Energie 2020
Energiekonzepte

Manuskript für die Loseblattsammlung "Energie 2020"
Kapitel 8 "Energiekonzepte"
Verfasser K. Jagnow und D. Wolff
erstellt für DWD und Beuth Verlag
Datenstand Dezember 2017

1 Energiekonzepte 4

2 Einführung in die Energiebilanzierung 5

2.1 Energieflüsse und Flussdiagramme 6
2.2 Bewertungskennzahlen 11
2.3 Energiebedarf und Energieverbrauch 13
2.4 Bilanzebenen und Bilanzumfang 17
2.5 Energieträgerbewertung im Rahmen von Energiekonzepten 21
2.6 Relevante Regelwerke und Verfahren 29

3 Energie- und Bilanzkennwerte 35

3.1 Leistung und Energie 36
3.2 Nutzungsranddaten 39
3.2.1 Nutzungs- und Betriebszeiten 40
3.2.2 Raumtemperatur und Raumfeuchte 44
3.2.3 Luftvolumenstrom und Luftwechsel 49
3.2.4 Wassernutzung 53
3.2.5 Beleuchtungsstärke 56
3.2.6 Gerätestrom 58
3.3 Standortdaten 63
3.3.1 Außentemperatur 66
3.3.2 Luftfeuchte 70
3.3.3 Solarstrahlung 72
3.3.4 Weitere Einflüsse 75
3.4 Kennwerte für Baukörper 77
3.4.1 Gebäudegeometrie 78
3.4.2 Opake Bauteile 82
3.4.3 Transparente Bauteile 89
3.4.4 Wärmebrücken 93
3.4.5 Gebäudedichtheit 97
3.5 Kennwerte für Beleuchtung 99
3.5.1 Tageslichtnutzung 99
3.5.2 Kunstlicht 105
3.6 Kennwerte für die Gebäudewärmeversorgung 109
3.6.1 Erzeuger 109
3.6.2 Speicher 118
3.6.3 Verteilnetze 120
3.6.4 Übergabeeinrichtungen 128
3.7 Kennwerte für die Gebäudekälteversorgung 131
3.7.1 Erzeuger 132
3.7.2 Speicher 141
3.7.3 Verteilnetze 143
3.7.4 Übergabeeinrichtungen 144
3.8 Kennwerte für die Trinkwassererwärmung 146
3.8.1 Erzeuger 148
3.8.2 Speicher 154
3.8.3 Verteilnetze 157
3.9 Kennwerte für externe Energiebereitstellung 165
3.9.1 Heizzentralen 165
3.9.2 Wärmespeicherung 169
3.9.3 Nah- und Fernwärmenetze 169
3.9.4 Gebäudenahe Stromerzeugung 174
3.10 Kennwerte für mechanische Belüftung und Raumlufttechnik 178
3.10.1 Luftförderung und Verteilung 179
3.10.2 Thermische Luftbehandlung 185
3.11 Kennwerte für Gebäudeautomation und Monitoring 189
3.12 Kennwerte für gewerbliche, industrielle und landwirtschaftliche Prozesse 191

4 Analyse und Bewertung ... 195

4.1 Bewertungsmethoden ... 195
4.1.1 Stichproben ... 197
4.1.2 Zeit- und Indexreihen ... 198
4.1.3 Energiekennwerte und Typologien ... 202
4.1.4 Steckbriefe ... 208
4.1.5 Klassifizierung mit dem Energieausweis ... 211
4.2 Jahresverbrauchswerte ... 213
4.2.1 Verbrauchserfassung ... 213
4.2.2 Witterungskorrektur ... 217
4.2.3 Zeitkorrektur ... 221
4.3 Energieintervallmessung und Energieanalyse aus dem Verbrauch ... 223
4.3.1 Datenaufbereitung ... 223
4.3.2 Gebäudeanalyse ... 224
4.3.3 Erzeugeranalyse ... 230
4.3.4 Weitere Anwendungen ... 232
4.4 Lastganganalysen ... 235
4.5 Jahresdauerlinie ... 238
4.6 Energiebedarfsbilanz ... 242
4.6.1 Grundsätzlicher Bilanzablauf ... 242
4.6.2 Wärmetransportvorgänge ... 249
4.6.3 Stofftransportvorgänge ... 252
4.6.4 Verbrennungsvorgänge und konventionelle Wärmeerzeuger ... 254
4.6.5 Wärmepumpen und Kältemaschinen ... 255
4.6.6 Kraft-Wärme-Kopplung ... 256
4.6.7 Elektrisch betriebene Maschinen, Geräte und Beleuchtung ... 259
4.6.8 Regenerative Energienutzung ... 260
4.7 Bezugsflächen und andere Bezugsgrößen ... 260

5 Erstellung von Energiekonzepten ... 263

5.1 Motivation ... 263
5.2 Konzeptarten ... 266
5.2.1 Individuelles und globales Konzept ... 267
5.2.2 Geräte- und Anlagenkonzept ... 268
5.2.3 Prozesskonzept ... 271
5.2.4 Gebäudeenergiekonzept ... 273
5.2.5 Quartier-, Siedlungs- und kommunales Energiekonzept ... 275
5.2.6 Politische Szenarien ... 278
5.3 Vorüberlegungen und Zielsetzungen ... 280
5.4 Energetische, ökologische und wirtschaftliche Auswertung ... 281
5.4.1 Energetische Auswertung ... 281
5.4.2 Ökologische Auswertung ... 283
5.4.3 Wirtschaftliche Auswertung ... 283
5.4.4 Systematischer Variantenvergleich ... 293
5.5 Entscheidungsfindung ... 294
5.5.1 Beispielwertanalyse "Etagen/Zentralheizung" ... 296
5.5.2 Beispielwertanalyse "Lüftungsvarianten" ... 300
5.6 Beispielkonzepte ... 301
5.6.1 Ausgangslage und Randdaten ... 303
5.6.2 Quartierskonzept: Energieversorgung ... 310
5.6.3 Anlagenkonzept: Biowärmeoptimierung ... 316
5.6.4 Quartiers- und Gebäudeenergiekonzept: Gebäudeentwicklung ... 318
5.6.5 Gebäudekonzept: Pflegeheim mit Passivhauskomponenten ... 326
5.6.6 Gebäudekonzept: Künstlervilla ... 328
5.6.7 Gebäudekonzept: Wohnheim mit Solarthermie ... 330
5.6.8 Prozesskonzept: Wäscherei ... 332
5.6.9 Gerätekonzept: Pumpen ... 334
5.6.10 Gerätekonzept: elektrische Großverbraucher ... 336
5.6.11 Anlagenkonzept: Außenbeleuchtung ... 337

6 Literatur und Verzeichnisse ... 339

1 Energiekonzepte

Als Einstieg in die Thematik soll Bild 1 dienen. Es zeigt einen beispielhaften Ablauf von der Problemstellung bis zur Verbesserung.

Das Energiekonzept beruht meist auf dem Wunsch nach verminderten Energiekosten oder Emissionen, eines verbesserten Komforts oder einer höheren Betriebssicherheit oder einer Mischung dieser und ähnlicher Fragestellungen. Die zu optimierenden Verbraucher können Siedlungen oder Kommunen sein, Wohngebäude und Produktionsstätten, einzelne Anlagen und Maschinen oder allgemein beliebige energieverbrauchende Prozesse. Sofern der Energieverbraucher noch nicht vorhanden ist, geht es um die Entscheidung zwischen verschiedenen Ausführungsvarianten eines Neubaus.

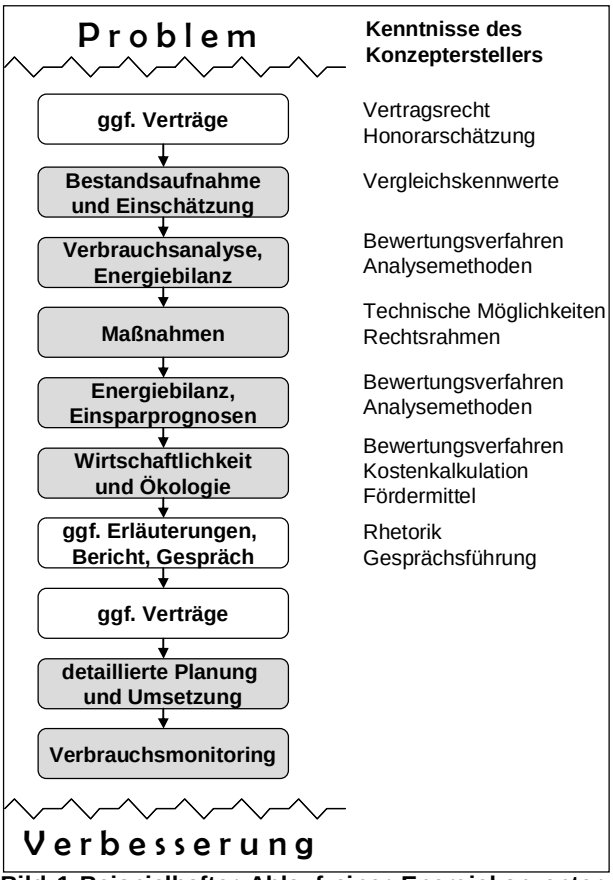


Bild 1 Beispielhafter Ablauf einer Energiekonzepterstellung und -umsetzung

Sofern das entsprechende Fachwissen zur Energieoptimierung beim Betreiber oder Nutzer, in der Kommune oder in der Betriebsstätte etc. nicht vorhanden ist, wird ein externer Berater eingeschaltet, in Bild 1 der »Energiekonzeptersteller«. Es werden Verträge geschlossen.

Die fachliche Tätigkeit des Konzepterstellers beginnt mit der Bestandsanalyse. Zur Einschätzung hilft meist eine Kombination von Verbrauchsmessungen und Bedarfsberechnungen. Sinnvolle Bewertungsmethoden zur Bewertung von Gebäuden, Nutzern, Anlagentechnik werden in Abschnitt 4 vorgestellt. Die notwendigen Bilanz- und Energiekennwerte, d.h. typische Effizienzmerkmale zum Vergleichen sind in Abschnitt 3 zusammengestellt.

Technisch und rechtlich mögliche und sinnvolle Maßnahmen erarbeitet der Konzeptersteller mit Hilfe seines Fachwissens.

Auf Basis der Verbesserungsideen ergeben sich Einsparprognosen für den Energieeinsatz. Es handelt sich hierbei in der Regel um Endenergiemengen. Diese lassen sich in Richtung einer ökologischen oder ökonomischen Bewertung weiterverarbeiten. Der Abschnitt 5 erläutert das hierfür notwendige strukturierte Vorgehen – allgemein und an einem Praxisbeispiel.

Das Konzept muss dem Auftraggeber anschließend erläutert werden. Im positiven Fall kommt es zu einer Umsetzung. Der nachfolgende Abschnitt 2 führt in die Thematik der Energiebilanzierung ein. Es werden Energiebedarf und -verbrauch, Energieflussdiagramme und Bilanzierungsmethoden erläutert.

2 Einführung in die Energiebilanzierung

Die Erstellung einer Energiebilanz gehört zum grundlegenden Handwerkszeug bei der Erarbeitung eines Energiekonzeptes.

Die Bilanzierung liefert für einen bereits bestehenden Verbraucher (Gebäude, Maschine o. ä.) vor der Umsetzung von Maßnahmen – also in der Planungsphase des Konzeptes – einen Hinweis auf die vorhandene energetische Qualität und potentielle Schwachstellen. Der verbesserte Zustand kann ebenfall einer Bilanzierung unterzogen werden. Die Differenzenergiemenge ΔQ ergibt sich im Vergleich der Bilanzen. Das Vorgehen ist auf den Neubau übertragbar. Für jede Planungsvariante sind Energiemengen bestimmbar. Deren Vergleich zeigt Vor- und Nachteile der Lösungen.

Für den Neubauzustand kann die Energiebilanzierung nur mit Hilfe theoretischer Bedarfberechnungen erfolgen. Im Bestand lässt sich zumindest der vorhandene Zustand zusätzlich oder ggf. ausschließlich messtechnisch analysieren. Der Einbezug von Messdaten erhöht erfahrungsgemäß deutlich die Vertrauenswürdigkeit der Einsparprognose künftiger Energiemengen. Diese Vorgehensweise wird daher dringend empfohlen.

Aufbau des Abschnittes und Inhaltsüberblick

Der Abschnitt 2.1 beschreibt grundlegende Arten von Energieflüssen, die im Rahmen der Konzepterstellung regelmäßig bilanziert werden müssen. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob Energieflüsse messtechnisch oder rechnerisch oder kombiniert messtechnisch/rechnerisch sichtbar gemacht werden. Zur Erläuterung wird auf die Darstellung als Energieflussdiagramm zurückgegriffen.

Bewertungskennzahlen helfen dem Ersteller eines Energiekonzeptes in zweierlei Hinsicht. Einerseits werden sie gebildet, um den Energieverbrauch sowie zugehörige Prozesse zu vergleichen und einzuschätzen. Andererseits greift man auf sie zurück, wenn ein Prozess nur qualitativ bekannt ist, aber eine quantitative Einschätzung notwendig wird. Abschnitt 2.2 liefert einen Überblick über übliche Kennwerte und deren Aussagekraft.

Der Abgrenzung des rechnerischen Energiebedarfs vom gemessenen Energieverbrauch wird in Abschnitt 2.3 besprochen, während Abschnitt 2.4 zusammenfasst, welche Möglichkeiten bei der Energiekonzepterstellung grundsätzlich bestehen, d.h. welcher Bilanzraum dem Konzept zugrunde gelegt wird. Es wird erläutert, welche Unterschiede zwischen Nutz- und Endenergie bestehen, wie Nutzenergie überhaupt definiert werden kann.

Der Abschnitt 2.5 widmet sich der Bewertung der verschiedenen Energieträger, d.h. Endenergien. Liegt im Rahmen der Energiekonzepterstellung eine Endenergiemenge für jede Variante vor, ergibt sich die Möglichkeit der weitergehenden Bewertung. Je nach gewähltem Bewertungskriterium (Kosten, Inanspruchnahme von Ressourcen, Emissionen) für die eingesetzten Energieträger ergibt sich eine andere Aussage des Konzeptes.

Im einfachsten Fall lassen sich Endenergien mit Preisen belegen, so dass Energiekosten bekannt sind. Ziel wäre eine ökonomische Bewertung. Alternativ können den Energieträgern auch Emissionskennwerte zugeordnet werden, um eine ökologische Bewertung zu erhalten. Dies ließe sich auch über die Umrechnung in Primärenergie verwirklichen. Auch der Ressourcenverbrauch ist für verschiedene Endenergiearten unterschiedlich.

Der Abschnitt 2.6 benennt relevante Regelwerke, die zur Erstellung eines Energiekonzeptes regelmäßig zum Einsatz kommen. Es wird ein inhaltlicher Überblick über Normen, Richtlinien und andere technische Regeln gegeben, die sich mit der Energiebilanzierung, Verbrauchsauswertung und wirtschaftlichen Bewertung befassen.

2.1 Energieflüsse und Flussdiagramme

Im Rahmen der Energiekonzepterstellung werden für den zu bewertenden Verbraucher oder Prozess mit Hilfe einer Energiebilanzierung einzelne Energieflüsse sichtbar gemacht. Die Detaillierung hängt hierbei davon ab,

- welcher Art der zu bewertende Energieverbraucher bzw. wie komplex der zu bewertende Prozess ist: eine einzelne Maschine oder ein technisches Gerät, eine komplette Wärmeversorgungsanlage, ein Raum oder ein komplettes Gebäude, eine größere Liegenschaft oder eine Stadt,
- in welchem Umfang Verbrauchsdaten und andere Messwerte vorhanden sind und wie stark auf Näherungen und Kennwerte zurückgegriffen werden muss,
- welche Energieflüsse und Energieformen bilanziert werden sollen: elektrische Energien, thermische Energien, (auch chemische, mechanische Energien),
- welches Ziel die Bilanzierung überhaupt verfolgt – ein eher global angelegtes kommunales Energieversorgungskonzept, die energetische Betriebsoptimierung einer konkreten Produktionsanlage, der Nachweis der Förderwürdigkeit von Energieeinsparmaßnahmen für ein Mehrfamilienhaus.

Im Fokus der Energiebilanzierung steht in jedem Fall zunächst die Endenergie, siehe Abschnitt 2.4. Sie lässt sich bewerten, so dass eine Aussage zu Emissionen, Kosten, dem Ressourcenverbrauch möglich ist, siehe Abschnitt 2.5.

Die Höhe der Endenergie hängt bei den meisten Energieverbrauchsprozessen von vielen Einflussgrößen ab. Beispielhafte Einflussgrößen und damit zu bilanzierende Teilenergiemengen werden nachfolgende mit Hilfe einfacher Energieflussdiagramme (Sankey-Diagramme) grundsätzlich erläutert. Dabei erklärt sich ebenfalls die übliche Darstellung von energetischen Zu- und Abflüssen in ein System.

