

The screenshot shows an Excel spreadsheet with multiple columns and rows. The top part contains numerical data with color-coded cells (orange, green, yellow). Below this, there are sections with text labels and more data, some of which are highlighted in yellow. The spreadsheet appears to be a detailed calculation tool for energy and emissions.

Kurzbeschreibung eines Exceltools zur Energie- und Emissionsbilanzierung sowie Wirtschaftlichkeitsbewertung anhand zweier Typgebäude

Exceltool „Typgebäudebilanz“

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

Braunschweig,
Februar 2024 (V2.0)

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	4	5 Nutzungsranddaten	24
1.1 TOOL: Grundsätzlicher Aufbau der Programmierung	4	5.1 Personenbelegung der Gebäude.....	24
1.2 Feste und variable Parameter für die Gebäude.....	5	5.2 Mittlere Innentemperatur	24
1.3 Globale Variantenbildung.....	6	5.3 Personenbezogener Luftwechsel	24
1.4 TOOL: Vereinfachte Schnittstelle zur Ein- und Ausgabe	6	5.4 Personenbezogener Haushaltsstrombedarf und interne Wärmegewinne.....	25
1.5 TOOL: Allgemeine Hinweise zur Excel-Anwendung.....	8	5.5 Personenbezogener Warmwasserbedarf	25
		5.6 Variante „sparsamer Wasserverbrauch“	25
2 Berechnungsablauf und Ergebnisauswertung 8		6 Randdaten des Baukörpers	26
2.1 TOOL: Legende der Ausgabedaten	10	6.1 Hüllflächen	26
2.2 Berechnungsablauf für ein Gebäude.....	11	6.2 Wärmedurchgangskoeffizienten	26
2.2.1 Bilanzierung der Heizwärme	11	6.3 Wärmeleitfähigkeit.....	26
2.2.2 Bilanzierung der Endenergie	11	6.4 Wärmebrücken.....	26
2.2.3 Bilanzierung der Primärenergie	12	6.5 Temperaturkorrekturfaktoren	27
2.2.4 Bilanzierung der Emissionen	13	6.6 Infiltration	27
2.2.5 Bilanzierung der Energiekosten	14	6.7 Energiedurchlassgrad der Fenster und Abminderung.....	27
2.3 Ergebnisauswertung für ein Gebäude	15	6.8 Fremdwärmenutzungsgrad	27
2.3.1 Jahreskostenüberschuss oder -fehlbetrag 15		7 Randdaten der Wärmeversorgung	28
2.3.2 Ausgleich durch Subvention	16	7.1 Übergabeverluste	28
2.3.3 Ausgleich durch Emissionspreis	17	7.2 Typische Leitungslängen	28
2.3.4 Äquivalenter CO ₂ -Preis	18	7.2.1 Zentrales Trinkwarmwassernetze.....	28
2.4 Berechnungsablauf für den Gesamtbestand.....	19	7.2.2 Dezentrale Trinkwarmwassernetze ..	28
		7.2.3 Heizungsrohrnetze	28
3 Typgebäude	20	7.3 Auslegungs- und mittlere Netztemperaturen bei Heizkörperheizungen	29
3.1 Ein- und Zweifamilienhaus	20	7.4 Auslegungs- und mittlere Netztemperaturen bei Flächenheizungen	29
3.2 Mehrfamilienhaus.....	20	7.5 Mittlere Temperaturen für Warmwassernetze und -speicher.....	29
3.3 Bilanzranddaten und Eigenschaften der Typgebäude.....	21	7.6 Größe von Speichern.....	30
4 Klimaranddaten	22	7.7 Wärmeverluste von Speichern	30
4.1 Klimadaten für die Jahresmittelbetrachtung	22	7.8 Effizienzbewertung von Kesseln, Fernwärme und Direktheizung.....	30
4.2 Klimadaten für die Auslegung	22	7.9 Effizienzbewertung der Wärmepumpen.....	31
4.3 Heizgrenztemperatur	23	7.9.1 Arbeitszahl	31
4.4 Variante „Klimaerwärmung“	23	7.9.2 Bivalenzpunkt der Wärmepumpen...	31
		7.9.3 Umrechnung von Antriebs- und Wärmeleistungen	32
		7.9.4 Mittlere Jahresarbeitszahl incl. Nachheizung	33
		7.10 Hybridanlagen.....	33
		7.11 Solarthermie	33
		7.12 Lüftungsanlage mit WRG	33
		7.13 Qualitätssicherung der Peripherie.....	34

8	Randdaten der Elektroenergiebilanz.....	35	11	Werte für 2035 und 2050.....	40
8.1	Haushaltsstrom	35	11.1	Bevölkerung und Wohnflächen	40
8.2	Erträge der Photovoltaik	35	11.2	Sanierung des Baukörpers	40
8.3	Selbstnutzungsquote von PV-Strom für Haushalt und Trinkwarmwasser	35	11.2.1	Außenwand	41
8.4	Selbstnutzungsquote von PV-Strom für Heizung	35	11.2.2	Oberste Geschossdecke	41
8.5	Pauschale Selbstnutzungsquote von PV-Strom	36	11.2.3	Dach	42
9	Ökologische Bewertung.....	36	11.2.4	Kellerdecke.....	42
10	Ökonomische Bewertung	37	11.2.5	Bodenplatte	42
10.1	Investitionskosten.....	37	11.2.6	Fenster	42
10.2	Nutzungsdauer sowie Wartungs- und Unterhaltskosten	38	11.3	Technologieausbreitung der TGA	43
10.3	Betrachtungszeitraum und Nachinvestition bzw. Restwert.....	38	11.3.1	Haupterzeuger	43
10.4	Preissteigerung der Bauprodukte oder Lernkurve für Bauprodukte	39	11.3.2	Systeme der Trinkwassererwärmung.....	44
10.5	Kalkulatorischer Zins.....	39	11.3.3	Übergabesysteme	44
10.6	Energiepreise und deren Preissteigerung	39	11.3.4	Verteilleitungen im Keller.....	45
10.7	Variante „reformierte Energiepreise“	39	11.3.5	Photovoltaik	45
			11.3.6	Solarthermie	45
			11.3.7	Lüftung mit Wärmerückgewinnung..	46
			11.4	Nutzung von Photovoltaikstrom.....	46
			11.5	Investitionskosten und Kalkulationszins....	46
			11.6	Energiepreise	47
			11.7	Emissions- und Primärenergiefaktoren....	47
			11.8	Variante „reformierte Energiepreise“	47
			11.9	Variante „Beschleunigte Sanierung“	48
			11.9.1	Suffizienzmaßnahmen	48
			11.9.2	Sanierungsquoten für den Baukörper	48
			11.9.3	Marktdurchdringung der Haupterzeuger	48
			11.9.4	Sanierungsquoten für die Peripherie	49
			11.9.5	Technologieausbauquoten für Zusatzherzeuger.....	49
			11.9.6	Emissionsfaktoren	49
			11.9.7	Qualitätssicherung.....	49
			12	Literaturverzeichnis.....	50

1 Einleitung

Das Tool gilt der Abbildung des gesamten deutschen Wohnbaubestandes. Berechnet werden dazu exemplarisch zwei durchschnittliche Typgebäude, das mittlere Ein- und Zweifamilienhaus EZFH sowie ein Mehrfamilienhaus MFH. Auch nur eine separate Betrachtung der beiden Typgebäude ist somit möglich, z.B. zur Einstiegsenergieberatung. Für die Gebäude können berechnet werden:

- die Nutzenergie,
- die Endenergie,
- die nicht-regenerative Primärenergie sowie
- die Emissionen (CO₂-Äquivalent)

jeweils für Heizung, Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom.

Es kann entweder ein Zustand (vor Sanierung, nach Sanierung, heute, künftig) oder eine Änderung (Fenstertausch im MFH, Umstellung aller Wärmeerzeuger in allen EZFH usw.) betrachtet werden.

Die Verbesserungsmaßnahmen können (auf Einzelgebäudeebene) auch wirtschaftlich bewertet werden.

1.1 TOOL: Grundsätzlicher Aufbau der Programmierung

Das Exceltool enthält 10 Tabellenblätter, siehe Abbildung 1. Deren Inhalt wird nachfolgend grob erläutert.

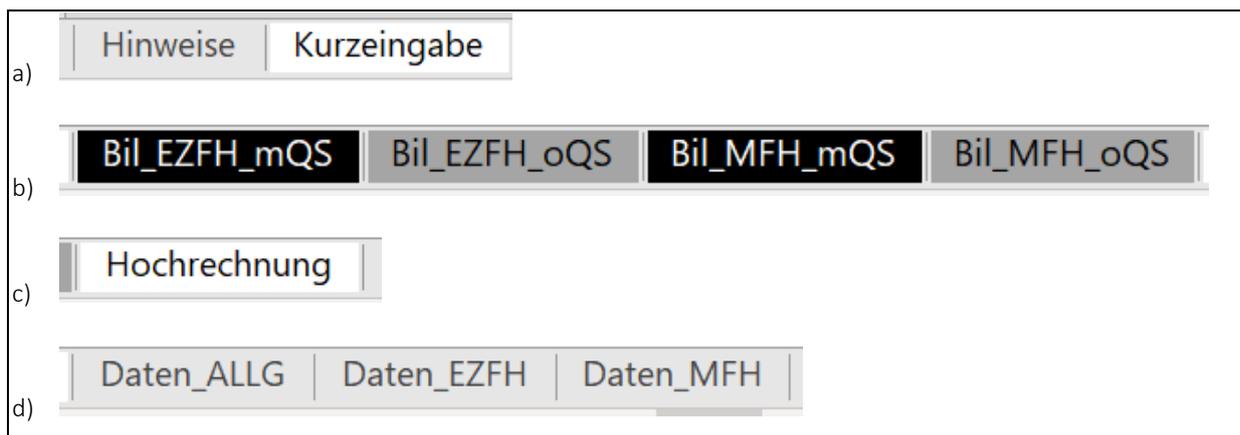


Abbildung 1 Tabellenblätter des Exceltools

Folgende Inhalte sind in den jeweiligen Tabellenblättern enthalten:

- Das Blatt „Hinweise“ gibt Hinweise zum Blattschutz und zu den Farblegenden der Zellen. Es richtet sich an Nutzer mit verschiedenem Hintergrundwissen (Einsteiger bis Programmierer)

Das Blatt „Kurzeinweise“ liefert eine Schnittstelle zur einfachen und schnellen Benutzung der unter b) genannten Blätter.
- Die vier Blätter „Bil_...“ liefern jeweils die Bilanzierung für Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) mit (m) oder ohne (o) Qualitätssicherung (QS). Eingaben werden in den Blättern „mQS“ gemacht, die Blätter „oQS“ sind mit den Eingaben verlinkt.
- Das Blatt „Hochrechnung“ verarbeitet die Ergebnisse der unter b) genannten vier Blätter weiter. Hier wird aus den Typgebäuden eine Bilanz für den gesamten Wohngebäudebestand Deutschland erstellt. Es wird angenommen, dass Deutschland aus identischen EZFH und MFH besteht und alle Verbesserungsmaßnahmen identisch stattfinden.

d) Das Blatt „Daten_ALLG“ enthält die für beide Typgebäude gleichermaßen gültigen Annahmen zum Klima und zur Nutzung, zur Gebäudehülle, zu Netzen und Speichern, zu Haupt- und Zusatzerzeugern, zur Qualitätssicherung sowie zu Restriktionen bei Verbesserungsmaßnahmen. Für den Anwender wichtig sind darüber hinaus die Grunddaten der ökologischen Bewertung, die Ansätze für die Investitionskosten sowie die sonstigen Wirtschaftlichkeitsranddaten. Bei Bedarf müssen an dieser Stelle Energiepreise, Investitionskosten, Emissions- und Primärenergiefaktoren aktualisiert werden

Die Blätter „Daten_EZFH“ und „Daten_MFH“ enthalten jeweils für die Typgebäude die Daten der Personenbelegung, Geometrie, Gebäudehülle, zu Netzen und Speichern, Haupt- und Zusatzerzeugern – sofern sie nur für eines dieser Modelle gelten. Bei Bedarf können an dieser Stelle aktuelle Daten zur Größe und Beschaffenheit der Gebäude aus der Statistik hinterlegt werden.

1.2 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 durch den Anwender nicht modifiziert werden. 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, siehe Abbildung 2.

The screenshot shows a software interface with a grid of 11 yellow boxes representing selectable features for building types. The interface includes a top menu bar with options like 'Hinweise', 'Übersicht', 'Bil_EZFH_mQS', 'Bil_EZFH_oQS', 'Bil_MFH_mQS', and 'Bil_MFH_oQS'. The main area is a list of building features with checkboxes and dropdown menus.

