3	7,4	2,0	1,4

Tabelle 163 Verteilung unterschiedlicher Beheizungsarten im Wohnbau, eigene Darstellung nach IWU [7]

Tabelle 164 fasst die unterschiedlichen Arten der Energieträger zusammen, welche zur Beheizung und Trinkwarmwasserversorgung im Wohnbau zum Einsatz kommen. Fernwärme hat einen nennenswerten Einsatzbereich im Mehrfamilienhaus. Der Energieträger Strom kommt vor allem im Neubau zum Einsatz, Heizöl im Altbau.

Angaben in [%]	Bezugsmaß		Gebäudeart		Gebäudealter		
	Wohngebäude	Wohnungen	Ein-/Zweifamilienhäuser	Mehrfamilienhäuser	Altbauten bis Baujahr 1978	Baujahr 1979–2009	Neubauten ab Baujahr 2010
Fernwärme	6,4	16,6	3,9	18,6	6,7	5,9	7,1
Erdgas	52,5	51,2	51,6	56,7	49,9	57,6	42,9
Heizöl	27,5	21,5	29,5	17,4	31,2	23,8	0,8
Holz/Biomasse	5,3	3,8	6,0	2,2	5,8	4,4	7,2
Strom	6,4	5,5	6,9	3,9	4,7	5,8	41,0
Flüssiggas	1,6	1,1	1,8	0,9	1,1	2,4	1,1
Kohle	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,1	0,0

Tabelle 164 Verteilung unterschiedlicher Hauptenergieträger im Wohnbau, eigene Darstellung nach IWU [7]

Verteilung nach Hauptwärmeerzeuger nach IWU

Tabelle 165 splittet den Gesamtbestand an Erzeugern auf nach Art der Beheizungsart (Ausdehnung der Netzverbünde, von oben nach unten kleiner werdend), Wärmeerzeuger und zugehörigem Energieträger.

Die Daten der Mikrozensuserhebung 2018 des statistischen Bundesamtes sind nicht Bestandteil der „Datenerhebung zum Wohngebäudebestand 2016“ des IWU. Stichprobenhaft überprüfte Angaben stimmen hinreichend genau überein, jedoch könnten die beiden Datenquellen im Zuge künftiger Projekte zusammengeführt werden.

Die Erhebung 2018 liefert Erkenntnisse zur Art der Heizung (Fernheizung, Block-/Zentral-/Etagenheizung oder Einzelraumheizung) für folgende Untermengen des Wohnbaubestandes:

- Gebäude mit 1, 2 oder ≥ 3 Wohneinheiten sowie deren Summe
- 5 Baualtersklassen und im Durchschnitt
- 7 Größenkategorien von Wohneinheiten und im Durchschnitt
- Mietwohnungen, Eigentumswohnungen und deren Summe

Angaben in [%]			Bezugsmaß		Gebäudeart		Gebäudealter		
			Wohn-gebäude	Woh-nungen	Ein-/Zwei-familien-häuser	Mehrfami-lienhäuser	Altbauten bis Baujahr 1978	Baujahr 1979–2009	Neubauten ab Baujahr 2010
Fernwärme			6,4	16,6	3,9	18,6	6,7	5,9	7,1
Block- und Zentralheizung	Heizkessel (auch Therme)	Erdgas	46,7	43,0	47,6	42,3	42,7	53,7	41,3
		Heizöl	26,7	20,7	28,8	16,4	30,2	23,4	0,8
		Holz/Biomasse	4,2	3,1	4,6	2,0	4,2	3,9	6,6
		Flüssiggas	1,4	0,9	1,5	0,8	0,8	2,3	1,1
		Kohle	0,1	0,1	0,2	0,0	0,2	0,1	0,0
	Blockheizkraftwerk (Erdgas/Heizöl/Biomasse)		0,2	0,4	0,1	0,6	0,2	0,2	0,8
	Brennstoffbetriebene Wärmepumpe (Erdgas/Heizöl)		0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1
	elektrische Wärmepumpe		3,2	2,1	3,7	0,7	0,6	3,9	39
	direktelektrisch		0,2	0,1	0,2	0,0	0,1	0,3	0,0
Wohn./Etagen-heizung	Heizkessel (incl. Therme)	Erdgas	5,2	7,4	3,5	13,2	6,4	3,6	0,8
		Heizöl	0,3	0,4	0,2	0,6	0,3	0,3	0,0
		sonstige Brennstoffe	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,0
	elektrische Wärmepumpe und direktelektrisch		0,1	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,9
Ofen-/ Raumheizung	Öfen	Erdgas	0,4	0,4	0,3	0,6	0,6	0,1	0,0
		Heizöl	0,4	0,4	0,5	0,2	0,7	0,0	0,0
		Holz/Biomasse	1,1	0,6	1,3	0,1	1,6	0,2	0,4
		Flüssiggas	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0
		Kohle	0,2	0,2	0,1	0,4	0,3	0,0	0,0
	direktelektrisch (incl. Nachtspeicher)		3,0	3,3	3,0	3,0	4,0	1,6	1,0

Tabelle 165 Verteilung unterschiedlicher Wärmeerzeuger im Wohnbau 2016, eigene Darstellung nach IWU [7]

Damit ließe sich über die Datenlage des IWU hinaus noch eine mögliche unterschiedliche Verteilung von Technik in Eigentümer- und Mietwohnungen untersuchen. Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wird aus Zeitgründen darauf verzichtet. Stattdessen werden die IWU-Daten der Tabelle 165 weiter verdichtet und wie folgt zusammengefasst.

Adaption der Verteilung nach Hauptwärmeerzeuger für dieses Gutachten

Für das Gutachten werden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- zentrale Gaskessel sowie wohnungsweise Gasthermen werden zusammengefasst; dieser Rubrik werden auch die wenigen Erdgaseinzelöfen und Thermen mit anderen Brennstoffen zugeordnet
- die zentralen Ölkessel und wohnungsweisen Heizölthermen werden zusammengefasst; dieser Rubrik werden auch die wenigen Heizöl- und Flüssiggaseinzelöfen sowie die zentralen Flüssiggaskessel zugeordnet
- zentrale Holzkessel sowie dezentrale Holzöfen werden zusammengefasst; dieser Rubrik werden die wenigen zentralen kohlebetriebenen Kessel zugeordnet
- alle zentralen und dezentralen Stromdirektversorgungen werden zusammengefasst; dieser Rubrik werden auch die wenigen Kohleeinzelöfen zugeschlagen
- die geringe Menge gebäudezentraler BHKW werden der Fernwärme zugeschlagen
- alle Wärmepumpenvarianten werden zu einer Rubrik zusammengefasst

Danach erfolgt eine Aufteilung der Gas- und Ölkessel in die beiden Untergruppen: Brennwertkessel sowie Niedertemperaturkessel nach Zahlen des BDH [2]. Abschließend werden die Wärmepumpen in Erdreich- und Außenluftwärmepumpen aufgeteilt [4], wobei die Grundwasserwärmepumpen den Erdreichwärmepumpen zugeordnet werden.

Anschließend wird ausschließlich für die Wärmepumpen eine Fortschreibung der Marktdurchdringung angesetzt. Seit der Datenerhebung (mind. 5 Jahre) hat der Bestand an Wärmepumpe im Markt sich etwa um 60 % erhöht [2]. Es wird aus Gründen der Vereinfachung davon ausgegangen, dass entsprechend im Gegenzug sich der Anteil von Ölkesselt vermindert hat.

Es resultiert daraus eine für dieses Gutachten relevante Ausgangsverteilung der Erzeuger. Um Doppelungen zu vermeiden wird auf Anhang 3.1 verwiesen. Dort fassen Tabelle 37 die Daten für Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Tabelle 39 die Ansätze für Mehrfamilienhäuser zusammen.

5.6.3 Bestehende Versorgungsstruktur der Nichtwohngebäude

Mit der Typologisierung von Nichtwohnbauten und deren Versorgungsstrukturen befassen sich unter anderem Jochum et al. 2017 in ihrer Studie zum Anlagenpotential [119]. Auf Basis einer umfangreichen Recherche von Primärliteratur ergibt sich die Zusammensetzung in Abbildung 288. Es ist anzumerken, dass die Datenbasis insgesamt schlechter ist als im Wohnungsbau (weniger untersucht, teilweise veraltet).

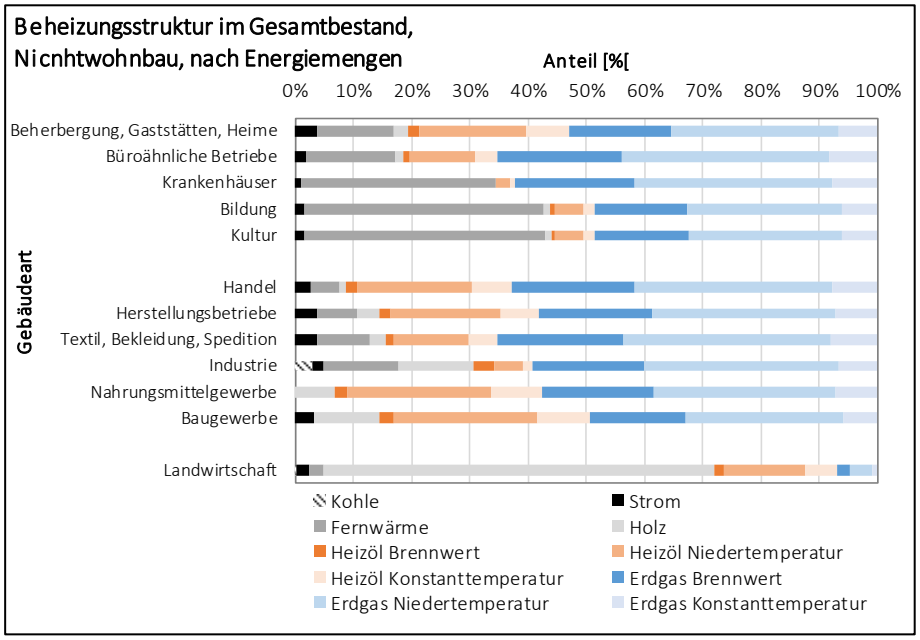


Abbildung 288 Versorgungssysteme im Nichtwohnbau, eigene Darstellung nach [119]

Für die Gebäude, die dem Dienstleistungssekttor zuzuordnen und gleichzeitig ähnliche Raumtemperaturen wie der Wohnungsbau aufweisen, ergibt sich folgendes Bild: der Anteil von Fernwärme ist höher als im durchschnittlichen Wohnbau und ähnelt eher dem von großen Mehrfamilienhäusern. Der Anteil von Heizöl und Erdgas ähnelt dem Wohnungsbau (außer Beherbergungsstätten, die überproportional viel Heizöl verbrauchen). Der Anteil von Strom und Holz ist vergleichbar.

Erkenntnisse aus dem Sektor der Bestandsmehrfamilienhäuser lassen sich mit einigermaßen Sicherheit auf den wohnähnlichen Nichtwohnbau (Bildung, Büro, Krankenhaus, Beherbergung) übertragen.

5.6.4 Details einzelner Erzeuger

Nachfolgend werden einzelne Erzeuger, die für den Umbau der Gebäudeversorgung relevant sind, näher beleuchtet.

Solarthermie

Die Gesamtfläche installierter Solarthermieanlagen betrug nach Erhebung des BDH etwa 20,5 Mio. m² in ca. 2,4 Mio. Anlagen [2]. Eine Zusammenstellung von Zubaumengen und dem sich ergebenden Gesamtbestand zeigt Abbildung 289. Es wird davon ausgegangen, dass ein Großteil dieser Anlagen (ca. 90 %) im Wohnungsbau installiert ist, während nur geringe Mengen in Nichtwohnbauten – Hotels, Schulen, Schwimmbäder usw. – zu finden sind.

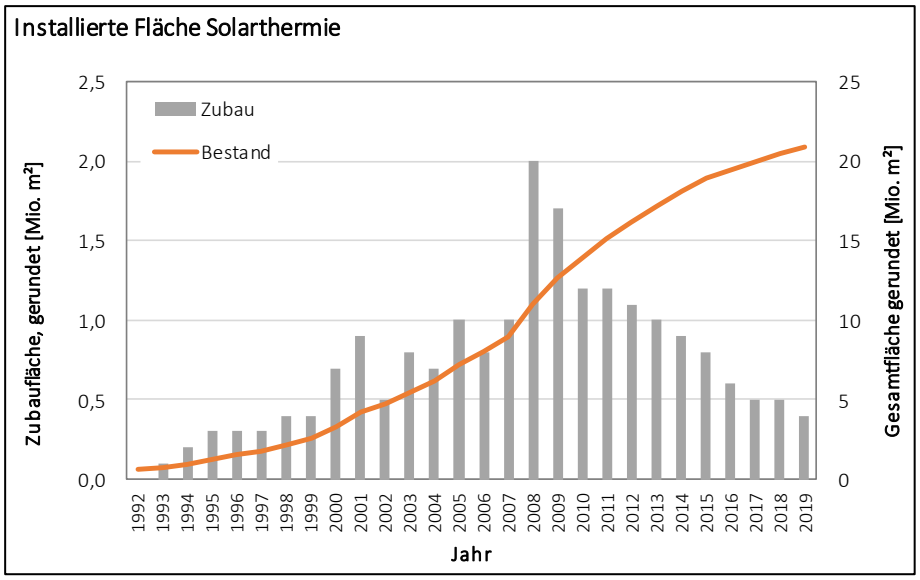


Abbildung 289 Solarthermieflächen – Zubau und Gesamtbestand, eigene Darstellung nach [309] [4]

Die Datenerhebung des IWU 2016 [7] zeigt, dass der jährliche Zubau über alle Gebäudearten und Altersklassen gemittelt bei etwa 0,9 %/a liegt. Im Jahr 2016 wiesen insgesamt etwa 14 % der Gebäude eine Solarthermieanlage auf. In Ein- und Zweifamilienhäusern ist der Anteil mit 16 % deutlich höher als in Mehrfamilienhäusern mit knapp 7 %. In Altbauten mit Baujahren bis 1978 liegen die Werte bei unterdurchschnittlichen knapp 12 %, im Neubau ab 2010 bei 40 %. Relativ gleich verteilt in allen Gebäudearten und Altersklassen sind die Anteile der Anlagen für reine Warmwasserbereitung (ca. 57 %) und Kombianlagen mit Heizungsunterstützung (43 %). In Süddeutschland ist die Durchdringung mit knapp 19 % höher als im Rest der Republik (10 bis 12 %).

Der Absatz von Solarthermieanlagen ist rückläufig. Der DENA Gebäudereport von 2019 stellt im Vergleich von 1999 und 2018 einen Rückgang neu installierter Anlagen um 73 % fest [3].

Der in der Heizwärmestudie von Shell und BDH im Jahr 2013 [308] prognostizierte Anstieg auf über 3 Millionen Anlagen mit ca. 27 Mio. m² Fläche bis 2020 ist nicht eingetreten. Er schrieb das Trendszenario fort, welches sich aus den Zahlen bis ca. 2009 ergeben hatte.

Die Ausstattung von Gebäuden mit Solarthermie ist seit 2008 stetig rückläufig. Im selben Zeitraum begann die erste Welle des Ausbaus von Photovoltaikanlagen. Trotz der PV-Flaute um 2015 hat es keinen erneuten Aufschwung der Solarthermie gegeben.

Plausibilisierung: mit den von IWU erfassten Durchdringung der Solarthermie in der Breite der Gebäude sowie der Annahme, dass 90 % aller Kollektorflächen im Wohnungsbau installiert sind, ergibt sich eine im Mittel installierte Kollektorfläche von 1,5 m²/P. Dies entspricht der üblichen Dimensionierung für Trinkwarmwasser. Die Datenbasis wird als in sich plausibel angesehen.

Photovoltaik

Abbildung 290 zeigt die installierte Photovoltaikleistung seit 2005. Nach einer großen förderbedingten Spitze um 2010 folgte ein Einbruch. Die zweite Installationswelle läuft seit 2015.

Die Datenerhebung des IWU 2016 [7] – am Ende der Talsohle auf Basis der Zahlen von 2010 bis 2016 – zeigt, dass der jährliche Zubau über alle Gebäudearten und Altersklassen gemittelt bei etwa 0,8 %/a liegt. Im Jahr 2016 wiesen insgesamt etwa 8 % der Gebäude eine Photovoltaikanlage auf. In Ein- und Zweifamilienhäusern ist der Anteil mit 9 % etwa doppelt so hoch wie in Mehrfamilienhäusern. In Altbauten mit Baujahren bis 1978 liegen die Werte bei unterdurchschnittlichen knapp 6 %, im Neubau ab 2010 bei mehr als dem Doppelten. In Süddeutschland ist die Durchdringung mit knapp 12 % höher als im Rest der Republik (3 bis 7 %).

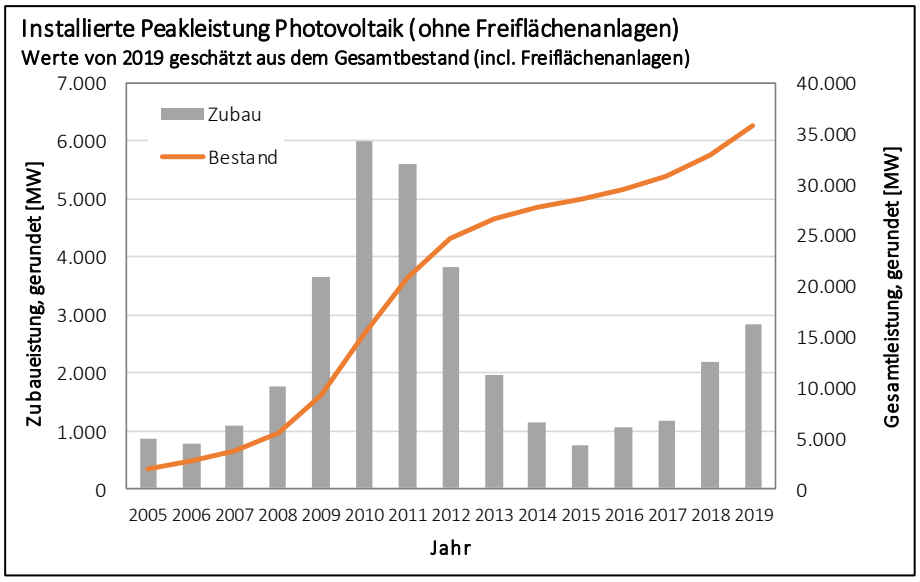


Abbildung 290 Photovoltaikleistung – Zubau und Gesamtbestand ohne Freiflächenanlagen, eigene Darstellung nach [285] [310]

Es ist bekannt, dass etwa ⅓ der installierten Leistung in Besitz von Privatpersonen ist [83]. Genaue Angaben zu den tatsächlich im Wohnungsbau installierten Anlagen sind nicht verfügbar. Jedoch wird hochgerechnet, dass insgesamt heute etwa 10 % aller verfügbaren Dachflächen von Wohn- und Nichtwohnbauten bereits mit PV belegt sind, während die Maximalbelegung etwa 36 % beträgt [310]. Die restlichen Flächen sind verschattet, weisen in ungünstige Himmelsrichtungen oder sind durch Einbauten belegt.

Plausibilisierung: die eigene Auswertung des Zahlenmaterials zeigt, dass von den betroffenen Wohnbauten etwa 27 % der Dachflächen belegt sind. Da die Zahl etwas unter der durchschnittlichen Maximalbelegung von 36 % liegt, werden die Werte als plausibel angesehen. Es kann davon ausgegangen werden, dass nicht immer alle Investoren das Ziel hatten, die verfügbare Dachfläche voll auszuschöpfen.

Ausgehend von den Werten des IWU für 2016 zum Durchdringungsgrad der Technik wird davon ausgegangen, dass nur etwa ein Drittel der Dachflächen-PV im Wohnbau installiert sind und entsprechend der Großteil auf Nichtwohnbaudächern (insbesondere landwirtschaftlicher Gebäude) zu finden ist. Die noch verfügbaren Dachflächenpotentiale können mit etwa 1.600 km² abgeschätzt werden, wobei etwa 850 km² davon in Wohnbauten liegen [310].

Lüftungsanlagen

Die Datenerhebung des IWU zum Zustand des Gebäudebestandes [7] liefert für den Zeitraum 2010 bis 2016 die Erkenntnis:

- 1,4 % aller Wohnbauten weisen eine Anlage ohne Wärmerückgewinnung auf (EZFH 0,9 %; MFH 4,2 %)
- 2,6 % aller Wohnbauten weisen eine Anlage mit Wärmerückgewinnung auf (EZFH 2,8 %; MFH 1,2 %)
- in Altbauten bis Baujahr 1978 liegt die Durchdringung bei 1,6 % (beide Anlagenarten zusammen)
- im Neubau mit Baujahren ab 2010 werden 30,4 % erreicht (mit WRG) bzw. 5,7 % (ohne WRG)

Wegen des großen Aufwandes der Nachrüstung dieser Technik im Bestand ist die Marktdurchdringung sehr gering. Keines der früheren Förderprogramme hat deutliche Änderungen bewirkt.

Wärmepumpen

Der Absatz von Wärmepumpen steigt. Unterdessen sind etwa 1 Million Stück im Einsatz [2]. Im Berichtszeitraum des 2. Monitoringberichtes zum EEWärmeG zeigt sich folgendes Bild [4]: im Zeitraum 2008 bis 2010 wurden gleich viele Sole- wie Außenluftwärmepumpen verkauft, danach verschoben sich die Absatzzahlen immer weiter in Richtung Luft als Wärmequelle. Bereits 2014 nutzte nur noch ⅓ der verkauften Geräte das Erdreich als Wärmequelle. Die Zahlen für 2019 zeigen mehr als 75 % außenluftbasierte Geräte. Insgesamt sind etwa 32 % aller installierten Geräte Erdreichwärmepumpen, 6 % Wasser-Wasser-Wärmepumpen und 62 % Außenluftwärmepumpen. Der Wärmepumpentrend geht in Richtung Außenluft als Wärmequelle.

Biomasse-Kessel

Von den etwa 900.000 Biomassekesseln, die im Jahr 2014 insgesamt installiert waren [2], waren etwa 40 % Pelletkessel und Pelletkaminöfen [4]. Im Gesamtbestand wurden damit etwa 20 % Pelletkessel erreicht; der Rest sind Holzvergaserkessel und Hackschnitzelkessel [308].

Fernwärme

Mit Datenstand 2018 veröffentlicht die AGFW in ihrem Hauptbericht [221] folgende Randdaten: 21.700 km Trassen sind verlegt. Der Zubau beträgt jährlich ca. 200 km seit dem Jahr 2000. Die Anschlussleistung liegt bei 51,5 GW. Dieser Wert ist seit 2000 leicht fallend, während die angeschlossenen Gebäude stückzahlenmäßig steigen.

Pro Hausstation ergibt sich im Jahr 2018 eine Anschlussleistung von 137 kW und eine Anschlussleitungslänge von 58 m. Die Netzverluste liegen bei etwa 13 % über alle Netze (der Mitglieder der AGFW).

Einzelöfen

Auf Basis der Verbändebefragung von 2007 (in Klammern Werte für 2002) zu den Beständen der Wohnungswirtschaft ergibt sich folgende Ausstattung mit Einzelöfen: 5 % (9,4 %) brennstoffbeschickte Ofenheizung, 2 % (2,5 %) Elektrospeicherheizung [144]. Der Anteil ist – auch aufgrund der zwischenzeitlich für Elektrospeicherheizung nach EnEV geltenden Austauschpflicht heute deutlich geringer anzunehmen.

5.7 Typologie

Das Mengengerüst einer Typologie dient in einer Modellierung (Buttom-Up-Modell) dazu, den Gesamtenergieverbrauch, die Gesamtemissionen usw. des Sektors „Gebäude“ nachzubilden. Dazu werden typische Vertreter von Gebäuden stellvertretend bilanziert und anschließend mit einer Stückzahl ähnlicher Objekte hochgerechnet.

Die Festlegung „des Typischen“ orientiert sich an einschneidenden Änderungen des Baugeschehens, siehe Tabelle 166 und Tabelle 167. Die Angaben von Zeitpunkten für die Einführung von technischen Produkten in den Massenmarkt (Tabelle 166) sind als Anhaltswerte zu verstehen. Insbesondere bei technischen Lösungen sind oft mehrere Jahre bis zu einer erkennbaren Marktdurchdringung festzustellen.

Jahr	Änderung im Massenmarkt
ca. 1980	Niedertemperaturkessel
ca. 1980	Kompaktleuchtstofflampen
ca. 1980	1. Generation Wärmepumpen (nach der Ölkrise)
ca. 1985	Solarthermie
ca. 1990	Gas-Brennwerttechnik
ca.1995	Öl-Brennwerttechnik
ca.1995	Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (im Wohnbau)
ca.1995	Zweischeibenwärmeschutzverglasung
ca.1995	Wärmedämmung von Rohrleitungen im unbeheizten Bereich mit ca. 100 %
ca. 2000	Photovoltaik
ca. 2002	2. Generation Wärmepumpen (zusammen mit der EnEV)
ca. 2002	Holzpelletkessel (zusammen mit der EnEV)
ca. 2005	Hocheffizienzpumpen
ca. 2005	Mikro-KWK
ca. 2010	LED-Technologie
ca. 2010	Dreischeibenwärmeschutzverglasung

Tabelle 166 Geschichtlich und verordnungsrechtlich bedingte Änderungen des Technikstandards [eigene Darstellung] nach [78]

Auch ordnungsrechtliche Änderungen (Tabelle 167) – z. B. das Inkrafttreten von Wärmeschutzverordnungen – wirken frühestens nach ein bis zwei Jahren im Markt, wegen des Abstandes zwischen Bauantrag und Baufertigstellung. Wobei auch immer in kleinerer Anzahl Projekte das gerade gesetzlich geltende Niveau unterschreiten (regulär ausgelöst durch Fördermittel). Es kann davon ausgegangen werden, dass damit zumindest in Teilen eine Verwischung der energetischen Standards zwischen den Baualtersklassen einhergeht.

Jahr	Grund
1918	Nachkriegswiederaufbau, Bauordnung von 1918
1946	Nachkriegswiederaufbau
1952	Mindestwärmeschutz DIN 4108 (in der BRD)
1958	Mindestwärmeschutz DIN 4108 (in der BRD)
1965	TGL 10686/3 (in der ehemaligen DDR)
1968	Mindestwärmeschutz DIN 4108 (in der BRD)
1979	1. Wärmeschutzverordnung (in der BRD)
1981	TGL 35424/03 (in der ehemaligen DDR)
1984	Novellierung Wärmeschutzverordnung (in der BRD)
1995	Novellierung Wärmeschutzverordnung
2002	1. Energieeinsparverordnung
2009	Novellierung Energieeinsparverordnung
2016	Novellierung Energieeinsparverordnung

Tabelle 167 Geschichtlich und verordnungsrechtlich bedingte Änderungen des Baustandards [eigene Darstellung] nach [78]

Bei der Typologisierung von Gebäuden, z. B. durch das Institut Wohnen und Umwelt in Darmstadt wird auf die sich ergebenden Baualtersklassen Rücksicht genommen. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens schließen sich dieser Auffassung an.

5.7.1 Gebäudetypologie Wohnbau

Als Datengrundlage für die Wohnbaubewertung dienen im Wesentlichen zwei Datenquellen: die Datenerhebungen von IWU und ARGE.

Das IWU verfeinerte über Jahrzehnte die theoretische Datenbasis zu „Typgebäuden“ als Mengengerüst (typische Wohnflächen, Hüllflächen, Eigenschaften der Gebäudehülle, Ausstattung mit technischen Anlagen) – also Eigenschaften, auf deren Basis eine Bedarfsenergiebilanz der Typgebäude erfolgen kann. Anhand von Häufigkeitsverteilungen verschiedener Merkmale (Sanierungsgrad der Hülle, Ausstattung mit Wärmeerzeugern usw.) ergibt sich eine große Kombinatorik von berechneten Energiemengen der Einzelgebäude. Letztlich werden zum Hochrechnen die statistisch erfassten Gesamtwohnflächen bzw. Gebäude- und Wohneinheitenzahlen benötigt. Es resultiert eine theoretisch berechnete Gesamtenergiemenge für den gesamten deutschen Wohngebäudebestand. Die Problematik, dass berechneter Bedarf und gemessener Verbrauch von Gebäuden nicht zwangsläufig identisch sind (vgl. Anhang 5.2), ist dabei bekannt und erkannt, jedoch noch nicht gelöst.

Die ARGE-Datenerhebung von Walberg et al. geht daher den umgekehrten Weg: unabhängig von einzelnen Gebäudehüllflächen, einzelnen Wärmedurchgangskoeffizienten der Hülle und verschiedenen Erzeugern wird in der Statistik der tatsächliche Verbrauch von Gebäuden erhoben. Durch identische Typologisierung wie das IWU liegen somit zusätzlich die tatsächlichen mittleren Verbräuche vor. Damit kann eine direkte Validierung der theoretischen Annahmen erfolgen.

Zumindest im statistischen Mittel und mit den üblichen Unsicherheiten sollten die vom IWU erfassten Randdaten in einer Bedarfsenergiebilanz zu den von ARGE erfassten Verbräuchen passen. Die Gutachter sehen aus Erfahrung mit Projekten (z. B. [26]) eine Annäherung auf ± 10 % als realistisch an.

Typologien des IWU

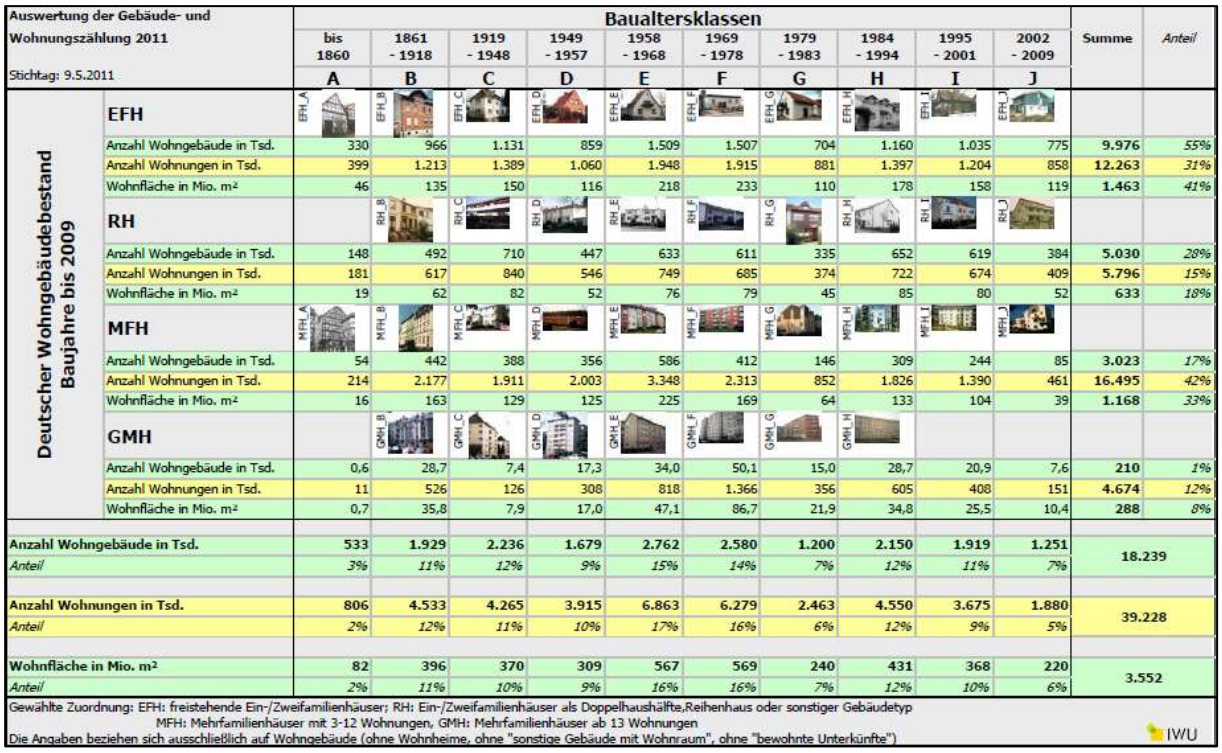
Das IWU typologisiert seit 1990 den Gebäudebestand nach Gebäudegrößen und Baualtersklassen [102]. Mit dem „Tabula-Projekt Gebäudetypologie Deutschland“ von 2015 sowie der „Datenerhebung Wohngebäudebestand“ von 2016 liegen die aktuellsten Datensätze vor. Dabei widmet sich die Typologie schwerpunktmäßig dem Mengengerüst (Stückzahlen, Flächen) und die Datenerhebung dem Zustand (Sanierungsgrad, Vorhandensein bestimmter Erzeuger, Lüftungsanlagen, PV, Solarthermie usw.)

Die Typologie unterscheidet in 12 Baualtersklassen und regulär in 4 Größenklassen („Basis-Typen“), siehe Abbildung 291. Darüber hinaus gibt es Sonderfälle in der Größe (Hochhäuser) und Bauart (Fertighäuser, Plattenbauten der ehemaligen DDR). Für alle Gebäudetypen sind häufig vorkommende Baukonstruktionen und Geschossigkeiten dokumentiert. Die Wahrscheinlichkeit einer Unterkellerung ist ebenfalls protokolliert wie die direkte Nachbarbebauung und das Vorhandensein von Gauben.

Darüber hinaus sind Beispielgebäude (quantitativ) beschrieben: mit Nettogrundfläche, beheizter Wohnfläche, Gebäudenutzfläche nach EnEV, Kompaktheit und der Summe aller thermisch relevanten Hüllflächen. Für drei Wärmeschutzniveaus sind U-Werte gegeben.

Abbildung 291 Gebäudetypologie mit Basistypen und Sonderfällen nach „Tabula“ 2015, Grafik aus [102]

Im Abgleich mit den Erhebungen des statistischen Bundesamtes erfolgt eine Quantifizierung, welcher Typ wie häufig vorkommt. Die „Tabula“-Daten von 2015 beziehen sich dabei auf die Zensuserhebung von 2011. Es ergibt sich das Mengengerüst in Abbildung 292.



Auswertung der Gebäude- und Wohnungszählung 2011		Baualtersklassen										Summe	Anteil
Stichtag: 9.5.2011		bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2009		
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
Deutscher Wohngebäudebestand Baujahre bis 2009	**EFH**												
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	330	966	1.131	859	1.509	1.507	704	1.160	1.035	775	**9.976**	*55%*
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	399	1.213	1.389	1.060	1.948	1.915	881	1.397	1.204	858	**12.263**	*31%*
	Wohnfläche in Mio. m²	46	135	150	116	218	233	110	178	158	119	**1.463**	*41%*
	RH												
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	148	492	710	447	633	611	335	652	619	384	**5.030**	*28%*
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	181	617	840	546	749	685	374	722	674	409	**5.796**	*15%*
	Wohnfläche in Mio. m²	19	62	82	52	76	79	45	85	80	52	**633**	*18%*
	MFH												
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	54	442	388	356	586	412	146	309	244	85	**3.023**	*17%*
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	214	2.177	1.911	2.003	3.348	2.313	852	1.826	1.390	461	**16.495**	*42%*
	Wohnfläche in Mio. m²	16	163	129	125	225	169	64	133	104	39	**1.168**	*33%*
	GMH												
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	0,6	28,7	7,4	17,3	34,0	50,1	15,0	28,7	20,9	7,6	**210**	*1%*
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	11	526	126	308	818	1.366	356	605	408	151	**4.674**	*12%*
	Wohnfläche in Mio. m²	0,7	35,8	7,9	17,0	47,1	86,7	21,9	34,8	25,5	10,4	**288**	*8%*
Anzahl Wohngebäude in Tsd.		**533**	**1.929**	**2.236**	**1.679**	**2.762**	**2.580**	**1.200**	**2.150**	**1.919**	**1.251**	**18.239**	
Anteil		*3%*	*11%*	*12%*	*9%*	*15%*	*14%*	*7%*	*12%*	*11%*	*7%*		
Anzahl Wohnungen in Tsd.		**806**	**4.533**	**4.265**	**3.915**	**6.863**	**6.279**	**2.463**	**4.550**	**3.675**	**1.880**	**39.228**	
Anteil		*2%*	*12%*	*11%*	*10%*	*17%*	*16%*	*6%*	*12%*	*9%*	*5%*		
Wohnfläche in Mio. m²		**82**	**396**	**370**	**309**	**567**	**569**	**240**	**431**	**368**	**220**	**3.552**	
Anteil		*2%*	*11%*	*10%*	*9%*	*16%*	*16%*	*7%*	*12%*	*10%*	*6%*		

Gewählte Zuordnung: EFH: freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser; RH: Ein-/Zweifamilienhäuser als Doppelhaushälfte,Reihenhaus oder sonstiger Gebäudetyp
MFH: Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen, GMH: Mehrfamilienhäuser ab 13 Wohnungen
Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf Wohngebäude (ohne Wohnheime, ohne "sonstige Gebäude mit Wohnraum", ohne "bewohnte Unterkünfte")

IWU

Abbildung 292 Mengengerüst für die Basistypen nach „Tabula" 2015, Grafik aus [102]

Bürger et al. [252] haben 2016 für ihre Makrostudie die bestehende Gebäudetypologie des IWU (Stand 2010 [6]) ebenfalls mit den Zensusdaten (Stand 2011) harmonisiert. Ziel waren Typengruppen des IWU, die in der Quersumme dem Mikrozensus entsprachen. Es ergeben sich marginal abweichende Ergebnisse. Sie stellten dabei fest, dass sowohl bei den Einteilungen in Baualtersklassen (IWU 12 Klassen, Zensus: 10 Klassen), als auch bei den Gebäudetypen (EFH, Reihenhaus usw.) andere Teilungs- und Zusammenfassungslogiken gegeben waren [252]:

> *„Vor allem die Anpassung der Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH, ZFH) ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden, da der Zensus bei Gebäuden mit einer Wohneinheit und bei Gebäuden mit zwei Wohneinheiten zwischen freistehenden Gebäuden, Doppelhaushälften, gereihten Häusern und sonstigen Gebäuden unterscheidet. Die IWU-Gebäudetypologie unterscheidet hingegen nur zwischen Einfamilienhäusern (nicht-gereihte Häuser mit ein oder zwei Wohneinheiten) und Reihenhäusern (RH)."*

Theoretisch könnte die angewandte Logik auch verwendet werden, um die aktuellste Typologie des IWU von 2015 [102] mit den neuen Mikrozensusdaten von 2018 [101] zu harmonisieren. Im Rahmen dieses Gutachtens wird aus Zeitgründen darauf verzichten, zumal die Änderungen an der Datenlage nicht groß sind.

Für künftige Mikrozensuserhebungen wäre aus Sicht der Bau- und Energieforschung zumindest eine Erfassung der Baualtersklassen nach den typischen energetischen Teilungsmerkmalen des IWU vorzunehmen (andere Gruppenbildung als heute). Alternativ könnte die Auswertung des statistischen Bundesamtes in Jahresscheiben erfolgen, die im Nachgang eine beliebige Zusammenfassung zu Baualtersklassen ermöglicht.

In der IWU-Studie zum „Zielerreichungsszenario" von 2013 [62] wird auf die Daten des Projektes „Tabula" zurückgegriffen. Wobei der Bestand durch Datenkomprimierung mit Hilfe von nur 6 Gebäuden abgebildet wird: 3 Altersklassen sowie jeweils ein Ein-/Zweifamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus, siehe Tabelle 168. Gleichermaßen wird auch in der gemeinsamen Studie von IWU, Hochschule Darmstadt und BET 2019 vorgegangen [57]; allerdings werden aus den Gesamtwärmebedarfen der Gebäude dabei nachträglich Lastverläufe abgeleitet.

Dieser Vorgehensweise folgen die Verfasser des vorliegenden Gutachtens und verwenden die in Tabelle 168 genannten Daten (abgeleiteter Mittelwert) für die eigenen Berechnungen, nach entsprechender Anpassung an neuere Erhebungen des statistischen Bundesamtes.

		Altersklasse bis 1978	Altersklasse 1979 - 1994	Altersklasse 1995 - 2009	Mittelwert
		EZFH I	EZFH II	EZFH III	EZFH
Gesamtfläche	[m²]	1.285.000.000	372.000.000	365.000.000	2.022.000.000
Wohneinheiten	[WE]	12.450.000	3.160.000	2.980.000	18.590.000
Stückzahl	[G]	9.610.000	2.710.000	2.670.000	14.990.000
Wohnfläche	[m²/G]	134	137	137	134,9
Wohneinheiten	[WE/G]	1,3	1,2	1,1	1,2
Wand	[m²/G]	144	135	122	138,5
Dach/O. Geschossdecke	[m²/G]	105	110	89	103,1
Boden/Kellerdecke	[m²/G]	87	90	70	84,5
Fenster	[m²/G]	27	30	25	27,2
		MFH I	MFH II	MFH III	MFH
Gesamtfläche	[m²]	965.000.000	268.000.000	160.000.000	1.393.000.000
Wohneinheiten	[WE]	14.820.000	3.910.000	2.110.000	20.840.000
Stückzahl	[G]	2.340.000	440.000	270.000	3.050.000
Wohnfläche	[m²/G]	412	609	593	456,7
Wohneinheiten	[WE/G]	6,3	8,9	7,8	6,83
Wand	[m²/G]	303	466	386	333,9
Dach/O. Geschossdecke	[m²/G]	173	303	298	202,8
Boden/Kellerdecke	[m²/G]	152	271	225	175,6
Fenster	[m²/G]	81	142	125	93,7

Tabelle 168 Typgebäude und deren Häufigkeit, eigene Darstellung nach IWU [62] sowie Mittelwertbildung [eigene Darstellung]

Da die Typologien des IWU die umfassendste Datenbasis bilden, basieren auch andere Datenmodelle darauf. Teilweise wird das Datengerüst dabei zusätzlich ergänzt oder weiter verdichtet, um die Zahl der Rechenschritte zu verringern. Drei Beispiele seien hier genannt:

- Mahler et al. nutzen in ihrer Studie für das UBA für den Bestand je zwei EFH sowie zwei MFH aus der IWU-Typologie, welche etwa 20 % des Gesamtbestandes ausmachen [173]; es erfolgt aus den Erkenntnissen dieser 4 Typgebäude eine Hochrechnung auf den Gesamtbestand.
- Ebert befasst sich ausschließlich mit Mehrfamilienhäusern [311]; aus Gründen der Vereinfachung (und Minimierung der Datenmasse) verdichtet er die 10 „Tabula"-Gebäude des IWU zu 4 repräsentativen Baualtersklassen.
- ECOFYS greift bei der Untersuchung des Gesamtbestandes 2014 ebenfalls auf die Zustandsuntersuchung des IWU zurück [124]; allerdings werden die Daten zu 4 Gebäudetypen (im Wohnbau) mit jeweils 5 Altersklassen gruppiert; ein Abgleich mit der AGEB Energiebilanz erfolgt.

Die Studien von IFEU oder unter der Beteiligung des IFEU verwenden in der Regel das Mengengerüst „GEMOD", welches wie folgt beschrieben ist [127]:

> *„Der deutsche Gebäudebestand wird in GEMOD mit Hilfe von 234 Gebäudetypen abgebildet. Diese gliedern sich in vier Wohngebäude- und 14 Nichtwohngebäudearten, die wiederum nach insgesamt 13 Baualtersklassen unterschieden werden. Die Einteilung der Wohngebäude basiert in weiten Teilen auf der Gebäudetypologie des IWU […] Die Baualtersklassen sind nach typischen Baukonstruktionen bzw. dem Inkrafttreten relevanter Verordnungen eingeteilt. Zusätzlich wurden drei weitere Baualtersklassen angelegt, um künftige Gebäudestandards abbilden zu können. Das Startjahr des Modells ist 2011. Alle relevanten Eingangsdaten sind auf dieses Jahr bezogen. Die Gesamtanzahl der Gebäude ist mit statistischen Daten und aktuellen Studien abgeglichen […]"*

Typologien der ARGE

Walberg et al. [8] entwickeln 2011 eine Klassifizierung des Verbrauchs von Gebäuden. Basis ist die Typologie des IWU (Stand 2003), vervollständigt unter anderem anhand von Zensusdaten (Stand 2008). Sie teilen in 9 Altersklassen und in EZFH sowie kleine MFH, siehe Tabelle 169. Der Verbrauch ist heizwertbezogen.

Anhand mehrerer 10.000 Gebäudedatensätze konnte anschließend ein typischer Verbrauch bestimmt werden. Dabei wurde in 3 unterschiedliche Ausgangsmodernisierungszustände unterstellt (nicht, gering, größtenteils modernisiert).

	Baualters-klasse	Zahl	ohne Maßnahmen		gering modernisiert		mittel/voll modernisiert	
		[G]	Anteil	Verbrauch	Anteil	Verbrauch	Anteil	Verbrauch
			[%]	[kWh/(m²a)]	[%]	[kWh/(m²a)]	[%]	[kWh/(m²a)]
EZFH	vor 1918	2200656	3	226	64	197	33	167
	1918-1948	2045435	2	238	67	209	31	175
	1949-1957	1476720	3	235	73	210	24	175
	1958-1968	2357250	5	232	74	203	21	165
	1969-1978	1940167	11	214	74	188	15	154
	1979-1987	1585337	29	169	64	153	7	127
	1988-1993	777809	75	149	20	136	5	111
	1994-2001	1456447	85	116	15	106	-	-
	2002-2008	1044512	95	92	5	85	-	-
MFH bis 12 Wohneinheiten	vor 1918	501102	2	189	61	163	37	140
	1918-1948	329602	2	194	67	166	31	143
	1949-1957	318743	3	193	64	163	33	141
	1958-1968	455859	4	183	69	159	27	137
	1969-1978	340280	10	171	74	149	16	131
	1979-1987	292086	36	141	54	126	10	112
	1988-1993	131304	72	126	21	116	7	104
	1994-2001	245208	88	116	12	108	-	-
	2002-2008	92664	96	96	3	90	-	-

Tabelle 169 Verteilung und typische wohnflächenbezogene (heizwertbezogene) Verbräuche, eigene Darstellung nach ARGE [8]

Im Rahmen der Auswertungen des vorliegenden Gutachtens wurden daraus gewichtete Mittelwerte für drei Kategorien von Gebäuden ermittelt:

- guter Standard (Gebäude Baujahr ab 1995 ohne Maßnahmen oder gering modernisiert sowie Baujahre bis 1979 -1994 mittel und voll modernisiert
- mittlerer Standard (Gebäude Baujahr 1979 - 1994 ohne Maßnahmen oder gering modernisiert sowie Baujahre bis 1978 mittel und voll modernisiert)
- schlechter Standard (Gebäude bis 1978 ohne Maßnahmen oder gering modernisiert)

Die Energiekennwerte sowie deren Häufigkeiten sind Tabelle 170 zu entnehmen und dienen der Kalibrierung der selbst ermittelten Energiebedarfskennwerte von Gebäuden.

	gut		mittel		schlecht	
	Anteil	Verbrauch	Anteil	Verbrauch	Anteil	Verbrauch
	[%]	[kWh/(m²a)]	[%]	[kWh/(m²a)]	[%]	[kWh/(m²a)]
EZFH	18	106	32	162	51	202
MFH	14	110	35	135	51	161

Tabelle 170 Mittlere Verbrauchskennwerte nach Baustandard, eigene Ermittlung nach ARGE [8]

Im gewichteten Mittel und brennwertbezogen ergibt sich ein Energiekennwert von 186 kWh/(m²a) für Ein- und Zweifamilienhäuser und 155 kWh/(m²a) für die Mehrfamilienhäuser.

Die DENA-Leitstudie zur integrierten Energiewende von 2018 [67] entwickelt aus den Daten von ARGE ein eigenes Mengengerüst. Die fehlenden großen Mehrfamilienhäuser werden dazu noch ergänzt. Die Einzeldaten sind nicht veröffentlicht.

Zur Plausibilisierung der berechneten Energiebedarfe verwenden die Verfasser des vorliegenden Gutachtens die Daten von Walberg et al. Sofern notwendig werden sie komprimiert (z. B. verschiedene Baualtersklassen zusammengefasst.)

Andere Typologien

Schulze-Darup entwickelt 2010 in seinem Werk „Faktor 10“ zur Sanierung insgesamt 14 MFH-Typen für die Jahrzehnte 1880 bis 1970 [94]. Es finden Bedarfsrechnungen nach PHPP und EnEV statt. Da die Einfamilienhäuser fehlen, wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

Mahler et al. definieren in ihrer Studie für das UBA für den Neubau zwei eigene Typgebäude [173].

Beer et al. verzichten in ihrer Studie zur Energiezukunft 2009 komplett auf eine Typologie [278]. Sie rechnen ausgehend vom gegebenen Verbrauch der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (Top-Down). Allerdings entstammt die erzielbare Reduzierung des Heizwärmebedarfs aus einer älteren Untersuchung von 10 Ensembleklassen (EFH/MFH, 5 Altersklassen).

Sanierungszustand der Gebäudehülle

Festlegungen zu typischen Wärmedurchgangskoeffizienten sind den Typologien des IWU zu entnehmen, z. B. der „Deutschen Wohngebäudetypologie“ [102]. Da diese Typologie sehr kleinteilig ist, wird auf die Detailwiedergabe der Werte an dieser Stelle verzichtet. Stattdessen wird die auf 6 Typgebäude komprimierte Zusammenfassung verwendet, die das IWU in der Studie zum „Zielerreichungsszenario“ selbst vorgenommen hat [62]. Es ergeben sich die Werte nach Tabelle 171.

		Altersklasse bis 1978		Altersklasse 1979 - 1994		Altersklasse 1995 - 2009	
		EZFH I	MFH I	EZFH II	MFH II	EZFH III	MFH III
Modernisierungsgrad							
Wand	[%]	20	26	7	15	0	0
Dach/Obere Geschossdecke		47	48	24	23	0	0
Boden/Kellerdecke		10	11	3	7	0	0
Fensterfläche		36	45	12	24	0	0
U-Werte vor Modernisierung							
Wand	[W/(m²K)]	1,40	1,35	0,60	0,68	0,28	0,39
Dach/Obere Geschossdecke		1,00	1,09	0,44	0,45	0,33	0,34
Boden/Kellerdecke		1,24	1,45	0,68	0,69	0,41	0,43
Fensterfläche		2,70	2,70	2,70	2,70	1,60	1,60
U-Werte nach Modernisierung							
Wand	[W/(m²K)]	0,35	0,34	0,26	0,27	-	-
Dach/Obere Geschossdecke		0,24	0,24	018	0,18	-	-
Boden/Kellerdecke		0,37	0,39	0,30	0,30	-	-
Fensterfläche		1,60	1,60	1,60	1,60	-	-

Tabelle 171 Sanierungszustand und Qualitäten der Wohngebäude, eigene Darstellung nach IWU [62]

Es ist erkennbar, dass sich innerhalb der 6 Klassen jeweils noch 2 Untergruppen bilden: der unsanierte und der sanierte Zustand. Nur die neuesten Gebäude („III“) sind noch nicht von der Sanierung betroffen. Final ergeben sich daher insgesamt deutlich mehr als 6 Ausgangszustände.

Es lässt sich der unsanierte Zustand berechnen (immer der schlechtere U-Wert für jedes Hüllflächenbauteil), der komplett sanierte Zustand (immer der bessere U-Wert) oder ein mittlerer Zustand (anteilig gewichtet). Selbstverständlich könnten auch alle durch Kombinatorik der Merkmale erzielbaren, verschieden häufigen Zwischenstände berechnet werden, was den Rechenaufwand vervielfacht.

Für die eigenen Untersuchungen wurden die Daten zunächst fortgeschrieben (Sanierungsfortgang seit dem Zeitpunkt der Datenerhebung) sowie zusammengefasst in 3 Zustände „schlecht“, „mittel“ und „gut“. Für diese Zustände wurde der repräsentative Wärmedurchgangskoeffizient (Ø U-Wert) sowie die Gesamthäufigkeit bestimmt, siehe Anhang 3.1.3.

Auch Walberg et al. unterscheiden für ihre ARGE-Typologie in Sanierungswahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Einzelbauteile, siehe Tabelle 172 und Tabelle 173. Durch die deutlich höhere Anzahl von 7 Baualtersklassen sowie die Unterteilung in 3 Sanierungsgrade ergäbe sich ein Vielfaches von Kombinationsmöglichkeiten.

EFH/ZFH	vor 1918	von 1918 bis 1948	von 1949 bis 1957	von 1959 bis 1968	von 1969 bis 1978	von 1979 bis 1987	von 1988 bis 1993
Außenwände							
vor WSchV 1977	81,5	78,9	68,6	87,6	89,8	-	-
nach WSchV 1977/1984	5,3	11,1	1,2	2,2	2,1	95,0	96,1
nach WSchV 1995	13,2	10,0	12,2	10,2	8,1	5,0	3,9
Dach und obere Geschossdecke							
vor WSchV 1977	34,2	31,1	42,7	46,2	53,0	-	-
nach WSchV 1977/1984	43,4	52,2	42,7	40,2	34,3	82,5	87,4
nach WSchV 1995	22,4	16,7	14,6	13,6	12,7	17,5	12,6
Fenster							
vor WSchV 1977	16,4	18,3	26,7	35,5	53,1	-	-
nach WSchV 1977/1984	67,8	65,6	60,4	50,1	34,5	91,2	93,1
nach WSchV 1995	15,8	16,1	12,9	14,4	12,4	8,8	6,9
Kellerdecke und Bodenplatte							
vor WSchV 1977	93,4	94,4	95,1	95,7	96,9	-	-
nach WSchV 1977/1984	1,4	1,2	1,0	0,9	0,7	98,0	98,5
nach WSchV 1995	5,2	4,4	3,9	3,4	2,4	2,0	1,5

Tabelle 172 Sanierungszustand der Gebäudehülle in EFH und ZFH, Werte nach ARGE [8]

EFH/ZFH	vor 1918	von 1918 bis 1948	von 1949 bis 1957	von 1959 bis 1968	von 1969 bis 1978	von 1979 bis 1987	von 1988 bis 1993
Außenwände							
vor WSchV 1977	75,1	79,7	83,7	85,4	88,8	-	-
nach WSchV 1977/1984	13,0	9,5	9,6	7,5	5,7	94,8	95,8
nach WSchV 1995	11,9	10,8	6,7	7,1	5,5	5,2	4,2
Dach und obere Geschossdecke							
vor WSchV 1977	44,6	41,9	51,0	48,3	51,1	-	-
nach WSchV 1977/1984	39,0	48,0	37,5	37,0	36,4	85,2	89,3
nach WSchV 1995	16,4	10,1	11,5	14,7	12,5	14,8	10,7
Fenster							
vor WSchV 1977	19,4	20,2	23,5	28,1	37,3	-	-
nach WSchV 1977/1984	67,2	64,2	65,9	57,5	49,1	91,7	95,2
nach WSchV 1995	13,4	15,6	10,6	14,4	13,6	8,3	4,8
Kellerdecke und Bodenplatte							
vor WSchV 1977	93,4	94,4	95,1	95,7	96,9	-	-
nach WSchV 1977/1984	2,2	1,5	1,1	1,2	1,0	98,8	99,1
nach WSchV 1995	4,4	4,1	3,8	3,1	2,1	1,2	0,9

Tabelle 173 Sanierungszustand der Gebäudehülle in MFH, Werte nach ARGE [8]

Um die Zahl der zu berechneten Varianten überschaubar zu halten, verdichten Pehnt et al. die Wahrscheinlichkeiten zu vier Sanierungsszenarien, siehe Abbildung 293. Es wird davon ausgegangen, dass bei einem Teil der Gebäude nur das Dach von einer Sanierung betroffen ist und auch als Einzelmaßnahme häufig anzutreffen. Darüber hinaus werden Fälle mit zusätzlicher Außenwandsanierung angenommen; wobei dies vereinfachend unterstellt, dass die Wand immer erst nach dem Dach angefasst wird. Kellerdeckendämmungen oder Außenwanddämmungen als Einzelmaßnahmen werden nicht als Ausgangszustand zugrunde gelegt, jedoch die Vollsanierung.

Dieser Logik schließen sich die Verfasser des vorliegenden Gutachtens an: untersucht werden regulär insgesamt 4 Ausgangszustände für jede der gewählten 6 Gebäudegruppen. In der neuesten Baualtersklasse gibt es jedoch nur den Ursprungszustand.

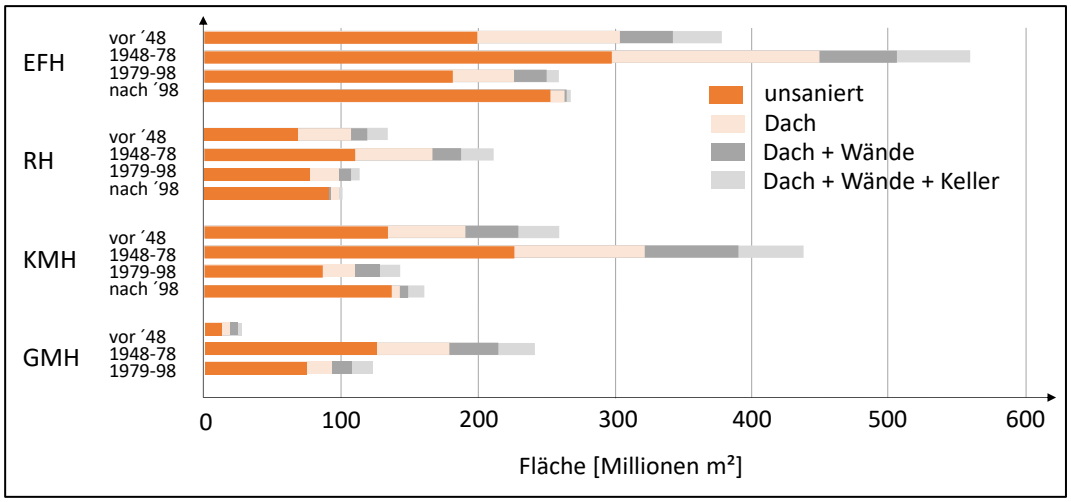


Abbildung 293 Flächenanteile und Sanierungszustand der Wohngebäude, Werte nach [34]

Gewähltes Mengengerüst

Die gewählten Randdaten für die Berechnung innerhalb des vorliegenden Gutachtens sind im Anhang 3.1 (exemplarisch gewähltes EZFH und MFH) wiedergegeben.

5.7.2 Gebäudetypologie Nichtwohnbau

Basis einer möglichst aktuellen Gebäudetypologie für Nichtwohnbauten sind jeweils nur wenige Primärdatenquellen, die jeweils fortgeschrieben (Abriss/Neubau), weiterentwickelt, modifiziert oder neu gruppiert werden. Zu nennen sind die Studie von Schlohmann et al. des Fraunhofer ISI [312] von 2015 sowie die Erhebung von Deilmann et al. des Leibnitz-Instituts für ökologische Raumentwicklung von 2013 [313]. Für beide Studien liegen jeweils Vorgängerversionen vor.

In der Studie von Staniaszek et al. wird der Nichtwohnbau in 70 Segmente verschiedener Gebäudetypen, Altersklassen und Branchen geteilt [280]; die Grunddaten entstammen den Datensätzen von Fraunhofer ISI.

Nicht in jeder makroskopischen Betrachtung des Gebäudesektors wird eine Buttom-Up-Modellierung verfolgt. Alternativ werden die Auswirkungen von Sanierungen ausgehend vom zusammengefassten Endenergieverbrauch aller Nichtwohnbauten abgeschätzt (z. B. in [67]).

Datenverschnitt aufgrund einer Meta-Analyse

Ein ausführlicher Vergleich zum Umfang und Detaillierungsgrad von verfügbaren Primärdaten liefern Jochum et al. 2015 [127]. Die Studie ermittelt ein Mengengerüst für das Simulationsmodell „GEMOD“, welches – nach Ansicht der Gutachter – die präziseste verfügbare Beschreibung für den Sektor der Nichtwohnbauten darstellt. Tabelle 174 gibt die Erkenntnisse wieder.

Die Zahlen sind in sich schlüssig; allerdings der Endenergieverbrauch (für Wärme) der „büroähnlichen Betriebe“ wird als zu gering eingeschätzt. Erwartungsgemäß liegt der Verbrauch in der Größenordnung der Bildungsgebäude. Zudem wäre eine Erweiterung auf den Verbrauch an Strom wünschenswert.

Typologien sind Basisdaten für Energiekonzepte, die den Gesamtbestand an Gebäuden betreffen. Je nach Fokus auf den Energieeinsatz (Wärmekonzept oder Wärme- und Stromkonzept) sind alle Nichtwohngebäude oder nur jene mit Beheizung in einer Typologie enthalten. Der Quervergleich von Literatur liefert keine einheitliche Vorgehensweise.

Für künftige Verfeinerungen der Datenlage wird eine möglichst umfassende Betrachtung aller Nichtwohngebäude als sinnvoll erachtet: beheizt oder unbeheizt. Das bietet die Option, neben Wärme- auch umfassende Stromkonzepte zu erstellen.

Nichtwohnbautyp	Anzahl	Nettogrundfläche	Nettogrundfläche Typgebäude	Endenergieverbrauch Wärme
		[Mio. m²]	[m²/Gebäude]	[kWh/(m²a)]
Krankenhäuser	17.000	53	3.120	340
Bildung	111.000	156	1410	160
Beherbergung, Gaststätten, Heime	423.000	127	560	140
Sport	114.000	55	480	130
Baugewerbe	402.000	97	240	120
Herstellungsbetriebe	200.000	86	430	100
Handel	487.000	244	500	90
Landwirtschaft	299.000	254	850	80
Büroähnliche Betriebe	687.000	316	460	60
Textil, Bekleidung, Spedition	188.000	74	390	50
Industrie	490.000	698	1430	k. A.
Kultur	83.000	70	840	k. A.
Nahrungsmittelgewerbe	14.000	7	500	k. A.
Wäschereien	6.000	1	170	k. A.

Tabelle 174 Gebäudetypologie Nichtwohnbau, Werte gerundet nach [127]

Baualtersklassen

Eine Verteilung auf einzelne Altersklassen liegt in keiner der Primärstudien flächendeckend vor. Deilmann et al. [313] klassifizieren nur einen Teil der Gebäude, siehe Tabelle 175. Jochum et al. [127] verarbeiten diese Teilung weiter und vergleichen sowie ergänzen Datenlücken anhand des Wohnungsbaus.

Gebäudetyp	Quelle	Anteil an der gesamten Gebäudezahl [%]			
		bis 1948	1949-1978	1979-1994	1995-2009
alle Wohngebäude	[127]	25,8	38,4	18,4	17,4
Büro, Verwaltung, Schule	[313]	32,4	22,9	35,4	9,3
Krankenhaus, Heime		40,4	25,3	25,2	9,1
Handel, Gewerbe		30,5	22,2	29,6	17,7
Hotel		38,6	29,0	29,9	2,5

Tabelle 175 Altersstruktur der Nichtwohnbauten, eigene Darstellung nach [127] [313]

Die Altersstruktur zeigt – im Vergleich zum Wohnungsbau – dass während der Hochphase des Wohnungsbaus weniger Nichtwohnbauten entstanden. Ein großer Teil der Krankenhäuser und Heime sind Vorkriegsliegenschaften; ähnliches gilt für Hotels. Nur bei den Schulen und Verwaltungsbauten ist Anfang der 1980er bis in die 1990er Jahre noch ein großer Zubau erkennbar.

Die verwendete Vierteilung der Altersklassen findet sich fast identisch auch in der Studie von Pehnt et al. [34] wieder. Gerhardt et al. [43] fassen die Daten des Fraunhofer ISI zu 4 Gruppen und jeweils 3 Altersklassen zusammen. Das konkrete Mengengerüst wird jedoch nicht offengelegt.

Hüllflächen

Jochum et al. ermitteln näherungsweise geometrische Daten (Volumen, Hüllflächen) aus der Geschossigkeit der Gebäude und der bekannten Nettogrundfläche (NGF) [127]. Es entstehen näherungsweise quaderförmige Typgebäude. Fehlende Daten (Fensterflächenanteil, Gebäudetiefen) werden anhand von typischer Planung abgeschätzt. Es entstehen nach Ansicht der Gutachter sehr plausible Werte, siehe Tabelle 176.

Nichtwohnbautyp	NGF	Luftvolumen	Wand	Fenster plus Tür	Boden oder Dach	Geschosse
	[m²]	[m³]	[m²]	[m²]	[m²]	[-]
Krankenhäuser	3.100	29.300	720	800	1210	3,0
Bildung	1.400	12.100	670	380	690	2,3
Beherbergung, Gaststätten, Heime	560	4.500	370	150	260	2,5
Büroähnliche Betriebe	460	4.600	410	140	180	3,0

Tabelle 176 Hüllflächen von Typgebäuden im Nichtwohnbau, ausschnittsweise und gerundete Werte nach [127]

Es sind in der Tabelle nur die Werte für Gebäudeklassen dargestellt, die dem Wohnbau ansatzweise ähnlich sind. Die restlichen sind der Primärquelle zu entnehmen.

Bauliche Qualitäten

Das Hüllflächengerüst dient einer Buttom-Up-Berechnung, daher legen Jochum et al. [127] für das Gebäudemodell „GEMOD" auch bauliche Qualitäten fest. Die Wärmedurchgangskoeffizienten werden aus anderen Studien ([313]) übernommen bzw. am Wohnbau orientiert ergänzt. Es ergeben sich die in Werte in Tabelle 177. Alle Nichtwohnbauten werden dabei zusammengefasst.

Gebäudetyp	Wärmedurchgangskoeffizienten, [W/(m²K)]			
	bis 1948	1949-1978	1979-1994	1995-2009
Fenster	2,7 - 3,5	2,9 - 3,5	1,9 - 2,9	1,7
oberer Abschluss	1,0	1,0	0,30 - 0,45	0,25
unterer Abschluss	1,2	1,2	0,40 - 0,85	0,40
Außenwand	1,5 - 2,0	1,5	0,85 - 1,2	0,50

Tabelle 177 Wärmedurchgangskoeffizienten im Nichtwohnbau, Werte zusammengefasst nach [127]

Nach Ansicht der Verfasser des vorliegenden Gutachtens sind die Werte zu schlecht angenommen. Insbesondere der Sanierungsgrad der Hüllflächen ist nicht oder kaum enthalten.

Pehnt et al. verdichten ebenfalls Grunddaten aus mehreren Studien, unter anderem von Fraunhofer ISI [312]. Das Mengengerüst enthält Flächen für 6 Typen in jeweils 4 Altersklassen und 2 Sanierungsgraden (insgesamt 48 Untergruppen). Es wird nur grafisch offengelegt, nicht tabellarisch. Jedoch zeigt Abbildung 294 ansatzweise die Annahmen zur Sanierung.

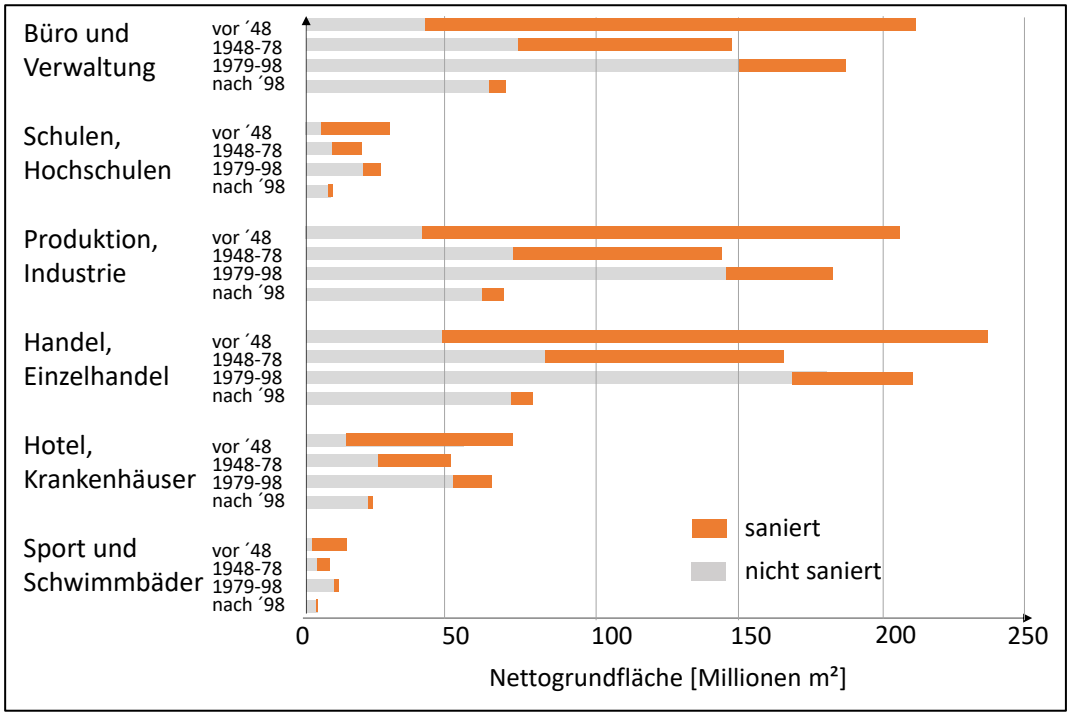


Abbildung 294 Flächenanteile und Sanierungsgrad der Nichtwohnbauten, Werte nach [34]

Unter der Annahme zu schlechter Ausgangszustände ergibt sich – analog dem Wohnungsbau – das Problem falscher Einsparprognosen, vgl. Anhang 5.2. Das Problem wird verschärft, da kaum Erkenntnisse zu statistischen Fehlern und Fehlannahmen bei der Bedarfsberechnung im Abgleich zum Verbrauch vorhanden sind.

Eine künftige Verfeinerung der Datenlage – unterstützt durch Messungen von Verbrauchsmengen und detaillierten Verbrauchsanalysen – ist im Nichtwohnbau notwendig, um vertrauenswürdige Buttom-Up-Analysen durchführen zu können.

Aus obigem Grund kommt die Studie des IWU von 2013 ohne eine konkrete Gebäudetypologie für Nichtwohnbauten aus [62]. Da die vorhandenen Typologien bei weitem nicht so detailliert ausfallen wie die Wohnbautypologien, wird auf eine Verwendung komplett verzichtet. Allerdings werden die Endenergien dennoch in der Makroanalyse zum Zielerreichungsszenario berücksichtigt. Dafür wird ein pauschaler Faktor (0,45) bezogen auf den Wohnungsbau verwendet. Der Faktor ergibt sich aus den veröffentlichten Statistiken zum Endenergieverbrauch von Wohn- und Nichtwohnbau (AGEB).

5.8 Kosten

Mit der energetischen Verbesserung von Gebäuden sind Investitionskosten und deren Folgekosten, insbesondere Wartungs- und Instandhaltungskosten, verbunden. Nachfolgend werden schwerpunktmäßig typische Investitionskosten sowie Wartungsansätze für Bauprodukte zum heutigen Zeitpunkt (bzw. nach Datenlage der jüngsten Vergangenheit) zusammengestellt. Die zurückliegenden Veränderungen der Kosten beschreiben der Baupreis- und Baukostenindex.

Darüber hinaus widmet sich Anhang der Frage, welche Kostenanteile der energetischen Verbesserung zuzuschreiben sind und welche ohnehin im Zuge der laufenden Bauunterhaltung angefallen wären. Nur erstere werden regulär in die Wirtschaftlichkeitsbewertung einbezogen. Das mit dieser Fragestellung verwandte Thema der Kosten vorfristiger Investitionen wird ebenfalls kurz beleuchtet.