Elektrischer Einzelverbraucher: Ventilator einer Lüftungsanlage

Die bilanzierbaren Energieflüsse für den Ventilator zeigt Bild 2. Die eingesetzte Energiemenge – regulär links im Flussbild – ist elektrische Energie. Ein Teil des eingesetzten Stromes wird bereits im Motor nicht in mechanische Arbeit umgesetzt, sondern in Wärme (Motorverluste). Gleiches passiert an Wellen und Getrieben sowie den Schaufelrädern des Ventilators (Ventilatorverluste). Die Verlustterme, die nicht dem eigentlichen Zweck des Gerätes oder Systems dienen, biegen nach unten aus dem Energiefluss ab. Die nicht verloren gegangene Energie ist die mechanische Energie, die der Ventilator abgibt bzw. die Arbeit, die er verrichtet (Förderung von Volumenstrom und gleichzeitige Druckerhöhung) – regulär rechts im Flussbild.

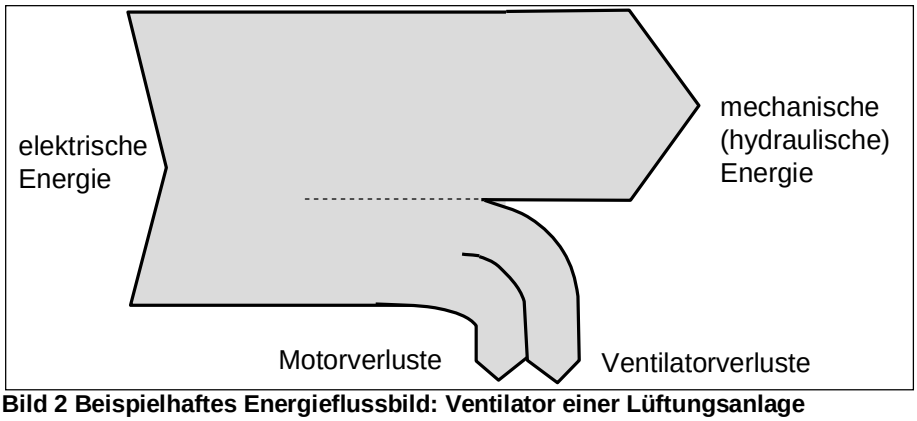


Bild 2 Beispielhaftes Energieflussbild: Ventilator einer Lüftungsanlage

Es wäre eine gröbere oder auch eine feinere Bilanzierung und Darstellung des Flussbildes möglich, wenn der Zweck des Konzeptes dies erforderlich macht. Die beiden Verlustterme könnten zusammengefasst werden zu einem gesamten Motorverlust, aber auch weiter aufgeteilt in Verluste bzw. Eigenverbrauch der Drehzahlsteuerung, des Motors, in die Reibung des Getriebes und der Schaufelräder usw.

Das Energieflussbild lässt sich am besten aus Prüfstandsmesswerten reproduzieren. Für einen im Feld befindlichen Ventilator wäre eine Einzelmessung des Elektroenergieerbrauchs denkbar sowie eine Messung der verrichteten Arbeit (Messung von Volumenstrom und Druckerhöhung). Damit ließe sich der Gesamtverlust rechnerisch als Differenzgröße bestimmen.

Jede feinere messtechnische Unterteilung des Verlustes ist in einer Realanlage eher unrealistisch, weil technisch schwierig umsetzbar. Es wird wenn notwendig auf Kennwerte zurückgegriffen, die vom Produkthersteller bereitgestellt werden oder die typisch für Geräte dieser Bauart sind (Motorwirkungsgrad, Getriebe/Wellenwirkungsgrad usw.).

In der Praxis einer Bestandsanlage wird – unter günstigen Umständen – der Elektroenergieverbrauch des Ventilators vorliegen und mit Hilfe von Effizienzmerkmalen die mechanische Energie (Nutzenergie) hieraus berechnet.

Eine rein theoretische Bilanzierung ist ebenfalls möglich. Allerdings muss dann entweder die elektrische Energie oder besser der gewünschte Nutzen vorgegeben werden. Diese Vorgehensweise ist bei einer Neuplanung üblich.

Verallgemeinerung der Bilanzierung und Darstellung:

- im Bestand mit Verbrauchsdaten als Basis: Bilanzierung von links nach rechts, also vom Aufwand zum Nutzen, Verwendung von Kennwerten zur Bezifferung der Verluste
- im Neubau ohne Verbrauchsdaten: Bilanzierung von rechts nach links, also vom Nutzen zum Aufwand, Verwendung von Kennwerten zur Bezifferung der Verluste
- Verlustterme werden aus dem Schema nach unten abgeführt

Thermischer Verbrauch: Heizwärme- und Kühlbedarf

Die bilanzierten thermischen Energieflüsse für den winterlichen Wärmeverbrauch zeigt schematisch Bild 3. Die sommerliche Bilanz ist in Bild 4 dargestellt. Bilanziert wird ein Raum oder eine Summe von Räumen. Der eingesetzte Aufwand an Wärme und Kälte ist jeweils links im Bild angeordnet, der Nutzen rechts. Es gibt in diesem Fall Gewinnterme, die von oben in den Energiefluss einbiegen.

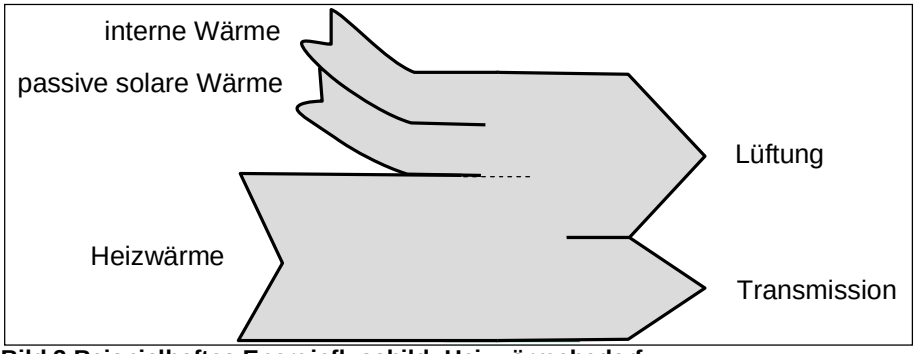


Bild 3 Beispielhaftes Energieflussbild: Heizwärmebedarf

Im Winter (Bild 3) ist das primäre Ziel der Heizung, die Verluste aus Transmission und Lüftung zu decken. Gleichzeitig gibt es passiv solare Wärmeeinträge durch die Hüllflächen des Bilanzraumes und interne Wärmeeinträge aus Personen, Gerätenutzung usw. (allgemein: aus anderen Bilanzkreisen), die bereits einen Teil des Bedarfs decken. Die Heizwärme ergibt sich aus Differenzbildung. Anders gesagt, die Zuflüsse und Abflüsse müssen sich die Waage halten.

Im Sommer (Bild 4) ist das primäre Ziel der Kühlung, überflüssige interne und solare Wärmeeinträge aus dem Raum abzuführen. Ein Teil dieser Überschüsse kann bei der Betrachtung einer gesamten Sommerperiode über die Hülle und Lüftung selbsttätig abfließen, der Rest muss aktiv weggekühlt werden.

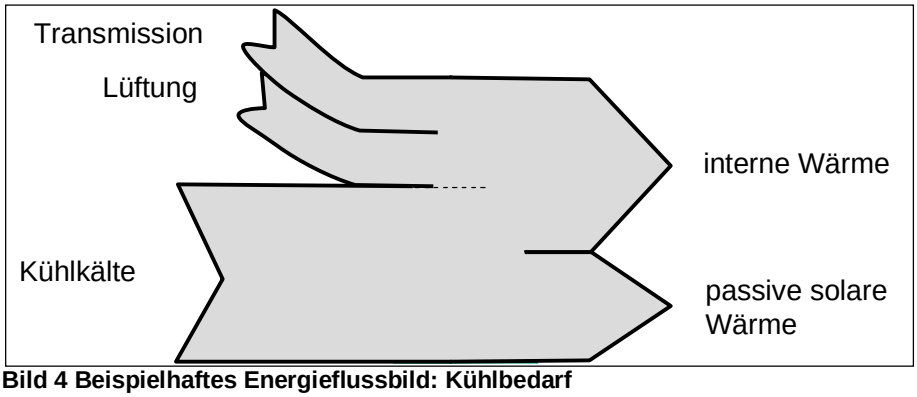


Bild 4 Beispielhaftes Energieflussbild: Kühlbedarf

Es ist bei der Energiebilanzierung üblich, die Heiz- und Kühlenergien jeweils mit positiven Vorzeichen zu berechnen. Der rechnerische Vorzeichenwechsel wird vermieden, indem Gewinn- und Verlustterme vertauscht werden. Für die Darstellung im Energieflussdiagramm ist dies von Vorteil, weil der Energiefluss optisch immer vom Aufwand (links) zum Nutzen (rechts) führt.

Wie beim Ventilator in Bild 2 lassen sich ebenfalls gröbere Flussbilder erzeugen (Aufwand plus Gewinne = Verluste), aber auch feinere durch eine weitere Unterteilung aller Bilanzgrößen. Ebenfalls ist eine rein theoretische Bilanzierung möglich, aber auch ein Rückgriff auf Messwerte oder Mischformen, siehe Abschnitt 4.

Verallgemeinerung der Bilanzierung und Darstellung:

- üblicherweise werden alle Energieflüsse – Wärme, Kälte, Strom usw. – ungeachtet ihrer realen Flussrichtung mit positiven Vorzeichen berechnet
- die Darstellung von links nach rechts folgt dem Schema: Aufwand → Nutzen
- Gewinnterme werden dem Schema von oben zugeführt

Von der Primärenergie zur Nutzenergie

Bild 5 zeigt einen in der Detaillierung eher groben Energiefluss, jedoch für einen sehr großen Bilanzraum: von der Förderstätte der Energieträger bis zur Endanwendung.

Der abgebildete Prozess könnte die Wärmeversorgung für ein Gebäude sein. Ein Großteil heute eingesetzter Energieträger ist fossiler Herkunft, z.B. Erdöl. Jedoch wird in geringerem Umfang auch ein regenerativer Energieträger eingesetzt, z.B. Rapsöl. Von bilanziellem Interesse für die Erstellung des Energieflusses ist der fossile Energieträger, daher beginnt das Schema links mit diesem. Die Vorkette, d.h. die Aufbereitung und der Transport der Rohenergieträger bis zum Gebäude ist verlustbehaftet.

Im Gebäude wird das Heizöl-/Bioölgemisch als Hautenergiequelle genutzt, jedoch auch lokal regenerative Energie genutzt, z.B. aus einer Solarthermieanlage oder Biowärme aus einer Biogas-BHKW-Anlage. Die Energienutzung im Gebäude ist ebenfalls verlustbehaftet, Verbrennung des Öls, Speicherung der Solarenergie, Verteilung von Wärme (technische Verluste). Den Räumen wird eine Nutzenergie geliefert. Die Bilanzierung der Nutzenergie analog zu Bild 3 ist nicht mehr dargestellt.

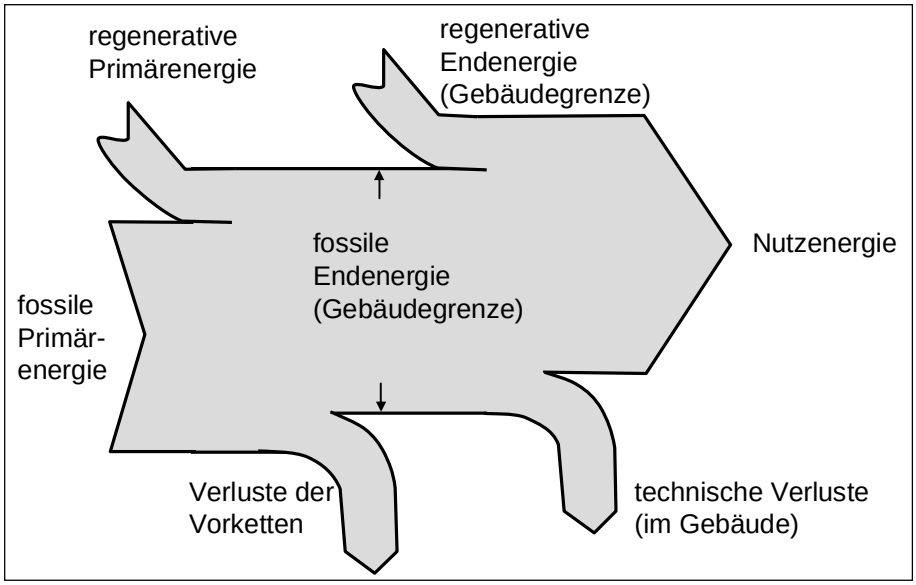


Bild 5 Beispielhaftes Energieflussbild: Primär- bis Nutzenergie

Verallgemeinerung der Bilanzierung und Darstellung:

- eine ausschnittsweise Darstellung des Energieflusses ist möglich, maßgeblich sind die gewählte Bilanzgrenzen,
- die Summe aller ein- und austretenden Energieströme ist gleich groß,
- das Energieflussbild kann auf Basis von gemessenen Größen, von berechneten Größen und mit gemischter Datenherkunft erstellt werden.

Typische Bilanzterme

Tabelle 1 stellt (Teil-)energiemengen mit üblichen Formelzeichen zusammen, aus denen Flussdiagramme bestehen können. Der Schwerpunkt liegt auf der Beschreibung thermischer Größen, da die eingeführten Regelwerke diesen Punkt am detailliertesten darstellen. Die Größen werden kurz erläutert und ein Hinweis auf die Messbarkeit gegeben.

Bezeichnung	Erläuterung	typische Formelzeichen
Bilanzraum: thermische Nutzenergie		
Transmissionswärmeverlust bzw. -wärmesenke	Wärmetransport durch die Gebäudehülle; Abhängigkeiten: Hüllflächen, U-Werte, Wärmebrücken, Temperaturdifferenz; praktisch immer ein rechnerischer Wert, allenfalls punktuell messbar.	Q_T
Lüftungswärmeverlust bzw. -wärmesenke	Wärmetransport mit dem Stoffstrom der Luft; Abhängigkeiten: Luftwechsel, Luftvolumen, Dichte und Wärmespeicherkapazität der Luft, Temperaturdifferenz; im Falle mechanischer Lüftung direkt messbar, sonst ein Rechenwert.	Q_V | Q_L
Wärmeverlust bzw. Wärmesenke	Summe aus Transmission und Lüftung; bei einer Jahres- und Monatsbilanzierung der Energieflüsse ergeben sich Wärmeströme von innen nach außen, bei täglicher oder stündlicher Auflösung kann der Energiefluss umgekehrt sein; Wert kann berechnet und aus Verbrauchsdaten messtechnisch bestimmt werden.	Q_{T+V} | Q_V | Q_{sink}
Solarer Wärmegewinn bzw. solare Wärmequelle bzw. solare Fremdwärme	Wärmetransport durch Strahlung; regulär durch transparente Bauteile, aber auch über Absorption nicht transparenter Bauteile; Abhängigkeiten: Flächen, g-Werte und Absorptionsgrade, Strahlungsintensität, Verschattung, Verschmutzung, Reflexion; praktisch immer ein rechnerischer Wert.	Q_S

Bezeichnung	Erläuterung	typische Formelzeichen
Bilanzraum: thermische Nutzenergie		
Interner Wärmegewinn bzw. interne Wärmequelle bzw. interne Fremdwärme	Wärmeabgabe von nicht regelbaren Wärmeemittern, z.B. Personenabwärme, Gerätenutzung, auch nicht (nach dem Bedarf) regelbare Teile der Versorgungstechnik wie Steigleitungen und Speicher; für Einzelgeräte messbar (Geräteabwärme), i. A. ein Rechenwert.	Q_I
Wärmegewinne bzw. Wärmequellen bzw. Fremdwärme	Summe solarer und interner Fremdwärme; Wert kann berechnet und aus Verbrauchsdaten messtechnisch bestimmt werden.	Q_{I+S} | Q_F | Q_{source}
Heizwärmebedarf	(winterliche) Differenz zwischen den Wärmesenken und Wärmequellen; je nach Definition der Wärmequellen entspricht der Heizwärmebedarf der geregelten Wärmeabgabe der Heizflächen und ist somit messbar.	Q_h | Q_H | $Q_{h,b}$
Kühlbedarf	(sommerliche) Differenz zwischen den Wärmequellen und Wärmesenken; je nach Definition der Wärmequellen entspricht der Kühlbedarf der geregelten Wärmeabgabe der Kühlflächen und ist somit messbar.	Q_c | $Q_{c,b}$
Trinkwarmwassernutzwärme	Wärmetransport mit dem Stoffstrom des genutzten Warmwassers; Abhängigkeiten: Volumenstrom, Dichte und Wärmespeicherkapazität des Wassers, Temperaturdifferenz; messbar und berechenbar.	Q_{tw} | Q_W | $Q_{w,b}$
Nutzenergie	Summe aus Heizwärmebedarf, Kühlbedarf und Trinkwarmwassernutzwärme; d.h. für Gebäude die Energiemengen zur Aufrechterhaltung der Nutzungsanforderungen; die Einzelgrößen sind messbar.	Q_{nutz}
Bilanzraum: Anlagentechnik		
Regelungs- und Übergabeverluste	Differenz eines fiktiven idealen Regelverhaltens (masselos, totzeitfrei, ohne Regelabweichung) und des realen Verhaltens von Heiz- und Kühlflächen; Abhängigkeiten: Zeitkonstanten der Regler und Regelstrecken, Verhältnisse von Fremdwärme zu Wärmesenken, Reglerart; nicht als Energiemenge messbar, allenfalls als Temperaturdifferenz zum geplanten Sollwert.	Q_{ce}
Verteilverluste	Wärmeabgabe von Rohrleitungen; Abhängigkeiten: Hüllflächen bzw. Trassenlängen, U-Werte, Temperaturdifferenz; messbar in einer Differenzmessung, vor allem bei Nah- und Fernwärme, jedoch innerhalb von Gebäuden meist ein rechnerischer Wert.	Q_d | Q_V
Speicherungsverluste	Wärmeabgabe von Speichern; Abhängigkeiten: Volumina bzw. Oberflächen, U-Werte, Temperaturdifferenz; einzeln messbar in einer Differenzmessung, jedoch innerhalb von Gebäuden meist ein rechnerischer Wert.	Q_s | Q_S
Energieabgabe der Erzeuger	Wärme- und Kälteabgabe der Erzeuger an das nachgeschaltete Netz oder direkt die genutzten Räume; einzeln direkt messbar.	Q_{outg}
Erzeugungsverluste	Wärmeverluste durch die chemische Umwandlung und Abgasverluste (bei brennstoffbasierten Systemen, messbar) sowie über die Oberfläche des Gerätes an den Aufstellraum; Abgasverluste direkt messbar, Oberflächenverluste messbar in einer Differenzmessung.	Q_g | Q_E
Technische Verluste	Summe Verteilverluste, Speicherverluste, Erzeugerverluste und ggf. Regelungs- und Übergabeverluste; Differenz zwischen End- und Nutzenergie; messbar per Differenzmessung.	Q_t