Abbildung 2 Auswahl der 11 Merkmale für die Typgebäude in den gelben Kästchen [eigene Darstellung]

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

Die Optionen im Einzelnen:

- 1) Qualität der Außenwand: Ø, schlecht, mittel, gut, best
- 2) Qualität der Fenster: Ø, schlecht, mittel, gut, best
- 3) Qualität des oberen Gebäudeabschlusses: Ø, schlecht, mittel, gut, best
- 4) Qualität des unteren Gebäudeabschlusses: Ø, schlecht, mittel, gut, best

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

- 9) Photovoltaik: Ø, mit, ohne
- 10) Solarthermie: Ø, mit, ohne
- 11) Lüftung: Ø, mechanisch mit Wärmerückgewinnung, Fensterlüftung/Abluftanlage

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.

1.3 Globale Variantenbildung

Über die Parameter hinaus, die das einzelne Gebäude beschreiben, sieht das Programm folgende übergeordnete Variantenbildung vor, siehe auch Abbildung 3:

- 1) Bilanzzeitpunkt: 2020 (für den heutigen Zustand relevant), 2035, 2050
- 2) Wasserverbrauch: normales oder sparsames Nutzerverhalten
- 3) Klimadaten: heutige Daten (Mittelwert der letzten 30 Jahre) und Extrapolation auf künftige Klimaerwärmung
- 4) Sanierungsfortschritt: ambitioniert (anspruchsvolle Umsetzung bis 2035 und 2050 oder beschleunigte Sanierung (zum Einhalten des Emissionsbudgets)
- 5) Energiepreise: heutiges System sowie eine reformierte Bepreisung (heutiger und künftiger Preis emissionsbasiert)

	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Version	Übergeordnete Randdaten für die Bilanz						
2								
3			Bilanz für	2050		(bitte wählen)		
4			Wasserverbrauch	sparsam		(bitte wählen)		
5			Klima	wärmer		(bitte wählen)		
6			Sanierung	ambitioniert		(bitte wählen)		
7			Energiepreise	reformiert		(bitte wählen)		
8								

Abbildung 3 Auswahl der globalen Berechnungsparameter im Übersichtsblatt [eigene Darstellung]

1.4 TOOL: Vereinfachte Schnittstelle zur Ein- und Ausgabe

Ab der Version 2.0 des Tools ist ein Blatt „Kurzeingabe“ vorhanden, siehe Abbildung 4. Dabei werden links die Eingaben gemacht und rechts die Ergebnisse dargestellt.

Ein- und Ausgabebogen "Standardbilanz" bzw. "Typgebäudebilanz"

Daten in die Berechnungsblätter
übertragen (anklicken)

Datenstand: Februar 2024
Herausgeber: K. Jagnow, D. Wolff
Benutzung als Freeware

EINGABEN

1. Typgebäude wählen

EFH



Wohnfläche: 141,6 m²
Personen: 2,7

MFH



Wohnfläche: 470 m²
Personen: 12,2

2. Gebäudehülle beschreiben

Außenwand:

Dach/OGD:

Boden/KD:

Fenster/Türen:

3. Lüftung beschreiben

Lüftungsart:

4. Verteilnetze und Übergabe beschreiben

Heizung:

Warmwasser:

5. Haupterzeuger beschreiben

Heizung:

Warmwasser:

6. Zusatzerzeuger beschreiben

Solarthermie:

Photovoltaik:

7. Optionale Bilanzparameter für den Einzelfall

Wasserverbrauch:

Klima:

Energiepreise:

8. Optionale Bilanzparameter für die Hochrechnung

Sanierungsvorgehen:

Bilanzzeitpunkt:

AUSGABEN

1. Leistungskennwerte

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
h	W/(m²K)	1,77	1,88	1,48	1,60	-16%	-15%
q̇	W/m²	56	60	47	51	-16%	-15%

2. Heizungsbilanz

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
q _h	kWh/(m²a)	99,0	107,9	76,2	85,9	-23%	-20%
q _{outgH}	kWh/(m²a)	106,3	117,3	83,9	96,7	-21%	-18%
η JAZ _H	---	0,80	0,75	2,54	2,15	217%	186%
q _H	kWh/(m²a)	132,9	156,4	33,1	45,1	400%	-71%
q _{PH}	kWh/(m²a)	146,1	172,0	59,6	81,1	-59%	-53%

3. Trinkwarmwasserbilanz

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
q _{tw}	kWh/(m²a)	14,6	14,6	14,6	14,6	0%	0%
q _{outgW}	kWh/(m²a)	16,1	16,7	16,1	16,7	0%	0%
η JAZ _W	---	1,00	1,00	1,00	1,00	0%	0%
q _W	kWh/(m²a)	16,1	16,7	16,1	16,7	0%	0%
q _{PW}	kWh/(m²a)	29,0	30,1	29,0	30,1	0%	0%

4. Gebäudebilanz

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
q _{hw}	kWh/(m²a)	114,8	125,5	92,4	104,4	-20%	-17%
q _{HW}	kWh/(m²a)	149,0	173,1	49,2	61,8	-67%	-64%
q _{el}	kWh/(m²a)	32,4	32,4	32,4	32,4	0%	0%

5. Photovoltaikbilanz

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
q _{PV}	kWh/(m²a)	0,0	0,0	32,0	32,0	k.A.	k.A.
q _{PV,selbst}	kWh/(m²a)	0,0	0,0	28,9	29,8	k.A.	k.A.
q _{PV,rück}	kWh/(m²a)	0,0	0,0	3,1	2,2	k.A.	k.A.

6. Emissionsbilanz

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
e _{HW}	kg/(m²a)	34,8	39,9	21,8	27,4	-37%	-31%
e	kg/(m²a)	49,2	54,3	23,4	28,6	-52%	-47%

7. Vollkostenbilanz

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
I ₀	€			104.423	106.019		
k _{3qu}	€/tCO ₂					336	344
K ₁	€/a			4.074	4.157		
K ₂	€/a			869	889		
K ₃	€/a	10.810	11.562	6.776	8.046	-37%	-30%
K ₄	€/a	10.810	11.562	11.719	13.092	40	641
Zuschuss I ₀	---			1%	15%		
zus. k _{em}	€/tCO ₂			3	53		
Erdgas	€/kWh	0,060	0,060	0,061	0,071		
Strom	€/kWh	0,310	0,310	0,311	0,334		

8. Mehrkostenbilanz

		Ausgangszustand		Sanierter Zustand		Differenz/Abweichung	
		mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS	mit QS	ohne QS
I ₀	€			79.302	80.400		
k _{3qu}	€/tCO ₂					311	317
K ₁	€/a			3.120	3.177		
K ₂	€/a			651	663		
K ₃	€/a	10.810	11.562	6.776	8.046	-37%	-30%
K ₄	€/a	10.810	11.562	10.547	11.886	-263	323
Zuschuss I ₀	---			0%	8%		
zus. k _{em}	€/tCO ₂			0	27		
Erdgas	€/kWh	0,060	0,060	0,060	0,066		
Strom	€/kWh	0,310	0,310	0,310	0,322		

Abbildung 4 Kurzeingabe [eigene Darstellung]

Die Eingaben auf der linken Seite betreffen:

- die Wahl des Typgebäudes: EZFH oder MFH,
- die 11 Eigenschaften des Typgebäudes hinsichtlich des Baukörpers und der Anlagentechnik, jeweils vor und nach einer Verbesserung (analog Kapitel 1.1); Wahl aus Drop-Down-Menüs,
- die 5 optionalen Parameter zur Bilanzierung (nach Kapitel 1.3); Wahl aus Drop-Down-Menüs.

Die Ausgaben auf der rechten Seite sind:

- Leistungskennwerte, die z.B. zur Dimensionierung der Anlagentechnik erforderlich sind (Heizlast, bezogene Heizlast),
- die Heizungsbilanz mit Angabe von Nutzenergie, zu erzeugender Energie (ab Erzeuger), Effizienz des Erzeugers, End- und Primärenergie, siehe auch Kapitel 2.2.1 bis 2.2.3,
- die Trinkwarmwasserbilanz mit Angabe von Nutzenergie, zu erzeugender Energie (ab Erzeuger), Effizienz des Erzeugers, End- und Primärenergie, siehe auch Kapitel 2.2.2 und 2.2.3,
- die Gebäudebilanz mit Angabe von Nutz- und Endenergie, incl. des Haushaltsstroms, siehe auch Kapitel 2.2.2,
- die Photovoltaikbilanz mit Angabe von produziertem, selbst genutztem und rückgespeistem Strom, siehe auch Kapitel 8,
- die Emissionsbilanz für Heizung und Warmwasser sowie die gesamte Endenergie incl. Haushaltsstrom, siehe auch Kapitel 2.2.4
- die Angabe der Vollkosten für das Bestandgebäude und die gewählten Verbesserungen sowie aller Bewertungsparameter der Maßnahme, siehe auch Kapitel 2.2.5 und 2.3
- die Angabe der Mehrkosten für das Bestandgebäude und die gewählten Verbesserungen sowie aller Bewertungsparameter der Maßnahme, siehe auch Kapitel 2.2.5 und 2.3

Mit Hilfe eines Makros werden die ausgewählten Eingaben in die vier Tabellenblätter „Bil_...“ übertragen. Es muss ausgelöst werden, nachdem Änderungen getätigt wurden. Ob dies der Fall ist, zeigt eine rote Markierung oben an, siehe Abbildung 5. Dann ist der entsprechende Button zu betätigen.



Abbildung 5 Makro [eigene Darstellung]

1.5 TOOL: Allgemeine Hinweise zur Excel-Anwendung

Das Tool hat ggf. einen Blattschutz, der ausgehoben werden kann. Es gibt keinen Passwortschutz. Teilweise sind Zeilen ausgeblendet, die mit „Pluszeichen“ am linken Rand eingeblendet werden können.

In der Programmierung wurden die relevanten Verknüpfungen der Einflussgrößen auf den Energiebedarf abgebildet, siehe Abbildung 6. 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.

2.1 TOOL: Legende der Ausgabedaten

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt die Kopfzeile der Blätter „Bil_...“ mit den darin zu findenden Größen. Durch Klick in eines der Kästchen ist die Zelle zu finden, in der die Größe berechnet wird. Die Berechnung findet im selben Blatt in den Zeilen 13 ff. statt. Die nachfolgenden Kapitel 2.2 und 2.3 erklären die Vorgehensweise.

The screenshot shows a spreadsheet with columns A through K. The data is organized into two main sections. The first section (rows 2-7) includes metrics like 'h' (W/(m²K)), 'qh' (kWh/(m²a)), 'qoutgH' (kWh/(m²a)), 'ηIAZH' (—), 'qH' (kWh/(m²a)), and 'qPH' (kWh/(m²a)). The second section (rows 8-11) includes 'q' (W/m²), 'qw' (kWh/(m²a)), 'qoutgW' (kWh/(m²a)), 'ηIAZW' (—), 'qW' (kWh/(m²a)), and 'qPW' (kWh/(m²a)). Callouts link these values to descriptive terms: 'Fingerabdruck' = nutzflächenbezogene Steigung (Transmission & Lüftung), Heizwärmebedarf (Nutzwärme), Wärmeabgabe des Erzeugers, Erzeugereffizienz, Endenergie Heizung, Primärenergie Heizung, Nutzen sowie Endenergie Heizung & Warmwasser, Emissionen Heizung & Warmwasser, Emission Haushalt, Heizlast, Werte für Trinkwarmwasser analog der Heizung, Haushaltsstrom, PV-Ertrag, selbst genutzter & rückgespeicher Anteil, and Invest für Mehr.

The screenshot shows a spreadsheet with columns H through S. The data is organized into two main sections. The first section (rows 12-13) includes 'qhw' (kWh/(m²a)), 'qHW' (kWh/(m²a)), 'eHW' (kg/(m²a)), 'e' (kg/(m²a)), 'Ke' (€/a), 'ΔK' (€/a), 'Zuschuss ID' (—), 'zus. kem' (€/tCO2), 'Erdgas' (€/kWh), and 'Strom' (€/kWh). The second section (rows 14-15) includes 'qel' (kWh/(m²a)), 'qPV' (kWh/(m²a)), 'qPVselbst' (kWh/(m²a)), 'qPV,rück' (kWh/(m²a)), 'ID' (€), 'KI' (€/a), 'Ku' (€/a), 'Ka' (€/a), and 'käqu' (€/tCO2). Callouts link these values to descriptive terms: Emissionen Heizung & Warmwasser, Nutzen sowie Endenergie Heizung & Warmwasser, Emissionen incl. Haushaltsstrom, Energiekosten, Gesamtkostendifferenz der Maßnahmen, ggf. Investitionskostenzuschuss oder CO2-Bepreisung für Wirtschaftlichkeit, (mittlere) Energiepreise, PV-Ertrag, selbst genutzter & rückgespeicher Anteil, Investitionskosten für Maßnahmen (als Mehr- & Vollkosten), Jahreskosten Kapital- & Wartung/Unterhalt, Jahreskosten gesamt, incl. Energie, and äquivalenter CO2-Preis der Verbesserungsmaßnahmen.