5.8.1 Baukosten- und Baupreisindex

Die Investitionskosten für Maßnahmen der energetischen Gebäudeverbesserung werden im Rahmen von Studien regulär nur abgeschätzt. Sofern ein Einzelgebäude und der heutige Zeitpunkt von Interesse sind, könnten konkrete Angebote eingeholt werden. Für Konzeptstudien wird auf Kostenfunktionen zurückgegriffen.

Deren Grundlage sind in der Regel einmalige Kostenerhebungen der jüngeren Vergangenheit. Den Zusammenhang mit dem Baupreisindex beschreibt Abbildung 295. Fiktiv erfolgte vor 5 Jahren eine Erhebung für Pumpenpreise im Rahmen einer wissenschaftlichen Studie (Punkt „F“). Eine heute zu erstellende Studie benötigt die Werte ebenfalls und will sie verwenden. Es stellt sich die Frage, mit welchen Pumpenpreisen heute zu rechnen ist. Dafür kann nur ein Korridor (Bereich „G“) angegeben werden, außer eine neue Grunddatenerhebung beginnt.

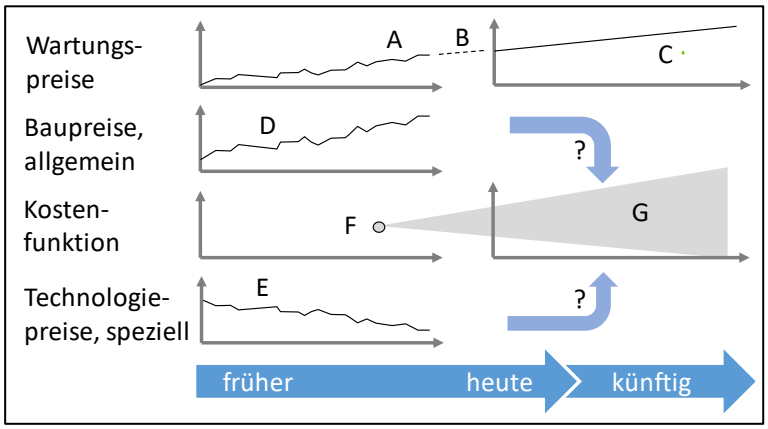


Abbildung 295 Verwendung von Indices zur Bestimmung heutiger und künftiger Preise [eigene Darstellung]

Der Korridor wird in der Literatur gebildet von zwei Trends. Zum einen ist der Baupreisindex (Linie/Kurve „D“) gegeben, teilweise aufgeschlüsselt in verschiedene Kostengruppen, Gewerke usw. Er hat – langfristig betrachtet – eine ansteigende Tendenz und begrenzt den Bereich oberhalb. Der andere Trend ist die Lernkurve bestimmter Technologien (Linie/Kurve „E“). Insbesondere bei Effizienztechnologien ist im Zuge einer gewissen Marktdurchdringung ein Preisverfall festzustellen. Damit ist das Kennfeld „G“ unterhalb begrenzt.

Ob die fiktiv gesuchte Kostenfunktion für Pumpen eher dem allgemeinen Baupreisindex steigend folgt oder mit der Lernkurve eher fällt, kann nur vermutet werden. Kurz nach Einführung eines Produktes auf dem Markt überwiegt die Lernkurve, dann schließt sich – voraussichtlich – eine Phase der Preissteigerung an. Dass ein Produkt über sehr lange Zeiträume – von der Markteinführung bis zur Abschaffung aus dem Markt von den genannten Effekten unberührt ist, ist unwahrscheinlich. Sofern der Zeitpunkt der Grunddatenermittlung (Punkt „F“) noch nicht sehr lange zurückliegt, ist der Fehler zum Zeitpunkt „heute“ eher gering.

Eine beispielhafte Anwendung dieses Vorgehens ist in der Studie von Ökoinstitut und Fraunhofer ISE nachzuvollziehen [252]. Es werden Investitionskosten aus einer anderen Quelle (Jahr 2009) auf das Jahr der Studie 2016 angepasst. Zum Einsatz kommt der Baupreisindex.

Die erste beeinflussende Größe – der Baupreisindex – wird nachfolgend beschrieben. Auf die weiteren Aspekte der künftigen Entwicklung (für den Zeitraum nach „heute“) wird im Anhang 4.2.6 eingegangen. Die Aspekte der Wartung (Linien/Kurve „A“ bis „C“) geht Anhang 5.8.3 ein. Die Verwendung der kompletten Kosten oder nur der energetisch relevanten Anteile wird in Anhang 5.8.4 thematisiert.

Baupreisindex und Baukostenindex

Das Statistische Bundesamt veröffentlicht regelmäßig Baupreis- und Baukostenindices. Beide sind wie folg definiert [314]:

- Baupreisindex: er enthält die Kostengruppen 300 und 400 (Komponentenkosten); er wird gewichtet aus einem „Warenkorb“ von 170 bis 200 Einzelpositionen berechnet; die Einzelpositionen werden alle 5 Jahre neu zusammengestellt und an die aktuelle Entwicklung im Baugeschehen angepasst; in diesem Zusammenhang wird jeweils ein neuer Indexstartwert 100 ermittelt und alle früheren Einzelwerte entsprechend skaliert.

- Baukostenindex: er enthält neben den Produkten der Komponenten auch Lohnkosten sowie einen Zuschlag für Hilfsstoffe, wie Energie.

Seit 1990 schwankt der Baupreisindex zwar stärker als der Verbraucherpreisindex, im Mittel ist die Steigung jedoch nahezu gleich groß [197]; Schulze Darup und Kollegen stellen darüber hinaus 2014 Folgendes fest:

> *„Die deutsche Einheit (1990), der drohende Wegfall der Eigenheimzulage […] (2006) und das Konjunkturpaket II (2009) bewirkten kurzfristig und zeitlich befristet jeweils eine deutlich erhöhte Nachfrage nach Bauleistungen. Das Anziehen der Baupreise stellt sich hier als Ergebnis dieses Nachfrageschubs bei gleichzeitig begrenzter Angebotsseite dar. Die Wärmeschutzverordnung 1995, sowie die Energieeinsparverordnungen 2002 und 2009 offenbaren hingegen weder nach noch vor (Vorzieheffekte) deren Inkrafttreten einen kurz- oder mittelfristigen Preisanstieg.“*

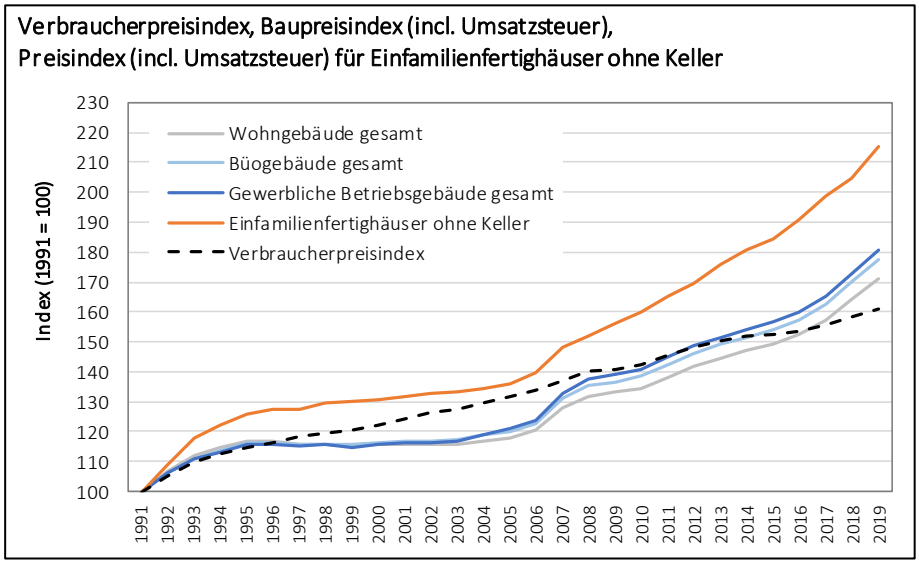


Abbildung 296 Verbraucherpreisindex, Baupreisindex, Preisindex für Fertighäuser seit 1991, eigene Darstellung nach [314]

Abbildung 296 zeigt die Entwicklung des Baupreisindex‘ und des Verbraucherpreisindex‘ seit 1991 (für die Darstellung selbst gewählter Startwert, da Verbraucherpreisindices seitdem verfügbar). Für die jüngere Vergangenheit gilt: seit ca. 2014 bis 2016 ist der Baupreisindex höher als der Verbraucherpreisindex, wobei es in den 20 Jahren vorher anders herum war. Die Baupreisindices sind weitgehend bereinigt um Effekte erhöhter energetischer Anforderungen (EnEV, EEWärmeG usw.), da der Warenkorb fest definiert ist. Zum Vergleich ist daher das „Einfamilienfertighaus ohne Keller“ mit eingefügt. Es enthält alle Kosten, auch die für erhöhten Wärmeschutz und verbesserte Anlagentechnik. Hier ist eine Steigerung der Baukosten gut zu erkennen, die zumindest teilweise auf erhöhte energetische Anforderungen zurückzuführen sein dürfte.

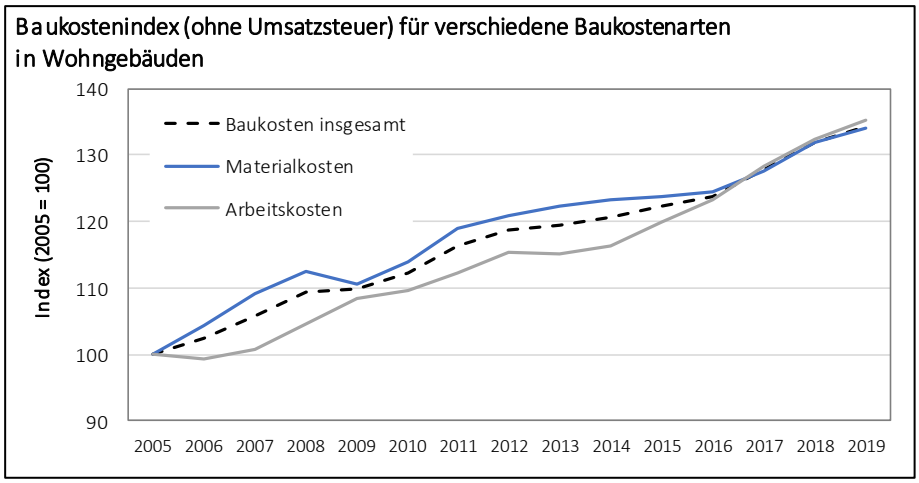


Abbildung 297 Baukostenindex seit 2005, eigene Darstellung nach [314]

Abbildung 297 zeigt den Baukostenindex, welcher für die Endverbraucher relevant ist. Die Anteile von Material- und Lohnkosten zeigen – über längere Zeiträume betrachtet – ähnliche Tendenzen.

Der Baupreisindex liegt – über lange Zeiträume betrachtet – auf der Höhe des Verbraucherpreisindex, ggf. etwas darüber.

Baupreissteigerung vs. Lernkurven

Die Daten des statistischen Bundesamtes erlauben eine genauere Analyse des Baupreisindex nach Kostengruppen. Für den Wohnungsbau sind unter anderem (einheitlich seit 2005) die in Abbildung 298 ausgewerteten Kostengruppen „Wärmedämmverbundsystem (WDVS)“ und „zentrale Heizung und Trinkwarmwasserbereitung“ verfügbar. Es zeigt sich, dass die Steigerungsraten aller Kostengruppen über dem Verbraucherpreis liegen. Eine genauere Analyse der Effizienzmerkmale (Wärmeleitfähigkeit, Wirkungsgrad, Betriebsbereitschaftsverluste usw.) erlauben die Zahlen nicht.

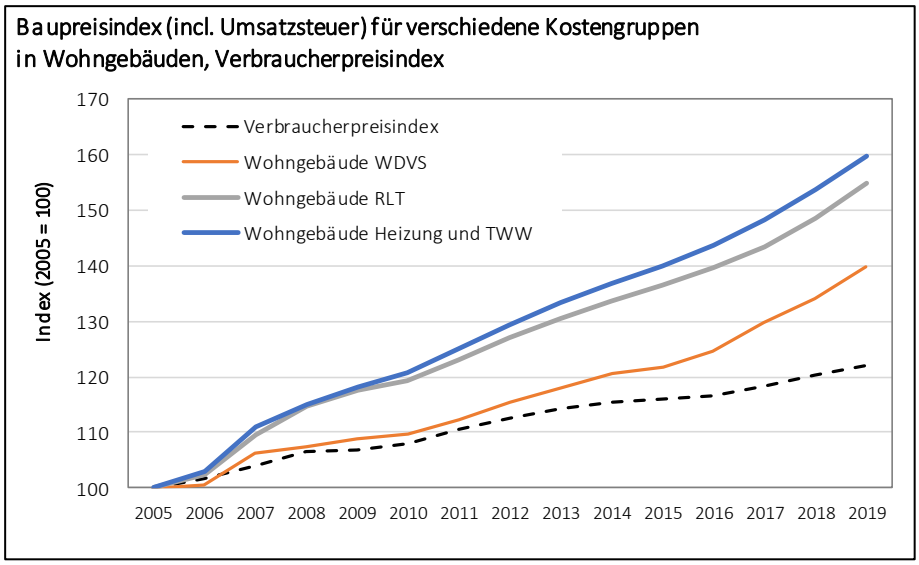


Abbildung 298 Baupreisindex verschiedener Kostengruppen sowie Verbraucherpreisindex seit 2005, eigene Darstellung nach [314]

Der Bericht der Baukostensenkungskommission von 2015 [315] bestätigt die Erkenntnisse mit Zahlen für den Zeitraum 1999 bis 2014. Auszugweise werden Indices einzelner Produkte bzw. Kostengruppen benannt, die für die Sanierung relevant sind:

- Heizkessel: 155
- Brennwertkessel: 153
- Wärmepumpe: 156

- Rohrdämmung: 170
- Wärmedämmverbundsystem: 116
- Haustür aus Kunststoff oder Holz: 129

Die Zahlen der beiden Kesselarten im Vergleich sowie der Kessel mit der Wärmepumpe lassen keine nennenswerten Effekte einer Lernkurve erkennen. Wärmepumpen waren zu Beginn der Indizierung ein vergleichsweise neues Produkt (ohne nennenswerten Marktanteil), Brennwertkessel waren etwa 10 Jahre eingeführt, andere Heizkessel gängige Technik. Auch hier sind keine Angaben über die ggf. steigende Effizienz der Produkte verfügbar (nach der Logik: „für steigenden Kosten erhält der Käufer steigende Effizienz“).

Es lässt sich aus der Datenlage vieler Technologien keine allgemeine Lernkurve für Effizienztechnologien ableiten. Für aus heutiger Sicht bereits lange am Markt etablierte Produkte (Wärmedämmstoffe, Brennwertkessel, Solarthermie) kann eher von steigenden Kosten (Baupreisindex) ausgegangen werden bei gleichzeitig nur noch schwach steigender oder konstanter Effizienz.

Für die – bezüglich der Marktdurchdringung – etwas neuere Technologien der Wärmepumpe sind zwar momentan steigende Kosten (ggf. künftig auch konstante) festzustellen, wobei die Effizienz sich gleichzeitig verbessert, da herstellerseits technisch noch optimiert wird. Nur für sehr „junge“ Technologien bezüglich der Marktdurchdringung (Photovoltaik) sind gleichzeitig Kostendegressionen und technische Verbesserungen gleichzeitig zu beobachten.

Für die eigenen Untersuchungen gelten die in Anhang 5.8.2 tabellarisch festgelegten Kosten (und Lernkurven) sowie ein Baupreisindex in der Höhe der Inflation.

Einfluss der gesetzlichen Vorgaben auf die Baukosten

Die am häufigsten zitierte Studie zum Thema ist die Untersuchung von Walberg et al. aus dem Jahr 2015 [316]. Sie entwickelt aus des Kosten real erfasster Gebäuden eine Aufschlüsselung der Preisanstiege in die Rubriken: „allgemeiner Preisanstieg“, „erhöhte Ausstattung“ und „erhöhte energetische Anforderungen“, siehe Abbildung 299.

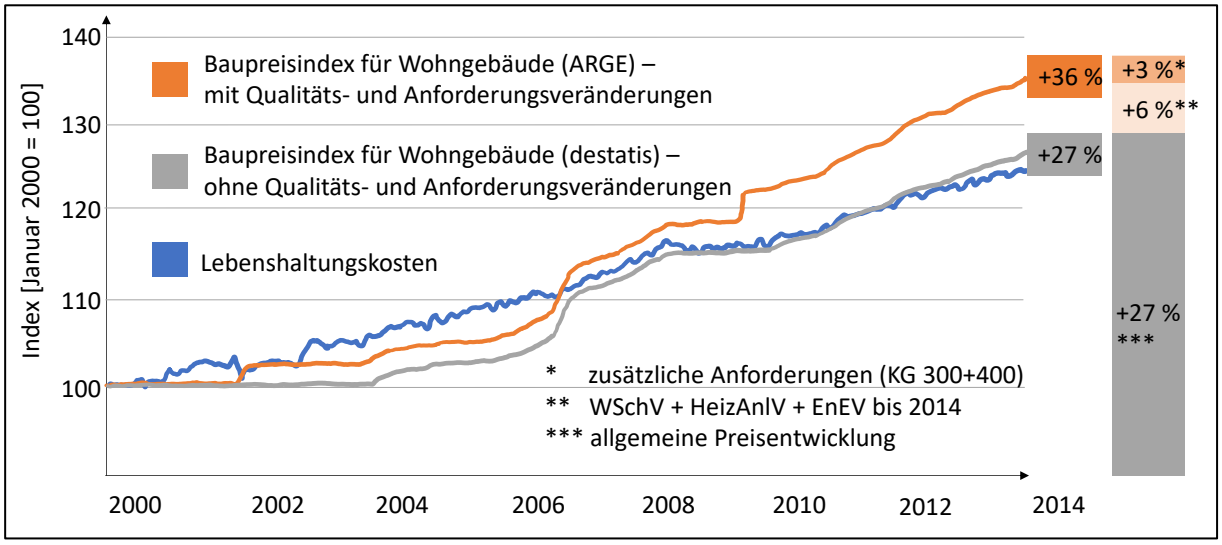


Abbildung 299 Baupreisindex mit und ohne Qualitäts- und Anforderungsveränderungen, Kurvenverlauf nach ARGE [316]

Die Einführung der EnEV 2002 und ihre Novellierung 2009 sind erkennbar als Sprünge des Bauwerkskostenindex‘ (ARGE) in den jeweiligen Jahren. Die allgemeine Kostenentwicklung überlagert diese Sprünge. Von insgesamt 36 %-Punkten an Kostenerhöhung im ausgewerteten Zeitraum drei Viertel auf die allgemeine Preissteigerung. Ein Sechstel ist erhöhter Ausstattung (erhöhter Schallschutz, barrierefreies/armes Bauen incl. Aufzüge, Tiefgaragenstellplätze, Gäste-WC usw.) zuzuschreiben. Ein Zwölftel ist auf die erhöhten gesetzlichen Anforderungen der EnEV und des EEWärmeG zurückzuführen.

Ein nennenswerter Anteil des Anstiegs an Kosten ist auf die gestiegenen Planungs- und Beratungskosten zurückzuführen, siehe auch Abbildung 300. Die Autoren der Studie führen aus:

„In diesem Zusammenhang ist darüber hinaus festzustellen, dass der Kostenanteil im Bereich der Planungs- und Beratungsleistungen in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat. Dieses ist insbesondere auf notwendige zusätzliche Fach- und Expertenplanungen (energetische Zertifizierungen und Sachverständigennachweise für Förderprogramme, Brandschutz- und Schallschutzgutachter u. a. infolge von Deregulierungen der Landesbauvorschriften) zurückzuführen."

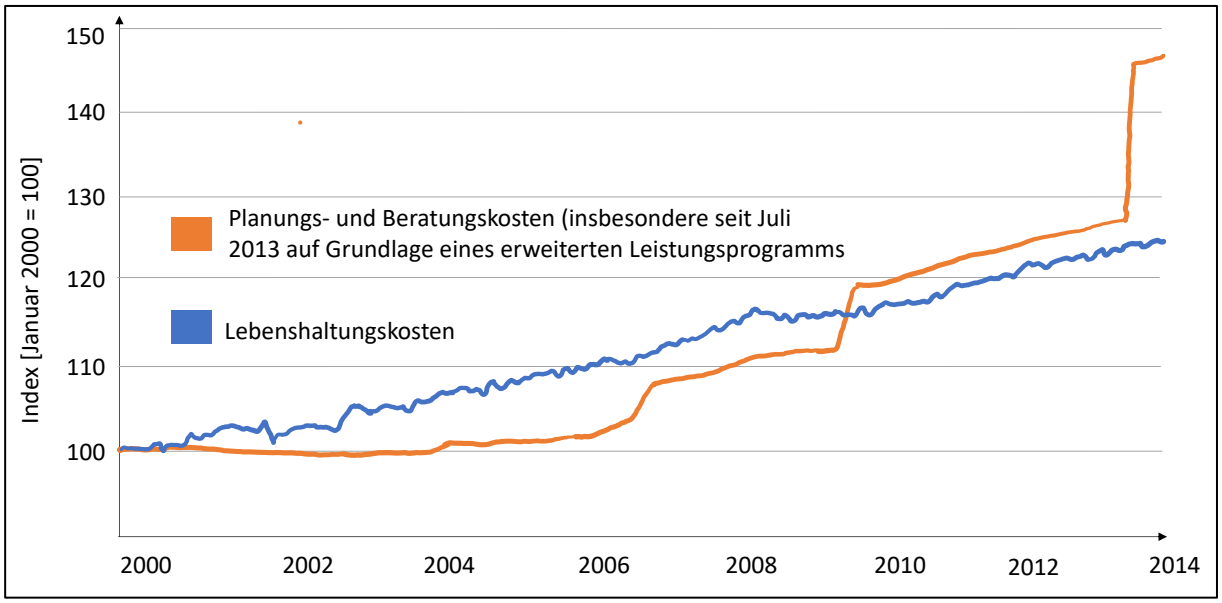


Abbildung 300 Index der Planungs- und Beratungskosten im Vergleich zum Verbraucherpreisindex, Kurvenverläufe nach ARGE [316]

Der Anstieg der Planungskosten ist grundsätzlich nachvollziehbar. Allein die energetische Effizienz der Gebäude betreffend sind Wärmebrückenberechnungen, Planung und Prüfung der Luftdichtheit sowie anspruchsvollere TGA-Planungen zu vermuten. Allerdings – siehe Anhang 3.1.3 bis 3.5 – sind noch deutliche Potentiale hinsichtlich der tatsächlich erreichbaren Effizienzen zu heben.

Daher ist für die zukünftige Entwicklung von Baukosten (und ggf. daraus abzuleitende Fördermechanismen) zu vermuten:

Planungskosten sowie Lohnkosten für die qualitätsgesicherte Ausführung werden noch steigen (müssen). Bei den Planern (oder ausführenden) sind künftig auch Kostenanteile für das Monitoring nach der Inbetriebnahme anzusetzen.

5.8.2 Investitionskosten und Kostenfunktionen

Eine detaillierter Rückblick auf typische Investitionskostenansätze im Zeitverlauf (1995 bis heute) sowie eine Unterscheidung in „Sowiesokosten" und „energiebedingte Mehrkosten" folgt in Anhang 5.8.4. An dieser Stelle werden Kostenansätze aus der Literatur zusammengestellt. In Kombination mit eigenen Erfahrungen aus Projekten werden Festlegungen für die Berechnungen in diesem Bericht getroffen.

Detaillierungsgrad

Für die Auswertung des konkreten Einzelfalls ist das Einholen von Angeboten am angebrachtesten, um eine aussagekräftige Wirtschaftlichkeitsbewertung zu erzielen. Aufgrund des gegebenen Aufwandes wird jedoch bereits für diese Mikroperspektive häufig auf Kostenfunktionen bzw. standardisierte Kostenansätze zurückgegriffen. Eine Vereinfachungsnotwendigkeit besteht in jedem Fall für Betrachtungen der Makroperspektive.

In der Literatur ist das Vorgehen dennoch überwiegend vergleichsweise kleinteilig – insbesondere in Studien der jüngeren Vergangenheit, u. a. des IWU (z. B. [57]). Grundvoraussetzung sind stark aufgeschlüsselte, flächendeckend verfügbare Zustandsdaten und Mengenangaben für einzelne Gebäudehüllflächen und Wärmeerzeugungsstrukturen (jeweils incl. Altersangaben und/oder Instandhaltungsbedarf).

Bei der unterdessen nach mehr als 30 Jahren Forschung gegebenen Detaillierung eignen sich Kostenfunktionen für einzelne Hüllbauteile sowie Erzeuger. Das gegebene Mengengerüst kann so im Zeitverlauf untersucht werden. Eingesetzt wird z. B. das Rechenmodell „GEMOD".

Allerdings weisen insbesondere Makrostudien mit dem Schwerpunkt „TGA“ häufig Vereinfachungen bei der Abbildung der Baukörper – und dem notwendigen Investitionsbedarf für die energetische Modernisierung derselben – auf. Unter anderem die Studien des Fraunhofer ISE [281] [68] vereinfachen entsprechend. Sowohl 2015 als auch 2020 werden beispielsweise folgende pauschale (wohnflächenbezogenen) Kostenansätze gewählt:

- „Gebäude vollsaniert“: 102 €/m²
- „Gebäude vollsaniert plus“: 180 €/m²

Es handelt sich hier nur um die energiebedingten (ohne „Sowiesokosten“), vgl. Anhang 5.8.4. Und auch diese sind sehr niedrig angesetzt, vgl. Untersuchungen von Wahlberg [8] und dem IWU [99]. Innerhalb des Untersuchungsschwerpunkts „TGA“ ist dies zunächst zweitrangig; es lässt sich eine optimale Variante von Anlagentechnik finden. Aus Sicht der Praxis und künftiger Investoren ergibt sich jedoch ein deutlich verzerrter Blick auf den notwendigen Gesamtfinanzierungsbedarf.

Einige Studien legen Kostendaten darüber hinaus gar nicht oder nur vage offen, z. B. die Leitstudie der DENA von 2018 [67]. Hier fehlen alle Kosten für TGA im Gebäude. Aus den bundesweiten Hochrechnungen der Makroebene und Gesamtinvestitionskosten über alle Gebäude und alle Anlagen lässt sich keine qualifizierte Rückrechnung erstellen. Die Ergebnisse der Studie lassen sich daher nur bedingt auf Plausibilität prüfen.

Der Detaillierungsgrad der Untersuchung sowie das Ausgangsniveau des Mengengerüstes (Flächen, Zustandsdaten, Ausstattung mit Erzeugungssystemen) beeinflusst die Detailtiefe der zu verwendenden Kostenfunktionen. In jedem Fall sind die Ansätze offen zu legen, damit sie einer Plausibilität unterzogen werden können.

Üblicherweise werden in der Literatur Kosten als Bruttokosten der Kostengruppen 300 und 400 (DIN 276) angegeben, siehe auch Ausführungen in Anhang 5.9.3. Wichtig ist, dass innerhalb einer Betrachtung keine Vermischung der Handhabung auftritt: für die (betriebswirtschaftliche) Mikroperspektive und den privaten Investor eignet sich die Wahl der Bruttokosten für Investition, Energie und alle anderen Folgekosten. Für (volkswirtschaftliche) Makroperspektive ist der Nettoansatz sinnvoller.

Die Offenlegung der gewählten Strategie erleichtert in jedem Fall die Einschätzung der Zahlenwerte (Negativbeispiel: [281]).

Allgemeine Hinweise zu den nachfolgenden Einzelaspekten

Als „Vollkosten“ wird die Summe der sowieso erforderlichen Kosten im Zuge der Instandhaltung sowie der Mehraufwand für die energetische Verbesserung des Gebäudes verstanden. Dies ist nachfolgend für alle abgebildeten Kostenfunktionen identisch; (vermutete) Abweichungen werden gesondert besprochen. Die Ansätze gelten näherungsweise für heutige Investitionen (bzw. zum Zeitpunkt der Erstellung der Primärquelle) und fassen die Kosten der Gruppen 300 oder 400 nach DIN 276 zusammen.

Es sind nur neuere Quellen ausgewertet. Die ausgewählten Literaturquellen sind jüngeren Datums und decken eine breite Palette der veröffentlichungs- und forschungsstarken Institute/Autoren ab.

Auch die Verfasser des vorliegenden Gutachtens haben in der Vergangenheit zum Thema publiziert (u. a. [317] [318]). Diese Erkenntnisse sowie die Erfahrungen aus der Projektarbeit (u. a. [26] [95]) fließen bei der Interpretation der jeweils gegebenen Gesamtbandbreite an Zahlen ein.

Die sich ergebenden Kostenfunktionen werden tabellarisch am Ende des Kapitels zusammengestellt. Als Einflussparameter werden jeweils jene gewählt, der auch in der Literatur häufig zugrunde gelegt sind. Dies sind Bauteilflächen und Dämmdicken für bauliche Maßnahmen sowie die Erzeugerleistung für Wärmeerzeuger. Sofern möglich werden die Literaturangaben umgerechnet, so dass sie vergleichend in einem Diagramm dargestellt werden können. Ist dies nur näherungsweise möglich, wird dies gekennzeichnet.

Die Zahlen des IWU [319] zu TGA-Anlagen werden nicht dargestellt. Die ansonsten sehr plausible und nachvollziehbare Auswertung wählt als Bezugsgröße für die Formelableitung eine Wohnfläche. Dies sehen die Verfasser des vorliegenden Gutachtens als nicht praktikabel an – es lässt sich auf dieser Basis nicht herausarbeiten, welchen Vorteil eine leistungsreduzierende Dämmmaßnahme auf verminderte Erzeugerkosten hat (v. a. relevant für stark leistungsabhängige Erzeuger wie Wärmepumpen).

Außenwände und Fenster

Abbildung 301 zeigt die Kostenfunktionen für die nachträgliche Außenwanddämmung im Rahmen der Sanierung. Dem Grundprinzip, dass sich die Kosten aus einem Festbetrag zuzüglich eines dämmdickenabhängigen Anteils zusammensetzen, folgen von den untersuchten bis auf eine alle Studien.

Die DENA-Leitstudie fasst eine gewisse Bandbreite von Dämmdicken zur Erreichung eines Effizienzhausstandards zusammen [67]. Die in der Grafik angezeigte Bandbreite (9 bis 20 cm) ist eine eigene Näherung, um die Zahlen darstellen zu können. Dies gilt auch für die anderen Kostenannahmen und Darstellungen aus dieser Quelle.

Ausgehend von einer typischen Dämmdicke von 14 cm streuen die Annahmen von 103 bis 159 €/m². Nach eigener Erfahrung mit Niedrigenergie- und Passivhaussanierung [26] wird ein höherer Wert als realistisch angesehen.

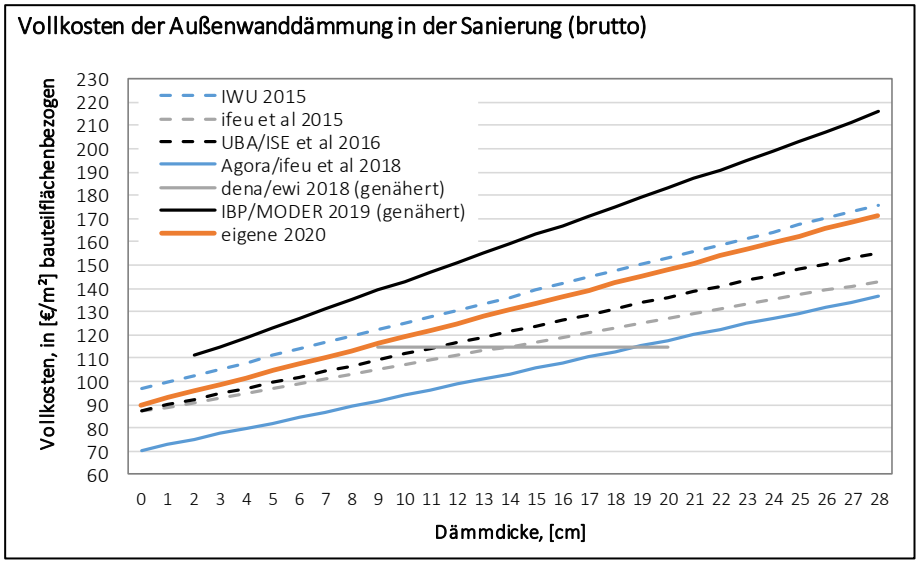


Abbildung 301 Kosten der nachträglichen Außenwanddämmung im Bestand [eigene Darstellung]

Abbildung 302 zeigt die Vollkosten der Fenstersanierung. Die Bandbreite heutige üblicher Fester – Passivhausfenster bis Zweischeibenwärmeschutzverglasung – wird in den zitierten Quellen jeweils abgedeckt. Für ein heute übliches Dreischeibenwärmeschutzglas mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von 1 W/(m²K) streuen die Werte zwischen 200 und knapp 850 €/m². Bis auf Ausreißer [34] [128] liegen jedoch viele Werte auf einem ähnlichen Niveau – um 450 €/m². Dort wird auch die eigene Kostenfunktion angesiedelt.

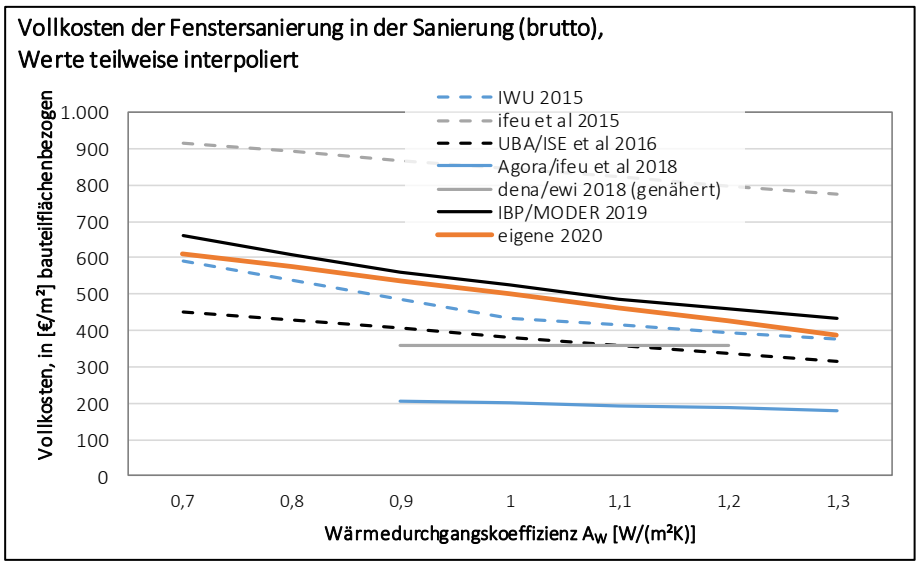


Abbildung 302 Kosten der Fenstersanierung im Bestand [eigene Darstellung]

Oberer und unterer Gebäudeabschluss

Die Kosten der Dämmung eines Daches von oben (d. h. incl. Neueindeckung) werden – mit der Ausnahme der Veröffentlichung des IBP – vergleichsweise ähnlich eingeschätzt, siehe Abbildung 303. Erhorn-Kluttig et al. fassen allerdings alle Maßnahmen am oberen Gebäudeabschluss (Steildach, Flachdach, oberste Geschossdecke) zu einer Funktion zusammen, was diesen Ausreißer erklärt. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Studie des IBP nur Kosten zur Erreichung eines bestimmten Wärmedurchgangskoeffizienten angibt; die Umrechnung in eine Dämmdicke haben die Verfasser des vorliegenden Gutachtens durchgeführt (Annahme: Bestands-U-Wert liegt bei 1 W/(m²K)), so dass die Kostenfunktion zumindest näherungsweise grafisch dargestellt werden kann. Das gilt analog auch für die anderen Funktionen, die aus dieser Literaturquelle entstammen.

Die eigene Kostenfunktion liegt im guten Mittelfeld der verfügbaren Literatur. Für eine beispielhafte 20 cm Dämmung ergeben sich Kosten von gut 200 €/m².

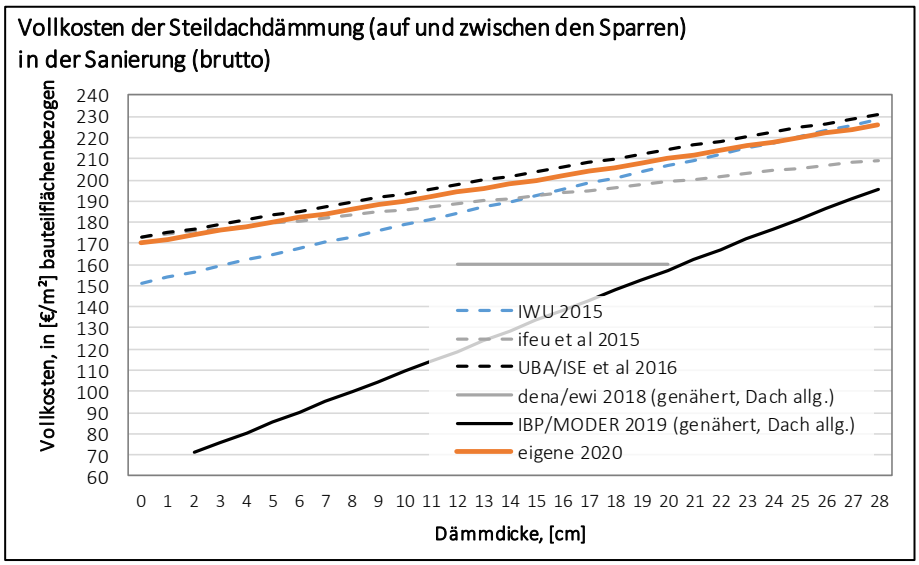


Abbildung 303 Kosten der nachträglichen Steildachdämmung im Bestand [eigene Darstellung]

Abbildung 304 zeigt das entsprechende Datenmaterial für die Flachdachdämmung. (Die Hinweise zu der Studie des IBP gelten entsprechend Abbildung 303). Die Einschätzung der Kosten variiert stärker; für 20 cm Dämmung fallen 145 bis 214 €/m² an. Der höchste Wert aus der Studie des UBA [252] kommt vermutlich zustande, weil keine explizite Unterscheidung in Flach- und Steildach getroffen wurde, sondern eine Zusammenfassung erfolgte. Die eigenen Annahmen liegen im Mittelfeld und orientieren sich an den Zahlen von IWU [319] und IFEU/ECOFYS et al. [34].

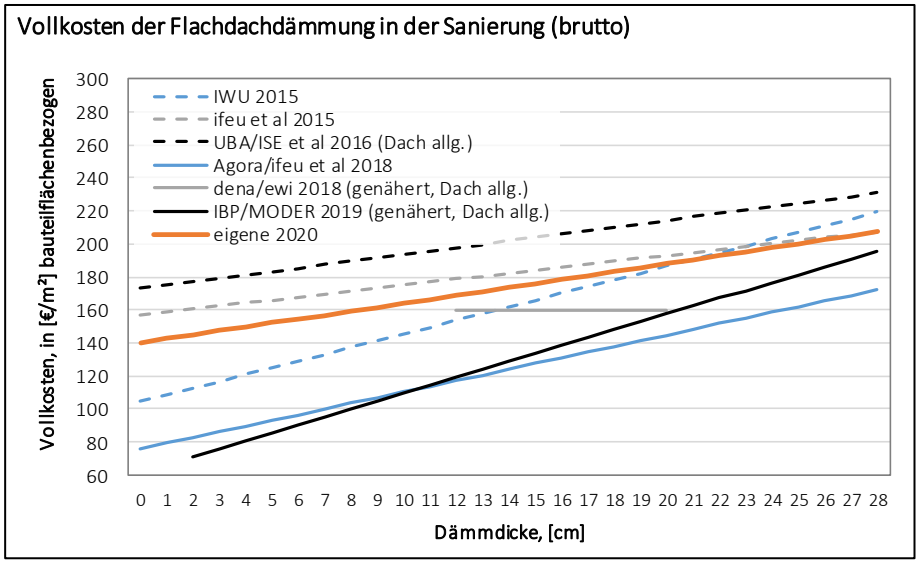


Abbildung 304 Kosten der nachträglichen Flachdachdämmung im Bestand [eigene Darstellung]

Abbildung 305 zeigt die Kostenansätze für die nachträgliche Dämmung der obersten Geschossdecke. (Die Hinweise zu der Studie des IBP gelten entsprechend Abbildung 303). Es ist nur eine geringe Varianz gegeben. Nicht alle Studien treffen hierzu explizite Aussagen. Die eigenen Annahmen orientieren sich an den verfügbaren Daten und können aus eigener Projektarbeit bestätigt werden [26].

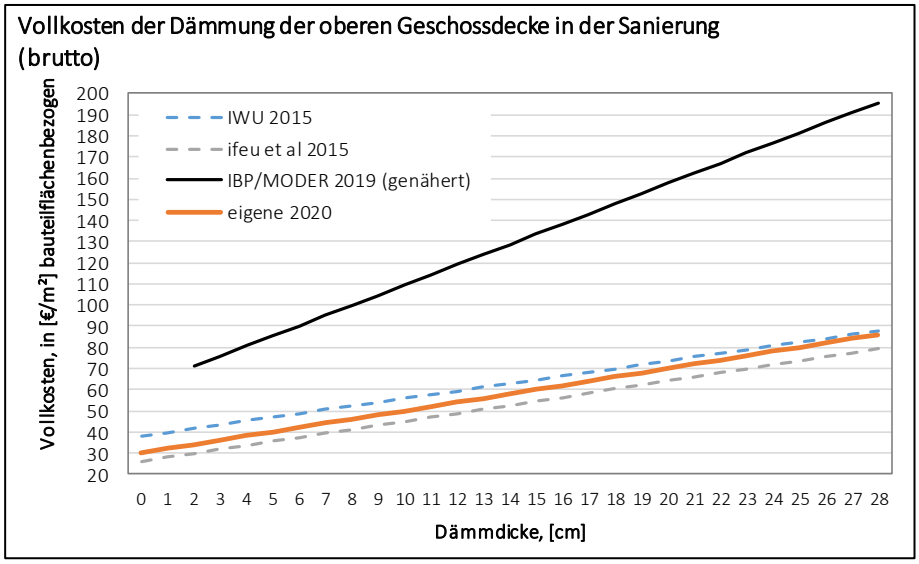


Abbildung 305 Kosten der nachträglichen Geschossdeckendämmung im Bestand [eigene Darstellung]

Abbildung 306 stellt zuletzt die Kosten für die Dämmung von Kellerdecken zusammen. Wieder stechen aus der ansonsten vergleichsweise homogenen Darstellung die Zahlen des IBP hervor. Bei genauerer Recherche kann festgestellt werden, dass die hohen Kosten (z. B. 134 €/m² bei 12 cm Dämmung) auch für Bodenplatten an das Erdreich gelten. Für diese Bauteile kann der Wert aus eigener Projekterfahrung bestätigt werden – er liegt vermutlich sogar noch etwas höher [26]. Für die Kellerdeckendämmung ist er zu hoch.

Die eigene Funktion liegt eher im oberen Bereich, da davon ausgegangen wird, dass eine Schutzbekleidung der Dämmung vorgenommen wird, um eine lange Lebensdauer (siehe Anhang 5.9.1) zu erreichen.

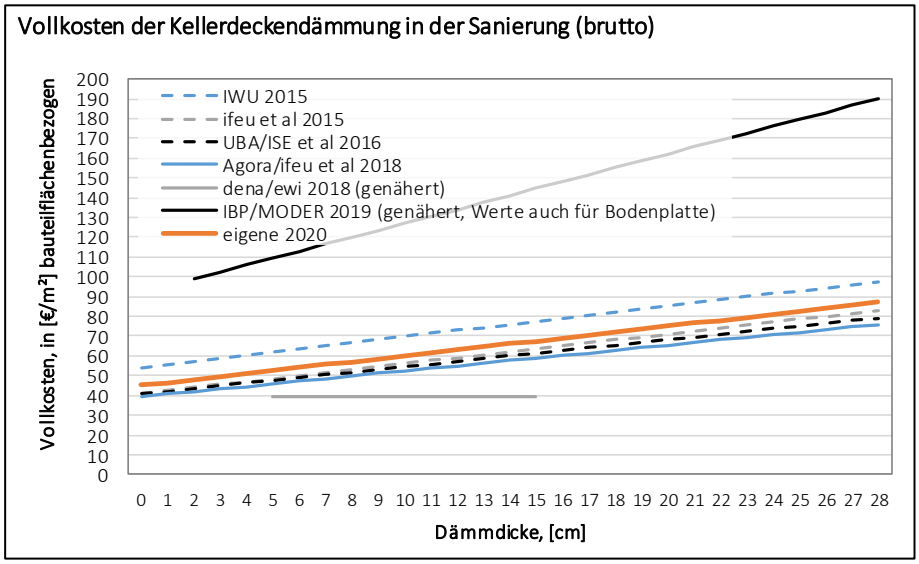


Abbildung 306 Kosten der nachträglichen Kellerdeckendämmung im Bestand [eigene Darstellung]

Brennstoffbetriebene Heizkessel

Abbildung 307 zeigt die leistungsbezogenen Kosten für fossil mit Gas oder Heizöl befeuerte Kessel. Abgesehen von den beiden Studien des Fraunhofer ISE [281] [68] wählen alle anderen einen leistungsabhängigen Preis. Da kleine Kesselleistungen mit hohen Einstiegskosten behaftet ist, ergeben sich stark degressive Zusammenhänge.

Für einen Kessel mit 15 kW Leistung – wie er im Einfamilienhaus häufig vorkommt – liegt der Gesamtbereich an Schätzkosten bei 1750 bis 9640 €. Anhand einer leistungsabhängigen Formel ergeben sich die oberen Werte, minimal 5470 €. Leistungsunabhängig ermittelt werden die beiden unteren Werte, hier maximal 2630 €.

Der Ansatz des Fraunhofer ISE über die Gesamtbandbreite des Bestandes nur eine Leistung anzusetzen, ist grundsätzlich zulässig, solange die kumulierten Kosten aller Erzeuger im Rahmen in einer Makrostudie betrachtet werden. Zu wählen sind dann eine typische Leistung und ein zugehöriger typischer Preis. Die gewählten Annahmen erscheinen allerdings zu niedrig – in Anbetracht der unzähligen Einzelerzeuger in EZFH mit kleinen Leistungen (vgl. 5.6). Der Schnittpunkt der waagerechten Linien mit der Kurvenschar liegt deutlich zu weit rechts im Bild. Für Einzelfallbetrachtungen eignen sich die Formeln nicht (Hinweis: Fraunhofer ISE führt keine Mikrountersuchung mit diesen Ansätzen durch).

Die eigenen Annahmen sind aufgrund der Projekterfahrungen im mittleren Bereich angesiedelt [95] [26]. Der 15-kW-Kessel weist Vollkosten von ca. 8100 € auf.

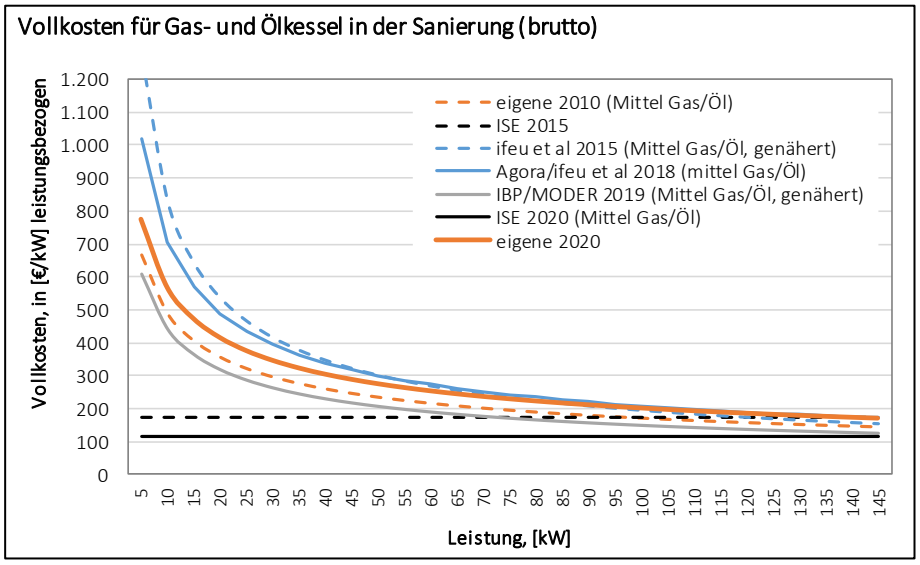


Abbildung 307 Kosten für Gas- und Ölkessel in der Sanierung [eigene Darstellung]

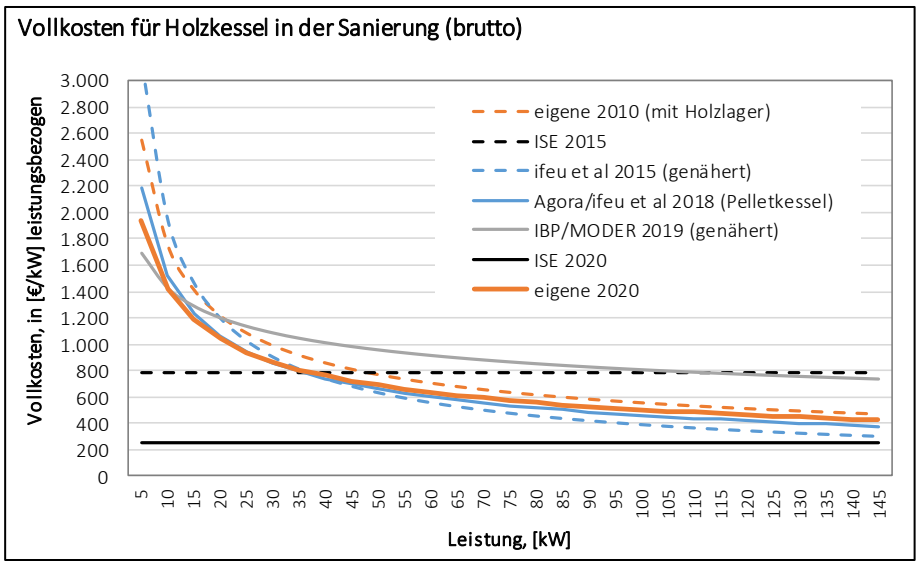


Abbildung 308 Kosten für Holzkessel in der Sanierung [eigene Darstellung]

Abbildung 308 zeigt die Zusammenhänge für Holzkessel. Die Aussagen zu den Zahlen von Fraunhofer ISE (vgl. Abbildung 307) gelten entsprechend. Da mit der Errichtung eines Holzkessels in der Sanierung auch die Schaffung eines geeigneten Lagerraums sowie Anschaffung von Peripheriebauteilen (Puffer usw.) verbunden ist, ergeben sich hohe immer notwendige Investitionen. Die Kurven sind entsprechend noch stärker leistungsabhängig. Die eigenen Ansätze liegen im oberen Mittelfeld der Funktionen. Ein Holzkessel mit 15 kW Leistung führt zu Kosten von ca. 20.000 €.

Sterchele et al. gehen von einer Investitionskostenminderung bis 2050 um 18 % aus, die sich anhand der vergangenen Jahre nicht nachvollziehen lässt [68]. Vor allem da die Gutachter des vorliegenden Gutachtens – aufgrund des begrenzten Biomassebudgets – auch keine größeren Steigerungen in der Marktdurchdringung bzw. der Absatzzahlen zu erwarten sind, wird dieser Ansatz als nicht gerechtfertigt angesehen.

Wärmepumpen

Die starke Leistungsabhängigkeit der Kosten ist auch für Wärmepumpen gegeben. Abbildung 309 zeigt die Zusammenhänge für Erdreichwärmepumpen, Abbildung 310 für Außenluftwärmepumpen.

Die Kostenfunktionen von AGORA/IFEU et al. von 2018 [128] passen in beiden Fällen nicht in das ansonsten verfügbare Feld von Kostendaten aus anderen Literaturquellen. Sie werden als zu gering angesehen. Dies ist jedoch kein systematischer Ansatz, der für alle TGA-Anlagen gelten würde. Er gilt insbesondere für Erdreichwärmepumpen und abgeschwächt auch für Außenluftwärmepumpen. Anderen Technologien sind jeweils eher „typisch" gewertet. Ein solches Ungleichgewicht verschiebt (gewollt oder ungewollt) die Aussage einer Studie in Richtung „Wärmepumpe" als präferierte Zukunftstechnologie.

Die Schätzkosten einer Erdreichwärmepumpe mit 10 kW Leistung erstrecken sich von ca. 14.000 € (AGORA/IFEU et al) über ca. 15.400 bis 17.400 € (Fraunhofer ISE) bis hin zu 19.800 bis 27.800 €. Jeweils incl. der Erschließung der Quelle. Der selbst gewählte Ansatz liegt bei 24.000 € im oberen Mittelfeld.

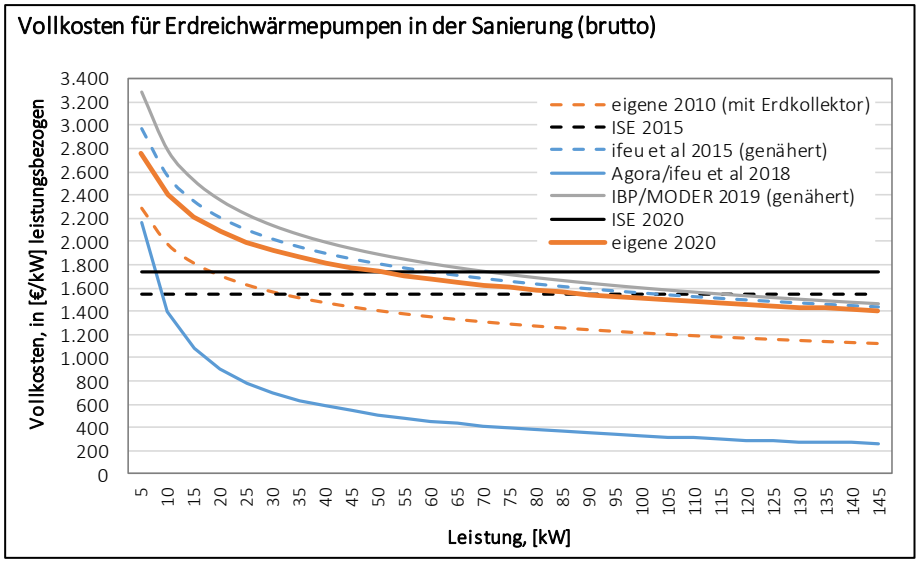


Abbildung 309 Kosten für Erdreichwärmepumpen in der Sanierung [eigene Darstellung]

Die Aussagen zu den Zahlen von Fraunhofer ISE (vgl. Abbildung 307) gelten entsprechend. Anders als bei den Gas- und Ölkesseln liegen die Schnittpunkte der leistungsunabhängigen Schätzkosten (Fraunhofer ISE) und der leistungsabhängigen Kurvenschar (andere Quellen) eher mittig oder links im Bild. Es ist davon auszugehen, dass bei einer Makrostudie die kumulierten Gesamtkosten aller in Deutschland befindlichen Gebäude daher besser passt.

Auf Basis von Abbildung 309 und der Annahme, alle Erzeuger in Deutschland hätten eine Leistung von 50 kW führte die Funktion „ISE 2020" zu denselben Kosten wie die Funktion „eigene 2020" (da die beiden Kurven sich bei 50 kW schneiden). Liegen real aber 50 % der Erzeuger unter der Marke von 50 kW und 50 % darüber (gleiche Gesamtleistung), ist die kumulierte Kostensumme vermutlich höher als Fraunhofer ISE sie schätzt, da viele kleine Erzeuger spezifisch teurer sind. Kann man davon ausgehen, dass 50 kW ohnehin nicht der repräsentative Mittelwert ist, ergeben sich insgesamt real höhere Kosten.

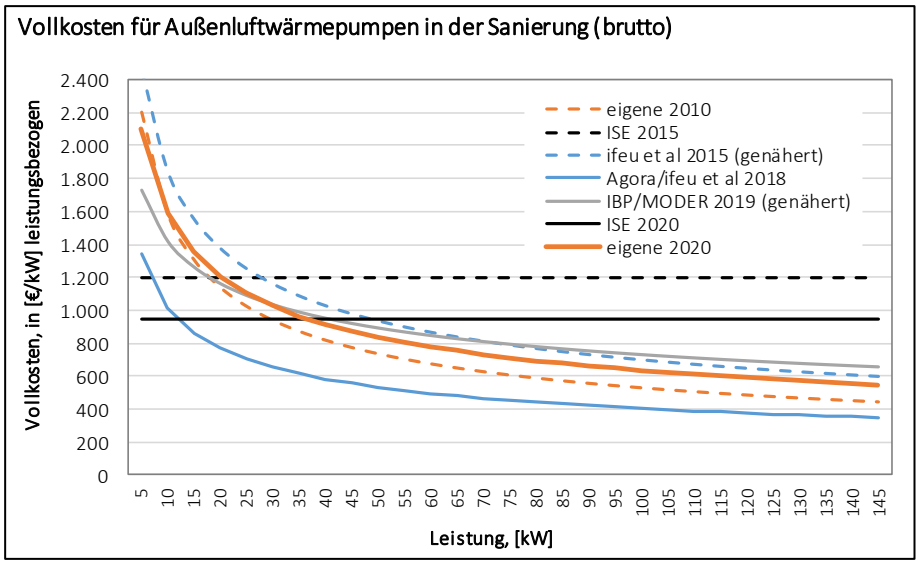


Abbildung 310 Kosten für Außenluftwärmepumpen in der Sanierung [eigene Darstellung]

Für die Außenluftwärmepumpen gelten die Aussagen entsprechend.

Blockheizkraftwerke

Abbildung 311 zeigt die Kostenfunktionen für gebäudeintegrierte BHKW mit kleinen Leistungen. Die Werte sind auf die elektrische Leistung der Geräte bezogen. Für ein Modell mit einer elektrischen Leistung von 6 kW (und entsprechend einer thermischen Leistung von z. B. 15 kW, Stromkennzahl 0,4) liegen die Werte zwischen 9.700 € und 43.800 €. Die höchste Kurve ist eine eigene Recherche aus dem Jahr 2010 [26].

Aus Basis der heute verfügbaren Kostenfunktion, u. a. des IBP, wurden die Werte nach unten korrigiert. Es ergeben sich nach der aktuellen eigenen Funktion Kosten von 26.300 € für das 6/15 kW-Modell. Die Kostenansätze von Fraunhofer ISE [281] [68] passen für kleine Leistungen nach Ansicht der Gutachter nicht. Das genannte Modell hätte einen Preis von nur ca. 10.000 €. Das entspricht der Hälfte des Listenpreises typischer Modelle dieser Größe – jedoch ist noch kein Pufferspeicher, Einbau, Verrohrung usw. enthalten.

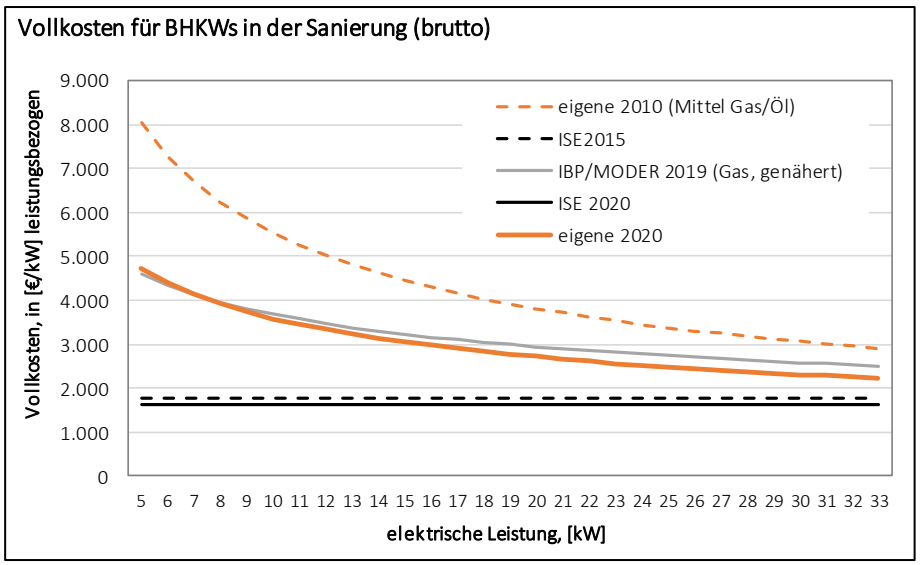


Abbildung 311 Kosten für gebäudeintegrierte BHKWs in der Sanierung [eigene Darstellung]

Lüftungstechnik

Abbildung 312 und Abbildung 313 zeigen die Ansätze für Lüftungsanlagen, die im Bestand nachgerüstet werden. Eine größere Datenbasis von Primärdaten entstammt den Untersuchungen des IWU (u. a. [319]). Hier werden wohnflächenbezogene Werte abgeleitet. Da ein Teil der Investition Grundkosten sind, die unabhängig von der Wohnungsgröße zu verzeichnen sind, ergeben sich degressive Funktionen. Vereinfachtere Ansätze sind größenunabhängig, so auch die eigenen Ansätze. Es wird davon ausgegangen, dass in einem großen Mehrfamilienhaus die Anlagen nicht gebäudeweise, sondern wohnungs- oder abschnittsweise installiert werden. Dies vereinfacht neben der Einhaltung von Brandschutzanforderungen auch die Einregulierung und Regelung im Betrieb.

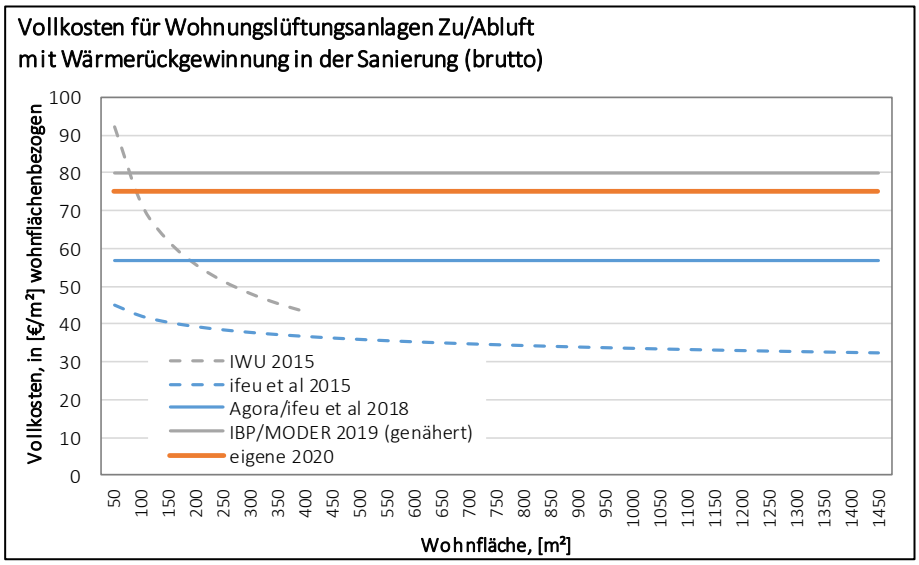


Abbildung 312 Kosten für Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung in der Sanierung [eigene Darstellung]

Für ein 150 m² großes Gebäude (oder eine entsprechende Wohnung) ergeben sich Vollkosten im Bereich von ca. 6.100 bis 12.300 €. Die eigene Annahme führt zu Schätzkosten von 11.300 €. Insbesondere die Tatsache, dass Raumhöhen im Bestand vielfach nicht gegeben sind und sich daraus ein erhöhter Planungs- und Ausführungsaufwand ergibt, begründen diese Annahme im oberen Segment.

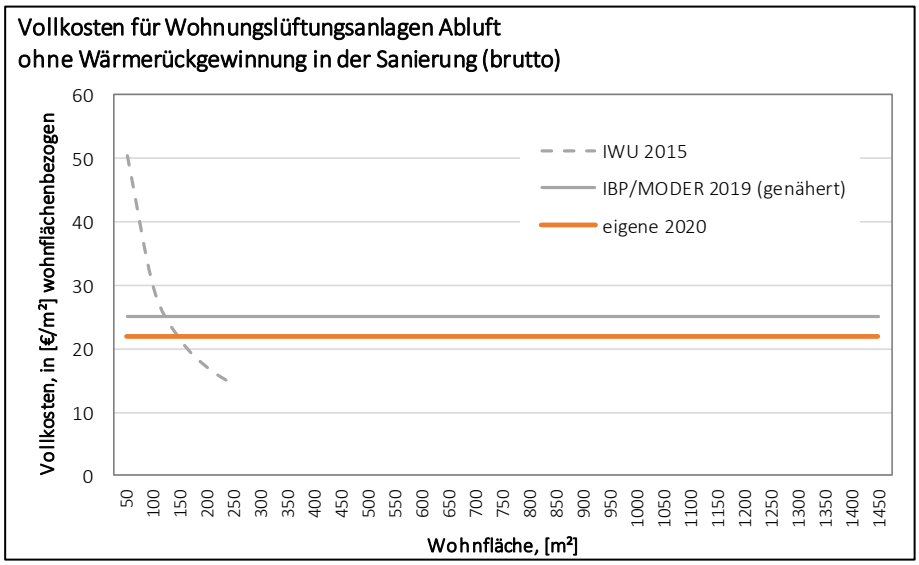


Abbildung 313 Kosten für Abluftanlagen in der Sanierung [eigene Darstellung]

Die Kosten einer Abluftanlage ergeben sich im 150 m²-Gebäude zu 3.200 bis 3.800 €. Der eigene Ansatz liefert einen Wert von 3.330 €. In beiden Fällen sind die Kosten aus der Studie von IFEU et al. näherungsweise bestimmt, indem eine typische Raumhöhe und ein Luftwechsel angenommen wurden. Die Studie selbst lieferte Werte für verschiedene Anlagenvolumenströme.

Solarthermie und Photovoltaik

Abbildung 314 stellt Kostenansätze für die Solarthermie zusammen. Die Werte sind kollektorflächenbezogen. Am gebräuchlichsten ist die Festlegung eines Fixwertes. Lediglich IFEU et al. [34] berücksichtigen den vorhandenen Degressionseffekt, den große Anlagen mit sich bringen, weil Kosten für Speicher, Regelung, Verrohrung usw. nicht proportional zur Kollektorfläche wachsen.

Für eine 7 m²-Anlage (mit einem typischen Speicher von ca. 400 l Volumen, der inbegriffen ist) ergeben sich Kosten zwischen 3.500 bis 7.600 €. Der eigene Wert (hier 6.300 €) wurde eher im oberen Bereich angesiedelt, da Praxiserfahrungen mit Solarthermie entsprechend gegeben sind. Noch 2014 wurden Anlagen einem Monitoring unterzogen, die auf Vollkosten (ohne Planung) von 1.200 €/m² kamen [26].

Ob die Zahlen aus der Studie von AGORA/IFEU [128] et al. tatsächlich korrekt sind, kann nicht abschließend geklärt werden, da die Formelangabe im Projektbericht nicht eindeutig nachvollziehbar ist.

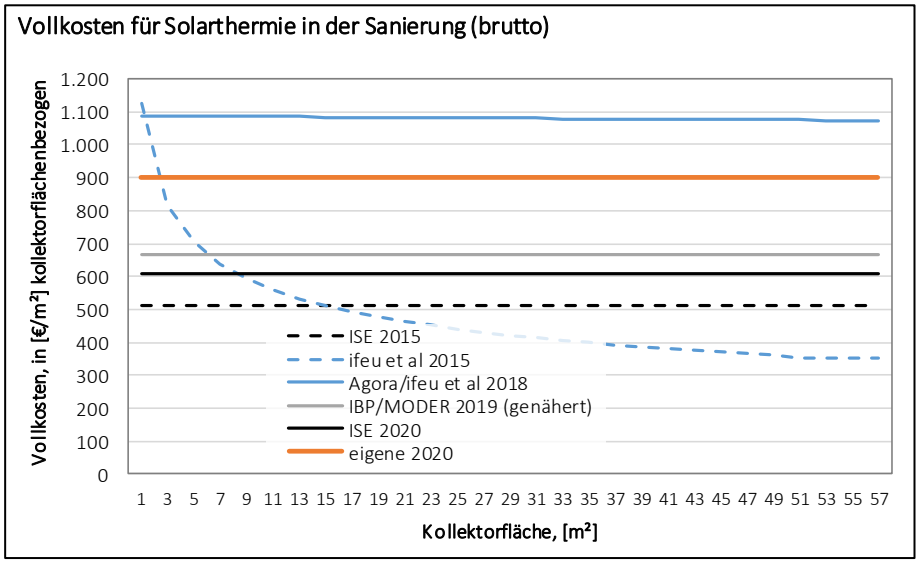


Abbildung 314 Kosten für gebäudenahe/integrierte Solarthermie in der Sanierung [eigene Darstellung]

Die Datenbasis für Photovoltaik ist am stärksten dem Zeiteinfluss unterworfen, da die (junge) Technologie noch immer einem Preisverfall unterliegt. Zwischen dem Jahr 2000 und 2015 hat es einen Preisverfall von 83 % gegeben [90]. Je älter die Studien, desto höher tendenziell die Kostenannahmen. Abbildung 315 zeigt typische Annahmen für die Nachrüstung im Bestand als gebäudenahe oder gebäudeintegrierte Anlage.

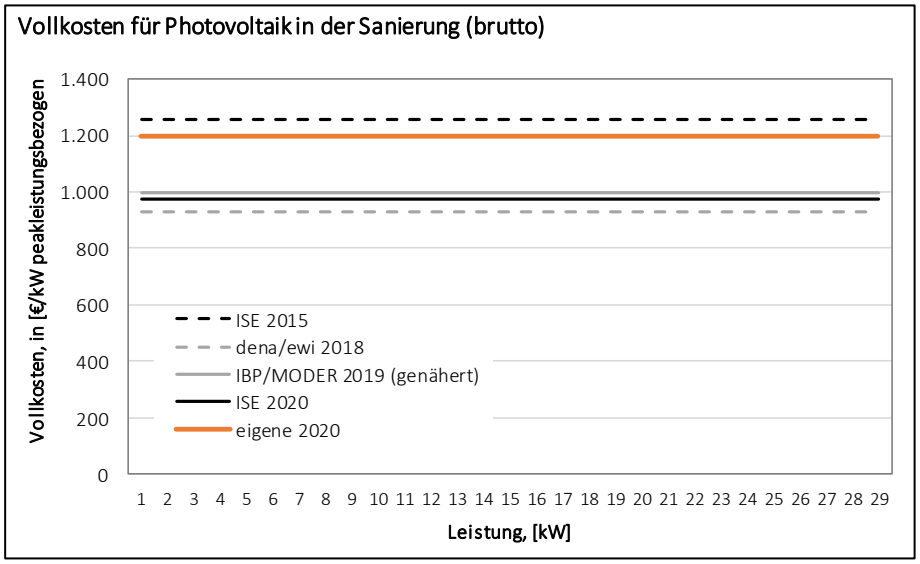


Abbildung 315 Kosten für gebäudenahe/integrierte Photovoltaik in der Sanierung [eigene Darstellung]

In einer Bandbreite von 5.600 bis. 7.500 € liegen die Werte einer 6 kW-Anlage (näherungsweise 30 m²), wie sie häufig in kleineren Objekten vorkommt. In der Reihe der verfügbaren Zahlen wird ein eher konservativer Wert (hier: 7.200 €) gewählt, um auch notwendige Änderungen an der zentralen Elektrik eines Bestandsobjektes zu berücksichtigen. Der künftig zu erwartende weitere Preisverfall kann durch einen Lernfaktor berücksichtigt werden, siehe Anhang 4.2.6.