Bezeichnung	Erläuterung	typische Formelzeichen
Bilanzraum: Gesamtgebäude		
Endenergie	Energiemenge, die über die Gebäudegrenze fließt (von außen nach innen), wobei regulär nur die aktiv eingesetzten Energieträger gemeint sind, die einen Ressourcenverbrauch hervorrufen (zu bezahlen sind); Oberbegriff für alle Energieträger: Erdgas, Heizöl, Fernwärme, Strom usw.; Oberbegriff für alle Aufwendungen: Heizung, Kühlung, Trinkwarmwasserbereitung, Beleuchtung usw.; direkt messbar.	Q | Q_E | E | Q_f
Endenergie der Heizung bzw. Heizenergie	Energiemenge, die zum Zwecke der Gebäudeheizung über die Gebäudegrenze fließt; sonst siehe Endenergie; messbar.	Q_H | E_H | $Q_{h,f}$
Endenergie Trinkwarmwasser	Energiemenge, die zum Zwecke der Gebäudeheizung über die Gebäudegrenze fließt; sonst siehe Endenergie; messbar.	Q_{TW} | E_W | $Q_{w,f}$
Endenergie der Kühlung bzw. Kühlenergie	Energiemenge, die zum Zwecke der Gebäudekühlung über die Gebäudegrenze fließt; sonst siehe Endenergie; messbar.	$Q_{c,f}$
Endenergie der Beleuchtung bzw. Beleuchtungsenergie	Energiemenge, die zum Zwecke der Gebäudebeleuchtung über die Gebäudegrenze fließt; sonst siehe Endenergie; messbar.	$Q_{l,f}$
Regenerative Energie	eigentlich eine Art der Endenergie; da kostenmäßig und aus Sicht des Ressourcenverbrauchs nicht relevant regulär separat behandelt; messbar.	Q_{reg} | Q_R
Hilfsenergie	Teil der Endenergie; Zusammenfassung aller Nebenaufwendungen zum Betrieb der Versorgungsanlagen für Wärme, Kälte, Luft, Trinkwarmwasser und Licht; Aufwendungen für Pumpenstrom, Ventilatoren, Regler, Stellantriebe usw.; grundsätzlich einzeln messbar, in der Summe regulär Rechenwerte.	Q_{HE} | E_{HE} | Q_{aux} | W
Bilanzraum: mit Vorketten		
Primärenergie	Summe aus der Endenergie und ihren Vorverlusten, wobei häufig nur die Energieträger berücksichtigt werden, die fossil sind; Energiemengen per Lagerstätte; Oberbegriff für alle Rohenergieträger: Roherdgas, Rohöl, Kohle, Holz usw.; global messbar, im Rahmen der Bilanzierung nur rechnerisch erfassbar.	Q_P | Q_p

Tabelle 1 Übliche (thermische) Bilanzgrößen und deren Bezeichnungen

2.2 Bewertungskennzahlen

Bei der Energiekonzepterstellung basiert die Erarbeitung von konkreten Verbesserungsmaßnahmen auf der Feststellung der Güte des Ausgangszustandes. Bewertungskennzahlen sind die hierzu notwendigen und eingeführten Hilfsmittel. Sie werden gebildet, um den Energieverbrauch sowie zugehörige Prozesse zu vergleichen und einzuschätzen.

Dimensionsbehaftete Kennzahlen

Ausgang bei der Bildung von Kennzahlen ist die absolute Energiemenge, üblicherweise als Jahresmenge (in kWh/a). Alternativ werden auch Leistungen (in W oder kW) zu Kennzahlen weiterverarbeitet; dies können Maximalleistungen sein, aber auch über lange Zeiträume gemittelte Leistungen (mittlere Dauerleistungen).

Vielfach werden Bezugsgrößen gewählt, die sich aus dem betreffenden Nutzen ableiten, d.h. zu versorgende Flächen, Personen, Beleuchtungsstärken usw. Tabelle 2 erläutert typische dimensionsbehaftete Bewertungskennzahlen – also Kennwerte mit einer physikalischen Einheit – und deren Anwendungsgebiete. Es werden Anwendungshinweise gegeben, sofern aus der Praxis bekannt.

Art der Kennzahl	Erläuterungen
Energie	
flächenbezogene Energiemenge q (kWh/m²)	Üblich für die Einschätzung von Verbräuchen, die auf die Qualität eines Gebäudes zurückzuführen ist, insbesondere für Heizenergie und Kühlenergie. Jedoch auch zur Bewertung von Gesamtgebäuden (mit allen ablaufenden Prozessen), da viele Vergleichskennwerte als Gebäudesummen vorhanden sind. Übliche Art der Kennwertdarstellung in den meisten Energiebilanzverfahren für die verwendeten Bilanzgrößen. Energieausweise werden auf dieser Basis erstellt. Potentielle Fehlerquelle beim Vergleich ist die gewählte Bezugsfläche, die korrekterweise jeweils mit angegeben werden müsste, da sehr viele verschiedene Flächenarten zugrunde gelegt werden können.
personenbezogene Energiemenge (kWh/P)	Üblich für die Einschätzung von stark nutzungsabhängigen Verbräuchen und Prozessen, z.B. Kennwerten der Warmwasserbereitung oder des Stromkonsums in vielen Nutzungen. Auch für Kennwerte der Solarthermie häufig verwendet. Für Gesamtenergiemengen üblich beim nationenübergreifenden Vergleich des Konsums.
Energiemenge je Bett, Essen, Arbeitsplatz, Pflegeplatz usw.	Übliche alternative Bezugsgrößen für Gebäude des Dienstleistungssektors, insbesondere bei stark unterschiedlichen Flächenbelegungen (Belegungsdichten) von Gebäuden. Potentielle Fehlerquelle ergibt sich durch eine nicht eindeutige Definition eines Arbeits- oder Pflegeplatzes, Bettes usw. wenn keine 24 h- Nutzung (ein- oder mehrschichtiger Betrieb) bzw. keine Vollbelegung vorhanden ist. Diese Phänomene lassen sich zeitkorrigiert herausrechnen, jedoch muss die Bezugsbasis eindeutig sein.
Energiemenge je Stück oder Menge	Übliche alternative Bezugsgrößen für die Produktion. Potentielle Fehlerquelle ergibt sich bei Zuordnung von Teilenergiemengen auf unterschiedliche Produkte, falls nicht nur eines hergestellt wird.
weitere Bezüge	Im Bereich der Wärmeenergiekennwerte ist ein (zusätzlicher) Bezug zu einer Temperatur bzw. Temperaturdifferenz (kWh/K) möglich, insbesondere um Einflusses des Standortes bzw. Klimas zu neutralisieren. In der Prozessbewertung, um Systeme unterschiedlicher Temperaturniveaus miteinander vergleichen zu können. Bei der Einschätzung von Lüftungsanlagen wird als Bezug der Volumenstrom (kWh/(m³/h)) gewählt, um die Anlagengröße auszublenden. Bei Beleuchtungssystemen ist es die Beleuchtungsstärke (kWh/lx).
Leistung	
flächenbezogene Leistung $\dot{q}$ (W/m²)	Flächenbezogene Leistungen als Kennwerte sind etabliert bei der Angabe der Heiz- und Kühllast sowie der Beleuchtungsleistung und anderer Geräteleistungen. Die für die Energiemengen gegebenen Hinweise zum Flächenbezug gelten ebenso.
weitere Bezüge	Wie bei den Energiemengen sind Angaben mit Personenbezug, (zusätzlichem) Temperaturbezug, Bezug auf den Volumenstrom oder die Beleuchtungsstärke etabliert.
Sonderfälle	
Energiemenge mit Zeitbezug	Der Bezug einer Energiemenge auf das Zeitintervall der Messung liefert eine mittlere Dauerleistung. Bei taktenden Prozessen kann die Betriebsdauer als Bezug verwendet werden, so dass sich die mittlere Betriebsleistung ergibt.
Energiemenge mit Leistungsbezug	Der Bezug einer Energiemenge auf eine Leistung ergibt eine Zeitangabe. Falls die Bezugsleistung die Maximalleistung (Gerätenennleistung) ist, sind das Ergebnis die Vollbenutzungsstunden.

Tabelle 2 dimensionsbehaftete Bewertungskennzahlen

Dimensionslose Kennzahlen

Wenn bei der Kennwertbildung die Bezugsgröße die gleiche Einheit aufweist wie die Ausgangsgröße, ergeben sich dimensionslose Kenngrößen. Sie werden vor allem zur Bewertung von energierelevanten Prozessen eingesetzt. Tabelle 3 erläutert übliche Bewertungskennzahlen ohne physikalische Einheit und gibt Hinweise potentieller Fehlerquellen bei der Anwendung.

Art der Kennzahl	Erläuterungen
Energie (kWh/kWh)	
Nutzungsgrad η (Arbeitszahl β)	Nutzenergie dividiert durch Aufwand an Energie. Üblich für die Bewertung von Wärmeerzeugern – dort heißt die Größe Nutzungsgrad. Im Falle von Wärmepumpen oder Kältemaschinen spricht mal von Arbeitszahlen. Nutzungsgrade finden auch zur Bewertung von Energieverteilnetzen, seltener von Speichern Anwendung. Insbesondere in älteren Regelwerken und Kennwertsammlungen zur Thematik werden technische Anlagen (Gesamtanlagen oder Anlagenteile) fast ausschließlich mit Nutzungsgraden und Arbeitszahlen bewertet. Nutzungsgrade beschreiben regulär einen Prozess über einen langen Zeitraum, z.B. ein Jahr. Die Kennzahl ist dann ein gewichteter Mittelwert aller einzelnen Lastzustände und bewertet somit ggf. auch vorhandene Betriebsbereitschaftszustände ohne Nutzen. Nutzungsgrade für Anlagen und Anlagenteile variieren somit in der Regel mit dem zu liefernden Nutzen. Eine potentielle Fehlerquelle bei der Anwendung der Kennzahl ist die Verwechslung mit Wirkungsgraden und Leistungszahlen. Dies ist nur gerechtfertigt, wenn keine nennenswerten Lastunterschiede innerhalb des betrachteten Zeitraums auftreten (BHKW) oder Prozesse kaum lastabhängig variierenden Effizienzen aufweisen (Durchlauferhitzer).
Aufwandszahl e	Aufwand an Energie dividiert durch Nutzenergie. Kehrwerte von Nutzungsgraden. Aufwandszahlen sind im jüngeren Regelwerk, insbesondere im Zusammenhang mit der Energieeinsparverordnung zu finden. Eine spezielle Aufwandszahl (primärenergetische Anlagenaufwandszahl) fasst alle Effizienzmerkmale der Technik zu einer Größe zusammen. Alle Hinweise und Beschreibungen gelten gleichermaßen.
Deckungsanteil α	Deckungsanteile sind Bewertungskennzahlen zur Beschreibung von parallel oder alternativ erfolgender Energieversorgung. Ein Deckungsanteil definiert mit einem Wert zwischen null und eins den Anteil eines Systems an der Gesamtenergielieferung. Üblich für Erzeuger (z.B. Anteile von Solarthermie und Kessel) und Übergabeeinrichtungen (z.B. Anteile von Fußboden und Heizkörpern).
Leistung (W/W)	
Wirkungsgrad η (Leistungszahl ε)	Nutzleistung dividiert durch den Aufwand an Leistung. Für Wärmeerzeuger, Pumpen und Ventilatoren spricht man vom Wirkungsgrad, bei Kälteanlagen und Wärmepumpen von der Leistungszahl. Der Wert gilt für einen bestimmten Betriebszustand, z.B. für die Volllast oder eine definierte Teillast.
Leistungsanteil μ	Wie bei den Deckungsanteilen, jedoch errechnet aus Leistungsangaben. Die Größe wird häufig zur Charakterisierung von multivalenten Erzeugeranlagen genutzt.
Stromkennzahl σ	Besondere Größe zur Beschreibung des Verhältnisses der gelieferten elektrischen Leistung zur thermischen Leistung für eine Anlage zur Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW).
Überdimensionierung	Verhältnis einer installierten Geräteleistung zur notwenigen maximalen Leistung (Lastanforderung aus der Nutzung heraus).

Tabelle 3 dimensionslose Bewertungskennzahlen

Die Einschätzung eines Prozesses oder eines Verbrauchers mit Hilfe von Bewertungskennzahlen gelingt, wenn repräsentative Vergleichswerte vorliegen. Dieser Thematik widmet sich Abschnitt 3.

2.3 Energiebedarf und Energieverbrauch

Bei der Erstellung eines Energiekonzeptes ist die Kenntnis folgender Definitionen unbedingt notwenig:

- **Energiebedarf:** ist eine **rechnerische** Energiemenge unter Annahme von definierten Nutzungsranddaten und sonstigen äußeren Einflüssen.
- **Energieverbrauch:** ist eine **gemessene** Energiemenge unter Einbezug realer Nutzungsranddaten und sonstigen äußeren Einflüsse.

Sofern die Nutzungsranddaten (z.B. Raumtemperaturen bei der Bewertung eines Gebäude, Häufigkeiten bestimmter Teillastzustände bei der Bewertung eines Ventilators), die dem Energiebedarf zugrunde liegen auch den realen Randdaten entsprechen, können Bedarf und Verbrauch zahlenmäßig gleich sein. Gleiches gilt für andere äußere Randdaten (z.B. Außentemperaturen, Solarstrahlung für die Gebäudebewertung).

Bedarf und Verbrauch im Wohnungsbau

Dass die Verwendung von Standardranddaten bei der energetischen Bewertung von Wohnbauten auch zu deutlichen Abweichungen zwischen der berechneten Endenergie (X-Achse) und dem witterungskorrigierten Verbrauch (Y-Achse) führen kann, zeigt Bild 6. Es lassen sich Abweichungen um den Faktor 2 … 4 in beide Richtungen feststellen.

Die Bedarfsrechnung verwendet – bewusst zur Verdeutlichung des Problems - Standardnutzungsranddaten eines EnEV-Nachweises. Außerdem wurden, sofern einzelne technische Komponenten vor Ort nicht korrekt einschätzbar waren, der Berechnung Standardmerkmale für die Gebäudehülle und Anlagentechnik zugrunde gelegt. Dies wäre ebenfalls im Rahmen der Energieausweiserstellung (Bedarfsausweis) zulässig. Die Verbrauchsdaten sind hingegen einer Witterungskorrektur unterzogen, wobei als Standardklima ein mittleres deutsches Klima gewählt wurde, so dass die Werte ebenfalls für die Energieausweiserstellung (Verbrauchsausweis) zugrunde gelegt werden könnten.