Abbildung 7 Kopfzeile des Tools mit Legende der Ausgabedaten [eigene Darstellung]

2.2 Berechnungsablauf für ein Gebäude

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.

2.2.1 Bilanzierung der Heizwärme

Der Heizwärmebedarf ist – wie üblich – eine Saldierung der Verluste (Transmission, Lüftung) und der Gewinne (interne und solare), siehe Abbildung 8. 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 [5].

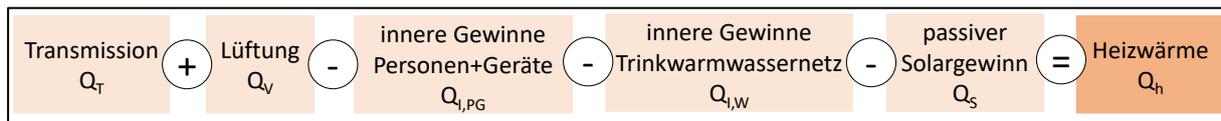


Abbildung 8 Berechnungsablauf Heizwärme [eigene Darstellung]

Auf die Verwendung eines Fremdwärmenutzungsgrades wird verzichtet. Die Tatsache, dass nicht alle Wärmegevinne 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 Kapitel 4 und 5 (Klima- und Nutzer) sowie 6 (Baukörper) zusammengestellt.

2.2.2 Bilanzierung der Endenergie

Die Heizungsbilanz ist in Abbildung 9 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 [6] [1] [7] sowie „Übergabeverluste“ nach DIN V 4701-10 [5] 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).

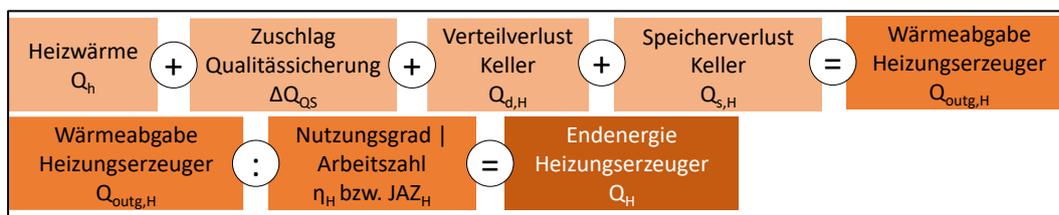


Abbildung 9 Berechnungsablauf Endenergie Heizung [eigene Darstellung]

Das Schema der Trinkwassererwärmung – Abbildung 10 – 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.

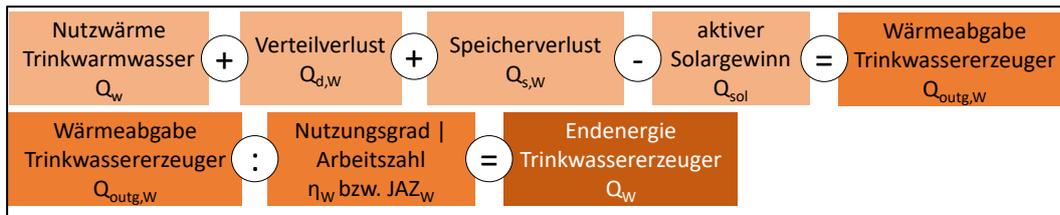


Abbildung 10 Berechnungsablauf Endenergie Trinkwarmwasser [eigene Darstellung]

Alle weiteren Hintergrundinformationen sowie Ansätze sind in Kapitel 7 (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 11. 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 die Programmierung neu erstellt worden und werden in Kapitel 8 erläutert.

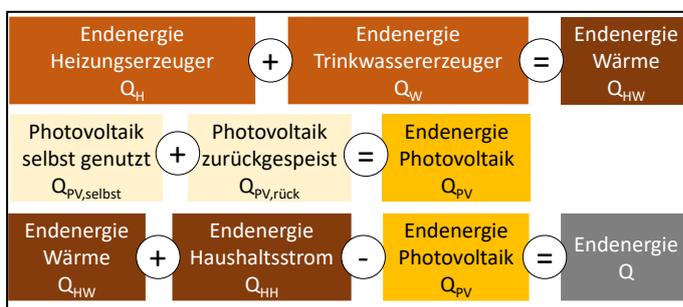


Abbildung 11 Berechnungsablauf gesamte Endenergie [eigene Darstellung]

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 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“.

2.2.3 Bilanzierung der Primärenergie

Basis zur Berechnung der Primärenergie ist die Endenergie. Es gelten die jeweiligen Primärenergiefaktoren. Die Umrechnung erfolgt getrennt für die Endenergien der Heizung und Trinkwassererwärmung, siehe Abbildung 12. Aus beiden Teilmengen entsteht – analog der Endenergie – eine Primärenergie für Wärme. Dieses Schema folgt dem Ablauf der EnEV-Normen.

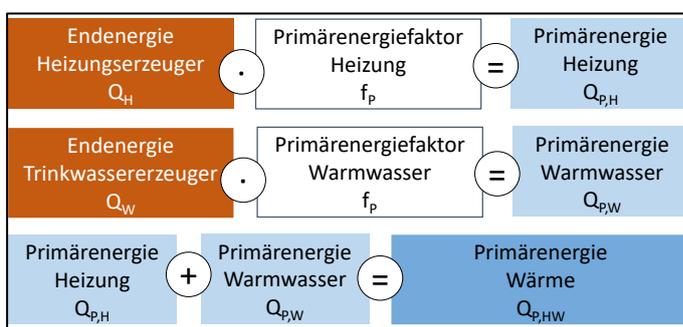


Abbildung 12 Berechnungsablauf Primärenergie Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung]

Daneben wird auch der Haushaltsstrom in die Betrachtung einbezogen, siehe Abbildung 13. 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 der Programmierung lautet der Faktor „0“). Er verbessert die Bilanz des Gebäudes nicht.

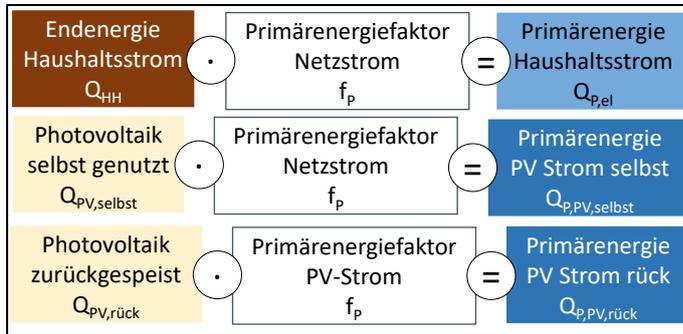


Abbildung 13 Berechnungsablauf Primärenergie Strom [eigene Darstellung]

In der finalen Bilanz der Primärenergien, siehe Abbildung 14, 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 14 Berechnungsablauf gesamte Primärenergie [eigene Darstellung]

In diesem Bilanzmodell ist eine gebäudenaher PV-Strom-Erzeugung also primärenergetisch nur relevant, wenn der Strom im Gebäude genutzt wird. Weitere Festlegungen zur ökologischen Bewertung sind in Kapitel 9 zu finden.

2.2.4 Bilanzierung der Emissionen

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 15. Es gelten die jeweiligen Emissionsfaktoren.

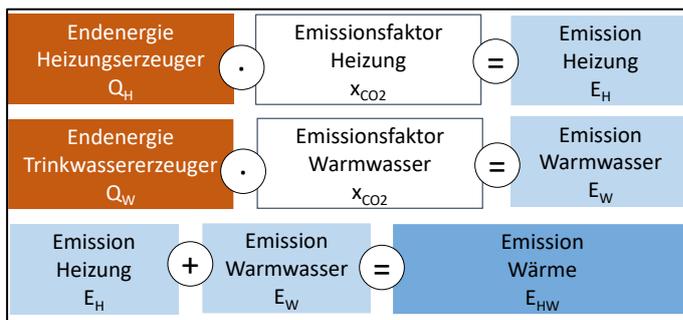


Abbildung 15 Berechnungsablauf Emissionen Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung]

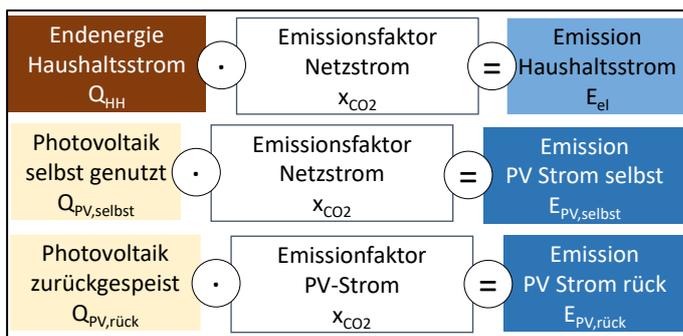


Abbildung 16 Berechnungsablauf Emissionen Strom [eigene Darstellung]

Anschließend werden der Haushaltsstrom, die selbst genutzte PV-Strommenge sowie die zurückgespeiste Menge zunächst einzeln bewertet, siehe Abbildung 16.

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 der Programmierung 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 17.

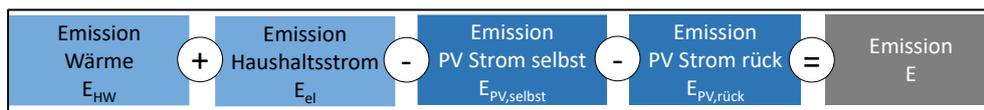


Abbildung 17 Berechnungsablauf gesamte Emissionen [eigene Darstellung]

Weitere Festlegungen zur ökologischen Bewertung sind in Kapitel 9 zu finden.

2.2.5 Bilanzierung der Energiekosten

Die Energiekosten für Heizung und Trinkwarmwasser werden anhand der jeweiligen Energiepreise zunächst separat berechnet. 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 18.

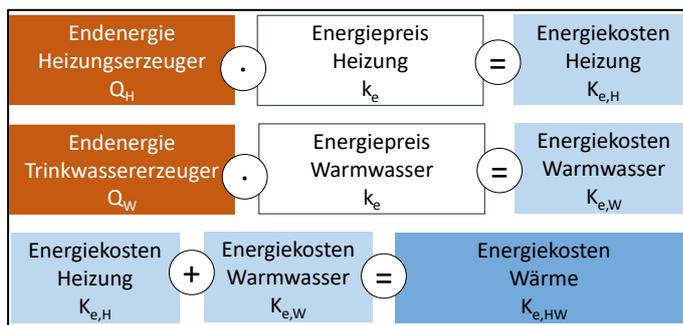


Abbildung 18 Berechnungsablauf Energiekosten Heizung und Trinkwarmwasser [eigene Darstellung]

Auch die Stromkosten für den Haushaltsstrom werden zunächst in absoluter Höhe bestimmt, unabhängig davon, ob eine Photovoltaikanlage vorhanden ist oder nicht, siehe Abbildung 19. 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.

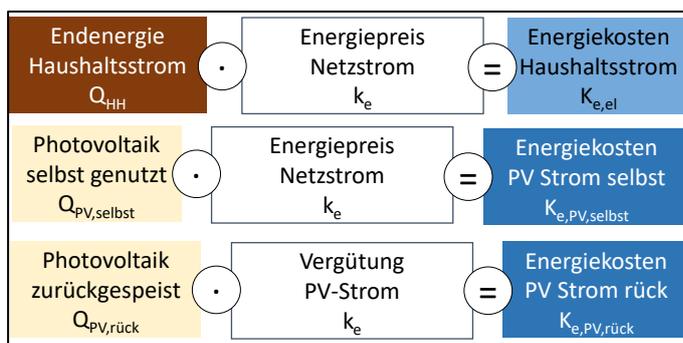


Abbildung 19 Berechnungsablauf Energiekosten Strom [eigene Darstellung]

In der finalen Energiekostenbilanz nach Abbildung 20 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.

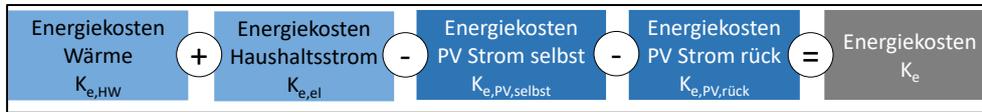


Abbildung 20 Berechnungsablauf gesamte Energiekosten [eigene Darstellung]

Weitere Festlegungen zu der wirtschaftlichen Bewertung sind Kapitel 10 zu entnehmen.