Nah- und Fernwärme

Abbildung 316 zeigt die Kostenansätze für den Gebäudeanschluss (mit einer Übergabestation incl. Speicher) an ein Wärmenetz. Wie für andere Erzeuger auch typisch, ist eine Leistungsabhängigkeit gegeben. Für ein Mehrfamilienhaus mit 50 kW Anschlussleistung liegen die Werte in einem Bereich von 5.000 bis 12.200 €. Der eigene Wert (7.100 €) wurde gegenüber der Ersterhebung 2010 geringfügig modifiziert.

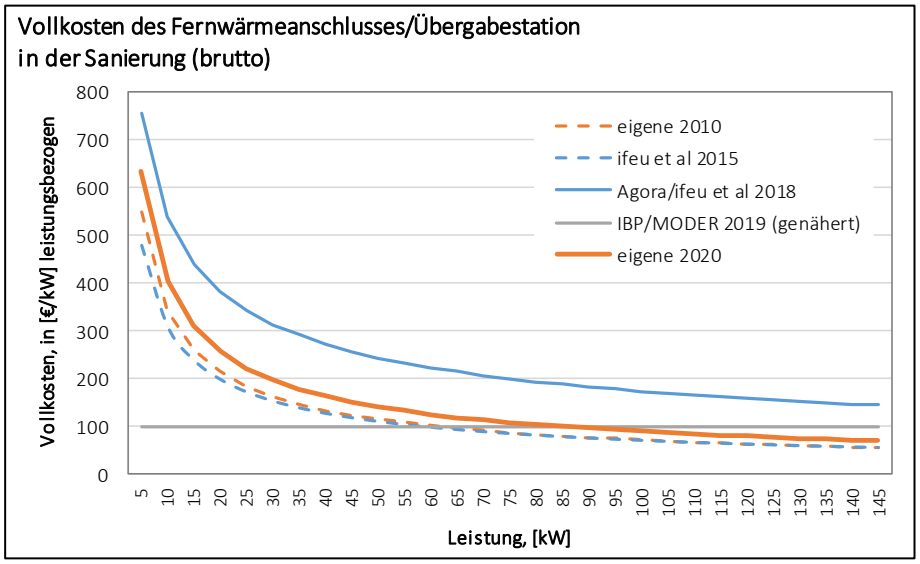


Abbildung 316 Kosten für Wärmenetzanschlüsse in der Sanierung [eigene Darstellung]

Neben dem Hausanschluss wird ein Trassennetz benötigt. Die Literatur zu dieser Thematik ist begrenzt. Folgende Werte finden sich (auf eine grafische Darstellung wird verzichtet, da keine Abhängigkeiten gegeben sind):

- Fraunhofer ISE 2020: 400 €/kW_{th} [68]
- AGORA/IFEU et al: 250 €/m im ländlichen Raum und 400 €/m im urbanen Raum [128]
- eigene Werte: ca. 450 €/m im befestigten Gelände [26] sowie ca. 50 % davon im unbefestigten Gelände [318]

Die Angabe von leistungsbezogenen Werten wird als wenig zielführend eingeschätzt. Die Leistung der zu versorgenden Abnehmer hat vor allem einen Einfluss auf den Volumenstrom und damit den Durchmesser der Leitungen. Dieser trägt seinerseits nur eher geringfügig zu den Kosten bei; entscheidend ist vor allem die Länge des Netzes.

Peripherie

Neben der Baukörpermodernisierung und den Wärmeerzeugern ergeben sich weitere Kosten für die Trinkwarmwasserspeicherung, alternativ für Durchlauferhitzer. Die sich ergebenden Kostenfunktionen sind in Tabelle 178 enthalten. Dabei ist die Funktion für den Speicher eine Aktualisierung der früher selbst abgeleiteten Funktion [318]. Der Ansatz für den Durchlauferhitzer entstammt [320]. Es wird davon ausgegangen, dass eine Wohneinheit jeweils einen Durchlauferhitzer mit 20 kW Leistung erhält.

Kosten für Pumpen, Thermostatventile, Heizflächen und Rohrnetze werden nicht separat angesetzt. Es wird nach Projekterfahrung davon ausgegangen, dass die langlebigen Bauteile darunter überwiegend bis zum Ende der Lebensdauer eingesetzt werden. Dagegen weisen die kurzlebigen Bauteile eher geringe Kosten auf, so dass im Zusammenhang mit der Unsicherheit aller Kosten insgesamt eine separate Berücksichtigung nicht sinnvoll ist.

Komplette Systemwechsel (Zentralisierung innerhalb des Gebäudes, Dezentralisierung) sind ggf. mit Kosten für zusätzliche Leitungsnetze (incl. Durchbrüchen) oder Kabelwege verbunden. Es wird davon ausgegangen, dass solche Maßnahmen nur umgesetzt werden, wenn ohnehin die zentralen Netze erneuert werden. Die alternativen Lösungen werden nur dann umgesetzt, wenn keine Mehrkosten zu verzeichnen sind.

Optimierung und Monitoring

Für die nachträgliche Optimierung (incl. hydraulischer Abgleich) von Heizungsanlagen wird der Kostenansatz aus dem eigenen DBU-Forschungsvorhaben „Optimus“ [23] fortgeschrieben und an das aktuelle Preisniveau angepasst. Darüber hinaus wird – entgegen der früheren Umsetzung 2006 – davon ausgegangen, dass für die Berechnung (Planung mit Software) überwiegend Ingenieurleistung angesetzt wird, während die Umsetzung dann durch das Handwerk erfolgt. Ein Tausch von Heizflächen ist nicht enthalten, jedoch wird davon ausgegangen, dass wahlweise einige der Thermostatventile oder eine Pumpe bzw. ein Differenzdruckregler getauscht werden. Diese beiden Fälle führen zu mittleren Kosten in der Bandbreite der 2006 erhobenen Ansätze. Die grafische Aufbereitung der Zusammenhänge ist Abbildung 317 zu entnehmen.

Für ein beispielhaftes Einfamilienhaus mit 150 m² Wohnfläche ergeben sich im Jahr 2020 mittlere Optimierungskosten von 5,6 €/m² bzw. 830 €. Bei einem größeren Mehrfamilienhaus mit 1200 m² Wohnfläche belaufen sich die Werte auf 3,0 €/m² bzw. 3.600 €.

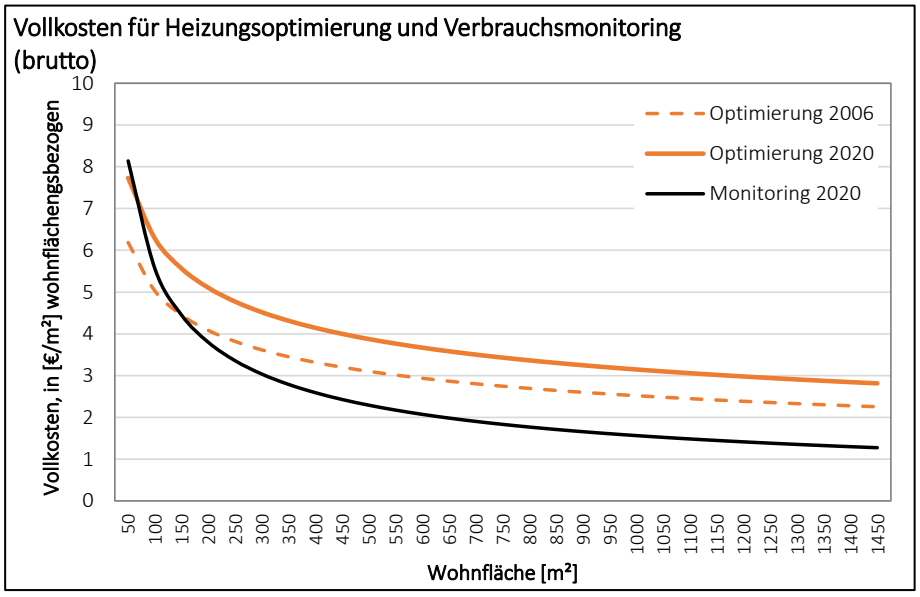


Abbildung 317 Kosten für Heizungsoptimierung und Verbrauchsmonitoring [eigene Darstellung]

Abbildung 317 zeigt auch geschätzte Kosten für ein niederschwelliges Verbrauchsmonitoring, welche sich aus folgenden Einzelaspekten zusammensetzen:

- die Nachrüstung eines Wärmemengenzählers bzw. bei größeren Objekten mehrerer Zähler für verschiedene Kreise ohne Eichung (EFH 150 m²: ca. 300 €, MFH 1200 m²: ca. 680 €)
- alternativ je nach Größe des Objektes entweder manuelle Ablesung von Daten über einen Zeitraum von 3 Jahren, z. B. 6 Mal jährlich, oder Digitalisierung von Daten (EFH 150 m²: 75 €, MFH 1200 m²: 600 €)
- automatisierte Auswertung mit einer Software, digitale Berichtserstellung, jedoch manuelle Dateninterpretation mit Handlungshinweisen für den Eigentümer über 3 Jahre (EFH 150 m²: 290 €, MFH 1200 m²: 550 €)

Daraus ergeben sich Gesamtkosten für ein beispielhaftes Einfamilienhaus mit 150 m² Wohnfläche von 4,4 €/m² bzw. 670 €. Bei einem größeren Mehrfamilienhaus mit 1200 m² Wohnfläche belaufen sich die Werte auf 1,4 €/m² bzw. 1.700 €. Die Kosten fallen in einem Dreijahreszeitraum nach einer größeren Modernisierung an. Die gewählten Kostenansätze entstammen eigenen Projekterfahrungen mit dem Monitoring.

Einbezug der Kostengruppe 700

Da die Vollkosten häufig nur Positionen der Kostengruppen 300 und 400 (nach DIN 276) umfassen, ist dies auch für die sich daraus ergebenden „Sowiesokosten“ und „energiebedingten Mehrkosten“ gegeben. Der Aufwand der Planung – Kostengruppe 700 – fehlt. Allerdings führt dies dazu, dass insbesondere private Bauherren den Investitionsaufwand unterschätzen. Eine Begründung kann sein: diese Position ist ohnehin – auch ohne energetische Verbesserungen – notwendig und fällt damit im weiteren Verlauf der Betrachtungen heraus (z. B. beim Vergleich zweier Konzepte).

Die Praxiserfahrung zeigt, dass zum einen energetische Verbesserungen einen höheren Planungsaufwand haben als reine Instandhaltungen und zum zweiten, dass aufwändige Energiekonzepte einen erhöhten Planungsaufwand haben als Standardkonzepte.

Zur transparenten Offenlegung aller Kosten ist die Kostengruppe 700 in die Betrachtungen einzubeziehen. Zumindest die Mehrkosten für die Planung, welche sich aus einem erhöhten Standard ergeben, sind in die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Maßnahmen zu überführen. Auch bietet sich dadurch die Chance, Kosten für das Monitoring und die Qualitätssicherung im laufenden Betrieb zu berücksichtigen.

Eigene Erfahrungen mit Konzepten führten zu folgenden Mehrkosten [26] für Kostenpositionen, die der Gruppe 700 zuzurechnen sind:

- Außenwanddämmung auf Passivhausniveau (brutto): 85 €/m² (ohne KG 700) bzw. 110 €/m² (mit KG 700 anteilig für Architekt, Planer, Projektsteuerer, Qualitätssicherer)
- Nahwärmeanschluss plus Solarthermie (brutto): 1350 €/m² (ohne KG 700) bzw. 1880 €/m² (mit KG 700 anteilig für Planer, Projektsteuerer, Statiker)

Die genannten Kosten incl. der KG 700 liegen 30 bzw. 40 % über den Werten der KG 300/400. Ein Aufschlag von 30 % wird daher als realistisch angesehen.

Zusammenfassende Kostenfunktionen

Tabelle 178 fasst die Erkenntnisse zu den Kostenfunktionen zusammen, welche grafisch in Abbildung 301 bis Abbildung 317 vorab dargestellt wurden. Darüber hin aus ist ein Anteil von „Sowiesokosten“ angegeben, dessen Zustandekommen in Anhang 5.8.4 näher erläutert wird.

Komponente	Vollkosten (ohne KG 700)	Sowiesokosten (ohne KG 700)
bauliche Maßnahmen		
Außenwanddämmung	K [€] = A [m²] · (90 + 2,9 · d [cm])	K [€] = A [m²] · 60
Steildachdämmung	K [€] = A [m²] · (170 + 2,0 · d [cm])	K [€] = A [m²] · 140
Flachdachdämmung	K [€] = A [m²] · (140 + 2,4 · d [cm])	K [€] = A [m²] · 110
Dachdämmung allgemein	K [€] = A [m²] · (155 + 2,2 · d [cm])	K [€] = A [m²] · 125
Fensteraustausch	K [€] = A [m²] · (870 - 370 · U [W/m²K])	K [€] = A [m²] · 389
Oberste Geschossdecke	K [€] = A [m²] · (30 + 2,0 · d [cm])	K [€] = 0
Kellerdecke	K [€] = A [m²] · (45 + 1,5 · d [cm])	K [€] = 0
Bodenplatte	K [€] = A [m²] · (100 + 4,0 · d [cm])	K [€] = 0
grundsätzliche Anlagentechnik		
Gas- und Heizölkessel	K [€] = $\dot{Q}_{th}$ [kW] · (1600 · $\dot{Q}_{th}$ [kW] $^{-0,45}$)*	K [€] = $\dot{Q}_{th}$ [kW] · (1600 · $\dot{Q}_{th}$ [kW] $^{-0,45}$)
Biomassekessel	K [€] = $\dot{Q}_{th}$ [kW] · (4000 · $\dot{Q}_{th}$ [kW] $^{-0,45}$)*	
Erdreichwärmepumpe	K [€] = $\dot{Q}_{th}$ [kW] · (3800 · $\dot{Q}_{th}$ [kW] $^{-0,20}$)*	
Außenluftwärmepumpe	K [€] = $\dot{Q}_{th}$ [kW] · (4000 · $\dot{Q}_{th}$ [kW] $^{-0,40}$)*	
Wärmenetzanschluss	K [€] = $\dot{Q}_{th}$ [kW] · (1800 · $\dot{Q}_{th}$ [kW] $^{-0,65}$)*	

Tabelle 178 Kostenfunktionen (brutto) [eigene Darstellung]

additive Anlagentechnik			
BHKW, gebäudeintegriert	$K [€] = \dot{Q}_{el} [kW] \cdot (9000 \cdot \dot{Q}_{el} [kW]^{-0,40})$*		K [€] = 0
Zu-/Abluftanlage mit WRG	$K [€] = A_{wohn} [m^2] \cdot 75$		
Abluftanlage ohne WRG	$K [€] = A_{wohn} [m^2] \cdot 22$		
Durchlauferhitzer, elektrisch	$K [€] = \dot{Q}_{el} [kW] \cdot 50$		
Trinkwasserspeicher, elektrisch	$K [€] = V [l] \cdot 3,5 + 1000$		
Solarthermieanlage	$K [€] = A_{koll} [m^2] \cdot 900$		
Photovoltaikanlage	$K [€] = P [kW] \cdot 1200$		
Wärmenetze			
neues Wärmenetz, urban	$K [€] = L_{TR} [m] \cdot 450$		K [€] = 0
neues Wärmenetz, ländlich	$K [€] = L_{TR} [m] \cdot 250$		
Optimierung und Monitoring			
Heizungsoptimierung	$K [€] = A_{wohn} [m^2] \cdot (25 \cdot A_{wohn} [m^2]^{-0,30})$*		K [€] = 0
Verbrauchsmonitoring	$K [€] = A_{wohn} [m^2] \cdot (70 \cdot A_{wohn} [m^2]^{-0,55})$*		
Legende und Hinweise			
A: Bauteilfläche	d: Dämmschichtdicke	P: Peakleistung	U: Wärmedurchgangskoeffizient
A_{koll}: Kollektorfläche	K: Kosten	$\dot{Q}_{el}$: elektrische Leistung	V: Volumen
A_{wohn}: Wohnfläche	L_{TR}: Trassenlänge	$\dot{Q}_{th}$: Wärmeleistung	* Formel könnte vereinfacht werden

Tabelle 178 Kostenfunktionen (brutto) [eigene Darstellung] (Fortführung)

Mit den Bruttokostenfunktionen (zzgl. des Aufschlags von 30 % für die Kostengruppe 700) kann eine Bewertung in der Mikroebene erfolgen. Für die Makroebene wird die Mehrwertsteuer entsprechend gekürzt.

5.8.3 Wartungs- und andere Folgekosten

In einer Wirtschaftlichkeitsbewertung werden – sowohl mikro-, als auch makroökonomisch – kapitalgebundene Kosten (Investitionen), betriebsgebundene Kosten (u. a. Wartung, Inspektion) und verbrauchsgebundene Kosten (Energiekosten) berücksichtigt.

Instandhaltung

Die DIN 31051 definiert die Instandhaltung als Einheit dreier Grundmaßnahmen: der Inspektion, der Wartung und der Instandsetzung (incl. Reparatur). Sie alle halten das Bauprodukt während des Lebenszyklus in einem funktionsfähigen Zustand oder stellen diesen wieder her, ohne ihn über das Ausgangsmaß zu verbessern.

- Inspektion: Feststellung und Beurteilung des aktuellen Zustandes, ggf. durch Messung, Abgleich mit dem Sollzustand, möglichst vor Eintritt eines Funktionsausfalls, vorausschauendes Ableiten des Zeitpunkts eines kommenden Funktionsabfalls (anhand der Abnutzung)
- Wartung: Maßnahmen zur Erhaltung des Sollzustandes, Reinigung und andere präventive Maßnahmen
- Instandsetzung: Ersatz defekter Bauteile, z. B. der verschleiß- bzw. abnutzungsbedingten Komponenten.

Übertragen auf die üblichen Maßnahmen der energetischen Gebäudesanierung ergeben sich bei der Bewertung der Instandhaltung Abgrenzungsschwierigkeiten.

Kostenabgrenzung und rechnerische Bewertungsmöglichkeiten für bauliche Maßnahmen

Abbildung 318 beschreibt idealisiert die Zusammensetzung der Kosten exemplarisch für ein Bauteil, z. B. eine Wand. Die Erstinvestition teilt sich auf in Kosten für die tragende Konstruktion, die praktisch verschleißfrei ist (schwarz) sowie für Schichten mit Verschleiß (weiß), z. B. Putz. Mit Wartung und Inspektion (blau) ergibt sich eine gewisse Nutzungsdauer, bis eine Instandsetzung (grau) der Putzschicht anfällt, dann werden die Putzschichten instandgesetzt und in diesem Fall auch eine energetische Maßnahme durchgeführt, z. B. Dämmung (Fall A). Instandsetzungsmaßnahmen sind eher selten und können an die energetische Verbesserung gekoppelt werden.

Wird die Wartung und Inspektion unterlassen, kommt es entweder zu längeren Intervallzeiten, bei dann größeren Kosten (Fall B) oder zu kürzeren Lebensdauern bei gleichen Kosten (Fall C). Über die Zeit gesehen, sind die Kosten der Wartung/Inspektion (blau) plus Instandsetzung (grau) etwa gleich groß, nur anders zeitlich verteilt. Der Fall B scheint in der Praxis derjenige zu sein, der sich am häufigsten einstellt, wenn man zusätzliche Anreize (steuerliche Aspekte oder Förderung usw.) außer Acht lässt.

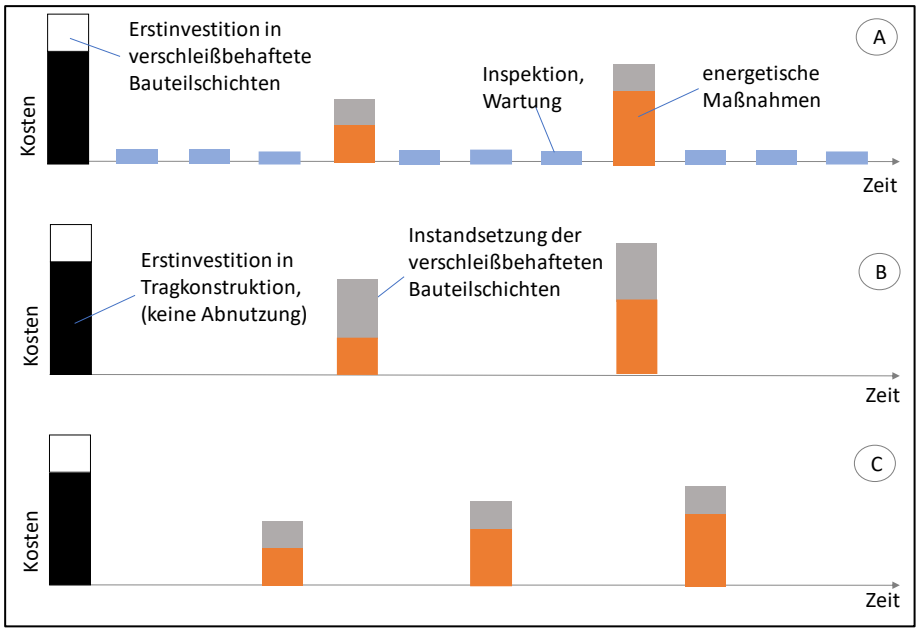


Abbildung 318 Exemplarische Abgrenzung der Kostenanteile für eine Außenwand im Zeitverlauf [eigene Darstellung]

Bauliche Maßnahmen weisen eher lange Instandhaltungsintervalle auf, wobei zwischen den Zeitpunkten der Investitionen kaum Wartungs- und Inspektionskosten zu verzeichnen sind. Zum Zeitpunkt der Investition ist jedoch der Anteil ohnehin fälliger Kosten (Instandsetzung) vergleichsweise groß und der Anteil energetischer Zusatzkosten etwas geringer.

Den laufenden Kosten lassen sich entweder die „Inspektion und Wartung“ (blau) oder die Summe aus „Inspektion, Wartung und Instandsetzung“ (blau plus grau) zuordnen. Im Gegenzug bestehen die Ansätze für die Investition entweder aus der Summe „Instandsetzung plus energetische Maßnahme“ (orange plus grau) oder nur der „energetischen Maßnahme“ (orange). Wichtig für langfristige Betrachtungen ist, dass keine Doppelberücksichtigung der Instandsetzung (grau) erfolgt.

Allein dieses Zuordnungsproblem der Instandsetzung zu den Investitionen oder den laufenden Kosten erklärt die verschiedenen Ansätze in der verfügbaren Literatur, siehe Anhang 5.8.2. Es ist folgender Trend bei der rechnerischen Bewertung festzustellen:

- laufende Aufwendungen für Wartung/Inspektion (ohne Instandsetzung) der baulichen Maßnahmen werden angesetzt, gleichzeitig eher lange Lebensdauern (Fall A in Abbildung 318),
- die Instandsetzung selbst wird dafür zusammen mit der Investition berücksichtigt, jedoch erfolgt eine Aufteilung in „Sowiesokosten“ (Instandsetzung) und „energetisch bedingte Mehrkosten“; nähere Ausführungen in Anhang 5.8.4.

Kostenabgrenzung und rechnerische Bewertungsmöglichkeiten für die Anlagentechnik

Abbildung 319 beschreibt die Zusammensetzung der Kosten exemplarisch für eine anlagentechnische Komponente, z. B. einen Heizkessel. Das gesamte Bauteil ist als verschleißend einzuschätzen. Mit Wartung (blau) sowie Instandsetzung (grau) ergibt sich eine gewisse Lebensdauer, bis eine komplette Neuanschaffung notwendig ist. Das ist grundsätzlich anders als bei baulichen Investitionen, bei der üblicherweise nur Teile des Bauteils erneuert werden. Wird die Wartung und Instandsetzung (blau plus grau) unterlassen, kann eine geringere Lebensdauer vermutet werden (Fälle B/D). Zwischenlösungen sind denkbar, z. B. Wartung (blau) ohne Instandsetzung (grau) führt zu mittleren Lebensdauern.

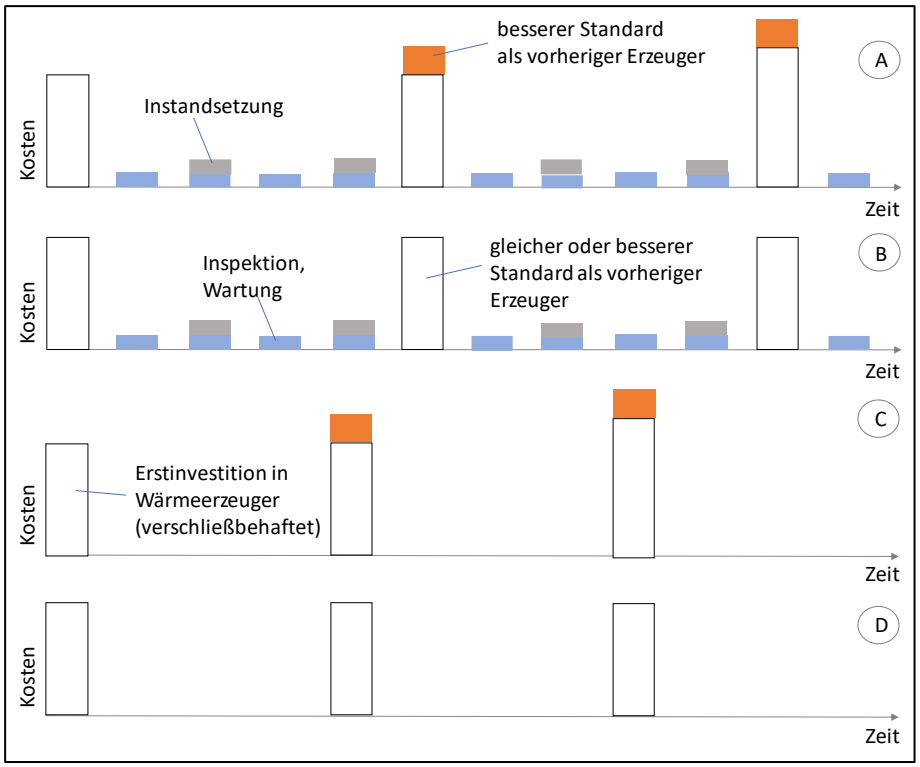


Abbildung 319 Exemplarische Abgrenzung der Kostenanteile für einen Wärmeerzeuger im Zeitverlauf [eigene Darstellung]

Über lange Zeiträume ergeben sich in allen Fällen ähnliche (nicht identische!) Gesamtkosten aus Neuanschaffung (weiß), Instandsetzung (grau) und Wartung (blau).

Für die Plausibilisierung der Annahmen in der Literatur gilt: lange Lebensdauern setzen hohe Ansätze für die wiederkehrenden Betriebskosten (Wartung und Instandsetzung) voraus. Unplausible Wertepaare lassen vermuten, dass Eingangsgrößen „ergebnisorientiert" gewählt wurden.

Im Zusammenhang mit der Neuanschaffung kann ein reiner Ersatz betrieben werden (Fälle B/D). Im Falle eines abgängigen Gaskessels wird beispielsweise erneut ein Gaskessel angeschafft. Der Fall der gleichen Effizienz ist dabei nur selten gegeben, weil energetisch ineffiziente Produkte von besseren Produktgenerationen abgelöst werden, die nicht teurer sind. Bei dieser Betrachtung gibt es keine energetischen Mehrkosten (orange), die über das Maß des Ersatzes hinausgehen. In einer Wirtschaftlichkeitsbewertung sind die Kapitelmehrkosten daher null und der Vorteil der Investition äußert sich allein durch geringere Energiekosten. Das Phänomen der verbesserten Effizienz zum gleichen Preis wird für einzelne Komponenten in Anhang 3.1.3 näher erläutert 3.5.

Alternativ (Fälle A/C) wird aktiv eine Maßnahme ergriffen, die zu energetisch bedingten Mehrkosten (orange) führt. Die Mehrinvestition führt nicht zufällig, sondern geplant auf ein energetisch hochwertigeres Niveau. Der zusätzliche Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung oder Photovoltaik sind praktische Beispiele.

Mehrere Herangehensweisen existieren in der verfügbaren Literatur, siehe Anhang 5.8.1. Es ist folgender Trend bei der rechnerischen Bewertung der Anlagentechnikmaßnahmen festzustellen, der sich von den baulichen Maßnahmen unterscheidet:

- Wartung und Inspektion (blau) sowie Instandsetzung (grau) werden gemeinsam als laufende Kosten verbucht, gleichzeitig werden längere Lebensdauern angenommen (Fälle A/B in Abbildung 319),
- hinsichtlich der Berücksichtigung der Ersatzinvestition für den Wärmeerzeuger werden regulär die Gesamtkosten einschließlich energetischer Mehrkosten (weiß plus orange) berücksichtigt; nähere Ausführungen in Anhang 5.8.4.

Konkrete Ansätze

Für bauliche und anlagentechnische Maßnahmen führt die unterschiedliche Zuordnung der Instandsetzungskosten zu entweder den Investitionen oder den laufenden Kosten zu den typischen Annahmen nach Tabelle 179. Angegeben sind prozentuale Werte, die sich auf die Erstinvestitionssumme beziehen. Die eigenen Annahmen korrespondieren mit dem Lebensdauern nach Anhang 5.9.1.

Ansätze für die Instandhaltung bzw. Instandsetzung, in [%] der Investitionssumme.	IWU/LEG [77]	Steinbeis/IBP [173]	Ökoinstitut/ Fraunhofer ISE [252]	ECOFYS [284]	Fraunhofer ISE [68]	VDI 2067, neu [321]	VDI 2067, alt [322]	eigene Annahmen
Bauliche Maßnahmen/Bauteile								
Gründung		1,1			1,0			0,0
Außenwände	1,0	1,1		0,0				1,0
Decken	1,0	1,1		0,0				0,0
Dächer	1,0	1,1		0,0				1,0
Fenster	1,5			0,0				1,0
Wärmeerzeuger								
BHKW (gebäudeintegriert)	6,0	2,0	5,6		3,0	8,0	8,0	5,0
(elektrische) Wärmepumpe	4,0	2,5	2,8	1,5-3,0	1,0-1,3	2,5	3,0	2,0
Pellets/Holzkessel		3,5	3,2	0,5-1,5	6,0	6,0		5,0
Fernwärmeanschluss		2,5	3,0	0,0		3,0	3,0	1,5
Gasbrennwertkessel	3,0-3,5	2,0	2,8	1,5	2,0	2,5-3,0	2,5-3,0	2,0
Solarthermie, Flachkollektor	3,0	2,0	0,7	0,5	1,2	1,5	1,0	1,5
Ölkessel	3,0-3,5			1,5	2,0			2,0
Andere technische Komponenten								
Photovoltaik		2,0	5,0		2,0			2,0
Wärmenetze im Erdreich	2,0				1,0		1,0	1,0
Lüftung mit WRG	3,5	2,0	4,5	4,0	1,0	0,5-13	0,5-13	5,0
Wärmeverteilung im Gebäude		1,0				0,5-3,0	0,5-3,0	1,0
Abluftanlage								3,0

Tabelle 179 Auswahl von Instandhaltungskosten von Bauprodukten aus verschiedenen Literaturquellen [eigene Darstellung]

Zu den Werten ist anzumerken: in den einzelnen Literaturquellen sind ggf. weitere Annahmen zu finden; es erfolgte eine Auswahl für die energetische Sanierung von Gebäuden (Kraftwerke usw. vernachlässigt). Bei den Wärmeerzeugern ist teilweise die Wartung der Peripherie mit einbezogen, teilweise nicht. Daher sind die Ansätze nur näherungsweise vergleichbar.

Für das Blockheizkraftwerk ist alternativ auch die Verwendung eines betriebsstundenabhängigen Ansatzes sinnvoll. Die obigen Zahlen gelten nur, wenn eine hohe Auslastung (Näherungswert: ≥ 5000 h/a) gegeben ist, das BHKW also als Grundlasterzeuger betrieben wird.

Spezialfälle: Solarthermie und BHKW

Für die Solarthermie ist festzustellen, dass insbesondere zu Beginn der Marktdurchdringung das Bild über die Instandhaltungsansätze sehr unterschiedlich war. Während der VDI im Jahr 2000 den Wert 1,0 % veröffentlichte, schätzte das IWU im Jahr 1999 den Aufwand auf 3,0 % der Investition. Heutige Veröffentlichungen liegen dazwischen. Zumindest der VDI hat 2012 den Wert nach oben auf 1,5 % korrigiert.

Auffällig ist ebenfalls, dass insbesondere in Studien, die eine Solarthermieausbau propagieren (ECOFYS, Fraunhofer ISE, Ökoinstitut) der Wert sehr niedrig angenommen wird – trotz jeweils ähnlicher Lebensdauer von etwa 20 Jahren.

Für das BHKW als Gebäudeerzeuger ist die Erkenntnis ähnlich. Der VDI geht von 8 % jährlichen Aufwendungen für die Instandhaltung bei einer Lebensdauer von 15 Jahren aus – im Jahr 2000 und erneut 2012. Das IWU schätzt 1999 noch konservativer 15 Jahre und 6 % Instandhaltung.

Insbesondere in Konzeptstudien, die den BHKW-Ausbau empfehlen, werden dagegen deutlich abweichende Werte kommuniziert. Fraunhofer ISE nimmt bei einer Lebensdauer von 20 Jahren nur 3 % Instandhaltung an, Steinbeis/IBP sogar nur 2 %. Diese Werte (insbesondere deren Kombination) sind nach Auffassung der Gutachter nicht praxistauglich.

Preissteigerung für Wartungs- und Instandhaltungskosten

Das statistische Bundesamt veröffentlich Zahlen zur Entwicklung der Wartungs- und Instandhaltungskosten von Wohnbauten, siehe Abbildung 320. Der Wert für die Schönheitsreparaturen in Wohngebäuden folgt prinzipiell dem allgemeinen Verbraucherpreisindex.

Der Instandhaltungsindex an Gebäuden (für die sonstigen Maßnahmen, außer Schönheitsreparaturen) weist seit 2006 eine größere Steigung auf. Die genaue Zusammensetzung der Indexberechnung wird im Rahmen des vorliegenden Gutachtens nicht recherchiert. Es ist jedoch ist zu vermuten, dass beispielsweise Positionen wie „Heizungswartung“ darin enthalten sind. Mit der zunehmenden Marktdurchdringung von komplexeren und wartungsintensiveren technischen Anlagen – insbesondere Solarthermie, Holzkessel, BHKW, Wohnungslüftungsanlagen – nach Einführung der EnEV 2002 ist der Anstieg zumindest plausibel.

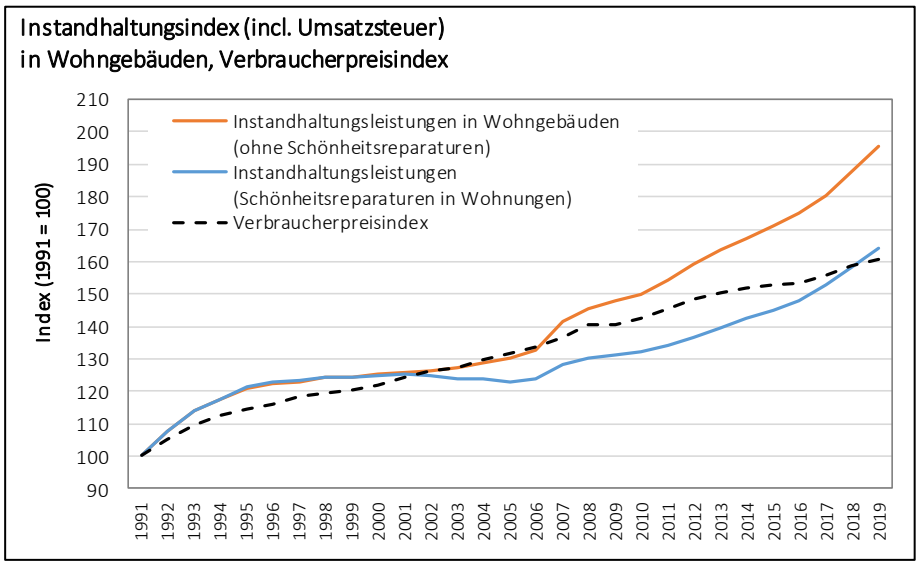


Abbildung 320 Instandhaltungsindex sowie Verbraucherpreisindex seit 1991, eigene Darstellung nach [314]

Der einzelne Wartungsvertrag für eine Technik weist keine überproportionalen Steigerungen auf, sondern folgt in seiner Preisgestaltung der allgemeinen Inflation. Allerdings führt die rein zahlenmäßige Zunahme von wartungsrelevanten Komponenten zu einem Kostenanstieg.

Für künftige Entwicklungen der Wartungskosten ist von einem Gleichlauf mit der Inflation auszugehen, d. h. es werden keine realen (inflationsbereinigten) Preissteigerungen angesetzt. Der absolute Anstieg für das einzelne Gebäude, aber auch die Gesamtheit des Wohnbaubestandes ergibt sich aus der höheren Marktdurchdringung von wartungsintensiveren Bauprodukten, insbesondere im Bereich der TGA. Diese Vorgehensweise verfolgen auch andere Studien, z. B. [124] [68].

Andere Folgekosten

Andere Folgekosten, z. B. erhöhte Gebäudeversicherungen aufgrund von Maßnahmen der energetischen Gebäudesanierung (Solarthermie, Photovoltaik o. ä.) werden nicht berücksichtigt.

5.8.4 Sowieso- und energiebedingte Mehrkosten

Bei der Bewertung von Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen ist zu unterscheiden, welcher Anteil der Kosten ohnehin angefallen wäre („Sowiesokosten“ bzw. „Ohnehinkosten“) und welcher zur energetischen Verbesserung führt („energiebedingte Mehrkosten“). Die Summe beider Kostenanteile sind die Vollkosten.

Gegebener Instandhaltungsbedarf

Die Sowiesokosten sind vor allem durch den Instandhaltungsbedarf an Gebäuden und Anlagen gegeben. Mellwig et al. grenzen im Jahr 2018 den insgesamt für Deutschland feststellbaren Instandhaltungsbedarf in einer Bandbreite von 235 bis 836 €/m² - mit einem wahrscheinlichen Wert um 300 bis 400 €/m² - ein, siehe Abbildung 321.

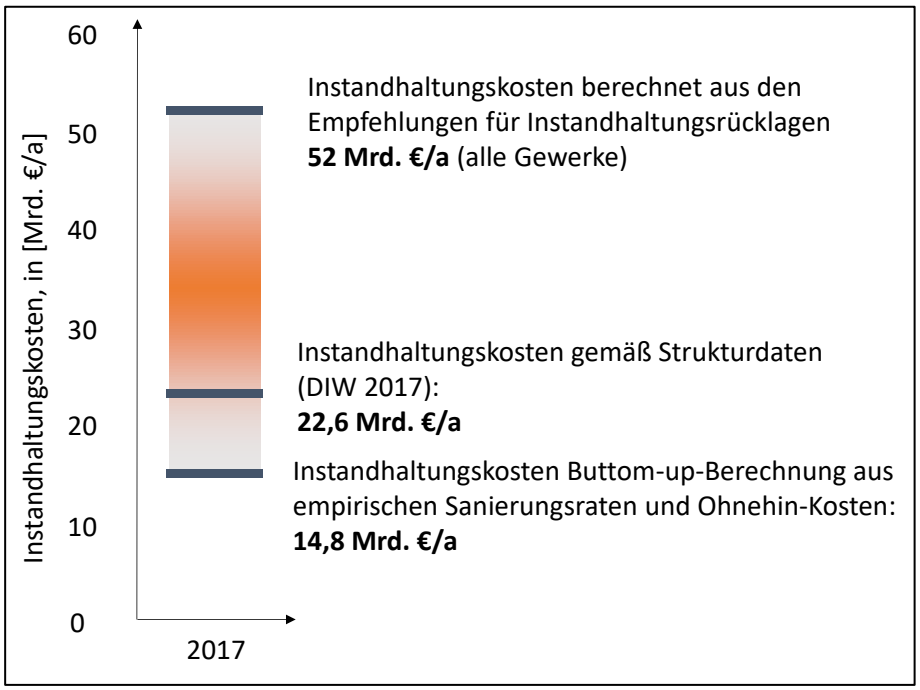


Abbildung 321 Bandbreiten für gesamtdeutsche Instandhaltungskosten, Grafik nach [128]

Der Bedarf ist abhängig von Baualter und Sanierungszustand. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens haben aus eigener Erfahrung bei Bauprojekten die folgende Näherungsgleichung abgeleitet:

$$50\ €/m^2 + 2{,}50\ €/(m^2a) * (2000 - \text{Baujahr})$$

Für Nachkriegs-Mehrfamilienhäuser ergibt sich beispielhaft ein typischer Instandsetzungsbedarf ohne energetische Maßnahmen von 150 €/m² für die dringlichsten Instandsetzungsaufgaben ohne zusätzliche energetische Maßnahmen bei einem Gebäude aus dem Jahre 1960.

Bewertung mit oder ohne Sowiesokosten

Über die Frage des korrekten Einbezugs der Sowiesokosten in Energiekonzepte herrscht keine Einigkeit. Seltener wird mit Vollkosten gerechnet (z. B. in [34]). Regulär ist in Makrostudien bzw. Konzeptstudien zur Energiewende nur der Anteil der „energiebedingten Mehrkosten“ enthalten (z. B. in [43]) oder zumindest für die Wirtschaftlichkeitsbewertung entscheidungsrelevant. Dieser Ansatz folgt dem „Kopplungsprinzip“. Es geht davon aus, dass energetische Maßnahmen nur dann ergriffen werden, wenn an der betreffenden Komponente ohnehin aus anderen Gründen (Instandhaltung, Wohnwertverbesserung) eine Änderung angestrebt wird. Die darüber hinaus gehenden Kosten werden entweder nicht thematisiert oder nur indirekt benannt – beispielsweise unter den „von Förderung ausgelösten Gesamtinvestitionen“.

Henger und Voigtländer fassen die Diskussion über die Verwendung des einen oder anderen Kostenansatzes treffend zusammen [122]:

„Der Mehrertragsansatz und das Kopplungsprinzip sind für jene Fälle richtig, in denen der Anlass der Sanierung nicht vorrangig energetisch motiviert ist […] Davon ist jedoch nicht immer auszugehen, da zur Erreichung der Klimaschutzziele auch energetische Maßnahmen vorgezogen werden müssen, obwohl die einzelnen Bauteile noch über eine ausreichende technische und/oder wirtschaftliche Restlebensdauer verfügen. Es wird daher vielfach argumentiert, dass Vollkostenbetrachtungen besser geeignet sind, um eine wirtschaftliche Bewertung von energetischen Sanierungsmaßnahmen vorzunehmen. Die Vollkosten entsprechen schließlich denjenigen Kosten, die insgesamt für eine Maßnahme – unabhängig von deren individuell festzustellendem Instandhaltungs- oder Modernisierungsanteil – aufzubringen sind.

Die meisten Studien die sich mit Wirtschaftlichkeitsberechnungen von energetischen Modernisierungen beschäftigen, setzen jedoch voraus, dass die energetische Modernisierung zeitgleich mit den notwendigen Instandsetzungen einhergeht (Kopplungsprinzip) und kalkulieren daher mit den energiebedingten Mehrkosten. Die hier geführte Diskussion hat jedoch gezeigt, dass dieses Vorgehen zwar für eine Vielzahl von Modernisierungen angemessen erscheint, jedoch eine Gesamtbetrachtung und -bewertung von Sanierungsprojekten nicht zulässt. Schließlich werden zum Teil auch Modernisierungen vorgezogen, obwohl die Bauteile zu diesem Zeitpunkt noch eine wirtschaftliche oder technische Restlaufzeit aufweisen. Da darüber hinaus auch Abgrenzungsschwierigkeiten […] zwischen Instandhaltungskosten und energetischen Mehrkosten bestehen, ist daher zu empfehlen, bei den Wirtschaftlichkeitsanalysen mit beiden Kostenpositionen zu arbeiten."

Die Auswirkungen sollen an einem Zahlenbeispiel verdeutlicht werden: die im Gebäude befindlichen Fenster (U = 2,8 W/m²K) sind abgängig. Das Energiekonzept schlägt als Ersatz Passivhausfenster (U = 1,0 /m²K) vor. Bei der Berechnung der Energieeinsparung wird der Sprung von 2,8 auf 1,0 W/m²K berücksichtigt. Bei den Kosten ist dies nicht so einfach:

- die gesamten Kosten der Passivhausfenster werden als Investition angesetzt (ungünstigste Wirtschaftlichkeit) und gegen null Investition im Bestand gerechnet; dies ist unplausibel, weil die Fenster als abgängig beschrieben werden
- als Bezugsvariante werden Fenster mit U = 2,8 W/m²K gewählt (reine Instandhaltung, größter Mehrkostenanteil, weil die billigsten Fenster als Alternativ) und deren Kosten „Sowiesokosten" angesetzt; die Schwierigkeit besteht in der Kostenermittlung, weil solche Fenster nicht mehr zu kaufen sind und nach EnEV nur zulässig, wenn die Fenster nicht alle auf einmal getauscht werden (maximal 10 % der Bauteilfläche innerhalb eines Jahres sind nicht EnEV-nachweispflichtig)
- als Bezugsvariante werden Fenster mit U = 1,3 W/m²K gewählt (entsprechend EnEV Anlage 3) und deren Kosten „Sowiesokosten" angesetzt (geringster Anteil an Mehrkosten, weil höchste Sowiesokosten; günstigste Wirtschaftlichkeit); die Schwierigkeit besteht hier bei der Energiebilanzierung, die nicht berücksichtigt, dass auch die Fenster mit dem Bezugs-U-Wert von 1,3 W/m²K zu einer Einsparung gekommen wären

Das Problem verschärft sich, wenn die Fenster des Bestandes noch nicht abgängig sind, sondern noch 5 oder 10 Jahre halten. Die Verfasser des vorliegenden Gutachtens handhaben den Umgang mit Sowiesokosten bei der Erstellung von Einzelkonzepten (Mikroebene) wie folgt:

Keine Sowiesokosten für Maßnahmen, die sonst nicht getätigt werden (z. B. Solarthermie). Keine Sowiesokosten, wenn Bauteile ersetzt werden, die ≤ 25 % der zu erwartenden maximalen Lebensdauer aufweisen (z. B. Dämmung einer erst 10 Jahre alten Fassade). Keine Sowiesokosten, wenn auch mit Verwendung der Vollkosten eine Wirtschaftlichkeit im Einzelfall gegeben ist (dafür Hinweis an den Leser: auch die ohnehin erforderlichen Instandhaltungskosten werden mit erwirtschaftet). In allen anderen Fällen plausible Abschätzung der Sowiesokosten.

Typische Aufteilung zwischen energiebedingten Mehrkosten und Sowiesokosten

Aus den zahlreichen in der Literatur vorhandenen Studien werden nachfolgend zwei näher hinsichtlich der Zahlenwerte für Sowiesokosten und energiebedingte Mehrkosten vorgestellt. Betrachtet werden jeweils nur die Kosten für Maßnahmen, die direkt und indirekt mit der Energieeinsparung zusammenhängen und das Niveau „EnEV 2009" bzw. „Effizienzhaus 100 der KfW" erreichen.

Schulze Darup und Neitzel veröffentlichen 2011 für Mehrfamilienhäuser verschiedener Baualtersklassen (siehe auch Abbildung 322) wohnflächenbezogenen Kennwerte. Deren Vollkosten beläuft sich auf etwa 300 €/m². Der Anteil energetisch bedingter Kosten wird – in den häufig vorkommenden Mehrfamilienhäusern der 1960er und 1970er Jahre – auf etwa ⅓ der Gesamtkosten bestimmt [123]. Zu deutlich anderen Kostenstrukturen führt die Studie von Staniaszek et al. [280]. Auf Basis von Primärliteratur kommt diese zu dem Schluss, dass die Gesamtkosten bei etwa 270 €/m² liegen. Dabei nimmt der energetische Anteil etwa 78 % ein. Dies ist ein Mittelwert über alle Gebäudearten und -altersklassen.

Die Unschärfe des abweichenden Flächenbezugs (Wohnfläche vs. Nettogrundfläche) sowie des Einbezugs nur einzelner Gebäudealtersklassen und -arten wird zunächst außen vorgelassen. Der direkte Vergleich der Zahlen gestaltet sich wie folgt:

- Sowiesokosten der energetisch relevanten Maßnahmen: ca. 60 €/m² ⇔ ca. 200 €/m²
- Energierelevante Mehrkosten: ca. 210 €/m² ⇔ ca. 100 €/m² (orange)
- Gesamtkosten dieser beiden Positionen: ca. 270 €/m² ⇔ ca. 300 €/m²

Bei der bezahlenden Gesamtsumme sind beide Studien fast vergleichbar. In einer Wirtschaftlichkeitsbewertung unterscheidet sich das Ergebnis dennoch um den Faktor 2, wenn nur die „energiebedingten Mehrkosten" in die Bewertung fließen.

Ein weiterführender Vergleich anderer Studien ist beispielsweise Henger/Voigtländer [122] zu entnehmen. Letztere vergleichen die Primärliteratur und finden folgende Bandbreiten vor:

- bei den Einfamilienhäusern Vollkosten von 340 bis 736 €/m² mit Sowiesokosten von 165 bis 486 €/m²
- bei den Mehrfamilienhäusern Vollkosten von 205 bis 512 €/m² mit Sowiesokosten von 79 bis 289 €/m².

Zwischen ⅓ bis ⅔ Sowiesokosten lassen sich feststellen. Darin begründen sich eine deutlich abweichende Aussage zur Wirtschaftlichkeit von energetischen Maßnahmen, zu der die jeweiligen Forscher kommen können.

Absolute oder relative Kostenanteile

Bei der konkreten Festlegung von Kostenansätzen bzw. Kostenfunktionen ist eine Entscheidung zu treffen, ob die Sowiesokosten als absoluter Wert oder als relativer Anteil der Vollkosten angegeben werden. Henger und Voigtländer untersuchen eine große Anzahl von Primärstudien und finden eine Bandbreite von 29 % bis 61 % für den Sowiesokostenanteil an den Vollkosten vor [122].

Da Sowiesokosten – wie der Name ausdrückt – vergleichsweise unabhängig vom anschließend durch Maßnahmen realisierten Standard sind, empfiehlt sich (u. a. aus mathematischer Sicht) die Verwendung von Absolutwerten. Anderenfalls ergeben sich Funktionen, die abhängig vom späteren Dämmstandard selbst (siehe Holm [201]), was für das Verständnis nicht förderlich ist. Beispiel – anhand von Zahlenwerten einer Dämmmaßnahme:

- 12 cm Dämmung: Gesamtkosten 105 €/m², davon Sowiesokosten 60 €/m² und energiebedingte Mehrkosten 45 €/m² - Anteil der Sowiesokosten 57 %
- 16 cm Dämmung: Gesamtkosten 120 €/m², davon Sowiesokosten 60 €/m² und energiebedingte Mehrkosten 60 €/m² - Anteil der Sowiesokosten 50 %

Besser: Angabe von Sowiesokosten als Absolutwert 60 €/m² und Entwicklung einer dämmdickenabhängigen Funktion für die Vollkosten, siehe Anhang 5.8.2.

Ungewollte Verbesserung des Standards

Eine eindeutige Angabe für die Sowiesokosten ist nicht möglich. Denn es ergeben sich Ansätze hinsichtlich des Bezugszustandes, welcher das Gebäude beschreibt, wenn die Maßnahme nicht durchgeführt werden würde:

- Sowiesokosten sind der Anteil der Vollkosten, welcher allein der Instandhaltung dient, ohne dass das Gebäude einen besseren Standard erreicht; diese Betrachtung ist für Bauteile dienlich, die nicht komplett getauscht werden, z. B. für Außenwände, die im Fall einer Investition entweder nur neuen Putz erhalten oder mit einer zusätzlichen Dämmung versehen werden.
- Sowiesokosten sind der Anteil der Vollkosten, mit welchem der schlechtmöglichste Standard erreicht wird, welcher zum Zeitpunkt der Investition möglich ist; diese Betrachtung ist für Bauteile dienlich, die im Falle einer Investition komplett ersetzt werden, z. B. Heizkessel; zum Zeitpunkt der Investition wird mit jedem Kessel, der am Markt verfügbar ist, (ungewollt) ein besserer energetischer Standard erreicht, da die vorherige Kesselgeneration gar nicht mehr verfügbar ist.

Eine saubere Trennung in „Sowiesokosten“, die das energetische Niveau nicht verbessern und „energiebedingten Mehrkosten“ ist nicht möglich; insbesondere da sich während langer Betrachtungszeiträume grundlegend effizientere Produktgenerationen am Markt befinden, so dass im Rahmen normaler Instandhaltung eine Verbesserung des Standards (ungewollt) eintritt. Dies ist auch ein Grund, warum es zu Abgrenzungsschwierigkeiten im Rahmen wohnwirtschaftlicher Betrachtungen kommt.

Darüber hinaus ist die Thematik der „Sowiesokosten“ eng mit der Frage der Instandhaltungskosten (siehe Anhang 5.8.4) und der Lebensdauer (siehe Anhang 5.9.1) von Bauteilen und Bauprodukten verbunden. Wird an Instandhaltungskosten gespart, erhöhen sich die Investitionskosten – auf lange Zeiträume betrachtet.

Beispiele aus der Baukörpersanierung und Anlagentechnik

Nachfolgend werden anhand von Literaturauszügen typische Ansätze von Sowiesokosten und Mehrkosten (sowie der Vollkosten als deren Summe) gezeigt. Es ist zu beachten, dass keine vollständige Recherche erfolgte, sondern die Absicht verfolgt wird, einen breiten Überblick zu geben. Sofern möglich, werden Kosten identischer Maßnahmen verglichen, sonst ähnlicher. Die jeweiligen Literaturstellen enthalten ggf. noch weitere Maßnahmenvarianten. Die Werte innerhalb der Tabellen sind chronologisch abgebildet.

Tabelle 180 zeigt Kosten für die Außenwanddämmung mit einem Wärmedämmverbundsystem von außen. Kostenansätze für andere Arten der Außenwanddämmung (vorgehängte Fassade, Einblasdämmung für zweischaliges Mauerwerk, Innendämmung) werden nicht näher analysiert. Die genannten Bandbreiten sind ausreichend für den Erkenntnisgewinn.

Quelle, Jahr		Bemerkung, Beschreibung	Vollkosten	Sowiesokosten		Mehrkosten	
			[€/m²]	[€/m²]	[%]	[€/m²]	[%]
IWU, 1995	[323]	12 cm, MFH	80	57	71	23	29
Passivhausinstitut, 2005	[202]	bei Neuanstrich der Fassade, U = 0,17 W/(m²K)	73	20	27	53	73
IWU, 2012	[324]	12 cm	117	73	62	44	38
IWU, 2015	[319]	12 cm	131	78	59	53	41
IFEU, ECOFYS, IWU, Uni Bielefeld, 2015	[34]	Wohnbau, 12 cm	111	(50)	(45)	(61)	(55)
IWU, HS Darmstadt, BET, 2019	[57]	12 cm, mittlere Ohnehinkosten	134	50	37	84	63

Tabelle 180 Vollkosten und Sowiesokosten für Außenwanddämmung mit Wärmedämmverbundsystem [eigene Darstellung]

Der Anstieg der Vollkosten von ca. 80 auf ca. 130 €/m³ in 25 Jahren ist plausibel. Dies entspricht einer Steigerungsrate von 2 %/a. Die Kostenanteile streuen stark. Über die gesamte Datenlage betrachtet erscheint ein Sowiesokostenanteil von 60 €/m² (knapp unter 50 %) bei Gesamtkosten von 130 €/m² für den heutigen Zeitpunkt eine realistische Annahme zu sein. Erwähnenswert ist der Erkenntnisgewinn (aus real abgerechneten Praxisprojekten), welcher das IWU zwischen 2012 und 2015 erzielt hat. Mit der besseren Datenlage ist der Kennwert stark angestiegen. Pehnt und Kollegen haben in ihrer Studie mit Vollkosten gerechnet und die Werte in Klammern nur informativ angegeben.

Tabelle 181 stellt Kosten für die unterseitige Kellerdeckendämmung zusammen. Alle Investitionen werden einheitlich als Mehrkosten angesehen. Die sehr früh veröffentlichten Zahlen erscheinen zu gering; es darf vermutet werden, dass begleitende Tätigkeiten (Kabel neu verlegen, Lampen umsetzen usw.) nicht darin enthalten waren. Eine Bandbreite ist gegeben, wenn Fälle mit oder ohne Armierung verglichen werden.

Quelle, Jahr		Bemerkung, Beschreibung	Voll-kosten	Sowiesokosten		Mehrkosten	
			[€/m²]	[€/m²]	[%]	[€/m²]	[%]
IWU, 1995	[323]	6 cm, MFH	15	0	0	15	100
Passivhausinstitut, 2005	[202]	U = 0,27 W/(m²K)	22	0	0	22	100
IWU, 2012	[324]	12 cm, ohne Armierung	39	0	0	39	100
IWU, 2015	[319]	12 cm, ohne Armierung	46	0	0	46	100
IFEU, ECOFYS, IWU, Universität Biele-	[34]	Wohnbau, 12 cm	59	0	0	59	100
IWU, HS Darmstadt, BET, 2019	[57]	12 cm	60	0	0	60	100

Tabelle 181 Vollkosten und Sowiesokosten für Kellerdeckendämmung von unten [eigene Darstellung]

Ein Wert von 50 €/m² ist aus heutiger Sicht realistisch und deckt sich mit eigenen Erkenntnissen [26]. Höhere Werte (hier ca. 60 €/m²) sind akzeptabel, wenn der Wert für alle unteren Gebäudeabschlüsse – also auch Bodenplatten – angesetzt wird. Deren flächenbezogene Vollkosten liegen deutlich höher. Die Zahl der Veröffentlichungen hierzu ist überschaubar, weil die Maßnahme in der Praxis kaum vorkommt. Eigene Erfahrungen zeigten im Jahr 2011 Kosten von etwa 120 €/m², wobei darin der neue Bodenbelag mit etwa ⅓ Anteil enthalten ist [26]. Die 1995 von IWU veröffentlichte Zahl von 30 €/m² für eine 5 cm dicke Dämmung im Fußboden (mit 25 €/m² als Sowiesokosten) ist nicht realistisch.

Tabelle 182 zeigt die Kosten für die nachträgliche Dämmung oberster Geschossdecken – in einer begehbaren Ausführung. Der Kostenanstieg von ca. 30 auf ca. 60 €/m² in 25 Jahren ist plausibel (Preissteigerung 2,8 %/a). Die Maßnahme wird von allen Forscherteams in voller Höhe den Mehrkosten zugeordnet. Der Ansatz von 60 €/m² deckt sich (unter Berücksichtigung der Preissteigerung) mit eigenen Erkenntnissen zu solchen Konstruktionen aus den Jahren 2011/12 [26].

Quelle, Jahr		Bemerkung, Beschreibung	Voll-kosten	Sowiesokosten		Mehrkosten	
			[€/m²]	[€/m²]	[%]	[€/m²]	[%]
IWU, 1995	[323]	begehbar, 20 cm, MFH	30	0	0	30	100
Passivhausinstitut, 2005	[202]	begehbar, U = 0,14 W/(m²K)	35	0	0	35	100
IWU, 2012	[324]	begehbar, 20 cm	64	0	0	64	100
IWU, 2015	[319]	begehbar, 20 cm	64	0	0	64	100
IFEU, ECOFYS, IWU, Universität Biele-	[34]	Wohnbau, 20 cm	64	0	0	64	100
IWU, HS Darmstadt, BET, 2019	[57]	20 cm	52	0	0	52	100

Tabelle 182 Vollkosten und Sowiesokosten für oberste Geschossdecken [eigene Darstellung]

Bei der Dämmung von Steildächern mit Zwischen- und Aufsparrendämmung (von oben) im Zuge einer ohnehin erforderlichen Neueindeckung ergibt sich ein sehr inhomogenes Bild für die Sowiesokosten, siehe Tabelle 183.

Quelle, Jahr		Bemerkung, Beschreibung	Voll-kosten	Sowiesokosten		Mehrkosten	
			[€/m²]	[€/m²]	[%]	[€/m²]	[%]
IWU, 1995	[323]	20 cm, Zwischen- und Aufsparren, MFH	117	90	71	27	29
Passivhausinstitut, 2005	[202]	bei Neueindeckung, U = 0,15 W/(m²K)	123	70	57	53	43
IWU, 2012	[324]	20 cm	227	183	81	44	19
IWU, 2015	[319]	20 cm, ohne Dachgauben	206	147	71	59	29
IFEU, ECOFYS, IWU, Universität Biele-	[34]	Wohnbau, 20 cm	199	(50)	(25)	(149)	(75)
IWU, HS Darmstadt, BET, 2019	[57]	20 cm, mittlere Ohnehinkosten	206	100	48	106	52

Tabelle 183 Vollkosten und Sowiesokosten für Steildachdämmung von oben [eigene Darstellung]

Die Entwicklung der Vollkosten über ein Vierteljahrhundert ist plausibel. Der Sprung von ca. 120 €/m² auf ca. 200 €/m² entspricht einer Kostensteigerung von 2 %/a. Die Sowiesokosten werden mit 25 bis 81 % beziffert. Pehnt und Kollegen haben in ihrer Studie mit Vollkosten gerechnet und die Werte in Klammern nur informativ angegeben. Sie passen – verglichen mit dem Rest der Zahlenwerte nicht ins Bild. Erstaunlich sind die 2015 veröffentlichten Zahlen des IWU. Durch eine Vergrößerung derselben Datenbank innerhalb von 3 Jahren gab es eine deutliche Verschiebung zwischen den einzelnen Positionen. Aufgrund der nicht eindeutigen Datenlage werden bei Gesamtkosten von 200 €/m² Sowiesokosten von 140 €/m² (70 %) als realistisch angesehen.

Die weiteren Kosten für andere Arten der Steildachsanierung (nur Zwischensparrendämmung von oben, nur Aufsparrendämmung von oben, nur Zwischensparrendämmung von unten, Zwischen- und Untersparrendämmung von unten) sowie die Flachdachsanierung werden nicht detailliert ausgewertet. Der Erkenntnisgewinn sieht ähnlich aus.

Tabelle 184 zeigt die Kennwerte für Fenster. Während die Zweischeibenwärmeschutzverglasung 1995 noch ganz neu am Markt war, ist die 2019 das schlechteste System, für welches jeweils Kennwerte angegeben sind. Die anderen Zahlenwerte werden aus Vergleichsgründen weggelassen.

Quelle, Jahr		Bemerkung, Beschreibung	Voll-kosten	Sowiesokosten		Mehrkosten	
			[€/m²]	[€/m²]	[%]	[€/m²]	[%]
IWU, 1995	[323]	U = 1,5 W/(m²K)	339	306	90	33	10
IWU, 2012	[324]	EFH	345	(345)	(100)	(0)	(0)
Empirica, 2012	[120]	EFH/ZFH	365	315	86	50	14
ECOFYS, 2013	[284]	U = 1,5 W/(m²K)	350	350	100	0	0
IWU, 2015	[319]	1,5 m² Wandfenster	376	(376)	(100)	(0)	(0)
IFEU, ECOFYS, IWU, Universität Biele-	[34]	U = 1,3 W/(m²K)	774	(0)	(0)	(774)	(100)
IWU, HS Darmstadt, BET, 2019	[57]	mittlere Ohnehinkosten	250	200	80	50	20

Tabelle 184 Vollkosten und Sowiesokosten für Fenster mit Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung [eigene Darstellung]

Die Vollkostenangabe 774 €/m² wird als Ausreißer angesehen und nicht weiter interpretiert. Die prinzipielle Kostendegression von ca. 350 €/m² (1995) auf 250 €/m² (2019) ist plausibel, da sich heute bereits Dreischeibenverglasung als Standard etabliert hat. Eigene Datenerhebungen in Praxisprojekten führten in den Jahren 2011 - 2013 zu Kennwerten in der Größenordnung 250 bis 300 €/m² [26].

Die Zuordnung der Kosten zu Sowieso- und Mehrkosten ist inhomogen. Es ist dazu anzumerken, dass in den Veröffentlichungen des IWU prinzipiell keine Aufteilung der Kosten für das Zweischeibenfenster vorgenommen wurde (daher: Werte in Klammern). Aber es wurden für das Dreischeibenfenster die Mehrkosten zum Zweischeibenfenster angegeben, welches somit indirekt als „Sowiesomaßnahme“ deklariert wird. In den anderen Fällen werden regulär etwa 10 bis 20 % der Kosten als Mehrkosten angenommen. ECOFYS nimmt das Fenster mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von 1,3 W/(m²K) als Referenz. Nur bessere Fenster weisen Mehrkosten auf. Nur das IFEU und Kollegen setzen die Fenster in voller Höhe in die Gesamtkostenbetrachtung ein (in der Studie werden in allen Szenarien alle Kosten als Vollkosten gerechnet). Realistisch erscheint eine Annahme von 15 % als Mehrkosten im Falle eines ohnehin geplanten Fenstertausches – falls eine Unterteilung stattfinden soll.

Abschließend werden beispielhaft die Kosten für die Anlagentechnik – hier Gasbrennwertkessel und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung – auf Sowiesokosten und Mehrkosten hin untersucht. Auch für andere Wärmeerzeuger wären Ansätze verfügbar und auswertbar; jedoch ist der Erkenntnisgewinn auch so gegeben.

Tabelle 185 zeigt, dass die Vollkosten für die Brennwerttechnik in einem kleinen Gebäude jeweils ähnlich eingestuft werden. In der Auswertung des IWU zeigt sich zwischen 2012 und 2015 ein Kostenanstieg von 20 %, was vermutlich nicht der realen Preisentwicklung entspricht, sondern einer besseren Datenlage zuzuschreiben ist.

Quelle, Jahr		Bemerkung, Beschreibung	Vollkosten	Sowiesokosten		Mehrkosten	
			[€]	[€]	[%]	[€]	[%]
IWU, 2012	[324]	150 m²	7.937	(7.937)	(100)	0	0
ECOFYS, 2013	[284]	Doppelhaushälfte, 4,8 kW	7.021	0	0	(7.021)	(100)
IWU, 2015	[319]	150 m²	10.131	(10.131)	(100)	0	0
IFEU, ECOFYS, IWU, Universität Biele-	[34]	6,2 kW	7.018	0	0	7.018	100
IWU, HS Darmstadt, BET, 2019	[57]	EFH/ZFH, 150 m²	10.500	0	0	10.500	100

Tabelle 185 Vollkosten und Sowiesokosten für Gaskessel [eigene Darstellung]

Bei der Zuordnung zu Sowiesokosten und Mehrkosten herrscht keine Einigkeit. Es spiegelt sich die gleiche Logik wieder, die auch bei den Fenstern erkennbar ist. Entweder es wird mit Vollkosten gerechnet (aus Prinzip: Pehnt et al) oder da es sich um ein Bauteil handelt, welches in der Lebensdauer des Gebäudes planmäßig komplett einmal oder mehrfach ersetzt wird. Zur Erläuterung der Thematik siehe auch Abbildung 318 und Abbildung 319 in Anhang 5.8.3.

Alternativ werden gar keine Mehrkosten angesetzt, sondern der Kessel komplett den Sowiesokosten zugeordnet, weil er – im Sinne der Instandhaltung – das Gerät ist, was mindestens zum Weiterbetrieb des Gebäudes erforderlich ist (vgl. auch Shell-Studie 2013 [308]). Nach dieser Logik ist der Gaskessel dann auch für alle anderen Wärmeerzeuger die Bezugsvariante bzw. seine Kosten sind die Sowiesokosten für alle anderen Erzeuger (Wärmepumpe, Holzkessel usw.).

Solange jeweils eine Logik stringent verwendet werden, um Szenarien untereinander zu vergleichen (und festzustellen, welche Modernisierungsmaßnahmen sinnvoll sind), sind beide Wege legitim. Eine Berechnung mit Vollkosten führt zu höheren Gesamtkosten als die Verwendung der Mehrkosten. Die Differenz zweier Varianten ist jedoch identisch.

Soll aber zunächst nur festgestellt werden, ob überhaupt eine Modernisierung in Frage kommt oder alternativ der Bestand ohne Änderung so belassen wird, wie er ist, eignen sich die energiebedingten Mehrkosten als Kostenansatz.

Tabelle 186 zeigt exemplarisch für eine Anlagentechnik, die zusätzlich zum Haupterzeuger installiert wird, um den Bedarf zu senken. Auch für Solarthermie sind Zahlen verfügbar, die an dieser Stelle den Erkenntnisgewinn nicht verbessern.

Quelle, Jahr		Bemerkung, Beschreibung	Vollkosten	Sowiesokosten		Mehrkosten	
			[€]	[€]	[%]	[€]	[%]
Empirica, 2012	[120]	EFH/ZFH	5.648	2396	42	3.252	58
IWU, 2012	[324]	EFH, 150 m², Referenz: Abluftanlage	7.585	(2.551)	(34)	(5034)	(66)
IWU, 2015	[319]	EFH, 150 m², Referenz: Abluftanlage	9.268	(3.217)	(35)	(6051)	(65)
IFEU, ECOFYS, IWU, Universität Biele-	[34]	Nichtwohnbau, 170 m³/h	6.630	0	0	6.630	100

Tabelle 186 Vollkosten und Sowiesokosten für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung [eigene Darstellung]

Die Vollkosten erscheinen insgesamt plausibel. Das IWU korrigiert anhand einer größeren Stichprobe den 2012 gefundenen Wert stark nach oben (es dürfte sich innerhalb der kurzen Zeit nicht nur um Preiserhöhungen des Marktes handeln). Ein Wert von ca. 8500 € wird als realistisch angesehen. Falls mit Mehrkosten operiert wird, dann jeweils im Vergleich zu einer Abluftanlage, die als „ohnehin vorhanden" definiert wird. Alternativ wird eine mechanische Lüftung als grundsätzlich verzichtbar angesehen, dann sind sämtliche Kosten nur der energetischen Verbesserung zuzuschlagen.

Aus dem Quervergleich über die unterschiedlichen Studien folgt als Erkenntnis für die Erstellung von Mikroanalysen (Einzelfall, konkretes Objekt) sowie Makroanalysen (der Gesamtbestand):

Bei einer Makroanalyse ist der Bezug auf „Vollkosten" für alle Maßnahmen dann legitim, wenn nicht geklärt werden soll, ob energetisch verbessert wird, sondern nur in welcher Höhe. Im Vergleich mehrerer Szenarien ergibt sich die gleiche Erkenntnis – der Instandhaltungsbedarf (Sowiesokosten) ist in allen Szenarien gleichermaßen enthalten und entfällt beim Vergleich.

Bei einer Mikroanalyse eignet sich der Bezug auf die „energiebedingten Mehrkosten" zu Einschätzung der Wirtschaftlichkeit, weil diese Kosten zu der Einsparung führen, welche zur Refinanzierung führt. Die Angabe der Vollkosten ist dennoch informativ notwendig.