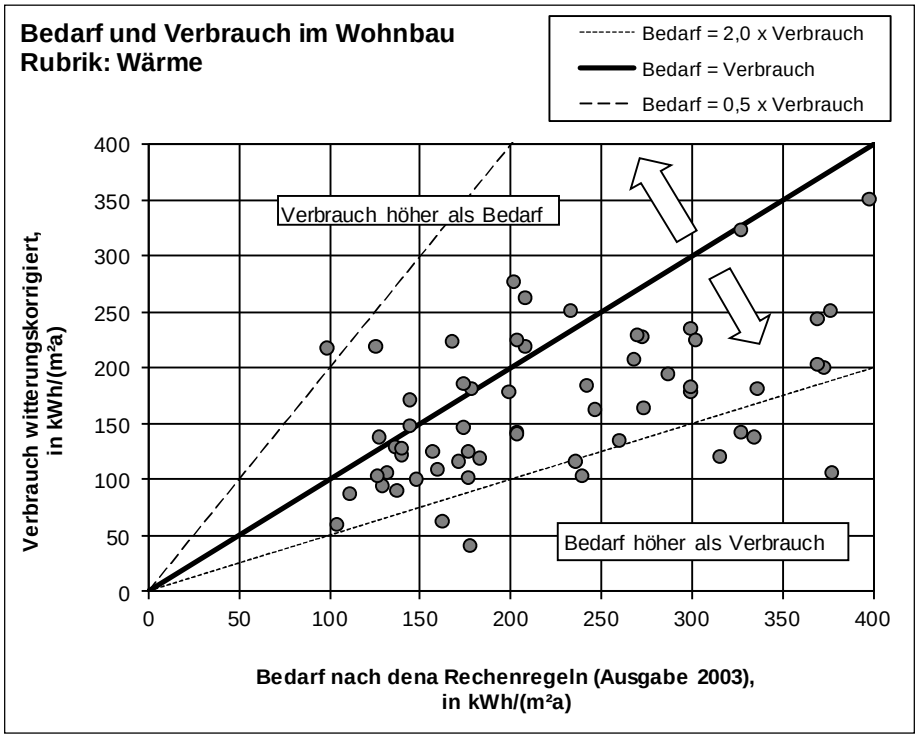


Bild 6 Endenergiebedarf und -verbrauch Wärme für eine Stichprobe von ca. 60 Wohnbauten [81]

Als Basis einer Energiekonzepterstellung sind viele Datenpunkte unbrauchbar – jedenfalls wenn es um eine realistische Abschätzung der Einsparungen durch Verbesserungsmaßnahmen geht. Insbesondere beim Altbau mit Verbrauchskennzahlen über ca. 150 kWh/(m²a) und Bedarfskennzahlen über ca. 200 kWh/(m²a) geht die Schere weit auseinander. Der rechnerische Kennwert liegt weit über dem gemessenen.

Größte Fehlerpotentiale und Fehlannahmen bei der Berechnung des Energiebedarfs – in der Reihenfolge einer für den Wohnbaubestand typischen Ergebnisrelevanz der Einflussparameter:

- Innentemperatur (incl. räumliche und zeitliche Teilbeheizung des Gebäudes),
- wärmetechnische Qualität der Regelbauteile (U-Werte) und Wärmebrücken,
- Leitungslängen und Temperaturen der Wärmeverteilnetze für Heizung und Trinkwarmwasser,
- Qualitätssicherung in Planung und Ausführung (z. B. Hydraulischer Abgleich)
- Luftwechsel (incl. räumliche und zeitliche Teilbelüftung des Gebäudes),
- Warmwasserbedarf,
- Erzeugereffizienz (bei Anlagen älter 20 … 30 Jahre ggf. relevanter als die vorgenannten Einflüsse)

Für den Haushaltsstrom gibt es im Wohnungsbau keine analoge Darstellung, da keine eingeführten Standardrechenverfahren für den Strombedarf existieren – zumindest nicht im Rahmen der EnEV.

Bedarf und Verbrauch im Nichtwohnungsbau

Die Problematik ist im Nichtwohnbau grundsätzlich ähnlich gelagert. Bild 7 zeigt eine Übersicht von Wärmeenergiebedarf und -verbrauch, Bild 8 entsprechend für den Energieträger Strom. Sowohl die Verbrauchswerte als auch die Bedarfswerte wurden so ermittelt, dass sie einem Energieausweis zugrunde gelegt werden könnten. Es gelten also u. a. Standardannahmen für das Nutzerverhalten als auch die Klimadaten.

Die Tendenzen sind ähnlich denen im Wohnungsbau. Insbesondere bei Gebäuden im Bestand wird mit schlechter werdender Substanz die Schere zwischen Wärmebedarf und Wärmeverbrauch immer größer (Bedarf ist größer als Verbrauch).

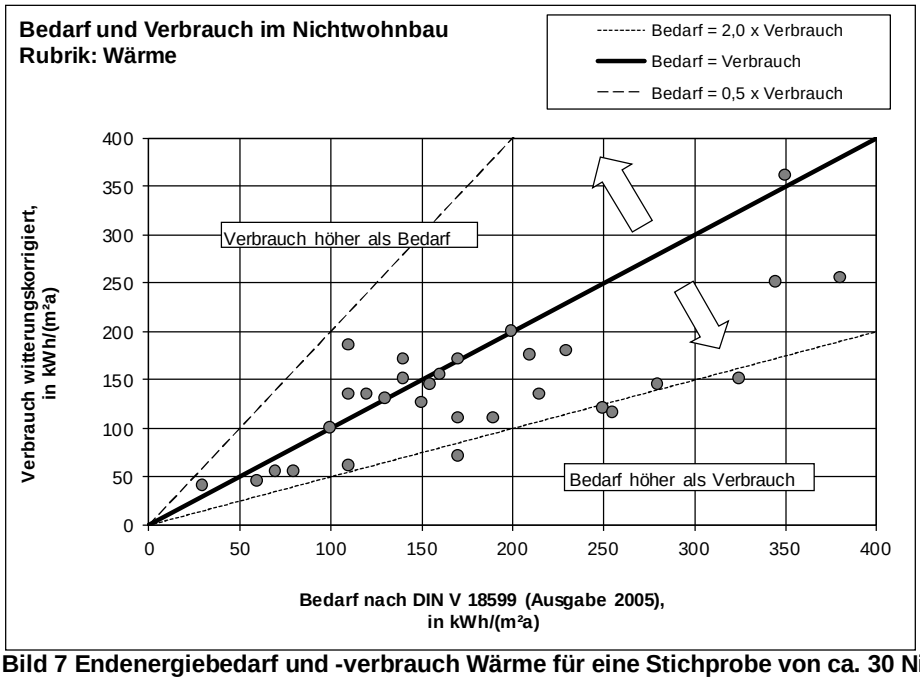


Bild 7 Endenergiebedarf und -verbrauch Wärme für eine Stichprobe von ca. 30 Nichtwohnbauten [27]

Die Einflüsse auf den Energiebedarf für Wärme sind vergleichbar mit denen bei Wohnbauten, jedoch wird die Ergebnisrelevanz der Einflüsse etwas anders eingeschätzt:

- Innentemperatur (incl. räumliche und zeitliche Teilbeheizung des Gebäudes),
- Luftwechsel (incl. räumliche und zeitliche Teilbelüftung des Gebäudes),
- wärmetechnische Qualität der Regelbauteile (U-Werte) und Wärmebrücken,
- Qualitätssicherung in Planung und Ausführung (z. B. Hydraulischer Abgleich)

- Leitungslängen und Temperaturen der Wärmeverteilnetze,
- Erzeugereffizienz (bei Anlagen älter 20 … 30 Jahre ggf. relevanter als die vorgenannten Einflüsse)
- Warmwasserbedarf.

Der Stromenergiekennwert enthält – rechnerisch – die Aufwendungen für die Beleuchtung, ggf. mechanische Lüftung, Heizung und Trinkwarmwasserbereitung und alle Hilfsaufwendungen der Wärme-, Kälte- und Lüftungsanlagen (Pumpen, Regelung usw.). Das erklärt den sehr großen Unterschied zum Verbrauch, der auch alle anderen Stromnutzungen enthält.

Dies führt zu einer teilweise riesigen Abweichung (bis Faktor 9 Bild 8) in zwischen Bedarf und Verbrauch, wenn Produktions- und Werkstätten bewertet werden.

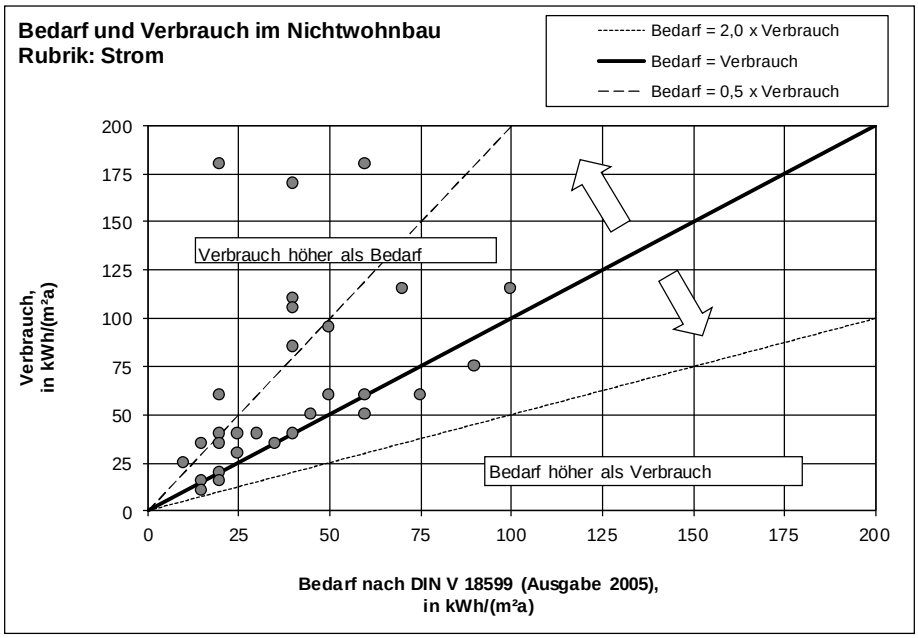


Bild 8 Endenergiebedarf und -verbrauch Strom für eine Stichprobe von ca. 30 Nichtwohnbauten [27]

Ein direkter Vergleich zwischen Stromverbrauch und -bedarf kann nicht gezogen werden, da keines der üblichen Bilanzverfahren es vorsieht, alle Stromverbraucher zu bilanzieren. Ist dies erwünscht, ergibt sich die Notwendigkeit einer individuellen Bilanzierung (mit Ingenieursverstand und Exceltabelle).

Hinweise zur Konzepterstellung

Die zusammengefasste Erkenntnis lautet zu diesem Zeitpunkt:

- Im Bereich der Wärmeenergien bilden verfügbare und verbreitete Bilanzierungsverfahren grundsätzlich den gesamten Energiefluss bis zur Endenergie ab, jedoch kann es – bei Wahl nicht passender Randdaten – zu großen Abweichungen zwischen Verbrauch und dem rechnerischen Bedarf kommen. Diesem Phänomen kann (nicht muss!) der Bilanzersteller entgegensteuern, indem er passende Randdaten wählt. Größte Herausforderung ist der realitätsnahe Umgang mit dem Nutzerverhalten.
- Im Bereich der Strombilanzierung, die vielfach die Aufwendungen für die Kälteversorgung enthält, bieten verfügbare und verbreitete Bilanzierungsverfahren derzeit keine Möglichkeit, eine komplette Bilanzierung der Endenergiemenge vorzunehmen. Die Aufwendungen an Strom, die jenseits der Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung in einem Gebäude zu verzeichnen sind, müssen praktisch individuell erfasst werden. Das betrifft demnach einen Großteil des Stroms bei Gebäuden mit Strom als Prozessenergie.

Die Konzepterstellung und Entscheidungsfindung basiert jedoch regulär auf dem rechnerischen Vergleich (also Energiebedarf) von mindestens zwei Alternativen – Bestand oder Sanierung, Neubaukonzept 1 oder 2, Maschine A oder B. Die rechnerische Differenzenergiemenge ΔQ wird mit Kosten belegt, in Emissionen umgerechnet usw.

Es wird dem Konzeptersteller daher dringlich geraten, seiner rechnerischen Einsparprognose realistische Randdaten zugrunde zu legen. Dies spricht – zumindest bei einer Bestandsoptimierung – für den immer zu fordernden Einbezug von Verbrauchswerten in die Prognose späterer Einsparungen.

In vielen Fällen geht die Empfehlung noch deutlich weiter: vor einer geplanten Verbesserung, also begleitend zur theoretischen Ausarbeitung des Energiekonzeptes ausgedehnte Messungen von Verbrauchs- und Betriebsdaten vorzunehmen. Die Autoren sehen aus Erfahrung ein Jahr Vorlaufzeit (mit permanenten oder punktuellen Messungen) als realistisch an. Diese Empfehlung ergibt sich unabhängig vom Projekt für ein Einfamilienhaus genauso wie für eine Wäscherei oder eine Schule.

2.4 Bilanzebenen und Bilanzumfang

Bei der Erstellung eines Energiekonzeptes muss entschieden werden, in welchem Umfang und welcher Detaillierung die einzelnen Energiemengen betrachtet werden:

- Nutzenergien, Verlustenergien, Endenergien
- thermische Energien (Wärme, Kälte usw.), elektrische Energien (Beleuchtung, Antriebe usw.)
- Jahres-, Monats-, Tages- oder Stundengenauigkeit,
- …

Bilanzrahmen und Randdaten werden einerseits durch den Beratungsauftrag eingegrenzt. Aber auch die zur Auswahl stehenden (genormten) Rechenverfahren geben ihn teilweise vor, siehe Abschnitt 2.6. Jedoch steht es dem Energiekonzeptersteller frei, selbst erstellte Rechenwerkzeuge (Tabellenkalkulationssoftware) zu verwenden, Verbrauchswerte in geeignetem Rahmen einzubeziehen. Nachfolgend werden einige Begriffe erläutert, die das Spektrum der Möglichkeiten für die Aufstellung von Energiebilanzen aufzeigen.

Endenergie

Die Endenergie ist die zentrale Rechengröße vieler Energiebilanzverfahren. Sie ergibt sich in den meisten Energiebilanzverfahren als die Energiemenge, die über die Gebäudegrenze (als Bilanzraumgrenze) fließt. Dabei werden regulär nur fossile Energiemengen bzw. mit Energiekosten verbundene Energiemengen als Endenergien angesehen. Beispiele aus der **Gebäudebilanzierung**:

- bilanzierte Endenergie ist das Heizöl zum Betrieb des Kessels,
- bilanzierte Endenergie ist die aus einem Nah- oder Fernwärmenetz bezogene und über einen Wärmemengenzähler gemessene Wärme, die von einem zentralen Heizwerk bzw. Heizkraftwerk bezogen wird,
- bilanzierte Endenergie ist der Strom zum Betrieb der im Gebäude aufgestellten Wärmepumpe, jedoch nicht die kostenlos damit gewonnene Umweltwärme (obwohl diese auch über die Bilanzraumgrenze fließt),
- bilanzierte Endenergie ist regulär weder die aktiv gewonnene Solarthermie, noch die passive Solarenergiemenge, die sich als Eintrag über Glasflächen ergibt,

Da die meisten eingeführten Bilanzverfahren das Gebäude als Bilanzraum zugrunde legt, ergeben sich damit verbundene Abgrenzungs- und Definitionsprobleme für die Endenergie, sobald ein Erzeuger außerhalb der Bilanzgrenze angeordnet ist, siehe Bild 9.

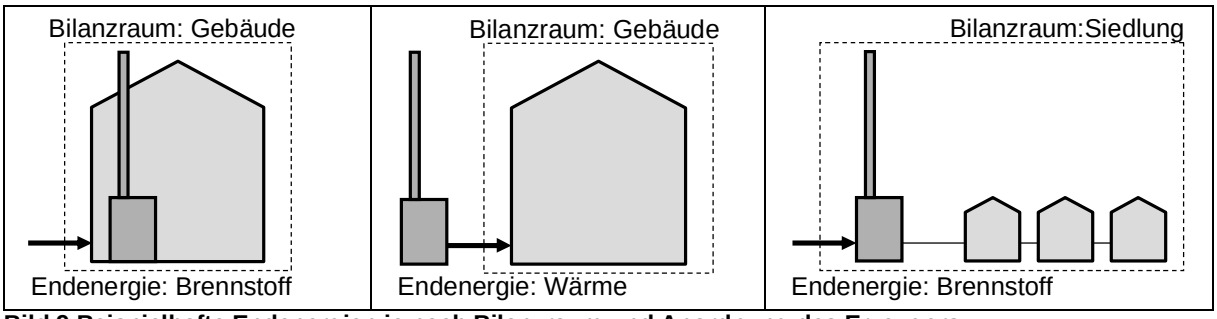


Bild 9 Beispielhafte Endenergien je nach Bilanzraum und Anordnung des Erzeugers

Unstrittig ist, dass bei einem Erzeuger innerhalb der Bilanzgrenze der eingesetzte Brennstoff (oder Energieträger) als Endenergie bilanziert wird: Gas, Öl, Holz, Kohle, aber auch Strom für den Betrieb von Wärmepumpen und Kältemaschinen.

Sobald der Erzeuger außerhalb der eigentlichen Bilanzgrenze angeordnet ist, gibt es verschiedene Lösungen:

- der Bilanzraum (Gebäude) bleibt erhalten und als Endenergie wird beispielsweise die gelieferte Wärme bilanziert; alle Verluste außerhalb des Bilanzraumes werden als "Vorkette" verbucht (im Primärenergiefaktor, CO_2-Äquivalent und den Preisen für Wärme); dieses Modell kommt beispielsweise für einen Gebäudeanschluss an ein Fernwärmenetz zum Einsatz
- der Bilanzraum (Gebäude) bleibt erhalten, wird aber fiktiv auf den Erzeuger ausgedehnt; dieser wird so berechnet als stünde er im Gebäude; bilanziert wird als Endenergie der Energieträger, der dem Erzeuger zugeführt wird; dieses Modell kommt beispielsweise zum Einsatz für einen im Nebengebäude stehenden Erzeuger, aber auch für die Kleinwindkraftanlage im Garten; dies ist praktikabel, wenn die Endenergien sich unabhängig vom Aufstellort des Erzeugers eindeutig dem bilanzierten Gebäude zuordnen lassen
- der Bilanzraum wird ausgedehnt (Siedlung), so dass sich weitere Verlustketten innerhalb der Bilanzierung befinden; allerdings befinden sich nun auch weitere Abnehmer im Bilanzraum; bilanziert wird als Endenergie der Energieträger, der dem Erzeuger zugeführt wird; dieses Modell kommt beispielsweise zum Einsatz, wenn Siedlungs- oder Quartierskonzepte erstellt werden.