2.3 Ergebnisauswertung für ein Gebäude

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

2.3.1 Jahreskostenüberschuss oder -fehlbetrag

Die Energiekosten (K_e) werden aus Endenergien (Q_E) und Energiepreisen (k_e) bestimmt.

- 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. Alle Bestandteile einer Modernisierung, welche nicht genauso langlebig sind wie der Betrachtungszeitraum, werden entweder mehrfach benötigt oder haben einen Restwert. Beide Fälle werden über lineare Umrechnungen abgebildet. Es gelten die festgelegten Nutzungsdauern (m).

- Kapitalkosten: $K_i = a_{p,n} \cdot I \cdot \frac{n}{m}$ (für Mischinvestitionen 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 dargelegt.

Die Wartungs- und Unterhaltskosten (K_u) werden standardmäßig 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 Mischinvestitionen 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 21. Sofern die Summation dieser drei Anteile nach der Modernisierung (mittlerer Balken in Abbildung 21) bereits geringer sind als die Energiekosten vorher (unterer Balken Abbildung 21), ist eine Wirtschaftlichkeit gegeben. Das dargestellte schematische Beispiel zeigt einen solchen Fall nicht.

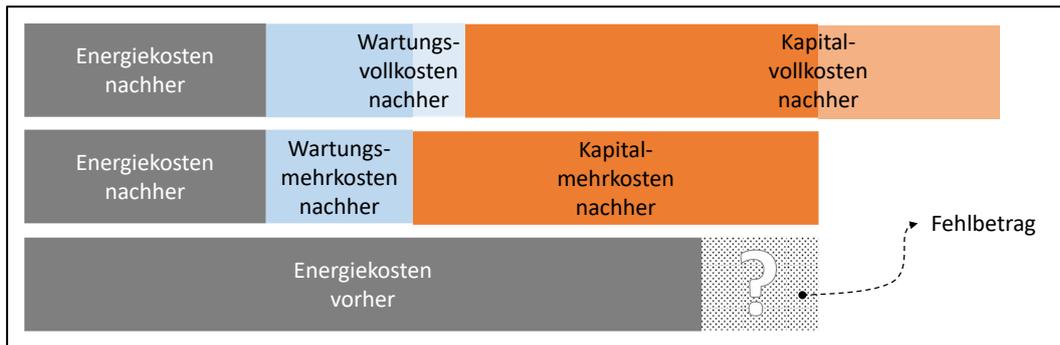


Abbildung 21 Gesamtkostenauswertung sowie Mehrkostenauswertung [eigene Darstellung]

Sofern sich keine geringeren Gesamtkosten einstellen, ergibt sich ein Fehlbetrag, der anderweitig kompensiert werden muss. Dies wird nachfolgend erläutert.

2.3.2 Ausgleich durch Subvention

Abbildung 22 zeigt die erste Option zur Kompensation des Fehlbetrags: eine Bezuschussung der Investition bis zur rechnerischen Kostengleichheit. Die Kapitalkosten vermindern sich entsprechend.

Die Berechnung 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 22 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 22 schraffiert) ermitteln:

- $K_{i2}^* = K_{i2} - K_{i,Förderung}$ bzw. $K_{i,Förderung} = K_{i2} - K_{i2}^*$

Daraus ergibt sich auch die Förderquote ($f_{\text{Förderung}}$):

- $f_{\text{Förderung}} = \frac{K_{i,\text{Förderung}}}{K_{i2}}$

Beispiel: anhand der obigen Grafik könnten Praxisergebnisse wie folgt lauten: Energiekosten vorher von $K_{e1} = 1500 \text{ €/a}$ stehen Energiekosten nachher von $K_{e2} = 600 \text{ €/a}$ gegenüber. Allerdings werden Kapitalkosten nachher von $K_{a2} = 1200 \text{ €/a}$ bestimmt. Damit liegen die Gesamtkosten nachher bei $600 + 1200 = 1800 \text{ €/a}$. Es zeigt sich ein Fehlbetrag von $1800 - 1500 = 300 \text{ €/a}$. Dieser muss ausgeglichen werden. Dieses entspricht der notwendigen Förderung $K_{i,\text{Förderung}}$. Der Fördermittelanteil beträgt somit:

- $f_{\text{Förderung}} = \frac{300 \text{ €/a}}{1200 \text{ €/a}} = 0,25$

2.3.3 Ausgleich durch Emissionspreis

Abbildung 23 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 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.

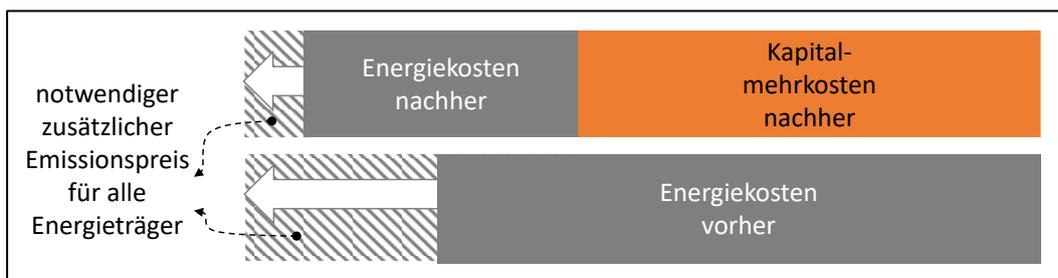


Abbildung 23 Ausgleich der Fehlkosten durch zusätzliche Emissionspreise [eigene Darstellung]

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 23 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 unbekanntem Emissionspreis k_{em} .

- $K_{CO2} = E \cdot k_{em}$

Daher lässt sich die obige Gleichung wie folgt umstellen:

$$\bullet \quad K_{CO_2,1} - K_{CO_2,2} = E_1 \cdot k_{em} - E_2 \cdot k_{em} = k_{em} \cdot (E_1 - E_2) = (K_{e2} + K_{i2}) - K_{e1}$$

Für den Emissionspreis gilt daher:

$$\bullet \quad k_{em} = \frac{(K_{e2} + K_{i2}) - K_{e1}}{E_1 - E_2} = \frac{K_{i2} + (K_{e2} - K_{e1})}{E_1 - E_2}$$

Auf die Einberechnung einer weiteren Energiepreisverteuerung wird 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 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) sich 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 $K_{e1} = 1500 \text{ €/a}$ stehen Energiekosten nachher von $K_{e2} = 600 \text{ €/a}$ gegenüber. Die Kapitalkosten nachher liegen bei $K_{a2} = 1200 \text{ €/a}$.

Unterstellt wird derselbe Energieträger, z. B. Erdgas. Bei dem Erdgaspreis von $0,06 \text{ €/kWh}$ 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 $0,208 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ bewertet).

$$\bullet \quad k_{em} = \frac{(600 + 1200) \text{ €/a} - 1500 \text{ €/a}}{(5200 - 2080) \text{ kg/a}} = 0,096 \text{ €/kg} = 96 \text{ €/t}$$

Mit dem Wert würde der Energieträger Erdgas entsprechend $0,096 \text{ €/kg} \cdot 0,208 \text{ kg/kWh}$ mehr kosten. Das sind $0,02 \text{ €/kWh}$. Der Erdgaspreis würde dann nicht mehr bei $0,06 \text{ €/kWh}$ liegen, sondern bei $0,08 \text{ €/kWh}$. Entsprechend wurde das Gebäude unsaniert modifizierte Energiekosten haben von $25.000 \text{ kWh/a} \cdot 0,08 \text{ €/kWh} = 2000 \text{ €/a}$. 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.

2.3.4 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.

$$\bullet \quad k_{CO_2} = \frac{(K_{i2} - K_{i1}) + (K_{u2} - K_{u1})}{E_1 - E_2}$$

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 CO₂-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.

2.4 Berechnungsablauf für den Gesamtbestand

Die Energiebilanzierung folgt dem in Kapitel 2.1 erläuterten Schema der Einzelgebäude. Es werden je ein EZFH und ein MFH mit durchschnittlichen Eigenschaften bilanziert und der Gesamtbestand anhand der vorhandenen Stückzahl der Gebäude bestimmt (Modell: Vervielfältigung der Typgebäude).

Hinweis: für andere Zeitpunkte als heute (2035 und 2050) und je nach Sanierungsaktivität bis dahin (ambitioniert oder beschleunigt) ergeben sich andere Typgebäudeeigenschaften. Damit ist für den Gesamtbestand eine Verbesserung feststellbar, nicht nur für das Einzelgebäude.

3 Typgebäude

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. 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 [8]. 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 [8].

Die Vielfalt der Bestandsgebäude lässt sich verdichten zu Typgebäuden. Die 2 Gebäudetypen (EZFH und MFH) der Excelanwendung sind aus den Beispielgebäuden der Studie „Zielerreichungsszenario 2013“ von Diefenbach et al. [9] erzeugt worden. Eine Anpassung an die aktuellen Zahlen des statistischen Bundesamtes zur Entwicklung des Gebäudebestandes [10] hat stattgefunden.

3.1 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 [11] sein, weil Gebäude dieser Altersklasse die größte Einzelgruppe unter den Ein- und Zweifamilienhäusern sind. Eine beispielhafte Visualisierung zeigt Abbildung 24.



Abbildung 24 Beispielhaftes Ein- und Zweifamilienhaus [eigenes Bild]

3.2 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 [11] sein, weil Gebäude dieser Altersklasse die größte Einzelgruppe unter den Mehrfamilienhäusern sind. Eine beispielhafte Visualisierung zeigt Abbildung 25.



Abbildung 25 Beispielhaftes Mehrfamilienhaus [eigenes Bild]

3.3 Bilanzranddaten und Eigenschaften der Typgebäude

Die zugehörigen Daten der Belegung, Größe, Gebäudehülle und Anlagentechnik sind Tabelle 1 zu entnehmen. Weitere Eigenschaften, z. B. die Qualitäten der Hülle und die Effizienzen der Erzeuger werden in den Kapiteln 5 ff. benannt.

		EZFH		MFH	
Gesamtfläche	[m ²]	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	[m ² /G]	141,6		470,0	
Wohneinheiten	[WE/G]	1,2		6,8	
Personenbelegung	[P/G]	2,74		12,18	
pro-Kopf-Wohnfläche	[m ² /P]	51,6		38,6	
Gebäudehülle des Einzelobjektes					
Wand	[m ² /G]	145,3		343,5	
Dach/Obere Geschossdecke	[m ² /G]	108,2		208,7	
Boden/Kellerdecke	[m ² /G]	88,7		180,7	
Fenster	[m ² /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
Holzessel	[-]	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 1 Beschreibung des Typ-EZFH und des Typ-MFH [eigene Darstellung]

Dargestellt ist der Zustand 2020. Die Sanierung führt zu veränderten Häufigkeiten. Werte für 2035 und 2050 sind im Kapitel 11 zu finden.

4 Klimaranddaten

4.1 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) [12].

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.

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: $16 \frac{d}{a} + 16,7 \frac{d}{a} \cdot \vartheta_{HG} [^{\circ}C]$
- mittlere Außentemperatur in der Heizperiode: $-1,8^{\circ}C + 0,54^{\circ}C \cdot \vartheta_{HG} [^{\circ}C]$

Die Globalstrahlung auf die Gebäudehülle wurde auf Basis der Datenerhebung des IWU von 2001 angenähert [6]. Abhängig von der Heizgrenztemperatur (und damit der Länge der Heizperiode) wurde für die Fensterausrichtung „Ost/West“ folgender Zusammenhang zugrunde gelegt:

- Globalstrahlung: $-427 \frac{kWh}{m^2a} + 62 \frac{kWh}{m^2a} \cdot \vartheta_{HG} [^{\circ}C]$

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.

4.2 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.

4.3 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. Praxisbeobachtungen [13] [14] 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“, ergibt sich folgende Näherung:

- Heizgrenztemperatur: $13,3\text{ °C} + 1,14\text{ °C} \cdot h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$

4.4 Variante „Klimaerwärmung“

Anstelle der mittlere Außentemperaturen des Zeitraumes 1.1.1990 bis 31.12.2019 des Deutschen Wetterdienstes [12], welche der Exceltabelle im Allgemeinen zugrunde liegen, wird ein modifizierter Datensatz verwendet.

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 2. 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.

Heizgrenze	1980 - 2009		1990 - 2019		2020 - 2049 (Fortschreibung)	
	$\vartheta_{a,m}$ [°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 2 Modifizierter Außentemperaturdatensatz [eigene Darstellung]

Wird diese Erkenntnis über die Jahrzehnte fortgeschrieben, ergeben sich die rechts in Tabelle 2 dargestellten Werte. Sie werden analog der sonstigen Vorgehensweise auch, zunächst durch Regressionsformeln abgebildet und anschließend für die Berechnung verwendet.