Mehrkosten bezogen auf gesetzliche Forderungen

Im Zusammenhang mit einem konkreten Konzept – d. h. in der Mikrobetrachtung – können dem Gebäudebesitzer auch nur diejenigen Kostenanteile als Mehrkosten benannt werden, die über die Forderungen der EnEV (oder anderer gesetzlicher Regelungen) hinausgehen. Alles andere wird als „Sowiesokosten" deklariert, daher auch ein Großteil der energetischen Maßnahmen. Beispielsweise sei die anstehende Entscheidung über eine Putzsanierung betrachtet. Die Gesamtkosten lassen sich wie folgt aufteilen (Zahlen beispielhaft, nur zum Verständnis):

- 60 €/m² für Gerüst, Anstrich, Putz, anteiligen Lohn: ohnehin erforderlich aus Gründen der Instandhaltung
- 45 €/m² für 12 cm Dämmung, neue Fensterbretter, anteiligen Lohn: ohnehin erforderlich, um die geltenden Anforderungen der EnEV einzuhalten; hier Annahme eines Ziel-U-Wertes von 0,24 W/(m²K)
- 15 €/m² für weitere 4 cm Dämmung, Mehrkosten breiterer Fensterbretter, anteiligen Lohn: zusätzliche Mehrkosten zur Erreichung eines besseren Standards als gesetzlich gefordert.

Mehrkosten sind nach dieser Betrachtung lediglich 15 €/m². Die „Sowiesokosten“ liegen bei 105 €/m². Grundsätzlich ist diese Betrachtung nicht falsch. Allerdings wird sie von den Verfassern des vorliegenden Gutachtens als nicht zielführend angesehen. Ehrlicherweise ist dann den so deklarierten Mehrkosten auch nur die Energieeinsparung zuzuschreiben, welche sich aus der Erhöhung der Dämmung von 12 auf 16 cm ergibt. Passiert das nicht, wird die Wirtschaftlichkeitsbewertung „künstlich“ besser gerechnet.

Die geltenden gesetzlichen Standards sollen – nach Vorstellung der Gutachter – nicht verwendet werden, um Kosten-Nutzen-Betrachtungen schönzurechnen.

Weitere Kostengruppen ohne Bezug zur Energieeffizienz

Da eine Modernisierung oft mehrere Aspekte der Gebäudeverbesserung koppelt, lässt sich auch untersuchen, welche Kosten neben der energetischen Sanierung (mit ihren Vollkosten der KG 300 und 400) sonst noch typischerweise in Praxisprojekten zu verzeichnen sind.

Schulze Darup und Neitzel untersuchen dafür die Gesamtinvestitionskosten für Mehrfamilienhäuser verschiedener Baualtersklassen. Der Anteil energetisch bedingter Kosten (orange in Abbildung 322) sowie zugehöriger Sowiesokosten (hellblau in Abbildung 322) machen für die häufig vorkommenden Mehrfamilienhäuser der 1960er und 1970er Jahre nur etwa ⅓ der Gesamtkosten aus. Der Rest fließt in Balkone, Grundrissänderungen, Badsanierungen und andere Maßnahmen, die mit der Energieeinsparung nicht zusammenhängen.

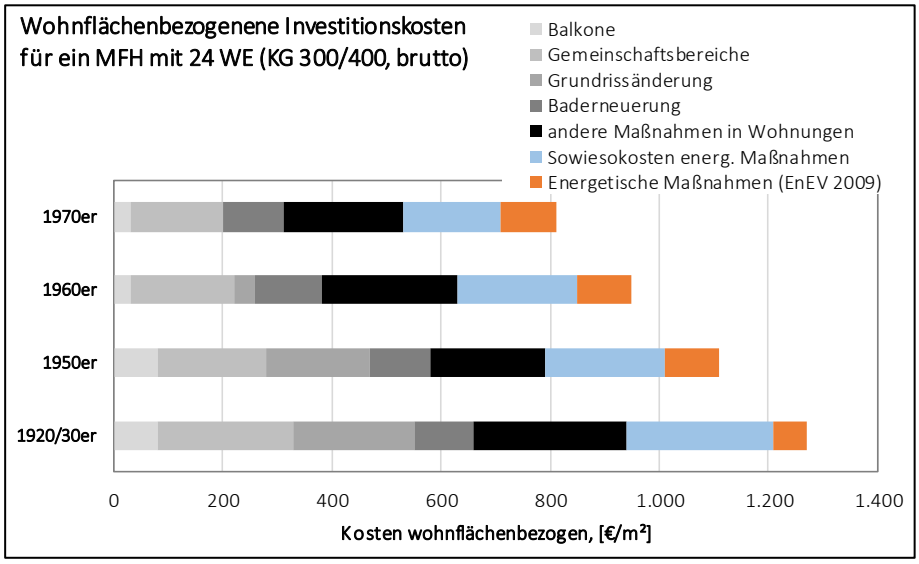


Abbildung 322 Wohnflächenbezogene Investitionskosten im MFH, eigene Darstellung nach [123]

Ausgehend von dieser Untersuchung liegen bei den Mehrfamilienhäusern häufiger Bauart die realen Baukosten ca. 9-mal höher aus als der rein energiebedingte Anteil bzw. 3-mal höher als die mit der Energieeinsparung direkt oder indirekt verbundenen Kosten.

Die typischen Gesamtkosten von Investitionen könnten (mindestens näherungsweise) dreigeteilt angegeben werden, um den Investor umfassend aufzuklären: energiebedingte Mehrkosten, zu den energetisch bedingten Maßnahmen gehörige Sowiesokosten, alle anderen Kosten.

Zusammenfassung der Kostenansätze

Die konkreten Annahmen sind in Anhang 5.8.2 tabellarisch zusammen mit den Gesamtkosten erfasst.

Es ist anzumerken, dass die Genauigkeit der Annahmen davon abhängt, welcher Art das Konzept ist. Für eine Einzelfalluntersuchung in der Mikroebene ist es unerlässlich, die gegebene bauliche Ausgangslage zu berücksichtigen. So ergeben sich andere Kosten, wenn ein Dach mit Unter- oder Aufsparrendämmung saniert wird oder eine Außenwand von außen oder innen gedämmt wird. Gleiches gilt für diverse andere Aspekte.

In der Makrobetrachtung ist es sinnvoll, Vereinfachungen vorzunehmen, um die Variantenvielfalt zu begrenzen, z. B. durch:

- anteilig gemittelte Kosten für Komponenten, z. B. die Außenwanddämmung – gewichtet nach der vorzufindenden Häufigkeit von denkmalgeschützten/erhaltenswerten Fassaden (Innendämmung) und allen anderen Fällen (Außendämmung)
- gemittelte Kosten für Sanierungsstandards, z. B. Effizienzhausniveaus, d. h. exemplarische Paketkosten aus baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen, welche für einzelne Objekte der Gebäudetypologie bestimmt werden und anschließend auf den Gesamtbestand hochgerechnet werden.

Die wohnwirtschaftliche Abgrenzung der Kosten – in der Mikroebene – ist davon unberührt und erfolgt anschließend. Basis sind die Vollkosten, die entsprechend der Aspekte „werterhaltend“ oder „werterhöhend“ Teil der üblichen Kaltmiete oder einer Mieterhöhung sind.

5.8.5 Vorgezogene Investition

Jedes Bauteil weist typische technische Lebens- und wirtschaftliche Nutzungsdauern auf, siehe Anhang 5.9.1. Dabei sind die Lebensdauern innerhalb einer Produkt- oder Bauteilfamilie (Fenster, Kessel, Dächer usw.) weder identisch, noch im Einzelfall vorhersagbar. Übergeordnet und unter Betrachtung großer Stichproben sind sie nach Jochum näherungsweise weibullverteilt [119] [127]. Ein Teil der Komponenten und Bauteile hält länger bis zum technischen Versagen, ein anderer Teil ist früher defekt. Über alle Bauteile hinweg lässt sich daraus eine typische (sinnvolle) Nutzungsdauer ableiten, nach deren Erreichen die Ausfallwahrscheinlichkeit stark zunimmt oder die Instandhaltungskosten stark steigen.

Nachfolgend werden typische Produktfamilien bzw. Bauteile und -komponenten auf die Frage einer vorgezogenen Investition hin untersucht, geordnet aufsteigend nach ihrer Nutzungsdauer (maßgeblich ist dabei der in Anhang 5.9.1 genannte typische Wert). Dabei stellen sich zwei Fragen:

- Vorgezogene Investition bezogen auf die Lebensdauer (dieser Aspekt ist eher ordnungsrechtlich durchzusetzen): Soll das Bauteil zum Zeitpunkt einer festgelegten Nutzungsdauer ersetzt werden, auch wenn es noch eine Restlebensdauer hat?
- Vorgezogene Investition bezogen auf die Nutzungsdauer (dieser Aspekt ist eher über Förderungsanreize zu verwirklichen): Soll das Bauteil vor Ablauf der festgelegten Nutzungsdauer ersetzt werden, weil die Nachfolgegeneration an Komponenten bedeutend effizienter ist – auch unabhängig von einer ohnehin anstehenden Instandhaltung?

Für die Ausführung jeglicher Modernisierung – und auch den Neubau – gilt nachfolgende Einschätzung. So minimiert sich im Laufe künftiger Jahrzehnte das Entscheidungsproblem der „vorgezogenen Investition“ von allein.

Jedes Bauteil ist nach Ansicht der Gutachter so zu errichten bzw. modernisieren, dass der Standard auf mindestens seine Nutzungsdauer (besser noch seine Lebensdauer) zukunftsfähig ist. Eine energetisch motivierte Erneuerung vor Ablauf der Nutzungsdauer ist betriebswirtschaftlich ungünstig und daher zu vermeiden.

Im Rahmen der Ausarbeitungen des vorliegenden Gutachtens werden keine Kosten für die vorgezogene Investition angesetzt, weder bei der mikro- noch der makroskopischen Betrachtung. Die Förderung oder Forderung derselben sind jedoch Steuerungsinstrumente, um die Marktdurchdringung besserer Standards zu beschleunigen.

Anlagentechnische Investitionen in Regelung und Hydraulik

Bauteile mit eher kurzen Lebensdauern und gleichzeitig geringen Investitionskosten werden häufig erst im Schadensfall ersetzt (Lebensdauerende, technisches Versagen). Alternativ werden sie im Zusammenhang mit dem Ersatz eines relevanten übergeordneten Bauteils in dessen Sanierungszyklus ersetzt: Thermostatventile zusammen mit Heizkörpern, Pumpen oder Regelungen zusammen mit dem Wärmeerzeuger. Dies erfolgt unabhängig von der jeweiligen noch zu erwartenden Restnutzungsdauer des Bauteils. Zum Zeitpunkt des Ausbaus noch sehr neuwertige Komponenten können anschließend ggf. noch als Ersatzteile dienen.

Vorgezogene Investition zum Zeitpunkt des Erreichens der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte sind in Klammern angegeben):

- ungeregelte, externe Heizungspumpen (15 Jahre)
- konventionelle Zirkulationspumpen (15 Jahre)
- Handventile (25 Jahre); da die in der letzten Heizungsanlagenverordnung vorgesehene Ersatzpflicht bereits seit längerem abgelaufen ist und bereits seit Jahrzehnten Thermostatventile am Markt etabliert sind, dürfte der Restbestand überschaubar sein

Vorgezogene Investition vor Erreichen der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte der Nutzungsdauer und mögliche Werte für eine Verkürzung sind in Klammern angegeben):

- ungeregelte, externe Heizungspumpen (15/10 Jahre); voraussichtlich gibt es jüngere Pumpen dieser Bauart nicht mehr häufig im Markt, da seit geraumer Zeit zum einen Regelpumpen Stand der Technik sind und seit 2002 teilweise mit der EnEV vorgeschrieben
- konventionelle Zirkulationspumpen (15/10 Jahre)
- konventionelle, geregelte, externe Heizungspumpen (15/10 Jahre)
- Ersatz separater Heizkreisregelungen, die bislang weder witterungsgeführt noch raumtemperaturgeführt sind durch entsprechende höherwertige (25/10 Jahre)

Für alle anderen Pumpen mit kurzen Laufzeiten (Speicherladepumpen usw.) erscheint eine vorgezogene Investition zu kostspielig. Für Pumpen, die Teil von Wärmeerzeugern sind (integriert) ist die Umrüstung in der Regel nicht realisierbar, weil das Gerät i. d. R. das CE-Zeichen verliert. Eine Umrüstung von im Erzeuger vorhandenen Regelungen ist ebenfalls mit höheren Investition verbunden, so dass in der Masse der Fälle keine Wirtschaftlichkeit gegeben sein dürfte.

Jegliche Neuausstattung von Gebäuden und Geräten erfolgt nach Ansicht der Gutachter mit Hocheffizienzpumpen. Alle neuen Erzeuger – auch für den wohnungsweisen Anwendungsfall – müssen Regelungen mit einer leistungsbeeinflussenden Führungsgröße aufweisen.

Anlagentechnische Investitionen in Erzeuger

Die Altersstruktur von Wärmeerzeugern im Bestand zeigt (siehe Anhang 5.6.1), dass – ausgehend von den angenommenen Lebensdauern – ein genereller und stetiger Investitionsbedarf besteht. Vorgezogene Investition zum Zeitpunkt des Erreichens der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte sind in Klammern angegeben):

- Ersatz von Niedertemperaturkesseln (25 Jahre); anstelle von 30 Jahren nach derzeitiger Energieeinsparverordnung

Vorgezogene Investition vor Erreichen der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte der Nutzungsdauer und mögliche Werte für eine Verkürzung sind in Klammern angegeben):

- Ersatz von fossilen Heizkesseln und Umstieg auf einen anderen Energieträger als Gas und Öl (25/15 Jahre)

Bei allen anderen Erzeugern (Wärmepumpen, elektrische Direktheizung, Solarthermie, Übergabestationen) wird nicht von der Notwendigkeit einer vorzeitigen Investition ausgegangen.

Bauliche Investitionen in Fenster

Fenster und Türen sind kostenintensive Bauteile. Aufgrund der geringen Flächenanteile am Gesamtgebäude ist die erreichbare Energieeinsparung limitiert. Allerdings sind an Fenstern die größten Verschleißerscheinungen zu verzeichnen, wenn mit anderen Elementen des Baukörpers (ohne TGA) verglichen wird.

Vorgezogene Investition zum Zeitpunkt des Erreichens der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte sind in Klammern angegeben):

- Ersatz von Einscheibenfenstern (35 Jahre); der Markt dürfte nur Fenster aufweisen, welche bereits deutlich älter sind
- Ersatz von Fenster mit Zweischeibenisolierverglasungen (35 Jahre)

Eine vorgezogene Investition vor Erreichen der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte der Nutzungsdauer und mögliche Werte für eine Verkürzung sind in Klammern angegeben):

- Ersatz von Kastenfenstern (35/30 Jahre), der Markt dürfte nur Fenster aufweisen, welche bereits deutlich älter sind
- Ersatz von Fenster mit Zweischeibenisolierverglasungen (35/25 Jahre); es handelt sich um alle Modelle vor der ersten Wärmeschutzverordnung von 1995

Bauliche Investitionen in Außenwände und Dächer

Außenwände und Dächer haben – abgesehen von Flachdächern – sehr lange Lebensdauern und sehr geringe Instandhaltungsbedarfe (bzw. im Einzelfall von Klinkerfassaden praktisch gar keine). Insbesondere bei diesen Bauteilen ergibt sich somit eine aktiv vorgezogene Investition.

Vorgezogene Investition zum Zeitpunkt des Erreichens der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte sind in Klammern angegeben):

- Dämmung bis dahin ungedämmter Außenwände (50 Jahre), bei erhaltenswerten oder denkmalgeschützten Wänden von innen, bei zweischaligem Mauerwerk als Kerndämmung,
- Dämmung bis dahin ungedämmter Steildächer (50 Jahre) oder Flachdächer (45 Jahre), obwohl die Anzahl solcher Konstruktionen im Bestand eher gering ist,
- Nachdämmung von Außenwänden mit WDVS (45 Jahre).

Eine vorgezogene Investition vor Erreichen der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte der Nutzungsdauer und mögliche Werte für eine Verkürzung sind in Klammern angegeben):

- Nachdämmen von Flachdächern (45/35 Jahre) und Steildächern (50/40 Jahre).

Anlagentechnische Investitionen in Netze und Speicher

Der vorzeitige Austausch von Rohrleitungen und Speichern erscheint nicht sinnvoll. Es handelt sich um passive Bauteile, insbesondere als Heizungsleitung nahezu verschleißfrei. Speicher werden, wenn nötig, im Zusammenhang mit dem Erzeuger ersetzt. Der Ersatz von Rohrleitungen bedeutet vielfach große begleitende Maßnahmen, z. B. das Öffnen von Mauerschlitzen, Böden, Schächten. Allerdings erscheint es zielführend, die Wärmedämmung zu erhöhten, sofern die Rohre zugänglich sind.

Vorgezogene Investition zum Zeitpunkt des Erreichens der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte sind in Klammern angegeben):

- Nachdämmen von wärmeführenden Rohrleitungen mit halber Dämmung oder weniger in unbeheizten Räumen (40 Jahre)

Eine vorgezogene Investition vor Erreichen der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte der Nutzungsdauer und mögliche Werte für eine Verkürzung sind in Klammern angegeben):

- Nachdämmen von wärmeführenden Rohrleitungen mit halber Dämmung oder weniger in unbeheizten Räumen (40/30 Jahre)
- Nachdämmen von ungedämmten wärmeführenden, zugänglichen Verteilleitungen und Steigesträngen in beheizten Räumen (40 Jahre)

Bauliche Investitionen in praktisch instandhaltungsfreie Bauteile

Decken zum unbeheizten Dachraum oder Keller sind nahezu verschleißfrei. Es darf davon ausgegangen werden, dass sie nicht ohne Anlasse energetisch saniert werden.

Vorgezogene Investition zum Zeitpunkt des Erreichens der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte sind in Klammern angegeben):

- Dämmung bis dahin ungedämmter Decken (60 Jahre).

Eine vorgezogene Investition vor Erreichen der Nutzungsdauer (von den Gutachtern angenommen typische Werte der Nutzungsdauer und mögliche Werte für eine Verkürzung sind in Klammern angegeben):

- Dämmung oder Nachdämmung von obersten Geschossdecken mit weniger als 3 cm Dämmung (60/30 Jahre).
- Dämmung oder Nachdämmung von Kellerdecken mit weniger als 3 cm Dämmung (60/30 Jahre).

Die angegebene Dämmdicke ist als äquivalente Dämmung zu verstehen, so dass der Wert auch für inhomogene Bauteile gilt.

Abriss und Neubau

Als „vorgezogene Investition“ wird auch der Komplettersatz eines Gebäudes verstanden, bevor die einzelnen Bestandteile ihre Nutzungsdauer erreicht haben.

Walberg et al. vergleichen in [8] den Bestandsersatz mit einer Modernisierung unter dem Aspekt der „grauen Energie“. Dem Herstellungsaufwand der Bauprodukte (für die energetische Modernisierung oder den Neubau) stehen die Energieeinsparmaßnahmen gegenüber. Der stoffliche Aufwand der Investition wird „refinanziert“ durch den dauerhaft geringeren Verbrauch, was in beiden Fällen gegeben ist. Ausgehend vom schlechten Altbau und mit dem Ziel eines Niedrigenergiegebäuden ergibt sich 2011 die Erkenntnis:

- der Neubau erreicht geringere Verbräuche als der Bestand, z. B. aufgrund technischer Optionen zur Minimierung von Wärmebrücken usw., allerdings ist sein Herstellungsaufwand deutlich größer
- „Ausgleichszeitraum“ für Abriss/Neubau: 15 bis 25 Jahre
- „Ausgleichszeitraum“ für Bestandsmodernisierung: 12 bis 23 Jahre

Die Werte liegen insgesamt nahe beieinander und weisen andererseits große Spannen auf. Eine allgemeine Empfehlung für den Ersatzneubau lässt sich daraus nicht ableiten. Die Studie identifiziert jedoch vor allem Mehrfamilienhäuser der Baualtersklasse 1958-1968 als potentiell interessant für den Bestandsersatz – aber nur unter der Prämisse, einen vollmodernisierten (energetisch: Neubauniveau) und gleichzeitig barrierefreien Zustand herzustellen. Für Einfamilienhäuser derselben Baualtersklasse gilt dies nicht.

Weitere Optionen für Bestandersatz sind insbesondere in den Mehrfamilienhäusern der Baualtersklasse 1949 bis 1957 zu finden – Werte in Klammern beschreiben den jeweils betroffenen Anteil der Gebäude [8]:

- nicht erweiterungsfähige Kubaturen und damit einhergehendes Nutzflächendefizit (37 %)
- zu geringe Raumhöhen (21 %)
- schadhafte Baukonstruktion und Baustoffe aus der Nachkriegsaufbauzeit (15 %)
- mangelnder Schallschutz (42 %)

Die anderen Baualtersklassen der Mehrfamilienhäuser sowie Einfamilienhäuser aller Baualtersklassen sind – gebündelt – von den genannten Problemen weit weniger betroffen. Insgesamt werden etwa 10 % aller Gebäude als sinnvoll für den Ersatzneubau angesehen.

Die Frage des Bestandsersatzes stellt sich im Wohnungsbau frühestens 50 Jahre nach der Errichtung, also für Objekte mit Baujahr vor 1970 (aus heutiger Sicht). Insbesondere Mehrfamilienhäuser der Nachkriegsbautätigkeit bis einschließlich 1957 sind geeignete Kandidaten, vor allem barrierefreien Wohnraum als Ersatzneubau zu errichten. Dies gilt umso mehr, je geringer die bereits getätigte Investition bislang ausfällt.

Vorzieh- und Mitnahmeeffekte

Die vorgezogene Investition wird ausgelöst durch entweder eine gesetzliche Forderung oder eine finanzielle Förderung. Sie erhöht damit kurzfristig die Sanierungsrate. Simons äußert sich 2012 wie folgt [120]:

> *„Soll die energetische Sanierungsrate trotzdem erhöht werden, sind hohe Subventionen notwendig, aber nicht einmal hinreichend. Da kein allgemeiner Sanierungsstau existiert – wie im Übrigen auch jede Besichtigung eines Einfamilienhausgebietes zeigt –, bedeutet eine energetische Sanierung immer eine vorgezogene Sanierung außerhalb des Sanierungszyklus […] Doch selbst eine vollständige Schließung dieser Rentabilitätslücke führt nicht zu einer nachhaltig höheren Sanierungsrate. Eine Subvention, z. B. eine Abwrackprämie für Heizkessel oder Fenster, wird vorrangig von den Eigentümern in Anspruch genommen werden, deren Heizkessel zwar schon ziemlich alt, aber noch funktionstüchtig ist. Energetische Sanierungsmaßnahmen werden damit nur etwas vorgezogen. Nachdem sämtliche ‚ziemlich alten' Heizkessel ausgetauscht wurden, sinkt die Sanierungsrate wieder. Nachhaltig führt eine dauerhafte Abwrackprämie nur zu einer geringfügigen Verkürzung der wirtschaftlichen Lebensdauer der Bauteile."*

Der Mitnahmeeffekt führt allerdings dazu, insbesondere den energetisch sehr ungünstigen Bestand schnell zu verbessern.

Steuerliche Abschreibungen (AfA)

Die steuerliche Abschreibung von Gebäuden ist gesetzlich geregelt. Die Absetzung für Abnutzung kann für betrieblich genutzte oder vermietete Immobilien in Anspruch genommen werden. Der Gesetzgeber unterstellt, dass das Gebäude (als Ganzes) im Laufe der Zeit durch Abnutzung an Wert verlieren. Durch die Abschreibung (AfA) besteht die Möglichkeit, den Wertverfall der Immobilie durch Steuererleichterungen teilweise auszugleichen.

Bis auf wenige Ausnahmen (Photovoltaik, Solarthermie, Fernwärmenetze und Kessel) gilt eine einheitliche Festlegung der Abschreibungsdauer von 50 Jahren. Insbesondere im Zusammenhang mit der energetischen Sanierung ist eine Diskussion über die Zukunftstauglichkeit dieses Wertes notwendig. Walberg et al. formulieren in [316]:

> *„Bei den derzeitigen Abschreibungsmöglichkeiten im Wohnungsbau (Ist-Status: Linear in Höhe von 2 %) geht der Gesetzgeber heute davon aus, dass sich moderne Wohnungsbauten erst nach 50 Jahren abnutzen (d. h. wesentliche Teile des Gebäudes ersetzt werden müssen). Die Untersuchungen zeigen aber, dass dieser Sachverhalt u. a. in Umsetzung der verschärften bauordnungsrechtlichen Vorschriften zum energieeffizienten Bauen (anteilig immer mehr und komplexere technische Anlagen) bei einer steuerrechtlichen Betrachtungsweise heute schon nach 36 Jahren zutrifft. Somit entsprechen die heutigen Abschreibungsmöglichkeiten nicht mehr dem tatsächlichen Werteverzehr im modernen Wohnungsbau. Aus diesem Grund wäre eine diesbezügliche Anpassung folgerichtig und sachgerecht."*

5.8.6 Neben- und Betriebskosten

In einer Wirtschaftlichkeitsbewertung werden – sowohl mikro-, als auch makroökonomisch – kapitalgebundene Kosten (Investitionen), betriebsgebundene Kosten (u. a. Wartung, Inspektion) und verbrauchsgebundene Kosten (Energiekosten) berücksichtigt.

In der Mieter-Vermieter-Situation entfallen Teile der Gesamtkosten direkt auf die Mieter (Energie, Wartung usw.) und Teile auf den Vermieter (kapitalgebundene Kosten, Instandsetzung). Die Kaltmiete ist die „Ausgleichszahlung" der zwei getrennten Bilanzierungen.

Für wohnwirtschaftliche Belange sind jedoch weitere Neben- und Betriebskosten relevant. Insbesondere die Kosten der wohnungs- oder heizkörperweisen Heizkostenerfassung und -abrechnung sind hierbei zu nennen. Details sind u. a. Pfnür [279] zu entnehmen.

Im Rahmen der hier ausgeführten Untersuchung werden diese Kosten nicht weiter berücksichtigt; auch nicht im vermieteten Mehrfamilienhaus. In Anbetracht der energetischen Standards, die langfristig angestrebt werden, sind klassische Heizenergieerfassungskosten nicht zu rechtfertigen. Ihre Höhe überschreitet voraussichtlich das Niveau der Energiekosten oder führt zumindest zu größeren Zusatzkosten als die zu erwartenden Energiekosteneinsparungen.

Es ist langfristig davon auszugehen, dass der in der Heizkostenverordnung bereits heute für Passivhäuser bzw. überwiegend regenerativ versorgte Gebäude vorgesehene Ausnahmetatbestand künftig nahezu flächendeckend zur Anwendung kommt.

5.9 Wirtschaftlichkeitsranddaten

Neben den energetischen Einsparungen und Investitionskosten der Bauprodukte beeinflussen eine Reihe weiterer Daten die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Modernisierungsmaßnahmen. Allen voran die angenommene Lebensdauer der Bauprodukte, die nachfolgend beleuchtet wird. Darüber hinaus erfolgt ein Rückblick auf die Finanzierungszinsen. Die Thematik „Steuern und Abschreibungen“ wird in einem kurzen Exkurs beleuchtet.

5.9.1 Nutzungs- und Lebensdauer von Bauprodukten

Neben der Frage der Investitionskosten für Bauprodukte in der Sanierung spielt ihre Haltbarkeit bzw. der sich daraus ergebende Sanierungszyklus eine entscheidende Rolle bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung

Definitionen

Eine ausführliche Aufarbeitung der Begrifflichkeiten und Definitionen ist u. a. der Dissertation von Hansen zu entnehmen [325]. Es ist zu unterscheiden in:

- die technische Betrachtung: Lebensdauer bis zum Versagen des Bauproduktes; durch Maßnahmen von Wartung, Reparatur und Instandhaltung verlängerbar
- die wirtschaftliche Betrachtung: Nutzungsdauer bis zum Austausch des Bauproduktes; dieses kann nach Ablauf der Nutzungsdauer prinzipiell noch technische Lebensdauer aufweisen und wird dennoch bereits ersetzt.

Grundsätzlich kann die Nutzungsdauer nicht länger als die Lebensdauer sein.

In Konzeptstudien zur Energiewende werden die beiden Größen häufig nicht unterschieden, sondern jeweils eine der beiden namentlich verwendet. Es darf anhand der untersuchten Literatur vermutet werden, dass trotz prinzipiell vorhandener Unterschiede, die beiden Größen gleichgesetzt werden. Bzw. keine inhaltliche Unterscheidung vorgenommen wird. Alle Studien gehen davon aus, dass am Ende der Zeitangabe (unabhängig von Begriff und Inhalt) ein Bauteil ersetzt wird und ein neues (besseres oder gleichwertiges) eingebaut wird. Die Zeitangabe ist maßgeblich für die Wirtschaftlichkeitsbewertung, da maximal diese Zeit zur Amortisation zur Verfügung steht. Im Rahmen dieses Berichtes wird der Begriff „Nutzungsdauer“ verwendet.

Ein Auszug aus der Grunddatenlage ist Tabelle 187 zu entnehmen. Die genannten Quellen enthalten teilweise noch weitere Annahmen, es erfolgt eine Datenauswahl, welche die typischen Investitionen in Gebäude umschreibt.

Es ist Folgendes anzumerken: nicht alle Studien verwenden alle tabelliere Größen, weil beispielsweise nur Teilaspekte des Neubau- oder Sanierungsmarktes untersucht werden (FIW gibt nur Kosten für Dämmung an usw.).

Allerdings werden auch nicht immer alle Daten transparent bzw. nachvollziehbar offengelegt, obwohl mit ihnen gerechnet wurde. So fehlen beispielsweise Angaben zu den konkreten baulichen Nutzungsdauern in den Studien von Beuth Hochschule und IFEU [127] [119]. Sie nutzen das Gebäudemodell „GEMOD“. Es berechnet die Nutzungsdauer der Bauteile als Weibull-Funktion. Diese definiert eine Verteilungskurve der Nutzungsdauer auf Basis typischer Ausfallwahrscheinlichkeit von Bauteilen. Ein Teil der Bauteile wird bereits nach kurzer Nutzungszeit ersetzt, andere halten wesentlich länger.

Teilweise werden steigende Lebens- oder Nutzungsdauern für künftige Bauteilgenerationen unterstellt, z. B. Fraunhofer ISE für die Photovoltaik [68]. Oder es werden Maßnahmenpakete aus Komponenten mit unterschiedlicher Lebensdauer gebildet, z. B. die Sanierung „Passivhaus+“ in [68], die sämtliche Dämmmaßnahmen, aber auch die Lüftungstechnik enthält.

Lebens- bzw. Nutzungsdauern, in [a]	IEMB	Passivhausinstitut	ECOFYS, IWU, Uni Bielefeld, IFEU	FIW	Beuth & IFEU	VDI 2067, neu	VDI 2067, alt	Fraunhofer ISE	eigene Annahmen
	[326]	[282]	[34]	[201]	[127] [119]	[321]	[322]	[68]	
Lebensdauer (LD)/ Nutzungsdauer (ND)	LD	LD	LD	ND	ND	ND	ND	LD	ND
Bauliche Maßnahmen/Bauteile									
Flachdach/Warmdach	30	50	25	45					45
Steildach	30	50	50	50					45
Außenwand, verkleidet/ Kerndämmung		50		45					45
Wärmedämmverbundsystem	30	50	40	40					45
Kellerdecke, oberste Geschossdecke		50		65	k. A.			50	60
Bodenplatte				75					75
Fenster (gesamt)			30						
Fensterrahmen	40-50	50							35
Mehrscheibenverglasung	25	30							
Wärmeerzeuger									
Gasbrennwerttherme	20	20	24		20	18		20	25
Gasbrennwertkessel	20	20	24		20	20		20	25
andere Gaskessel	20	20	24		20	15-18	15-18	20	25
Ölkessel	20	20	24		20	20	20	20	25
Holzpellets/Hackschnitzelkessel	20	20	24			15		20	25
elektrische Wärmepumpe Luft	12	20	24		23	18	20	20	25
elektrische Wärmepumpe Sole	12	20	24		23	20	20	20	25
BHKW	12					15	15	20	15
Solarthermie (Flachkollektor)		20	20		23	20	20	25	25
Photovoltaik								26-29	25
Andere technische Komponenten									
Fernwärmenetze/Erdleitungen		40				.	40	40	40
Rohrnetze, Speicher Trinkwarmwasser	25					15-30	40		30
Rohrnetze Heizung	60	30	40			40	40		40
Rohrleitungsdämmung		30		15		20-25	20		40
Wärmerückgewinnung (Lüftungsgerät)	20	25	30			20	20	50	25
Luftkanäle	35	50	30			30	20		40
Pumpen	12				23	10	10		15
Regelung, Ventile	10-15					10-20	10-20		25

Tabelle 187 Auswahl von Lebens- bzw. Nutzungsdauern von Bauprodukten aus verschiedenen Literaturquellen [eigene Darstellung]

Kurze vs. lange Zeitangaben

Je geringer die Nutzungsdauern der Bauprodukte im Mittel insgesamt angesehen werden, desto unwirtschaftlicher sind alle Maßnahmen der energetischen Sanierung. Allerdings weisen sowohl der Bestand an Heizungserzeugern und deren Baualter (Anhang 5.6.1) als auch die geringe Sanierungsrate der thermischen Hülle (Anhang 5.11) darauf hin, dass Bauprodukte aller Art eher langlebig sind.

Für Energiekonzepte auf der Makroebene erscheinen längere Nutzungsdauern gerechtfertigt; dies spiegelt das Marktgeschehen der letzten Jahrzehnte gut wieder. Für Mikrokonzepte, die einem einzelnen Bauherrn übergeben werden, sind kürzere Nutzungsdauerannahmen für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung ggf. angebracht. Vor allem weil sehr lange Zeitspannen von mehr als einem halben Jahrhundert nicht mehr vorstellbar sind (die typischen Nutzungsdauern sind dem Leser dennoch zu nennen).

Die Konsequenz zahlenmäßig groß veranschlagter Nutzungsdauern ist die Umsetzbarkeit besserer Standards, die dann (ggf. auf Jahrzehnte) nicht noch einmal Nachbesserungsbedarf aufweisen – nach der Devise „einmal, aber richtig modernisieren“. Eine Wartung der Bauteile mit entsprechendem Bedarf (siehe Anhang 5.9.1) ist dabei selbstverständlich. Damit gleichen sich künftig auch die tatsächlich notwendigen Sanierungsraten an die (politisch oder konzeptionell) geforderten an. Damit kann auch der berechtigten Kritik von Simon [120] und anderen begegnet werden:

> *„Die Nutzungsdauer wird oder soll aus den tatsächlichen Sanierungsraten abgeleitet werden. Entsprechen die umgerechneten Sanierungsraten nicht den Angaben zur Nutzungsdauer, so müssen die Angaben zu Nutzungsdauer angepasst und nicht andersherum die Sanierungsraten erhöht werden.“*

Gleichgewicht der Maßnahmen

Aufgrund des begrenzten CO_2-Budgets und der insgesamt notwendigen Emissionsminderung erübrigt sich aus heutiger Sicht das Kompensationsdenken zwischen baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen.

Offensichtlich ist: Anlagenkomponenten haben kürzere Lebensdauern als bauliche Maßnahmen. Je passiver ein Bauteil, desto länger seine Lebensdauer. Je mehr Verschleißteile, desto kürzer. Mit den gewählten Nutzungsdauern für anlagentechnische und bauliche Maßnahmen lässt sich die Aussage einer Wirtschaftlichkeitsbewertung in eine Richtung lenken:

- Wird die Nutzungsdauer von Dämmmaßnahmen im Verhältnis zur Anlagentechnik überproportional lang gewählt, so ergeben sich Empfehlungen von besserer Dämmung bei gleichzeitigen Abstrichen an Anlagentechnikmaßnahmen. Es eignet sich dieses Vorgehen in der Mikroebene, wenn der bauliche Wärmeschutz über die anlagentechnische Effizienz gestellt werden soll. In der Makroebene ergeben sich dann zwangsläufig eher Low-Tech-Konzepte sowie dezentralisierte Konzepte mit Wärmepumpen oder Holzkessel (ohne Nah- und Fernwärme).
- Wird die Nutzungsdauer der Anlagentechnik im Verhältnis zur Dämmung überproportional lang gewählt, so ergeben sich Empfehlungen von komplexerer Technik bei gleichzeitigen Abstrichen an Dämmmaßnahmen. Es eignet sich dieses Vorgehen in der Mikroebene, wenn die anlagentechnische Effizienz über den baulichen Wärmeschutz gestellt wird. In der Makroebene ergeben sich dann zwangsläufig eher High-Tech-Konzepte sowie zentralisierte Konzepte mit BHKW-Lösungen, Großflächensolarthermie (mit Nah- und Fernwärme).

In Reinform treten diese beiden Richtungen nicht auf, sondern nur mit einer Tendenz. Unter den zum Vergleich gewählten Literaturstellen (Tabelle 187) würde die Studie des Passivhausinstituts [282] eher der ersten Ausprägung und die von IFEU und Projektpartnern [34] der zweiten Ausprägung zuzuordnen sein.

Auch Verschiebungen zwischen den Nutzungsdauern der Technologien haben denselben Effekt. Liegt die angenommene Nutzungsdauer von Lüftungskanälen oberhalb der von Heizungsleitungen (z. B. [282]) ergibt sich eine Tendenz zur Lüftungstechnik bzw. es spricht nichts gegen ihre schnellere Marktdurchdringung. Sonst (z. B. [34]) ist es umgekehrt.

Eine Verschiebung der angenommenen Nutzungsdauern zwischen den Bauprodukten verschiebt die Aussage von Konzepten. Die überproportional langlebigen Bauprodukte dominieren das Konzept, weil sie geringere Annuitäten aufweisen. Dies gilt insbesondere in Verbindung mit geringen Finanzierungszinsen.

Analoges gilt auch für die Energiepreise, siehe Anhang 5.5.1.

Weges des nicht möglichen Blickes in die Zukunft zur tatsächlichen Lebensdauer der Bauprodukte, hilft nur ein Blick zurück. Sowohl die Solarthermieanlagen aus den 1990er Jahren sind noch auf den Dächern vorzufinden als auch die Wärmepumpengeneration der EnEV 2002-Einführung. Heizkessel sind ebenfalls sehr langlebig und werden in der Regel erst nach EnEV-Aufforderung (30 Jahre) außer Betrieb genommen. Auch der nunmehr fast 50-jährige Einsatz von Wärmedämmung ist ohne nennenswerte Sanierungen festzustellen. Daran sind die eigenen Annahmen zur Nutzungsdauer in Tabelle 187 angelehnt.

Abschreibungsdauer

Die Tatsache, dass die tatsächlichen Lebensdauern der Bauprodukte mit den steuerrechtlichen Ansätzen nicht übereinstimmen, ist ausführlich in der Studie „Kostentreiber für den Wohnungsbau“ [316] nachzulesen. Die Autoren weisen nach, dass sich aufgrund von Verschiebungen der Investitionskosten in Richtung „technische Ausstattung“ die mittlere (gewichtete) Abschreibungsdauer des Gebäudes insgesamt rechnerisch verkürzt. Sie lag 2015 in der untersuchten Stichprobe von Objekten bei 36 Jahren. Dagegen muss das Gebäude nach der Fertigstellung über 50 Jahre abgeschrieben werden.

Hierfür ist nach Ansicht der Verfasser des vorliegenden Gutachtens eine steuerrechtliche Lösung zu finden (gewichtete Abschreibung, zweigeteilte Abschreibung Bau – Technik oder ähnlich). Die Erkenntnis über die insgesamt sehr langen Lebensdauern der Bauprodukte (jedes in seiner Kategorie) ist davon unberührt.

5.9.2 Finanzierung und Zinsen

Die Modernisierung von Gebäuden muss finanziert werden. Aus Sicht potentieller Investoren kommen zwei Szenarien in Betracht:

- das Geld ist prinzipiell verfügbar, könnte jedoch alternativ angelegt werden bzw. ist bereits angelegt; wird modernisiert, entgeht dem Investor der Anlagezins (von Aktien, Tagesgeld, Bundeswertpapieren usw.)
- das Geld ist nicht verfügbar, wird daher aufgenommen; es gilt der Hypothekenzins

In beiden Fällen wird der Zins um die Inflation bereinigt, so dass der Realzins entsteht. In allen Studien mit dem Ziel einer Mikro- oder Makrokonzepterstellung des Bestandes wird auf den Zins zurückgegriffen bzw. dieser grundsätzlich definiert. Zahlenmäßig folgt der Wert dem aktuellen Zinsniveau bzw. der jeweils kürzeren Vergangenheit (zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie). Als Beispiel werden 4 Studien zitiert, welche aus dem sehr transparent offengelegten Datenbestand des IWU stammen:

- 2001: IWU 7,0 %/a [327]
- 2008: IWU 5,5 %/a [328]
- 2013: IWU 3,0 %/a [62]
- 2019: IWU, HS Darmstadt und BET: 2,0 %/a [57]

Die Zahlen folgen bis 2010 etwa dem tatsächlichen Verlauf der Zinsen – als Mischung von Realzins (abzüglich Inflation) für anzulegendes Geld (Abbildung 323) und dem Hypothekenzins (Abbildung 324) für Baukredite.

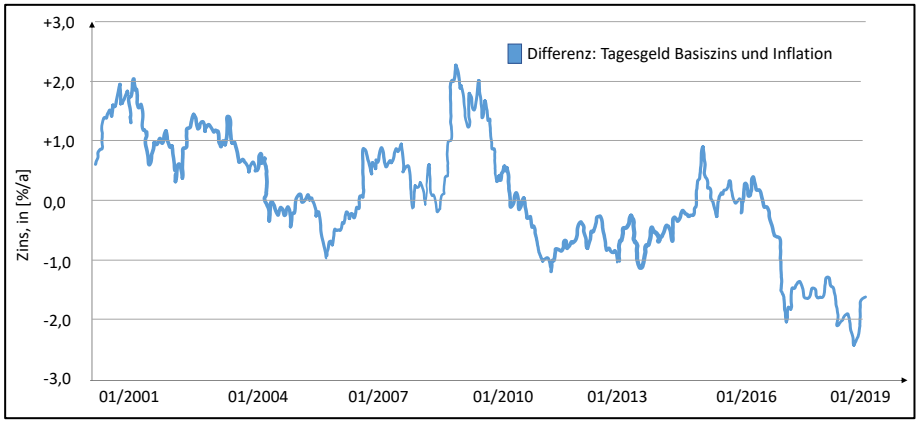


Abbildung 323 Realverzinsung (Tagesgeld minus Inflationsrate) der letzten 20 Jahre, Kurvenverlauf nach [329][1]

Die Negativphase ab 2016/17 wird dagegen in keiner neueren Studie tatsächlich bei der Berechnung verwendet. Das zur Berechnung verwendete Realzinsniveau wird stattdessen mit Werten um 1 bis 2 %/a angenommen. In Ausnahmefällen wird der Zins mit 0 %/a festgelegt [330] oder ist eine von mehreren Varianten der Untersuchungen, z. B. 5, 1, 0 %/a in [201]. Diese Vorgehensweise gibt den Berechnungen eine gewisse Sicherheit, da die Betrachtungszeiträume (bis 2050) sowie die Finanzierungszeiträume der Bauprodukte (20 bis 40 Jahre) deutlich länger sind als die heute erzielbare typische Zinsbindung.

[1] https://index.fmh.de/charts/fmh/weeklycharts/beb139d9-b554-414c-bbf1-dd501241c29e_fs.png

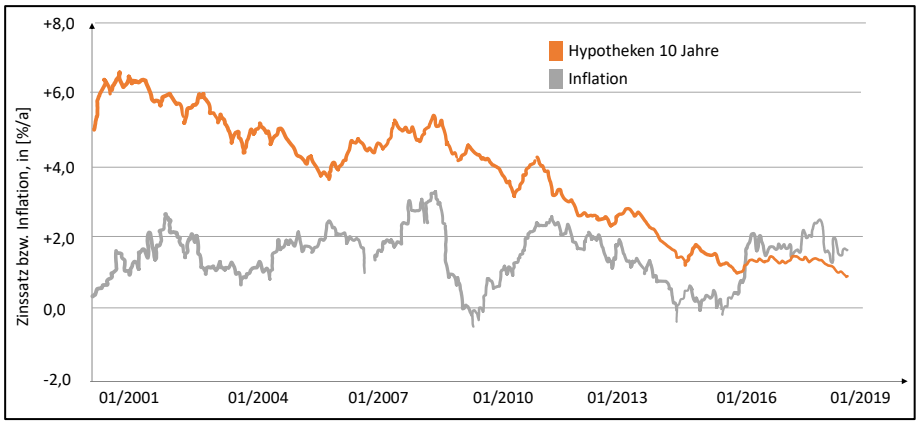


Abbildung 324 Bauzinsen und Inflation der letzten 20 Jahre, Kurvenverlauf nach [329][2]

Für die weiteren Untersuchungen schließen sich die Verfasser des vorliegenden Gutachtens dem Wert 2 %/a an.

5.9.3 Steuern und Abschreibungen

Sowohl die Investitionskosten als auch die jährlichen Kosten werden aus der nationalen Perspektive mit Blick auf das Gesamtsystem analysiert.

Mehrwertsteuer und andere relevante Steuern

In der Mikroperspektive, d. h. der betriebswirtschaftlichen Perspektive der Eigentümer auf die Gebäude, wird die Mehrwertsteuer berücksichtigt. Auch alle Steuern auf die Energieträger sind Gegenstand der Betrachtung.

In der Makroperspektive, d. h. mit dem volkswirtschaftlichen Blick, werden Steuern und Abgaben i. d. R. nicht betrachtet, da ihre zukünftige Entwicklung und Höhe nicht vorhersehbar ist. Im Gegenteil: die Untersuchungen auf der Makroebene liefern Erkenntnisse zu Steuern und Förderungen als politische Instrumente.

Diese allgemein übliche Vorgehensweise – im Sinne des vorliegenden Gutachtens zum Thema, insbesondere die in Anhang 4.1 untersuchten – wird von den Verfassern des vorliegenden Gutachtens nicht gewählt. Die Makrountersuchungen dieser Studie ist eine Summation aller Haushalte; es erfolgen keine volkswirtschaftlichen Betrachtungen.

Steuerliche Abschreibungen, Sonderabschreibungen

Die explizite Berücksichtigung von Sonderabschreibungen bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung erfolgt in keiner der untersuchten Konzeptstudien (vgl. Anhang 4.1), die sich mit dem Thema „Bestandsmodernisierung“ unter makroökonomischen Aspekten befassen. Sie werden regulär als politisches Instrument vorgeschlagen. Sie finden ihre reale Umsetzung in der Gesetzgebung, zum Beispiel dem aktuell in Diskussion bzw. Einführung befindlichen „Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 im Steuerrecht“.

Diese Vorgehensweise wird auch im Rahmen der hier vorliegenden Ausarbeitung gewählt. Alle Investitionen werden rechnerisch linear in der gewählten Lebensdauer abgeschrieben.

Für eine weitere Vertiefung, insbesondere in Hinblick auf die Wohnungswirtschaft, wird auf die Ausführungen zur „vollständigen Finanzierung“ (voFi) von Pfnür und Müller verwiesen [279]. Der theoretische Hintergrund wird sehr komprimiert von Enseling in [125] beschrieben.

CO_2-Besteuerung

Eine CO_2-Besteuerung der Investitionen wird hier nicht vertieft. Sie wäre auf Basis einer stofflichen Bilanz (Stichwort: „graue Energie“) der Bauprodukte denkbar. Das Thema CO_2-Besteuerung der Energieträger wird in Anhang 5.5.3 im Zusammenhang mit der Energieträgerbewertung besprochen.

[2] https://index.fmh.de/charts/fmh/weeklycharts/8f0895a9-844c-45c4-9d06-342ef3962b3d_fs.png

5.10 Förderung

Bereits in Anhang 2.2.4 wurde das Zusammenspiel von gesetzlichen Anforderungen (EnEV, EEWärmeG, GEG usw.) und von Möglichkeiten der Förderung (Bund: KfW, BAFA – Länder, Kommunen, Verbände, Hersteller) beschrieben.

Bei der Planung, der Ausführung und dem Betrieb von Gebäuden sind in Deutschland eine Vielzahl an Gesetzen und Verordnungen zu beachten, welche in erster Priorität 2020 den zukünftigen Indikator für Klimaneutralität als Maßstab für die Einhaltung der Klimaziele festlegen. Hier helfen die Vorschläge des Sachverständigenrats für Umweltfragen [41], die im Mai 2020 gemeinsam mit dem BMU vorgestellt wurden:

Als am besten geeigneter Indikator wurde in einem ersten Schritt das lokale, länder- und europaweite Einhalten des CO_2-Emissionsbudgets zur Einhaltung der Pariser Klimaziele genannt [41]. Die Gutachter sehen es als sinnvoll an, in einem zweiten Schritt – möglichst global – bei gleichzeitiger Einführung von CO_2- bzw. Kohlenstoffzertifikaten eine einheitliche Bewertung der Klimagase zu erreichen.

Das Einhalten eines weltweit gleich großen Pro-Kopf-Budgets könnte den Weg zu einer gerechten Verteilung der Lasten, aber auch Chancen auf dem Weg zu Klimaneutralität ebnen. Hierauf wurde bereits in Anhang 2.1.1 eingegangen. Hierzu wurde am 20. Mai 2020 eine wesentliche Entscheidung im Bundeskabinett getroffen:

> *„Bund und Länder hatten sich im Dezember 2019 unter anderem darauf geeinigt, ab 2021 die CO_2-Bepreisung von Brennstoffen zu erhöhen und im Gegenzug die Belastungen für Stromverbraucher und Fernpendler zu begrenzen. Der nationale Emissionshandel startet nun mit einem festen CO_2-Preis von 25 Euro pro Tonne im Jahr 2021. Gleichzeitig hat das Bundeskabinett eine Verordnung beschlossen, damit Einnahmen aus dem nationalen Emissionshandel zur Entlastung der EEG-Umlage eingesetzt werden können.*
> *[…]*
> *Bundesumweltministerin Svenja Schulze: „Die heutigen Beschlüsse zeigen: Es ist möglich, Klimaschutz und soziale Gerechtigkeit zusammenzubringen. Der höhere CO_2-Preis verteuert fossile Brennstoffe und bringt uns den Klimazielen näher.*
> *[…]*
> *Bundeswirtschaftsminister Peter Altmaier: „Wir haben heute die rechtlichen Voraussetzungen für eine Entlastung der EEG-Umlage ab dem 1. Januar 2021 auf den Weg gebracht. Das ist eine gute Nachricht für die Bürgerinnen und Bürger und für die Wirtschaft. Bislang finanzieren die Letztverbraucher die gesamten Förderkosten des EEG über den Strompreisbestandteil der EEG-Umlage. Künftig werden wir durch den Einsatz von Haushaltsmitteln die EEG-Umlage entlasten und damit auch den Geldbeutel der Verbraucherinnen und Verbraucher schonen.“*
> *[…]*
> *Der nationale Emissionshandel startet nach der Bund-Länder-Einigung nun mit einem fixen CO_2-Preis von 25 Euro pro Tonne im Jahr 2021. Das entspricht brutto 7 Cent pro Liter Benzin, 8 Cent pro Liter Diesel, 8 Cent pro Liter Heizöl und 0,5 Cent pro Kilowattstunde Erdgas. Dieser Preis war ursprünglich erst für das Jahr 2023 vorgesehen. Bis zum Jahr 2025 werden die Zertifikate mit einem auf 55 Euro ansteigenden Festpreis ausgegeben. Ab 2026 wird der Zertifikatepreis dann durch Versteigerungen ermittelt, wobei für 2026 ein Preiskorridor von 55 Euro bis 65 Euro pro Tonne CO_2 vorgegeben ist.*
> *[…]*
> *Das nationale Emissionshandelssystem tritt neben den EU-Emissionshandel für große Industrieanlagen und Kraftwerke und erfasst alle Brennstoffemissionen, die nicht bereits im EU-Emissionshandel mit einem CO_2-Preis belegt sind – unabhängig vom Sektor, in dem die Brennstoffe eingesetzt werden.“.*

Damit ist ein erster – aber leider viel zu kleiner Schritt – auf dem Weg zur Dekarbonisierung – getroffen worden. Bereits vor knapp 10 Jahren wurden die gleichen Argumente in einer DENA-Studie zur Sanierung [331] vorgetragen.

5.10.1 Geförderte Maßnahmen im Rückblick – Status Quo

Die beiden relevanten Förderprogramme, die der energetischen Sanierung von Gebäuden einschließlich ihrer Wärmeversorgung zuzuordnen sind, sind die Förderprogramme des Marktanreizprogramm (MAP), also die verschiedenen Einzelprogramme des BAFA und der KfW. Für beide liegen Monitoringberichte vor.

Darüber hinaus liegen auch Berichte vor, die verschiedene Maßnahmen zur Energiewende übergeordnet evaluieren, z. B. der Bericht von Bothor et al. [332]. Er untersucht die Effekte, die sich aus der Beratung der Verbraucherzentralen, des Wärmeliefercontractings im Mietrecht, der Verpflichtung der öffentlichen Hand zur energieeffizienten Beschaffung u. v. m. ergeben.

Monitoring einzelner Programme

Das Monitoring der KfW-Förderprogramme wird seit etlichen Jahren vom Institut Wohnen und Umwelt IWU in Darmstadt sowie dem Fraunhofer IFAM in Bremen durchgeführt. Die Datenlage wird dabei jährlich fortgeschrieben. Auch die Verfasser des vorliegenden Gutachtens greifen vielfach auf die Erkenntnisse und die Datenbasis zurück – es wird der Bericht aus dem Jahr 2018 verwendet [15].

Die Art der Datenaufbereitung lässt es zu, sich schnell und übersichtlich ein Bild darüber zu verschaffen,

- wie geförderte Dämmdicken im Verlauf der Zeit zunehmen, welche Qualitäten rechnerisch erreicht werden, welche Hüllbauteile bevorzugt von den Gebäudebesitzern verbessert werden
- welche Hauptwärmeerzeuger hauptsächlich eingesetzt werden und in welchen Effizienzhausniveaus diese typisch sind
- welche Zusatztechnologien (Solarthermie, Photovoltaik, Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung) im Verlauf der Zeit und in den verschiedenen Sanierungsstandards Verwendung finden.

Über die Fördersummen lassen sich ausgelöste Bauvolumina bestimmen und Beschäftigungseffekte berechnen. Alle diese Daten sind objektiv nachvollziehbar. Für die konkreten Fakten wird auf die genannte Primärliteratur verwiesen. Da jeweils frühere Ausgaben des Berichtes in späteren einbezogen werden, reicht der letzte Stand.

Kritisch einzuschätzen sind die bestimmten Endenergieeinsparungen, Primärenergieeinsparungen und Emissionsminderungen. Es erfolgt bei der Datenerhebung per Fragebogen keine Abfrage des Verbrauchs vor und nach der Sanierung. Lediglich die rechnerischen Ergebnisse des Nachweises (für das sanierte Gebäude) werden erhoben.

Somit werden alle Einsparungen zwangsläufig rechnerisch bestimmt. Das IWU hat seit Jahrzehnten Erfahrungen mit der Thematik „Diskrepanz zwischen berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch“ (vgl. Anhang 5.2). Dies betrifft jedoch in der überwiegenden Zahl der Gebäude den Bestand. Diefenbach et al. bemerken dazu [15]:

> *„Die tatsächliche Fehlerbandbreite ist größer, da über den Stichprobenfehler hinaus weitere denkbare Fehlerquellen existieren, etwa potentielle Unterschiede in der Teilnahmebereitschaft der befragten Fördermittelempfänger, Unsicherheiten durch die Hochrechnung einer Stichprobe aus dem ersten Halbjahr auf das ganze Jahr oder Abweichungen der gemessenen von der modellbasiert berechneten Energieeinsparung. Hier gibt es erste Hinweise darauf, dass der tatsächliche Energieverbrauch und die daraus resultierenden Energieeinsparungen durch die Modellrechnungen im Mittel eher überschätzt werden.“*

Insbesondere Erkenntnisse zu tatsächlich erreichen Standards nach der Sanierung sind nicht in ausreichender Zahl verfügbar bzw. es ist davon auszugehen, dass das Zusammenspiel komplexer Systeme (Wärmepumpen, Mehrerzeugersysteme usw.) und notwendiger Qualitätssicherung nicht optimal ist. Im Rahmen des hier vorliegenden Gutachtens wird als ein Schwerpunkt der Einfluss der Qualitätssicherung auf den Erfolg einer Maßnahme herausgearbeitet, vgl. Anhang 3.6.

In Anbetracht ggf. sehr großer Differenzen zwischen rechnerischem Bedarf und realen Verbrauch, halten es die Gutachter für zielführend, ein künftiges „Realmonitoring“ auf realen Verbrauchswerte aufzubauen.

Ein Gesamtmonitoring des MAP liegt beispielsweise mit dem Monitoringbericht von Zech et al. aus dem Jahr 2018 vor [16]. Letztlich ist die Problemlage identisch zu der Studie des IWU. Eine sehr gute Datenbasis ist gegeben hinsichtlich der Förderfälle sowie der theoretischen Effizienzen der geförderten Produkte. Eine Hochrechnung auf die realen Endenergieeinsparungen oder nutzbar gemachten regenerativen Energien kann aber nicht erfolgen, weil schlichtweg reale Messwerte fehlen. So werden:

- die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen theoretisch berechnet und damit auch theoretisch die nutzbar gemachte Umweltwärme ermittelt
- die Effizienzen von Holzkesseln angenommen
- die spezifischen Kollektorkreiserträge der Solarthermie abgeschätzt

Die Autoren bemerken dazu selbst [16]

> *„Eine wesentliche Herausforderung für die Zukunft sollte somit darin bestehen, diesen geforderten Alltagstauglichkeitsnachweis gegenüber dem Endkunden in Messungen zu erbringen und auch Aussagen über den erwarteten Nutzungsgrad anstelle des unter Idealbedingungen möglichen Wirkungsgrades bei Nennwärmeleistung zu ermöglichen."*

Es liegt nicht an den Verfassern der jeweilig zitierten Studien, dass die Erträge und Effizienzen nur rechnerisch wiedergegeben werden, sondern an der Struktur der Förderung selbst. Somit ist abschließend festzustellen, dass mit heute verfügbaren Monitoringberichten zu den Förderprogrammen nützliche Informationen zum Marktgeschehen erfasst und erkannt werden können, dass die Aussagen zu erzielten Einsparungen jedoch kritisch einzuschätzen sind und zunächst im Feld zu belegen wären.

Bericht an die EU Kommission

Einen ausführlichen Bericht über aktuelle und zurückliegende Förderprogramme gibt der noch nicht veröffentlichte Entwurf des Berichts der Bundesregierung (Stand Mai 2020) an die EU-Kommission zur Renovierungsstrategie [11]. Einen Ansatz in Richtung Klimaneutralität liefert diese Langfristige Renovierungsstrategie (LTRS) für Deutschland vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aus Sicht der Autoren nicht.

Der Bericht enthält eine Vielzahl von Maßnahmen und Fördermöglichkeiten zur Erreichung des Klimaschutzzieles der Bundesregierung. Übernommene Tabellen wurden an die Tabellennummerierung des vorliegenden Gutachtens angepasst. Nachfolgend Auszüge, mit einzelnen kommentierenden Anmerkungen:

> *„2.3.1 Förderprogramme und Initiativen auf Bundesebene*
> *[…] Dazu gehören auch die Beratungsangebote für alle Energieverbraucher (private Haushalte, kleine und mittlere Unternehmen, Kommunen und gemeinnützige Organisationen) im Vorfeld energetischer Maßnahmen, die eine effiziente und zielkonforme Sanierung der Gebäude gewährleisten sollen. Mit Maßnahmen zur Qualitätssicherung bzw. durch die stichprobenweise Überprüfung geförderter 42 Vorhaben soll eine hohe Qualität bei der Umsetzung der baulichen und anlagentechnischen Sanierungsmaßnahmen sichergestellt werden. Zudem minimiert die Einbindung nachweislich qualifizierter und erfahrener Experten in die Antragstellung, Planung und Umsetzung die Gefahr von Fördermissbrauch und fachlichen Fehlern in der Planung und Umsetzung. Das ist besonders wichtig für die Akzeptanz energetischer Sanierungsmaßnahmen bei künftigen potentiellen Förderkunden.*

Leider wird bisher keine Förderung an dem im Betrieb feststellbaren Erfolg einer geförderten Maßnahme geknüpft: siehe Anhang 2.2.4. Es braucht nach Ansicht der Gutachter keine stichprobenhafte Überprüfung von 42 Vorhaben, sondern eine flächendeckende Qualitätssicherung aller Neubau- und Sanierungsvorhaben.

> *„2.3.2.1 **Steuerliche Förderung** für energetische Sanierungsmaßnahmen im selbstgenutzten Wohneigentum*
> *Eine zentrale Maßnahme im Gebäudesektor ist die steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung, die als attraktives Förderinstrument zum 1.1.2020 in Ergänzung zur existierenden Förderkulisse als weitere Säule der Förderung eingeführt worden ist. […] Förderfähig sind 20 Prozent der Investitionskosten und der Kosten für die Erteilung der für die Gewährung der Steuerermäßigung beim Finanzamt vorzulegenden Bescheinigung; sowie 50 Prozent der Aufwendungen für einen Energieberater, der mit der energetischen Fachplanung und Beaufsichtigung der förderfähigen Maßnahmen beauftragt wurde. […]*
>
> *2.3.2.2 **CO_2-Gebäudesanierungsprogramm***
> *Das CO_2-Gebäudesanierungsprogramm besteht seit 2006 und umfasst sowohl die systemische als auch die Einstiegsförderung (Einzelmaßnahmen) zur energetischen Sanierung bestehender Wohngebäude sowie energieeffizienter Neubauten. […] Daneben gibt es zwei Programme für die energetische Gebäudesanierung kommunaler und sozial genutzter Gebäude […]. Damit trägt das CO_2-Gebäudesanierungsprogramm entscheidend dazu bei, Wohnungen und Gebäude energieeffizienter zu machen, weit über die gesetzlichen Anforderungen hinaus. Seit 2015 besteht außerdem ein Förderprogramm zur Steigerung der Energieeffizienz für Gewerbegebäude […].*
>
> *Im Rahmen der systemischen Förderung werden energetisch anspruchsvolle und umfassende Sanierungen von Bestandsgebäuden zu sogenannten Effizienzhäusern gefördert. Die Anforderungen der EnEV 2009 an Primärenergiebedarf (Q_P) und Qualität der Gebäudehülle (Transmissionswärmeverlust H'_T) des Referenzgebäudes bilden den Vergleichswert, an dem sich die Höhe der Förderung in Form von Tilgungszuschüssen in Verbindung mit zinsvergünstigten Krediten bzw. in Form von reinen Zuschüssen bemisst. Je geringer der Primärenergiebedarf und je besser die Qualität der Gebäudehülle ausfallen, desto höher fallen Effizienzhaus-Niveau und damit die Förderung aus.*
> *[…]*

Zur Qualitätssicherung in den Investitionsförderprogrammen sind folgende Instrumente verankert: Zur Planung und Begleitung durch qualifizierte Experten gehört die verpflichtende Einbindung von Energieeffizienz-Experten (www.energieeffizienz-experten.de) bereits in der Planung bis hin zur Umsetzung des Vorhabens. Sie verfügen über einschlägige Erfahrung und Fachwissen. Praxiserfahrungen und Fortbildungen sind regelmäßig nachzuweisen. Die Prüfung der eingereichten Nachweise bei Antragstellung und nach Umsetzung des Vorhabens, insbesondere der Berechnung des geförderten Effizienzhausniveaus, stellt die Qualität und Förderfähigkeit der Vorhaben sicher. Stichprobenartig werden geförderte Objekte vor Ort dahingehend überprüft, ob die eingereichten Nachweise dem tatsächlichen Umsetzungsstand entsprechen. (Prüfung der eingebauten Anlagentechnik, Dämmstoffe, Materialstärken usw.)

Die Qualitätssicherung der KfW für Nichtwohngebäude ist analog zu den Anforderungen im Wohngebäude-Segment gestaltet. Die Vor-Ort-Kontrollen der KfW und die verbindliche Einbindung von qualifizierten Experten haben zu einer Steigerung der Qualität der Förderanträge geführt.

Im Rahmen des Programmteils „Energieeffizient Sanieren" (Wohngebäude) wurden im Jahr 2019 mehr als 145.000 Förderzusagen für Maßnahmen an rund 280.000 Wohnungen erteilt. Die Treibhausgasminderung mit den in diesem Jahr geförderten Sanierungsmaßnahmen belief sich auf rund 500.000 t CO_2-Äquivalente. Für die Ermittlung der Beschäftigungseffekte wurden die Gesamtinvestitionskosten der energiesparenden Modernisierungsmaßnahmen aus den KfW-Antragsdaten zugrunde gelegt. Diese Investitionen in Höhe von rd. 11 Mrd. Euro (inkl. MWSt.) bewirkten Beschäftigungseffekte im Umfang von 116.000 gesicherten Arbeitsplätzen. Im Segment „Nichtwohngebäude" (kommunale/soziale sowie gewerbliche Gebäude) wurden 2019 THG-Einsparungen in einem Umfang von ca. 145.000 t CO_2-Äquivalenten erzielt.

2.3.2.3 ***Marktanreizprogramm*** *zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt*
[…]
In Ergänzung zum CO_2-Gebäudesanierungsprogramm werden in diesem Förderprogramm gezielt Investitionen in unterschiedliche Wärmeerzeuger auf Basis erneuerbarer Energien gefördert. Das MAP wird als BMWi-Programm im Bereich der Zuschussförderung durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) sowie im Bereich der Kreditförderung durch die KfW durchgeführt.
[…]
Die Förderung umfasst die Technologien Solarthermie, Biomasse und effiziente Wärmepumpen sowie die Visualisierung des Ertrags von erneuerbaren Energien. Neu hinzugekommen sind Gas-Hybridanlagen, die mehrere Wärmeerzeuger kombinieren und Wärme aus erneuerbarer Energie nutzen, auch dann, wenn der erneuerbare Wärmeerzeuger innerhalb von zwei Jahren nach Installation des gasbasierten Heizungsteils nachgerüstet wird. Außerdem wird der Ersatz von Ölheizungen durch eine Biomasse-, Wärmepumpen- oder Hybridanlage wegen der besonders positiven Klimawirkung mit einer zusätzlichen Prämie von 10 Prozentpunkten auf den ansonsten gewährten Fördersatz der zu errichtenden Anlage gewährt.
[…]
Die Höhe der Förderung wird als prozentualer Anteil der tatsächlich für den Austausch bzw. die Erweiterung der Heizungsanlage entstandenen förderfähigen Kosten berechnet. Dabei werden auch die Kosten für notwendige Umfeldmaßnahmen zur Installation der neuen Anlage berücksichtigt.
[…]
Unter dem Namen „Erneuerbare Energien – Premium" (Programm Nr. 271/281 und 272/282) werden im KfW-Teil des MAP Großanlagen zur Wärmeerzeugung durch zinsverbilligte KfW-Kredite gefördert, die durch Tilgungszuschüsse aus dem Bundeshaushalt ergänzt werden. Eine Förderung kann für große Biomasse-Anlagen, Tiefengeothermieanlagen, große effiziente Wärmepumpen, Nahwärmenetze, große Solarkollektoranlagen in der Innovationsförderung, große Wärmespeicher in der Innovationsförderung und Biogasleitungen für unaufbereitetes Biogas in der Innovationsförderung beantragt werden. Dabei sind für die einzelnen Technologien technische Mindestanforderungen definiert, die der Förderrichtlinie zu entnehmen sind. Die Antragstellung muss vor Maßnahmenbeginn erfolgen. Zur Qualitätssicherung müssen Verwendungsnachweise erbracht werden, darüber hinaus werden Stichprobenprüfungen durchgeführt.
[…]
Die Gesamtevaluierung des MAP für den Förderzeitraum 2015 bis 2018 basiert auf dem Evaluierungsbericht vom November 2019. Insgesamt erhielten im Jahr 2018 49.341 Anlagen eine Förderung. Dabei konnte sich im BAFA-Teil der Zubau, der in den Jahren 2016 und 2017 festgestellt wurde, nicht auf gleichem Niveau fortsetzen. Technologiebezogen stellten dort erstmals Wärmepumpen das Technologiesegment mit den meisten geförderten Anlagen (38,4 %). Im KfW-Teil blieb die Zahl geförderter Anlagen im Vergleich zu 2017 in etwa stabil (+0,8 %). Der Schwerpunkt der Förderung lag weiterhin im Bereich der Wärmenetze und der Biomasseanlagen zur Wärmeerzeugung, einschließlich der EE-Wärmespeicher.
[…]
Über das MAP wurde im Jahr 2018 insgesamt eine Leistung von 792 MW gefördert. Davon entfielen auf den BAFA-Teil knapp 713 MW (90 %) und auf den KfW-Teil etwa 79 MW (10 %). Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Endenergie- und Nutzenergiemengen, die im Rahmen des gesamten MAP (BAFA und KfW) 2018 eine Förderung erhalten haben. Insgesamt wurden durch das Programm Anlagen mit jährlichen Endenergiemengen von ca. 1.200 GWh gefördert.
[…]

Die Höhe der Fördermittel für im Jahr 2018 geförderte Anlagen belief sich auf 215 Mio. Euro. Insgesamt wurden in 2018 durch die MAP-Förderung Investitionen in Höhe von 901,2 Mio. Euro ausgelöst. Die Gesamtinvestitionen fielen im Vergleich zum Vorjahr um ca. 19 %, der Förderanteil fiel um knapp 15 %.

Insgesamt konnten in 2018 knapp 303.000 t CO_{2e} -Emissionen vermieden werden. Biomasse nimmt in beiden Programmsäulen den mit Abstand größten Anteil ein: rund 86 % im BAFA-Teil, gefolgt von Wärmepumpen und Solarthermie zu ca. 8 % bzw. ca. 6 %. Im KfW-Teil dominieren Biomasseanlagen mit ca. 59 %, gefolgt von Wärmenetzen/BHKW mit 31 % und Tiefengeothermie mit 9 %. Solarthermie und Wärmepumpen spielen in diesem auf große Anlagen fokussierten Programm keine nennenswerte Rolle.
[…]

	Energieträger	vermiedene CO2e-Emissionen in t pro Jahr
BAFA	Biomasse	203.525
	Solarthermie	13.482
	Wärmepumpe	18.433
	Gesamt	235.440
KfW	Biomasse	39.821
	Solarthermie	480
	Tiefe Geothermie	6.072
	Wärmenetze zur Erschließung von Biogas BHKWs	21.224
	Wärmepumpen	21
	Gesamt	67.619

Tabelle 188 Vermiedene CO_{2e}-Emissionen der MAP-geförderten Anlagen 2018, Werte aus [11]

[…]

*2.3.2.4 **Anreizprogramm Energieeffizienz** (APEE)*
Im Zuge der Novellierung der Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt ist das Anreizprogramm Energieeffizienz (APEE) in Bezug auf die KfW-Programmlinie „Energieeffizient Sanieren" […] und den BAFA-Teil des MAP Ende 2019 ausgelaufen. Im KfW-Teilprogramm „Energieeffizient Sanieren - Investitionszuschuss" (Nr. 430) waren aus dem APEE ein sog. „Heizungs- und Lüftungspaket" finanziert worden, mit dem die Erneuerung ineffizienter Heizungs- sowie der Einbau von Lüftungsanlagen in Verbindung mit Umfeldmaßnahmen durch Investitionszuschüsse in Höhe von 15 % besonders gefördert wurden.