Fazit: **die Endenergie ist nicht eindeutig definiert**. Sie hängt vom gewählten bzw. festgelegten Bilanzraum ab. Dieser Bilanzraum bzw. die Bilanzgrenzen sind prinzipiell im Rahmen eines Energiekonzeptes festzulegen, vor allem wenn:

- nicht nach einem genormten/eingeführten Bilanzverfahren gerechnet wird (dort sind die Bilanzgrenzen häufig mit der Verfahrensbeschreibung vorgegeben),
- zwar nach einem genormten/eingeführten Bilanzverfahren gerechnet wird, aber nur Teilenergiebilanzen erstellt werden oder die Berechnung anderweitig eigenständig modifiziert wird,
- sich die Bilanzierung nur auf einzelne Teile einer Versorgungskette beschränkt, z.B. einzelne Erzeuger, Maschinen, Räume eines Gebäudes, aber auch einzelne Abnehmer eines Nahwärmenetzes usw.
- gekoppelte Prozesse (Wärme – Kälte – Strom) bilanziert werden.

Nutzenergie für thermische Verbraucher

Werden von der Endenergie die technischen Verluste (Umwandlung/Erzeugung, Speicherung, Transport/Verteilung) innerhalb der Bilanzgrenzen abgezogen, ergibt sich die Nutzenergie. Sie ist jedoch ebenfalls nicht eindeutig definiert. Drei Beispiele für eine Nutzenergiedefinition zeigt Bild 10.

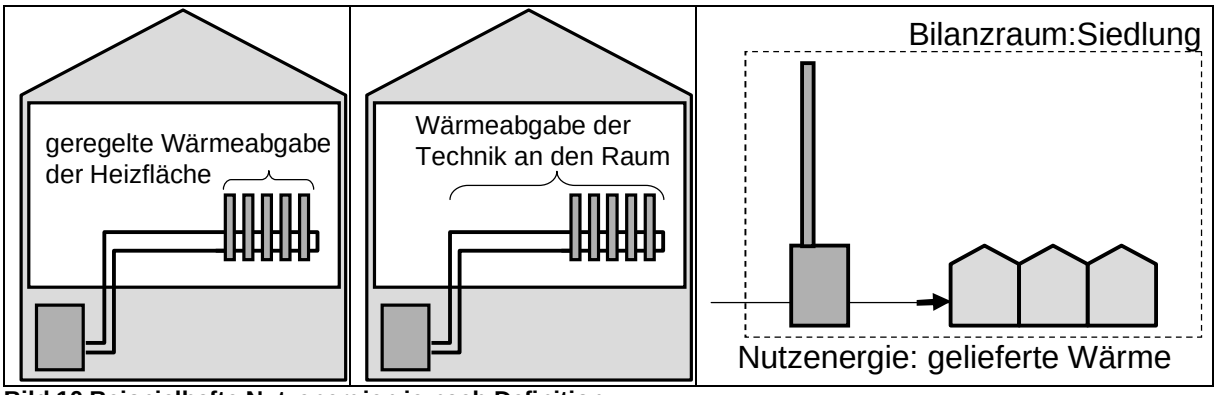


Bild 10 Beispielhafte Nutzenergien je nach Definition

Sofern einzelne Gebäude bilanziert werden, beschreibt die Nutzenergie häufig die von einem System an den Endanwender gelieferten Energiemengen. Im Falle der Warmwasserbereitung das gezapfte Warmwasser, wenn es den Hahn verlässt.

Bei Heiz- und Kühlanwendungen existieren uneinheitliche Festlegungen bezüglich des Nutzenergiebedarfes. Für den Nutzwärmebedarf für die Heizung (=Heizwärmebedarf) ist allgemein in allen eingeführten Rechenverfahren die Bilanzierung wie folgt definiert:

- der Heizwärmebedarf ist die Differenz aus Verlusten (Transmission und Lüftung) und nutzbaren Gewinnen.

Abgesehen davon, dass die einzelnen Rechenverfahren unterschiedliche Randdaten für die Berechnung vorschlagen oder vorgeben, was zu abweichenden Ergebnissen führt, sind sie sich nicht einig in der Definition der "Gewinne". Dies bedeutet beispielsweise:

- in DIN V 18599 [13] ist die geregelte Wärmeabgabe der Heizflächen als Heizwärmebedarf definiert; alle ungeregelten Wärmeabgaben von Rohrleitungen, Speichern, Erzeuger usw. (der Heizung, Trinkwarmwasserversorgung usw.) zählen nicht zum Heizwärmebedarf, sondern zu den internen Wärmegewinnen; der Heizwärmebedarf ergibt sich rechnerisch aus den Verlusten (Transmission, Lüftung) des Raumes abzüglich aller nutzbaren Gewinne (Personen, Beleuchtung, Geräte, passive Solargewinne, ungeregelte Wärmeeinträge der Technik);
- in VDI 2067 [73][74] wird die gesamte Wärmeabgabe der Technik an den Raum als Nutzen bezeichnet; das ist die Summe aller geregelten und ungeregelten Wärmeeinträge der Technik; der Heizwärmebedarf ergibt sich rechnerisch aus den Verlusten (Transmission, Lüftung) des Raumes abzüglich aller nutzbaren Gewinne (Personen, Beleuchtung, Geräte, passive Solargewinne, aber keine Technik);
- die DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 [14][15] wählen ein gemischtes Verfahren; DIN V 4108-6 errechnet einen Heizwärmebedarf analog zu VDI 2067; DIN V 4701-10 korrigiert ihn um die Abwärme nur der Trinkwarmwasserbereitung innerhalb des beheizten Bereiches, jedoch nicht um die Wärmeabgabe von Heizungsleitungen.

Sofern nicht das Gebäude als Bilanzraum zugrunde gelegt wird, kann der Begriff der Nutzenergie auch noch anders besetzt sein. Beispielweise mit der an die Gebäude gelieferten Energiemengen, siehe Bild 10 rechts. Das Energiekonzept betrifft in diesem Fall das Versorgungskonzept für eine Siedlung, d.h. berechnet werden verschiedene Netz- und Erzeugervarianten.

Fazit: **die Nutzenergie ist nicht eindeutig definiert**. Sie sollte – sofern nicht eine eingeführte Norm oder Richtlinie für die Berechnungen des Konzeptes zugrunde gelegt wird – definiert werden.

Nutzenergie für elektrische Verbraucher

Im Bereich der elektrischen Verbraucher sind Nutzenergien ebenfalls verschieden definiert. Folgende Varianten sind bekannt und etabliert:

- für Pumpen, Ventilatoren: Nutzenergie ist die "hydraulische Energie", das Produkt aus gefördertem Volumenstrom und der Druckerhöhung (als Integral über die Zeit); zwischen Nutzenergie und der Endenergie Strom stehen ein oder mehrere Wirkungsgrade des betreffenden Gerätes.
- für Beleuchtung: Nutz- und Endenergie werden entweder gleich gesetzt, alternativ ist eine ideale Beleuchtung als Bezugsvariante definiert.

Gekoppelte Prozesse

Ist ein gekoppelter Prozess Gegenstand oder Teil des Energiekonzeptes – beispielsweise eine Kraft-Wärme-Kopplung – ergeben sich je nach gewähltem Bilanzumfang andere Aussagen. Bild 11 zeigt zwei Varianten der Festlegung des Bilanzraums.

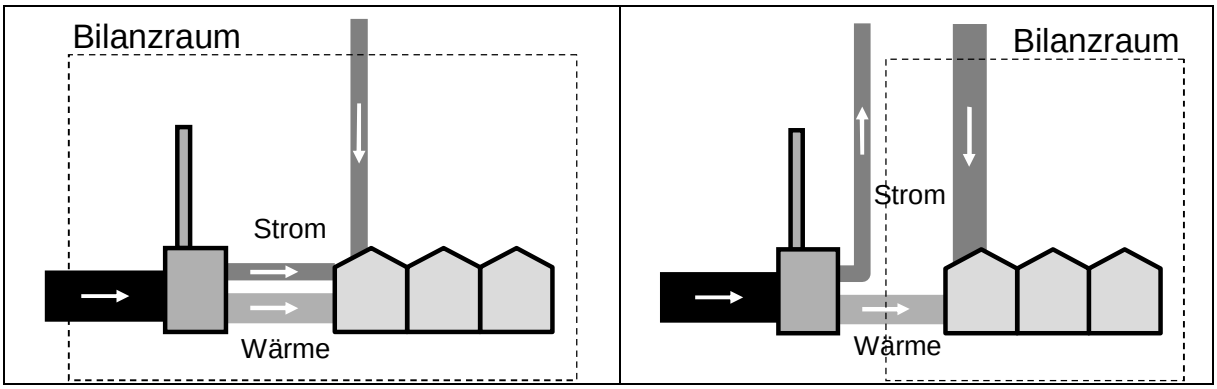


Bild 11 Varianten des Bilanzumfangs für gekoppelte Prozesse

- Bild 11 links: bilanziert werden als Endenergien eine Brennstoffmenge sowie eine Restbezugsmenge an Strom aus dem öffentlichen Netz, jeweils mit allen Vorketten.
- Bild 11 rechts: bilanziert werden als Endenergien eine Wärmemenge sowie die gesamte Strombezugsmenge aus dem öffentlichen Netz, jeweils mit allen Vorketten; es muss rechnerisch festgelegt werden, welche der Vorkettenverluste dem Strom zugeschlagen werden und welche der an die Siedlung gelieferte Wärme (hierfür gibt es verschiedene Ansätze: energetische Aufteilung, exergetische Aufteilung, Stromgutschriftmethode usw.).

Sollen im Rahmen der Energiekonzepterstellung Lösungen mit und ohne gekoppelte Prozesse miteinander verglichen werden, ergibt sich die Empfehlung:

- die Bilanzierung aller (nicht nur einzelner) Nutzenergiemengen vorzunehmen, weil sonst Vergleichsaussagen schwierig sind; es werden beispielsweise Wärme und Strombedarf der Gebäude nach Bild 11 bilanziert, nicht nur die Wärme,
- den Bilanzraum so zu legen, dass keine rechnerische Aufteilung der Vorkette auf die beiden Koppelprodukte notwendig ist; im Bild 11 links wird das BHKW komplett bilanziert mit einem zugeführten Brennstoffstrom, es ist bilanziell unerheblich, welcher Brennstoffanteil den beiden Nutzmengen Wärme und Strom zugeordnet werden könnte.

Verlustenergie bzw. Zusatzaufwendungen

Zwischen End- und Nutzenergie liegen – je nach Umwandlungskette und System – Differenzenergiemengen, die durch das (nicht ideale) technische System hervorgerufen werden. Die Namensgebung ist je nach Bilanzverfahren uneinheitlich, wenn auch die Mengen identisch sind. Diese Größen heißen alternativ:

- technischer Verlust, welcher die Endenergie bis zur Nutzenergie verringert (Bilanzprinzip: Endenergie – Verlust = Nutzenergie),
- technischer Zusatzaufwand, welcher die Nutzenergie bis zur Endenergie erhöht (Bilanzprinzip Endenergie = Nutzenergie + Zusatzaufwand).

Folgende anlagentechnische Verluste oder Zusatzaufwendungen werden dabei regulär unterschieden:

- Verlust/Aufwand für die Erzeugung, sofern eine verlustbehaftete Energieumwandlung innerhalb der Bilanzgrenzen stattfindet, ansonsten ersatzweise Verluste der Bereitstellung mit einer Übergabestation,
- Verlust/Aufwand für die Speicherung (sofern vorhanden),
- Verlust/Aufwand für die Verteilung mit einem Leitungsnetz (sofern vorhanden),
- Verlust/Aufwand für die Übergabe und Regelung (nicht in jedem Bilanzverfahren), als Ausdruck des Unterschiedes an Energiebedarf zwischen einem idealen und dem realen technischen System.

Die unterschiedliche Definition von Nutz- und Endenergie (siehe Bild 10) in verschiedenen Bilanzverfahren hat Rückwirkungen auf die Verlustbewertung. Beispiel: wenn die Wärmeabgabe der Heizungsleitungen an den beheizten Bereich als Nutzenergie angesehen wird, ist sie entsprechend in den betreffenden Bilanzverfahren kein Teil der technischen Verluste.

Mit einer eindeutigen Definition von Nutz- und Endenergie im Rahmen der Erstellung eines Energiekonzeptes sind die Verlustenergien bzw. Zusatzaufwendungen der Technik (als Summe) ebenfalls eindeutig festgelegt.

Hilfsenergien

Mit der Versorgung eines Objektes mit Wärme, Kälte, Frischluft oder einer Prozessenergie sind regulär zusätzliche Hilfsenergien verbunden. Dies sind Stromaufwendungen für Antriebe, Pumpen, Ventilatoren und Gebläse, Regler und Ventile.

Werden Energiekonzepte erstellt, welche die Höhe der notwendigen Hilfsenergien verändern, ist eine Bilanzierung der Differenzen empfohlen.

2.5 Energieträgerbewertung im Rahmen von Energiekonzepten

Die eingesetzten Energieträger werden bei der Erstellung von Energiekonzepten üblicherweise zunächst als Energiemengen bilanziert. Anschließend kann eine Umrechnung erfolgen:

- mit Heiz- und Brennwerten, um stoffliche Mengen zu bestimmen, z.B. zur Bemessung von Lagerflächen, Dimensionierung von Versorgungsleitungen usw.,
- mit Preisen in Energiekosten als Teil der Gesamtkosten, zur wirtschaftlichen Bewertung bzw. ggf. Lebenszyklusanalyse,
- mit Primärenergiefaktoren, CO_2-Äquivalenten oder ähnliche Größen zur Umweltbewertung des Energiekonsums.

Den genannten Bewertungsgrößen gemein ist regulär der Bezug auf eine Kilowattstunde Endenergie des betreffenden Energieträgers (also die Verwendung der Schnittstelle "Gebäudegrenze" bzw. "Abrechnungszähler des Lieferanten").

Die bei der Erstellung von Energiekonzepten häufig auftretenden Bewertungsfaktoren sowie die damit zusammenhängenden Schwierigkeiten, Fehler- und Diskussionspotentiale werden nachfolgend vorgestellt.

Heiz- und Brennwert

Bei der Erstellung von Energiekonzepten erfolgen regelmäßig Umrechnungen von Brennstoffmengen in Energiemengen und zurück. Zum Einsatz kommen dafür Heiz- und Brennwerte, beispielsweise die in Tabelle 4 zusammengestellten typischen Werte (gemittelte Werte aus verschiedenen Quellen). Die Angaben beziehen sich auf die an Endkunden (Haushalte, Kleinabnehmer) gelieferten Stoffe und deren Qualitäten.

	Einheit	Heizwert H_i (H_U)	Brennwert H_s (H_O)	Umrechnung $f_{HS/HI}$	Kondensationstemperatur	Anmerkungen
Erdgas E (= Erdgas H)	kWh/m³	10,4	11,5	1,11	56°C	Bezug: Normkubikmeter Dichte: ca. 0,76 kg/m³
Erdgas LL (=Ergas L)		8,9	9,8	1,11	56°C	Bezug: Normkubikmeter Dichte: ca. 0,76 kg/m³
Flüssiggas		30,4	32,8	1,08	53°C	Bezug: Normkubikmeter Dichte: ca. 2,36 kg/m³
Heizöl EL	kWh/l	10,0	10,6	1,06	47°C	Dichte: ca. 860 kg/m³
Braunkohlebriketts	kWh/kg	5,3	5,6	1,06	k. A.	ca. 700 kg/m³ geschüttet ca. 1000 kg/m³ gesetzt
Steinkohlebriketts		9,0	9,2	1,02	k. A.	ca. 760 kg/m³ Schüttdichte für Nüsse, Eierbriketts
Koks		8,2	8,3	1,01	k. A.	
Laubholz	kWh/kg	4,1	4,36	1,06	k. A.	Dichte: ca. 560 kg/m³
Nadelholz		4,4	4,68	1,06	k. A.	Dichte: ca. 420 kg/m³
Holzhackschnitzel		4,3	4,57	1,06	k. A.	Schüttdichte: ca. 185 kg/m³
Pellets		4,9	5,21	1,06	k. A.	Pelletdichte: ca. 1200 kg/m³ Schüttdichte: ca. 650 kg/m³

Tabelle 4 Typische Heiz- und Brennwerte zur Umrechnung in Energiemengen

Der Umrechnungsfaktor $f_{HS/HI}$ gibt dabei an, welchen potentiellen (!) Mehrnutzen die Abgaskondensation bei dem jeweiligen Brennstoff hat. Je höher der Kohlenstoffanteil und geringer der Wasserstoffanteil in dem Brennstoff ist, desto geringer fällt der Brennwerteffekt aus (da der Wasserdampfanteil im Abgas sinkt) und desto kleiner ist der Umrechnungsfaktor.