- Heizperiodendauer: $-8 \frac{\text{d}}{\text{a}} + 16,7 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot \vartheta_{HG} [\text{°C}]$
- mittlere Außentemperatur in der Heizperiode: $-1,4\text{ °C} + 0,54\text{ °C} \cdot \vartheta_{HG} [\text{°C}]$

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 nicht modifiziert.

5 Nutzungsranddaten

5.1 Personenbelegung der Gebäude

Basis aller Überlegungen sind die Typgebäude des IWU aus dem Jahr 2013 [9]. Allerdings sind seit der Veröffentlichung neuere Zahlen zur Bevölkerung (81,8 Mio. Personen) sowie der Gesamtwohnfläche (3,754 Mrd. m²) verfügbar aus Zensus 2018 [10].

Sowohl der Wohnflächenzuwachs als auch die Bevölkerungsentwicklung seit der Bearbeitung der zitierten Studie werden daher 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 Kapitel 3.3 zu entnehmen.

5.2 Mittlere Innentemperatur

Als typische Innentemperatur innerhalb der beheizten Bereiche des Gebäudes wird 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. Nachtabenkung) sowie der räumlichen Teilbeheizung (abhängig von der Belegungsdichte). Beide Einflüsse wirken unterschiedlich – je nach Baustandard.

Für die Berechnung wurde der Ansatz von Loga et al. aus der Energiebilanztoolbox [6] 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, wird für die Programmierung aus demselben Ansatz eine Temperaturkorrektur abgeleitet. 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: $0,006 \text{ K} \cdot \left(\frac{A_{\text{Wohn}}}{P} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{P}} \right] \right)^{1,4} \cdot \left(h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \right)^{0,4}$

Für ein durchschnittliches Bestandsgebäude ($h = 2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und $45 \text{ m}^2/\text{P}$) 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 ($h = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und $30 \text{ m}^2/\text{P}$) ergibt sich 0,6 K (20,4°C). In einem unsanierten Altbau, von einem Ehepaar allein bewohnt ($h = 3,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und $80 \text{ m}^2/\text{P}$) 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.

5.3 Personenbezogener Luftwechsel

Abhängig von der Belegung ergibt sich der Luftwechsel. Es wird ein personenbezogener Wert von $25 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{P})$ angenommen. Dies basiert auf einem typischen Auslegungswert nach Schulze-Darup und Albers von 30 bis $40 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{P})$ [15] [16], 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 (siehe Kapitel 6.6) addiert.

5.4 Personenbezogener Haushaltsstrombedarf und interne Wärmegewinne

Der personenbezogene Haushaltsstrombedarf wird nach den Zahlen der AGEb [17] 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 wird dazu ggf. als variable Komponente ausschließlich der Ventilatorstromaufwand einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung addiert.

Es wird nach 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 [6].

5.5 Personenbezogener Warmwasserbedarf

Der Warmwasserbedarf je Person wird an die Zahlen des großen Messdienstleisters Techem [18] [19] angelehnt. 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.

5.6 Variante „sparsamer Wasserverbrauch“

Neuere Messungen zeigen vermehrt eine fallende Tendenz für den Kennwert, beispielsweise Untersuchungen in Gebäuden der Wohnungswirtschaft [20]. 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 [21], aber auch co2online, ECOFYS und dem Messdienstleister ISTA [22] 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 Kapitel 4.4). 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.).

6 Randdaten des Baukörpers

6.1 Hüllflächen

Die Hüllflächen sind in Kapitel 3.3 dokumentiert.

6.2 Wärmedurchgangskoeffizienten

Tabelle 3 zeigt die Qualitäten der Gebäudehülle und die Häufigkeit des Vorkommens im Bestand. Grundlage sind die Daten zweier IWU-Studien [9] [23]. Da seit der Datenerhebung bereits etwa ein Jahrzehnt vergangen ist, wird der Sanierungszustand entsprechend fortgeschrieben (mit einer Sanierungsrate von 1 %/a).

Die in Tabelle 3 ebenfalls vermerkten Zielzustände ergeben sich unter Berücksichtigung der Empfehlungen des Passivhausinstitutes und der Einzelmaßnahmenförderung der KfW bzw. der EnSanMV [24]. Ein Abgleich mit anderen Studien ist ebenso erfolgt, z. B. mit der „Tabula“-Studie des IWU [11], der Studie zum Dämmpotential von Jochum et al. [25] und der Studie zur Sektorenkopplung von AGORA [26].

Es handelt sich somit um best practice-Zielwerte. Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese in allen Gebäuden im Zuge einer Sanierung umgesetzt werden können (Stichwort: erhaltenswerte Fassade, Innendämmung, begrenzte Höhe von Kellern usw.).

	Ein- und Zweifamilienhaus				Mehrfamilienhaus			
	Außenwand	Fenster	Dach/ obere Ge- schossde- cke	Kellerde- cke/ Bo- denplatte	Außenwand	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 3 Sanierungszustand und Qualitäten der Gebäudehülle im Bestand sowie Zielzustand [eigene Darstellung]

6.3 Wärmeleitfähigkeit

Die zusätzliche Dämmdicke zur Erreichung einer verbesserten Dämmung von Bauteilen wird berechnet mit einer Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes von $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$.

6.4 Wärmebrücken

Der Effekt von Wärmebrücken ist abhängig vom sonstigen Baustandard der Hüllbauteile. In den Berechnungen wird eine Näherungsformel verwendet. Sie verwendet den mittleren hüllflächenbezogenen Transmissionswärmeverlust H_T' („mittlerer U-Wert“) als Eingangsgröße. Je besser der Baukörper ist – ausgehend vom genannten schlechtesten Wert), desto höher fallen Wärmebrückenzuschläge nach dem genannten Ansatz aus.

- mit Optimierung: $0,03 - 0,02 \cdot H_T' \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
- ohne Optimierung: $0,07 - 0,05 \cdot H_T' \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$

Die für die Berechnung verwendeten Werte sind insgesamt nur etwa halb so groß wie die pauschalen Wärmebrückenzuschläge der EnEV-Normen [1] [7].

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.

Für die bei der Programmierung 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 nicht bekannt. Die entsprechenden Versuche von co2online im Rahmen des Projektes „Sanierungswirkung“ waren nicht geeignet, da es zu viele weitere Einflüsse gibt [27]. Allerdings sind die Zuschläge auf der ungünstigen Seite liegend gewählt.

6.5 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 Geschosdecke)

Die Werte ergeben sich innerhalb der Bandbreiten der EnEV-Normen [1] [7] [5] bzw. des IWU „Energiepass Heizung/Warmwasser“ [6], wobei die große dort verfügbare Detailtiefe entsprechend vereinfacht wurde.

6.6 Infiltration

Abhängig von der durchgeführten Qualitätssicherung (dichte Bauweise) werden Luftwechsel aus Infiltration angesetzt. Für ein dichtes Gebäude wird eine verminderte Infiltration angesetzt. Die für die Berechnungen gewählten Ansätze folgen der Bewertung des IWU im „Energiepass Heizung/Warmwasser“ [2] sowie den EnEV-Wohnbau-Normen [1] [7].

- mit Optimierung: $0,1 \text{ h}^{-1}$
- ohne Optimierung: $0,2 \text{ h}^{-1}$

Der Infiltrationsluftwechsel ist dabei nur ein Teil des Gesamtluftwechsels, welcher zusätzlich den Nutzereinfluss (siehe Kapitel 5.3) 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 nicht bekannt. Da sich im realen Gebäude der Effekt der Dichtheit mit dem Nutzerverhalten überlagert (vgl. auch die Ansätze in der DIN V 18599 [1]), wäre ein messtechnischer Nachweis über Stichproben auch stark eingeschränkt möglich.

6.7 Energiedurchlassgrad der Fenster und Abminderung

Der Energiedurchlassgrad der Fenster ist näherungsweise abhängig von dessen Wärmedurchgangskoeffizienten. In den Berechnungen wird eine Näherungsformel verwendet. Sie leitet sich aus Typologiewerten nach Loga ab [2] [6]. 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 [7] und des IWU-Energiepass' [2]).

- Energiedurchlassgrad: $0,42 + 0,1 \cdot U \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$

6.8 Fremdwärmenutzungsgrad

Es wird kein Fremdwärmenutzungsgrad angesetzt. Die Effekte nicht nutzbarer Fremdwärme sind in dem Zuschlag für Qualitätssicherung, siehe Kapitel 7.13 enthalten.

7 Randdaten der Wärmeversorgung

7.1 Übergabeverluste

Es werden keine separaten Aufschläge für die Regelgüte der Raumregelung angesetzt. Die Effekte sind in dem Zuschlag für Qualitätssicherung enthalten, siehe Kapitel 7.13.

7.2 Typische Leitungslängen

Die Wärmeabgabe von Heizungsleitungen wird nur dann als Verlust 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).

7.2.1 Zentrales Trinkwarmwassernetze

Für die Berechnungen wird das Verteilnetz für die Trinkwassererwärmung wie folgt eingeschätzt [28] [29]:

- 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 Kapitel 3.3 beschrieben. Als Mehrfamilienhäuser ohne Zirkulation, jedoch mit zentraler Versorgung, werden beispielsweise Gebäude mit Etagenheizung aufgefasst.

7.2.2 Dezentrale Trinkwarmwassernetze

Für die Berechnungen wird das dezentrale Verteilnetz für die Trinkwassererwärmung im beheizten Bereich des Gebäudes wie folgt eingeschätzt [28] [29]:

- 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 Kapitel 3.3 beschrieben.

7.2.3 Heizungsrohrnetze

Für die Berechnungen wird das Verteilnetz im unbeheizten Bereich des Gebäudes wie folgt eingeschätzt [28] [29]:

- Wärmedurchgangskoeffizient einer Heizungsleitung im Keller: 0,25 W/(mK)
- verlegte Verteilung 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. Stichwort „erzwungener Lüftungswärmeverlust“ [30]. Dieser Effekt wird in der Qualitätssicherung zusammen mit anderen Merkmalen dieser Art zusammengefasst, siehe Kapitel 7.13.

7.3 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 folgende Gleichungen:

- Vorlauftemperatur kältester Tag: $30,0^{\circ}\text{C} + 20,0^{\circ}\text{C} \cdot h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
- Vorlauftemperatur mittlerer Heiztag: $25,1^{\circ}\text{C} + 9,1^{\circ}\text{C} \cdot h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
- Systemtemperatur mittlerer Heiztag: $23,8^{\circ}\text{C} + 8,0^{\circ}\text{C} \cdot h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$

Für ein mittleres Gebäude des bundesdeutschen Bestandes und $h = 2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 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 $h = 1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf 50°C und 34°C (maximale und mittlere Vorlauftemperatur) bzw. 32°C (mittlere Systemtemperatur).

7.4 Auslegungs- und mittlere Netztemperaturen bei Flächenheizungen

Die für Heizkörperheizungen o.g. prinzipiellen Zusammenhänge gelten entsprechend auch für Flächenheizungen, jedoch mit geringeren Temperaturen. Es gelten folgende Gleichungen:

- Vorlauftemperatur kältester Tag: $29,8^{\circ}\text{C} + 7,0^{\circ}\text{C} \cdot h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
- Vorlauftemperatur mittlerer Heiztag: $25,0^{\circ}\text{C} + 3,2^{\circ}\text{C} \cdot h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
- Systemtemperatur mittlerer Heiztag: $23,4^{\circ}\text{C} + 3,1^{\circ}\text{C} \cdot h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$

7.5 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 [31].

Für die mittlere Temperatur in Leitungen ohne Zirkulation wird bei mäßiger Zapfhäufigkeit eine Temperatur von 30°C angenommen [31].

7.6 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). Es 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 Kapitel 7.10 zu finden.

7.7 Wärmeverluste von Speichern

Für alle Speicher gleichermaßen wird ein Bewertungsansatz abhängig vom Volumen gewählt. Die Grunddaten entstammen Voruntersuchungen des IWU [2]. 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 lautet:

- 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 ungedämmte Anschlussstutzen und Armaturen mit 50 % Aufschlag [31].

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.

7.8 Effizienzbewertung von Kesseln, Fernwärme und Direktheizung

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. Nachfolgende Tabelle 4 fasst die Annahmen zusammen, die für die Berechnung gewählt wurden.

Effizienzangaben für die Hauptwärmeerzeuger, ggf. brennwertbezogen, in [-]			
	Qualitätssicherung:	mit	ohne
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 4 Effizienzen der Haupterzeuger mit und ohne Qualitätssicherung [eigene Darstellung]

Für alle elektrischen Direktversorgungen (Direktheizung, Durchlauferhitzer, Heizstab im Speicher) wird eine Effizienz von 100 % angesetzt.

Die Daten stammen aus verschiedenen Studien [32] [13] [33] [19] [34] [35] [36].