Im BAFA-Programm „Heizen mit erneuerbaren Energien" wurde mit dem aus dem APEE finanzierten Zusatzbonus „Heizungspaket" ein zusätzlicher Zuschuss von 20 % sowie eine Prämie von maximal 600 Euro gewährt, um damit den Einbau besonders effizienter Heizungen sowie Maßnahmen zur Optimierung des gesamten Heizsystems (inklusive Heizkörpern und Rohrleitungen) zu fördern. Vor dem Hintergrund der Umstellung der Fördersystematik auf eine anteilige Finanzierung von Anlagen- und Nebenkosten im BAFA-Teil des MAP und der Erhöhung der Tilgungs- und Investitionszuschüsse für Einzelmaßnahmen in „Energieeffizient Sanieren" war das APEE für diese Programme obsolet geworden.

Weiterhin aus dem APEE finanziert wird u. a. das durch die KfW durchgeführte Programm „Energieeffizient Bauen und Sanieren – Zuschuss Brennstoffzelle" (Nr. 433), in dem – abhängig von der elektrischen Leistung der eingebauten Anlage – Zuschüsse für innovative Heizsysteme auf Basis der Brennstoffzellentechnologie vergeben werden. Die Zuschusshöhe beträgt bis zu 28.200 EUR.

*2.3.2.5 **Förderprogramm Heizungsoptimierung** (HZO)*
Seit 1. August 2016 werden der Ersatz von Heizungspumpen und Warmwasserzirkulationspumpen durch hocheffiziente Pumpen sowie der hydraulische Abgleich am Heizsystem gefördert. Grundlage ist die Richtlinie über die Förderung der Heizungsoptimierung durch hocheffiziente Pumpen und hydraulischen Abgleich.

Zweck der Förderung ist der Austausch ineffizienter Heizungs- und Warmwasserzirkulationspumpen. Darüber hinaus werden weitere Optimierungsmaßnahmen an der Heizungsanlage gefördert. (Hydraulischer Abgleich, Thermostatventile, Optimierung von Verteilung und Übergabe oder der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, MSR).
[…]

*2.3.2.6 **Förderprogramm Wärmenetzsysteme 4.0***
Mit der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (Wärmenetzsysteme 4.0) wird seit dem 1. Juli 2017 eine systemische Förderung im Bereich der Wärmeinfrastruktur eingeführt, mit der nicht nur Einzeltechnologien und -komponenten, sondern Gesamtsysteme gefördert werden. Die zu fördernden Wärmenetze zeichnen sich durch hohe Anteile erneuerbarer Energien, die effiziente Nutzung von Abwärme und ein deutlich niedrigeres Temperaturniveau im Vergleich zu klassischen Wärmenetzen aus.

Das Programm setzt sich aus mehreren Modulen zusammen und deckt darüber sowohl die Planungs- wie auch die Investivphase ab. Gefördert werden einerseits Machbarkeitsstudien mit bis zu 60 % der förderfähigen Kosten (Fördermodul I), sowie in einem zweiten Schritt die Realisierung eines Wärmenetzsystems 4.0 mit bis zu 50 % der förderfähigen Vorhabenkosten (Fördermodul II). Die Höhe der Förderung beträgt dabei bis zu 600.000 Euro für Machbarkeitsstudien und bis zu 15 Mio. Euro für die Realisierung eines Wärmenetzsystems 4.0.

Ergänzend können zudem Maßnahmen zur Kundeninformation im Gebiet des geplanten Wärmenetzsystems 4.0 zur Erhöhung der Anschlussquote an ein Modellvorhaben sowie projektbezogene wissenschaftliche Kooperationen mit Hochschulen, Forschungs- und Wissenschaftseinrichtungen zur Unterstützung, Planung, Realisierung und Optimierung gefördert werden.
[…]
*2.3.2.7 **Energetische Stadtsanierung***
Mit dem KfW Programm Energetische Stadtsanierung werden die Erstellung von integrierten Konzepten zur energetischen Quartiersanierung sowie die Initiierung eines Sanierungsmanagements mit Zuschüssen gefördert. Das Sanierungsmanagement begleitet auch die Umsetzung der zuvor in den Konzepten entwickelten Maßnahmen. Es wird künftig für die Dauer von i.d.R. drei Jahren mit einer Verlängerungsoption auf fünf Jahre gefördert. Darüber hinaus wird die energetische Quartiersversorgung (Wärme- und künftig auch Kälteversorgung, Wasserver- und Abwasserentsorgung) mit zinsgünstigen Darlehen und zukünftig auch Tilgungszuschüssen gefördert […].

*2.3.3.1 **Energieberatung der Verbraucherzentralen***
Die Energieberatung der Verbraucherzentralen (Bundesverband und der Bundesländer) bietet dem Verbraucher eine erste Anlaufstelle über ein weites Kommunikationsspektrum von der Telefonberatung über eine online- bis zur stationären Beratung in einer zentralen Anlaufstelle oder einer Beratung im Gebäude des Eigentümers selbst. Jährlich finden mehr als 120.000 Beratungen statt. Die Bereitstellung einer teilweise kostenfreien (insbes. für einkommensschwache Haushalte) und niedrigschwelligen Beratung ist wesentlich, um alle Bevölkerungsschichten bei Maßnahmen zur Energieeffizienz mitzunehmen und liefert so einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung […].

*2.3.3.2 **Energieberatung für Wohngebäude** (Vor-Ort-Beratung, individueller Sanierungsfahrplan)*
Die „Energieberatung für Wohngebäude (Vor-Ort-Beratung, individueller Sanierungsfahrplan)" adressiert ca. 15,6 Mio. Ein- und Zweifamilienhäuser und rund 3,1 Mio. Mehrfamilienhäuser. Förderfähig ist eine Energieberatung, die Möglichkeiten der energetischen Sanierung aufzeigt. Hierzu hat ein qualifizierter Energieberater (§21 EnEV und verpflichtende Weiterbildungen) einen Energieberatungsbericht, z. B. in Form eines individuellen Sanierungsfahrplans zu erstellen, der die Gesamtsanierung oder Schritt-für-Schritt-Sanierung mit aufeinander abgestimmten Einzelmaßnahmen aufzeigt.

Das BMWi übernimmt 80 % der Kosten der Beratung, maximal jedoch 1.300 EUR für die Beratung bei Ein- und Zweifamilienhäuser und 1.700 EUR für die Beratung bei Wohnhäusern mit drei und mehr Wohneinheiten übernommen. Da die Abstimmungsprozesse in Wohnungseigentümergemeinschaften (WEG) komplexer sind als bei einem Einzeleigentümer, kann die Vorstellung des Sanierungsfahrplans in einer Versammlung der WEG zusätzlich mit einmalig 500 EUR gefördert werden. Damit sollen Entscheidungsprozesse für eine energetische Sanierung in einer WEG transparenter gemacht werden.

Um die Komplexität eines Sanierungsfahrplans gegenüber dem Beratungsempfänger vereinfacht darzustellen, wurde der individuelle Sanierungsfahrplan (iSFP) 2017 entwickelt. Dieser Sanierungsfahrplan entspricht einer „Renovation Roadmap" für den jeweiligen Wohngebäudeeigentümer. Mit der Methodik des iSFP werden die Beratungsberichte standardisiert und klar strukturiert. Die energetische Ausgangssituation des Gebäudes wird komponentenweise bewertet und bietet dem Gebäudeeigentümer einen verständlichen Überblick über die sanierungswürdigen Teile des Gebäudes.
[…]
Neben der übersichtlichen Darstellung der Sanierungsschritte werden auch die mit der Sanierung verbundenen Kosten verständlich dargestellt und erläutert. So soll durch eine gut nachvollziehbare Darstellung dem Eigentümer ein deutlicher Anstoß gegeben werden, der Sanierungsplanung auch konkrete Umsetzungsschritte folgen zu lassen.

Gemäß Evaluierung der Energieberatung für Wohngebäude werden dabei pro Beratung durchschnittlich rd. 31.000 Euro (Netto-) Mehrinvestitionen angestoßen. Pro Beratungsfall werden durchschnittlich Endenergieeinsparungen von durchschnittlich rd. 8.000 kWh pro Beratungsfall erreicht. Die umgesetzten Maßnahmen haben 2018 rund 18.400 t CO_2-Äquivalente eingespart.

2.3.3.3 ***Energieberatung im Mittelstand***

Das Programm „Energieberatung Mittelstand" (EBM) richtet sich an kleine und mittlere Unternehmen (KMU), entspricht einem hochwertigen Energieaudit und setzt die Vorgaben der Energieeffizienzrichtlinie (EED 2018) um. Antragsberechtigt sind KMU der gewerblichen Wirtschaft und des sonstigen Dienstleistungsgewerbes sowie Angehörige der Freien Berufe mit Sitz und Geschäftsbetrieb in Deutschland, die weniger als 250 Personen beschäftigen und einen Jahresumsatz von nicht mehr als 50 Mio. Euro oder eine Jahresbilanzsumme von nicht mehr als 43 Mio. Euro haben. Ansatzpunkte für eine Energieberatung sind die Bereiche Gebäude und Anlagen sowie das Nutzerverhalten; die Maßnahmenvorschläge sollten sich am Gebot der Wirtschaftlichkeit orientieren. Sofern die Nutzung von Erneuerbaren Energien als sinnvoll erscheint, soll hierauf besonders hingewiesen und gegebenenfalls ein entsprechendes Konzept erarbeitet werden; dies gilt auch für die Nutzung von Abwärme.

Für Unternehmen mit jährlichen Energiekosten über 10.000 Euro, beträgt die Zuwendung 80 % der förderfähigen Beratungskosten, jedoch maximal 6.000 Euro. Für Unternehmen mit jährlichen Energiekosten von maximal 10.000 Euro, beträgt die Zuwendung 80 % der förderfähigen Beratungskosten, jedoch maximal 1.200 Euro.

Jährlich werden rd. 3.500 Energieberatungen durchgeführt. Durch die Energieberatung sparen die Unternehmen durchschnittlich rd. 14 % Energie ein, das entspricht ca. 120 MWh pro Jahr. Pro eingesetztem Euro Förderung wurden 8,05 EUR an Investitionen ausgelöst. Insgesamt trägt die EBM mit jährlich 502 GWh zum Einsparziel bei.

2.3.3.4 ***Energieberatung für Nichtwohngebäude*** *von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen (EBK)*

Die seit 2016 in Kraft getretene Förderrichtlinie "Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen" (EBK) unterstützt die Erstellung eines Sanierungsfahrplans für die energetische Sanierung eines Nichtwohngebäudes im öffentlichen Bereich. Gefördert wird die Energieberatung zur Erstellung eines energetischen Sanierungskonzepts von Nichtwohngebäuden, entweder in Form eines Sanierungsfahrplans oder in Form einer umfassenden Sanierung. Zudem wird die Neubauberatung für Nichtwohngebäude gefördert, um die Kommunen bei der Umsetzung der Vorbildfunktion der öffentlichen Hand (Niedrigstenergiegebäude) zu unterstützen.

Das BMWi übernimmt 80 % der Kosten der Beratung (maximal 15.000 Euro). Seit 2016 bis Ende 2019 wurden insgesamt rd. 2.600 Förderanträge von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen gestellt. Es ergeben sich Einsparungen von 360 GWh jährlich in der jeweiligen Kommune, die auf die Beratung zurückzuführen sind. Zudem konnten pro eingesetztem Euro Förderung 31,19 Euro Investitionen angestoßen werden.

2.3.3.5 ***Beratung zum Energiespar-Contracting***

In den Förderprogrammen „Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen" und „Energieberatungen im Mittelstand" fördert das BMWi zudem einen „Contracting-Check". Im Rahmen dieses optionalen Beratungsbestandteils wird geprüft, ob die Planung und Realisierung einer höheren Energieeffizienz durch einen externen Dienstleister sinnvoll sein kann. Darüber hinaus sind Contractoren in der Mehrheit der Förderprogramme des Bundes antragsberechtigt.

Durch das vom BMWi geförderte Vorhaben „Contracting: build the future!" sollen in den nächsten drei Jahren qualitativ hochwertige Energiespar-Contracting-Projekte in öffentlichen Liegenschaften initiiert und zur Umsetzung gebracht werden. Als Leuchtturmprojekte werden sie in die Breite kommuniziert und sollen somit als Vorbilder für andere potentielle Umsetzer dienen. Außerdem sollen sie dazu beitragen, Kenntnisse zu Energiespar-Contracting bei der öffentlichen Hand und den regionalen Akteuren aufzubauen. Im Rahmen der Modellprojekte werden öffentliche Liegenschaften durch eine über drei Jahre laufende kostenfreie Projektentwicklung unterstützt."

Mit dem derzeitigem Forderungs- und Förderregime ist eine effektive Umsetzung der Klimaziele nur schwer erreichbar, wie bereits in Anhang 2.2.4 beschrieben:

Stand Juli 2020 ist festzustellen, dass die vom Sachverständigenrat für Umweltfragen [41] geforderte CO_2-Budgetstrategie als einziger Indikator für Klimaneutralität und die oben im Bericht der Bundesregierung an die EU [11] dargestellten Erfolge bisheriger Maßnahmen in den Bereichen der Förderung zueinander konträr verlaufen.

Der Bericht der Bundesregierung an die EU [11] ist eine pflichtgemäße Beantwortung der für die EU wichtigen Aspekte ohne große Ambitionen. Er fasst die derzeitigen Förderprogramme wie einen strategisch wenig strukturierten Flickenteppich zusammen, ohne auf das ausschlaggebende Ziel einzugehen, Fördererfolge tatsächlich feststellen zu wollen.

In Verbindung mit Gesetzen, Förderprogrammen und Leitlinien zur Einhaltung des noch verfügbaren Emissionsbudgets sind zukünftig immer gleichzeitig Forderungen an die Qualitätssicherung und an Erfolgsnachweise umgesetzter Maßnahmen durch ein Monitoring zu stellen. Damit kann kontinuierlich eine Überprüfung des Fortschritts hin zu einer Kohlenstofffreien Welt stattfinden. Neben dem gesetzlichen Rahmen spielen hierbei gerade Förderprogramme eine ausschlaggebende Rolle, um auf Basis von Neubau-, v. a. aber auch von freiwilligen Modernisierungsmaßnahmen bestmögliche Ergebnisse in Richtung CO_2-Minderung zu erzielen.

In der Evaluierung des MAP aus dem Jahr 2019 [16] wird der Erfolg von Förderprogrammen nach folgenden drei Kriterien durchgeführt:

> *„**Zielerreichungskontrolle**: Die Zielerreichungskontrolle prüft, ob die Ziele der Maßnahme erreicht werden. Ein wesentlicher Bestandteil ist der Soll-Ist-Vergleich und damit die Bestimmung des Zielerreichungsgrads zum Zeitpunkt der Erfolgskontrolle. Sie bildet gleichzeitig den Ausgangspunkt von Überlegungen zur Zielanpassung und Maßnahmenoptimierung.*
>
> ***Wirkungskontrolle**: Die Wirkungskontrolle ermittelt, ob die Maßnahme für die Zielerreichung geeignet und ursächlich war. Hierbei sind beabsichtigte und unbeabsichtigte Auswirkungen der durchgeführten Maßnahme zu berücksichtigen.*
>
> ***Wirtschaftlichkeitskontrolle**: Die Wirtschaftlichkeitskontrolle untersucht, ob die Ziele auf wirtschaftliche Art und Weise erreicht werden. Unterschieden wird hierbei die Vollzugswirtschaftlichkeit von der Maßnahmenwirtschaftlichkeit. Die Vollzugswirtschaftlichkeit betrachtet, ob der Vollzug der Maßnahme im Hinblick auf den finanziellen Ressourcenverbrauch wirtschaftlich war. Bei der Maßnahmenwirtschaftlichkeit wird eruiert, ob die Maßnahme im Hinblick auf übergeordnete Zielsetzungen insgesamt wirtschaftlich war.“*

In der Wirksamkeit der Fördermaßnahmen auf die Verminderung der CO_2-Emissionen lassen sich mit der vorgestellten Methodik nur geringe, wenn nicht sogar gar keine Rückschlüsse ziehen, wie folgender Auszug aus der Studie [16] zeigen:

> *„Die zur Verfügung stehenden Fördermittel geben als finanzieller Input im Rahmen des Förderprogramms Anstoß zu einer Realisierung eines Projektes. Als Output kann im Falle des MAP die Installation, Erweiterung oder Optimierung einer EE- Wärme-/Kälteanlage gem. Fördertatbeständen definiert werden. Zeitlich nach dem "Output", aber noch unmittelbar kausal mit der Programmmaßnahme in Verbindung stehen die Ergebnisse der Maßnahmen. Im Fall des MAP also die Substitution von fossilen Brennstoffen bzw. die eingesparte Energie oder die Entwicklung der Gesamtkapazitäten und damit auch die Reduktion von Emissionen. Mit größerem zeitlichem Abstand und meist nur mittelbar kausal dem Programm zuzurechnen sind schließlich die Wirkungen des Förderprogramms. Hierzu zählen längerfristige Effekte wie Schaffung einer wettbewerbsfähigen erneuerbaren Energien Branche, ein nachhaltiger Strukturwandel oder Weiterentwicklung von Technologien. Die Beziehung zwischen Fördermaßnahme und Wirkung wird als mittelbar bezeichnet, weil neben dem Impuls durch das Förderprogramm eine Reihe weiterer externer und nicht durch das Programm zu steuernden Faktoren die Wirkungsgrößen beeinflussen.“*

Mit rund 300 000 Tonnen CO_2-Minderung im Jahr 2018 der durch das Marktanreizprogramm MAP geförderten Anlagen sind die meisten Fördergelder in die Nutzung von Biomasse-Anlagen geflossen. Eine Technologie, die durch das Biomassebudget eng begrenzt ist. Für die zukünftig wichtige Förderung von Wärmepumpen konnten in [16] noch keine abschließenden Aussagen zur Wirtschaftlichkeit getroffen werden.

Die Verbesserungen der Förderbedingungen seit Anfang 2020 in Deutschland werden aus Sicht der Gutachter die Maßnahmen zum Klimaschutz durch die Bundesregierung zwar unterstützen, jedoch können die neuen steuerlichen Vorteile und die neue Förderrichtlinie zur Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) nur Anreize für die Gebäudebesitzer schaffen. Sie sind somit keine Garantie zur Erreichung des aus Sicht der Gutachter einzig sinnvollen indikativen Meilensteins CO_2-Minderung zur Einhaltung des noch verfügbaren Emissionsbudgets.

Zudem werden in der LTRS eine Vielzahl von Fördermöglichkeiten auf nationaler und internationaler Ebene benannt, welche den privaten Investor durch die Unüberschaubarkeit des Angebotes eventuell überfordern.

Aus der LTRS wird erkennbar, dass Deutschland hinter seinen eigenen und den europäischen Zielen liegt. Dennoch benennt der Bericht keine eindeutigen Strategien, wie das eindeutig definierte Ziel des Pariser Abkommens (Treibhausgasneutralität bis 2050) weiterhin erreicht werden kann.

Eine Anpassung der Meilensteine ist zwingend notwendig. Es wäre aus Sicht der Gutachter hilfreich, die Ziele zu konkretisieren und neue Konzepte zur Umsetzung zu entwickeln.

5.10.2 Ausblick Förderprogramme

Die Gutachter würde es begrüße, wenn die zukünftige Förderpolitik sich an der Maxime „Schnellstmögliches Erreichen von Klimaneutralität unter Einhaltung des CO_2-Emissionsbudgets“ [41] orientiert, bei effektivem Einsatz der Fördermittel und der Investitionen für den Ausbau erneuerbarer Technologien für die Wärme- und Stromerzeugung und deren Nutzung.

Kurz- und mittelfristig stehen hierfür nur der beschleunigte Ausbau von PV und Windkraft als einzige Optionen zur Verfügung. Dies spricht für die Dominanz des „Elektropfades“ gegenüber dem „Technologiemix-Pfad“, da dezentrale Lösungen mit Wärmepumpen und elektrischer Direktheizung wesentliche Vorverluste vermeiden. Nennenswert in diesem Zusammenhang sind die Verluste von Nah- und Fernwärmenetzen, von Speichern, von immer Kraft-Wärme-Kopplung in Heizkraftwerken und in Blockheizkraftwerken. Diese Technologien würden einen mittel- und langfristig um 3 bis 5-fach so hohen Ausbau von PV- und Windkraft-Kapazitäten erfordern. Vor allem, wenn sie noch längere Zeit zunächst mit Erdgas unter Erschöpfung des noch verbliebenen geringen Emissionsbudgets betrieben würden.

Die genannte Maxime („vermeidbare Verluste vermeiden“) spiegelt sich allerdings nicht in der derzeitigen Bewertung von KWK wieder - Stichwort „Stromgutschriftmethode“. Initiiert durch verschiedene Interessensverbände wird das Problem vielfach nicht thematisiert und mündet in einer weiteren Ausbauförderung von KWK, der sich die Gutachter nicht anschließen. Dies findet sich vor allem in Quartiersansätzen mit dem Vorschlag des Ausbaus von Nah- und Fernwärmesystemen bis hin zu einem Anschlusszwang wieder.

Der 2014 vom Passivhaus-Institut eingebrachte Vorschlag einer Primärenergiebewertung zukünftig nur noch regenerativer Energien („PER“) hat sich dagegen bislang nicht etabliert; auch wenn er substantiell zur Problemlösung beigetragen hätte - ähnlich wie auch der Ansatz des Einhaltens eines noch verbleibenden CO_2-Emissionbudgets.

Im Anhang 3.3.4 wird vertieft auf die Problematik einer zukünftig weiteren Förderung der Aus- und Neubaus von Nah- und Fernwärmenetzen eingegangen.

5.11 Sanierungsrate, Sanierungstiefe und Sanierungsquote

Der Gebäudebestand entwickelt sich durch Neubau, Abriss und Sanierungstätigkeiten. Der Gesamtmodernisierungsfortschritt beim Wärmeschutz im (nicht abgerissenen) Altbau hängt dabei von der Sanierungsrate und -tiefe ab. In der Fachwelt wird jedoch ein Mangel an Hintergrundinformationen zum Thema beklagt; die Deutsche Immobilien-Akademie Freiburg DIA stellt 2012 beispielsweise fest [117]:

> *„Die aktuelle Sanierungsrate ist leider keineswegs so eindeutig bekannt, wie es für eine saubere Analyse nötig wäre. Denn die durchgeführten energetischen Sanierungen werden weder in ihrer Zahl noch in ihrer Tiefe erfasst.“*

Beide Einflussgrößen werden nachfolgend separat beschrieben und auch die sich aus der dünnen Datenbasis ergebenden Konsequenzen näher beleuchtet.

Dabei beschreibt die „Sanierungsrate“ die Umsetzungszahlen je Zeiteinheit und die „Sanierungstiefe“ die Qualitäten der Sanierung. Die „Sanierungsquote“ ist die Kombination beider Einflüsse. Sie lässt sich näherungsweise als Verminderung des Energieverbrauchs definieren.

5.11.1 Sanierungsrate

Es gibt keinen Konsens über eine einheitliche Definition der „Sanierungsrate“. Dennoch wird der Begriff flächendeckend in den einschlägigen Veröffentlichungen und Studien verwendet, denn der Parameter „Steigerung der Sanierungsrate“ ist ein wichtiger Baustein der Energiewende im Gebäudesektor.

Mehrheitlich wird darunter der zeitliche Aspekt (die zeitliche Häufigkeit) einer Sanierung verstanden.

Studie des IWU und BEI von 2010

Die Primärliteratur zum Thema „Sanierungsrate“ ist äußerst überschaubar. Die diesen Primärauswertungen zugrundeliegende Datenbasis ebenfalls. Die mit Abstand am häufigsten zitierte Primärdatenquelle ist eine Stichprobenauswertung von 7500 Gebäuden aus dem Jahr 2010, durchgeführt vom Institut Wohnen und Umwelt und das Bremer Energieinstitut [6]. Grundlage aller weiteren Auswertungen ist der absolute energetische Sanierungszustand der einzelnen Gebäudehüllbauteile, siehe Abbildung 325. Die Zahlenbasis ist dem Gebäudereport der DENA entnommen, welcher die Datenbasis aus IWU/BEI fortschreibt.

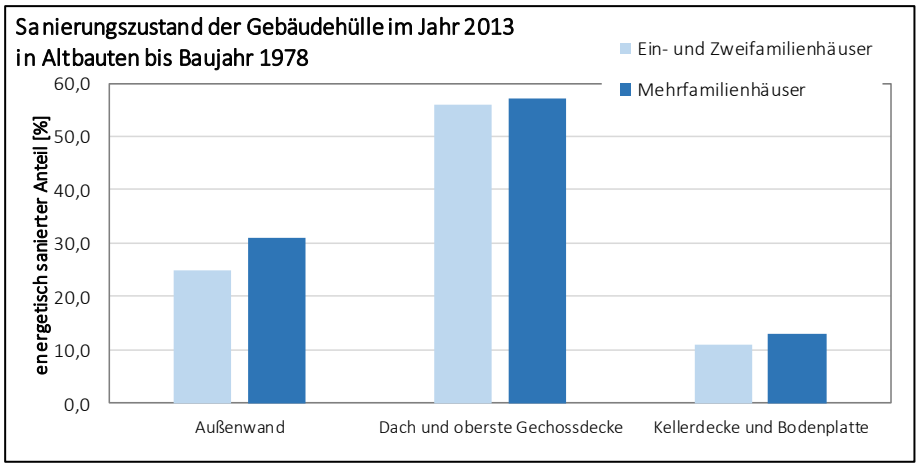


Abbildung 325 Sanierungszustand der Gebäudehülle von Altbauten bis 1978 im Jahr 2013, eigene Darstellung nach [9]

Aus dem Baujahr der untersuchten Gebäude und dem Anteil der energetischen Sanierung zum Untersuchungszeitpunkt lässt sich eine jährliche Zuwachsrate an energetischer Sanierung rückwärts berechnen. Folgende Werte für die Sanierungsrate der Gebäudehülle ergeben sich [6]:

- Zeitraum 2005 - 2008: 0,8 %/a (Gebäudehülle ohne Technik, alle Wohngebäude)
- Zeitraum 2005 - 2008: 1,1 %/a (Gebäudehülle ohne Technik, Wohngebäude bis Baujahr 1978)

Die mittlere jährliche Sanierungsrate wird aus den Einzelmaßnahmen (Dämmung Außenwand, Dämmung Dach bzw. Obergeschossdecke, Dämmung Fußboden bzw. Kellerdecke, Fenstererneuerung) berechnet. Die Maßnahmen werden im Verhältnis der Heizwärmeeinsparungen gewichtet. Teilsanierungen werden somit entsprechend berücksichtigt.

So heißt eine Sanierungsrate von 1 %/a, dass statistisch nach 100 Jahren alle Hüllflächen an allen Gebäuden einmal energetisch modernisiert wurden. Insbesondere die Flächen, die kaum natürlichen Instandhaltungsbedarf aufweisen oder nicht zugänglich sind, drücken den Schnitt daher nach unten.

Die gegebene Primärdaten komprimiert beispielsweise der DENA Gebäudereport 2012, siehe Abbildung 326. In der Studie von Empirica ergibt sich aus der Datenbasis die Darstellung der Abbildung 327.

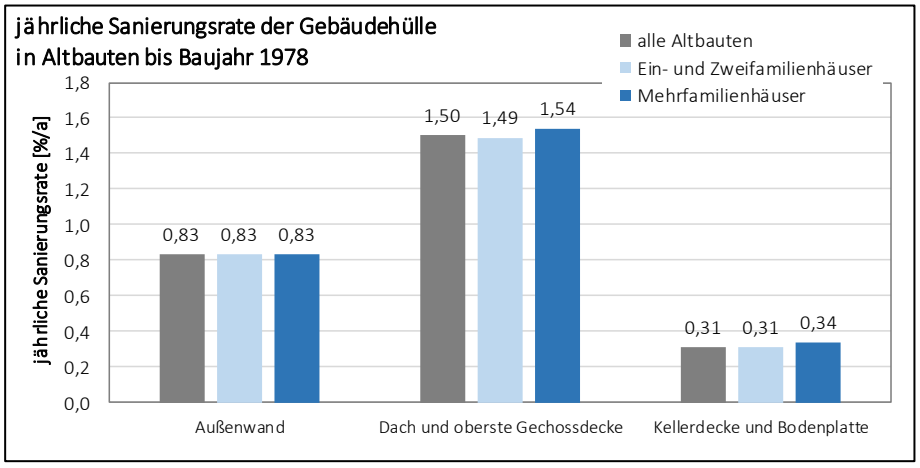


Abbildung 326 Sanierungsraten für die Gebäudehülle von Altbauten bis 1978 im Zeitraum 2005 bis 2008, eigene Darstellung nach [118]

Im Detail liefert die Datenerhebung der Jahre 2005 bis 2010 auch die Erkenntnis, dass bei den 7500 Stichprobengebäuden überwiegend Einzelmaßnahmen durchgeführt wurden. Eine Gesamtmodernisierung aller Maßnahmen ist um den Faktor 20 seltener als die Umsetzung einer Einzelmaßnahme.

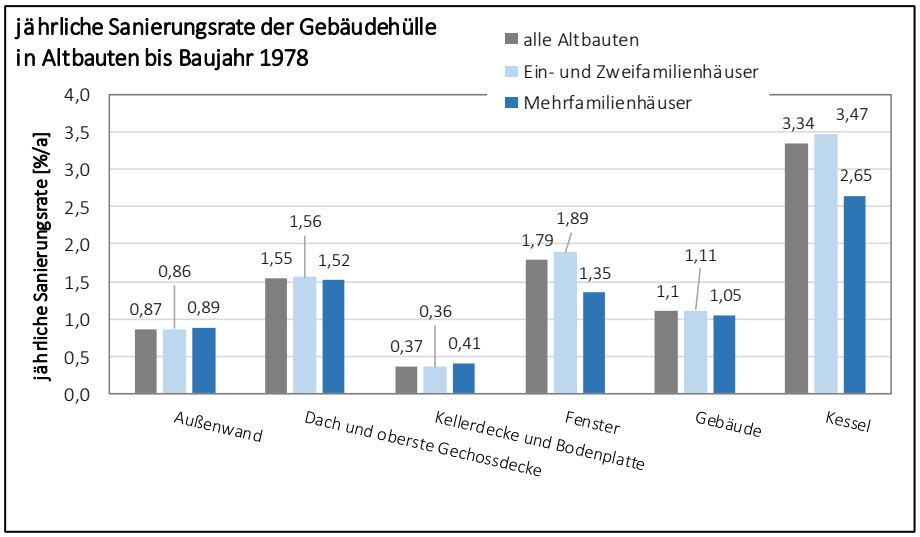


Abbildung 327 Sanierungsraten für die Gebäudehülle von Altbauten bis 1978 im Zeitraum 2005 bis 2008, eigene Darstellung nach [120] [6]

Der Istzustand der Sanierungsrate wird in den letzten Jahren mehrheitlich bei ca. 1 %/a vermutet. Der Wert umfasst gewichtet die Gebäudehüllbauteile (Dach, Wand usw.).

Das Deutsche Institut für Wirtschaftsförderung ging auf Basis der Studie von IWU im Jahr 2011 davon aus, dass neben den 0,8 %/a energetischer Sanierung an Außenwänden noch weitere 2,4 %/a nicht-energetische Sanierung stattfinden [167] (nur streichen, neu verputzen usw.).

Wärmeschutz- und Gesamtmodernisierungsrate

Das IWU und das Bremer Energieinstitut [6] bilden bereits 2010 die mittlere Sanierungsrate allein aus den Daten der Gebäudehülle. Diefenbach und Cischinsky geben im Jahr 2015 in [333] folgende Definition für die „Wärmeschutz-Modernisierungsrate“ an:

> *„Sinnvoll ist, die jährliche Modernisierungsrate des Wärmeschutzes der Gebäudehülle zu betrachten, genauer gesagt: die jährlich in deutschen Gebäuden durch Wärmedämmung oder Fensteraustausch energiesparend erneuerte Bauteilfläche dividiert durch die gesamte thermische Hüllfläche im Gebäudebestand.“*

Sie wird als ein Indikator (aber nicht der einzige, weil beispielsweise die Änderungsrate der Anlagentechnik nicht enthalten ist) angesehen, um Maßnahmen am Gebäudebestand zu beschreiben, zu monitoren und vorausschauend zu steuern.

Neben einer Datenanalyse diverser Primärquellen (u. a. auch die IWU Datenerhebung des IWU von 2010 [6]) wertet die Deutsche Immobilien-Akademie jedoch auch die Minderung des tatsächlichen Energieverbrauchs der Haushalte aus und errechnet rückwärts eine Gesamtsanierungsrate, welche zu dieser Einsparung geführt hat. Hierin sind alle Maßnahmen enthalten – an der Gebäudehülle und der Anlagentechnik. Die finale Feststellung ist [117]:

> *„Keinesfalls würde allerdings eine Sanierungsrate von 1 % der ineffizientesten Gebäude dazu ausgereicht haben, eine jährliche Energiemengenreduktion um 3 % oder mehr zu bewirken.“*

Etwas höher wurde die Sanierungsrate auch im CO_2-Gebäudereport von co2online und Fraunhofer IBP [17] eingeschätzt. Auf Basis von Befragungen zu Voll- und Teilsanierungen (5/6 bzw. ≤ 4 von 6 möglichen Maßnahmen) ergab sich für den Zeitraum 2004 bis 2006 eine Rate von 2,2 %/a.

Unter Berücksichtigung aller verbrauchsmindernden Maßnahme, auch der Anlagentechnik liegt der Wert bei ca. 2 %/a.

Erwünschte und reale Modernisierungsrate

Sämtliche konzeptionelle Studien zur Entwicklung des Verbrauchs der Gebäude nutzen die „Sanierungsrate“ als Instrument zur Modellierung der Zukunft, siehe auch Anhang 4.2.2. Dabei wird vom Ziel aus gedacht: welcher Verbrauch soll zum Zeitpunkt x (2020, 2035, 2050) zu verzeichnen sein und wie ist dieser Wert erreichbar. Häufig wird kommuniziert, dass der Wert auf 2 %/a verdoppelt werden muss. Gemeint ist dabei regulär die Wärmeschutz-Modernisierungsrate (der Gebäudehülle). Je später der Herausgabezeitpunkt der Prognosestudie, desto größer ist die kommunizierte Steigerungsnotwendigkeit, weil die Spanne bis zum Endpunkt der Überlegungen jeweils knapper wird.

Wird das Gebäudemodell „GEMOD“ genutzt, wie in [119], ist die Sanierungsrate keine Vorgabegröße, sondern ein Ergebnis des Modells. Vorgegeben werden das Jahr der Errichtung eines Gebäudes, die Nutzungsdauern der einzelnen Bauteile (vgl. Anhang 5.9.1) sowie eine Verteilung von energetischen und nicht-energetischen Sanierungen. Es ergeben sich für alle Bauteile jeweils eigene wellenförmige Sanierungsaktivitäten, die sich überlagern. Die 2017 berechneten durchschnittlichen Sanierungsraten aus der Studie der Beuth-Hochschule und IFEU [119] betragen im Wohnungsbau:

- Szenario konventionelle Effizienz: 1,12 % (2011) über 1,38 % (2020) bis 1,55 % (2040)
- Szenario maximale Effizienz: 1,91 % (2011) über 2,77 % (2020) bis 2,40 %(2040)

Aus den real beobachtbaren Ergebnissen der Minderung des Endenergieverbrauchs (siehe Anhang 5.4.1) lässt sich schlussfolgern, dass tendenziell der erste Pfad der Realität entspricht. Dies deckt sich mit einer Auswertung des BTGA aus dem Jahr 2018 [334].

Es lässt sich zwischen 2010 und 2016 kein Anstieg der Investitionsvolumina in die energetische Sanierung feststellen, siehe Abbildung 328. Im Gegenteil: während die absoluten Investitionen stiegen, nahm der Anteil an energetischer Sanierung ab. Eine Preisbereinigung hat nicht stattgefunden. In derselben Veröffentlichung ergibt sich für den gesamten Umsatz der TGA-Branche (ohne Unterteilung in Neubau und Bestand, energetische und nicht energetische Maßnahmen) eine Umsatzsteigerung von 2,3 %/a (2008 bis 2017).

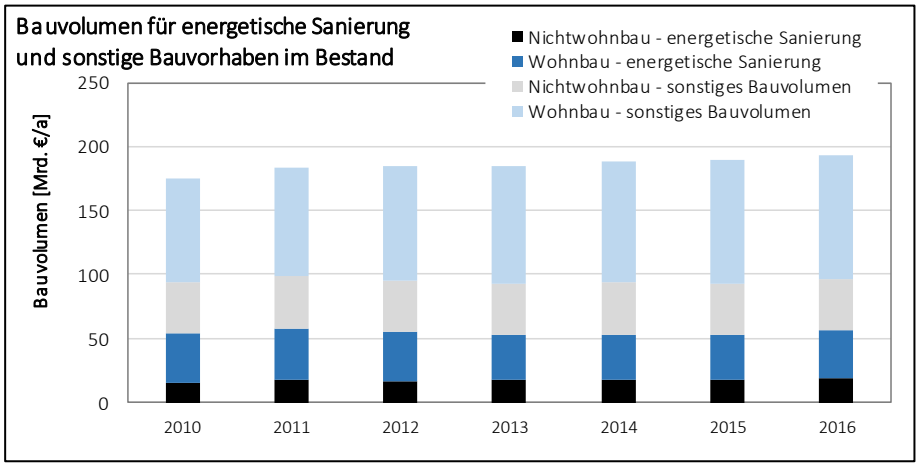


Abbildung 328 Bauvolumen im Bestand und Anteil der energetischen Sanierung, eigene Darstellung nach [334]

Zwischen der real beobachtbare Sanierungsrate und den für die Klimazielerreichung getroffenen Annahmen sind seit Jahren deutliche Diskrepanzen feststellbar.

Abbau des Sanierungsstaus bzw. künstliche Erhöhung der Sanierungsrate

Aus der Diskrepanz zwischen notwendiger und beobachtbarer energetischer Sanierung leitet sich in der Literatur der Begriff „Sanierungsstau“ ab. In Reaktion und aus dem Blickwinkel der Gebäudeeigentümer schreibt Simon 2012 [120]:

„Vor diesem Hintergrund ist die aktuell beobachtbare Gesamtmodernisierungsrate nur niedrig im Vergleich zu den politischen Zielen, nicht aber im Vergleich zum Verhalten der Eigentümer und dem Zustand der Gebäude. Kurz: Eine energetische Gesamtmodernisierungsrate von 1 % ist schlicht nicht niedrig. […] Ein politischer Vorwurf eines Sanierungs-Attentismus dürfte bei der Mehrheit der Eigentümer auf Unverständnis stoßen oder sie in dem Glauben wiegen, dass damit ja nur die anderen Eigentümer gemeint sein können, schließlich hat man ja selbst erst letztes Jahr drei neue Wärmeschutzfenster eingebaut und vor fünf Jahren die Heizungsanlage ausgetauscht."

Insbesondere ist für Kellerdecken und oberste Geschossdecken kein Sanierungsstau gegeben. Der einzige Anlass diese eigentlich wartungsfreie Fläche zu verändern ist die energetische Verbesserung. Ähnliches gilt für Klinkerfassaden. Aufgrund real deutlich längerer Lebensdauern vieler Bauteile als 50 Jahre können sich „von allein" keine Sanierungsraten von 2 %/a (für diese Bauteile) ergeben Es ist vor allem ein „energetischer Sanierungsstau" festzustellen.

Diefenbach et al. stellen 2019 fest [57]:

„Allerdings muss […] die Modernisierungsrate deutlich erhöht werden – und zwar zum Teil über die typischen Sanierungszyklen der Bauteile hinaus. Das gilt - neben der vom Sanierungszyklus unabhängigen Obergeschoss- und Kellerdeckendämmung – vor allem für die Wanddämmung. Bei der Dachdämmung und Fenstererneuerung sind dagegen bereits heute relativ hohe Raten zu beobachten. […] Auch hier ist allerdings nicht sicher, ob in jedem Fall eine Kopplung an ohnehin notwendige Sanierungen stattfindet."

Eine über den 1,1 %/a deutlich erhöhte Sanierungsrate ist nur erzielbar, wenn (neben den Energieersparnissen) dauerhaft Anreize zur Investition geschaffen bzw. aufrechterhalten oder ausgebaut werden.

Monitoring als Daueraufgabe

Die DENA stellt in ihren Gebäudereports 2012 und 2016 [118] [9] unverändert fest:

„Trotz der großen politischen Bedeutung des Themas ‚Energetische Gebäudesanierung' gibt es derzeit keine Quelle, die jährlich aktuell eine energetische Sanierungsrate für den deutschen Gebäudebestand aufzeigt."

Diefenbach und Cischinsky empfehlen die statistische Untersuchung (kleiner Stichproben) als Daueraufgabe [333] mit der Begründung:

„Strukturelle Basisdaten und Indikatoren dieser Art sind entscheidend für die Kenntnis der aktuellen Situation und der Dynamik im Gebäudesektor. Als Zielgrößen sind sie auf Grundlage der beobachteten Entwicklung und darauf aufbauender Trend- und Szenarienanalysen regelmäßig zu überprüfen und anzupassen. Sie haben nicht die Relevanz und das Gewicht der ‚eigentlichen' Ziele (Klimaschutz und Treibhausgasemissionen), sondern sind sozusagen Mittel zum Zweck. Darüber hinaus sind die Einzelvorgaben keine Fixpunkte (wie dies bei dem im Energiekonzept genannten Wert von 2 % pro Jahr für die energetische Sanierungsrate den Anschein haben mag). Vielmehr bestehen Spielräume zwischen den unterschiedlichen Maßnahmen: Es gibt nicht nur einen einzigen Pfad zum Klimaschutzziel, sondern vielmehr einen Korridor.
[…]
Ganz oben auf der Tagesordnung steht allerdings ein anderes Problem: Ohne verlässliche Basisdaten fehlt der gesamten Diskussion die Grundlage. Dringend benötigt werden regelmäßige Primärerhebungen. Die genannten Daten für den Wohngebäudesektor sind inzwischen veraltet, eine erneuerte und verstetigte Datengewinnung ist hier ebenso erforderlich wie bei den Nichtwohngebäuden."

Als Monitoring-Instrument ist die Erfassung der Sanierungsrate sinnvoll. Es handelt sich dabei um eine Daueraufgabe. Dies kann über kleine Stichproben (Mikrozensus o. ä.) oder über eine Breitenerfassung (Energieausweis, Fördermittel) erfolgen. Sofern man die Förderung an einen Erfolgsnachweis koppeln würde, wäre eine bessere Datenlage schnell erzielbar.

5.11.2 Sanierungstiefe

Die Sanierungstiefe beschreibt im Allgemeinen den Grad der energetischen Verbesserungen, welcher mit einer Sanierung erreicht wird – in einer Abstufung von „keine energetischen Verbesserungen" bis hin zur Grenze des technisch Machbaren oder sogar Denkbaren. Sie lässt sich auch als Sanierungsqualität beschreiben.

In selteneren Fällen meint der Begriff etwas anderes, nach Friedrich und Erhorn [17], z. B. den prozentualen Anteil der durchgeführten an den technisch sinnvollen Sanierungsmaßnahmen. Diese Definition wird an dieser Stelle nicht weiterverfolgt.

Sanierungstiefen in der Modellbildung

Rückblickend ist die Qualität von Sanierungen von den jeweils geltenden gesetzlichen Randdaten (Wärmeschutzverordnung, Energieeinsparverordnung) bzw. der Fördermittellandschaft (KfW, BAFA usw.) geprägt. In der Vorausschau wird die Sanierungstiefe jedoch auch bei der Modellbildung benutzt – vor allem zur Abbildung der künftigen Entwicklung der Gebäudehüllen. Dabei sind qualitativ deutliche Unterschiede festzustellen:

- differenzierte Anwendung: Berücksichtigung von Restriktionen hinsichtlich des Denkmalschutzes, der natürlichen Sanierungszyklen abhängig von Baualter, z. B. in Jochum [119]
- undifferenzierte Anwendung: unabhängig von tatsächlich gegebenen (technischen, räumlichen oder anderen) Restriktionen Potentialabschätzungen einer homogenen Sanierungstiefe, z. B. in FIW [195].

Beide Ansätze haben ihre Berechtigung. Zur Potentialabschätzung ist es legitim, davon auszugehen, dass jeweils alle dämmbaren Bauteile aller Gebäude bestimmter Altersklassen auf das Niveau der EnEV 2009 bzw. Niedrigenergieniveau gebracht werden, wie es die Metastudie zur Wärmedämmung des FIW [195] praktiziert. Um einen tatsächlichen Verlauf der Modernisierungsaktivitäten zu modellieren, ist der differenzierte Ansatz jedoch geeigneter.

Verwendet wird in der Studie von Beuth-Hochschule und IFEU das Gebäudemodell „GEMOD“. Es berücksichtigt, für die einzelnen Komponenten und Bauteile jeweils deren einen vorgegebenen Sanierungszyklus ausgehend von einer ersten energetischen Verbesserung. Der Zeitpunkt der ersten Verbesserung richtet sich nach dem Jahr der Errichtung. Darüber hinaus werden 3 Sanierungstiefen definiert, siehe auch Abbildung 329:

- Pinselsanierung: keine energetische Verbesserung in diesem Sanierungszyklus,
- Konventionelle Sanierung: entsprechend etwa der EnEV 2012 (Einzelbauteilanforderungen),
- Ambitionierte Sanierung: zu Beginn Einzelanforderungen der KfW (Stand 2014), später höherwertiger.

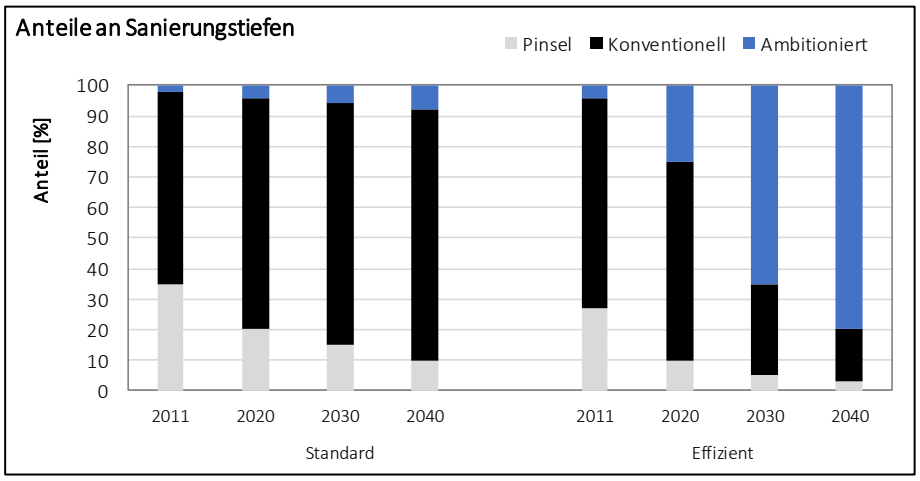


Abbildung 329 Anteile von unterschiedlichen Sanierungstiefen zweier Szenarien, eigene Darstellung nach [119]

Abbildung 330 zeigt die Auswirkungen der Annahmen am Beispiel. Die energetische Sanierung startet erst 1973 mit der Ölkrise. Ein Abriss ist berücksichtigt, ebenso ein Verschlechterungsverbot bei der 2. Sanierung. Der erste Sanierungszyklus erstreckt sich hier über einen Zeitraum von rund 40 Jahren. Analog werden alle Bauteile für die gesamte Gebäudetypologie bearbeitet.

Erreichbar sind die verbesserten Sanierungstiefen des Effizienzszenarios nur mit Anreizen. Für das Jahr 2040 sind selbst im Standardszenario nur noch 10 % der Sanierungen „Pinselsanierungen“. Das hieße, maximal die Gebäude unter Denkmalschutz bleiben ohne Maßnahmen (oder werden in anderen Objekten kompensiert). Im Effizienzszenario müssten praktisch für alle Flächen, für die es Restriktionen gibt, Lösungen gefunden werden.

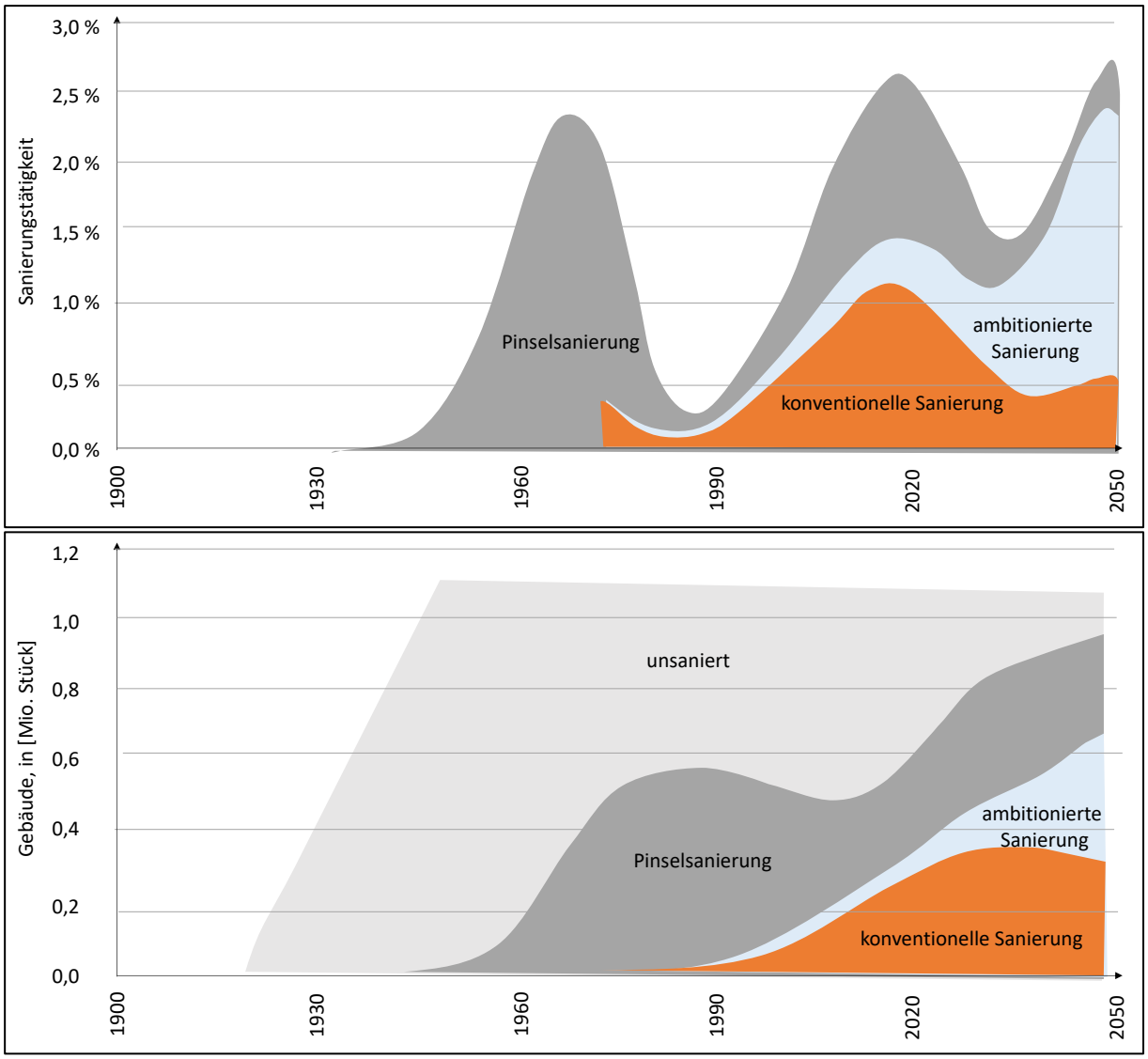


Abbildung 330 Beispielhafte Auswertung für die Dächer von Einfamilienhäusern der Baualtersklasse 1919-1948, Grafik vereinfacht nach [119]

Zu setzende Standards

Die Sanierungstiefe wird – aus Sicht der Gebäudeeigentümer – geprägt dich die gesetzlichen Standards. Sie definieren das ohnehin erforderliche Niveau und damit indirekt eine ggf. ausgeschüttete Förderung.

Vor- und Nachteile von zu setzenden Standards werden u. a. in Rehkugler [117] diskutiert. Höhere Standards mindern – weil sie preiserhöhend wirken – zunächst die Investitionsbereitschaft von Eigentümern, v. a. im Mietwohnungsbau. Andererseits verschiebt eine Lockerung der Standards das Problem nur in die Zukunft. Nach anfänglich schnellen Erfolgen („billige Teilsanierungen“), schließt sich eine Phase der notwendigen Nachsanierungen an, die noch unwirtschaftlicher sind.

Denkmalschutz und andere Restriktionen

Restriktionen bei der Sanierung von Bauteilen und damit der erreichbaren Sanierungstiefe sind:

- erhaltenswerte Fassaden bzw. Bauteile, u. a. im denkmalgeschützten Bestand,
- für Fassaden darüber hinaus: Abstandsregelungen zu Nachbargebäuden, Straßen, Gehwegen
- für den unteren Gebäudeabschluss: fehlender Keller bzw. beheizter Keller, sehr geringe Kellerhöhe

Etwa 3,5 % des Wohnbaubestandes sind denkmalgeschützt, etwa 7 % der Altbauten (vor 1978) verfügen über eine oder mehrere erhaltenswerte Fassaden. Erhaltenswerte Fassaden sind bereits heute erheblich seltener gedämmt als andere Altbaufassaden [6]. Es darf davon ausgegangen werden, dass dieser Anteil sich nur geringfügig ändert – durch z. B. Innendämmung – bzw. immer schlechter bleiben wird als das „technisch heute Machbare".

Etwa 50 % der Keller sind von den genannten Restriktionen betroffen [118] und damit ebenfalls langfristig eine Schwachstelle für die Umsetzung einer großen Sanierungstiefe. Andererseits ist festzustellen, dass in denkmalgeschützten Gebäuden die Sanierungsrate von Keller- und Geschossdecken höher ist [6].

5.11.3 Sanierungsquote

Neben einer Datenanalyse diverser Primärquellen (u. a. auch die IWU Datenerhebung des IWU von 2010 [6]) wertet die Deutsche Immobilien-Akademie die Minderung des tatsächlichen Energieverbrauchs der Haushalte aus und errechnet rückwärts eine Gesamtsanierungsquote, welche zu dieser Einsparung geführt haben muss.

Hierin sind alle Maßnahmen enthalten – an der Gebäudehülle und der Anlagentechnik. Die finale Feststellung ist [117]:

> *„Keinesfalls würde allerdings eine Sanierungsrate von 1 % der ineffizientesten Gebäude dazu ausgereicht haben, eine jährliche Energiemengenreduktion um 3 % oder mehr zu bewirken."*

Die „Sanierungsquote" fasst die Effekte der Sanierungsraten („wie häufig") und Sanierungstiefen („wie gut") zusammen. In der Konsequenz kann man am abnehmenden Endenergieverbrauch alle Maßnahmen gemeinschaftlich beurteilen.

Kopplung Sanierungsrate und -tiefe

Die „natürliche" Sanierungsrate liegt deutlich unter der energetisch notwendigen, d. h. Bauteile werden seltener saniert, als viele Modernisierungsszenarien dies propagieren. Andererseits ist jede zweite energetische Modernisierung unwirtschaftlicher als die erste.

Wenn ein Gesamtziel in Form eines Verbrauchsrückgangs das Ziel ist, also eine bestimmte „Sanierungsquote" insgesamt festliegt, sind zwei Hebel zu Zielerreichung gegeben: entweder es wird auf eine hohe Rate bei moderater Tiefe gesetzt oder auf eine geringe Rate bei dann höherer Tiefe.

Mit Fördermitteln oder durch gesetzliche Anforderungen lassen sich beide Hebel beeinflussen. Die höhere Sanierungsrate bedeutet vorgezogene Investitionen. Die höhere Sanierungstiefe bedeutet bessere Standards.

Ausgehend vom typischen Verhalten von Investoren erscheint den Gutachtern der zweite Weg als zielführender. Nach Ansicht der Gutachter, wird daher die „Sanierungstiefe" der Bauteile am besten so gewählt, dass über sehr lange Zeiträume keine Nachsanierung mehr erforderlich ist. Um das zu forcieren, erscheint eine deutlich progressive (überproportionale) Förderung nur sehr guter Standards sinnvoll (die für 50 Jahre keinen „Anlass zur Reue" geben).

6 Anhang: Bilanzierungsmodell

Dieser Anhang stellt das Bilanzierungsmodell, welches zu den Bilanzergebnissen der Kapitel 1.4 und 1.5 führt, detaillierter und mit weiteren Hintergrundinformationen dar.

Im Rahmen der Gutachtenbearbeitung erfolgt die Energiebilanzierung, die ökologische und ökonomische Bewertung nach dem nachfolgend vorgestellten Verfahren. Berechnet werden exemplarisch zwei Typgebäude, das mittlere Ein- und Zweifamilienhaus EZFH sowie ein Mehrfamilienhaus MFH – wie in Anhang 3.1 vorgestellt. Für diese Gebäude können berechnet werden:

- die Nutzenergie,
- die Endenergie,
- die nicht-regenerative Primärenergie sowie
- die Emissionen (CO_2-Äquivalent)

jeweils für Heizung, Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom. Es kann entweder ein Zustand (vor Sanierung, nach Sanierung, heute, künftig) oder eine Änderung (Fenstertauch im MFH, Umstellung aller Wärmeerzeuger in allen EZFH usw.) betrachtet werden. Die Verbesserungsmaßnahmen können auch wirtschaftlich bewertet werden.

Die Programmierung dient als Grundlage für die Ausführungen zur Mikroebene in Anhang 3 zum einzelnen Objekt sowie durch Hochrechnen auf alle 19 Millionen Wohngebäude auch für die Makroperspektive in Anhang 4.

6.1 Mikroperspektive

Feste und variable Parameter für die Gebäude

Grundsätzlich sind die Typgebäude (siehe Anhang 3.1) mit ihren materiellen Eigenschaften hinterlegt, z. B. den Hüllflächen und Volumina sowie der Belegung mit Personen, welche nicht modifiziert werden. Darüber hinaus wird das Außenklima zunächst als nicht veränderlich angesetzt. Für andere Eigenschaften gibt es einen Katalog von Optionen, aus denen gewählt wird.

Darüber hinaus gibt es variable Eigenschaften für das einzelne Typgebäude, zwischen denen gewählt werden kann. Im Detail sind dies 11 Merkmale. Eine Option ist jeweils der Durchschnittswert für den vorhandenen Gebäudebestand, wobei dann eine mittlere Eigenschaft aller Gebäude unterstellt wird (mittlere Wandqualität, mittlere Solarausstattung, gemischt gewichtete Erzeugung usw.). Die Optionen im Einzelnen:

- Qualität der Außenwand: Ø, schlecht, mittel, gut, best
- Qualität der Fenster: Ø, schlecht, mittel, gut, best
- Qualität des oberen Gebäudeabschlusses: Ø, schlecht, mittel, gut, best
- Qualität des unteren Gebäudeabschlusses: Ø, schlecht, mittel, gut, best

- Art des Heizungssystems: Ø, Heizkörper, Fußbodenheizung, dezentral
- Art des Trinkwarmwassersystems: Ø, dezentral, zentral mit Zirkulation, zentral ohne Zirkulation
- Heizungserzeugung: Ø, Holzkessel, Gas-NT-Kessel, Heizöl-NT-Kessel, Gas-Brennwert-Kessel, Heizöl-Brennwert-Kessel, Fernwärme, Stromdirektversorgung, Außenluftwärmepumpe mit Spitzenlaststrom, Erdreichwärmepumpe
- Trinkwarmwassererzeugung: analog

- Photovoltaik: Ø, mit, ohne
- Solarthermie: Ø, mit, ohne
- Lüftung: Ø, mechanisch mit Wärmerückgewinnung, Fensterlüftung/Abluftanlage

Werden jeweils immer die Durchschnittswerte dieser Eigenschaften gewählt, entstehen das „Durchschnitts-EZFH“ und das „Durchschnitts-MFH“.

Für das einzelne Objekt (also auch für die „Durchschnittsgebäude“) kann neben dem aktuellen Zustand auch eine Verbesserung bilanziert werden, wobei dann die oben genannten 11 Punkte jeweils modifiziert werden – einzeln oder in Paketen. Im Einzelnen werden die materiellen Qualitäten (Dicke der Dämmung, Nutzungsgrad des Kessels usw.) dabei nicht abgefragt, sondern nur aus dem vorgegebenen Katalog der Optionen eine andere gewählt.

Andere als die genannten Verbesserungen lassen sich standardmäßig nicht berechnen. Allerdings werden im Sinne von Parametervariationen exemplarisch zusätzliche Untersuchungen mit der Berechnungstabelle durchgeführt, indem die Bilanzranddaten überschrieben werden. Beispielsweise wird testhalber ein anderer Klimadatensatz gewählt oder ein sehr sparsames Nutzerverhalten bei der Trinkwarmwasserverwendung.

Verknüpfte Parameter

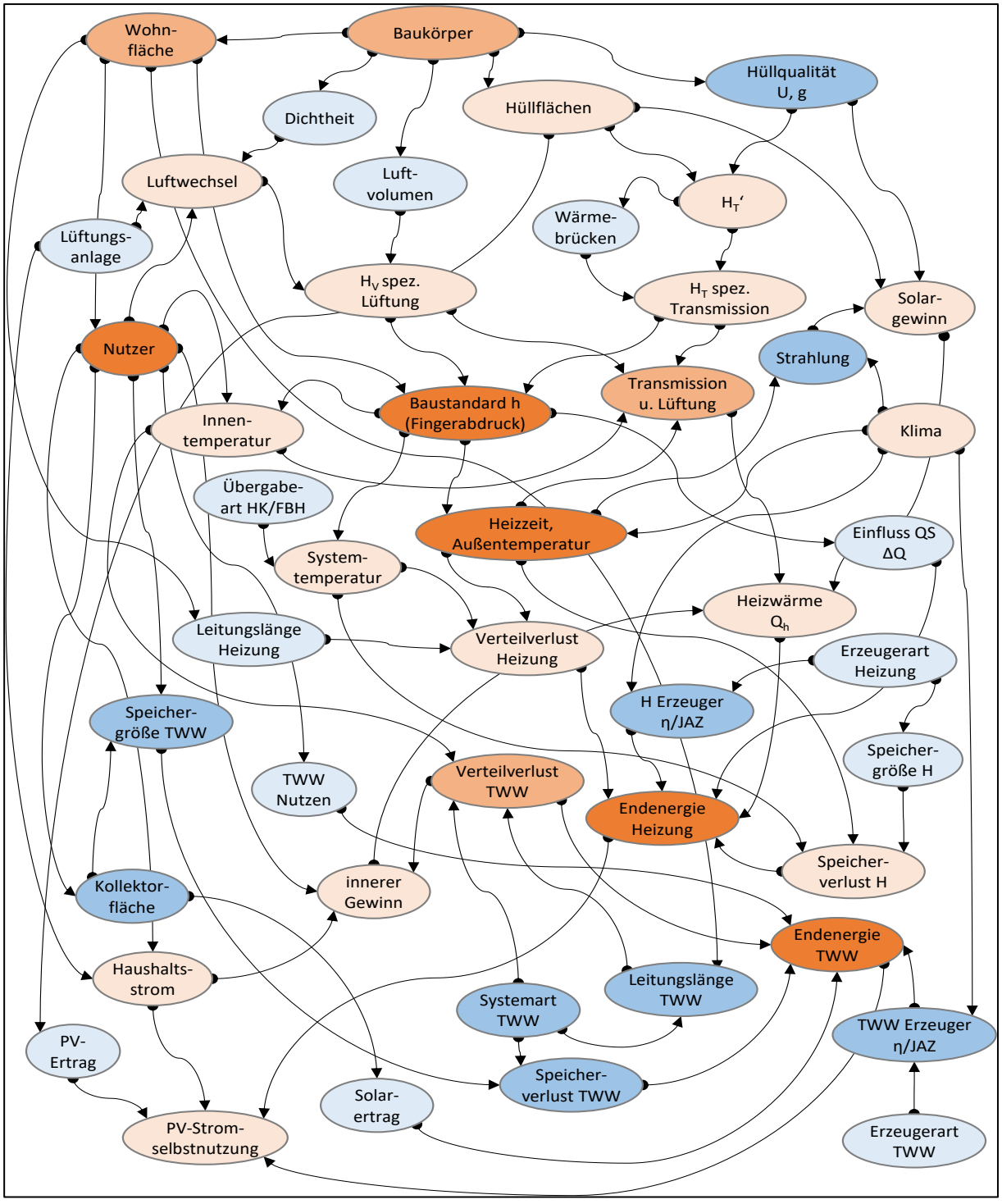


Abbildung 331 Verknüpfung der Einfluss- und Bewertungsgrößen im Überblick [eigene Darstellung]

Die Bilanzierung folgt im Grundsatz den Rechenmodellen der EnEV-Normen [112] bzw. des IWU-Verfahren „Energiepass Heizung/Warmwasser“ [75]. Jedoch wurde darauf geachtet, dass die Bilanzgrößen möglichst realistisch angenommen werden, so dass keine große Diskrepanz zwischen Energiebedarf und -verbrauch auftritt (vgl. Anhang 5.2).

In diesem Zusammenhang wurden auch Größen weggelassen, deren Einfluss nicht wesentlich ergebnisrelevant sind (vgl. auch das Beiblatt 1 zur DIN V 18599 zum Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich [109]). In der Programmierung wurden jedoch die nach Ansicht der Gutachter relevanten Verknüpfungen der Einflussgrößen auf den Energiebedarf abgebildet, siehe Abbildung 331.

Die einzelnen Abhängigkeiten sind in den folgenden Anhängen 6.1.3 bis 6.1.8 erläutert. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Farbgebung für die Verknüpfung der Größen untereinander gewählt wurde. Größen mit starker Abhängigkeit von anderen Einflüssen bzw. mit starker Beeinflussung andere Bilanzgrößen sind orange dargestellt (je intensiver die Farbe, desto intensiver die gegenseitigen Einflüsse). Weniger verknüpfte Größen sind blau markiert.

6.1.1 Berechnungsablauf

Unabhängig, ob Betrachtungen in der Mikro- oder Makroebene erfolgen, wird zunächst ein einzelnes Gebäude berechnet. Dies kann das EZFH oder das MFH sein. Wird der Gesamtbestand untersucht, wird anhand von Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten der Eigenschaften operiert. Die Bilanzierungsmethodik ist jedoch immer identisch. Sie wird nachfolgend erläutert.

Bilanzierung der Heizwärme

Der Heizwärmebedarf ist – wie üblich – eine Saldierung der Verluste (Transmission, Lüftung) und der Gewinne (interne und solare), siehe Abbildung 332. Als interner Gewinn aus der Anlagentechnik werden dabei nur die Leitungsnetze der Trinkwassererwärmung berücksichtigt. Für die Heizleitungen wird unterstellt, dass deren Abwärme im beheizten Bereich auch der Gebäudebeheizung dient. Damit ähnelt das Verfahren dem Ansatz der DIN V 4701-10 [214].

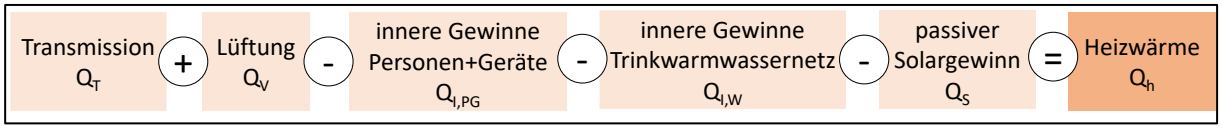


Abbildung 332 Berechnungsablauf Heizwärme [eigene Darstellung]

Auf die Verwendung eines Fremdwärmenutzungsgrades wird verzichtet. Die Tatsache, dass nicht alle Wärmegewinne nutzbar sind, wenn sie zur falschen Zeit oder am falschen Ort eintreffen, wird stattdessen in einer Differenzenergiemenge ausgedrückt.

Alle weiteren Hintergrundinformationen sowie Ansätze sind in Anhang 6.1.3 (Klima- und Nutzer) sowie 6.1.4 (Baukörper) zusammengestellt.

Bilanzierung der Endenergie

Die Heizungsbilanz ist in Abbildung 333 schematisch dargestellt. Neben dem Heizwärmebedarf wird ein „Zuschlag für Qualitätssicherung“ eingeführt. Er fasst die folgenden Einflüsse zusammen:

- die Nutzbarkeit oder nicht Nutzbarkeit von Wärmegewinnen
- abhängig vom Baustandard bzw. dem Verhältnis von Gewinnen zu Verlusten sowie
- der gewählten Regelungstechnik und Trägheit der Heizflächen

Je nachdem, ob in einem Gebäude eine Qualitätssicherung (z. B. ein hydraulischer Abgleich) erfolgt ist, fällt diese Größe verschieden aus. In alternativen Berechnungsverfahren sind die o.g. Einflüsse gesplittet und als „Fremdwärmenutzungsgrad“ nach Loga, bzw. DIN V 18599 und DIN V 4108-6 [76] [112] [244] sowie „Übergabeverluste“ nach DIN V 4701-10 [214] zu finden.

Es folgen die Verteilverluste im Keller sowie der Speicherwärmeverlust. Die sich ergebende Wärmemenge ist vom Wärmeerzeuger zu liefern. Dies erfolgt, analog der IWU-Bewertung im „Energiepass“ mit einem Nutzungsgrad (oder im Falle der Wärmepumpen mit der Jahresarbeitszahl).

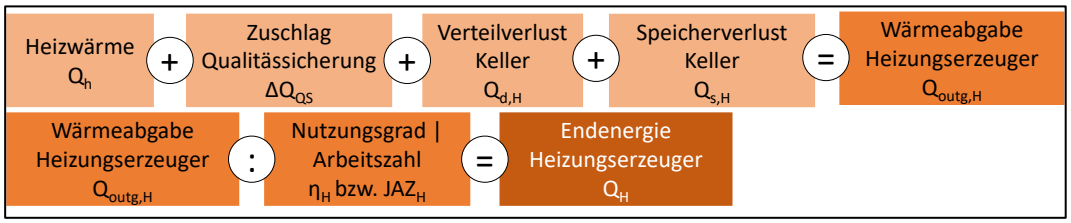


Abbildung 333 Berechnungsablauf Endenergie Heizung [eigene Darstellung]

Das Schema der Trinkwassererwärmung – Abbildung 334 – ist analog aufgebaut. Allerdings wird als Verteilverlust hier das gesamte Netz betrachtet. Die innerhalb des beheizten Bereiches anfallenden Rohrwärmeabgaben sind gleichzeitig interne Gewinne, s.o.

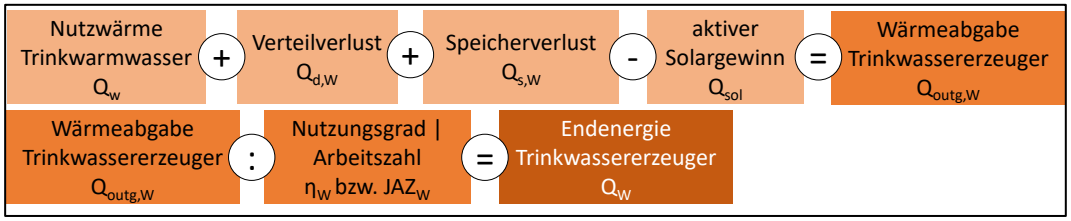


Abbildung 334 Berechnungsablauf Endenergie Trinkwarmwasser [eigene Darstellung]

Alle weiteren Hintergrundinformationen sowie Ansätze sind in Anhang 6.1.5 (Wärmeversorgung) zusammengestellt.