Zu dem Energieträger Erdgas ist anzumerken, dass real verfügbare Erdgase Brennwerte im Bereich der genannten Qualitäten L (low) bis H (high) aufweisen. Teilweise liegen Werte in der Praxis auch außerhalb des tabellierten Bereiches. Für das real zu erstellende Energiekonzept sollte der Brennwert vom Versorger erfragt werden, sofern eine Umrechnung in stoffliche Mengen gewünscht ist. Der Umrechnungsfaktor $f_{HS/HI}$ = 1,11 gilt für alle Erdgase.

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich ist, können zu jedem Brennstoff zwei Angaben – heiz- und brennwertbezogene Energiemengen – erfolgen. Beim Vergleich von Energiemengen ist dies zu beachten.

Tabelle 5 gibt Hinweise, wann die heiz- und die brennwertbezogene Angabe üblich bzw. vorgesehen ist. So ist eine Angabe "20.000 kWh/a" aus einem Energieausweis nach den Normen DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 immer heizwertbezogen (weil dieses Normenpaket dies so vorsieht), während diese Größe in einer Gasversorgerabrechnung immer brennwertbezogen ist (Branchenübereinkunft).

Soll ein Vergleich von Größen aus der linken und rechten Spalte erfolgen, kommt der Umrechnungsfaktor $f_{HS/HI}$ aus Tabelle 4 zum Einsatz. Dies ist vor allem bei der Energiekonzepterstellung mit Abgleich von Energiebedarf und Verbrauch, einem Vergleich mit typischen Kennwerten aus der Literatur usw. zu beachten.

Heizwert	Brennwert
End- und Primärenergie im Verbrauchsausweis der EnEV (bei Wohn- und Nichtwohnbauten)	Verbrauchsabrechnung (der Gasversorger)
End- und Primärenergie im Bedarfsausweis der EnEV bei Berechnung nach DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 (bei Wohnwohnbauten)	-
Primärenergie im Bedarfsausweis der EnEV bei Berechnung nach DIN V 18599 (bei Wohn- und Nichtwohnbauten)	Endenergie im Bedarfsausweis der EnEV bei Berechnung nach DIN V 18599 (bei Wohn- und Nichtwohnbauten)
frühere und meist heute noch gebräuchliche Effizienzangaben (Wirkungs- und Nutzungsgrade usw.) für Kessel, BHKW u. a. brennstoffbetriebene Wärmeerzeuger von Geräteherstellern	neuere und noch nicht flächendeckend gebräuchliche Effizienzangaben (Wirkungs- und Nutzungsgrade usw.) für Kessel, BHKW u. a. brennstoffbetriebene Wärmeerzeuger von Geräteherstellern
Effizienzangaben (Wirkungsgrad, Aufwandszahl usw.) für Kessel bei Energiebilanzierung nach DIN V 4701-10	Effizienzangaben (Wirkungsgrad, Nutzungsgrad usw.) für Kessel, BHKW, brennstoffbetriebene Wärmepumpen bei Energiebilanzierung nach DIN V 18599
die Mehrzahl der Energiekennwerte (Bedarf und Verbrauch) aus der Literatur, z.B. in VDI 3807	-

Tabelle 5 Anwendungsfälle für heiz- und brennwertbezogene Größen

Vorketten

Die Bewertung der verschiedenen Energieträger mit Preisen, Umweltfaktoren usw. enthält Vorketten bis zu einem Bezugspunkt. Die übliche Schnittstelle zwischen dem "Ende der Vorkette" und "Beginn der Energiebilanz des Energiekonzeptes" ist die Endenergie.

Das bedeutet, dass der Energiekonzeptersteller die Endenergie (für das Gebäude, die Anlage, den Prozess, die Siedlung…) bilanziert, wohingegen die Vorkettenbewertung regulär von anderer Stelle global vorgegeben wird. Es gibt direkte und indirekte Vorketten, regenerative und fossile Vorketten.

Beispiele:

- die Energiebilanz für ein KMU ergibt eine Endenergiemenge für Erdgas; die Umrechnung in Kosten erfolgt mit einem Versorgerpreis, der (unter anderem) alle direkten kostenrelevanten Vorketten der Förderung, Aufbereitung und des Transportes für den Energieträger enthält, aber anteilig auch indirekte Vorketten wie beispielsweise den Erdgastrassenbau
- die Energiebilanz eines Wohngebäudes ergibt eine Endenergiemenge für Strom; die Umrechnung in die EnEV-relevante Primärenergie erfolgt mit einem Primärenergiefaktor von (derzeit) 2,4; dieser umfasst alle direkten Vorketten der Förderung von Rohstoffen, der Erzeugung und des Transportes des Stroms bis zum Abnehmer; indirekte Vorketten für den Energieaufwand des Kraftwerksbaus o. ä. sind nicht enthalten; die EnEV bilanziert nur die fossilen (nicht erneuerbaren) Vorketten.

Bei der Verwendung von Indikatoren für die ökologische und ökonomische Bewertung hat der Energiekonzeptersteller darauf zu achten, welche Vorketten bilanziert werden und ob die sich ergebende Aussage so gewollt ist.

Beim Vergleich von Konzepten ist dafür Sorge zu tragen, dass jeweils gleiche Maßstäbe gelten (ohne/direkte/indirekte Vorketten, fossile/regenerative/alle Vorketten).

Energiepreise

Bei der Verwendung von Energiepreisen zur Umrechnung von Energiemengen in Kosten ergeben sich drei relevante Stolpersteine, die aus der Praxis bekannt sind:

- der korrekte Umgang mit Arbeitpreisen sowie Leistungspreisen, Grund- und Messgebühren o. ä. nicht vom Mengenbezug abhängigen Kostenanteilen,
- die korrekte Verwendung von heiz- und brennwertbezogenen Arbeitspreisen,
- der Einbezug von Preissteigerungen und die Aussage für das Energiekonzept.

Da Endenergiemengen heiz- und brennwertbezogen angegeben werden können, gilt das auch für die Preise, siehe Beispiel in Tabelle 6. Bei der Kostenbilanz müssen beide Größen – Energiemengen und Preise – den gleichen Bezug haben.

Die beobachtete Fehlerquote im Falle einer Erdgasversorgung ist in der Praxis vergleichsweise hoch: es werden fälschlicherweise heizwertbezogene Energiemengen aus einer Bedarfsbilanz mit brennwertbezogenen Preisen eines Versorgers multipliziert. Das Resultat ist falsch und vom Zahlenwert her zu klein (im Beispiel: 619 €), d.h. im Energiekonzept fallen insbesondere die Prognosen künftiger Kosten zu klein aus!

	stoffbezogene Angaben	**brennwertbezogene Angaben**	**heizwertbezogene Angaben**
Erdgasverbrauch, beispielhaft	1000 m³	1000 m³	1000 m³
Energiegehalt, beispielhaft	- nicht notwendig -	H_s = 10,58 kWh_{Hs}/m^3	H_i = 9,53 kWh_{Hi}/m^3
Energiemenge	- nicht notwendig -	10.580 kWh_{Hs}	9.530 kWh_{Hi}
gerundeter Preis	0,686 €/m³	0,065 €/kWh_{Hs}	0,072 €/kWh_{Hi}
Kosten	686 €	686 €	686 €
Anmerkungen	so wird nicht abgerechnet, weil Erdgase schwankende Energiegehalte je Kubikmeter haben.	übliche Abrechnungsart beim Gasversorger, aber unübliche Angabe für Endenergiemengen in Bedarfsbilanzen.	so wird nicht abgerechnet, aber die Preise sind kompatibel zu den meisten Energieangaben aus Bedarfsbilanzen.

Tabelle 6 Beispielhafte heiz- und brennwertbezogene Preise

Hinsichtlich des korrekten Umgangs mit Grundkosten (Leistungspreis, Zählermiete, Ablesegebühren usw.) ergibt sich ebenfalls eine Fehlermöglichkeit. Vielfach werden Grundpreise nicht bei der Berechnung von Einsparungen berücksichtigt. Das ist korrekt, solange die Art der Versorgung so bleibt und keine Änderungen der Grundkosten zu verzeichnen sind.

Sobald Energieträgerwechsel untersucht werden, müssen Grundkosten berücksichtigt werden. Am übersichtlichsten erfolgt dies mit einem separaten Kostenanteil bei der Berechnung – neben den energiemengenabhängigen Arbeitskosten.

Wenn allerdings mit einem Mischpreis aus Arbeits- und Leistungspreis gerechnet werden soll – weil viele Softwareprogramme dies so vorsehen – dann ist dessen Abhängigkeit von der Energiemenge zu bedenken, siehe Bild 12.

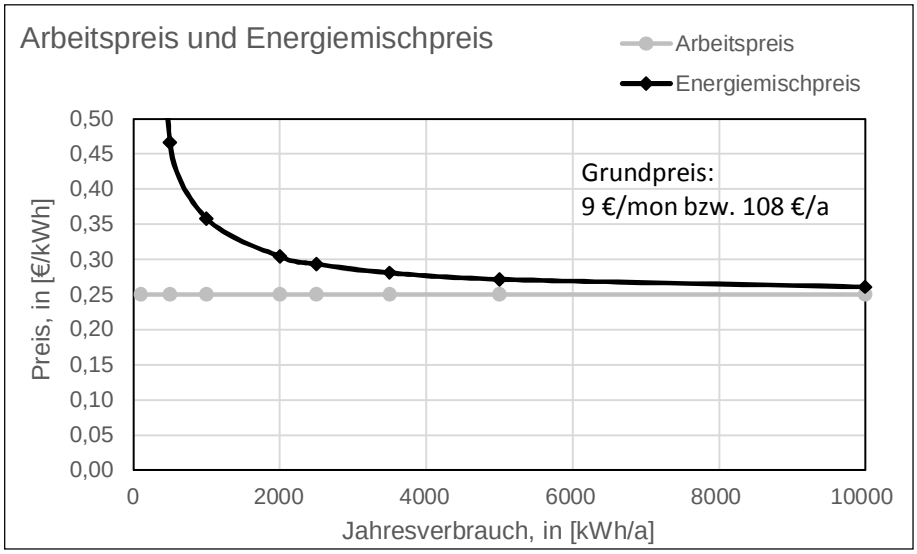


Bild 12 Beispielhafter Energiemischpreis für Strom bei einem Kleinverbraucher

Beispiel: vor Umsetzung von Einsparmaßnahmen beträgt der Strombezug 4000 kWh/a, die Gesamtkosten betragen 1108 €/a (1000 €/a + 108 €/a). Der Mischpreis liegt bei 0,277 €/kWh. Mit Einsparmaßnahmen soll die Endenergiemenge halbiert werden, somit ergeben sich Gesamtkosten von 608 €/a (500 €/a + 108 €/a) und ein Mischpreis von 0,304 €/kWh. Falsch wäre die Berechnung: 0,277 €/kWh · 2000 kWh/a = 555 €/a. Der Fehler tritt häufig bei der Prognose künftiger Kosten auf und bestimmt diese geringer als sie tatsächlich sein werden.

Der Umgang mit Energiepreisanstiegen im Rahmen von Energiekonzepterstellungen obliegt dem Ersteller. Bild 13 zeigt Endverbraucherpreise verschiedener Energieträger. Die Angaben sind nominal (nicht inflationsbereinigt) und enthalten alle Steuern und Abgaben.

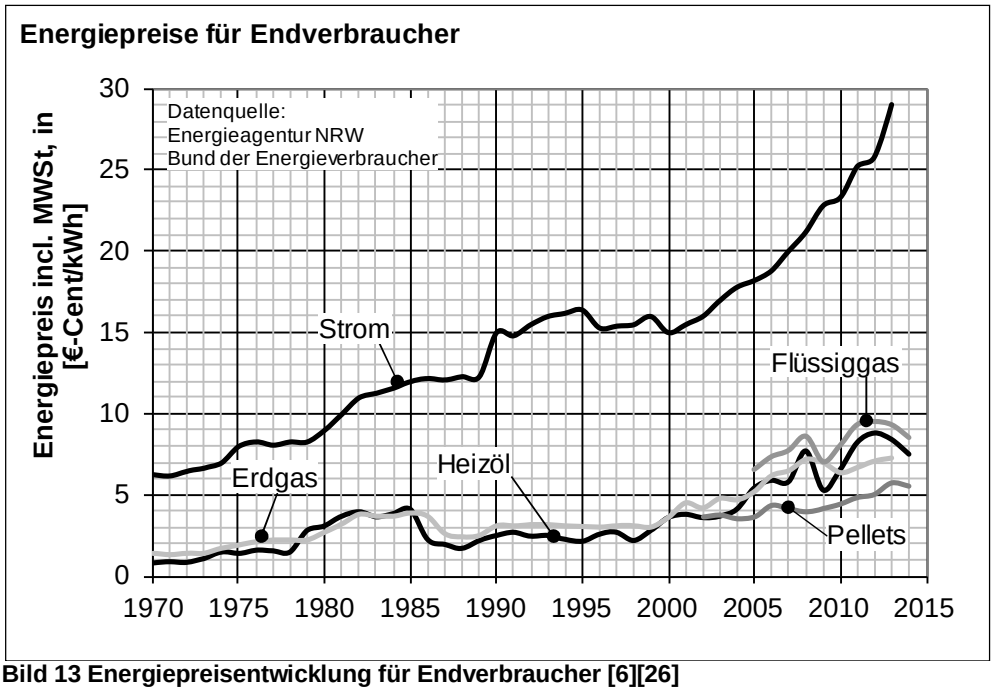


Bild 13 Energiepreisentwicklung für Endverbraucher [6][26]

15- oder 30-Jahres-Trends der Energiepreisentwicklung werden regulär bei der Erstellung von Energiekonzepten berücksichtigt. Typische Annahmen bei einer Vielzahl real durchgeführter Beratungen sind bzw. waren:

- nominale Energiepreisverteuerung: 3 … 6 … 9 %/a,
- gleicher Wert für alle Energieträger,
- Berechnung einer Variante ohne Energiepreisverteuerung.

Auch die Verwendung nicht identischer Teuerungsraten ist selbstverständlich möglich, führt beim Interpretieren der Daten durch Dritte jedoch häufig zu dem Verdacht zugunsten des Energieträgers zu beraten, für den die geringste Teuerung angenommen wird.

Bei der konkreten Umsetzung mit einer Software ist zu beachten, ob das verwendete Berechnungsverfahren für die Wirtschaftlichkeitsbewertung die Energiepreise nominal oder real (inflationsbereinigt) zugrunde legt. Entsprechende Angaben sind zu machen. Üblich sind nominale Werte sowie die zusätzliche Angabe einer Inflation, so dass die reale Energiepreisverteuerung sich rechnerisch ergibt. Parallel ist es ratsam, eine Wirtschaftlichkeitsberechnung auch ohne Energiepreissteigerungen durchzuführen.

CO_2-Äquivalente

Bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit reinem Sauerstoff entstehen Kohlendioxid und Wasserdampf. Die üblichen Brennstoffe enthalten neben Kohlen- und Wasserstoff weitere Elemente und werden mit Luft verbrannt. Das resultierende Abgas kann neben CO_2 und H_2O daher viele weitere Stoffe enthalten, u. a. Kohlenmonooxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (unvollständige Verbrennung), Stickoxide und Lachgas (Reaktion mit dem Luftstickstoff), Schwefelverbindungen usw. Einige der realen Abgasbestandteile sind schädlicher für die Atmosphäre, andere unschädlicher als CO_2.

Bei der Bewertung von Energieträgern im Rahmen von Energiekonzepten wird häufig auf das "CO_2-Äquivalent" zurückgegriffen. Diese Größe enthält die bei der Verbrennung der Endenergie entstehenden CO_2-Mengen, aber auch alle anderen Treibhausgase entsprechend ihrer Klimawirksamkeit auf CO_2 umgerechnet (Bezugszeitraum 100 Jahre). Das Umrechnungsverfahren ist in der Dokumentation zur Datenbank GEMIS/IINAS beschrieben.

Die Vorketten bei der Rohstoffgewinnung, dem Transport und ggf. die Umwandlung sind enthalten. Die CO_2-Mengen, die nachwachsende Rohstoffe in ihrer Wachstumsphase gespeichert haben, werden jedoch nicht bilanziert.

Energieträger			CO_2-Äquivalent, in [g/kWh]
allgemeiner Strommix			605...635
Brennstoffe	fossil	Erdgas	240...250
		Flüssiggas	260...270
		Heizöl EL	300...320
		Steinkohle	425...440
		Braunkohle	445...455
	nachwachsend	Stückholz	5...20
		Holzhackschnitzel	10...35
		Holzpellets	15...45
Nah- und Fernwärme	fossiler Brennstoff	mit KWK	ca. 220
		ohne KWK	ca. 410
	nachwachsender Brennstoff	mit KWK	ca. -330
		ohne KWK	ca. 110
	Deutschland Mix		ca. 295

Tabelle 7 CO_2-Äquivalente nach GEMIS/IINAS 4.2 bis 4.9 (heizwertbezogen) [65]

Die Werte nach Tabelle 7 sind für heizwertbezogene Endenergien angegeben. Die Schwankungsbreite ergibt sich aufgrund veränderlicher Bewertungen insbesondere der Vorketten für die einzelnen Energieträger. Die Werte entstammen der Datendank GEMIS aus verschiedenen Jahren und sind mehreren Fachveröffentlichungen des Instituts Wohnen und Umwelt verschiedenen Ausgabedatums entnommen.