7.9 Effizienzbewertung der Wärmepumpen

7.9.1 Arbeitszahl

Die Wärmepumpenbewertung erfolgt 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
- Senktemperatur 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):
$$\zeta_{ex} \cdot \frac{273 \text{ K} + \vartheta_{Senke} + 2 \text{ K}}{(\vartheta_{Senke} + 2 \text{ K}) - (\vartheta_{Quelle} - 6 \text{ K})}$$

Dabei werden die Untertemperatur am Verdampfer mit -6 K (Kältemittel ist geringer temperiert als Wärmequelle) und die Übertemperatur am Kondensator mit +2 K (Kältemittel ist höher temperiert als Wärmeabnehmer) angenommen.

Für Erdreichwärmepumpen werden als Hilfsgröße exergetische Nutzungsgrade festgelegt. Der Effekt einer Qualitätssicherung wird positiv berücksichtigt.

- mit Qualitätssicherung: $\zeta_{ex} = 0,39$
- ohne Qualitätssicherung: $\zeta_{ex} = 0,34$

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.

7.9.2 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. Es 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: $0,824 - 0,0353 \cdot \vartheta_{biv} [^{\circ}\text{C}] - 0,0016 \cdot \vartheta_{biv}^2 [^{\circ}\text{C}]$

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.

7.9.3 Umrechnung von Antriebs- und Wärmeleistungen

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 -2°C, 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 [16]. Der Vorlauftemperatureinfluss auf die elektrische Kompressorleistung wird wie folgt angenähert:

- Leistungsfaktor f_{komp} : $0,3636 + 0,0182 \vartheta_v$ [°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)
<ul style="list-style-type: none"> • Vorlauftemperatur: 35°C • Quellentemperatur: 0°C • $COP_{Prüf}$ (mit Qualitätssicherung): 2,81 	<ul style="list-style-type: none"> • 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.

7.9.4 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: $JAZ_{WP+el} = \frac{1}{\frac{0,89}{2,8} + \frac{0,11}{1}} = 2,34$

7.10 Hybridanlagen

Hybridanlagen werden hinsichtlich ihrer Energiebilanz in der Programmierung als reine Wärmepumpenanlagen berechnet. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Deckungsanteil der Wärmepumpe ergebnisrelevant ist.

7.11 Solarthermie

Die Berechnungen 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 [16].

Der Ertrag einer solarthermischen Anlage für die Trinkwassererwärmung in der o.g. Dimensionierung liegt in folgender typischer Größenordnung [33] [37]. Dabei wird die gesamte Bandbreite von in der Praxis festgestellten Erträgen in zwei Kategorien unterteilt:

- Solarertrag mit Qualitätssicherung: 360 kWh/(m²_{Koll} · a)
- Solarertrag ohne Qualitätssicherung: 320 kWh/(m²_{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 das gewählte Wertepaar die Praxis und auch den Einfluss der Qualitätssicherung realitätsnah ab.

7.12 Lüftungsanlage mit WRG

Für die Bewertung der Effizienz wird in Anlehnung an die EnEV-Normen [5] 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) [1]. Ein Anlagenbetrieb wird nur innerhalb der Heizperiode angenommen (als Dauerbetrieb).

Nur die Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung werden energetisch relevant in der Wärmebilanz berücksichtigt. Dies folgt dem Vorgehen auch anderer Studien, z. B. der Untersuchung von Jochum et al. zur Dämmbarkeit des Gebäudebestandes [25].

7.13 Qualitätssicherung der Peripherie

Den Einfluss der Qualitätssicherung auf die Erzeugung (Kessel, Wärmepumpen, Solarthermie) beschreiben die Kennwerte in Kapitel 7.8 bis 7.11.

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 [38]), 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.

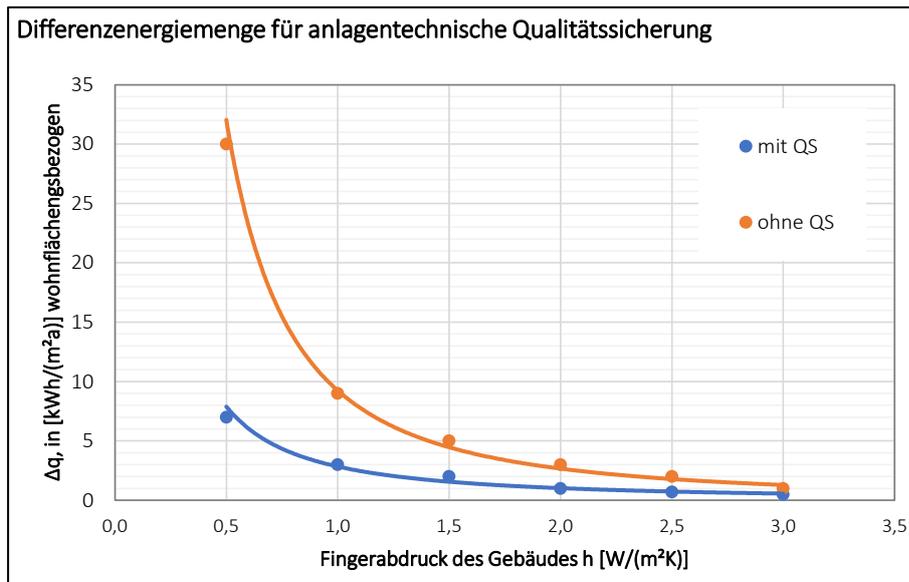


Abbildung 26 Differenzenergiemenge für anlagentechnische Qualitätssicherung [eigene Darstellung]

Der in Abbildung 26 dargestellte Zusammenhang wird in der Berechnung durch folgende Näherungsfunktionen, ausgehend vom Baustandard bzw. „Fingerabdruck des Gebäudes“ angenähert:

- mit Qualitätssicherung: $2,8 \frac{kWh}{m^2a} \cdot \left(h \left[\frac{W}{m^2K}\right]\right)^{-1,5}$
- ohne Qualitätssicherung: $9,2 \frac{kWh}{m^2a} \cdot \left(h \left[\frac{W}{m^2K}\right]\right)^{-1,8}$

Für das durchschnittliche Mehrfamilienhaus im Bestand mit $h = 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ liegt der Wert bei $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ im nicht qualitätsgesicherten Zustand und kann auf $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ 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 $h = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ liegen die Werte bei 4 bzw. $14 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der Vorteil der Qualitätssicherung ergibt sich zu $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Die Zahlen basieren auf den vorher genannten Studien zur Optimierung [13] [39] [40] [41] [42].

8 Randdaten der Elektroenergiebilanz

8.1 Haushaltsstrom

Die Randdaten zur Bewertung des Haushaltsstroms sind in Kapitel 5.4 zusammengestellt.

8.2 Erträge der Photovoltaik

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 [1]. Aus heutiger Sicht ist er im oberen Bereich tatsächlich gemessener Effizienzen angesetzt. Die erscheint 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. Die Umrechnung 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.

8.3 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: $-0,24 \cdot \ln\left(\frac{P_{pk}[\text{kWp}]}{Q_{el}[\frac{\text{kWh}}{\text{a}}]}\right) - 1,32$

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 [43], bei dem die Haushaltsstromdeckung mit etwa 25 % beziffert wird. Die Anlage ist jedoch etwas kleiner dimensioniert (etwa genauso viel Strom wird produziert wie benötigt).

8.4 Selbstnutzungsquote von PV-Strom für Heizung

Abbildung 27 zeigt schematisch das Rechenmodell für die Nutzung von PV-Strom zur Gebäudeheizung.

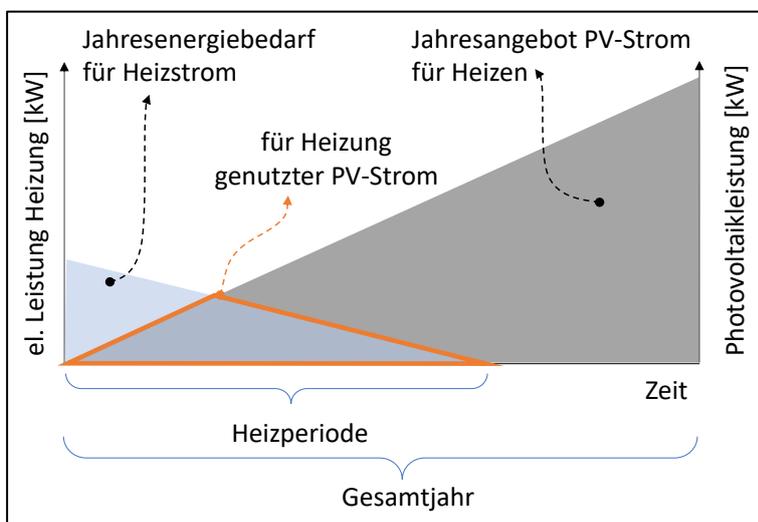


Abbildung 27 Schematische Darstellung des Näherungsmodells für PV-Heizstromnutzung [eigene Darstellung]

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.

8.5 Pauschale Selbstnutzungsquote von PV-Strom

Wird ein einzelnes Gebäude berechnet, kann die Nutzung des erzeugten PV-Stroms detailliert ermittelt werden.

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. Es wird von 10 % Selbstnutzung des Stroms ausgegangen.

9 Ökologische Bewertung

Es erfolgt eine Bewertung der fossilen Primärenergie sowie der äquivalenten CO₂-Emissionen mit Hilfe der in Tabelle 5 dargestellten Faktoren. Sie sind heiz- und brennwertbezogen angegeben, wobei im Rahmen der Programmierung die brennwertbezogenen Werte zum Einsatz kommen.

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 5 Emissionsfaktoren und Primärenergiefaktoren, eigene Zusammenstellung (unter Berücksichtigung von [44] [1] [45])

Der Wert für Strom ist eine Mittelwertbildung der beiden vom UBA 2020 [45] 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 [46] wird für die gebäudenahere oder gebäudeintegrierte Solarthermie sowie die Photovoltaik 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 [47].

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.

10 Ökonomische Bewertung

10.1 Investitionskosten

Tabelle 6 fasst die Kostenfunktionen zusammen. Darüber hin aus ist ein Anteil von „Sowiesokosten“ angegeben. Basis der Zahlen sind verschiedene Studien aus der Literatur [48] [49] [14] [20] [50] [51] [26] [52] [51] [14] [53] [54] [26] [55].

Mit den Bruttokostenfunktionen (zzgl. des Aufschlags von 30 % für die Kostengruppe 700) kann eine Bewertung in der Mikroebene erfolgen.

Bei der Kostenschätzung 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.

Komponente	Vollkosten (ohne KG 700)	Sowiesokosten (ohne KG 700)	
bauliche Maßnahmen			
Außenwanddämmung	$K [€] = A [m^2] \cdot (90 + 2,9 \cdot d [cm])$	$K [€] = A [m^2] \cdot 60$	
Steildachdämmung	$K [€] = A [m^2] \cdot (170 + 2,0 \cdot d [cm])$	$K [€] = A [m^2] \cdot 140$	
Flachdachdämmung	$K [€] = A [m^2] \cdot (140 + 2,4 \cdot d [cm])$	$K [€] = A [m^2] \cdot 110$	
Dachdämmung allgemein	$K [€] = A [m^2] \cdot (155 + 2,2 \cdot d [cm])$	$K [€] = A [m^2] \cdot 125$	
Fenster austausch	$K [€] = A [m^2] \cdot (870 - 370 \cdot U [W/m^2K])$	$K [€] = A [m^2] \cdot 389$	
Oberste Geschossdecke	$K [€] = A [m^2] \cdot (30 + 2,0 \cdot d [cm])$	$K [€] = 0$	
Kellerdecke	$K [€] = A [m^2] \cdot (45 + 1,5 \cdot d [cm])$	$K [€] = 0$	
Bodenplatte	$K [€] = A [m^2] \cdot (100 + 4,0 \cdot d [cm])$	$K [€] = 0$	
grundsätzliche Anlagentechnik			
Gas- und Heizölkessel	$K [€] = \dot{Q}_{th} [kW] \cdot (1600 \cdot \dot{Q}_{th} [kW]^{-0,45})^*$	$K [€] = \dot{Q}_{th} [kW] \cdot (1600 \cdot \dot{Q}_{th} [kW]^{-0,45})$	
Biomassekessel	$K [€] = \dot{Q}_{th} [kW] \cdot (4000 \cdot \dot{Q}_{th} [kW]^{-0,45})^*$		
Erdreichwärmepumpe	$K [€] = \dot{Q}_{th} [kW] \cdot (3800 \cdot \dot{Q}_{th} [kW]^{-0,20})^*$		
Außenluftwärmepumpe	$K [€] = \dot{Q}_{th} [kW] \cdot (4000 \cdot \dot{Q}_{th} [kW]^{-0,40})^*$		
Wärmenetzanschluss	$K [€] = \dot{Q}_{th} [kW] \cdot (1800 \cdot \dot{Q}_{th} [kW]^{-0,65})^*$		
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	Q _{el} : elektrische Leistung	V: Volumen
A _{wohn} : Wohnfläche	L _{TR} : Trassenlänge	Q _{th} : Wärmeleistung	* Formel könnte vereinfacht werden

Tabelle 6 Kostenfunktionen (brutto) [eigene Darstellung]

10.2 Nutzungsdauer sowie Wartungs- und Unterhaltskosten

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 als auch die geringe Sanierungsrate der thermischen Hülle darauf hin, dass Bauprodukte aller Art eher langlebig sind.