Die beiden Endenergiemengen für Heizung und Trinkwarmwasser werden anschließend zu einer „Endenergie für Wärme“ addiert. Auf der anderen Seite wird auch Photovoltaikstrom als Endenergie berechnet, siehe Abbildung 335. Dieser besteht aus einem im Gebäude nutzbaren Anteil (für Heizung und Trinkwarmwasser zunächst getrennt bestimmt) und einem ins Netz zurückgespeisten Anteil. Die Ansätze zur Bewertung der Photovoltaik sind für dieses Gutachten neu erstellt worden und werden in Anhang 6.1.6 erläutert.

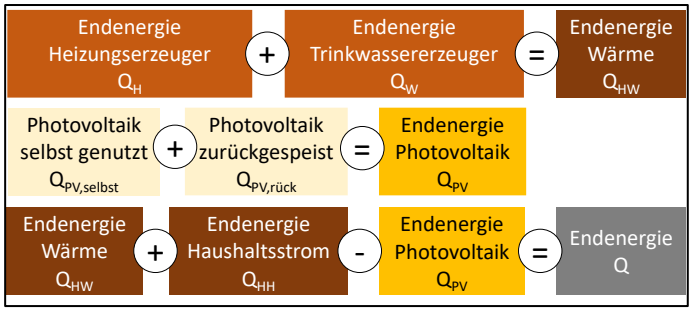


Abbildung 335 Berechnungsablauf gesamte Endenergie [eigene Darstellung]

Die finale Bilanz der Endenergie enthält – anders als in den sonst üblichen Bilanzen zur EnEV – neben der Wärmeenergie auch den Haushaltsstrom. Aus Sicht der Endenergie des einzelnen Gebäudes wird im Rahmen des hier vorliegenden Gutachtens festgelegt, dass der produzierte Photovoltaikstrom dem Sektor „Gebäude“ zugeordnet wird – unabhängig von der tatsächlichen Nutzbarkeit. Sofern also (im Einzelfall oder künftig ggf. flächendeckend) mehr Photovoltaikstrom erzeugt wird als es dem Endenergiebedarf für Wärme und Haushaltsstrom entspricht, entsteht rechnerisch ein „Plusenergiehaus“.

Bilanzierung der Primärenergie

Basis zur Berechnung der Primärenergie ist die Endenergie. Die Umrechnung erfolgt getrennt für die Endenergien der Heizung und Trinkwassererwärmung, siehe Abbildung 336. Es gelten die jeweiligen Primärenergiefaktoren, wie sie in Anhang 5.5.2 festgelegt wurden. Aus beiden Teilmengen entsteht – analog der Endenergie – eine Primärenergie für Wärme. Dieses Schema folgt dem Ablauf der EnEV-Normen.

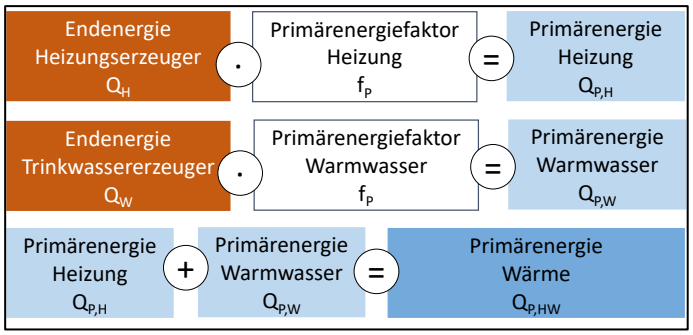


Abbildung 336 Berechnungsablauf Primärenergie Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung]

Daneben wird auch der Haushaltsstrom in die Betrachtung einbezogen, siehe Abbildung 337. Weist ein Gebäude keine Photovoltaik auf, ist die Bilanzierung an dieser Stelle abgeschlossen. Bei Vorhandensein einer Photovoltaik werden die beiden Anteile: der selbst genutzte und der zurückgespeiste Anteil unterschiedlich behandelt.

Der selbst genutzte Anteil wird anstelle des Netzstroms verwendet; für ihn gilt daher der Primärenergiefaktor des Netzstroms und verbessert damit die Primärenergie-Bilanz des Gebäudes. Der zurückgespeiste Anteil wird mit dem Primärenergiefaktor für „PV-Strom“ versehen (im Rahmen dieses Gutachtens lautet der Faktor „0“). Er verbessert die Bilanz des Gebäudes nicht.

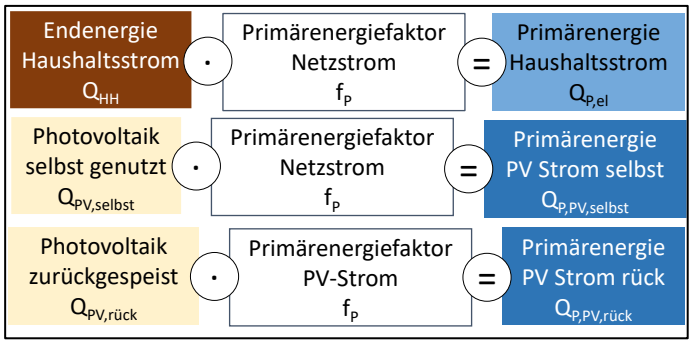


Abbildung 337 Berechnungsablauf Primärenergie Strom [eigene Darstellung]

In der finalen Bilanz der Primärenergien, siehe Abbildung 338, heißt dies, dass aus Sicht des Gebäudes nur der selbst genutzte Strom relevant für das Ergebnis ist. Es ergibt sich keine primärenergetische Gutschrift, aus der Rückspeisung.

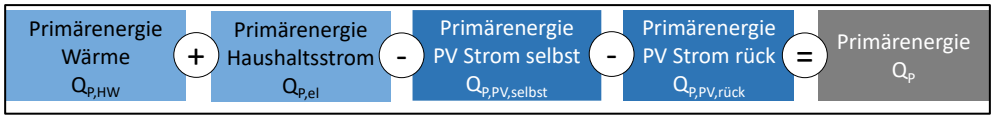


Abbildung 338 Berechnungsablauf gesamte Primärenergie [eigene Darstellung]

In diesem Bilanzmodell ist eine gebäudenahe PV-Strom-Erzeugung also primärenergetisch nur relevant, wenn der Strom im Gebäude genutzt wird. Weitere Festlegungen zur ökologischen Bewertung sind in Anhang 6.1.7 zu finden.

Bilanzierung der Emissionen

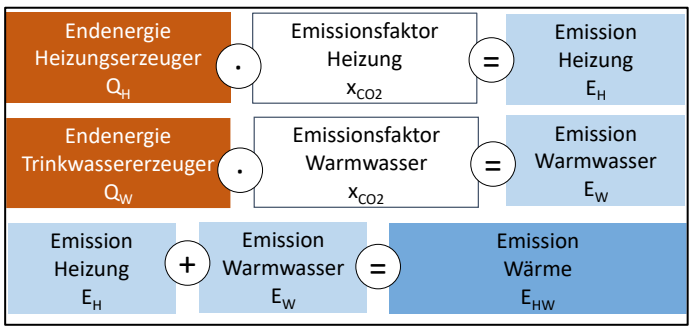


Abbildung 339 Berechnungsablauf Emissionen Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung]

Die Bilanzierung der Emissionen folgt dem identischen Schema wie die Primärenergiebewertung. Die Emissionen für Wärme entstehen aus der Einzelbetrachtung von Heizung und Trinkwarmwasser, siehe Abbildung 339. Es gelten die jeweiligen Emissionsfaktoren, wie sie in Anhang 5.5.3 festgelegt wurden

Anschließend werden der Haushaltsstrom, die selbst genutzte PV-Strommenge sowie die zurückgespeiste Menge zunächst einzeln bewertet, siehe Abbildung 340.

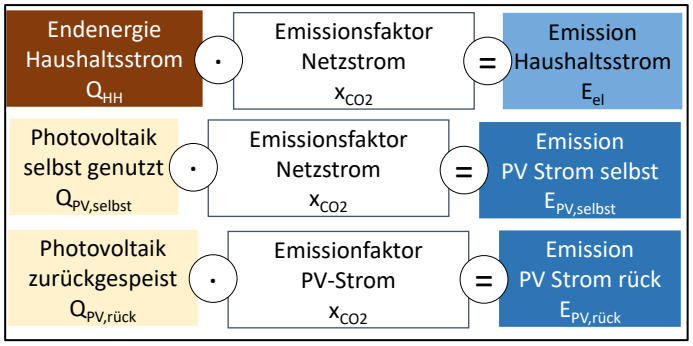


Abbildung 340 Berechnungsablauf Emissionen Strom [eigene Darstellung]

Weist ein Gebäude keine Photovoltaik auf, ist die Bilanzierung an dieser Stelle abgeschlossen. Bei Vorhandensein einer Photovoltaik werden die beiden Anteile: der selbst genutzte und der zurückgespeiste Anteil unterschiedlich behandelt. In der Endbilanz der Emissionen wird wiederum der – aus Sicht des Gebäudes ungünstigste Ansatz – gewählt. Der selbst genutzte Anteil wird anstelle des Netzstroms verwendet; für ihn gilt daher der Emissionsfaktor des Netzstroms und er verbessert damit die Bilanz des Gebäudes. Der zurückgespeiste Anteil wird mit dem Emissionsfaktor für „PV-Strom“ versehen (im Rahmen dieses Gutachtens lautet der Faktor „0 g/kWh“). Er verbessert die Bilanz des Gebäudes nicht. Es ergibt sich keine Verbesserung für das Gebäude, wenn PV-Strom zwar erzeugt, aber nicht genutzt wird, siehe Abbildung 341.

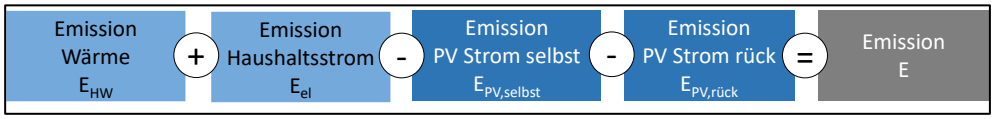


Abbildung 341 Berechnungsablauf gesamte Emissionen [eigene Darstellung]

Weitere Festlegungen zur ökologischen Bewertung sind in Anhang 6.1.7 zu finden.

Bilanzierung der Energiekosten

Die Energiekosten für Heizung und Trinkwarmwasser werden anhand der jeweiligen Energiepreise zunächst separat berechnet. Es gelten die jeweiligen Energiepreise, wie sie in Anhang 5.5.1 festgelegt wurden. Sofern Strom der Energieträger ist, erfolgt dies zunächst ohne Berücksichtigung der Photovoltaik. In Addition entstehen – analog End- und Primärenergie sowie der Emissionen – die Energiekosten für Wärme, siehe Abbildung 342.

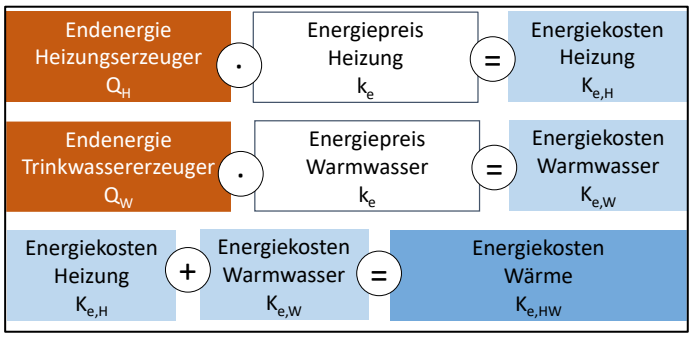


Abbildung 342 Berechnungsablauf Energiekosten Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung]

Auch die Stromkosten für den Haushaltsstrom werden zunächst in absoluter Höhe bestimmt, unabhängig davon, ob eine Photovoltaikanlage vorhanden ist oder nicht, siehe Abbildung 343. Anschließend folgt die Bewertung der Photovoltaik mit ihren beiden Einzelpositionen. Einerseits den zurückgespeisten Strom, für den die Vergütung des Versorgers angesetzt wird, andererseits den selbst genutzten Photovoltaikstrom, für den der Netzstrompreis gilt.

Sofern der selbst genutzte PV-Strom eine Wärmepumpe antreibt, wird als „Netzstrompreis“ der Wärmepumpentarif angesetzt (und im nächsten Schritt abgezogen), in anderen Fällen der allgemeine Stromtarif.

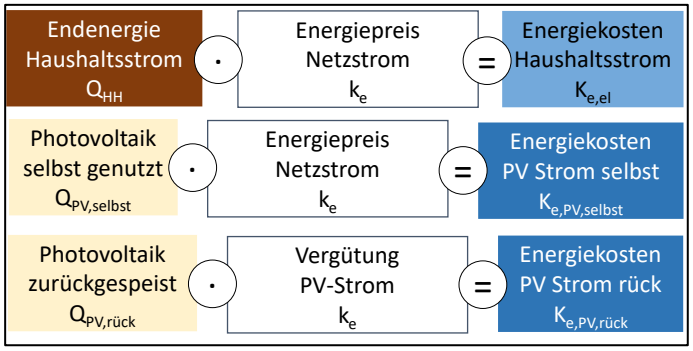


Abbildung 343 Berechnungsablauf Energiekosten Strom [eigene Darstellung]

In der finalen Energiekostenbilanz nach Abbildung 344 zeigt sich, dass – anders als bei der Primärenergie und den Emissionen – auch die Rückspeisung das Ergebnis des Einzelgebäudes positiv beeinflusst. Allerdings ist die Selbstnutzung lukrativer, solange der Strombezugspreis höher ist als die Einspeisevergütung. Bei überdimensionierten PV-Anlagen können sich durch den Stromverkauf auch negative Kosten ergeben.

Abbildung 344 Berechnungsablauf gesamte Energiekosten [eigene Darstellung]

Weitere Festlegungen zu der wirtschaftlichen Bewertung sind Anhang 6.1.8 zu entnehmen.

6.1.2 Ergebnisauswertung

Für das Einzelgebäude, welches einer Berechnung unterzogen wird, ist zunächst eine Verbesserungsmaßnahme durchzurechnen. Diese wird anschließend ausgewertet. Dazu werden aus der Bilanzierung benötigt:

- Endenergien vorher Q_{E1} und nachher Q_{E2} (ggf. getrennt nach verschiedenen Energieträgern)
- Emissionen vorher E_1 und nachher E_2

Kostenberechnung

Die Energiekosten (K_e) werden aus Endenergien (Q_E) und Energiepreisen (k_e) bestimmt. Es gelten die Annahmen in Anhang 5.5.1.

- Energiekosten: $K_e = Q_E \cdot k_e$ (für mehrere Energieträger erfolgt eine Summation)

Die Kapitalkosten (K_i) werden mit einer Annuität ($a_{p,n}$) aus den Investitionskosten (I) berechnet. Dazu wird ein Betrachtungszeitraum (n) vorher festgelegt – im Rahmen des Gutachtens für den Mikroteil beträgt der Wert 30 Jahre. Alle Bestandteile einer Modernisierung, welche nicht genauso langlebig sind wie der Betrachtungszeitraum, werden entweder mehrfach benötigt oder haben einen Restwert. Beide Fälle werden im Rahmen dieses Gutachtens über lineare Umrechnungen abgebildet. Es gelten die Nutzungsdauern (m) gemäß Anhang 5.9.1.

- Kapitalkosten: $K_i = a_{p,n} \cdot I \cdot \frac{n}{m}$ (für Mischinvestitonen erfolgt eine Summation)

Für eine Verbesserungsmaßnahme gibt es die Vollkosten sowie die energiebedingten Mehrkosten, die unterstellen, dass ohnehin eine Instandhaltungsmaßnahme angestanden hat. Wenn „Vollkosten“ berechnet werden, wird entsprechend für die Investition I der gesamte ermittelte Betrag eingesetzt. Werden „Mehrkosten“ gerechnet, wird er gekürzt um die ohnehin erforderlichen Kosten und nur die energetisch bedingten Kosten sind relevant. Beide Ansätze sind anhand von Kostenfunktionen in Anhang 5.8.2 dargelegt.

Die Wartungs- und Unterhaltskosten (K_u) werden standardmäßig anhand der in Anhang 5.8.3 angegebenen Ansätze aus der Investition (I) berechnet. Es gilt ein prozentualer Ansatz (a_U) der Anschaffungskosten, der jährlich aufzuwenden ist.

- Wartungskosten: $K_u = a_u \cdot I$ (für Mischinvestitonen erfolgt eine Summation)

Durch Addition der drei Kostenanteile ergeben sich die Jahreskosten (K_a).

- Jahreskosten: $K_a = K_e + K_i + K_u$

Eine beispielhafte schematische Darstellung der Addition zeigt Abbildung 345. Sofern die Summation dieser drei Anteile nach der Modernisierung (mittlerer Balken in Abbildung 345) bereits geringer sind als die Energiekosten vorher (unterer Balken Abbildung 345). Ist eine Wirtschaftlichkeit gegeben. Das dargestellte schematische Beispiel zeigt einen solchen Fall nicht.

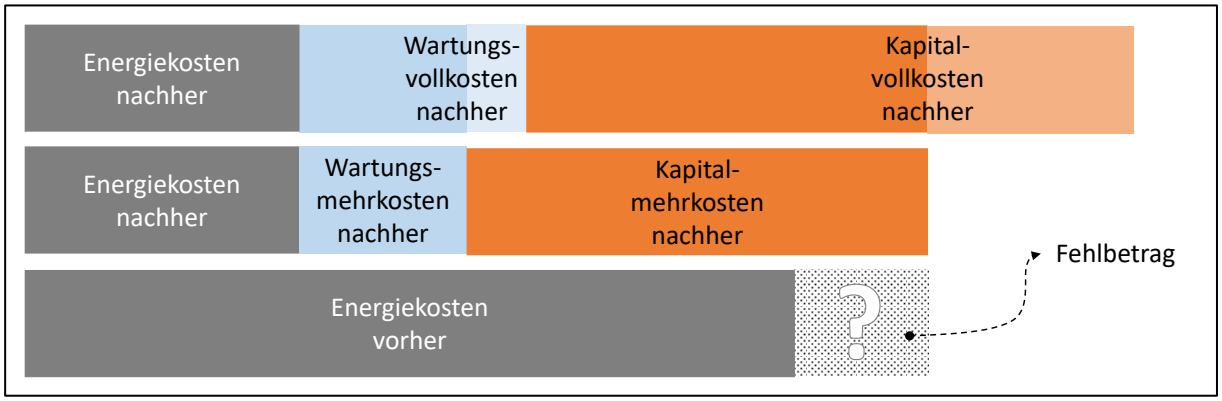


Abbildung 345 Gesamtkostenauswertung sowie Mehrkostenauswertung [eigene Darstellung]

Sofern sich keine geringeren Gesamtkosten einstellen, ergibt sich ein Fehlbetrag, der anderweitig kompensiert werden muss. Dies wird nachfolgend erläutert.

Subvention der Investition zum Ausgleich des Fehlbetrags

Abbildung 346 zeigt die erste Option zur Kompensation des Fehlbetrags: eine Bezuschussung der Investition bis zur rechnerischen Kostengleichheit. Die Kapitalkosten vermindern sich entsprechend.

Die Berechnung in diesem Gutachten zielt darauf ab, den notwendigen Prozentsatz an Zuschuss (bezogen auf die Gesamtkosten der Investition zu bestimmen). Dieser kann beispielsweise mit heutigen Zuschüssen von KfW oder BAFA verglichen und interpretiert werden.

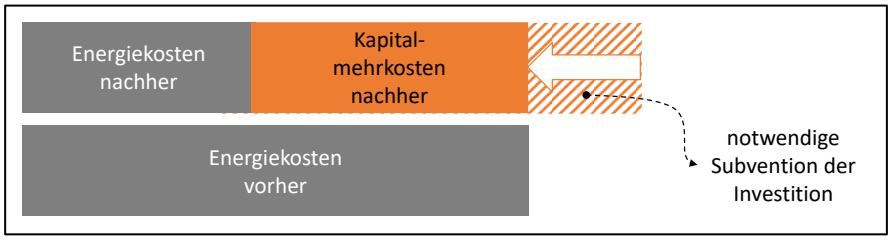


Abbildung 346 Ausgleich der Fehlkosten durch Investitionskostenzuschüsse [eigene Darstellung]

Damit eine Grenzwirtschaftlichkeit eintritt, müssen die Gesamtkosten auf einen geringen Wert (K_{a2}*) sinken. Es muss Folgendes gelten:

- $K_{a1} \equiv K_{a2}^*$ bzw. $K_{e1} + K_{i1} + K_{u1} \equiv K_{e2} + K_{i2}^* + K_{u2}$

Da die Wartungs- und Unterhaltskosten im Zustand vorher nicht genau bestimmt werden können, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die detailliert für den Zustand nachher ermittelten Werte (K_{u2}) auch vorher (K_{u1}) gegolten haben. Sie kürzen sich aus der Betrachtung daher heraus. Darüber hinaus sind die Kapitalkosten vorher (K_{i1}) zu null zu setzen, weil nichts investiert wird.

- $K_{u1} \equiv K_{u2}$
- $K_{i1} \equiv 0$

- $K_{e1} = K_{e2} + K_{i2}$ bzw. $K_{e1} - K_{e2} = K_{i2}^*$

Die modifizierten Kapitalkosten nachher (K_{i2}*) müssen also genauso groß sein wie die Ersparnis an Energiekosten, was in der Grafik oben gut zu erkennen ist: die orangene Fläche entspricht der Differenz der grauen.

Aus dem Verhältnis der tatsächlichen Kapitalkosten (K_{i2}) und der durch Förderung modifizierten Energiekosten (K_{i2}*) lässt sich der notwendige Förderbetrag ($K_{i,Förderung}$ – in Abbildung 346 schraffiert) ermitteln:

- $K_{i2}^* = K_{i2} - K_{i,Förderung}$ bzw. $K_{iFörderung} = K_{i2} - K_{i2}^*$

Daraus ergibt sich auch die Förderquote ($f_{Förderung}$):

- $f_{Förderung} = \frac{K_{i,Förderung}}{K_{i2}}$

Beispiel: anhand der obigen Grafik könnten Praxisergebnisse wie folgt lauten: Energiekosten vorher von K_{e1} = 1500 €/a stehen Energiekosten nachher von K_{e2} = 600 €/a gegenüber. Allerdings werden Kapitalkosten nachher von K_{a2} = 1200 €/a bestimmt. Damit liegen die Gesamtkosten nachher bei 600 + 1200 = 1800 €/a. Es zeigt sich ein Fehlbetrag von 1800 - 1500 = 300 €/a. Dieser muss ausgeglichen werden. Dieses entspricht der notwendigen Förderung $K_{i,Förderung}$. Der Fördermittelanteil beträgt somit:

- $f_{Förderung} = \frac{300\ €/a}{1200\ €/a} = 0{,}25$

Emissionspreis zum Ausgleich des Fehlbetrags

Abbildung 347 zeigt die zweite Option zur Kompensation des Fehlbetrags: eine Erhöhung der Energiekosten bis zu rechnerischen Kostengleichheit. Diese Maßnahme betrifft beide Zustände, d. h. die Energiekosten vor und nach der Modernisierung.

Die Berechnung in diesem Gutachten zielt darauf ab, den notwendigen Emissionspreis zu finden, der zu einer Gleichheit führt. Dieser kann beispielsweise mit heute bekannten (geplanten oder geltenden) Energieträgerbesteuerungen o. ä. verglichen und interpretiert werden.

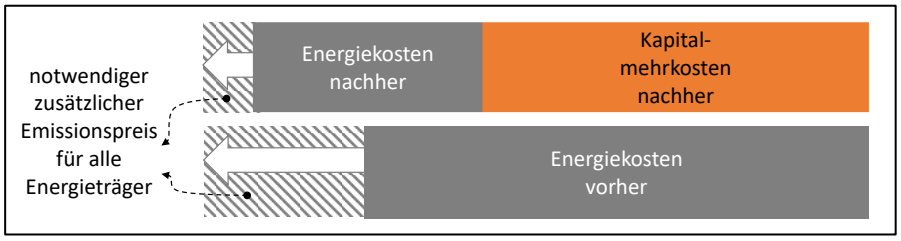


Abbildung 347 Ausgleich der Fehlkosten durch zusätzliche Emissionspreise [eigene Darstellung]

Zunächst wird der Ansatz erweitert und davon ausgegangen, dass neben den anderen Kostenpositionen eine neue hinzukommt, ein Kostenanteil für die Emissionen (K_{CO2}) – in Abbildung 347 die schwarz schraffierte Fläche. Die Gleichung zur Bestimmung der modifizierten Jahreskosten (K_a*) lautet daher nun:

- Jahreskosten: $K_a^* = K_e + K_i + K_u + K_{CO2}$

Dies gilt vor- und nach der Modernisierung gleichermaßen. Da die Wartungs- und Unterhaltskosten im Zustand vorher nicht genau bestimmt werden können, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die detailliert für den Zustand nachher ermittelten Werte (K_{u2}) auch vorher (K_{u1}) gegolten haben. Sie kürzen sich aus der Betrachtung daher heraus. Darüber hinaus sind die Kapitalkosten vorher (K_{i1}) zu null zu setzen, weil nichts investiert wird.

- $K_{u1} \equiv K_{u2}$
- $K_{i1} \equiv 0$

Damit eine Grenzwirtschaftlichkeit eintritt, müssen die Emissionskosten vorher und nachher ($K_{CO2,1}$ und $K_{CO2,2}$) genau so definiert werden, dass nachfolgendes gilt:

- $K_{a1}^{*} \equiv K_{a2}^{*}$
- $K_{e1} + K_{CO2,1} \equiv K_{e2} + K_{i2} + K_{CO2,2}$ bzw. $K_{CO2,1} - K_{CO2,2} = (K_{e2} + K_{i2}) - K_{e1}$

Die jeweiligen jährlichen Emissionskosten K_{CO2} ergeben sich aus der Emissionsmenge (E), die per Bilanz für die beiden Zustände vor und nach der Modernisierung bestimmt wurden, und einen noch unbekannten Emissionspreis k_{em}.

- $K_{CO2} = E \cdot k_{em}$

Daher lässt sich die obige Gleichung wie folgt umstellen:

- $K_{CO2,1} - K_{CO2,2} = E_1 \cdot k_{em} - E_2 \cdot k_{em} = k_{em} \cdot (E_1 - E_2) = (K_{e2} + K_{i2}) - K_{e1}$

Für den Emissionspreis gilt daher:

- $k_{em} = \frac{(K_{e2}+K_{i2})-K_{e1}}{E_1-E_2} = \frac{K_{i2}+(K_{e2}-K_{e1})}{E_1-E_2}$

Auf die Einberechnung einer weiteren Energiepreisverteuerung wird im Rahmen dieses Gutachtens verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass künftige Energiepreisverteuerungen (wie sie in den zurückliegenden Jahren und Jahrzehnten zu verzeichnen waren, siehe Anhang 5.5.1) künftig ebenso zu verzeichnen sind. Aber dass sich – politisch gesteuert – entsprechend die Verteuerung aus dem hier berechneten Emissionspreis ergibt. Zur Erhöhung der Verständlichkeit wird aus dem sich ergebenden Emissionspreis exemplarisch angegeben, welche Preise sich für einzelne Energieträger (i. d. R. Erdgas) danach ergeben würden.

Der Emissionspreis rückt die Einzelwirtschaftlichkeit in den Mittelpunkt. Das Ergebnis gibt an, wie die Energieträgerpreise sich ändern müssen, um einen Ausgleich der Emissionsbepreisung aller Energieträger – und auch einen Ausgleich zu den Kapitalkosten – zu erreichen.

Anhand der obigen Grafik könnten Praxisergebnisse wie folgt lauten (Fortführung des Beispiels von oben). Energiekosten vorher von K_{e1} = 1500 €/a stehen Energiekosten nachher von K_{e2} = 600 €/a gegenüber. Die Kapitalkosten nachher liegen bei K_{a2} = 1200 €/a.

Unterstellt wird derselbe Energieträger, z. B. Erdgas. Bei dem Erdgaspreis von 0,06 €/kWh wurden vorher 25.000 kWh/a verbraucht und nachher 10.000 kWh/a. Die Emissionen betragen 5200 kg/a vorher und 2080 kg/a nachher (Erdgas wird mit 0,208 kg CO_2/kWh bewertet).

- $k_{em} = \frac{(600+1200)\,€/a-1500\,€/a}{(5200-2080)kg/a} = 0{,}096€/kg = 96€/t$

Mit dem Wert würde der Energieträger Erdgas entsprechend 0,096€/kg · 0,208 kg/kWh mehr kosten. Das sind 0,02 €/kWh. Der Erdgaspreise würde dann nicht mehr bei 0,06 €/kWh liegen, sondern bei 0,08 €/kWh. Entsprechend wurde das Gebäude unsaniert modifizierte Energiekosten haben von 25.000 kWh/a · 0,08 €/kWh = 2000 €/a. Und das sanierte Gebäude auch mehr bezahlen, nämlich 800 €/a. Die Jahreskosten sind dann – wie vorher gewünscht – gleich. Sie betragen 2000 €/a.

Die Berechnung kann auch bei einem Energieträgerwechsel erfolgen.

Äquivalenter CO_2-Preis

Für die untersuchte Verbesserungsmaßnahme selbst wird abschließend bestimmt, welcher äquivalente CO_2-Preis sich ergibt.

Dazu werden die Mehrkosten für Kapital (K_{i2}) sowie Wartung/Unterhalt (Differenz aus K_{u2} und K_{u1}) den Emissionsminderungen (vorher E_1 auf nachher E_2) gegenübergestellt. Der Berechnungsansatz bzw. dessen Ableitung wird hier nicht komplett wiederholt. Es wird auf Anhang 5.5.4 verwiesen.

- $k_{CO2} = \frac{(K_{i2}-K_{i1})+(K_{u2}-K_{u1})}{E_1-E_2}$

Da die Wartungs- und Unterhaltskosten im Zustand vorher nicht genau bestimmt werden können, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die detailliert für den Zustand nachher ermittelten Werte (K_{u2}) auch vorher (K_{u1}) gegolten haben. Sie kürzen sich aus der Betrachtung daher heraus. Darüber hinaus sind die Kapitalkosten vorher (K_{i1}) zu null zu setzen, weil nichts investiert wird.

- $K_{u1} \equiv K_{u2}$
- $K_{i1} \equiv 0$

Es gilt dann:

- $k_{CO2} = \frac{K_{i2}}{E_1-E_2}$

Das Ergebnis gibt an, wieviel Kapitalkosten aufzuwenden sind, um Emissionen einzusparen – zunächst einmal unabhängig davon, was Energie selbst kostet und ob sich dies für den einzelnen rechnet. Das Ergebnis wird daher als Sortierkriterium für die Sinnhaftigkeit der Maßnahmen verstanden und verwendet. So können aus Einzelmaßnahmen beispielsweise Maßnahmenpakete oder Reihenfolgen geschnürt werden. Der Blick lautet: welche Maßnahmen sind zu ergreifen, um mit möglichst wenig Kapitaleinsatz (schnell) die Emissionen zu mindern.

Es wird auf dieselben Größen der Bilanz zurückgegriffen wie bei der Ermittlung des Emissionspreises k_{em}. Die beiden Größen lassen sich folglich ineinander umrechnen. Für den Emissionspreis der Maßnahmen gilt (s.o.):

- $k_{em} = \frac{K_{i2}+(K_{e2}-K_{e1})}{E_1-E_2} = \frac{K_{i2}}{E_1-E_2} + \frac{(K_{e2}-K_{e1})}{E_1-E_2}$ bzw. $k_{em} = k_{CO2} + \frac{K_{e2}-K_{e1}}{E_1-E_2}$

Üblicherweise ist davon auszugehen, dass der Emissionspreis k_{em} unter dem äquivalenten CO_2-Preis k_{CO2} liegt. Denn im Normalfall ist der zweite „Additionsterm“ der Energiekosteneinsparung eine negative Zahl.

Es ist davon auszugehen, dass die Emissionen immer sinken (sonst wurden die falschen Maßnahmen ergriffen). Der Nenner ist also immer eine positive Zahl. Der Zähler des Ausgleichsterms enthält die Energiekosten. Sie sollten sinken, wenn eine Maßnahme ergriffen wird, die zu einer Emissionsminderung führt. Wird derselbe Energieträger verwendet, ist dies auch so. Der Zähler wird zu einer positiven Zahl, wenn die Energiepreise steigen, obwohl die Emission gesunken ist. Das passiert ggf. bei einem Energieträgerwechsel. Dies sollte im Ausgleich zwischen übergeordneten Interessen (Emissionen sinken) und Einzelinteressen (Energiekosten sinken) nicht passieren.

An dieser Stelle ist eine Investitionskostenförderung auch keine Lösung des Problems. Der Vergleich von äquivalenten CO_2-Preis und notwendigem Emissionspreis kann einen Hinweis liefern, wie künftige Energiepreise mit Emissionsanteilen aussehen können, vgl. Anhang 3.9.

6.1.3 Klima- und Nutzungsranddaten

Nachfolgend werden die in der Programmierung getroffenen Annahmen zu den Klima- und Nutzungsranddaten erläutert. Um textliche Doppelungen zu vermeiden, wird ggf. auf andere Kapitel in diesem Gutachten verwiesen.

Klimadaten für die Jahresmittelbetrachtung

Der Untersuchung liegen die frei verfügbaren Wetterdaten für 63 Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes zugrunde (alle Stationen außer Leuchttürme auf Inseln sowie Bergstationen) [259].

Die für die Stationen verfügbaren Tagestemperaturen vom 1.1.1980 bis 31.12.2019 wurden zunächst linear gemittelt. Anschließend wurden 2 Dreißigjahreszeiträume ausgewertet: 1980 - 2009 sowie 1990 - 2019. Als repräsentativer Zeitraum für alle Berechnungen dient letztgenannter.

Die Detailauswertung zwischen den beiden Zeiträumen zeigt, dass es wärmer wurde. Während die Jahresmitteltemperatur für 1980-2009 bei 9,2°C lag, beträgt sie im Zeitraum 1990 - 2019 bereits 9,6°C. Eine lineare Fortschreibung zwei Jahrzehnte in die Zukunft ergäbe für 2020 - 2049 eine Jahresmitteltemperatur von 10,9°C.

Wertet man die Daten hinsichtlich der Dauer der Heizzeit und der mittleren Temperatur in der Heizperiode aus, ergibt sich beispielsweise:

- bei einer Heizgrenze von 14°C: Heizperiodendauer 249 d/a mit 5,8°C
- bei einer Heizgrenze von 15°C: Heizperiodendauer 267 d/a mit 6,4°C
- bei einer Heizgrenze von 16°C: Heizperiodendauer 284 d/a mit 6,9°C
- bei einer Heizgrenze von 17°C: Heizperiodendauer 301 d/a mit 7,5°C

In dem genannten Bereich liegen die Werte der Berechnung. Die Abhängigkeit der Daten von der Heizgrenze wurde in der Programmierung durch zwei Näherungsgleichungen (mit der Heizgrenztemperatur ϑ_{HG} als Eingangswert) angenähert:

- Heizperiodendauer: $16\frac{d}{a} + 16{,}7\ \frac{d}{a} \cdot\ \vartheta_{HG}[°C]$
- mittlere Außentemperatur in der Heizperiode: $-1{,}8°C + 0{,}54°C \cdot\ \vartheta_{HG}[°C]$

Die Globalstrahlung auf die Gebäudehülle wurde auf Basis der Datenerhebung des IWU von 2001 angenähert [76]. Abhängig von der Heizgrenztemperatur (und damit der Länge der Heizperiode) wurde für die Fensterausrichtung „Ost/West“ folgender Zusammenhang zugrunde gelegt:

- Globalstrahlung: -427 $\frac{kWh}{m^2a} + 62\ \frac{kWh}{m^2a} \cdot\ \vartheta_{HG}[°C]$

Die Daten für „Süd“ liegen 20 % über dem Wert für „Ost/West“, die Daten für „Nord“ 39 % darunter. Da insgesamt typischerweise mehr Fenster in Richtung „Süd“ als „Nord“ gerichtet sind, erscheint eine einheitliche Annahme der Fensterausrichtung nach „Ost/West“ ein sinnvoller Kompromiss.

Die jahresmittlere Erdreichtemperatur wird 1 K oberhalb der mittleren Außentemperatur angesetzt, d. h. mit 10,6°C. sie ist u. a. maßgeblich für die Bewertung der Wärmepumpen im Trinkwarmwassermodus.

Die mittlere Erdreichtemperatur in der Heizperiode wird 2 K unterhalb der mittleren Erdreichtemperatur des Gesamtjahres angesetzt, d. h. mit 8,6°C. Sie ist u. a. maßgeblich für die Bewertung der Wärmepumpen im Heizungsmodus. Der Wert wird konstant angenommen, unabhängig wie lang die Heizperiode tatsächlich bestimmt wurde.

Klimadaten für die Auslegung

Für die Bemessung von Wärmeerzeugern wird die Auslegungsheizlast benötigt. Der Wert wird im Rahmen der Berechnungen auf -12°C festgelegt. Dies kommt – im gewichteten Mittel der Tageswerte aller Klimastationen – an 13 Tagen innerhalb der 40 Jahre (1980 - 2019) vor. Der Wert entspricht dem Wert, der auch in den Normen zur EnEV als Referenz angenommen wird.

Die minimale Erdreichtemperatur – nur zur Bewertung des Auslegungszustandes von Erdreichwärmepumpen – wird mit -2°C angenommen.

Heizgrenztemperatur

Die Heizgrenztemperatur wird abhängig vom Baustandard angenommen. Je besser dieser ist, desto kürzer die notwendige Heizperiode und desto kälter kann es draußen sein, bevor die aktive Heizung einsetzt.

Die Praxisbeobachtungen der Gutachter [23] [26] zeigen dabei eine real geringere Schwankung als dies theoretisch zu erwarten wäre. In der gesamten Bandbreite vom unsanierten Bestand bis zum Passivhaus sind Werte zwischen typisch 17°C und 14°C festzustellen. Rein rechnerisch würden 19°C bis 10°C ermittelt werden. Allerdings verschiebt das veränderte Nutzerverhalten (sparsam im Bestand und umgekehrt) die Werte beider Ränder eher in den mittleren Bereich.

Abhängig vom wohnflächenbezogenen Verlust für Transmission und Lüftung h (Baustandard bzw. „Fingerabdruck des Gebäudes", Erläuterungen in Anhang 5.3.3 und 5.3.4) ergibt sich folgende Näherung:

- Heizgrenztemperatur: $13{,}3\ °C + 1{,}14\ °C \cdot h\ [\frac{W}{m^2 K}]$

Personenbelegung der Gebäude

Basis der Überlegungen sind die neuesten Werte des Zensus 2018 [101] für die Bevölkerung (81,8 Mio. Personen) sowie die Gesamtwohnfläche (3,754 Mrd. m²). Die anteiligen Wohnflächen für EZFH und MFH werden berücksichtigt.

Basis aller Überlegungen sind die Typgebäude des IWU aus dem Jahr 2013 [62]. Sowohl der Wohnflächenzuwachs als auch die Bevölkerungsentwicklung seit der Bearbeitung der zitierten Studie werden fortgeschrieben. Dabei wird folgende Aufteilung konstant gehalten: 53,1 % der Bevölkerung wohnt in einem EZFH, die anderen im MFH.

Die sich ergebenden Belegungsdichten, Personen je Gebäude und mittleren Typgebäude sind Anhang 3.1 zu entnehmen.

Mittlere Innentemperatur

Als typische Innentemperatur innerhalb der beheizten Bereiche des Gebäudes wird im Rahmen des Gutachtens von 21°C ausgegangen. Dies ist die Temperatur der aktiv genutzten Räume und innerhalb der Nutzungszeit. Die mittlere Innentemperatur eines Gebäudes ergibt sich unter Berücksichtigung weiterer Einflüsse: vor allem der zeitlichen Teilbeheizung (z. B. Nachtabsenkung) sowie der räumlichen Teilbeheizung (abhängig von der Belegungsdichte). Beide Einflüsse wirken unterschiedlich – je nach Baustandard.

Für die eigene Berechnung wurde der Ansatz von Loga et al. aus der Energiebilanztoolbox [76] adaptiert. Dazu wurde die Festlegung getroffen, dass bei einer Wohnfläche von 80 m² pro Person eine Teilbeheizung von 60 % der Wohnfläche auftritt, während bei dichter Belegung und nur 20 m² pro Person eine Vollbeheizung gegeben ist. Werte dazwischen werden linear angenommen. Im Rahmen der Auswertungen typischer Gebäude interessiert der Bereich von 35 bis 55 m²/Person, entsprechend mit Teilbeheizungen von 15 bis 35 % der Wohnfläche.

Während Loga et al. die Wärmeverluste des Gebäudes rechnerisch mit einem Faktor (nach unten) korrigieren, leiten die Gutachter aus demselben Ansatz eine Temperaturkorrektur ab. Dies führt zu gleichen Ergebnissen, ist jedoch nachvollziehbarer hinsichtlich der Dateninterpretation.

Folgender Ansatz für die Temperaturkorrektur wird gewählt, abhängig von der Belegungsdichte (bzw. Wohnfläche je Person A_{Wohn}/P) sowie vom Baustandard (ausgedrückt durch den („Fingerabdruck des Gebäudes" h):

- Innentemperaturkorrektur: $0{,}006\ K\ \cdot \left(\frac{A_{Wohn}}{P}\ [\frac{m^2}{P}]\right)^{1{,}4} \cdot \left(h[\frac{W}{m^2 K}]\right)^{0{,}4}$

Für ein durchschnittliches Bestandsgebäude (h = 2 W/(m²K) und 45 m²/P) ergibt sich eine mittlere Innentemperaturkorrektur von 1,6 K. Die Temperatur, mit der die Energiebilanz tatsächlich erstellt wird, liegt demzufolge nicht bei 21°C, sondern bei 19,4°C.

In einem nahe Passivhausniveau sanierten und gut belegten Mehrfamilienhaus (h = 0,7 W/(m²K) und 30 m²/P) ergibt sich 0,6 K (20,4°C). In einem unsanierten Altbau, von einem Ehepaar allein bewohnt (h = 3,0 W/(m²K) und 80 m²/P) liegt der Wert bei 4,3 K (16,7°C).

Im Keller wird eine mittlere Innentemperatur von 13°C angenommen, sofern eine Berechnung der Verluste von Rohrleitungen oder Speicher erfolgt.

Personenbezogener Luftwechsel

Abhängig von der Belegung ergibt sich der Luftwechsel. Es wird ein personenbezogener Wert von 25 m³/(h·P) angenommen. Dies basiert auf einem typischen Auslegungswert nach Schulze-Darup und Albers von 30 bis 40 m³/(h·P) [90] [241], vermindert um einen Anteil von 17 bis 38 % für die Abwesenheit der Personen aus ihrer Wohnung (4 bis 9 Stunden täglich).

Zu diesem Wert wird die Infiltration durch Undichtheiten des Baukörpers addiert.

Personenbezogener Warmwasserbedarf

Der Warmwasserbedarf je Person wird an die Zahlen der großen Messdienstleister angelehnt, siehe Anhang 5.4.2. Ausgehend von einem Tagesverbrauch von 30 l/(d·P) ergibt sich eine jährliche Energiemenge von 564 kWh/(P·a) für das gezapfte Warmwasser.

Dabei liegt die Kaltwassertemperatur bei 10,6°C (Erdreichtemperatur) und die Warmwassertemperatur bei 55°C. Bei der typischen Belegungsdichte der Mehrfamilienhäuser liegt der resultierende flächenbezogene Wert bei 14,6 kWh/(m²a) – in der Größenordnung der Werte von TECHEM [104].

Personenbezogener Haushaltsstrombedarf und interne Wärmegewinne

Der personenbezogene Haushaltsstrombedarf wird nach den Zahlen der AGEB – siehe Anhang 5.4.2 – auf 1250 kWh/(P·a) festgelegt. Es wird keine Unterscheidung in EZFH und MFH vorgenommen, weil die Haushaltsgrößen der beiden Typgebäude ähnlich groß sind (EZFH: 2,3 Personen/WE, MFH: 1,7 P/WE).

Der genannte Wert enthält keine Aufwendungen für die Heizung und Trinkwassererwärmung, jedoch alle Hilfsenergiemengen (Pumpen usw.). Im Rahmen der Berechnungen für das vorliegende Gutachten wird dazu ggf. als variable Komponente ausschließlich der Ventilatorstromaufwand einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung addiert.

Es wird nach eigenen Abschätzungen und Erfahrungswerten davon ausgegangen, dass 70 % des Haushaltsstrombedarfs als interne Wärmeleistung wirksam werden. Dies entspricht einer internen Wärmeleistung von 100 W/Person. Dazu kommt die Abwärme der Person selbst, welche mit weiteren 50 W/Person angesetzt wird. Der Wert berücksichtigt eine teilweise Abwesenheit der Person aus dem Haushalt und lehnt sich an die Untersuchungen des IWU von 2001 an [76].

6.1.4 Randdaten des Baukörpers

Nachfolgend werden die in der Programmierung getroffenen Annahmen zur Bilanzierung des Baukörpers erläutert. Um textliche Doppelungen zu vermeiden, wird ggf. auf andere Kapitel in diesem Gutachten verwiesen.

Geometrische Daten

Die Typgebäude – das heißt das Ein- und Zweifamilienhaus EZFH und das Mehrfamilienhaus MFH – sind im Anhang 3.1 hinsichtlich ihrer Hüllflächen sowie des Luftvolumens beschrieben.

Wärmedurchgangskoeffizienten und Wärmebrücken

Die typischen Sanierungsgrade der Gebäudehülle, deren Häufigkeiten sowie die zugehörigen Wärmedurchgangskoeffizienten sind in Anhang 3.1.3 beschrieben. Auf eine Wiederholung wird an dieser Stelle verzichtet. Gleiches gilt für den Ansatz zur Berücksichtigung der Wärmebrücken, siehe Anhang 3.1.3.

Temperaturkorrekturfaktoren

Die gewählten Temperaturkorrekturfaktoren (F_x) für die Hüllflächen, die nicht an Außenluft grenzen, lauten:

- unterer Gebäudeabschluss: 0,5 (Gewichtung aus ca. 50 % Bodenplatte und 50 % Kellerdecke)
- oberer Gebäudeabschluss: 0,9 (Gewichtung aus ca. 50 % Dach und 50 % obere Geschossdecke)

Die Werte ergeben sich innerhalb der Bandbreiten der EnEV-Normen [112] [244] [214] bzw. des IWU „Energiepass Heizung/Warmwasser“ [76], wobei die große dort verfügbare Detailtiefe entsprechend vereinfacht wurde.

Wärmeleitfähigkeit

Die zusätzliche Dämmdicke zur Erreichung einer verbesserten Dämmung von Bauteilen wird berechnet mit einer Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes von λ = 0,035 W/(mK).

Infiltration

Abhängig von der durchgeführten Qualitätssicherung (dichte Bauweise) werden Luftwechsel aus Infiltration angesetzt. Die genauen Ansätze sind im Anhang 3.1.3 beschrieben. Zu diesem Wert wird der Luftwechsel aus der Personenbelegung addiert.

Energiedurchlassgrad der Fenster und Abminderung

Der Energiedurchlassgrad der Fenster ist näherungsweise abhängig von dessen Wärmedurchgangskoeffizienten U. In den Berechnungen, die diesem Gutachten zugrunde liegen, wird eine Näherungsformel verwendet. Sie leitet sich aus Typologiewerten nach Loga ab [75] [76]:

- Energiedurchlassgrad: $0{,}42 + 0{,}1 \cdot U\ [\frac{W}{m^2 K}]$

Aufgrund von Rahmenanteilen der Fenster, nicht senkrechtem Lichteinfall auf die Scheiben, Verschattung und Verschmutzung wird das Solarstrahlungsangebot vermindert. Es wird ein Abminderungsfaktor von 0,4 angesetzt (typischer Wert in der Spanne der EnEV-Normen [244] und des IWU Energiepass' [75]).

Fremdwärmenutzungsgrad

Es wird kein Fremdwärmenutzungsgrad angesetzt. Die Effekte nicht nutzbarer Fremdwärme sind in dem Zuschlag für Qualitätssicherung, siehe Anhang 3.6 enthalten.

6.1.5 Randdaten der Wärmeversorgung

Nachfolgend werden die in der Programmierung getroffenen Annahmen zur Wärmeversorgung, d. h. Heizung und Trinkwarmwasserversorgung erläutert. Um textliche Doppelungen zu vermeiden, wird ggf. auf andere Kapitel in diesem Gutachten verwiesen.

Übergabeverluste

Es werden keine separaten Aufschläge für die Regelgüte der Raumregelung angesetzt. Die Effekte sind in dem Zuschlag für Qualitätssicherung enthalten, siehe Anhang 3.6.

Typische Leitungslängen

Die Wärmeabgabe von Heizungsleitungen wird im Rahmen der Berechnungen dieses Gutachtens nur dann als Verluste deklariert, wenn die Leitung sich im unbeheizten Bereich des Gebäudes befindet. Entsprechend werden für die anderen Leitungsteile keine typischen Leitungslängen benötigt.

Für die Trinkwassererwärmung werden alle Leitungsabschnitte bewertet. Allerdings werden die Wärmeverluste der Leitungen innerhalb des beheizten Bereiches unterschiedlich bewertet (als Verluste bzw. Gewinne).

Die gewählten Ansätze zur Bewertung sind im Anhang 3.4.4 zu finden.

Auslegungs- und mittlere Netztemperaturen bei Heizkörperheizungen

Bestimmten Baualtersklassen von Gebäuden sind typische Auslegungsvor- und Rücklauftemperaturen zuzuordnen. Mit dem über die Jahre besser werdenden Standard haben sich diese Werte immer weiter verringert. So wurden nach der 1. Ölkrise und mit Einführung der Niedertemperaturtechnik eher Anlagen mit 70/55°C Vor- und Rücklauftemperaturen geplant, seit der EnEV mit 55/45°C. Bei der Sanierung kann unter Beibehaltung der Bestandsheizkörper die Systemtemperatur angepasst werden, wenn der Dämmstandard verbessert wird bzw. allgemein die Transmissions- und Lüftungsverluste sinken.

Auf Basis des Baustandards bzw. „Fingerabdrucks des Gebäudes" h kann daher die Vorlauftemperatur [°C] oder die Systemtemperatur [°C] abgeschätzt werden. Es gelten im Rahmen der Berechnungen dieses Gutachtens folgende Gleichungen:

- Vorlauftemperatur kältester Tag: $30{,}0°C + 20{,}0°C \cdot h\ [\frac{W}{m^2K}]$
- Vorlauftemperatur mittlerer Heiztag: $25{,}1°C + 9{,}1°C \cdot h\ [\frac{W}{m^2K}]$
- Systemtemperatur mittlerer Heiztag: $23{,}8°C + 8{,}0°C \cdot h\ [\frac{W}{m^2K}]$

Für ein mittleres Gebäude des bundesdeutschen Bestandes und h = 2 W/(m²K) ergibt sich eine Vorlauftemperatur am kältesten Tag von 70°C sowie am mittleren Tag von ca. 43°C. Beide Werte werden ausschließlich zur Bewertung der Wärmepumpen benötigt. Die Systemtemperatur, als der Mittelwert von Vor- und Rücklauftemperatur an einem typischen Heiztag liegt bei etwa 40°C. Dieser Wert wird zur Bewertung der Wärmeverluste für Rohrnetze im Keller und Speicher benötigt.

Entsprechend sinken die Werte bei einem auf Neubauniveau sanierten Gebäude mit h = 1 W/(m²K) auf 50°C und 34°C (maximale und mittlere Vorlauftemperatur) bzw. 32°C (mittlere Systemtemperatur).

Auslegungs- und mittlere Netztemperaturen bei Flächenheizungen

Die für Heizkörperheizungen o.g. prinzipiellen Zusammenhänge gelten entsprechend auch für Flächenheizungen, jedoch mit geringeren Temperaturen. Es gelten im Rahmen der Berechnungen dieses Gutachtens folgende Gleichungen:

- Vorlauftemperatur kältester Tag: $29{,}8°C + 7{,}0°C \cdot h\ [\frac{W}{m^2K}]$
- Vorlauftemperatur mittlerer Heiztag: $25{,}0°C + 3{,}2°C \cdot h\ [\frac{W}{m^2K}]$
- Systemtemperatur mittlerer Heiztag: $23{,}4°C + 3{,}1°C \cdot h\ [\frac{W}{m^2K}]$

Mittlere Temperaturen für Warmwassernetze und -speicher

Als Mitteltemperatur für Netze mit Zirkulation sowie Trinkwarmwasserspeicher wird 50°C angenommen. Dieser Wert berücksichtigt, dass zum einen eine Zirkulation häufig nicht 24 Stunden täglich in Betrieb ist bzw. der Speicher nicht über seine komplette Höhe gleich temperiert ist [78].

Für die mittlere Temperatur in Leitungen ohne Zirkulation wird bei mäßiger Zapfhäufigkeit eine Temperatur von 30°C angenommen [78].

Größe von Speichern

Um die Leistungsspitzen eines Erzeugers zu minimieren, werden Trinkwarmwasserspeicher eingesetzt. Sie werden mit geringerer Leistung in einem längeren Zeitraum beladen als dies bei der Entladung festzustellen ist (große Leistung, kurzer Zeitraum). Im Rahmen der Berechnungen des Gutachtens wird folgende Annahme zu Bemessung des Trinkwasserspeichervolumens auf Basis der Personenzahl getroffen:

- Trinkwarmwasserspeichervolumen: $60l + 20l \cdot z\ [P]$

Für ein Einfamilienhaus mit 3 Personen resultiert daraus beispielsweise ein 120 l-Speicher. Das Mehrfamilienhaus mit 12 Personen erhält einen 300 l-Speicher. Dieser Ansatz wird aus Gründen der Vereinfachung für alle zentralen und dezentralen Lösungen gleichermaßen gewählt.

Bei der Versorgung mit Wärmepumpen oder Holzkessel wird standardmäßig ein Pufferspeicher im Rechenmodell berücksichtigt. Sein Speichervolumen wird mit 50 l/kW bezogen auf die Wärmeerzeugerleistung angesetzt.

Die Ansätze für Solarthermie sind in Anhang 3.5.2 zu finden.

Wärmeverluste von Speichern

Für alle Speicher gleichermaßen wird ein Bewertungsansatz abhängig vom Volumen gewählt. Die Grunddaten entstammen Voruntersuchungen des IWU [75]. Es wird zunächst ein Verlustkennwert bestimmt, der anschließend mit der Temperaturdifferenz (abhängig von der Wassertemperatur) zum Aufstellraum sowie der Betriebszeit (Heizperiode oder Jahr) multipliziert wird. Der Grundansatz beträgt:

- mit Qualitätssicherung: $0{,}070\,\frac{kW}{K}\cdot(V[l])^{0{,}574}$
- ohne Qualitätssicherung: $0{,}105\,\frac{kW}{K}\cdot(V[l])^{0{,}574}$

Der Zuschlag für die nicht durchgeführte Qualitätssicherung berücksichtigt nach eigenen Erfahrungen ungedämmte Anschlussstutzen und Armaturen mit 50 % Aufschlag [78].

Als rechnerische Vereinfachung wird die Annahme getroffen, dass der Speicher immer in einer beheizten Umgebung steht, aber die entstehenden Abwärmemengen nicht als interner Wärmegewinn nutzbar gemacht werden können. Als Begründung gilt: steht der Speicher tatsächlich im beheizten Bereich, stimmt die Raumtemperatur in etwa. Die Wärme ist aber häufig tatsächlich nicht nutzbar, da lediglich eine lokale Überwärmung des Aufstellraumes auftritt, keine flächendeckende Nutzung in der Wohnung. Steht der Speicher aber im Keller, ist der Aufstellraum meist fast so warm wie die Wohnung.

Effizienzen der Erzeuger

Die Effizienzen der Erzeuger werden abhängig vom Vorhandensein einer Qualitätssicherung angegeben. Bis auf die Wärmepumpen werden aus Gründen der Vereinfachung einheitliche Werte – unabhängig von Temperatur und Auslastung des Gerätes – verwendet.

Für alle elektrischen Direktversorgungen (Direktheizung, Durchlauferhitzer, Heizstab im Speicher) wird eine Effizienz von 100 % angesetzt. Konkrete Daten der anderen Erzeuger werden im Anhang 3.3 vorgestellt. Zur Vermeidung von Doppelungen werden sie hier nicht wiederholt.

Effizienzbewertung der Wärmepumpen

Die Wärmepumpenbewertung erfolgt im Rahmen dieses Gutachtens temperaturabhängig. Berücksichtigt werden für die Jahresarbeitszahlen folgende Temperaturen:

- Quellentemperatur bei Erdreichwärmepumpe
  - Heizung: mittlere Erdreichtemperatur in der Heizperiode
  - Trinkwarmwasser: jahresmittlere Erdreichtemperatur
- Quellentemperatur bei Außenluftwärmepumpe
  - Heizung: mittlere Außenlufttemperatur in der Heizperiode
  - Trinkwarmwasser: jahresmittlere Außenlufttemperatur
- Senkentemperatur des Abnehmerkreises
  - Fußbodenheizung: mittlere Vorlauftemperatur in der Heizperiode
  - Heizkörperheizung: mittlere Vorlauftemperatur in der Heizperiode
  - Trinkwarmwasser: jahresmittlere Trinkwarmwasserspeichertemperatur

Die Bewertung folgt dem Carnot-Ansatz unter Berücksichtigung eines exergetischen Gütegrades. Folgender Ansatz wird gewählt:

- Effizienz (COP oder JAZ): $\zeta_{ex}\cdot\frac{273\,K+\vartheta_{Senke}+2K}{(\vartheta_{Senke}+2K)-(\vartheta_{quelle}-6K)}$

Dabei werden die Untertemperatur am Verdampfer mit -6 K (Kältemittel ist geringer temperiert als Wärmequelle) und die Übertemperatur am Kondensator mit +2 K (Kältemittelt ist höher temperiert als Wärmeabnehmer) angenommen.

Mit den gewählten Ansätzen zum exergetischen Gütegrad, welche in Anhang 3.3.1 beschrieben werden, können Effizienzen für den Prüfstand-Zustand bestimmt werden.

Beispiele: Die Außenluftwärmepumpe hat nach diesem Ansatz im Prüfpunkt (Luft 2°C, Vorlauf 35°C) eine Arbeitszahl von 2,65 mit Qualitätssicherung und 2,27 ohne Qualitätssicherung. Die Erdreichwärmepumpe erreicht entsprechend (Erdreich 0°C, Vorlauf 35°C) Werte von 2,81 bzw. 2,65.

Bivalenzpunkt der Wärmepumpen

Außenluftwärmepumpen weisen verminderte Effizienzen bei sehr niedrigen Außentemperaturen auf, so dass häufig ein weiterer Wärmeerzeuger entweder alternativ verwendet oder parallel zu der Wärmepumpe betrieben wird. Im Rahmen dieses Gutachtens wird von -2°C als typischer Bivalenztemperatur ausgegangen und ein Parallelbetrieb des zweiten Erzeugers angenommen.

Anhand der Wetterdaten für den Zeitraum 1990 - 2019 kann ein Deckungsanteil der Wärmepumpe mit nachfolgender Näherungsformel für Parallelbetrieb abgeschätzt werden:

- Deckungsanteil der Wärmepumpe: $0{,}824 - 0{,}0353 \cdot \vartheta_{biv}[°C] - 0{,}0016 \cdot \vartheta_{biv}{}^2[°C]$

Für die Bivalenztemperatur von -2°C ergibt sich ein Anteil von etwa 88 %, während der Spitzenlasterzeuger die restlichen 12 % der Heizenergie liefert.

Für Erdreichwärmepumpen wird kein Bivalenzpunkt angenommen; sie werden als monovalente Erzeuger berechnet.

Miara et al. stellen fest, dass für die Gesamtbetrachtung der Effizienz die Elektrozusatzheizung nur von geringer Bedeutung ist. Sie verschlechtert die Gesamteffizienz, d. h. die Jahresarbeitszahl etwa in der Größenordnung von 0,06 [204].

Umrechnung von Antriebs- und Wärmeleistungen der Wärmepumpen

Für Wärmepumpen werden Leistungen (gelieferte Wärmeleistung und zugeführte Stromleistung) auf dem Prüfstand ermittelt. Die gängige Prüfstandsvorlauftemperatur beträgt dabei 35°C, während die Quellentemperaturen 2°C (Außenluft) und 0°C (Sole für Erdreichwärmepumpen) betragen. Bei diesen Prüfbedingungen sind Wärmeleistungen bekannt und es lassen sich Kosten und Kostenfunktionen ableiten.

Neben diesem bekannten Prüfpunkt, der prinzipiell für das Gebäude nicht weiter relevant ist, gibt es im Gebäude beliebig viele weitere Betriebspunkte, von denen folgende für die weitere Berechnung von Interesse sind:

- Auslegungsfall der Heizung, außen -12°C, maximale Vorlauftemperatur der Heizung, maximale Gebäudeheizlast (repräsentativ für die Auslegung)
- Bivalenzfall der Heizung, außen -2C, etwas geringere Vorlauftemperatur der Heizung, geringere Gebäudeheizlast (repräsentativ für die Auslegung einer Außenluftwärmepumpe)
- mittlerer Heiztag, außen ca. +6°C, mittlere Vorlauftemperatur der Heizung, mittlere Gebäudeheizlast (mittlere Jahresarbeitszahl der Heizung)
- mittlerer Tag eines Jahres, außen ca. +10°C, Trinkwarmwassertemperatur, mittlere Warmwasserlast (mittlere Jahresarbeitszahl der Trinkwassererwärmung)

Die Umrechnung eines bekannten Betriebspunktes (hier des Prüfpunktes „Prüf“ des Herstellers) in den anderen Zustand „x“ (als Platzhalter für den Auslegungsfall usw.) erfolgt mit nachfolgenden Gleichungen.

- Prüfpunkt: $COP_{Prüf} = \frac{\dot{Q}_{Prüf}}{P_{Prüf}}$ bzw. $\dot{Q}_{Prüf} = COP_{Prüf} \cdot P_{Prüf}$
- anderer Punkt: $COP_x = \frac{\dot{Q}_x}{P_x}$ bzw. $\dot{Q}_x = COP_x \cdot P_x$
- Verhältnis: $\frac{\dot{Q}_x}{\dot{Q}_{Prüf}} = \frac{COP_x}{COP_{Prüf}} \cdot \frac{P_x}{P_{Prüf}}$ $\frac{\dot{Q}_x}{\dot{Q}_{Prüf}} = \frac{COP_x}{COP_{Prüf}} \cdot f_{komp}$

Die Werte für COP („Prüf“ und „x“) werden anhand der Carnot-Gleichung oben berechnet und eingesetzt. Der Umrechnungsfaktor für die Kompressorleistung f_{komp} wird weiter unten beschrieben und ebenfalls als Zahl eingesetzt. Aus einer bekannten notwendigen Wärmeleistung – z. B. für den Auslegungsfall – kann eine zugehörige Prüfstandsleistung ermittelt werden, die relevant für die Kosten ist.

Es ist festzustellen, dass die elektrische Kompressorleistung der Wärmepumpen nicht konstant ist, sondern ebenfalls von der Vorlauftemperatur abhängt, während der Einfluss der Wärmequellentemperatur nach Albers nur gering ist [241]. Der Vorlauftemperatureinfluss auf die elektrische Kompressorleistung wird wie folgt angenähert:

- Leistungsfaktor f_{komp}: 0,3636 + 0,0182 ϑ_V [°C]

Beispiel: Es wird die Prüfstandswärmeleistung einer Erdreichwärmepumpe gesucht. Sie wird in einem Gebäude mit Heizkörpern betrieben. Das Gebäude hat 5,0 kW Heizlast. Es gelten folgende Randdaten:

Prüfstand	Gebäude (Auslegung)
• Vorlauftemperatur: 35°C • Quellentemperatur: 0°C • $COP_{prüf}$ (mit Qualitätssicherung): 2,81	• Vorlauftemperatur: 50°C • Quellentemperatur: -2°C • COP_{aus} (mit Qualitätssicherung): 2,11

Der Umrechnungsfaktor für die Kompressorleistung ergibt sich für 50°C Vorlauftemperatur zu 1,273. Nach Einsetzen in die obige Verhältnisgleichung ergibt sich eine Prüfstandswärmeleistung von 5,23 kW.

Mittlere Jahresarbeitszahl incl. Nachheizung

Aus Gründen der rechnerischen Vereinfachung wird für die Außenluftwärmepumpe mit dem elektrischen Nachheizstab eine gemittelte Jahresarbeitszahl beider Erzeuger bestimmt. Der Elektroenergieaufwand beider Erzeuger wird entsprechend nicht getrennt angegeben.

Beispiel: für eine Außenluftwärmepumpe mit einer JAZ im Heizfall von 2,8 und einem Deckungsanteil an der Erzeugung von 89 % wird eine Gesamteffizienz berechnet. Für den Elektroheizstab gilt ein Nutzungsgrad von 1.

- gewichtete JAZ: $JAZ_{WP+el} = \frac{1}{\frac{0,89}{2,8} + \frac{0,11}{1}} = 2,34$

Der „Abschlag“ von 0,46 (2,80 - 2,34) ist deutlich konservativer als die Feldmessergebnisse von Miara et al. Sie hatten eine Verschlechterung von unter 0,10 gemessen [204].

Solarthermie und Lüftungsanlage mit WRG

Die Randdaten zur Bewertung der beiden genannten Anlagen werden in den Anhängen 3.5.2 und 3.5.2 erläutert.

6.1.6 Randdaten der Elektroenergiebilanz

Nachfolgend werden die in der Programmierung getroffenen Annahmen zur Elektroenergiebilanz erläutert. Um textliche Doppelungen zu vermeiden, wird ggf. auf andere Kapitel in diesem Gutachten verwiesen.

Haushaltsstrom und Erträge der Photovoltaik

Die Randdaten zur Bewertung des Haushaltsstroms sind in Anhang 6.1.2 zusammengestellt. Der Bewertungsansatz zur Bestimmung des Jahresertrags der Photovoltaik ist in Anhang 3.5.1 beschrieben.

Selbstnutzungsquote von PV-Strom für Haushalt und Trinkwarmwasser

Sowohl der Bedarf an Haushaltsstrom als auch für Trinkwarmwasseranwendungen ist – im Gegensatz zum Heizstrombedarf – vergleichsweise homogen über das Jahr verteilt. Die Höhe des Strombedarfs [in kWh/a] und die installierte Peakleistung für Photovoltaik [in kWp] sind maßgeblich für die Selbstnutzung des Stroms. Die Selbstnutzungsquote des produzierten Stroms wird nach Erfahrungswerten wie folgt angenähert:

- Selbstnutzungsanteil der Photovoltaik: $-0,24 \cdot ln\left(\frac{P_{pk}[kWp]}{Q_{el}\left[\frac{kWh}{a}\right]}\right) - 1,32$

Für ein Einfamilienhaus mit einem Stromverbrauch von 5400 kWh/a (für Haushalt und Trinkwarmwasser) und einer installierten PV-Anlage mit 7,8 kWp (knapp 40 m²) ergibt sich ein Selbstnutzungsanteil des produzierten Stroms von 25 %. Bezogen auf die produzierte Menge von ca. 7800 kWh/a sind dies 1950 kWh/a. Es verbleiben 5850 kWh/a für die Heizung oder zur Rückspeisung ins Netz. Bezogen auf den Verbrauch ist die PV-Anlage groß bemessen (etwa 1,4mal mehr Strom wird produziert als benötigt).

Der Ansatz deckt sich gut mit dem Projektbericht „Auf dem Weg zum Niedrigstenergiehaus im Gebäudebestand“ des IFEU [124], bei dem die Haushaltsstromdeckung mit etwa 25 % beziffert wird. Die Anlage ist jedoch etwas kleiner dimensioniert (etwa genauso viel Strom wird produziert wie benötigt).

Selbstnutzungsquote von PV-Strom für Heizung

Abbildung 348 zeigt schematisch das Rechenmodell für die Nutzung von PV-Strom zur Gebäudeheizung. Der Berechnung voraus geht die Bestimmung der Nutzung von PV-Strom für den Haushalt und das Trinkwarmwasser. Nur der verbleibende Rest an PV-Strom wird betrachtet. Das Bilanzmodell geht vereinfacht davon aus, dass Heizstrombedarf und PV-Stromangebot komplett gegenläufig sind. Die beiden Steigungsdreiecke ergeben sich ausgehend von der Energiemenge und den beiden Zeitangaben (Heizperiode, Gesamtjahr).

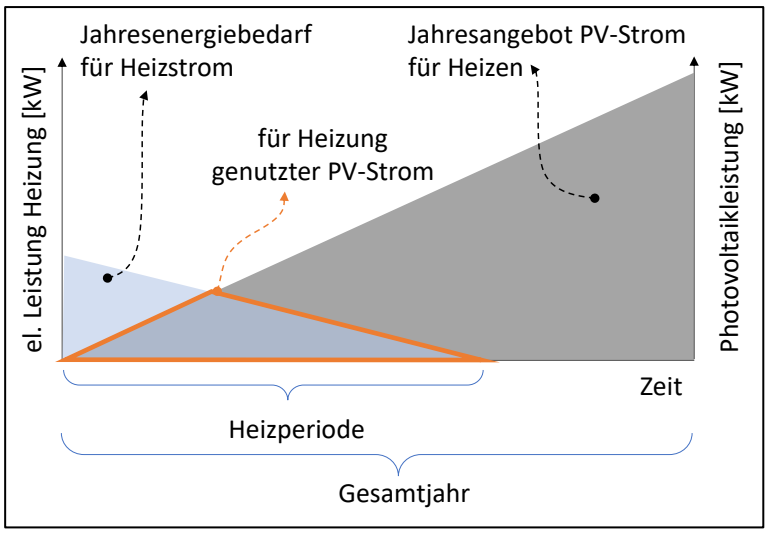


Abbildung 348 Schematische Darstellung des Näherungsmodells für PV-Heizstromnutzung [eigene Darstellung]

Für das o.g. beispielhafte EZFH und einem Heizstrombedarf von beispielsweise 3900 kWh/a ergäbe sich eine für Heizzwecke nutzbare PV-Strommenge von 1950 kWh/a. Das entspricht etwa 50 % des Bedarfs. Der Reststrom für Heizung käme entsprechend aus dem Netz; der nicht nutzbare PV-Strom wird ins Netz gespeist.

Pauschale Selbstnutzungsquote von PV-Strom

Falls die Photovoltaiknutzung nicht detailliert berechnet wird – das betrifft vor allem die mittlere Anlage im Bestand – wird heute von 10 % Selbstnutzung des Stroms ausgegangen.

6.1.7 Ökologische Bewertung

Es erfolgt eine Bewertung der fossilen Primärenergie sowie der äquivalenten CO_2-Emissionen mit Hilfe der Faktoren aus Anhang 5.5.2 bzw. 5.5.3.

Die Berücksichtigung des Biomassebudgets erfolgt nur exemplarisch (Mikroebene), siehe Anhang 3.3.3. In der allgemeinen Berechnung wird ausschließlich der fossile Anteil der Primärenergie berechnet. Jedoch werden nur sehr moderate Zuwachsraten von Biomassekesseln angenommen, so dass im Bundesschnitt das Budget eingehalten wird.