Die für "Nah- und Fernwärme mit KWK" angegebenen Werte entstehen durch eine Berechnung mit der Gutschriftenmethode, welche im Zusammenhang mit den Primärenergiefaktoren erläutert wird.

Es gibt zwei Vorteile bei der Verwendung von CO_2-Äquivalenten im Rahmen der Energiekonzepterstellung. Zunächst wird diese Größe vom (unbedarften) Berichtsempfänger eindeutig als Umweltindikator identifiziert. Sie kann praktisch nicht mit einer Endenergiemenge verwechselt werden – anders als die Primärenergie.

Zum anderen ist von Vorteil, dass das CO_2-Äquivalent als Umweltindikator proportional zum Treibhauspotential der Verbrennungsprodukte ist. Es wird nicht nur bewertet, wie viel höher der Energieaufwand bei der Rohstoffgewinnung ist (siehe Primärenergie), sondern auch welche Stoffe bei der Verbrennung entstehen. Beispiel Steinkohle und Erdgas: der Primärenergiefaktor ist in beiden Fällen 1,1 und sagt aus, dass ca. 10 % Mehraufwand für alle Vorketten zu verzeichnen sind.

Die CO_2-Äquivalente sind aber sehr unterschiedlich, weil 1,7 … 1,8 mal mehr Treibhausgase bei der idealen Kohle- gegenüber der idealen Erdgasverbrennung entstehen; bei Berücksichtigung unterschiedlicher Erzeugerwirkungsgrade erhöht sich dieser Unterschied in der Regel.

Primärenergiefaktoren

Für die Bereitstellung von Energieträgern als Endenergie könnten zusätzliche Aufwendungen bilanziert werden: für die Förderung, Aufbereitung, ggf. Umwandlung und den Transport zu den Abnehmern. Alle genannten energetischen Vorketten können mit einem Primärenergiefaktor beschrieben werden, der die Einheit "$kWh_{Primär}/kWh_{End}$" hat, aber üblicherweise einheitenlos angegeben wird.

Der öffentlich-rechtliche Nachweis im Rahmen der EnEV greift auf diese Faktoren zurück. Die mit der EnEV 2012 geltenden Werte sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Energieträger		Primärenergiefaktoren, heizwertbezogen	
		insgesamt	nicht erneuerbar (EnEV-relevant)
Fossile Brennstoffe	Heizöl EL, Erdgas, Flüssiggas, Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Biogas, Bioöl	1,5	0,5
	Holz	1,2	0,2
Nah-/Fernwärme aus KWK (70 % Anteil)	fossiler Brennstoff	0,7	0,7
	erneuerbarer Brennstoff	0,7	0,0
Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	fossiler Brennstoff	1,3	1,3
	erneuerbarer Brennstoff	1,3	0,1
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	2,4
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8
Umweltenergie	Solar- und Umgebungsenergie, Erdwärme, Geothermie	1,0	0,0

Tabelle 8 Primärenergiefaktoren nach DIN V 18599 (heizwertbezogen) [13]

Der Gesamtfaktor beschreibt alle Energieaufwendungen der Vorkette, der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor nur die fossilen (nicht regenerativen) Aufwendungen. Die Differenz beider Spalten ist der regenerative Primärenergiefaktor, der bei der Energiekonzepterstellung praktisch bedeutungslos ist.

Die Werte sind grob gerundet, die Datenbank GEMIS/IINAS liefert genauere Angaben, z.B. über die Internetseite des Institutes Wohnen und Umwelt [65] regelmäßig veröffentlicht.

Gesamtwerte unter "1,0" für Prozesse mit KWK sind physikalisch nicht erklärlich. Sie ergeben sich aufgrund der derzeit in Deutschland üblichen Berechnungsmethode für gekoppelte Prozesse, der "Strom-Gutschrift-Methode". Die Primärenergieaufwendung für den eingesetzten Energieträger, z.B. Erdgas wird nicht proportional auf die beiden Produkte (Wärme, Strom) verteilt. Ein überproportional großer Anteil wird dem entstehenden Strom zugeschlagen (Motto: welcher Strom musste anstelle des KWK-Stroms nicht mit einem konventionellem Kraftwerk erzeugt werden bzw. welcher Strom wurde von dem KWK-Strom verdrängt). Die Restemissionen werden der Wärme zugeordnet, die somit als "vorkettenarme" Abwärme deklariert ist.

Aufgrund der sehr geringen Primärenergiefaktoren für alle nachwachsenden Brennstoffe, aber auch KWK-Prozesse (durch die gewählte Berechnungsmethode!) können Fehloptimierungen entstehen – analoges Phänomen wie bei den CO_2-Äquivalenten. Abhilfe sollten zukünftig Ressourcenbewertungen schaffen, siehe unten. Ungünstig und für die Energiewende nicht zielführend ist die Einstufung des Primärenergiefaktors als Maß für die Umweltschädlichkeit von Energieträgern. Alle fossilen Brennstoffe haben – unabhängig von ihrem Kohlenstoffgehalt und damit verbundener CO_2-Bildung dieselben oder sehr ähnliche Faktoren. Dies verschleiert die unterschiedliche Emissionsbilanz!

Realistische Ressourcenbewertung

Die Bewertung von Energieträgern hinsichtlich ihrer Vorketten bzw. Klimaschädlichkeit mit den für Energiekonzepte üblichen Faktoren "CO_2-Äquivalent" und "Primärenergiefaktor für den nicht erneuerbaren Anteil" hat Grenzen. Nachteilig ist bzw. sind:

- die Verwendung von Primärenergiefaktoren als Maß für die Umweltwirksamkeit, d.h. die Gleichbehandlung der Brennstoffe unabhängig von ihren Emissionen,
- jeweils sehr geringe Faktoren für Wärme aus Prozessen der KWK, aufgrund der gewählten Gutschriftmethode zulasten des Stroms und zugunsten der Wärme,
- jeweils sehr geringe Faktoren für biogene Brennstoffe,
    - da beim CO_2-Äquivalent die von der Pflanze aufgenommene CO_2-Menge nicht mitbilanziert wird, also faktisch nur die Klimawirksamkeit der anderen Verbrennungsprodukte sowie die der fossilen Vorketten bilanziert wird,
    - da beim nicht erneuerbaren Primärenergiefaktor nur die fossilen Anteile bilanziert werden.

Folgende Praxisprobleme lassen sich in diesem Zusammenhang bei der Erstellung von Energiekonzepten erkennen:

- biogene Brennstoffen werden mit einer gewissen Sorglosigkeit und in Grenzfällen exzessiv empfohlen, zumal auch die Preise derzeit noch teilweise gering sind,
- bei Einsatz von KWK geraten die Kosten für den Betreiber aus dem Blick – insbesondere bei der Beantragung von Fördergeldern (BAFA, KfW) mit Berechnung der Primärenergie,
- der Einsatz unterschiedlicher fossiler Brennstoffe wird als gleichwertig im Sinne des Klimaschutzes verkauft, solange mit Primärenergie argumentiert wird.

Abhilfe könnten alternative oder zusätzliche Bewertungen eines realistischen Ressourcenverbrauchs leisten. Es wird empfohlen,

1. bei Konzepten mit gekoppelter Erzeugung eine gemeinsame und gleichwertige Bilanzierung der Wärme- und Stromerzeugung der KWK durchzuführen und auf die Strom-Gutschrift-Methode zu verzichten. Bereits heute liegen die EEX-Börsenpreise z. B. für Erdgas und für Strom in der gleichen Größenordnung. Erdgas kann zukünftig als Grundstoff für die Chemie wertvoller sein als Strom aus einer Windkraftanlage, der keinen Abnehmer findet
2. als Hauptindikator für die Klimawirksamkeit des Konzeptes immer eine Bewertung der CO_2-Äquivalente vorzunehmen (Tabelle 7, jedoch ohne die nach der Gutschriftmethode korrigierten Werte für KWK)
3. alle Brennstoffe als Ressourcen anzusehen, auch endlich verfügbar biogene Brennstoffe wie Holz und daher alle Vorketten energetisch unabhängig von der Herkunft zu bilanzieren als Primärenergie (Tabelle 8, Spalte "insgesamt", jedoch ohne die Werte für KWK)

Eine Vertiefung mit Beispiel erfolgt in Abschnitt 5.

Andere Indikatoren

Der Bilanzierungsansatz kann auch sehr viel weiter gefasst werden. Eine Lebenszyklusanalyse betrachtet neben dem Einsatz von Endenergien auch die Herstellung, den Unterhalt und die Entsorgung von Bauprodukten.

Mit einem Energiekonzept kann sich – im Sinne der Gebäudezertifizierung nach DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen www.dgnb.de) bzw. BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen www.bnb-nachhaltigesbauen.de) – auch eine detailliertere Bilanzierung aller Vor- und Wirkungsketten verbinden.

Bestimmt werden können für viele Bauprodukte sowie die Energieträger des Betriebs:

- die Menge der eingesetzten Stoffe: gesamte erneuerbare Primärenergie (PERT), gesamte nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT), Einsatz von Sekundärstoffen (SM), Einsatz von Süßwasserressourcen (FW),
- die Mengen der freigesetzten Stoffe: Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD), Stoffe zum Recycling (MFR)

Daraus ergibt sich die Wirkungsanalyse für:

- das Treibhauspotential (GWP),
- das Ozonabbaupotential (ODP),
- das Versauerungspotential (AP) für Niederschläge,
- Eutrophierungspotential (NP), d.h. die Überdüngung der Gewässer,
- Photooxidantienbildungspotential (POCP), d.h. die Bewertung der Sommersmogbildung.

Die Erstellung von Ökobilanzen bzw. Lebenszyklusanalysen einschließlich der eingesetzten Bauprodukte soll an dieser Stelle nicht vertieft werden. Es wird auf einschlägige Softwareprogramme verwiesen: LEGEP (LEGEP Software GmbH), GaBi (PE International) und Umberto NXT LCA (Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH).

2.6 Relevante Regelwerke und Verfahren

Zur Erstellung der rechnerischen Energiebilanz für ein Energiekonzept sind verschiedene Bilanzverfahren eingeführt und verfügbar (Normen/Richtlinien, Kalkulationstabellen mit erläuternder Literatur, professionelle Software).

Nachfolgend sollen 6 in der Energieberatung häufig eingesetzte Verfahren zur Bedarfsbilanzierung tabellarisch gegenübergestellt werden:

- das Normenpaket aus DIN V 4108-6 [14] und DIN V 4701-10 [15], welches zur Bewertung neuer Wohnbauten eingesetzt werden kann, ergänzt um DIN V 4701-12 [16] und PAS 1027 [69] zur Bewertung von Bestandstechnik im Wohnbau
- das Normenpaket DIN V 18599 [13] zur Bewertung von Wohn- und Nichtwohnbauten im Neubau und Bestand,
- die VDI 2067 in ihrer alten Ausgabe [74] aus den 1980er/1990er Jahren, welche komplett zurückgezogen ist, aber als Softwarelösung und zur überschlägigen Berechnung noch Anwendung findet,
- die derzeit geltende VDI 2067 [73] mit Schwerpunkt der Bilanzierung der Wirtschaftlichkeit technischer Anlagen,
- das Bilanzierungspaket vom Institut Wohnen und Umwelt bestehend aus dem "Energiepass Heizung und Warmwasser" von 1997 [51] bzw. in aktualisierter Form "IWU Energieberatungstool" von 2001 [50] und dem "Leitfaden Elektrische Energie LEE" [36],
- das TEK- Verfahren [38] des Instituts für Wohnen und Umwelt zur Bewertung von Nichtwohnbauten.

Darüber hinaus wird die VDI 3807 [76] als relevantes Regelwerk zur Verbrauchsdatenanalyse vorgestellt.

Zweck der Bilanz und Möglichkeiten der Endenergiebewertung

Für die Energiekonzepterstellung (=Beratung) sind alle Verfahren grundsätzlich geeignet – entsprechend realistische Randdaten des Projektes müssen verwendet werden. Für die DIN V 18599 gilt dies nur mit Einschränkung. Viele Kennwerte zur Bewertung der Beleuchtung, Raumlufttechnik und Kühlung sind nur standortbezogen für den Referenznachweisort der EnEV (Potsdam) verfügbar, so dass nur bedingt standortbezogen gerechnet werden kann.

Die neue VDI 2067 beschreibt in ihrem Anwendungsbereich, dass die unter den genannten Randdaten (Raumtemperaturen, Luftwechsel etc.) berechneten Bedarfswerte nicht mit real ausgeführten Objekten vergleichbar sind. Sofern der Bilanz allerdings realistische Randdaten zugrunde gelegt werden, ist das modifizierte Verfahren nach Ansicht der Verfasser als Beratungsverfahren tauglich.

Verfahren	Zweck der Bilanzierung		Endenergiebewertung		
	Nachweis	Beratung	Primärenergie	Emissionen	Kosten
DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12	ja	ja	ja	nein	nein
DIN V 18599	ja	teilweise	ja	nein	nein
VDI 2067 (alt)	nein	ja	nein	nein	ja
VDI 2067 (neu)	nein	teilweise	nein	nein	ja
IWU und LEE	heute: nein	ja	ja	ja	nein
TEK	nein	ja	ja	ja	nein

Tabelle 9 Energiebilanzverfahren – Bilanzzweck und Endenergiebewertung

Aus der jeweiligen Verfahrenshistorie heraus lässt sich auf die weitere Bewertung der Endenergie schließen. Die derzeit eingeführten EnEV-Nachweisverfahren weisen zusätzlich die Primärenergie aus. Die Verfahren des Instituts Wohnen und Umwelt legen daneben den Fokus auf die äquivalenten CO_2-Emissionen. Sie wurden teilweise früher als Nachweisverfahren eingesetzt. Die VDI-Verfahren hatten nie den Anspruch von Nachweisverfahren, sondern dienten immer der Beratung und fokussieren sich demnach auf die Energiekosten.

Da die Bewertungsfaktoren der Endenergie (Primärenergiefaktoren, Energiepreise, Emissionsfaktoren) vom Ersteller eines Energiekonzeptes einfach ergänzt werden können, lassen sich alle Verfahren (ggf. manuell) auf die fehlenden Größen ausweiten.

Verfahrensumfang

Die Verfahren befassen sich mit der Energiebilanzierung von Wohn- und Nichtwohnbauten und sind entsprechend für die in Tabelle 10 genannten Nutzungsarten sinnvoll einsetzbar, wenn ein Energiekonzept erstellt werden soll.

Keines der Verfahren reglementiert die Anwendung abhängig von Baualter. Die DIN V 4701 beschreibt die Bewertungsranddaten für Neu- und Altanlagen jedoch in drei Normteilen (Teil 10: Neubau, Teil 12 plus PAS 1027: Bestand).

Verfahren	Nutzungsart		Gebäude/Anlagenalter	
	Wohnbau	Nichtwohnbau	Neubau/ Neuanlagen	Bestand
DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12	ja	nein	ja	ja
DIN V 18599	ja	ja	ja	ja
VDI 2067 (alt)	ja	ja	ja	ja
VDI 2067 (neu)	ja	ja	ja	ja
IWU und LEE	ja	teilweise	ja	ja
TEK	nein	ja	ja	ja

Tabelle 10 Energiebilanzverfahren – Anwendungsbereiche nach Gebäudenutzung und -alter

Die bilanzierbaren Energieanwendungen geben einen Hinweis, inwieweit die Verfahren für das spezielle Beratungsvorhaben verwendbar sind. Insbesondere bei der Bewertung von Gerätestrom und anderen Prozessenergien kommen die Verfahren an ihre Grenzen.

Verfahren	Heizung	Trinkwassererwärmung	Wohnungslüftung	Raumlufttechnik	Kühlung	Beleuchtung	regenerative Wärme	Stromerzeugung	Anwenderstrom	Prozessenergie
DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12	ja	ja	ja	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein
DIN V 18599	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein
VDI 2067 (alt)	ja	ja	ja	ja	nein	nein	teilweise	teilweise	nein	nein
VDI 2067 (neu)	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	teilweise	nein	nein
IWU und LEE	ja	ja	ja	nein	teilweise	ja	ja	teilweise	ja	teilweise
TEK	ja	ja	nein	ja	ja	ja	teilweise	nein	ja	teilweise

Tabelle 11 Energiebilanzverfahren – Bilanzierte Energieanwendungen

Aufwendungen der Heizung und Trinkwassererwärmung lassen sich mit allen Verfahren berechnen, siehe Tabelle 11. Dagegen sind Prozessenergien (Dampferzeugung o. ä.) und Anwenderstrom (Geräte, Maschinen) nur selten integriert.