Tabelle 7 zeigt die getroffenen Annahmen – als repräsentativer Mittelwert aus der Literatur [4] [56] [52] [57] [54] [58] [59] [25] [60] [61] [62] [51] [63].

Angegeben sind prozentuale Werte, die sich auf die Erstinvestitionssumme beziehen. Die Annahmen korrespondieren mit den Lebensdauern.

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.

	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 7 Instandhaltungskostenansätze von Bauprodukten und Nutzungsdauern [eigene Darstellung]

10.3 Betrachtungszeitraum und Nachinvestition bzw. Restwert

Im Rahmen der Berechnung wird der Betrachtungszeitraum von Wirtschaftlichkeitsbewertungen standardmäßig auf 30 Jahre festgelegt.

Als Nutzungsdauern gelten die Festlegungen aus Kapitel 10.2. 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 $\frac{2}{3}$ der Nutzungsdauer, daher werden auch $\frac{2}{3}$ der Investitionskosten wirksam angesetzt (Restwert $\frac{1}{3}$)
- 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 einigermäßen gleichen Entwicklungen unterworfen sind.

10.4 Preissteigerung der Bauprodukte oder Lernkurve für Bauprodukte

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 eine Änderung angenommen. Der Preisindex aller Investitionskosten liegt bei 1,0. Dies spiegelt – bis auf Wärmepumpen und Photovoltaik – gut das Marktgeschehen der letzten Jahre wider.

10.5 Kalkulatorischer Zins

Für die wird ein Wert von 2 %/a angesetzt.

10.6 Energiepreise und deren Preissteigerung

Tabelle 8 zeigt die Festlegungen für die Energieträgerpreise aus heutiger Sicht. Die Daten sind brennwertbezogen.

Energieträger	Energiepreis, Standardfall
	[€/kWh]
Erdgas	0,06
Heizöl	0,06
Holz	0,05
Fernwärme	0,09
Strom (Bezug, Normaltarif)	0,31
Strom (Bezug, Wärmepumpe)	0,22
Strom (Einspeisung)	0,09

Tabelle 8 Energieträgerpreise, brennwertbezogen [eigene Darstellung] [64] [65]

Aus der Entwicklung der Energiepreise ergibt sich eine nominale Energiepreissteigerung von etwa 3,0 bis 3,5 %/a für alle Energieträger gleichermaßen. Auf die Einberechnung einer Energiepreisverteuerung wird 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 berechneten Emissionspreis ergibt. Notwendige Effekte der Verteuerung oder Verbilligung einzelner Energieträger sind Ergebnisse der Untersuchung.

10.7 Variante „reformierte Energiepreise“

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 [17]. Darüber hinaus werden die heutigen Endverbraucherenergiepreise verwendet, wie sie vom BMWi für 2019 [64] bekannt gegeben wurden. Der dritte Eingangsdatenpunkt sind die heute typischen Emissionsfaktoren der einzelnen Energieträger, wie von IWU und UBA (siehe Kapitel 9) kommuniziert.

Die Energieträgerpreise werden 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“). Jeder Energieträger wird proportional zu seiner Emissionsmenge bepreist. Ausgenommen ist Holz, welches auf seinen heutigen Preis festgesetzt wird. Für die restlichen Energieträger liegt der sich ergebende Emissionspreis bei 418 €/t CO₂.

Tabelle 9 zeigt die Festlegungen für die Energieträgerpreise aus heutiger Sicht. Die Daten sind brennwertbezogen.

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

Tabelle 9 Energieträgerpreise, brennwertbezogen [eigene Darstellung] [64] [65]

11 Werte für 2035 und 2050

In der Programmierung sind Randdaten für 3 Zeitpunkte hinterlegt, der heutige Zustand mit Häufigkeiten bestimmter Merkmale sowie zwei zeitliche Szenarien: 2035 und 2050. Die Überlegungen, die zu den modifizierten Häufigkeiten führen, sind nachfolgend erläutert.

11.1 Bevölkerung und Wohnflächen

Das statistische Bundesamt prognostiziert in 30 verschiedenen Szenarien die Bevölkerungsentwicklung bis 2050 [10]. Für die Programmierung gilt der Mittelwert. Es wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass in jedem Jahr die pro-Kopf-Wohnfläche um 0,3 m²/Person zunimmt (vgl. Kapitel 3). Dies deckt sich mit den Beobachtungen des statistischen Bundesamtes. Der Nettowohnflächenzuwachs ergibt sich rechnerisch aus der Bevölkerungsentwicklung sowie dem pro-Kopf-Flächenbedarf. Er spiegelt sich auch im Neubau- und Abrissgeschehen wider. Die gewählte Abrissquote liegt bei 0,1 %/a für EZFH und 0,2 %/a für MFH [66]

Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse.

Gebäudeart	Einzelgröße		2020	2035	2050
EZFH	Personen	[Mio. P]	43,445	44,020	42,639
	pro-Kopf-WF	[m ² /P]	51,6	56,1	60,6
	Gesamtfläche	[Mio. m ²]	2.242,3	2.470,1	2.584,5
	Abriss	[Mio. m ²]	↳ $\frac{-33,6}{+261,4}$ ↑		↳ $\frac{-45,3}{+209,7}$ ↑
	Neubau	[Mio. m ²]			
MFH	Personen	[Mio. P]	38,372	38,880	37,661
	pro-Kopf-WF	[m ² /P]	38,6	43,1	47,6
	Gesamtfläche	[Mio. m ²]	1.511,4	1.675,7	1.792,6
	Abriss	[Mio. m ²]	↳ $\frac{-37,1}{+151,5}$ ↑		↳ $\frac{-50,3}{+167,2}$ ↑
	Neubau	[Mio. m ²]			

Tabelle 10 Prognose der Personenzahlen und Wohnflächen im Zeitverlauf [eigene Darstellung]

11.2 Sanierung des Baukörpers

Die Qualität der Außenhülle wird weiterhin in vier Klassen geteilt, deren konkrete Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) nicht verändert werden. Es gelten die Werte aus Kapitel 6.

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.

Tabelle 11 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.

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 11 Prognose des anteiligen Sanierungszustandes der Gebäudehülle [eigene Darstellung]

Das angenommene Modell geht davon aus, dass Maßnahmen nicht vorzeitig umgesetzt (vorgezogen) werden. Es werden nachfolgt die Annahmen zur Sanierung zwischen 2020 und 2035 (Periode I) sowie 2035 und 2050 (Periode II) erläutert.

11.2.1 Außenwand

Eine Sanierung erfolgt alle 45 Jahre. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) $\frac{1}{3}$ „gute“ und $\frac{2}{3}$ „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 $\frac{2}{3}$ Gebäude mit „schlechten“ und $\frac{1}{3}$ mit „mittleren“ Außenwänden (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wider)
- 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).

11.2.2 Oberste Geschossdecke

Eine Sanierung erfolgt alle 60 Jahre. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) $\frac{1}{3}$ „gute“ und $\frac{2}{3}$ „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 $\frac{2}{3}$ Gebäude mit „schlechten“ und $\frac{1}{3}$ mit „mittleren“ Geschossdecken (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wider)
- 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 $\frac{1}{3}$ der Geschossdecken „gut“ und $\frac{2}{3}$ „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).

11.2.3 Dach

Eine Sanierung erfolgt alle 45 Jahre. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) $\frac{1}{3}$ „gute“ und $\frac{2}{3}$ „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 $\frac{2}{3}$ Gebäude mit „schlechten“ und $\frac{1}{3}$ mit „mittleren“ Dächern (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wider)
- 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 $\frac{1}{3}$ der Dächer „gut“ und $\frac{2}{3}$ „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).

11.2.4 Kellerdecke

Eine Sanierung erfolgt alle 60 Jahre. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) $\frac{1}{3}$ „gute“ und $\frac{2}{3}$ „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 $\frac{2}{3}$ Gebäude mit „schlechten“ und $\frac{1}{3}$ mit „mittleren“ Kellerdecken (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wider)
- 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 $\frac{2}{3}$ der Kellerdecken „gut“ und $\frac{1}{3}$ „best“ (insbesondere die Restriktion der verfügbaren Deckenhöhe spielt bei dieser Annahme eine Rolle).

11.2.5 Bodenplatte

Eine Sanierung erfolgt alle 75 Jahre. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) $\frac{1}{3}$ „gute“ und $\frac{2}{3}$ „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 $\frac{2}{3}$ Gebäude mit „schlechten“ und $\frac{1}{3}$ mit „mittleren“ Bodenplatten (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wider)
- 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 $\frac{2}{3}$ der Bodenplatten „gut“ und $\frac{1}{3}$ „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).

11.2.6 Fenster

Eine Sanierung erfolgt alle 35 Jahre. Folgende Annahmen werden zur Marktentwicklung getroffen:

- der Neubau bewirkt in Periode (I) $\frac{1}{3}$ „gute“ und $\frac{2}{3}$ „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 $\frac{2}{3}$ Gebäude mit „schlechten“ und $\frac{1}{3}$ mit „mittleren“ Fenstern (die Verteilung spiegelt etwa die Bestandssituation wider)
- 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.

11.3 Technologieausbreitung der TGA

Die derzeit im Markt befindlichen Gebäude weisen eine definierte Verteilung von Erzeugern auf; vgl. die Beschreibung der Typgebäude in Kapitel 3. 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. Das Resultat dieser Annahmen zeigt Tabelle 12.

Das angenommene Modell geht davon aus, dass Maßnahmen nicht vorzeitig umgesetzt (vorgezogen) werden. Es werden nachfolgt die Annahmen zur Sanierung zwischen 2020 und 2035 (Periode I) sowie 2035 und 2050 (Periode II) erläutert.

Die Effizienzen der Erzeuger werden unverändert angenommen (vgl. Kapitel7).

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							
Trinkwassererwärmung	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 12 Prognose der anteiligen Technologieausbreitung der Haupt- und Zusatzerzeuger sowie Peripherie [eigene Darstellung]

11.3.1 Haupterzeuger

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 % Holzessel in Periode (I) und (II), Gasbrennwertkessel 24 % in Periode (I) vor, keine in Periode (II), der Rest sind jeweils Wärmepumpen (1/3 Erdreich, 2/3 Außenluft)
 - in MFH: 3 % Holzessel 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 (2/3 Erdreich incl. „kalte Fernwärme“, 1/3 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 ($\frac{1}{3}$ Erdreich, $\frac{2}{3}$ 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 ($\frac{2}{3}$ Erdreich incl. „kalte Fernwärme“, $\frac{1}{3}$ Außenluft)

11.3.2 Systeme der Trinkwassererwärmung

Eine Sanierung (hier alle 30 Jahre im Zusammenhang mit einer Sanierung des Leitungsnetzes) kann zum Systemwechsel 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
- 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

11.3.3 Übergabesysteme

Eine Sanierung (hier alle 40 Jahre) kann zum Systemwechsel 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 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.

11.3.4 Verteilungen im Keller

Fast ebenso aufwändig wie der Umbau von Heizkörper- zu Flächenheizung ist die Veränderung der Rohrnetzverlegung. 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.

11.3.5 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)

11.3.6 Solarthermie

Der nachträgliche Einbau einer Solarthermieanlage (Nutzungsdauer 25 Jahre) kann im Zusammenhang mit der anstehenden Sanierung des Trinkwarmwassernetzes erfolgen. Dennoch sind vor allem in Neubauten, bei denen ein Holzkessel zum Einsatz kommt, sinnvolle Einsatzbedingungen gegeben. 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)

11.3.7 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 werden nicht gesehen.

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 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 $\frac{2}{3}$ (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.

11.4 Nutzung von Photovoltaikstrom

Tabelle 13 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.

		Anteilige Verbreitung der Wärmepumpen			Nutzungsquote des erzeugten Stroms im Durchschnittsgebäude			
		ohne Wärmepumpe	Erdreichwärmepumpe	Außenluftwärmepumpe	ohne Wärmepumpe	Erdreichwärmepumpe	Außenluftwärmepumpe	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 13 Pauschale Nutzungsquote des Photovoltaikstroms in den Typgebäuden [eigene Darstellung]

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.