Für den Überschuss von PV-Strom gilt: wird er ins Netz zurückgespeist, verbessert er – bezogen auf das einzelne untersuchte Objekt – nicht dessen Umweltbilanz. Selbstverständlich verbessert sich im Schnitt mit der Rückspeisung der Netzmix. Für den selbstgenutzten Strom aus PV wird davon ausgegangen, dass ein entsprechend gleich großer Netzbezug entfällt.

6.1.8 Ökonomische Bewertung

Nachfolgend werden die in der Programmierung getroffenen Annahmen zur Wirtschaftlichkeitswertung erläutert. Um textliche Doppelungen zu vermeiden, wird ggf. auf andere Kapitel in diesem Gutachten verwiesen.

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung folgt dem Leitfaden für energiebewusste Gebäudeplanung LEG [77]. Ermittelt werden Jahresgesamtkosten aus der Addition von Kapitalkosten, Wartungs- und Unterhaltskosten sowie Energiekosten.

Investitionskosten sowie Wartungs- und Unterhaltskosten

Zur Bestimmung der Investitionskosten gelten die Festlegungen aus Anhang 5.8.2, für die Wartungs- und Unterhaltskosten die Ansätze aus Anhang 5.8.3.

Allerdings werden für folgende Wärmeerzeuger Mindestleistungen festgelegt, die eine untere Grenze am Markt verfügbarer Produkte darstellen: Holzkessel 6 kW, Gas- und Ölkessel 10 kW. Dies dient dazu, unrealistisch kleine Kosten bei der Schätzung zu vermeiden.

Betrachtungszeitraum und Nachinvestition bzw. Restwert

Im Rahmen des Gutachtens wird der Betrachtungszeitraum von Wirtschaftlichkeitsbewertungen standardmäßig auf 30 Jahre festgelegt.

Als Nutzungsdauern gelten die Festlegungen aus Anhang 5.9.1.

Alle Investitionen mit einer längeren Nutzungsdauer haben einen Restwert, die kürzerlebigen werden entsprechend (anteilig) mehrfach benötigt. Beispiele:

- Dach: Nutzungsdauer 45 Jahre; im Betrachtungszeitraum von 30 Jahren liegt ⅔ der Nutzungsdauer, daher werden auch ⅔ der Investitionskosten wirksam angesetzt (Restwert ⅓)
- Wärmeerzeuger: Nutzungsdauer 25 Jahre; im Betrachtungszeitraum von 30 Jahren benötigt man rechnerisch 1,2 Erzeuger, daher wird auch das 1,2-fache der Investitionskosten wirksam angesetzt

Es erfolgt eine lineare Berechnung des Restwertes bzw. der Nachinvestition ohne Berücksichtigung von Preissteigerungseffekten. Dies basiert auf der Annahme, dass Baukostenindex und Inflation über lange Zeiträume betrachtet einigermaßen gleichen Entwicklungen unterworfen sind.

Preissteigerung der Bauprodukte oder Lernkurve für Bauprodukte

Für keines der untersuchten Bauprodukte wurde eine Änderung angenommen. Der Preisindex aller Investitionskosten liegt bei 1,0. Dies spiegelt – bis auf Wärmepumpen und Photovoltaik – gut das Marktgeschehen der letzten Jahre wieder, siehe Anhang 5.8.1.

Energiepreise und deren Preissteigerung

Die in Anhang 5.5.1 festgelegten Energiepreise werden sämtlichen Überlegungen zugrunde gelegt. Es wird ohne eine Energiepreissteigerung gerechnet. Notwendige Effekte der Verteuerung oder Verbilligung einzelner Energieträger sind Ergebnisse der Untersuchung. Die Erläuterungen sind in Anhang 6.1.2 gegeben.

6.2 Makroperspektive

In der Programmierung sind Randdaten für 3 Zeitpunkte hinterlegt, der heutige Zustand mit Häufigkeiten bestimmter Merkmale sowie zwei zeitliche Szenarien. Darüber hinaus kann die Bilanzierung unter Berücksichtigung der Qualitätssicherung oder ohne Qualitätssicherung erfolgen.

- Datensatz für 2020, 2035 und 2050
- Anteile von Gebäuden mit und ohne Qualitätssicherung

Unter diesen globalen Annahmen erfolgt für die Summe aller Ein- und Mehrfamilienhäuser eine Gesamtbilanz der Energiemengen und Emissionen.

6.2.1 *Berechnungsablauf*

Die Energiebilanzierung folgt dem in Anhang 6.1.1 erläuterten Schema der „Mikroperspektive“. Es werden je ein EZFH und ein MFH mit durchschnittlichen Eigenschaften zu drei Zeitpunkten bilanziert: 2020 (analog Mikroperspektive, Grundbilanz siehe Anhang 3.1.3), 2035 und 2050. Die veränderte energierelevante Ausstattung der Gebäude mit Dämmung und Fenstern, Haupterzeugern, Peripherie und Zusatzerzeugern ist in Anhang 4.2 der „Makroperspektive“ erläutert.

Die Kostenermittlung erfolgt kumuliert (hochgerechnet für den Gesamtbestand) anhand der vorher bestimmten Sanierungsaktivitäten für den Baukörper sowie der Technologiewechsel für die Anlagentechnik. Die jeweiligen zahlenmäßigen Datengrundlagen (zu dämmende Wandflächen, zu installierende PV-Fläche, Stückzahlen von Wärmepumpen usw.) ergibt sich aus der Erläuterung zur Sanierung in Anhang 4.2.

6.2.2 *Besondere Festlegungen*

Hybridanlagen

Hybridanlagen werden hinsichtlich ihrer Energiebilanz als reine Wärmepumpenanlagen berechnet. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Deckungsanteil der Wärmepumpe relevant für das Ergebnis ist (vgl. Ausführungen in Anhang 3.3.2). Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass der Zustand „Hybridanlage“ nur ein vorübergehender ist, bis die bauliche Sanierung durchführt bzw. abgeschlossen wird.

Nutzung des erzeugten Photovoltaikstroms

Wird ein einzelnes Gebäude berechnet, kann die Nutzung des erzeugten PV-Stroms detailliert ermittelt werden. Das Verfahren ist in Anhang 6.1.6 beschrieben. Es wurde auf alle Fallbeispiele der Mikroperspektive angewendet, siehe Anhang 3.5.1.

Wird der Bestand jedoch pauschal betrachtet – mit anteilig Gebäuden mit und ohne Photovoltaik sowie mit und ohne Wärmepumpe – kann die Stromnutzung nur pauschal bestimmt werden. Für diese pauschale Nutzbarkeit des Photovoltaikstroms wird (konservativ) davon ausgegangen, dass sich die PV-Anlagen statisch gleichmäßig auf Gebäude mit und ohne Wärmepumpen verteilen.

		Anteilige Verbreitung der Wärmepumpen			Nutzungsquote des erzeugten Stroms im Durchschnittsgebäude			
		ohne Wärme-pumpe	Erdreich-wärme-pumpe	Außenluft-wärme-pumpe	ohne Wärme-pumpe	Erdreich-wärme-pumpe	Außenluft-wärme-pumpe	pauschal, gewichtet
		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
EZFH	2020	0,94	0,02	0,04	0,14	0,66	0,70	(0,17)
	2035	0,62	0,14	0,24	0,12	0,53	0,58	0,29
	2050	0,35	0,24	0,41	0,10	0,44	0,50	0,35
MFH	2020	0,98	0,01	0,01	0,34	0,88	0,91	(0,35)
	2035	0,75	0,16	0,09	0,31	0,76	0,80	0,43
	2050	0,49	0,34	0,17	0,29	0,69	0,73	0,50

Tabelle 189 Pauschale Nutzungsquote des Photovoltaikstroms in den Typgebäuden [eigene Darstellung]

Tabelle 189 zeigt die Annahmen für 2035 und 2050. Die Werte für 2020 werden bei der Berechnung nicht verwendet, weil aus heutiger Sicht die reine Einspeisung noch deutlich verbreiteter ist. Für 2035 und 2050 gelten die Werte unter der Annahme von Selbstnutzung im Vorrang.

Die Nutzungsquote des erzeugten Stroms ist im MFH größer, weil die Anlage kleiner dimensioniert ist – verglichen mit der zu versorgenden Fläche. In dem EZFH ist die PV-Anlage mehr überdimensioniert, daher wird ein größerer Teil ins Netz zurückgespeist. Die Nutzungsquote nimmt mit der Zeit jeweils ab. Ist keine Wärmepumpe vorhanden, weil die Belegungsdichte abnimmt und daher der Haushaltsstrombedarf sinkt. Ist eine Wärmepumpe vorhanden, sinkt ebenfalls der Strombedarf im einzelnen Gebäude über die Jahre, weil die Gebäude nach und nach baulich verbessert werden und weniger Energie benötigen. Außenluftwärmepumpen führen zu einer größeren Nutzungsquote, weil deren Strombedarf größer ist als der von Erdreichwärmepumpen.

Kostenschätzung für die Erzeuger

Basis für die Kostenschätzung ist das jeweilige Typgebäude (EZFH oder MFH). Da die Kostenfunktionen aller Erzeuger von der Heizlast abhängen, wird diese verwendet. Es gelten folgende Festlegungen – auf der sicheren Seite liegend:

- für den gesamten Zeitraum 2020 - 2035:
    - es gilt die (höhere) Heizlast des Durchschnittsgebäudes des Jahres 2020 für alle in diesem Zeitraum zu installierenden monovalenten Erzeuger (auch wenn im Verlauf der Zeit die Last sinkt, weil die bauliche Sanierung voranschreitet)
    - es gilt die (geringere) Heizlast des Durchschnittsgebäudes des Jahres 2035 bei der Kostenschätzung für Hybridsysteme; da die in Kürze folgende bauliche Modernisierung ein Grund für den Aufbau des Hybridsystems ist, fällt die Wahl auf eine Leistung nach der Modernisierung; auch der zweite Wärmeerzeuger wird in dieser Leistung gewählt, so dass in Addition beider Leistungen in jeden Fall auch die anfangs größere Heizlast gedeckt werden kann
- für den gesamten Zeitraum 2035 - 2050: die Festlegungen gelten analog

Da in jeder Periode jeweils ein Teil der Erzeugersysteme als Hybridsystem ausgeführt wird, der Rest als monovalente Systeme, gleichen sich die Ansätze der Über- bzw. Unterschätzung der notwendigen Erzeugerleistung in Teilen aus.

7 Verzeichnisse und Übersichten

7.1 Glossar

Auf ein ausführliches Glossar der Begriffe wird in dieser Studie verzichtet. Die Stattdessen wird auf nachfolgende Literaturquellen verwiesen, die eine große Menge an Stichworten erläutern:

- WBGU, „Energiewende zur Nachhaltigkeit“, 2003, [335]; (ca. 100 Begriffe rund um Energiebilanzierung, Treibhausgase, Energieträger und -stoffe)
- Länderarbeitskreis Energiebilanzen, „Glossar zu den Energiebilanzen der Länder“, 2007, [336]; (ca. 80 Begriffe rund um Energieträger, Wärme- und Stromerzeuger)
- Agentur für erneuerbare Energien, „Potentialatlas 2020“, 2010, [337] (ca. 50 Begriffe rund um erneuerbare Energien)
- Klimareporting, „Grundlagen für ein einheitliches Emissions- und Klimastrategieberichtswesen“, 2014, [338]; (ca. 50 Begriffe rund um Bilanzierung und Kennwertbildung)

Darüber hinaus liefert selbstverständlich auch das Internet jegliche Information. Es wird auf die Internetseite „Baunetzwissen“ verwiesen, die aktuell über 4700 Glossareinträge aufweist (https://www.baunetzwissen.de/).

7.2 Verzeichnis wichtiger Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzung	Langfassung, ggf. Übersetzung und Erläuterung
Abkürzungen für Verbände, Vereine, Kammern, Gesellschaften, Ministerien, Ämter, Institute	
acatech	acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., München
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Berlin/Bergheim
AGFW	Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt
AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen, Berlin
ARGE	Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Kiel
B.KWK	Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V., Berlin
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Eschborn
BAK	Bundesarchitektenkammer, Berlin
BBH	Becker Büttner Held Rechtsanwälte Wirtschaftsprüfer Steuerberater PartGmbB, Berlin
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn
BBU	BBU Verband Berlin-Brandenburgischer Wohnungsunternehmen e. V., Berlin
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Berlin
BDH	Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V., Köln
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e. V., Berlin
BEE	Bundesverband Erneuerbare Energie e.V., Berlin
BEI	Bremer Energie Institut, Bremen (ehemals)
BET	Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung GmbH, Aachen
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BMUM	Bundesministerium für Umwelt und Bauen (früher)
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (früher)
BMWi	Bundeswirtschaftsministerium
BTGA	Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung e. V., Bonn
BTU	Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., Berlin
co2online	co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH, Berlin
CONSENTEC	Consentec GmbH, Aachen

Tabelle 190 Abkürzungen

Abkürzung	Langfassung, ggf. Übersetzung und Erläuterung
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt
DENA	Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin
destatis	Statistisches Bundesamt
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., Stuttgart
DIA	Deutsche Immobilien-Akademie an der Universität Freiburg GmbH
DIBt	Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Köln
DMB	Deutscher Mieterbund e.V., Berlin
DV	Deutscher Verband für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung e.V., Berlin
EBZ	Europäisches Bildungszentrum der Wohnungs- und Immobilienwirtschaft, Bochum
Empirica	Empirica AG, Berlin
EnBW	EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Karlsruhe
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH, Köln
FIW	Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V., München
GdW	Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V., Berlin
GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH, Osnabrück
HEA	Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V., Berlin
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart
IEA	Internationale Energieagentur, Paris
IEE	Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, Kassel
IEK	Institut für Energie- und Klimaforschung, Jülich
IEMB	Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., Berlin
IFAM	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Bremen
ifo Institut	Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V.
IINAS	Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH, Darmstadt
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Zwischenst. Ausschuss für Klimaänderungen, Genf
IREES	Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH, Karlsruhe
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg
ISFH	Institut für Solarenergieforschung GmbH, Emmerthal
ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe
ISTA	ista GmbH, Essen
ITG	Institut für Technische Gebäudeausrüstung Forschung und Anwendung GmbH, Dresden
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme, Bremerhaven
IWU	Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt
KIT	Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
MCC	Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, Berlin
PHI	Passivhaus Institut GmbH, Darmstadt
PIK	Potsdam Institute for Climate Impact Research e. V., Potsdam
Prognos	Prognos AG, Berlin
RWE	RWE AG, Essen
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Essen
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin
TECHEM	Techem GmbH, Eschborn
TGL	Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (ehemalige DDR)
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf
VfW	Verbandes für Wärmelieferung e.V., Hannover
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Frankfurt

Tabelle 190 Abkürzungen (Fortführung)

Abkürzung	Langfassung, ggf. Übersetzung und Erläuterung
Abkürzungen für Gesetze, Verordnungen, Förderprogramme	
APEE	Anreizprogramm Energieeffizienz (Förderprogramm)
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude (Förderprogramm)
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BGBl	Bundesgesetzblatt
EBK	Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen (Förderprogramm)
EBM	Energieberatung Mittelstand (Förderprogramm)
EBS	Energieeffizientes Bauen und Sanieren (Förderprogramm)
EED	Energieeffizienzrichtlinie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare Energien Wärme Gesetz
EH	Effizienzhaus
EnEG	Energieeinspargesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnSanMV	Verordnung zur Bestimmung von Mindestanforderungen für energetische Maßnahmen bei zu eigenen Wohnzwecken genutzten Gebäuden
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive; EU-Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergie-effizienz von Gebäuden
GEG	Gebäudeenergiegesetz
HeizAnlV	Heizungsanlagenverordnung
HeizKoV	Heizkostenverordnung
HOAI	Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen
HZO	Heizungsoptimierung (Förderprogramm)
iSFP	individueller Sanierungsfahrplan
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LTRS	Long Term Renovation Strategy, Langfristigen Renovierungsstrategie
MAP	Marktanreizprogramm (Förderprogramm)
TMA	Technische Mindestanforderungen (Anlage zu Förderprogrammen)
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
WärmeLV	Wärmelieferverordnung
WSchV	Wärmeschutzverordnung
Abkürzungen für Rechenverfahren, Technologien, Begriffe der energetischen Bilanzierung und Bewertung	
BAU	Business as usual, weiter so
BEAM	Simulationsmodell von ECOFYS: Built-Environment-Analysis-Model
BGF	Bruttogrundfläche
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIM	Building Information Modeling, Bauwerksdatenmodellierung
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude
CE	Conformité Européenne, Europäische Konformität
DN	Diameter Nominal, Nennweite eines Rohres
EAV	Energieanalyse aus dem Verbrauch
EE	erneuerbare Energie
EFH	Einfamilienhaus
EMK	energiebedingte Mehrkosten
EPHW	Rechenmodell des IWU: Energiepass Heizung und Warmwasser
ETS	EU Emissions Trading System, Emissionszertifikatehandel
EZFH	Ein- und Zweifamilienhaus
FW	Fernwärme

Tabelle 190 Abkürzungen (Fortführung)

Abkürzung	Langfassung, ggf. Übersetzung und Erläuterung
GEMIS	Simulationsmodell des Ökoinstituts: Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
GEMOD	Simulationsmodell des Fraunhofer IFEU: Modell zur Berechnung des Energieverbrauchs für Raumwärme und Trinkwarmwasser in Gebäuden
GLT	Gebäudeleittechnik
GMFH	Großes Mehrfamilienhaus
GUD	Gas und Dampf (Kraftwerk)
HNF	Hauptnutzfläche
IBA	Internationale Bauausstellung
KG	Kostengruppe
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LD	Lebensdauer
LEG	Leitfaden Energiebewusste Gebäudeplanung
MFH	Mehrfamilienhaus
MK	Mehrkosten
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
ND	Nutzungsdauer
NF	Nutzfläche
NGF	Nettogrundfläche
NT	Niedertemperatur (bei Kesseln)
PH	Passivhaus
PHPP	Passivhaus-Projektierung-Paket
PtH	Power to Heat, mit (Überschuss)strom hergestellte Wärme
PtG	Power to Gas, mit (Überschuss)strom hergestelltes synthetisches Gas
PtL	Power to Liquid, mit (Überschuss)strom hergestellter synthetischer Flüssigbrennstoff
PtX	Power to X, mit (Überschuss)strom hergestelltes synthetisches Gas oder Öl
PUR	Polyurethan (Dämmstoff)
PV	Photovoltaik
QS	Qualitätssicherung
REMOD	Simulationsmodell des Fraunhofer ISE: Nationales Energiesystemmodell mit Fokus auf sektorübergreifende Systementwicklung
RH	Reihenhaus
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgase
TWW	Trinkwarmwasser
VAR	Variante
VK	Vollkosten
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WEG	Wohnungseigentümergemeinschaft
WF	Wohnfläche
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung (hier in einer Lüftungsanlage)
Abkürzungen, die gleichzeitig Formelzeichen sind	
COP	Coefficient of Performance, Leistungszahl
JAZ	Jahresarbeitszahl
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KEV	Kumulierter Energieverbrauch
PEF	Primärenergiefaktor
PER	Primärenergie Erneuerbar

Tabelle 190 Abkürzungen (Fortführung)

Formel-zeichen	relevante/häufige Einheit	Erläuterung
A	m²	Fläche (allgemein)
A_N	m²	Gebäudenutzfläche nach EnEV
$a_{p,n}$	a^{-1}	Annuität
a_u	a^{-1}	jährlicher Wartungs- und Unterhaltskostenanteil
A_{wohn}	m², Mio. m²	Wohnfläche
COP	-	Leistungszahl (Leistungsverhältnis)
E	kg/a, t/a, Mt/a	Emissionsmenge (allgemein)
e_{CO2}	g/kWh, t/MWh	Emissionsfaktor
f	-	Faktor (allgemein)
$f_{Förderung}$	-	Fördermittelanteil
f_P	-	Primärenergiefaktor
h	W/(m²K)	wohnflächenbezogenen Verlust für Transmission und Lüftung, Baustandard, „Fingerabdruck des Gebäudes“
H	kWh/m³, kWh/l, kWh/kg	Heizwert (Index i) oder Brennwert (Index s)
H_T'	W/(m²K)	mittlerer hüllflächenbezogener Transmissionswärmeverlust
I	€, Mio. €, Mrd. €	Investitionskosten
JAZ	-	Jahresarbeitszahl (Energiemengenverhältnis)
K	€/a, T€/a, Mio. €/a	jährliche Kosten (allgemein)
k	€/kWh	Preis (allgemein)
K_a	€/a, T€/a, Mio. €/a	jährliche Gesamtkosten
$k_{äqu}$	€/kWh	äquivalenter Energiepreis (einer Sanierungsmaßnahme)
k_{CO2}	€/t	äquivalenter CO_2-Preis (einer Sanierungsmaßnahme)
K_{CO2}	€/a, T€/a, Mio. €/a	jährliche Kosten für Emissionen
k_e	€/kWh	Energiepreis
K_e	€/a, T€/a, Mio. €/a	jährliche Kosten für Energie
k_{em}	€/kWh	Emissionspreis als Bestandteil des Energiepreises
K_i	€/a, T€/a, Mio. €/a	jährliche Kosten für Kapital
K_u	€/a, T€/a, Mio. €/a	jährliche Kosten für Wartung und Unterhalt
L	m	Länge (allgemein)
n	h^{-1}	Luftwechsel
Q	kWh, MWh, GWh, TWh	Energiemenge (allgemein)
$\dot{Q}$	kW, MW, GW	Leistung (allgemein)
q_B	-	Betriebsbereitschaftsverlust eines Kessels oder Speichers
Q_E	kWh/a, TWh/a	Endenergie (an das Gebäude geleifert)
Q_h	kWh, MWh, GWh, TWh	Heizwärmebedarf
Q_P	kWh/a, TWh/a	Primärenergie (Endenergie plus Vorverluste)
Q_w	kWh, MWh, GWh, TWh	Nutzwärmebedarf für Trinkwarmwasser
t	h, d, mon	Zeit (allgemein)
t_{HP}	t/a, h/a	Heizperiodenlänge
U	W/(m²K)	Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteils
V	m³	Volumen (allgemein)
Δq	kWh/(m²a)	Zuschlag für Qualitätssicherung
ζ_{ex}	-	exergetischer Gütegrad
η_a	-	Jahresnutzungsgrad (Energiemengenverhältnis)
η_K	-	Kesselwirkungsgrad (Leistungsverhältnis)
ϑ	°C	Temperatur (allgemein)
ϑ_a	°C	Außentemperatur (in der Heizperiode)
ϑ_{HG}	°C	Heizgrenztemperatur
ϑ_i	°C	Innentemperatur
ϑ_R	°C	Rücklauftemperatur
ϑ_V	°C	Vorlauftemperatur

Tabelle 191 Wichtige Formelzeichen

7.3 Literaturverzeichnis

[1] Statistisches Bundesamt, „Wohnen in Deutschland (Datenbank 31231-0001),“ 2018. [Online]. Available: https://www-genesis.destatis.de. [Zugriff am 11 Mai 2020].

[2] BDH, „10-Jahres-Verlauf Absatz Wärmeerzeuger Deutschland,“ 2020. [Online]. Available: http://www.bdh-koeln.de. [Zugriff am 25 April 2020].

[3] Deutsche Energie-Agentur, „dena-Gebäudereport kompakt 2019 - Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand,“ dena, Berlin, 2019.

[4] BMWI, „Zweiter Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2015.

[5] L. Beier (Red.) und C. Bantle, „Wie heizt Deutschland 2019? BDEW-Studie zum Heizungsmarkt,“ BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Berlin, 2019.

[6] N. Diefenbach und e. al, „Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand,“ IWU und Bremer Energieinstitut, Darmstadt, Bremen, 2010.

[7] H. Cischinksy und N. Diefenbach, „Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016,“ Institut Wohnen und Umwelt für BBSR, Darmstadt, 2018.

[8] D. Walberg, A. Holz und weitere, „Wohnungsbau in Deutschland - 2011 - Modernisierung oder Bestandsersatz,“ Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Kiel, 2011.

[9] U. Bigalke, A. Armbruster und weitere, „Der dena-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand.,“ Deutsche Energie-Agentur, Berlin, 2016.

[10] J. Orthjohann, D. Schreckenberg und A. Poggenpohl, „ReConGeb-Start I Vorstudie,“ Stiftung Energieeffizienz, Köln, 2018.

[11] BMWI, „Langfristige Renovierungsstrategie für Deutschland - Nach Art. 2a der Richtlinie 2018/844/EU zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Energy performance of buildings directive, EPBD 2018),“ BMWI, Berlin, 2020.

[12] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland,“ AGEB für BMWI, Münster, Bergheim, 2020.

[13] P. Gniffke (Red.), „Nationale Trendtabellen für die Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020.

[14] R. Harthan, J. Reppening und weitere, „Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (Kurzbericht),“ UBA, Dessau, 2020.

[15] N. Diefenbach, B. Stein und weitere, „Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2017,“ IWU und Fraunhofer IFAM für KfW, Darmstadt, Bremen, 2018.

[16] D. Zech, S. Ullrich und weitere, „Evaluation des Marktanreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2015 bis 2018,“ BMWI, Berlin, 2019.

[17] M. Friedrich, H. Erhorn und weitere, „CO2 Gebäudereport 2007,“ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2007.

[18] BMWI, „Energiedaten: Gesamtausgabe,“ BMWI, Berlin, 2019.

[19] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V., „Der Holzpellet-Preis-Index, Jahresmittelwerte,“ 2020. [Online]. [Zugriff am 27 Mai 2020].

[20] BWP Bundesverband Wärmepumpe e.V., „Energiepreise (Wärmepumpentarif),“ 2019. [Online]. Available: https://www.waermepumpe.de/politik/energiepreise/. [Zugriff am 19 Juli 2020].

[21] A. Matthey und B. Bünger, „Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten,“ UBA, Berlin, 2019.

[22] T. Loga, B. Stein und weitere, „Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen,“ Institut Wohnen und Umwelt für BBSR, Darmstadt, 2019.

+

[23] K. Jagnow und D. Wolff, „Optimus - Umweltkommunikation in der mittelständischen Wirtschaft am Beispiel der Optimierung von Heizungssystemen durch Information und Qualifikation zur nachhaltigen Nutzung von Energieeinsparpotenzialen - Technische Optimierung und Energieeinsparung," Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Wolfenbüttel, 2006.

[24] U. Bigalke, H. Marcinek und weitere, „Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizienter Wohngebäude," dena, Institut Wohnen und Umwelt, Berlin, Darmstadt, 2016.

[25] K. Jagnow, D. Wolff und P. Teuber, „Effizienz von Wärmeerzeugern," *TGA Fachplaner,* Nr. 10, 2004.

[26] K. Jagnow, D. Wolff und weitere, „Umsetzungsprojekt – Integrale Planung und Steuerung der nachhaltigen Modernisierung des Gebäudebestandes und der Energieversorgung der," Ostfalia Hochschule, Wolfenbüttel, 2014.

[27] D. Wolff und A. Unverzagt, „Klimaschutzkampagne "Sanierungswirkung"," Ostfalia Hochschule für BMU, Wolfenbüttel, 2015.

[28] K. Jagnow und D. Wolff, „Integration von Heizkesseln in Wärmeverbundsysteme mit großen Solaranlagen," Wolfenbüttel, 2012.

[29] BMF, *Verordnung zur Bestimmung von Mindestanforderungen für energetische Maßnahmen bei zu eigenen Wohnzwecken genutzten Gebäuden nach §35c des Einkommensteuergesetzes - (Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung - ESanMV),* Berlin: Deutscher Bundestag - Drucksache 19/15312, 2019.

[30] BMWI, *Förderrichtlinie zur Bundesförderung für effiziente Gebäude - Wohngebäude (BEG WG),* Berlin: BMWI, 2020.

[31] I. Zenke, M. Altrock und weitere, „Das Klimapaket in der Gesetzgebung," BBH für Deutsche Energieagentur, Berlin, 2019.

[32] G. Purper, W. Neumann und weitere, „Konzept für eine zukunftsfähige Energieversorgung," BUND, Berlin, 2017.

[33] W. Sobek, „Interview mit dem Architekten," *VDI Nachrichten,* Nr. 3, 2020.

[34] M. Pehnt, A. von Oehsen und weitere, „Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich," ifeu, ecofys, IWU, Universität Bielefeld für BMWi, Heidelberg, Darmstadt, Köln, Bielefeld, 2015.

[35] M. Linder, „Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen 2016," Magistrat der Stadt Frankfurt, Frankfurt Main, 2016.

[36] E. O. Wright, Reale Utopien - Wege aus dem Kapitalismus, Berlin: Suhrkamp, 2017.

[37] M. Göpel, Unsere Welt neu denken - eine Einladung, Berlin: Ullstein, 2020.

[38] M. Latif, Heisszeit, Freiburg: Herder, 2020.

[39] C. Kemfert, P.-Y. Oei und weitere, „Die Beendigung der energetischen Nutzung von Kohle in Deutschland," DIW, Berlin, 2018.

[40] J. Schellnhuber, D. Messner und weitere, „Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz," Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung für BMBF und BMU, Berlin, 2009.

[41] C. Hornberg, M. Niekisch und weitere, „Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa - Umweltgutachten 2020," Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin, 2020.

[42] K. Hainsch, L. Göke und weitere, „European Green Deal: Mit ambitionierten Klimaschutzzielen und erneuerbaren Energien aus der Wirtschaftskrise," *DIW-Wochenbericht 28-2020,* Nr. Juli, 2020.

[43] N. Gerhardt, F. Sandau und weitere, „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr," Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP, ifeu, Stiftung Umweltenergierecht, Kassel, Heidelberg, Würzburg, 2015.

[44] T. Traber und H.-J. Fell, „Erdgas leistet keinen Beitrag zum Klimaschutz," Energy Watch Group, Berlin, 2019.

[45] Leopoldina, acatech, Union der deutschen Akademien, „Energiewende 2030: Europas Weg zur Klimaneutralität," Leopoldina, acatech, Union der deutschen Akademien, Berlin, 2020.

[46] L. Feld, C. M. Schmidt und weitere, „Aufbruch zu einer neuen Klimapolitik," Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Wiesbaden, 2019.

[47] M. Deutsch, M. Buck und weitere, „Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt," AGORA, Berlin, 2019.

[48] V. Bürger, C. Rohde und weitere, „Energieeinsparquote für Deutschland? Bewertung des Instruments der Energieeinsparquote (Weiße Zertifikate) auf seine Eignung als Klimaschutzinstrument für Deutschland," Ökoinstitut und Fraunhofer ISI für KfW und WWF, Freiburg, Karlsruhe, 2012.

[49] G. Eisenbeiß, „Klimaschutz durch Kohlenstoffbeschränkung," *ZAllgMed,* pp. 230-232, Heft 83 2007.

[50] BAK, „Energiewende mit Architekten - Strategie der BAK für einen klimaneutralen Gebäudebestand," Bundesarchitektenkammer, Berlin, 2018.

[51] DV AG Energie, „Kursbuch Klimaschutz im Gebäudebereich," Deutscher Verband für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung, Berlin, 2019.

[52] GDW, „Was genau wird gebraucht, damit es beim Klimaschutz im Gebäudesektor vorangeht?," Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen, Berlin, 2019.

[53] K. Jahnke, T. Loitz und weitere, „Wirksam Sanieren: Chancen für den Klimaschutz - Feldtest zur energetischen Sanierung von Wohngebäuden," co2online, SEnerCon, Fraunhofer ISE, Ostfalia für BMU, Berlin, Freiburg, Wolfenbüttel, 2015.

[54] BDEW, „Entwicklung der Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland," BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin, 2020.

[55] D. Wolff, „Was tut sich bei der Energiewende und beim Klimaschutz?," DV Deutscher Verband für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung, Berlin, 2019.

[56] Haustec, „Solarimo: Kostenlose PV-Anlagen für die Wohnungswirtschaft," 2020. [Online]. Available: https://www.haustec.de/heizung/waermeerzeugung/solarimo-kostenlose-pv-anlagen-fuer-die-wohnungswirtschaft. [Zugriff am 11 März 2020].

[57] N. Diefenbach, M. Großklos und weitere, „Analyse der Energieversorgungsstruktur für den für den Wohngebäudesektor zur Erreichung der Klimaschutzziele 2050," IWU, Hochschule Darmstadt, Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung für BMWi, Darmstadt, Aachen, 2019.

[58] Senat der Freien und Hansestadt Hamburg, *Gesetz zum Neuerlass des Hamburgischen Klimaschutzgesetzes sowie zur Anpassung weiterer Vorschriften,* Hamburg: HmbGVBl. Nr. 10, 2020.

[59] DMB, „Klimaschutz und energetische Gebäudesanierung - Positionspapier," Deutscher Mieterbund, Berlin, 2019.

[60] M. Neitzel, S. Klöppel und weitere, „Machbarkeits- und Umsetzungsstudie für eine Klimakomponente im Wohngeld," InWIS und Institut der deutschen Wirtschaft für BMU und BBSR, Bochum, Köln, 2017.

[61] M. Großklos, M.-C. Krapp und weitere, „Ansätze zur Reduktion der Nebenkosten im sozialen Wohnungsbau am Beispiel des Vorhabens „PassivhausSozialPlus" in Darmstadt," IWU für Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Darmstadt, 2018.

[62] N. Diefenbach, C. von Malottki und weitere, „Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich – Zielerreichungsszenario," IWU für Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Berlin, 2013.

[63] V. Bürger, S. Braungardt und weitere, „Auswirkungen der Sektorkopplung im Wärmebereich auf die Energiekosten von privaten Verbraucherinnen und Verbrauchern," Öko-Institut für Verbraucherzentrale Bundesverband, Freiburg, 2019.

[64] J. Weiß, A. Bierwirth und weitere, „Entscheidungskontexte bei der energetischen Sanierung," IÖW und Wuppertal Institut für BMBF, Berlin, Wuppertal, 2018.

[65] G. Thomaßen, L. Reuter und weitere, „Wie passen Mieterschutz und Klimaschutz unter einen Hut?," AGORA und Universität Kassel für BMBF, Berlin, Kassel, 2020.

[66] BMU, „Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung," Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin, 2016.

[67] T. Bründlinger, J. Elizalde-König und weitere, „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende," dena, ewi Energy Research & Scenarios, Berlin, Köln, 2018.

[68] P. Sterchele, J. Brandes und weitere, „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen," Fraunhofer ISE, Freiburg, 2020.

[69] F. Hein, F. Peter und P. Graichen, „Auswirkungen der Corona-Krise auf die Klimabilanz Deutschlands," AGORA Energiewende, Berlin, 2020.

[70] H. Becker, S. Leffers und weitere, „Förderung integrierter Energie-/Wärmezähler," *TGA Fachplaner,* Nr. 03, 2019.

[71] DPG Deutsche Physikalische Gesellschaft, „Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990 - 2020," DPG, Bad Honnef, 2005.

[72] P. Markewitz und G. Stein (Hrsg.), „Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland," Forschungszentrum Jülich für BMWA, Jülich, 2003.

[73] G. Kobiela, S. Samadi und weitere, „CO2-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze," Wuppertalinstitut für Fridays for Future, Wuppertal, 2020.

[74] H. Dambeck, F. Ess und weitere, „Klimaneutrales Deutschland," Prognos, Ökoinstitut, Wuppertalinstitut für AGORA und Stiftung Klimaneutralität, Berlin, Wuppertal, 2020.

[75] T. Loga und U. Imkeller-Benjes, „Energiepaß Heizung/Warmwasser - Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem," Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1997.

[76] T. Loga, R. Born und weitere, „Energiebilanz-Toolbox - Arbeitshilfe zum Energiepass Heizung/Warmwasser," Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2001.

[77] Institut Wohnen und Umwelt, „Heizenergie im Hochbau - Leitfaden energiebewusste Gebäudeplanung," Institut Wohnen und Umwelt für Hessisches Umweltministerium, Darmstadt, 1999.

[78] K. Jagnow und D. Wolff, „Energiekonzepte," in *Energieversorgung 2020*, Berlin, Beuth, 2017.

[79] K. Jagnow und D. Wolff, „Wärmewende und Klimaneutralität: Was sich für Gebäude schnellstens ändern muss," *TGA Fachplaner,* Nr. Juli, 2020.

[80] B. Krick, „Teil 1: Erneuerbare Primärenergie - ein Bewertungssystem mit Zukunft," IG-Passivhaus-Fachinformation, Darmstadt, 2015.

[81] K. M. Schmidt, „Brief des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie," Wissenschaftlicher Beirat, Berlin, 2020.

[82] RLS, „New Deal für das Erneuerbare Energiesystem," Reiner Lemoine Stiftung, Berlin, 2020.

[83] H. Wirth, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland," ISE, Freiburg, 2020.

[84] Leopoldina, acatech, Union der deutschen Akademien, „Ad-hoc-Stellungnahme - Juni 2020 - Energiewende 2030: Europas Weg zur Klimaneutralität," Nationale Akademie der Wissenschaften, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, Berlin, 2020.

[85] N. Gerhardt, J. Bard und weitere, „Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme," Fraunhofer IEE, Hannover, Kassel, 2020.

[86] J. Vorländer, „European Green Deal: Wärmepumpen sind No-regret-Maßnahme," *TGA-Fachplaner,* Nr. 7, 2020.

[87] J. Rifkin, Der globale Green New Deal, Frankfurt: Campus, 2019.

[88] H. Timm, „Wir brauchen einen Paradigmenwechsel," *TAB - Technik am Bau,* Nr. 4, 2020.

[89] P. Graichen, F. Peter und weitere, „Die Energiewende im Stromsektor," AGORA Energiewende, Berlin, 2018.

[90] B. Schulze Darup, „Kostengünstiger und zukunftsfähiger Geschosswohnungsbau im Quartier," schulze darup architekten für DBU, Berlin, 2019.

[91] K. Jagnow, „Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik," Dissertation, Universität Dortmund, Dortmund, 2004.

[92] K. Jagnow und D. Wolff, „E-A-V: Energieanalyse aus dem Verbrauch," *TGA Fachplaner,* Nr. 9, 2004.

[93] D. Wolff, „Standard-Angebot oder Top-Level-Modernisierung," in *Energieeffizienz in Gebäuden - Jahrbuch 2007*, Berlin, VME Verlag und Medienservice Energie, 2007.

[94] B. Schulze Darup, „Energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10," Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, 2010.

[95] D. Wolff und w. Mitarbeiter, „Entwicklung und Erprobung der Grundlagen für das Partnerschaftsmodell 'Alliance Contracting' in der Wohnungswirtschaft," Ostfalia Hochschule für DBU, Wolfenbüttel, 2019.

[96] J. Vorländer, „Neue Heizung kann Kosten sofort senken," *TGA-Fachplaner,* Nr. 4, 2020.

[97] J. Rifkin, Die Null-Grenzkosten-Gesellschaft, Frankfurt am Main: Campus-Verlag, 2014.

[98] D. Wolff, A. Unverzagt und A. Schünemann, „Quartiersüberblick Hildesheim," Ostfalia unveröffentlicht, Wolfenbüttel, 2020.

[99] Institut Wohnen und Umwelt, „Häuser sparsamer als verlangt - Investive Mehrkosten bei Neubau und Sanierung," IWU, Darmstadt, 2014.

[100] V. Stockinger, W. Jensch und J. Grunewald, „+Eins - Plusenergiesiedlung Ludmilla-Wohnpark Landshut," TU Dresden, Dresden, 2014.

[101] Statistisches Bundesamt, „Wohnen in Deutschland - Mikrozensus 2018," 2019. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html. [Zugriff am 11 Mai 2020].

[102] T. Loga, B. Stein und weitere, „Deutsche Wohngebäudetypologie," IWU, Darmstadt, 2015.

[103] Techem, „Kennwerte - Hilfen für den Wohnungswirt," Techem AG, Eschborn, 2005.

[104] Techem Energy Services, Corporate Communications, „Techem Energiekennwerte 2019," Techem, Eschborn, 2019.

[105] D. Wolff, C. Halper und weitere, „Analyse des Energieverbrauches von Mehrfamilienhäusern am Kronsberg in Hannover anhand monatlicher Messdaten," Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel für DBU, Wolfenbüttel, 2005.

[106] BMF, *Verordnung zur Bestimmung von Mindestanforderungen für energetische Maßnahmen bei zu eigenen Wohnzwecken genutzten Gebäuden nach § 35c des Einkommensteuergesetzes (Energetische Sanierungsmaßnahmen-Verordnung – ESanMV),* Bde. %1 von %2Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 1, ausgegeben zu Bonn am 7. Januar 2020, Berlin: Bundesanzeiger, 2020.

[107] ohne_Autor, *Technische Mindestanforderungen zum Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude" – Einzelmaßnahmen,* Berlin, 2019.

[108] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), *VDI 3807-5,* Berlin: Beuth, 2014.

[109] NABau, NHRS und FNL im DIN, *DIN V 18599 Bbl 1 "Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich",* Berlin: Beuth, 2009.

[110] U. R. Fritsche und L. Rausch, „Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme," Ökoinstitut für Umweltbundesamt, Freiburg, Dessau-Roßlau, 2008.

[111] M. Großklos, „Kumulierter Energieaufwand verschiedener Energieträger und -versorgungen," Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2002, 2009, 2014, 2020.

[112] NABau, NHRS und FNL im DIN, *DIN V 18599 - 1 bis 11 "Energetische Bewertung von Gebäuden",* Berlin: Beuth, 2018.

[113] Umweltbundesamt, „Bilanz 2019: CO2-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter," 2019. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom. [Zugriff am 05 Juli 2020].

[114] M. Memmler, T. Lauf und S. Schneider, „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger," Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2018.

[115] D. Schüwer, T. Hanke und H.-J. Luhmann, „Konsistenz und Aussagefähigkeit der Primärenergie-Faktoren für Endenergieträger im Rahmen der EnEV," Wuppertal Institut für Zukunft ERDGAS und DVGW, Wuppertal, 2015.

[116] J. Brandes, G. Eikenloff und weitere, „Stadtsanierung: Ist KWK sinnvoll?," *TGA Fachplaner,* Nr. Nr. 1, 2014.

[117] H. Rehkugler, T. Erbil und weitere, „Energetische Sanierung von Wohngebäuden - Wirtschaftlichkeit vs. Klimaschutz," Deutsche Immobilien-Akademie, Freiburg, 2012.

[118] U. Bigalke, H. Discher und weitere, „Der dena-Gebäudereport 2012. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand.," Deutsche Energie-Agentur, Berlin, 2012.

[119] P. Jochum, P. Mellwig und weitere, „Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich," Beuth Hochschule für Technik, ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Berlin, Heidelberg, 2017.

[120] H. Simons, „Energetische Sanierung von Ein- und Zweifamilienhäusern - Energetischer Zustand, Sanierungsfortschritte und politische Instrumente," empirica, Berlin, 2012.

[121] K. Barzantny, S. Achner und S. Vomberg, „Klimaschutz: Plan B 2050 - Energiekonzept für Deutschland," Eutech Energie und Management für Greenpeace, Aachen, Hamburg, 2008.

[122] R. Henger und M. Voigtländer, „Energetische Modernisierung des Gebäudebestandes: Herausforderungen für private Eigentümer," Haus & Grund Deutschland, Köln, Berlin, 2012.

[123] B. Schulze Darup und M. Neitzel, „Energieeffizienz mit städtebaulicher Breitenwirkung," schulze darup architekten, InWIS, Nürnberg, Bochum, 2011.

[124] M. Pehnt, P. Mellwig und weitere, „100 % Wärme aus erneuerbaren Energien? - Auf dem Weg zum Niedrigstenergiehaus im Gebäudebestand," ifeu, Bergische Universität, ecofys, dena, TU Darmstadt, Klinski, Heidelberg, Wuppertal, Köln, Berlin, Darmstadt, 2014.

[125] A. Enseling, „Leitfaden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparinvestitionen im Gebäudebestand," Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2003.

[126] A. Enseling und U. Hacke, „Energietechnische Gebäudemodernisierung – (wie) rechnet sich das?," Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2020.

[127] P. Jochum, P. Mellwig und weitere, „Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands," Beuth Hochschule für Technik, ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Berlin, Heidelberg, 2015.

[128] P. Mellwig, M. Pehnt und weitere, „Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung," ifeu, Fraunhofer IEE, consentec für AGORA, Heidelberg, Kassel, Aachen, 2018.

[129] VFF und BF, „Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern," Verband Fenster und Fassade, Bundesverband Flachglas, Frankfurt, Troisdorf, 2017.

[130] J. Orthjohann und D. Schreckenberg, „Qualitätssicherung effizienter Wärmeversorgung," *Bundesbaublatt,* Nr. 12, 2012.

[131] J. Deidert, K. Jagnow und D. Wolff, „Integration von Heizkesseln in Wärmeverbundsysteme mit großen Solaranlagen; Teil 1: Auswertung von Feldanlagen," Ostfalia für BMU, Wolfenbüttel, 2012.

[132] J. Kuck, „Deutschland 100% regenerativ - 20. Fachtagung Gebäude energetisch optimieren," Ostfalia, Wolfenbüttel, 2017.

[133] Purmo, „Leitfaden für Heizkörper in Niedrig-Temperatur-Systemen," Purmo, Vienenburg, 2011.

[134] Z. Bastian, W. Feist und weitere, „Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten," Passivhausinstitut, Darmstadt, 2009.

[135] Verbraucherzentrale Bundesverband, „Die „Aktion Brennwertcheck" der Verbraucherzentralen," VZBV, Berlin, 2011.

[136] Forum für Energieeffizienz in der Gebäudetechnik e.V., „Der Gebäudesanierungsfahrplan," VDZ, Berlin, ohne_Jahr.

[137] U. Wagner, S. Fattler und weitere, „Dynamis-Hauptbericht," FfE, München, 2019.

[138] B. Krick, „Wärmeversorgungskonzepte in Niedrigenergie- und Passivhäusern im ökonomischen Vergleich," Passivhausinstitut, Darmstadt, 2017.

[139] P. Deutscher, M. Elsberger und L. Rouvel, „Klimaschutz durch Minderung von Treibhausgasemissionen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher durch klimagerechtes Verhalten," TU München für UBA, München, 1999.

[140] T. Ueno, K. Tsuji und Y. Nakano, „Effectiveness of Displaying Energy Consumption Data in Residential Buildings: To Know Is to Change," ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Osaka, 2006.

[141] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), *VDI 3807-2,* Berlin: Beuth, 2014.

[142] M. Offermann, B. von Manteuffel und weitere, „Nutzenergiebedarf für Warmwasser in Wohngebäuden," ecofys, co2online, ISTA für BBSR, Köln, Berlin, Essen, 2017.

[143] L. Siebenkotten, M. Groschek und A. Gedaschko, „Wohngebäude: Klimaziele sozialverträglich erreichen," DMB, DV und GdW, Berlin, 2019.

[144] I. Vogler, „Untersuchung von mittel- und langfristigen Auswirkungen verschiedener Energie-Einsparstrategien von Wohnungsunternehmen auf die Wohnkosten," Dissertation, Universität Kassel, Kassel, 2014.

[145] D. Wolff, „Jahresnutzungsgrad von Brennwertkesseln - Vor der Wärmelieferung: Schätzen oder messen?," *TGA Fachplaner,* Nr. 03, 2016.

[146] V. Grinewitschus und K. Lepper, „Gutachten zur "Ermittlung von anerkannten Pauschalwerten für den Jahresnutzungsgrad (JNG) von Heizungsanlagen," EBZ Business School, Bochum, 2015.

[147] K. Jagnow und D. Wolff, „Ein Jahr Energieeinsparverordnung - Was haben wir gelernt," *Deutsches Architektenblatt,* 2003.

[148] K. Jagnow und D. Wolff, „EnEV-Arbeitsentwurf auf dem Holzweg," *TGA-Fachplaner,* Nr. 06, 2012.

[149] K. Jagnow und D. Wolff, „Nachgewiesene Verbräuche müssen die Messlatte werden," *Newsletter Gebäudeenergieberater,* Nr. 09, 2018.

[150] M. Robinius, P. Markewitz und weitere, „Wege für die Energiewende - Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050," IEK-3 am Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2019.

[151] N. Diefenbach, A. Enseling und weitere, „Kurzgutachten zu einem Sanierungsfahrplan im Wohngebäudebestand," Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, 2013.

[152] F. Seefeldt, „Die Implikationen der Energiewende: Dezentrale Versorgungskonzepte in Gebäuden," prognos, Berlin, 2012.

[153] A. Kuhlmann, T. Fischer und weitere, „Vorschlag für die Senkung der EEG-Umlage auf Null," dena, Berlin, 2020.

[154] S. Gäthke, „Wie finanzieren wir zukünftig die Energiewende?," Science Media Center, Berlin, 2020.

[155] Consentec, „Netzentgeltreform: Netzentgelte verbraucherfreundlich gestalten," Verbraucherzentrale Bundesverband, Berlin, 2020.

[156] N. Gerhardt, F. Sandau und weitere, „Wärmewende 2030: Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor," Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP für AGORA, Kassel, 2017.

[157] H. Hecking, O. Hennes und weitere, „Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor," ewi ER&S, ITG und FIW für dena, Köln, Dresden, München, 2017.

[158] Deutscher Bundestag, „Fragen zur Entwicklung der Netzentgelte im Stromsektor," Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag, Berlin, 2020.

[159] U. R. Fritsche und H. Greß, „Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THGEmissionen des deutschen Strommix im Jahr 2018 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050," IINAS für HEA, Darmstadt, 2019.

[160] A. Schünemann, G. Eikenloff und weitere, „CO2-Bewertung statt Primärenergiebezug!," *TGA-Fachplaner,* Nr. 12, 2014.

[161] R.-M. Lüking und F. Karg, „Zeit für die Rückgabe des Feuers," *Sonnenenergie,* Nr. September - November, 2020.

[162] ohne_Autor, „Maßnahmenkatalog - Ergebnis des Dialogprozesses zum Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung," Wuppertalinstitut, ifeu, Fraunhofer ISI, IREES, IFOK, Wuppertal und weitere, 2016.

[163] A. Schünemann, K. Jagnow und D. Wolff, „Vorschläge für das GEG 2019 - Es würde auch viel einfacher gehen!," *TGA Fachplaner,* Nr. 8, 2017.

[164] J. Weiß und T. Vogelpohl, „Politische Instrumente zur Erhöhung der energetischen Sanierungsquote bei Eigenheimen," IÖW für BMBF, Berlin, 2010.

[165] T. Drinkuth, „Notwendige Instrumente zur Erreichung der Energie- und Klimaziele 2030 im Gebäudebereich," dena für Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz (geea), Berlin, 2019.

[166] H. Hertle, M. Pehnt und weitere, „Wärmewende in Kommunen," ifeu für Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin, 2015.

[167] K. Neuhoff, H. Amecke und weitere, „Energetische Sanierung: Handlungsbedarf auf vielen Ebenen," *DIW Wochenbericht,* Nr. 34, 2011.

[168] AMEV, „Technisches Monitoring 2017," Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen, Berlin, 2017.

[169] M. Linder, „Wenn schon, dann richtig!," *Gebäudeenergieberater,* Nr. 10, 2018.

[170] AGORA, „Energiewende 2030: The Big Picture. Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende.," AGORA, Berlin, 2017.

[171] A. Kemmler, A. Kirchner und weitere, „Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050," Prognos AG, Fraunhofer ISI, GWS, iinas für BMWi, unbekannt, 2020.

[172] S. Gäthke, „Wie finanzieren wir künftig die Energiewende?," science media center germany, Köln, 2020.

[173] B. Mahler, S. Idler und weitere, „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus," Steinbeis-Transferzentrum für Energie-, Gebäude-und Solartechnik, Fraunhofer IBP für UBA, Stuttgart, 2019.

[174] M. Großklos, M.-C. Krapp und weitere, „Ansätze zur Reduktion der Nebenkosten im sozialen Wohnungsbau am Beispiel des Vorhabens „PassivhausSozialPlus" in Darmstadt," IWU für Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Darmstadt, 2018.

[175] K. Breil, V. Bürger und weitere, „Expertendossier: Effiziente Energiewende jetzt, statt Warten auf das grüne Gas," Deneff, Berlin, 2019.

[176] G. Eisenbeiß, „Klimaschutz durch Kohlenstoffbeschränkung," *ZAllgMed,* Nr. 83, 2007.

[177] W. Aichinger, M. Buck und weitere, „Der Doppelte Booster," AGORA Verkehrswende - AGORA Energiewende, Berlin, 2020.

[178] T. Vahlenkamp, I. Ritzenhofen und weitere, „COVID-19: Bremser oder Beschleuniger der Energiewende," *Energiewirtschaftliche Tagesfragen,* Nr. September, 2020.

[179] BMWI BMI, *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energiesparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze,* Berlin: Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 37, 2020.

[180] K. Oberzig, „DGS-News: Keine Enteignung von selbst erzeugtem Strom," 2020. [Online]. Available: https://www.dgs.de/index.php?id=2298&type=0. [Zugriff am 20 Mai 2020].

[181] BMU, „Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 % zurück," BMU, Berlin, 2020.

[182] P. van Rüth, K. Schönthaler und weitere, „Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel," UBA, Dessau, 2019.

[183] A. Jensen, „Rezension zu Wright: Reale Utopien," *taz,* Nr. 22. April, 2017.

[184] BMU, „BMU-Pressdienst," 2020. [Online]. Available: https://www.bmu.de/pressemitteilung/mit-nachhaltigem-wirtschaften-gestaerkt-aus-der-krise/. [Zugriff am 13 Mai 2020].

[185] K. Crome, „Was bedeutet eigentlich klimaneutral?," NRW Energieagentur, Düsseldorf, 2020.

[186] Bundesrat Drucksache, *Antrag des Landes Schleswig-Holstein - Entschließung des Bundesrates zur EEG-Reform: Ausbau der Erneuerbaren Energie voranbringen,* Berlin: Bundesrat, 2020.

[187] Photovoltaik, „Ländle beschließt Solarpflicht," 2020. [Online]. Available: https://www.photovoltaik.eu/gewerbe-kommune/laendle-beschliesst-solarpflicht. [Zugriff am 14 05 2020].

[188] A. Schünemann, K. Jagnow und D. Wolff, „Zurück zum gesunden Menschenverstand," *TGA Fachplaner,* Nr. 7, 2016.

[189] DBU, „DBU: Lösungen für den Klimaschutz," *DBU-Fachinfo Klimaschutz,* Nr. 6, 2019.

[190] Europäisches Parlament, *Richtlinie (EU) 2018/844 - Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden,* Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union, 2018.

[191] J. Meyer, „Qualitätssicherung in Planung, Ausführung und Betrieb, Projektarbeit," Ostfalia, Wolfenbüttel, 2020.

[192] A. Hoier und H. Erhorn, „Energetische Gebäudesanierung in Deutschland, Studie Teil I: Entwicklung und energetische Bewertung alternativer Sanierungsfahrpläne," Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2013.

[193] G. Eikenloff, K. Jagnow und weitere, „Verteilnetze bei der Modernisierung," Ostfalia für proKlima, Wolfenbüttel, 2012.

[194] D. Wolff, P. Teuber und weitere, „Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln," Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel für DBU, Wolfenbüttel, 2004.

[195] C. Sprengard, S. Treml und A. H. Holm, Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014.

[196] C. Asam, „Dämmmaßnahmen an Gebäudefassaden," BBSR, Bonn, 2017.

[197] B. von Manteuffel, A. Hermelink und B. Schulze Darup, „Preisentwicklung Gebäudeenergieeffizienz - Initialstudie," ecofys, schulze darup & partner für DENEFF, Berlin, 2014.

[198] K.-D. Clausnitzer, M. Fette und weitere, „Nachdämmung („Aufdoppelung") alter Wärmedämmverbundsysteme an Wohngebäuden," IFAM für BBSR, Bremen, 2016.

[199] H. Böhmer und J. Simon, „Mängel und Schäden bei Einzelmodernisierungsmaßnahmen," Institut für Bauforschung, Bauherrenschutzbund, Hannover, Berlin, 2015.

[200] V. Kienzlen, H. Erhorn und weitere, „Über den Sinn von Wärmedämmung," KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2015.

[201] A. H. Holm, C. Mayer und C. Sprengard, „Wirtschaftlichkeit von wärmedämmenden Maßnahmen," Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., München, 2015.

[202] O. Kah und W. Feist, „Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm-Maßnahmen im Gebäudebestand 2005," Passivhaus Institut, Darmstadt, 2005.

[203] B. Wenzel, E. Bruns und weitere, „Erneuerbare Energien zur individuellen Wärme- und Kälteerzeugung," iner für BMWi, Berlin, 2015.

[204] M. Miara, D. Günther und weitere, „Wärmepumpen Effizienz," Fraunhofer ISE für BMWi, Freiburg, 2011.

[205] L. Vorbeck und H. Weinreuter, „Bundesweite Verbraucherbefragung zum Thema Wärmepumpen," Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, Mainz, 2019.

[206] F. Auer und H. Schote, „Nicht jede Wärmepumpe trägt zum Klimaschutz bei," Lokale Agenda 21 Gruppe, Lahr, 2008.

[207] H. Born, S. Schimpf-Willenbrink und weitere, „Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes," International Geothermal Centre der Hochschule Bochum für ZSW, Bochum, 2017.

[208] D. Günther, J. Wapler und weitere, „WPsmart im Bestand," Fraunhofer ISE für BMWi, Freiburg, 2020.

[209] J. Simon, H. Böhmer und H. Helmbrecht, „Umfrage zur Fehlerhäufigkeit bei der Planung und Ausführung von Wärmepumpen," Institut für Bauforschung, Bauherrenschutzbund, Hannover, Berlin, 2017.

[210] D. Cali, Heesen, Florian und weitere, „Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen," RWTH für BMWi, Aachen, 2016.

[211] M. Tuschinski, „Lüftungsanlagen: Fluch oder Segen?," Institut für Energie-Effiziente Architektur mit Internet-Medien, Stuttgart, 2019.

[212] K. Bettgenhäuser und T. Boermans, „Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland," Ecofys für UBA, 2011.

[213] J. Nitsch, T. Pregger und weitere, „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global," Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Ingenieurbüro für neue Energien, Stuttgart, Kassel, Teltow, 2010.

[214] NHRS im DIN, *DIN V 4701-10; Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen,* Berlin: Beuth, 2003.

[215] M. Großklos, N. Diefenbach und weitere, „Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim," IWU für BMWi, Darmstadt, 2008.

[216] M. Köhrer, P. Hennig und D. Yanev, „Die Zusatzheizung – Nutzung ergänzender Heizsysteme im Gebäudebereich," co2online für BBSR, Berlin, 2018.

[217] M. Miehe, „Dämmstandards von Fernwärmeleitungen," *IKZ Haustechnik,* Nr. 8, 2014.

[218] D. Wolff und K. Jagnow, „Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung," Ostfalia für IWO, BDH, Wolfenbüttel, 2011.

[219] N. Diefenbach, T. Loga und R. Born, „Wärmeversorgung für Niedrigenergiehäuser," IWU, Darmstadt, 2005.

[220] M. Großklos, N. Diefenbach und M. Hörner, „Fernwärme für eine klimaneutrale Wärmeversorgung," IWU, Darmstadt, 2020.

[221] AGFW, „Hauptbericht 2018," AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt, 2019.

[222] M. Brillinger, J. Fritzsch und V. Hussl, „Warmwasserbereitung und -verteilung bei Niedrigenergiesanierungen im Wohnungsbau," ME-Consult für BBSR, Würzburg, 2009.

[223] K. Rühling, C. Schreiber und weitere, „EnEff: Wärme – Verbundvorhaben Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation," TU Dresden, Uni Bonn, IWW, Fraunhofer IEE für BMWi, Dresden, Bonn, Mülheim, Kassel, 2018.

[224] K. Jagnow, B. Oschatz und D. Wolff, „Vereinfachung des Berechnungsverfahrens von Rohrleitungslängen für eine Fortschreibung der DIN V 18599 Teil 5 und 8," Ostfalia und ITG für BBSR, Wolfenbüttel, Dresden, 2010.

[225] K. Jagnow und D. Wolff, „Wärme wo sie hingehört - Systemdenken bringt mehr Energieeffizienz beim Heizen," *Holzbau - die neue quadriga,* Nr. 06, 2010.

[226] Z. Bastian, W. Feist und weitere, „Warmwasserbereitung und -verteilung bei Niedrigenergiesanierungen im Wohnungsbau," Passivhausinstitut, Darmstadt, 2009.

[227] H. Hanke, „Schnell sein spart Energie," 2012. [Online]. Available: https://www.sbz-online.de/heizung/heizkoerper-und-flaechentemperierung-im-vergleich-schnell-sein-spart-energie. [Zugriff am 04 August 2020].

[228] J. Clausen und S. Hinterholzer, „Versorgung von Gebäuden mit Wärme aus erneuerbaren Energien," Borderstep, Berlin, 2017.

[229] O. Mercker und O. Arnold, „Ansätze zur Reduktion der konventionell erzeugten Wärmeverteilverluste in solar unterstützten Mehrfamilienhäusern," ISFH für BMWi, Emmerthal, 2017.

[230] D. Wolff, K. Jagnow und weitere, „Felduntersuchungen zur Begrenzung des natürlichen und erzwungenen Transmissions- und Lüftungswärmeverbrauchs durch Nutzerinformation sowie durch heiz- und regelungstechnische Maßnahmen," Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel für BBSR, Wolfenbüttel, 2003.

[231] Fachinformationszentrum Karlsruhe, „Kleine netzgekoppelte PV-Anlagen im Breitentest," BINE Informationsdienst, Karlsruhe, 1998.

[232] Fachinformationszentrum Karlsruhe, „Performance von Photovoltaik-Anlagen," BINE Informationsdienst, Karlsruhe, 2003.

[233] N. Fisch, „EnEff:Stadt IBA Hamburg," TU Braunschweig, IGS für BMWi, Braunschweig, 2016.

[234] K. Jagnow und K. Gebhardt, „Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale) als Nullenergiehaus in Holzbauweise," Hochschule Magdeburg Stendal für BMWi, Magdeburg, 2018.

[235] R. Vallentin, „PER-Bewertung und die neuen Passivhaus-Klassen," Vallentin, München, 2016.

[236] Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft, „Wirtschaftliche Instandhaltung," BBU, Berlin, 2006.

[237] D. Hufnagel, „Systeme gut abstimmen," *Gebäudeenergieberater,* Nr. Juli/August, 2010.

[238] O. Langniß, H. Böhnisch und weitere, „Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien (Marktanreizprogramm) im Zeitraum Januar 2004 bis Dezember 2005," BMU, Stuttgart, Straubing, 2006.

[239] F. Meyer, „Große Solaranlagen in der Gebäudesanierung," BINE Informationsdienst, Karlsruhe, 2006.

[240] K. Vanoli und P. Pärisch, „Funktionskontrolle solarthermischer Systeme durch Ertragsbewertung," *eBWK,* Nr. 06, 2008.

[241] K.-J. Albers (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Essen: Vulkan, 2018.

[242] Haustec, „ISE-Projekt ArKol: Solarthermie-Kollektoren für die Fassade," 2020. [Online]. Available: https://www.haustec.de/heizung/waermeerzeugung/solarthermie-kollektoren-fuer-die-fassade-ise-projekt-arkol. [Zugriff am 10 April 2020].

[243] D. Wolff und P. Teuber, „Felduntersuchungen zur Planung und Ausführung heiz- und lüftungstechnischer Anlagen am Kronsberg," Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel für DBU, Wolfenbüttel, 2001.

[244] NABau im DIN, *DIN V 4108-6; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden,* Berlin: Beuth, 2003.

[245] S. Rehberg, „Das BBU-Projekt: ALFA®-Allianz für Anlagenenergieeffizienz," BBU, Berlin, 2016.

[246] S. Fölsch, „Bedeutung und Potenziale des hydraulischen Abgleichs," GEWOBA, Bremen, 2008.

[247] D. Wolff und P. Teuber, „Effiziente Heizungspumpen und hydraulischer Abgleich," Ostfalia für BUND, Wolfenbüttel, 2010.

[248] F. Schweikhardt, „Hydraulischer Abgleich und Heizungspumpentausch," Evangelische Landeskirche Baden, Karlsruhe, 2014.

[249] B. Mailach, F. Emmrich und weitere, „Energetische Einsparpotentiale und wirtschaftliche Bewertung des hydraulischen Abgleiches für Anlagen der Gebäudeenergietechnik," ITG für Danfos, Dresden, 2019.

[250] V. Drusche, „Der hydraulische Abgleich von warmwasserführenden Heizungsanlagen," *Bauen+,* Nr. 3, 2017.

[251] F. Seefeldt, M. Wünsch und weitere, „Energieeinsparung und Energieeffizienz," prognos für BMWi, Berlin, 2007.

[252] V. Bürger, T. Hesse und weitere, „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050," Öko-Institut und Fraunhofer ISE für Umweltbundesamt, Freiburg, 2016.

[253] A. Enseling, R. Greiff und E. Hinz, „Erneuerung älterer Wohngebäude in Stufen," IWU für BBSR, Darmstadt, 2003.

[254] T. Lützkendorf und A. Enseling, „Wirtschaftlichkeit energieoptimierter Gebäude," FIZ Karlsruhe - Leibnitz-Institut für Informationsinfrastruktur, Karlsruhe, 2017.

[255] T. Loga, M. Großklos und J. Knissel, „Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten," Institut Wohnen und Umwelt für ISTA, Darmstadt, 2003.

[256] T. Osterhage, „Messdatengestützte Analyse und Interpretation sanierungsbedingter Effizienzsteigerungen im Wohnungsbau," Universität Dortmund, Promotionsschrift, Dortmund, 2018.

[257] J. Palmer, N. Terry und P. Pope, „How much energy could be saved by making small changes to everyday household behaviours?," Cambridge für Department of Energy an Climate Change, Cambridge, 2012.

[258] C.-S. Scherf, C. Fischer und weitere, „Das Zusammenspiel von Makro- und Mikro-Instrumenten zur Energieverbrauchsreduktion durch verbrauchsarmes Verhalten," Öko-Institut für UBA, Darmstadt, Freiburg, Berlin, 2020.

[259] Deutscher Wetterdienst, „Klimadaten Deutschland," 2020. [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klimadatendeutschland.html. [Zugriff am 01 Juli 2020].

[260] J. Lange, „Grundlegende Varianten einer CO2-Bepreisung im Vergleich," CO2 Abgabe e.V., Freiburg, Berlin, Stuttgart, 2019.

[261] S. Fiedler, F. Zerzawy und weitere, „Alternative Finanzierungsoptionen für erneuerbare Energien im Kontext des Klimaschutzes und ihrer zunehmenden Bedeutung über den Stromsektor hinaus," Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V. für UBA, Berlin, 2018.

[262] S. Bosch-Lewandowski, S. Marsch und weitere, „Investitionsprozesse bei Wohnungseigentümergemeinschaften mit besonderer Berücksichtigung energetischer und altersgerechter Sanierungen," Weeber+Partner, ECONSULT Lambrecht Jungmann Partnerschaft, Rechtsanwälte Dr. Greiner und Kollegen für BBSR, Stuttgart, Berlin, Rottenburg, Tübingen, 2014.

[263] K.-D. Clausnitzer und E. von Hebel, „Mini-Contracting. Weiterentwicklung von Contractingdienstleistungen für Einfamilienhäuser unter Einbindung Regenerativer Energien und mit Effizienzversprechen," Bremer Energie Institut für BBSR und VDZ, Bremen, 2011.

[264] W. Schmid, „Betriebskosten von Gebäuden werden unterschätzt," *de - das elektrohandwerk,* Nr. 6, 2016.

[265] D. Kalz, W. Kramer und weitere, „Effiziente Wärme- und Kälteversorgung für Gewerbe, Handel und Dienstleistung," *FVEE-Themen,* 2015.

[266] J. Weiß, R. Galvin und weitere, „Sondierungsstudie zur Quantifizierung von Rebound-Effekten bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden/Bundesliegenschaften," Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, RWTH Aachen, BTU Cottbus-Senftenberg für BBSR, Berlin, Aachen, Senftenberg, 2015.

[267] J. Repenning, H. Hermann und weitere, „Klimaschutzszenario 2050," Ökoinstitut, Fraunhofer ISI für BMWi, Berlin, Karlsruhe, 2015.

[268] T. Vahlenkamp, J. Hein und weitere, „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland," McKinsey für BDI, Düsseldorf, 2007.

[269] P. Gerbert, P. Herold und weitere, „Klimapfade für Deutschland," Boston Consulting Group und prognos für BDI, München, Berlin, Hamburg, Basel, 2018.

[270] F. Ausfelder, M. Fischediek und weitere, „»Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems," Nationale Akademie der Wissenschaften, acatech, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, München, Halle, Mainz, 2017.

[271] N. Diefenbach, M. Großklos und e. al, „Zukunftsfähige Neubauten als Baustein für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand 2050," IWU, Hochschule Darmstadt, Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung für BMWi, Darmstadt, Aachen, 2019.

[272] C. Kunz, „Studienvergleich: Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland," Agentur für Erneuerbare Energien, Berlin, 2013.

[273] M. Sandrock, H. Westholm und C. Kunz, „Metaanalyse: Energiewende im Wärmesektor," HIC und AEE für Agentur für Erneuerbare Energien, Hamburg, Berlin, 2015.

[274] A. Kirchner, S. Koziel und weitere, „Metaanalyse: Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr," prognos und AEE für Agentur für Erneuerbare Energien, Berlin, 2016.

[275] M. Haller, J. Reppening und weitere, „Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050," Ökoinstitut, Fraunhofer ISI, IREES für BMU, Berlin, Karlsruhe, 2016.

[276] ohne_Autor, „Expertise bündeln, Politik gestalten – Energiewende jetzt!," Leopoldina, acatech, Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften, BDI, dena, Berlin, 2019.

[277] M. Waltersbacher und A. Scharmanski, „Wohnungsmärkte im Wandel - Zentrale Ergebnisse der Wohnungsmarktprognose 2025," BBSR, Bonn, 2010.

[278] M. Beer, R. Corradini und weitere, „Energiezukunft 2050," FfE und ifo für EnBW, E.ON Energie, RWE Power, Vattenfall Europe, München, 2009.

[279] A. Pfnür und N. Müller, „Energetische Gebäudesanierung in Deutschland, Studie Teil II: Prognose der Kosten alternativer Sanierungsfahrpläne und Analyse der finanziellen Belastung für Eigentümer und Mieter bis 2050," Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2013.

[280] D. Staniaszek, F. Anagnostopoulos und weitere, „Die Sanierung des deutschen Gebäudebestandes - eine wirtschaftliche Bewertung aus Investorensicht," BPIE, TU Wien, Fraunhofer ISI, Brüssel, Wien, Karlsruhe, 2015.

[281] H.-M. Henning und P. Andreas, „Was kostet die Energiewende? - Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050," Fraunhofer ISE, Freiburg, 2015.

[282] O. Kah, O. Feist und weitere, „Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung," Passivhausinstitut, Darmstadt, 2008.

[283] S. Erdmann, A. Lückert und K. Probst, „Wirtschaftlichkeit baulicher Investitionen bei Erhöhung energetischer gesetzlicher Anforderungen - Metastudie," Fraunhofer IRB, Bauherrenschutzbund e.V., Stuttgart, Berlin, 2018.

[284] M. Offermann, B. von Manteuffel und A. Hermelink, „Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung „Cost-Optimal-Level" – Modellrechnungen," Ecofys für BMVBS, Köln, 2013.

[285] Bundesnetzagentur, „EEG-Registerdaten und -Fördersätze - PV-Anlagen (außer PV-Freiflächenanlagen)," 2020. [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/EEG_Registerdaten_node.html. [Zugriff am 27 April 2020].

[286] J. Blazejczak, D. Edler und W.-P. Schill, „Steigerung der Energieeffizienz: ein Muss für die Energiewende, ein Wachstumsimpuls für die Wirtschaft," *DIW Wochenbericht,* Nr. 4, 2014.

[287] BMEL, „Infoportal Zukunft.Land - Wohnfläche pro Person," 2018. [Online]. Available: https://www.landatlas.de/wohnen/wohnflaeche.html. [Zugriff am 13 Mai 2020].

[288] H. Erhorn und G. Hauser, „Rahmenbedingungen für effizienten Klimaschutz im Gebäudebereich - Teil II Energieversorgungsstrukturen im Gebäudesektor in Deutschland," Fraunhofer IBP, Stuttgart, 2008.

[289] J. Diekmann, W. Eichhammer und weitere, „Energie-Effizienz-Indikatoren: Statistische Grundlagen, theoretische Fundierung und Orientierungsbasis für die politische Praxis," DIW und Fraunhofer ISI für BMWi, Berlin, Karlsruhe, 1997.

[290] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), *VDI 3807-1,* Berlin: Beuth, 2013.

[291] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), *VDI 3808 (Entwurf),* Berlin: Beuth, 2020.

[292] C. Hoffmann und A. Geissler, „Dem Prebound Effekt auf der Spur – Differenzen zwischen dem Heizwärmeverbrauch und dem rechnerisch ermittelten Heizwärmebedarf bei Bestandsgebäuden (Wohnen)," *Bauphysik,* Nr. 39, 2017.

[293] J. Knissel, R. Alles und weitere, „Vereinfachte Ermittlung von Primärenergiekennwerten zur Bewertung der wärmetechnischen Beschaffenheit in ökologischen Mietspiegeln," Institut Wohnen und Umwelt für DBU, Darmstadt, 2006.

[294] R. Weeber, S. Bosch-Lewandowski und G. Sahner, „Marktentwicklung bei der Ausstellung von Energieausweisen im Gebäudebestand," Weeber + Partner, G.A.S. planen bauen forschen für BBSR, Berlin, Stuttgart, 2010.

[295] H. Erhorn-Kluttig, H. Erhorn und E. Gruber, „Evaluierung des dena Feldversuchs Energieausweis für Nichtwohngebäude," Fraunhofer IBP für dena, Stuttgart, 2005.

[296] D. Kalz, K. Klein und weitere, „Netzdienliche Gebäude und Quartiere," BINE Informationsdienst, Karlsruhe, 2018.

[297] M. Sterner, M. Thema und weitere, „Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland," OTH/FENES und Energy Brainpool, Regensburg, Berlin, 2015.

[298] R. Benndorf, M. Bernicke und weitere, „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050," Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2014.

[299] B. Praetorius, T. Lenck und weitere, „Neue Preismodelle für Energie," E-Bridge Consulting, TU Clausthal, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung für AGORA, Berlin, 2017.

[300] N. Diefenbach, „Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen," Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2002.

[301] P. Icha, G. Kuhs und weitere, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018," Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2019.

[302] W. Mauch, R. Corradini und weitere, „Allokationsmethoden für spezifische CO2-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen," *Energiewirtschaftliche Tagesfragen,* Nr. 9, 2010.

[303] P. Graichen, C. Hochfeld und weitere, „15 Eckpunkte für das Klimaschutzgesetz," AGORA, Berlin, 2019.

[304] Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, „Europäische und nationale Instrumente zur CO2 Reduktion," VSE, Aarau, 2018.

[305] Finanzen.net, „CO2 European Emission Allowances," 2020. [Online]. Available: https://www.finanzen.net/rohstoffe/co2-emissionsrechte/chart. [Zugriff am 15 Mai 2020].

[306] W.-P. Schill, „CO2-Preis, Grafik des DIW," 2020. [Online]. Available: https://pbs.twimg.com/media/EE62agYUYAAqZTx?format=png&name=medium. [Zugriff am 13 Mai 2020].

[307] U. Wagner, C. Heilek und weitere, „Rahmenbedingungen für effizienten Klimaschutz im Gebäudebereich - Teil III Versorgungsstrukturen und Effizienz verschiedener Technologien," IfE der TU München, München, 2008.

[308] J. Adolf, A. Lücke und weitere, „Shell BDH Hauswärme-Studie - Klimaschutz im Wohnungssektor – wie heizen wir morgen?," Shell Deutschland, BDH, ITG, HWI, Hamburg, Köln, 2013.

[309] BSW, „Marktdaten - Aktueller Bestand an Solarwärmesystemen und Solarkollektorfläche in Deutschland," 2020. [Online]. Available: https://www.solarwirtschaft.de/presse/marktdaten/. [Zugriff am 27 April 2020].

[310] T. Kelm, J. Metzger und weitere, „Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz," ZSW, Bosch und Partner für BMWi, Stuttgart, Hannover, 2018.

[311] B. Ebert, „LowEx-Bestand Analyse - Abschlussbericht zu AP 1.1 - Systematische Analyse von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden," KIT für BMWI, 2018.

[312] B. Schlomann, K. Wohlfahrt und weitere, „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013," Fraunhofer ISI, Technische Universität München, B. Geiger, GfK Retail and Technology, IREES für BMWi, Karlsruhe, München, Nürnberg, 2015.

[313] P. Deilmann, M. Behnisch und weitere, „Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO2-Minderungspotenzialen," Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Ingenieurbüro Petereit für BBSR, Dresden, Göldenitz, 2013.

[314] Statistisches Bundesamt, „Preisindizes für die Bauwirtschaft - November 2019 (4. Vierteljahresausgabe)," 2020. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Baupreise-Immobilienpreisindex/Publikationen/Downloads-Bau-und-Immobilienpreisindex/bauwirtschaft-preise-2170400193244.pdf?__blob=publicationFile. [Zugriff am 22 März 2020].

[315] M. Neitzel, D. Dangel und weitere, „Bericht der Baukostensenkungskommission im Rahmen des Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen," InWIS, EBZ Business School, iwb, Bochum, Braunschweig, 2015.

[316] D. Walberg, T. Gniechwitz und M. Halstenberg, „Kostentreiber für den Wohnungsbau, Untersuchung und Betrachtung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Gestehungskosten und auf die aktuelle Kostenentwicklung von Wohnraum in Deutschland," Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Kiel, 2015.

[317] K. Jagnow, I. Sell und D. Wolff, „Investitionskostenfunktionen TGA," Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Fachbereich Versorgungstechnik, Wolfenbüttel, 2007.

[318] K. Jagnow, A. Heimlich und D. Wolff, „Investitionskostenfunktionen TGA - Ergänzung I," Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Fachbereich Versorgungstechnik, Wolfenbüttel, 2009.

[319] E. Hinz, „Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten - Endbericht," Institut Wohnen und Umwelt für BMU, Darmstadt, 2015.

[320] H. Erhorn-Kluttig, E. Budde und weitere, „EU-Projekt MODER – Mobilisierung von innovativen Design Tools für die Sanierung von Gebäuden auf Quartiersebene," Fraunhofer IBP für BBSR, Stuttgart, 2018.

[321] Verein Deutscher Ingenieure e.V., „VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung," Beuth, Berlin, 2012.

[322] Verein Deutscher Ingenieure e.V., „VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung," Beuth, Berlin, 2000.

[323] Institut Wohnen und Umwelt, „Investitionskosten: Maßnahmen für den optimalen Wärmeschutz," IMPULS-Programm Hessen, Darmstadt, 1995.

[324] E. Hinz, „Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden," Institut für Wohnen und Umwelt für BMVBS, Darmstadt, 2012.

[325] P. Hansen, „Entwicklung eines energetischen Sanierungsmodells für den europäischen Wohngebäudesektor unter dem Aspekt der Erstellung von Szenarien für Energie- und CO2-Einsparpotenziale bis 2030," Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2009.

[326] ohne_Autor, „Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten," Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., Berlin, 2006.

[327] J. Knissel, R. Alles und weitere, „Mietrechtliche Möglichkeiten zur Umsetzung von Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand," Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2001.

[328] A. Enseling und E. Hinz, „Wirtschaftlichkeit energiesparender Maßnahmen im Bestand vor dem Hintergrund der novellierten EnEV," Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2008.

[329] FMH-Finanzberatung e.K., Max Herbst, „Grafik der Woche - Interessante Zinskurven und ihre Hintergründe," 2020. [Online]. Available: https://www.fmh.de/zinsentwicklung-grafik/grafik-der-woche. [Zugriff am 20 März 2020].

[330] S. Schlitzberger, A. Maas und weitere, „Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie zu Flexibilisierungsoptionen," IB Hauser, ITG, Fraunhofer IBP, schiller-engineering, ecofys, dena, Kassel, Dresden, Stuttgart, Hamburg, Köln, Berlin, 2018.

[331] H. Discher, E. Hinz und A. Enseling, „dena-Sanierungsstudie - Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand," dena, IWU, Berlin, Darmstadt, 2010.

[332] S. Bothor, S. Bubeck und weitere, „Evaluation ausgewählter Maßnahmen zur Energiewende," IER und IZT für BMWi, Stuttgart, Berlin, 2013.

[333] N. Diefenbach und H. Cischinksy, „Was ist eigentlich die energetische Sanierungsrate?," *Energiewirtschaftliche Tagesfragen,* Nr. 7, 2015.

[334] J. Adler, „Boom im Wohnungsneubau geht zu Ende – mehr Kapazitäten für Modernisierung und Sanierung," *BTGA Almanach,* 2018.

[335] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Energiewende zur Nachhaltigkeit, Berlin: Springer, 2003.

[336] Länderarbeitskreis Energiebilanzen, „Glossar zu den Energiebilanzen der Länder," Länderarbeitskreis Energiebilanzen, unbekannter_Ort, 2007.

[337] J. Schmidt und J. Mühlenhoff, „Erneuerbare Energien - Potenziatlas 2020," Agentur für erneuerbare Energien, Berlin, 2010.

[338] A. Dreifke-Pieper, M. Kopp und P. Simpson, „Vom Klimareporting zur Emissionsstrategie - Grundlagen für ein einheitliches Emissions- und Klimastrategieberichtswesen," Klimareporting für WWF und CDP, Berlin, 2014.

7.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern nach AGEB, eigene Darstellung nach [12] 10
Abbildung 2 Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch, schematische Zusammenfassung aus [24] [22] [23] 15
Abbildung 3 Emissionsbudget für den Gesamtwohnbau – Hauptszenario und beschleunigte Umsetzung [eigene Darstellung] 34
Abbildung 4 Kurzfristige Umstellung auf Grünen Strom, Grafik aus [79] in Anlehnung an [82] 41
Abbildung 5 Differenzbeträge der Szenarien im Vergleich zum Business-As-Usual-Szenario, zusammengefasste Werte nach [68] 42
Abbildung 6 Globale Jahresmittelwerte der bodennahen Lufttemperatur 1860 bis 2005, Kurvenverläufe aus [39] 44
Abbildung 7 Energiepreise auf Basis der reinen Emissionspreise [eigene Darstellung] 46
Abbildung 8 Heizwertbezogene Energiepreise – heute und modifizierte Werte [eigene Darstellung] 47
Abbildung 9 Einfluss von Sanierungsmaßnahmen auf den Energieverbrauch [eigene Darstellung] aus [27] 56
Abbildung 10 Beispielhaftes Ein- und Zweifamilienhaus [eigenes Bild] 60
Abbildung 11 Beispielhaftes Mehrfamilienhaus [eigenes Bild] 60
Abbildung 12 Primärenergieverbrauch sowie Endenergieverbrauch nach Sektoren, eigene Darstellung nach [12] 63
Abbildung 13 Endenergieverbrauch pro Kopf und Wohnfläche, eigene Darstellung nach [12] 63
Abbildung 14 Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern, eigene Darstellung nach [12] 64
Abbildung 15 Verbrauch Heizung und Trinkwarmwasser nach Gebäudeklassen, Werte nach [9] umgerechnet 64
Abbildung 16 Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch, schematische Zusammenfassung aus [24] [22] [23] 66
Abbildung 17 Schematische Erläuterung der Begriffe „Prebound“ und „Rebound“ [eigene Darstellung] 67
Abbildung 18 Positionierung von Zählern am Beispiel eines Wohngebäudes [eigene Darstellung] aus [78] 68
Abbildung 19 Beispielhafte Energieanalyse aus dem Verbrauch [eigene Darstellung] aus [78] 69
Abbildung 20 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren, eigene Darstellung nach [13] 70
Abbildung 21 Primärenergiefaktoren (gesamt) aus Daten von „GEMIS“ [eigene Darstellung] nach [75] [76] [111] 71
Abbildung 22 Emissionsfaktoren bzw. CO_2-Äquivalent aus Daten von „GEMIS“, eigene Darstellung nach [75] [76] [111] 72
Abbildung 23 Sanierungsraten für die Gebäudehülle von Altbauten bis 1978 im Zeitraum 2005 bis 2008, eigene Darstellung nach [118] 74
Abbildung 24 Ausgleich der Fehlkosten durch Investitionskostenzuschüsse [eigene Darstellung] 83
Abbildung 25 Ausgleich der Fehlkosten durch zusätzliche Emissionspreise [eigene Darstellung] 84
Abbildung 26 Altersstruktur der zentralen Erzeuger, eigene Darstellung nach [5] 88
Abbildung 27 Schematische Darstellung von Investitionszeitpunkten und Restwerten der vorhandenen Bauteile [eigene Darstellung] 102
Abbildung 28 Prognose – Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung] 121
Abbildung 29 Prognose Gesamtbestand – Endenergie nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung] 125
Abbildung 30 Prognose Gesamtbestand – Endenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 125
Abbildung 31 Prognose Gesamtbestand – Primärenergie nach Energieträgern [eigene Darstellung] 127
Abbildung 32 Prognose Gesamtbestand – Emissionen nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung] 128
Abbildung 33 Prognose Gesamtbestand – Emissionen mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 128
Abbildung 34 Prognose Gesamtbestand – Zusammensetzung der Transmissions- und Lüftungsverluste [eigene Darstellung] 129
Abbildung 35 Prognose Gesamtbestand – Verwendung der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung] 129
Abbildung 36 Prognose Gesamtbestand – Emissionsbudget [eigene Darstellung] 132
Abbildung 37 Prognose Sanierungsobjekte – Jährliche Investitionskosten: Anteil der energiebedingte Mehrkosten [eigene Darstellung] 133
Abbildung 38 Prognose Sanierungsobjekte – Gesamtkosten der energetischen Modernisierung [eigene Darstellung] 134
Abbildung 39 Variante 1 Gesamtbestand – Prognose der Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung] 137
Abbildung 40 Variante 1 Gesamtbestand – Emissionsbudget [eigene Darstellung] 139
Abbildung 41 Variante 2 Sanierungsobjekte – Gesamtkosten der energetischen Modernisierung [eigene Darstellung] 140
Abbildung 42 Ablaufschema für die Mikroperspektive [eigene Darstellung] 170
Abbildung 43 Beispielhaftes Ein- und Zweifamilienhaus [eigenes Bild] 171
Abbildung 44 Beispielhaftes Mehrfamilienhaus [eigenes Bild] 173
Abbildung 45 Mittlere Dämmstoffdicken (bei Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(mK)) in der KfW-Sanierung, Grafik mit Werten aus [15] 176
Abbildung 46 Schema – Außenwand mit Dämmung von außen [eigene Darstellung] 178
Abbildung 47 Schema – Außenwand mit Dämmung von innen [eigene Darstellung] 180
Abbildung 48 Schema – Außenwand mit Nachdämmung von außen [eigene Darstellung] 181
Abbildung 49 Zeitliche Einordnung der Verkaufsmengen verschiedener Fensterqualitäten, Grafik vereinfacht nach [9] 182
Abbildung 50 Preisentwicklung der Fenster (inkl. Mehrwertsteuer, preisbereinigt), Grafik aus [197] 182
Abbildung 51 Schema – Ersatz alter Fenster [eigene Darstellung] 184
Abbildung 52 Schema – Verbesserung guter Fenster [eigene Darstellung] 185
Abbildung 53 Schema – Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses [eigene Darstellung] 188
Abbildung 54 Schema – Dämmung des Daches [eigene Darstellung] 189
Abbildung 55 Schema – Dämmung der oberen Geschossdecke [eigene Darstellung] 191
Abbildung 56 Schema – Nachdämmung des Daches [eigene Darstellung] 191
Abbildung 57 Schema – Nachdämmung der oberen Geschossdecke [eigene Darstellung] 192
Abbildung 58 Schema – Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses [eigene Darstellung] 195
Abbildung 59 Schema – Dämmung der Bodenplatte [eigene Darstellung] 196
Abbildung 60 Schema – Dämmung der Kellerdecke [eigene Darstellung] 197
Abbildung 61 Schema – Nachdämmung der Kellerdecke [eigene Darstellung] 197

Abbildung 62 Bewertung der baulichen Maßnahmen nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung] 199
Abbildung 63 Bewertung der baulichen Maßnahmen nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung] 200
Abbildung 64 Bewertung der baulichen Maßnahmen nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung] 200
Abbildung 65 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-NT-Kessel [eigene Darstellung] 206
Abbildung 66 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-NT-Kessel [eigene Darstellung] 206
Abbildung 67 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 207
Abbildung 68 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Erdgas-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 208
Abbildung 69 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-NT-Kessel [eigene Darstellung] 209
Abbildung 70 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-NT-Kessel [eigene Darstellung] 210
Abbildung 71 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 210
Abbildung 72 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 211
Abbildung 73 Schema – Erdreich-Wärmepumpen als Ersatz für einen Fernwärmeanschluss [eigene Darstellung] 212
Abbildung 74 Schema – Außenluft-Wärmepumpen als Ersatz für einen Fernwärmeanschluss [eigene Darstellung] 212
Abbildung 75 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Erdreichwärmepumpe und Gasbrennwertkessel [eigene Darstellung] 218
Abbildung 76 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Erdreichwärmepumpe und Gasbrennwertkessel [eigene Darstellung] 219
Abbildung 77 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Außenluftwärmepumpe und Gasbrennwertkessel [eigene Darstellung] 221
Abbildung 78 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Außenluftwärmepumpe und Gasbrennwertkessel [eigene Darstellung] 221
Abbildung 79 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Erdreichwärmepumpe und Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 222
Abbildung 80 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Erdreichwärmepumpe und Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 223
Abbildung 81 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Außenluftwärmepumpe und Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 224
Abbildung 82 Schema – Aufbau eines Hybridsystems mit Außenluftwärmepumpe und Heizöl-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 225
Abbildung 83 Schema – Einbau eines Holzkessels in ein Durchschnittsgebäude mit Öl-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 227
Abbildung 84 Schema – Einbau eines Holzkessels in ein Durchschnittsgebäude mit Öl-NT-Kessel [eigene Darstellung] 228
Abbildung 85 Schema – Einbau eines Holzkessels in ein gutes Gebäude mit Öl-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 229
Abbildung 86 Schema – Einbau eines Holzkessels in ein gutes Gebäude mit Öl-NT-Kessel [eigene Darstellung] 229
Abbildung 87 Verteilungsnutzungsgrad von Nahwärmenetzen nach Wärmeleistungsliniendichte, Grafik aus [218] 233
Abbildung 88 Schema – Einbau einer Fernwärme in ein Durchschnittsgebäude mit Gas-NT-Kessel [eigene Darstellung] 234
Abbildung 89 Schema – Einbau einer Fernwärme in ein Durchschnittsgebäude mit Gas-Brennwertkessel [eigene Darstellung] 235
Abbildung 90 Vergleich der Wirkungsgradkette „Strom zu Heizwärme“ über Brennstoffpfad und Strompfad, Grafik aus [132] 241
Abbildung 91 Herkunft der Exergie und Anergie – heute und künftig, Grafik aus [132] 242
Abbildung 92 Vergleich KWK und Wärmepumpenlösung im MFH [eigene Darstellung] 243
Abbildung 93 Bewertung der Erzeuger nach Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung] 245
Abbildung 94 Bewertung der Erzeuger nach Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im guten Gebäude [eigene Darstellung] 246
Abbildung 95 Bewertung der Erzeuger im Durchschnittsgebäude nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung] 246
Abbildung 96 Bewertung der Erzeuger im guten Gebäude nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung] 247
Abbildung 97 Bewertung der Erzeuger im Durchschnittsgebäude nach Emissionsminderung u. äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung] 248
Abbildung 98 Bewertung der Erzeuger im neuen Gebäude nach Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung] 248
Abbildung 99 Bewertung der Hybrid-Öl-Systeme nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung] 249
Abbildung 100 Bewertung der Hybrid-Gas-Systeme nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung] 249
Abbildung 101 Bewertung der Hybrid-Öl-Systeme nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung] 250
Abbildung 102 Bewertung der Hybrid-Gas-Systeme nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung] 250
Abbildung 103 Bewertung der Hybrid-Öl-Systeme nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung] 251
Abbildung 104 Bewertung der Hybrid-Gas-Systeme nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung] 251
Abbildung 105 Unterschiedlich günstige Gebäudekubaturen für die Trinkwasserverteilung – links günstig, rechts ungünstig [eigene Bilder] 253
Abbildung 106 Prinzipielle Möglichkeiten der Trinkwarmwasserversorgung im MFH [eigene Darstellung] 255
Abbildung 107 Schema – Dezentralisierung im Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung] 257
Abbildung 108 Schema – Dezentralisierung im gedämmten Gebäude [eigene Darstellung] 257
Abbildung 109 Schema – Einbau einer Flächenheizung anstelle von Heizkörpern in Gebäude mit Wärmepumpen [eigene Darstellung] 262
Abbildung 110 Prinzipielle Möglichkeiten der Heizwasserversorgung [eigene Darstellung] 263
Abbildung 111 Schema – Einbau einer Photovoltaik in ein Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung] 268
Abbildung 112 Schema – Einbau einer Photovoltaik in ein Durchschnittsgebäude mit elektrischer Trinkwassererwärmung [eigene Darstellung] 269
Abbildung 113 Schema – Dezentralisierung mit Photovoltaik im Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung] 270
Abbildung 114 Schema – Kombinationen von Heizöl-NT-Kessel, Außenluftwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung] 271
Abbildung 115 Schema – Kombinationen von Heizöl-Brennwertkessel, Erdreichwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung] 272
Abbildung 116 Schema – Kombinationen von Erdgas-NT-Kessel, Erdreichwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung] 273
Abbildung 117 Schema – Kombinationen von Erdgas-Brennwertkessel, Außenluftwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung] 274
Abbildung 118 Schema – Kombinationen von Fernwärme, Erdreichwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung] 275
Abbildung 119 Schema – Kombinationen von Fernwärme, Außenluftwärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung] 276
Abbildung 120 Schema – Einbau einer Solarthermie in ein Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung] 279
Abbildung 121 Schema – Einbau einer Solarthermie in ein Durchschnittsgebäude mit Erdreichwärmepumpe [eigene Darstellung] 280
Abbildung 122 Schema – Einbau einer Solarthermie in ein Durchschnittsgebäude mit Außenluftwärmepumpe [eigene Darstellung] 281
Abbildung 123 Schema – Einbau einer Solarthermie in ein Durchschnittsgebäude mit Holzkessel [eigene Darstellung] 281
Abbildung 124 Schema – Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG in ein Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung] 283
Abbildung 125 Schema – Einbau von Erdreichwärmepumpe und Lüftungsanlage mit WRG in ein mittleres Gebäude [eigene Darstellung] 284

Abbildung 126 Schema – Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG, Nachdämmen oder deren Kombination [eigene Darstellung] 285
Abbildung 127 Bewertung der Zusatzerzeuger nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung] 287
Abbildung 128 Bewertung der Zusatzerzeuger nach notwendiger Förderung oder notwendigen Emissionspreisen [eigene Darstellung] 287
Abbildung 129 Bewertung der Zusatzerzeuger nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung] 288
Abbildung 130 Bewertung Wärmepumpe & PV nach Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im Ø-Gebäude [eigene Darstellung] 289
Abbildung 131 Bewertung Wärmepumpe & PV nach Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im guten Gebäude [eigene Darstellung] 290
Abbildung 132 Bewertung Wärmepumpe & PV im Durchschnittsgebäude nach notw. Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung] 290
Abbildung 133 Bewertung Wärmepumpe & PV im guten Gebäude nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung] 291
Abbildung 134 Bewertung Wärmepumpe & PV im Ø-Gebäude nach Emissionsminderung u. äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung] 291
Abbildung 135 Bewertung Wärmepumpe & PV im guten Gebäude nach Emissionsminderung u. äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung] 292
Abbildung 136 Bewertung der Dezentralisierung nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung] 293
Abbildung 137 Bewertung der Dezentralisierung nach notwendiger Förderung oder notwendigen Emissionspreisen [eigene Darstellung] 293
Abbildung 138 Bewertung der Dezentralisierung nach erzielter Emissionsminderung und äquivalentem CO_2-Preis [eigene Darstellung] 294
Abbildung 139 Differenzenergiemenge für anlagentechnische Qualitätssicherung [eigene Darstellung] 299
Abbildung 140 Schematische Darstellung von Investitionszeitpunkten und Restwerten der vorhandenen Bauteile [eigene Darstellung] 307
Abbildung 141 Schema – Komplettsanierung des EZFH oder MFH [eigene Darstellung] 308
Abbildung 142 Schema – Reihenfolge Anlage → Baukörper oder Maßnahmenpaket für das EZFH [eigene Darstellung] 309
Abbildung 143 Schema – Reihenfolge Anlage → Baukörper oder Maßnahmenpaket für das MFH [eigene Darstellung] 310
Abbildung 144 Schema – Reihenfolge Baukörper → Anlagentechnik oder Maßnahmenpaket für das EZFH [eigene Darstellung] 312
Abbildung 145 Schema – Reihenfolge Baukörper → Anlagentechnik oder Maßnahmenpaket für das MFH [eigene Darstellung] 313
Abbildung 146 Schema – Reihenfolgen oder Maßnahmenpakete für das EZFH [eigene Darstellung] 314
Abbildung 147 Schema – Reihenfolgen oder Maßnahmenpakete für das MFH [eigene Darstellung] 315
Abbildung 148 Bewertung der Pakte und Reihenfolgen nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis [eigene Darstellung] 317
Abbildung 149 Bewertung der Pakte und Reihenfolgen nach notwendiger Förderung oder Emissionspreisen [eigene Darstellung] 318
Abbildung 150 Bewertung der Erzeuger nach erzielter Emissionsminderung und Gesamtkostenergebnis im guten Gebäude [eigene Darstellung] 319
Abbildung 151 Schematische Darstellung der angenommenen Sanierungszyklen auf Basis der Nutzungsdauer [eigene Darstellung] 320
Abbildung 152 Fahrplan für die Entscheidungsfindung im Einzelfall – auf Basis von Messwerten [eigene Darstellung] 321
Abbildung 153 Beispielhafte Energieanalyse als Basis der Entscheidungsfindung sowie für das Monitoring, Grafik aus [95] 323
Abbildung 154 Anteile der Bevölkerungsgruppen am Milieu und Verbrauch, eigene Darstellung der Werte nach [127] 329
Abbildung 155 Emissionen aller Haushalte nach Energieträger heute [eigene Darstellung] 338
Abbildung 156 Energiekosten aller Haushalte nach Energieträger heute und in modifizierter Bepreisung [eigene Darstellung] 338
Abbildung 157 Heizwertbezogene Energiepreise – heute und modifizierte Werte [eigene Darstellung] 339
Abbildung 158 Energiepreise auf Basis der reinen Emissionspreise [eigene Darstellung] 339
Abbildung 159 Prognose – Wohnflächenentwicklung in Ein- und Zweifamilienhäusern [eigene Darstellung] 373
Abbildung 160 Prognose – Wohnflächenentwicklung in Mehrfamilienhäusern [eigene Darstellung] 373
Abbildung 161 Prognose – Sanierungszustand der Außenwände [eigene Darstellung] 375
Abbildung 162 Prognose – Sanierungszustand der obersten Geschossdecken [eigene Darstellung] 376
Abbildung 163 Prognose – Sanierungszustand der Dächer [eigene Darstellung] 377
Abbildung 164 Prognose – Sanierungszustand der Kellerdecken [eigene Darstellung] 378
Abbildung 165 Prognose – Sanierungszustand der Bodenplatten [eigene Darstellung] 379
Abbildung 166 Prognose – Sanierungszustand der Fenster [eigene Darstellung] 380
Abbildung 167 Prognose – Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung] 382
Abbildung 168 Prognose – Technologieausbreitung der Trinkwarmwassersysteme [eigene Darstellung] 386
Abbildung 169 Prognose – Technologieausbreitung der Wärmeübergabesysteme [eigene Darstellung] 386
Abbildung 170 Prognose – Technologieausbreitung der Lage von Verteilnetzen [eigene Darstellung] 387
Abbildung 171 Prognose – Technologieausbreitung der Photovoltaik [eigene Darstellung] 389
Abbildung 172 Prognose – Technologieausbreitung der Solarthermie [eigene Darstellung] 390
Abbildung 173 Prognose – Technologieausbreitung der Lüftung mit Wärmerückgewinnung [eigene Darstellung] 391
Abbildung 174 Prognose Gesamtbestand – Endenergie nach Anwendung [eigene Darstellung] 396
Abbildung 175 Prognose Gesamtbestand – Endenergie nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung] 396
Abbildung 176 Prognose Gesamtbestand – Endenergie nach Energieträgern [eigene Darstellung] 397
Abbildung 177 Prognose Gesamtbestand – GebäuDENAh erzeugte Endenergie [eigene Darstellung] 398
Abbildung 178 Prognose Gesamtbestand – Endenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 398
Abbildung 179 Prognose Gesamtbestand – Energiekosten nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung] 399
Abbildung 180 Prognose Gesamtbestand – Energiekosten nach Energieträgern [eigene Darstellung] 399
Abbildung 181 Prognose Gesamtbestand – Energiekosten mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 400
Abbildung 182 Prognose Gesamtbestand – Primärenergie nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung] 401
Abbildung 183 Prognose Gesamtbestand – Primärenergie nach Energieträgern [eigene Darstellung] 402
Abbildung 184 Prognose Gesamtbestand – Primärenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 402
Abbildung 185 Prognose Gesamtbestand – Emissionen nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung] 403
Abbildung 186 Prognose Gesamtbestand – Emissionen nach Energieträgern [eigene Darstellung] 404
Abbildung 187 Prognose Gesamtbestand – Emissionen mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 404
Abbildung 188 Prognose Gesamtbestand – Zusammensetzung der Transmissions- und Lüftungsverluste [eigene Darstellung] 405
Abbildung 189 Prognose Gesamtbestand – Zusammensetzung der inneren und solaren Gewinne [eigene Darstellung] 406

Abbildung 190 Prognose Gesamtbestand – Nutzwärmebedarf für Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung] 406
Abbildung 191 Prognose Gesamtbestand – Herkunft der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung] 407
Abbildung 192 Prognose Gesamtbestand – Verwendung der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung] 407
Abbildung 193 Prognose Gesamtbestand – Qualitätssicherung und Transmissionswärmeverlust [eigene Darstellung] 408
Abbildung 194 Prognose Gesamtbestand – Qualitätssicherung und Baustandard [eigene Darstellung] 409
Abbildung 195 Prognose Gesamtbestand – Qualitätssicherung und Endenergie [eigene Darstellung] 409
Abbildung 196 Prognose Gesamtbestand – Qualitätssicherung und Emissionen [eigene Darstellung] 410
Abbildung 197 Prognose Gesamtbestand – Emissionsbudget [eigene Darstellung] 411
Abbildung 198 Emissionen im Klimaschutzszenario im Vergleich zum Business-as-usual-Szenario [42] 414
Abbildung 199 Variante 1 Gesamtbestand – Prognose der Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung] 416
Abbildung 200 Variante 1 Gesamtbestand – Prognose der Technologieausbreitung der Photovoltaik [eigene Darstellung] 417
Abbildung 201 Variante 1 Gesamtbestand – Zusammensetzung der Transmissions- und Lüftungsverluste [eigene Darstellung] 418
Abbildung 202 Variante 1 Gesamtbestand – Herkunft der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung] 418
Abbildung 203 Variante 1 Gesamtbestand – Verwendung der Erzeugerwärmeabgabe [eigene Darstellung] 419
Abbildung 204 Variante 1 Gesamtbestand – Endenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 419
Abbildung 205 Variante 1 Gesamtbestand – Energiekosten mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 420
Abbildung 206 Variante 1 Gesamtbestand – Emissionen mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 420
Abbildung 207 Variante 1 Gesamtbestand – Emissionsbudget [eigene Darstellung] 421
Abbildung 208 Prognose Sanierungsobjekte – Jährliche Investitionskosten: Vollkosten [eigene Darstellung] 423
Abbildung 209 Prognose Sanierungsobjekte – Jährliche Investitionskosten: Anteil der energiebedingte Mehrkosten [eigene Darstellung] 423
Abbildung 210 Prognose Sanierungsobjekte – Endenergie nach Erzeugern sowie Haushaltsstrom [eigene Darstellung] 424
Abbildung 211 Prognose Sanierungsobjekte – Endenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 424
Abbildung 212 Prognose Sanierungsobjekte – Emissionen mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 425
Abbildung 213 Prognose Sanierungsobjekte – Primärenergie mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 425
Abbildung 214 Prognose Sanierungsobjekte – Energiekosten mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 426
Abbildung 215 Prognose Sanierungsobjekte – Energiekosten nach Energieträgern [eigene Darstellung] 427
Abbildung 216 Prognose Sanierungsobjekte – Mehrkosten für Kapital sowie für Wartung/Unterhalt [eigene Darstellung] 427
Abbildung 217 Prognose Sanierungsobjekte – Gesamtkosten der energetischen Modernisierung [eigene Darstellung] 428
Abbildung 218 Prognose Sanierungsobjekte – Qualitätssicherung und Baustandard [eigene Darstellung] 429
Abbildung 219 Variante 2 Sanierungsobjekte – Energiekosten nach Energieträgern [eigene Darstellung] 432
Abbildung 220 Variante 2 Sanierungsobjekte – Energiekosten mit Berücksichtigung der Eigenerzeugung [eigene Darstellung] 433
Abbildung 221 Variante 2 Sanierungsobjekte – Gesamtkosten der energetischen Modernisierung [eigene Darstellung] 433
Abbildung 222 Zuwachs an Wohngebäuden im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1] 435
Abbildung 223 Zuwachs an Wohneinheiten im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1] 436
Abbildung 224 Wohnflächenzuwachs im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1] 436
Abbildung 225 Durchschnittliche Wohnfläche je Wohneinheit im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1] 437
Abbildung 226 Durchschnittliche Wohnfläche je Gebäude im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1] 437
Abbildung 227 Bevölkerungsentwicklung im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1] 438
Abbildung 228 Pro-Kopf-Wohnfläche im zeitlichen Verlauf, eigene Darstellung nach [1] 438
Abbildung 229 Pro-Kopf-Wohnfläche, Grafik aus [287] und Wohnungsgröße, Grafik aus [104] 439
Abbildung 230 Selbstnutzer- und Vermieterstruktur nach Wohneinheiten 2018, eigene Darstellung nach [101] 440
Abbildung 231 Selbstnutzer- und Vermieterstruktur – Auflösung nach Baujahren 2018, eigene Darstellung nach [101] 440
Abbildung 232 Selbstnutzer- und Vermieterstruktur – Auflösung nach Wohnflächengröße 2018, eigene Darstellung nach [101] 441
Abbildung 233 Umrechnung für Flächen im Wohnbau, eigene Darstellung nach [78] 442
Abbildung 234 Unterschied zwischen EnEV-Nutzfläche (Ordinate) und beheizter Wohnfläche (Abszisse), Grafik aus [102] 443
Abbildung 235 Individualisierungs- und Standardisierungsgrad bei Bedarfs- und Verbrauchsanalysen [eigene Darstellung] 445
Abbildung 236 Endenergiebedarf und -verbrauch Wärme für eine Stichprobe von ca. 60 Wohnbauten, eigene Darstellung nach [23] 446
Abbildung 237 Schematische Erläuterung der Begriffe „Prebound“ und „Rebound“ [eigene Darstellung] 447
Abbildung 238 Wohnflächenbezogener Verbrauch sowie Verhältnis von Verbrauch zu Bedarf, Grafik aus [22] 449
Abbildung 239 Kalibrierungsfaktoren für die Umrechnung von Bedarf in Verbrauch, Grafik aus [22] 450
Abbildung 240 Alternativvorschlag für die Darstellung von Energiebedarfs- und Verbrauchskennwerten, Grafik aus [22] 453
Abbildung 241 Alternativvorschlag für die einen reine Verbrauchsdarstellung [eigene Darstellung] aus [78] 454
Abbildung 242 Endenergiebedarf und -verbrauch Wärme für ca. 30 Nichtwohnbauten, eigene Darstellung nach [295] 455
Abbildung 243 Endenergiebedarf und -verbrauch Strom für ca. 30 Nichtwohnbauten, eigene Darstellung nach [295] 455
Abbildung 244 Positionierung von Zählern am Beispiel eines Wohngebäudes [eigene Darstellung] aus [78] 457
Abbildung 245 Schematische Darstellung von Gradtagszahlen und Heizgradtagen [eigene Darstellung] aus [78] 458
Abbildung 246 Typische Heizgrenztemperaturen [eigene Darstellung] aus [78] 459
Abbildung 247 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Wärmemengenzählerwerten [eigene Darstellung] aus [78] 461
Abbildung 248 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Gaszählerwerten [eigene Darstellung] aus [78] 462
Abbildung 249 Energieanalyse eines Kessels auf Basis von Wärmemengen- und Gaszählerwerten [eigene Darstellung] aus [78] 463
Abbildung 250 Übergang EAV zur Bedarfsberechnung des Gebäudes [eigene Darstellung] aus [78] 464
Abbildung 251 Übergang EAV zur Bedarfsberechnung des Erzeugers [eigene Darstellung] aus [78] 465
Abbildung 252 Beispielhafte Erzeugeranalysen – Einfluss von Überströmventilen auf Brennwertkessel, Grafik aus [194] 465
Abbildung 253 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Sommerheizung, Grafik aus [26] 466

Abbildung 254 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Zwangswärmekonsum, Grafik aus [194] 466
Abbildung 255 Beispielhafte Systemanalysen – Nahwärme, Grafik aus [26] 467
Abbildung 256 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Nachverfolgung Modernisierung, Grafik aus [26] 467
Abbildung 257 Beispielhafte Jahresdauerlinie für ein Mehrfamilienhaus [eigene Darstellung] aus [78] 468
Abbildung 258 Primärenergieverbrauch sowie Endenergieverbrauch nach Sektoren, eigene Darstellung nach AGEB [12] 470
Abbildung 259 Endenergieverbrauch pro Kopf und Wohnfläche, eigene Darstellung nach AGEB [12] 471
Abbildung 260 Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern, eigene Darstellung nach AGEB [12] 471
Abbildung 261 Endenergie nach Sektoren und Energieträgern, eigene Darstellung nach AGEB [18] 472
Abbildung 262 Stromzusammensetzung nach Energieträgern, eigene Darstellung nach AGEB [12] 472
Abbildung 263 Fernwärmezusammensetzung nach Energieträgern, eigene Darstellung nach AGEB [12] 473
Abbildung 264 Endenergie nach Sektoren und Anwendungen, eigene Darstellung nach [18] 473
Abbildung 265 Verbrauch Heizung und Trinkwarmwasser nach Gebäudeklassen, Werte nach DENA [9] umgerechnet 474
Abbildung 266 Energieträger für Heizung und Trinkwarmwasser in privaten Haushalten, eigene Darstellung nach [18] 476
Abbildung 267 Hauptenergieträger für die Beheizung von Wohneinheiten, eigene Darstellung nach [101] 477
Abbildung 268 Verbreitung von Hybridsystemen bei der Beheizung, eigene Darstellung nach [101] 477
Abbildung 269 Hauptenergieträger für die Trinkwassererwärmung in den Wohneinheiten, eigene Darstellung nach [101] 478
Abbildung 270 Verbreitung von Hybridsystemen bei der Trinkwassererwärmung, eigene Darstellung nach [101] 478
Abbildung 271 Trinkwasserwärmeverbrauch in Gebäuden mit und ohne Zirkulation, Grafik aus [23] 479
Abbildung 272 Stromverbrauch der privaten Haushalte, eigene Darstellung nach [18] 481
Abbildung 273 Endverbraucherpreise, eigene Darstellung nach [18] [19] 484
Abbildung 274 Primärenergiefaktoren (gesamt) aus Daten von „GEMIS“ [eigene Darstellung] nach [75] [76] [111] 487
Abbildung 275 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren, eigene Darstellung nach UBA [13] 491
Abbildung 276 Emissionsfaktoren bzw. CO_2-Äquivalent aus Daten von „GEMIS“, eigene Darstellung nach [75] [76] [111] 492
Abbildung 277 Beispielhafte Allokationen verschiedener KWK-Systeme, Grafik aus [116] 492
Abbildung 278 Prinzip des äquivalenten Energiepreises [eigene Darstellung] 494
Abbildung 279 Preis der europäischen CO_2-Zertifikate, Verlauf nach [305] geglättet 496
Abbildung 280 Vergleich verschiedener CO_2-Preise, Grafik aus [306] 496
Abbildung 281 Gesamtbestand der Wärmeerzeuger, eigene Darstellung nach [2] [4] 497
Abbildung 282 Absatzzahlen der zentralen Wärmeerzeuger, eigene Darstellung nach BDH [2] 498
Abbildung 283 Altersstruktur der zentralen Erzeuger, eigene Darstellung nach BDEW [5] 498
Abbildung 284 Nutzerzufriedenheit mit der vorhandenen Heizungsanlage, Grafik aus [5] 500
Abbildung 285 Beheizungsstruktur im Neubau nach Wohneinheiten, eigene Darstellung nach BDEW [54] 500
Abbildung 286 Beheizungsstruktur im Gesamtbestand nach Wohneinheiten, eigene Darstellung nach BDEW [54] 501
Abbildung 287 Regionale Verteilung der Versorgungssysteme, Grafik aus [5] 502
Abbildung 288 Versorgungssysteme im Nichtwohnbau, eigene Darstellung nach [119] 505
Abbildung 289 Solarthermieflächen – Zubau und Gesamtbestand, eigene Darstellung nach [309] [4] 506
Abbildung 290 Photovoltaikleistung – Zubau und Gesamtbestand ohne Freiflächenanlagen, eigene Darstellung nach [285] [310] 507
Abbildung 291 Gebäudetypologie mit Basistypen und Sonderfällen nach „Tabula“ 2015, Grafik aus [102] 510
Abbildung 292 Mengengerüst für die Basistypen nach „Tabula“ 2015, Grafik aus [102] 511
Abbildung 293 Flächenanteile und Sanierungszustand der Wohngebäude, Werte nach [34] 516
Abbildung 294 Flächenanteile und Sanierungsgrad der Nichtwohnbauten, Werte nach [34] 518
Abbildung 295 Verwendung von Indices zur Bestimmung heutiger und künftiger Preise [eigene Darstellung] 519
Abbildung 296 Verbraucherpreisindex, Baupreisindex, Preisindex für Fertighäuser seit 1991, eigene Darstellung nach [314] 520
Abbildung 297 Baukostenindex seit 2005, eigene Darstellung nach [314] 521
Abbildung 298 Baupreisindex verschiedener Kostengruppen sowie Verbraucherpreisindex seit 2005, eigene Darstellung nach [314] 521
Abbildung 299 Baupreisindex mit und ohne Qualitäts- und Anforderungsveränderungen, Kurvenverlauf nach ARGE [316] 522
Abbildung 300 Index der Planungs- und Beratungskosten im Vergleich zum Verbraucherpreisindex, Kurvenverläufe nach ARGE [316] 523
Abbildung 301 Kosten der nachträglichen Außenwanddämmung im Bestand [eigene Darstellung] 525
Abbildung 302 Kosten der Fenstersanierung im Bestand [eigene Darstellung] 525
Abbildung 303 Kosten der nachträglichen Steildachdämmung im Bestand [eigene Darstellung] 526
Abbildung 304 Kosten der nachträglichen Flachdachdämmung im Bestand [eigene Darstellung] 526
Abbildung 305 Kosten der nachträglichen Geschossdeckendämmung im Bestand [eigene Darstellung] 527
Abbildung 306 Kosten der nachträglichen Kellerdeckendämmung im Bestand [eigene Darstellung] 527
Abbildung 307 Kosten für Gas- und Ölkessel in der Sanierung [eigene Darstellung] 528
Abbildung 308 Kosten für Holzkessel in der Sanierung [eigene Darstellung] 528
Abbildung 309 Kosten für Erdreichwärmepumpen in der Sanierung [eigene Darstellung] 529
Abbildung 310 Kosten für Außenluftwärmepumpen in der Sanierung [eigene Darstellung] 530
Abbildung 311 Kosten für gebäudeintegrierte BHKWs in der Sanierung [eigene Darstellung] 530
Abbildung 312 Kosten für Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung in der Sanierung [eigene Darstellung] 531
Abbildung 313 Kosten für Abluftanlagen in der Sanierung [eigene Darstellung] 531
Abbildung 314 Kosten für gebäudenahe/integrierte Solarthermie in der Sanierung [eigene Darstellung] 532
Abbildung 315 Kosten für gebäudenahe/integrierte Photovoltaik in der Sanierung [eigene Darstellung] 532
Abbildung 316 Kosten für Wärmenetzanschlüsse in der Sanierung [eigene Darstellung] 533
Abbildung 317 Kosten für Heizungsoptimierung und Verbrauchsmonitoring [eigene Darstellung] 534

Abbildung 318 Exemplarische Abgrenzung der Kostenanteile für eine Außenwand im Zeitverlauf [eigene Darstellung] 537
Abbildung 319 Exemplarische Abgrenzung der Kostenanteile für einen Wärmeerzeuger im Zeitverlauf [eigene Darstellung] 538
Abbildung 320 Instandhaltungsindex sowie Verbraucherpreisindex seit 1991, eigene Darstellung nach [314] 540
Abbildung 321 Bandbreiten für gesamtdeutsche Instandhaltungskosten, Grafik nach [128] 541
Abbildung 322 Wohnflächenbezogene Investitionskosten im MFH, eigene Darstellung nach [123] 549
Abbildung 323 Realverzinsung (Tagesgeld minus Inflationsrate) der letzten 20 Jahre, Kurvenverlauf nach [329] 558
Abbildung 324 Bauzinsen und Inflation der letzten 20 Jahre, Kurvenverlauf nach [329] 559
Abbildung 325 Sanierungszustand der Gebäudehülle von Altbauten bis 1978 im Jahr 2013, eigene Darstellung nach [9] 569
Abbildung 326 Sanierungsraten für die Gebäudehülle von Altbauten bis 1978 im Zeitraum 2005 bis 2008, eigene Darstellung nach [118] 569
Abbildung 327 Sanierungsraten für die Gebäudehülle von Altbauten bis 1978 im Zeitraum 2005 bis 2008, eigene Darstellung nach [120] [6] 570
Abbildung 328 Bauvolumen im Bestand und Anteil der energetischen Sanierung, eigene Darstellung nach [334] 571
Abbildung 329 Anteile von unterschiedlichen Sanierungstiefen zweier Szenarien, eigene Darstellung nach [119] 573
Abbildung 330 Beispielhafte Auswertung für die Dächer von Einfamilienhäusern der Baualtersklasse 1919-1948, Grafik vereinfacht nach [119] 574
Abbildung 331 Verknüpfung der Einfluss- und Bewertungsgrößen im Überblick [eigene Darstellung] 577
Abbildung 332 Berechnungsablauf Heizwärme [eigene Darstellung] 578
Abbildung 333 Berechnungsablauf Endenergie Heizung [eigene Darstellung] 579
Abbildung 334 Berechnungsablauf Endenergie Trinkwarmwasser [eigene Darstellung] 579
Abbildung 335 Berechnungsablauf gesamte Endenergie [eigene Darstellung] 579
Abbildung 336 Berechnungsablauf Primärenergie Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung] 580
Abbildung 337 Berechnungsablauf Primärenergie Strom [eigene Darstellung] 580
Abbildung 338 Berechnungsablauf gesamte Primärenergie [eigene Darstellung] 580
Abbildung 339 Berechnungsablauf Emissionen Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung] 580
Abbildung 340 Berechnungsablauf Emissionen Strom [eigene Darstellung] 581
Abbildung 341 Berechnungsablauf gesamte Emissionen [eigene Darstellung] 581
Abbildung 342 Berechnungsablauf Energiekosten Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung] 581
Abbildung 343 Berechnungsablauf Energiekosten Strom [eigene Darstellung] 582
Abbildung 344 Berechnungsablauf gesamte Energiekosten [eigene Darstellung] 582
Abbildung 345 Gesamtkostenauswertung sowie Mehrkostenauswertung [eigene Darstellung] 583
Abbildung 346 Ausgleich der Fehlkosten durch Investitionskostenzuschüsse [eigene Darstellung] 583
Abbildung 347 Ausgleich der Fehlkosten durch zusätzliche Emissionspreise [eigene Darstellung] 584
Abbildung 348 Schematische Darstellung des Näherungsmodells für PV-Heizstromnutzung [eigene Darstellung] 595

7.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Kurzbeschreibung des Typ-EZFH und des Typ-MFH sowie Endenergiebedarf [eigene Darstellung] [eigene Bilder] 9
Tabelle 2 Mögliche Durchsetzbarkeit erhöhter Sanierungsraten und -tiefen [eigene Darstellung] 13
Tabelle 3 Vergleich der heutigen und modifizierten Energieträgerbepreisung [eigene Darstellung] 13
Tabelle 4 Maßnahmen an der Gebäudehülle im Überblick [eigene Darstellung] 21
Tabelle 5 Maßnahmen an den Haupterzeugern im Überblick [eigene Darstellung] 22
Tabelle 6 Maßnahmen an Zusatzerzeugern und Peripherie im Überblick [eigene Darstellung] 23
Tabelle 7 Quantitative Ergebnisdarstellung der baulichen Einzelmaßnahmen [eigene Darstellung] 25
Tabelle 8 Quantitative Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Haupterzeugern [eigene Darstellung] 26
Tabelle 9 Quantitative Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Zusatzerzeugern [eigene Darstellung] 27
Tabelle 10 Prognose des Sanierungszustandes der Gebäudehülle und der Technologieausbreitung der Erzeuger [eigene Darstellung] 33
Tabelle 11 Ergebnisdarstellung wichtiger Bilanzgrößen für das „Hauptszenario“ [eigene Darstellung] 33
Tabelle 12 Beschreibung des Typ-EZFH und des Typ-MFH [eigene Darstellung] 61
Tabelle 13 Grundbilanz für durchschnittliche EZFH und MFH mit und ohne Qualitätssicherung [eigene Darstellung] 62
Tabelle 14 Emissionsfaktoren und Primärenergiefaktoren, eigene Zusammenstellung (unter Berücksichtigung von [111] [112] [113]) 72
Tabelle 15 Energieträgerpreise, brennwertbezogen [eigene Darstellung] [18] [19] 76
Tabelle 16 Instandhaltungskostenansätze von Bauprodukten und Nutzungsdauern [eigene Darstellung] 79
Tabelle 17 Sanierungszustand und Qualitäten der Gebäudehülle im Bestand sowie Zielzustand [eigene Darstellung] 85
Tabelle 18 Ergebnisdarstellung der baulichen Einzelmaßnahmen für das Ein- und Zweifamilienhaus [eigene Darstellung] 86
Tabelle 19 Ergebnisdarstellung der baulichen Einzelmaßnahmen für das Mehrfamilienhaus [eigene Darstellung] 86
Tabelle 20 Effizienzen der Haupterzeuger mit und ohne Qualitätssicherung [eigene Darstellung] 89
Tabelle 21 Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Haupterzeugern für das Ein- und Zweifamilienhaus [eigene Darstellung] 90
Tabelle 22 Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Haupterzeugern für das Mehrfamilienhaus [eigene Darstellung] 91
Tabelle 23 Netzlänge nach Siedlungsstruktur [eigene Darstellung] nach [78] 94
Tabelle 24 Ergebnisdarstellung der Einzelmaßnahmen an den Zusatzerzeugern [eigene Darstellung] 97
Tabelle 25 Ergebnisdarstellung der Kombimaßnahmen Wärmepumpe und Photovoltaik [eigene Darstellung] 100
Tabelle 26 Auswertung Qualitätssicherung im EZFH und MFH [eigene Darstellung] 101
Tabelle 27 Beschreibung der Maßnahmen für Pakete und Reihenfolgen im EZFH und MFH [eigene Darstellung] 103
Tabelle 28 Ergebnisdarstellung der Paketmaßnahmen und Reihen im Ein- und Zweifamilienhaus [eigene Darstellung] 104
Tabelle 29 Ergebnisdarstellung der Paketmaßnahmen und Reihen im Mehrfamilienhaus [eigene Darstellung] 105
Tabelle 30 Prognose der Personenzahlen und Wohnflächen im Zeitverlauf [eigene Darstellung] 119

Tabelle 31 Prognose des anteiligen Sanierungszustandes der Gebäudehülle [eigene Darstellung] 119
Tabelle 32 Prognose der anteiligen Technologieausbreitung der Haupt- und Zusatzerzeuger sowie Peripherie [eigene Darstellung] 121
Tabelle 33 Prognose der brennwertbezogenen Energiepreise [eigene Darstellung] 123
Tabelle 34 Prognose der Emissions- und Primärenergiefaktoren [eigene Darstellung] 123
Tabelle 35 Prognose der Energiepreise für das Szenario 2 „Alternative Energiepreise“ [eigene Darstellung] 140
Tabelle 36 Geometrische Daten des Typ-EZFH, eigene Berechnung nach [62] und [101] 172
Tabelle 37 Verteilung unterschiedlicher Wärmeerzeuger im Ein- und Zweifamilienhaus 2020 [eigene Darstellung] 172
Tabelle 38 Geometrische Daten des Typ-MFH, eigene Berechnung nach [62] und [101] 173
Tabelle 39 Verteilung unterschiedlicher Wärmeerzeuger im Mehrfamilienhaus 2020 [eigene Darstellung] 174
Tabelle 40 Umweltbilanz und Energiekosten für durchschnittliche EZFH und MFH mit und ohne Qualitätssicherung [eigene Darstellung] 174
Tabelle 41 Endenergiebilanz für durchschnittliche EZFH und MFH mit und ohne Qualitätssicherung [eigene Darstellung] 175
Tabelle 42 Sanierungszustand und Qualitäten der Außenwände des Typ-EZFH [eigene Darstellung] 177
Tabelle 43 Sanierungszustand und Qualitäten der Außenwände des Typ-MFH [eigene Darstellung] 177
Tabelle 44 Auswertung Außenwanddämmung (von außen) auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 179
Tabelle 45 Auswertung Außenwanddämmung (von außen) auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 179
Tabelle 46 Auswertung Außenwanddämmung (von innen) auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 180
Tabelle 47 Auswertung Aufdoppeln der Außenwanddämmung (von außen) auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 181
Tabelle 48 Sanierungszustand und Qualitäten der Fenster des Typ-EZFH [eigene Darstellung] 183
Tabelle 49 Sanierungszustand und Qualitäten der Fenster des Typ-MFH [eigene Darstellung] 183
Tabelle 50 Auswertung Fenstertausch auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 184
Tabelle 51 Auswertung Fenstertausch auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 185
Tabelle 52 Sanierungszustand und Qualitäten der Dächer und obersten Geschossdecken des Typ-EZFH [eigene Darstellung] 187
Tabelle 53 Sanierungszustand und Qualitäten der Dächer und obersten Geschossdecken des Typ-MFH [eigene Darstellung] 187
Tabelle 54 Auswertung Dämmung oberer Gebäudeabschluss auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 189
Tabelle 55 Auswertung Dämmung oberer Gebäudeabschluss auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 189
Tabelle 56 Auswertung Dämmung des Daches auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 190
Tabelle 57 Auswertung Dämmung des Daches auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 190
Tabelle 58 Auswertung Dämmung der obersten Geschossdecke auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 191
Tabelle 59 Auswertung Nachdämmung des Daches auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 192
Tabelle 60 Auswertung Nachdämmung des Daches auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 192
Tabelle 61 Auswertung Dämmung der obersten Geschossdecke auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 193
Tabelle 62 Sanierungszustand und Qualitäten der Kellerdecken und Bodenplatten des Typ-EZFH [eigene Darstellung] 194
Tabelle 63 Sanierungszustand und Qualitäten der Kellerdecken und Bodenplatten des Typ-MFH [eigene Darstellung] 194
Tabelle 64 Auswertung unterer Gebäudeabschluss auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 196
Tabelle 65 Auswertung Dämmung der Bodenplatte auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 196
Tabelle 66 Auswertung Dämmung der Kellerdecke auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 197
Tabelle 67 Auswertung Nachdämmung der Kellerdecke auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 198
Tabelle 68 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz eines Gas-NT-Kessels auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 206
Tabelle 69 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz eines Gas-NT-Kessels auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 207
Tabelle 70 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz eines Gas-Brennwertkessels auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 208
Tabelle 71 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz eines Gas-Brennwertkessels auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 208
Tabelle 72 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz eines Öl-NT-Kessels auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 209
Tabelle 73 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz eines Öl-NT-Kessels auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 210
Tabelle 74 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz eines Öl-Brennwertkessels auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 211
Tabelle 75 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz eines Öl-Brennwertkessels auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 211
Tabelle 76 Auswertung Einbau einer Erdreichwärmepumpe als Ersatz für Fernwärme auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 212
Tabelle 77 Auswertung Einbau einer Außenluftwärmepumpe als Ersatz für Fernwärme auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 213
Tabelle 78 Auswertung Hybridheizung Gas-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 219
Tabelle 79 Auswertung Hybridheizung Gas-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 220
Tabelle 80 Auswertung Hybridheizung Gas-Brennwertkessel und Außenluftwärmepumpe auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 221
Tabelle 81 Auswertung Hybridheizung Gas-Brennwertkessel und Außenluftwärmepumpe auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 222
Tabelle 82 Auswertung Hybridheizung Öl-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 223
Tabelle 83 Auswertung Hybridheizung Öl-Brennwertkessel und Erdreichwärmepumpe auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 224
Tabelle 84 Auswertung Hybridheizung Öl-Brennwertkessel und Außenluftwärmepumpe auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 225
Tabelle 85 Auswertung Hybridheizung Öl-Brennwertkessel und Außenluftwärmepumpe auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 226
Tabelle 86 Auswertung Holzkesseleinbau in ein durchschnittliches Gebäude auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 228
Tabelle 87 Auswertung Holzkesseleinbau in ein durchschnittliches Gebäude auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 228
Tabelle 88 Auswertung Holzkesseleinbau in ein gutes Gebäude auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 229
Tabelle 89 Auswertung Holzkesseleinbau in ein gutes Gebäude auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 230
Tabelle 90 Dämmung von Fernwärmeleitungen nach AGFW, eigene Darstellung nach [217] 232
Tabelle 91 Längenbezogene Wärmenetzverluste [eigene Darstellung] 232
Tabelle 92 Netzlänge nach Siedlungsstruktur [eigene Darstellung] nach [78] 233
Tabelle 93 Auswertung Wärmenetzumschluss von MFH auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 235
Tabelle 94 Auswertung Zirkulationsverzicht im EZFH [eigene Darstellung] 254

Tabelle 95 Auswertung Dezentralisierung im EZFH [eigene Darstellung] 257
Tabelle 96 Auswertung Dezentralisierung im MFH [eigene Darstellung] 258
Tabelle 97 Auswertung Änderung des Übergabesystems im Durchschnittsgebäude [eigene Darstellung] 261
Tabelle 98 Auswertung Änderung des Übergabesystems in EZFH mit Wärmepumpen [eigene Darstellung] 262
Tabelle 99 Auswertung Photovoltaik auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 269
Tabelle 100 Auswertung Photovoltaik in einem Gebäude mit elektrischer Trinkwassererwärmung auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 270
Tabelle 101 Auswertung Dezentralisierung mit Photovoltaik [eigene Darstellung] 271
Tabelle 102 Auswertung Photovoltaik im durchschnittlichen MFH mit Heizöl-NT-Kessel [eigene Darstellung] 272
Tabelle 103 Auswertung Photovoltaik im guten MFH mit Heizöl-Brennwert-Kessel [eigene Darstellung] 273
Tabelle 104 Auswertung Photovoltaik im durchschnittlichen MFH mit Erdgas-NT-Kessel [eigene Darstellung] 274
Tabelle 105 Auswertung Photovoltaik im guten MFH mit Erdgas-Brennwert-Kessel [eigene Darstellung] 275
Tabelle 106 Auswertung Photovoltaik im durchschnittlichen MFH mit Fernwärme [eigene Darstellung] 276
Tabelle 107 Auswertung Photovoltaik im guten MFH mit Fernwärme [eigene Darstellung] 277
Tabelle 108 Auswertung Solarthermie auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 279
Tabelle 109 Auswertung Solarthermie auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 280
Tabelle 110 Auswertung Wohnungslüftung auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 283
Tabelle 111 Auswertung der Kombination von Erdreichwärmepumpe und Wohnungslüftung auf Basis der Vollkosten [eigene Darstellung] 284
Tabelle 112 Auswertung der Kombination von Dämmung und Wohnungslüftung auf Basis der Mehrkosten [eigene Darstellung] 285
Tabelle 113 Auswertung Qualitätssicherung im EZFH [eigene Darstellung] 301
Tabelle 114 Auswertung Qualitätssicherung im MFH [eigene Darstellung] 302
Tabelle 115 Beschreibung der Maßnahmen für Pakete und Reihenfolgen im EZFH und MFH [eigene Darstellung] 308
Tabelle 116 Auswertung Maßnahmenpaket EZFH und MFH [eigene Darstellung] 308
Tabelle 117 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Anlage → Baukörper oder Paket für das EZFH [eigene Darstellung] 310
Tabelle 118 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Anlage → Baukörper oder Paket für das MFH [eigene Darstellung] 311
Tabelle 119 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Baukörper → Anlage oder Paket für das EZFH [eigene Darstellung] 312
Tabelle 120 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Baukörper → Anlage oder Paket für das MFH [eigene Darstellung] 313
Tabelle 121 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Baukörper → Anlage, Anlage → Baukörper oder Pakete für das EZFH [eigene Darstellung] 315
Tabelle 122 Auswertung Maßnahmenreihenfolge Baukörper → Anlage, Anlage → Baukörper oder Pakete für das MFH [eigene Darstellung] 316
Tabelle 123 Mögliche mikroökonomische Nutzen energetischer Modernisierungen, eigene Darstellung der Inhalte aus [22] 327
Tabelle 124 Modifizierter Außentemperaturdatensatz [eigene Darstellung] 331
Tabelle 125 Endenergiebilanz für durchschnittliche EZFH und MFH bei heutigem und modifizierten Klimadaten [eigene Darstellung] 332
Tabelle 126 Bewertung des Maßnahmenpaketes im EZFH bei heutigem und modifizierten Klimadaten [eigene Darstellung] 333
Tabelle 127 Bewertung des Maßnahmenpaketes im MFH bei heutigem und modifizierten Klimadaten [eigene Darstellung] 334
Tabelle 128 Endenergiebilanz für durchschnittliche EZFH und MFH bei heutigem und modifiziertem Trinkwarmwasserbedarf [eigene Darstellung] 335
Tabelle 129 Bewertung des Maßnahmenpaketes im EZFH bei heutigem und modifizierten Trinkwarmwasserbedarf [eigene Darstellung] 336
Tabelle 130 Bewertung des Maßnahmenpaketes im MFH bei heutigem und modifizierten Trinkwarmwasserbedarf [eigene Darstellung] 337
Tabelle 131 Energieträgerpreise, modifiziert [eigene Darstellung] 340
Tabelle 132 Energiekosten für durchschnittliche EZFH und MFH (qualitätsgesichert), heutige und modifizierte Energiepreise [eigene Darstellung] 340
Tabelle 133 Bewertung des Maßnahmenpaketes im EZFH bei heutigem und modifizierten Energiepreisen [eigene Darstellung] 343
Tabelle 134 Bewertung des Maßnahmenpaketes im MFH bei heutigem und modifizierten Energiepreisen [eigene Darstellung] 344
Tabelle 135 Berührungspunkte einzelner Akteure mit den einzelnen Positionen einer Modernisierung, Bewertung aus [254] 345
Tabelle 136 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende in allen Sektoren [eigene Darstellung] 361
Tabelle 137 Analyse relevanter Makrostudien zur Energiewende im Gebäudesektor [eigene Darstellung] 366
Tabelle 138 Übersicht vergleichender Metstudien zur Energiewende [eigene Darstellung] 370
Tabelle 139 Prognose der Personenzahlen und Wohnflächen im Zeitverlauf [eigene Darstellung] 373
Tabelle 140 Prognose des anteiligen Sanierungszustandes der Gebäudehülle [eigene Darstellung] 381
Tabelle 141 Prognose der anteiligen Technologieausbreitung der Haupterzeuger [eigene Darstellung] 384
Tabelle 142 Prognose der anteiligen Technologieausbreitung der Peripherie [eigene Darstellung] 388
Tabelle 143 Prognose der anteiligen Technologieausbreitung der Zusatzerzeuger [eigene Darstellung] 391
Tabelle 144 Prognose der brennwertbezogenen Energiepreise [eigene Darstellung] 394
Tabelle 145 Prognose der Emissions- und Primärenergiefaktoren [eigene Darstellung] 395
Tabelle 146 Prognose der Emissionsfaktoren für das Szenario 1 „Beschleunigung“ [eigene Darstellung] 417
Tabelle 147 Prognose Sanierungsobjekte – Grundlagen der Kostenschätzung für die Bestandssanierung [eigene Darstellung] 422
Tabelle 148 Prognose der Energiepreise für das Szenario 2 „Alternative Energiepreise“ [eigene Darstellung] 432
Tabelle 149 Umrechnung für Flächen im Nichtwohnbau, eigene Darstellung nach [78] 444
Tabelle 150 Häufigkeitsverteilung der Effizienzklassen im Energieausweis, Werte nach [9] 446
Tabelle 151 Einordnung der Kennwerte aus der Energieanalyse EAV des Gebäudes [eigene Darstellung] 462
Tabelle 152 Heizenergieverbrauch nach Gebäudegröße, Energieträger und Baustandard, eigene Darstellung nach [78] [103] [104] 475
Tabelle 153 Energieverbrauch MFH nach Energieträger und Art der Warmwasserbereitung, eigene Darstellung nach [78] [103] [104] 476
Tabelle 154 Systemeffizienz der Trinkwassererwärmung im MFH, eigene Darstellung nach [104] 480
Tabelle 155 Typische wohnflächenbezogenen Wasserverbrauchskennwerte, eigene Darstellung nach [141] [108] 480
Tabelle 156 Teilenergiekennwerte nach VDI 3807-5, Werte aus [108] 482
Tabelle 157 Staatlich veranlasste Preisbestandteile und CO_2-Belastung der Energieträger nach AGORA 2017, Grafik aus [299] 485
Tabelle 158 Energieträgerpreise [eigene Darstellung] 486

Tabelle 159 Primärenergiefaktoren, eigene Darstellung, Werte gekürzt nach DIN V 18599 bzw. IWU 2020 [112] [111] 490
Tabelle 160 Emissionsfaktoren, eigene Zusammenstellung (unter Berücksichtigung von [111] [112] [113]) 493
Tabelle 161 Typische äquivalente Energiepreise für Modernisierungen im Wohnbau, Stand 2015 [eigene Darstellung] nach [78] 494
Tabelle 162 Ausgewählte Wechselaktivitäten zentraler Heizwärmeerzeuger, eigene Darstellung nach BDEW [5] 499
Tabelle 163 Verteilung unterschiedlicher Beheizungsarten im Wohnbau, eigene Darstellung nach IWU [7] 503
Tabelle 164 Verteilung unterschiedlicher Hauptenergieträger im Wohnbau, eigene Darstellung nach IWU [7] 503
Tabelle 165 Verteilung unterschiedlicher Wärmeerzeuger im Wohnbau 2016, eigene Darstellung nach IWU [7] 504
Tabelle 166 Geschichtlich und verordnungsrechtlich bedingte Änderungen des Technikstandards [eigene Darstellung] nach [78] 508
Tabelle 167 Geschichtlich und verordnungsrechtlich bedingte Änderungen des Baustandards [eigene Darstellung] nach [78] 509
Tabelle 168 Typgebäude und deren Häufigkeit, eigene Darstellung nach IWU [62] sowie Mittelwertbildung [eigene Darstellung] 512
Tabelle 169 Verteilung und typische wohnflächenbezogene (heizwertbezogene) Verbräuche, eigene Darstellung nach ARGE [8] 513
Tabelle 170 Mittlere Verbrauchskennwerte nach Baustandard, eigene Ermittlung nach ARGE [8] 513
Tabelle 171 Sanierungszustand und Qualitäten der Wohngebäude, eigene Darstellung nach IWU [62] 514
Tabelle 172 Sanierungszustand der Gebäudehülle in EFH und ZFH, Werte nach ARGE [8] 515
Tabelle 173 Sanierungszustand der Gebäudehülle in MFH, Werte nach ARGE [8] 515
Tabelle 174 Gebäudetypologie Nichtwohnbau, Werte gerundet nach [127] 517
Tabelle 175 Altersstruktur der Nichtwohnbauten, eigene Darstellung nach [127] [313] 517
Tabelle 176 Hüllflächen von Typgebäuden im Nichtwohnbau, ausschnittsweise und gerundete Werte nach [127] 517
Tabelle 177 Wärmedurchgangskoeffizienten im Nichtwohnbau, Werte zusammengefasst nach [127] 518
Tabelle 178 Kostenfunktionen (brutto) [eigene Darstellung] 535
Tabelle 179 Auswahl von Instandhaltungskosten von Bauprodukten aus verschiedenen Literaturquellen [eigene Darstellung] 539
Tabelle 180 Vollkosten und Sowiesokosten für Außenwanddämmung mit Wärmedämmverbundsystem [eigene Darstellung] 544
Tabelle 181 Vollkosten und Sowiesokosten für Kellerdeckendämmung von unten [eigene Darstellung] 545
Tabelle 182 Vollkosten und Sowiesokosten für oberste Geschossdecken [eigene Darstellung] 545
Tabelle 183 Vollkosten und Sowiesokosten für Steildachdämmung von oben [eigene Darstellung] 546
Tabelle 184 Vollkosten und Sowiesokosten für Fenster mit Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung [eigene Darstellung] 546
Tabelle 185 Vollkosten und Sowiesokosten für Gaskessel [eigene Darstellung] 547
Tabelle 186 Vollkosten und Sowiesokosten für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung [eigene Darstellung] 548
Tabelle 187 Auswahl von Lebens- bzw. Nutzungsdauern von Bauprodukten aus verschiedenen Literaturquellen [eigene Darstellung] 556
Tabelle 188 Vermiedene CO_{2e}-Emissionen der MAP-geförderten Anlagen 2018, Werte aus [11] 564
Tabelle 189 Pauschale Nutzungsquote des Photovoltaikstroms in den Typgebäuden [eigene Darstellung] 597
Tabelle 190 Abkürzungen 599
Tabelle 191 Wichtige Formelzeichen 603