11.5 Investitionskosten und Kalkulationszins

Die Größen sind kaum prognostizierbar, zumal von Zeithorizonten bis 2050 ausgegangen wird. Die Daten werden auch in der langfristigen Betrachtung unverändert angenommen (Kapitel 10.1, 10.4, 10.5)

11.6 Energiepreise

Die Preisentwicklungen lehnen sich an die Vorschläge zur zukünftigen CO₂-Bepreisung 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 [67] zugrunde gelegt und unter Anpassungen in den zukünftigen Energiepreisen in Tabelle 14 berücksichtigt.

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 14 Prognose der brennwertbezogenen Energiepreise [eigene Darstellung]

11.7 Emissions- und Primärenergiefaktoren

Die Abschätzung der Emissions- und Primärenergie-Faktoren orientiert sich an den aktuellen Daten des UBA [68], an der Kurzstudie von Fritsche für die HEA [69] sowie an den Makro-Prognosen des DIW von 07/2020 [70].

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 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 15 Prognose der Emissions- und Primärenergiefaktoren [eigene Darstellung]

11.8 Variante „reformierte Energiepreise“

Die Energiepreise aus Kapitel 11.6 gelten nicht. Sie werden ersetzt durch die Werte nach Tabelle 16.

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 16 Prognose der Energiepreise für das Szenario 2 „Alternative Energiepreise“ [eigene Darstellung]

Die Preise für das Jahr 2020 werden bereits modifiziert, siehe Kapitel 10.7. 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 [67] 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.

11.9 Variante „Beschleunigte Sanierung“

Die beschleunigte Sanierung zielt auf die Einhaltung des Emissionsbudgets ab. Die Annahmen zur Entwicklung des Bestandes zwischen 2020 und 2050 (nach Kapitel 11.1 bis 11.7) reichen dazu nicht aus. Bauliche und anlagentechnische Maßnahmen müssen verbessert aufgeführt werden.

11.9.1 Suffizienzmaßnahmen

Die erste berücksichtigte Suffizienzmaßnahme ist ein künftig gebremster Wohnflächenzuwachs. Ausgangsbasis ist das Bevölkerungswachstum. Der Anstieg der pro-Kopf-Wohnfläche wird jedoch mit $0,1 \text{ m}^2 / (P \cdot a)$ festgelegt.

Darüber hinaus wird ein sparsameres Nutzerverhalten angenommen als im Kapitel 5 beschrieben. Es wird angenommen, dass:

- 2035: der pro-Kopf-Verbrauch für Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom 15 % geringer sind als 2020
- 2050: der pro-Kopf-Verbrauch für Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom 30 % geringer sind als 2020

11.9.2 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 $\frac{2}{3}$ „best“ und $\frac{1}{3}$ „gut“).

Die Nutzungsdauern für die Sanierung sind identisch, so dass die Sanierungsraten identisch sind (Häufigkeiten). Jedoch werden die Sanierungstiefen in beiden Zeitperioden (I) und (II) angepasst:

- Außenwand: (I) 70 % (II) 75 %
- Dach, Geschossdecke: (I) 80 % (II) 80 %
- Bodenplatte: (I) 80 % (II) 80 %
- Fenster: (I) 90 % (II) 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.

11.9.3 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 ($\frac{1}{3}$ Erdreich, $\frac{2}{3}$ 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 ($\frac{2}{3}$ Erdreich incl. „kalte Fernwärme“, $\frac{1}{3}$ 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 ($\frac{1}{3}$ Erdreich, $\frac{2}{3}$ 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 ($\frac{2}{3}$ Erdreich incl. „kalte Fernwärme“, $\frac{1}{3}$ Außenluft)

11.9.4 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 Kapitel 11.3).

11.9.5 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:

- Neubau: Periode (I) 100 % Periode (II) 100 %
- Sanierung: Periode (I) 75 % Periode (II) 75 %

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.

11.9.6 Emissionsfaktoren

Der Umbau der Energiewirtschaft erfolgt schneller, als in Kapitel 11.7 beschrieben. Tabelle 17 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 17 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.

11.9.7 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 %
- 2035: 85 %
- 2050: 100 %

Auch hier erfolgt die Beschleunigung vor allem in der ersten Phase bis 2030, weil die Emissionsminderungseffekte in dieser größer sind.

12 Literaturverzeichnis

- [1] NABau, NHRS und FNL im DIN, *DIN V 18599 - 1 bis 11 "Energetische Bewertung von Gebäuden"*, Berlin: Beuth, 2018.
- [2] T. Loga und U. Imkeller-Benjes, „Energiepaß Heizung/Warmwasser - Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem,“ Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1997.
- [3] NABau, NHRS und FNL im DIN, *DIN V 18599 Bbl 1 "Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich"*, Berlin: Beuth, 2009.
- [4] Institut Wohnen und Umwelt, „Heizenergie im Hochbau - Leitfaden energiebewusste Gebäudeplanung,“ Institut Wohnen und Umwelt für Hessisches Umweltministerium, Darmstadt, 1999.
- [5] NHRS im DIN, *DIN V 4701-10; Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen*, Berlin: Beuth, 2003.
- [6] T. Loga, R. Born und weitere, „Energiebilanz-Toolbox - Arbeitshilfe zum Energiepass Heizung/Warmwasser,“ Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2001.
- [7] NABau im DIN, *DIN V 4108-6; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden*, Berlin: Beuth, 2003.
- [8] Statistisches Bundesamt, „Wohnen in Deutschland (Datenbank 31231-0001),“ 2018. [Online]. Available: <https://www-genesis.destatis.de>. [Zugriff am 11 Mai 2020].
- [9] 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.
- [10] 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].
- [11] T. Loga, B. Stein und weitere, „Deutsche Wohngebäudetypologie,“ IWU, Darmstadt, 2015.
- [12] Deutscher Wetterdienst, „Klimadaten Deutschland,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klimadatendeutschland.html>. [Zugriff am 01 Juli 2020].
- [13] 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.
- [14] K. Jagnow, D. Wolff und weitere, „Umsetzungsprojekt – Integrale Planung und Steuerung der nachhaltigen Modernisierung des Gebäudebestandes und der Energieversorgung der,“ Ostfalia Hochschule, Wolfenbüttel, 2014.
- [15] B. Schulze Darup, „Kostengünstiger und zukunftsfähiger Geschosswohnungsbau im Quartier,“ schulze darup architekten für DBU, Berlin, 2019.
- [16] K.-J. Albers (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Essen: Vulkan, 2018.
- [17] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland,“ AGEB für BMWI, Münster, Bergheim, 2020.
- [18] Techem, „Kennwerte - Hilfen für den Wohnungswirt,“ Techem AG, Eschborn, 2005.
- [19] Techem Energy Services, Corporate Communications, „Techem Energiekennwerte 2019,“ Techem, Eschborn, 2019.
- [20] D. Wolff und w. Mitarbeiter, „Entwicklung und Erprobung der Grundlagen für das Partnerschaftsmodell 'Alliance Contracting' in der Wohnungswirtschaft,“ Ostfalia Hochschule für DBU, Wolfenbüttel, 2019.
- [21] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), *VDI 3807-2*, Berlin: Beuth, 2014.
- [22] M. Offermann, B. von Manteuffel und weitere, „Nutzenergiebedarf für Warmwasser in Wohngebäuden,“ ecofys, co2online, ISTA für BBSR, Köln, Berlin, Essen, 2017.
- [23] H. Cischinsky und N. Diefenbach, „Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016,“ Institut Wohnen und Umwelt für BBSR, Darmstadt, 2018.
- [24] 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.

- [25] P. Jochum, P. Mellwig und weitere, „Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands,“ Beuth Hochschule für Technik, ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [26] 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.
- [27] K. Jahnke, T. Loitz und weitere, „Wirksam Sanieren: Chancen für den Klimaschutz - Feldtest zur energetischen Sanierung von Wohngebäuden,“ co2online, SEnCon, Fraunhofer ISE, Ostfalia für BMU, Berlin, Freiburg, Wolfenbüttel, 2015.
- [28] G. Eikenloff, K. Jagnow und weitere, „Verteilnetze bei der Modernisierung,“ Ostfalia für proKlima, Wolfenbüttel, 2012.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] K. Jagnow und D. Wolff, „Energiekonzepte,“ in *Energieversorgung 2020*, Berlin, Beuth, 2017.
- [32] D. Wolff, P. Teuber und weitere, „Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln,“ Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel für DBU, Wolfenbüttel, 2004.
- [33] 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.
- [34] Verbraucherzentrale Bundesverband, „Die „Aktion Brennwertcheck“ der Verbraucherzentralen,“ VZBV, Berlin, 2011.
- [35] M. Großklos, N. Diefenbach und weitere, „Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim,“ IWU für BMWi, Darmstadt, 2008.
- [36] J. Orthjohann und D. Schreckenber, „Qualitätssicherung effizienter Wärmeversorgung,“ *Bundesbaublatt*, Nr. 12, 2012.
- [37] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), *VDI 3807-5*, Berlin: Beuth, 2014.
- [38] K. Jagnow, „Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik,“ Dissertation, Universität Dortmund, Dortmund, 2004.
- [39] S. Fölsch, „Bedeutung und Potenziale des hydraulischen Abgleichs,“ GEWOBA, Bremen, 2008.
- [40] S. Rehberg, „Das BBU-Projekt: ALFA®-Allianz für Anlagenenergieeffizienz,“ BBU, Berlin, 2016.
- [41] D. Wolff und P. Teuber, „Effiziente Heizungspumpen und hydraulischer Abgleich,“ Ostfalia für BUND, Wolfenbüttel, 2010.
- [42] F. Schweikhardt, „Hydraulischer Abgleich und Heizungspumpentausch,“ Evangelische Landeskirche Baden, Karlsruhe, 2014.
- [43] 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.
- [44] M. Großklos, „Kumulierter Energieaufwand verschiedener Energieträger und -versorgungen,“ Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2002, 2009, 2014, 2020.
- [45] 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].
- [46] M. Memmler, T. Lauf und S. Schneider, „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2018.
- [47] 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.
- [48] K. Jagnow, I. Sell und D. Wolff, „Investitionskostenfunktionen TGA,“ Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Fachbereich Versorgungstechnik, Wolfenbüttel, 2007.
- [49] K. Jagnow, A. Heimlich und D. Wolff, „Investitionskostenfunktionen TGA - Ergänzung I,“ Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Fachbereich Versorgungstechnik, Wolfenbüttel, 2009.

- [50] E. Hinz, „Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten - Endbericht,“ Institut Wohnen und Umwelt für BMU, Darmstadt, 2015.
- [51] 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.
- [52] V. Bürger, T. Hesse und weitere, „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050,“ Öko-Institut und Fraunhofer ISE für Umweltbundesamt, Freiburg, 2016.
- [53] H.-M. Henning und P. Andreas, „Was kostet die Energiewende? - Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050,“ Fraunhofer ISE, Freiburg, 2015.
- [54] P. Sterchele, J. Brandes und weitere, „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen,“ Fraunhofer ISE, Freiburg, 2020.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] M. Offermann, B. von Manteuffel und A. Hermelink, „Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung „Cost-Optimal-Level“ – Modellrechnungen,“ Ecofys für BMVBS, Köln, 2013.
- [58] Verein Deutscher Ingenieure e.V., „VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung,“ Beuth, Berlin, 2012.
- [59] Verein Deutscher Ingenieure e.V., „VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung,“ Beuth, Berlin, 2000.
- [60] 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.
- [61] ohne_Autor, „Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten,“ Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., Berlin, 2006.
- [62] O. Kah, O. Feist und weitere, „Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung,“ Passivhausinstitut, Darmstadt, 2008.
- [63] A. H. Holm, C. Mayer und C. Sprengard, „Wirtschaftlichkeit von wärmedämmenden Maßnahmen,“ Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., München, 2015.
- [64] BMWi, „Energiedaten: Gesamtausgabe,“ BMWi, Berlin, 2019.
- [65] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V., „Der Holzpellet-Preis-Index, Jahresmittelwerte,“ 2020. [Online]. [Zugriff am 27 Mai 2020].
- [66] T. Bründlinger, J. Elizalde-König und weitere, „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende,“ dena, ewi Energy Research & Scenarios, Berlin, Köln, 2018.
- [67] A. Matthey und B. Bünger, „Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten,“ UBA, Berlin, 2019.
- [68] R. Harthan, J. Reppening und weitere, „Treibhausgasminde rungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (Kurzbericht),“ UBA, Dessau, 2020.
- [69] 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.
- [70] K. Hainsch, L. Göke und weitere, „European Green Deal: Mit ambitionierten Klimaschutzziele n und erneuerbaren Energien aus der Wirtschaftskrise,“ *DIW-Wochenbericht 28-2020*, Nr. Juli, 2020.