- Die DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12 ist ein Wohnbauverfahren, daher fehlen die im Nichtwohnbau typischen Anwendungen (Kühlung, RLT, Prozessenergie) komplett. Allerdings sieht das Verfahren auch keine Bilanz des Beleuchtungs- und sonstigen Anwenderstroms oder der Stromerzeugung vor.
- Die DIN V 18599 bilanziert die meisten der genannten Energieanwendungen. Lediglich Aufwendungen für Prozessenergien und Anwenderstrom fehlen.
- Die VDI 2067 bilanziert keine Beleuchtungs- und sonstige Anwenderstrommengen oder Prozessenergien. Die Stromerzeugung über Photovoltaik ist nicht abbildbar, nur über KWK.
- Das TEK-Verfahren ist ein Nichtwohnbauverfahren, daher ist die Wohnungslüftung nicht integriert. Die Stromerzeugung sowie thermische Prozessenergie ist nicht abbildbar. Dafür sind Stromanwendungen komplett bilanzierbar.
- Ähnliches gilt für das IWU/LEE-Verfahren, welches Wohnbauten und einfache Nichtwohnbauten ohne Kühlung und RLT abbilden kann. Elektrische Prozessenergien und der Anwenderstrom ist abbildbar, die Stromerzeugung über PV allerdings nicht.

Details bei der Bilanzierung

Tabelle 12 gibt Aufschluss über die Detaillierung der Berechnung in den einzelnen Verfahren. Vom stündlichen Bilanzieren des Bedarfs (VDI 2067 neu) bis zur jährlichen Bilanzierung mit mittleren Betriebszuständen ist das gesamte Spektrum gegeben.

Verfahren	Zeitschritte bei der		Art der Bewertungsgrößen für die	
	Raumbilanzierung	Technikbilanzierung	Raumbilanzierung	Technikbilanzierung
DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12	monatlich	jährlich	absolute Energien	flächenbezogene kennwerte, teilweise Aufwandszahlen
DIN V 18599	monatlich	monatlich, in Ausnahmen jährlich	absolute Energien	überwiegend absolute Energien
VDI 2067 (alt)	jährlich	jährlich	absolute Energien	überwiegend Nutzungsgrade
VDI 2067 (neu)	stündlich (Simulation)	jährlich	absolute Energien	überwiegend Aufwandszahlen
IWU und LEE	jährlich	jährlich	absolute Energien	absolute Energien, Nutzungsgrade
TEK	monatlich	jährlich	absolute Energien	Aufwandszahlen, Nutzungsgrade

Tabelle 12 Energiebilanzverfahren – Zeitschritte der Bilanzierung und Art der Kennwerte

Tabelle 13 greift spezielle Fragestellungen bei der Bilanzierung auf, die für die Beratung wichtig sind.

Bei der Raumbilanzierung werden Wärmeeinträge in den Bilanzraum als Gewinne bilanziert. Nicht alle Wärmeeinträge sind im Winter für die Heizung nutzbar. Ein Teil führt – abhängig vom Speicherungsvermögen des Baukörpers, dem Verhältnis der Fremdwärme zu den Verlusten des Raumes, aber auch der Regelung der Anlagentechnik – zu einer mehr oder weniger hohen Überwärmung der Räume. Im weiteren Verlauf auch zu höheren Lüftungsverlusten (Ablüften). Ausgedrückt wird dieser instationäre Effekt in allen quasistationär bilanzierenden Verfahren durch den Fremdwärmenutzungsgrad.

Eine verwandte Fragestellung ist der Umgang mit der Regelung der Heiz- und Kühlflächen. Die nicht ideale Regelung drückt sich in der Realität durch nicht konstante, ggf. im Mittel überhöhte Innentemperaturen aus. Tabelle 13 zeigt, dass rechnerisch die üblichen Nachweisverfahren dafür Hilfsgrößen verwenden, die einen Mehraufwand bezogen auf den idealen Nutzen beschreiben. Dieser Ansatz ist für die Energieberatung nur bedingt hilfreich. Sofern ein Realprojekt mit messbaren Raumtemperaturen zugrunde gelegt wird, kann die ideale Raumtemperatur nicht erfasst werden, sondern bestenfalls die reale.

Die Fragestellung der Verbuchung positiver Effekte einer Wärmerückgewinnung ist hier ebenfalls mit aufgenommen, weil sie mit der Definition der Nutzenergie verbunden ist. Etliche Bilanzverfahren berücksichtigen bei der Bilanz des Nutzenergiebedarfes (Heizwärme, Kühlbedarf) das Vorhandensein einer Lüftungsanlage mit WRG zunächst nicht. Die WRG vermindert später den anlagentechnischen Aufwand bis zur Bilanz der Endenergie.

Verfahren	Fremdwärmenutzung	Übergabeverluste	Wärmerückgewinnung bei der Lüftung
DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12	variabler Fremdwärmenutzungsgrad für solare und interne Wärmegewinne (ohne Anlagentechnik) sowie fester Fremdwärmenutzungsgrad für Gewinne aus Anlagentechnik; keine Berücksichtigung der Anlagenregelung	vorhanden als flächenbezogene Kennwerte (additiv zu einem idealen Nutzen)	als Wärmegutschrift bei der Anlagentechnikbewertung; Nutzenergiebedarf ohne WRG
DIN V 18599	variabler Fremdwärmenutzungsgrad für solare und interne Wärmegewinne (incl. Anlagentechnik); keine Berücksichtigung der Anlagenregelung	vorhanden als Nutzungsgrade (Bewertung eines idealen Nutzens)	als Erhöhung der Zuluft-temperatur und damit verminderter Lüftungswärmeverlust; Nutzenergiebedarf mit WRG
VDI 2067 (alt)	variabler Fremdwärmenutzungsgrad solare und interne Wärmegewinne (ohne Anlagentechnik); Berücksichtigung der Anlagenregelung	als erhöhte Raumtemperaturen	als verminderter Aufwand für die RLT-Anlage; Nutzenergiebedarf ohne WRG
VDI 2067 (neu)	Simulation im Stundenschrittverfahren mit Speichermodell (ohne interne Wärmegewinne aus Anlagentechnik); keine Berücksichtigung der Anlagenregelung	als Aufwandszahlen (Bewertung eines idealen Nutzens)	als verminderter Aufwand für die RLT-Anlage; Nutzenergiebedarf ohne WRG
IWU und LEE	variabler Fremdwärmenutzungsgrad für solare und interne Wärmegewinne (ohne Anlagentechnik) und fester Fremdwärmenutzungsgrad für Gewinne aus Anlagentechnik; keine Berücksichtigung der Anlagenregelung	ggf. als erhöhte Raumtemperaturen	verminderter Luftwechsel und damit Lüftungswärmeverlust; Nutzenergiebedarf mit WRG
TEK	variabler Fremdwärmenutzungsgrad für solare und interne Wärmegewinne (incl. Anlagentechnik); keine Berücksichtigung der Anlagenregelung	ggf. als erhöhte Raumtemperaturen, im Regelverfahren derzeit nicht vorhanden	als Erhöhung der Zuluft-temperatur und damit verminderter Lüftungswärmeverlust; Nutzenergiebedarf mit WRG

Tabelle 13 Energiebilanzverfahren – Berücksichtigung von Wechselwirkungen

Tabelle 14 zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten, wie mit instationären Effekten räumlicher und zeitlicher Teilnutzung (Wochenendabsenkung, Nachtabschaltung, Minderbeheizung einzelner Räume eines Gebäudes usw.) umgegangen wird. Im Rahmen der Energiekonzepterstellung sind alle Lösungen praktikabel.

Verfahren	räumliche Teilnutzung	zeitliche Teilnutzung
DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12	im Nachweis: pauschal berücksichtigt; sonst: über individuell gemittelten Sollwert	im Nachweis: pauschal berücksichtigt; sonst: über individuelles Zeitprogramm
DIN V 18599	über Zonierung und unterschiedliche Sollwerte der Zonen	im Nachweis: pauschal berücksichtigt; sonst: über individuelles Zeitprogramm
VDI 2067 (alt)	Bilanzierung mit mittlerem Sollwert	über pauschale Minderung der Verluste
VDI 2067 (neu)	über Einzelbilanzierung von Bereichen mit unterschiedlichem Sollwert oder Bilanzierung mit mittlerem Sollwert	über individuelles Zeitprogramm
IWU und LEE	über Einzelbilanzierung von Bereichen mit unterschiedlichem Sollwert oder Bilanzierung mit mittlerem Sollwert	über pauschale Minderungsfaktoren
TEK	über Zonierung und unterschiedliche Sollwerte der Zonen	über individuelles Zeitprogramm

Tabelle 14 Energiebilanzverfahren – Berücksichtigung von räumlicher und zeitlicher Teilnutzung

Tabelle 15 zeigt den Umgang der Verfahren mit gekoppelten Prozessen. Sofern eine Bewertung im Rahmen der Energiekonzepterstellung vorgesehen ist, ist der Rückgriff auf DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12 nicht sinnvoll. Ebenfalls TEK liefert noch keine Ergebnisse. Alle anderen Verfahren sind geeignet.

Verfahren	Wärmebilanz	Strombilanz	Vorkette
DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12	bilanziert wird nur die Wärmeabgabe der KWK	nicht vorgesehen	alle Vorketteneffekte werden primärenergetisch in der Stromgutschriftmethode zusammengefasst und als Primärenergiefaktor für die Wärme ausgedrückt
DIN V 18599	Verfahren a: analog VDI 2067 Verfahren b: analog DIN V 4701-10	Verfahren a: analog VDI 2067 Verfahren b: analog DIN V 4701-10	Verfahren a: Brennstoffmenge für Wärme und Strom ohne Separierung Verfahren b: analog DIN V 4701-10
VDI 2067 (alt)	vorgesehen	vorgesehen	Brennstoffmenge für Wärme und Strom; keine Vorkettenbewertung, keine Separierung auf die beiden Einzelnutzen
VDI 2067 (neu)	vorgesehen	vorgesehen	Brennstoffmenge für Wärme und Strom; keine Vorkettenbewertung, keine Separierung auf die beiden Einzelnutzen
IWU und LEE	vorgesehen	optional möglich	Brennstoffmenge für Wärme oder für beide Koppelprodukte möglich
TEK	derzeit nicht vorgesehen	derzeit nicht vorgesehen	derzeit nicht vorgesehen

Tabelle 15 Energiebilanzverfahren – Umgang mit gekoppelten Prozessen

Verfahren	Gewinne	Nutzenergie
DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12	solare Einträge, interne Einträge aus Personen, Geräten, Beleuchtung; Einträge aus Warmwasserbereitung als gesonderte Gutschriften	Wärmeeintrag der Heizung in den beheizten Bereich; ggf. korrigiert um die Gutschriften der Warmwasserbereitung
DIN V 18599	solare Einträge, interne Einträge aus Personen, Geräten, Beleuchtung, Anlagentechnik	geregelte Wärmeabgabe der Heizflächen
VDI 2067 (alt)	solare Einträge, interne Einträge aus Personen, Geräten, Beleuchtung	Wärmeeintrag der Heizung in den beheizten Bereich
VDI 2067 (neu)	solare Einträge, interne Einträge aus Personen, Geräten, Beleuchtung	Wärmeeintrag der Heizung in den beheizten Bereich
IWU und LEE	solare Einträge, interne Einträge aus Personen, Geräten, Beleuchtung	Wärmeeintrag der Heizung in den beheizten Bereich
TEK	solare Einträge, interne Einträge aus Personen, Geräten, Beleuchtung, Anlagentechnik	geregelte Wärmeabgabe der Heizflächen

Tabelle 16 Energiebilanzverfahren – Definition von Nutzenergie, Abgrenzung der Gewinne

Tabelle 16 beschreibt am Beispiel des Heizfalls für ein Gebäude, welche Größen der Energiebilanz als "Gewinne" aufgefasst werden. Die Nutzenergie ergibt sich entsprechend aus der Differenz der Verluste (Transmission und Lüftung) und dem nutzbaren Anteil der Gewinne. Diese Zusammenstellung ist hilfreich, um beispielsweise im Rahmen der Energiekonzepterstellung einen Messwert für den Nutzen (Heizkostenerfassung) mit dem Rechenwert abzugleichen.

Modifizierbarkeit und Einsatzempfehlung

Der Einbezug von Projektkennwerten und die Verfügbarkeit von Standardwerten zeigt Tabelle 17. Entsprechend steigt mit der Detaillierung der Aufwand bei der Bilanzierung.

Verfahren	Verfügbarkeit von Standardwerten	Öffnung für Projektkennwerte	Aufwand der Bilanzierung	Detaillierung
DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10/12	++	++	++	++
DIN V 18599	+++	++	+++	+++
VDI 2067 (alt)	++	++	+	+
VDI 2067 (neu)	+	+++	+++	+++
IWU und LEE	+++	+++	++	++
TEK	++	+	++	++

Tabelle 17 Energiebilanzverfahren – Standard-, Projektkennwerte, Aufwand und Detaillierung

Eine eindeutige Empfehlung für den Einsatz eines bestimmten Verfahrens kann nicht gegeben werden. Hier kommt es eindeutig auf den Zweck des Konzeptes an. Der Leser mag mit Hilfe von Tabelle 9 bis Tabelle 17 selbst eine Einzelfallentscheidung treffen.

Das größte Problem zeigt sich derzeit in der nur teilweisen Eignung der DIN V 18599 für die Beratung, vor allem bei Nichtwohnbauten.

Für Gebäudekonzepte mit Schwerpunkt Heizung, Trinkwarmwasserbereitung sowie Bilanzierung elektrischer Verbraucher hat sich aus Sicht der Autoren das Verfahren "IWU und LEE" als günstig erwiesen. Vor allen die Ausführung als Excel ergibt eine hohe Flexibilisierung. Allerdings ermöglicht dieses Verfahren keine Energiekonzepterstellung für die Raumlufttechnik.

Für die Bewertung von Antrieben und Maschinen, Druckluft und ähnlichen in der Produktion vorkommenden Energieverbrauchern haben sich Branchenlösungen zur energetischen Bilanzierung etabliert. Zudem setzen Berater hier vielfach auch fallbezogene (selbst erstellte) Exceltabelle ein.

Verbrauchsauswertung

Als letztes Verfahren im Überblick soll die VDI 3807 genannt werden. Sie beschreibt in ihrem Blatt 1 ein Verfahren zur Bestimmung von Verbrauchskennwerten (thermische Energie, elektrische Energie, Wasser) für Gebäude und liefert im Blatt 2 typische Werte aus statistischen Erhebungen.

Die Blätter 1 und 2 sind hilfreiche Dokumente, wenn das zu untersuchende Gebäude zunächst eingeordnet – Vielverbraucher, Durchschnitt, Sparer – werden soll, bevor die Detailanalyse durchgeführt wird.

Die Blätter 3, 4 und 5 befassen sich mit Teilkennwertbildung für den Wasser-, Strom- und Wärmeverbrauch. Diese erste Stufe der Detaillierung kann erfolgen, um vom Durchschnitt abweichende (atypische) Verbräuche zu plausibilisieren.

Das Thema Verbrauchsauswertung, u. a. mit Hilfe der VDI 3807 wird im Abschnitt 4 vertieft.

3 Energie- und Bilanzkennwerte

Die Energiebedarfsbilanz ist eine synthetische Nachbildung einer Energiemenge. Es werden dazu einzelne Grundkennwerte addiert, subtrahiert, multipliziert oder dividiert – siehe Abschnitt 4.6. Welche Rechenoperation jeweils sinnvoll ist, ergibt sich meist aus dem abzubildenden physikalischen Phänomen. In jedem Fall werden Grundannahmen für die Berechnung benötigt, die vom zu bilanzierenden Objekt und seiner Umgebung und Nutzung abhängen. Diese Grundannahmen sollen Energie- und Bilanzkennwerte genannt werden und im vorliegenden Abschnitt mit Zahlenwerten belegt werden.

Auf sie wird ebenfalls zurückgegriffen, wenn Verbrauchsdaten analysiert werden. Das Ergebnis der Bilanz liegt als Messwert bereits vor. Häufig muss es jedoch in Teilverbräuche zerlegt werden, um es zu plausibilisieren.

Nutzen der typischen Kennwerte

Es gibt unterschiedliche Arten von Energie- und Bilanzkennwerten, allgemein Eingangsgrößen in eine Energiebilanz.

Zum einen gibt es Mengen- und Größenangaben: Längen, Flächen, Volumina, Stückzahlen. Die konkrete Energiebilanzierung eines Heizungssystems benötigt die Angabe einer Rohrleitungslänge. Anhand typischer Leitungslängen kann der real vorhandene Projektkennwert gemessen und bewertet werden. Andererseits kann – bei fehlendem realem Aufmaß – der Ersatzwert für die Bilanzierung verwendet werden.

Darüber hinaus gibt es stark zeitvariable Größen, z.B. Innen- oder Außentemperaturen. Die Bewertung eines Gebäudes setzt Zahlenwerte voraus. Auf typische fixe Werte wird beispielsweise zurückgegriffen, um Bilanzergebnisse vergleichbar zu machen. Da eine Messung im konkreten Projekt in der Regel langwierig sein dürfte, helfen typische Kennwerte auch, den Vorgang der Bilanzierung zu beschleunigen.

Eine weitere Art von Phänomenen ist schwer messbar. Der Luftaustausch – insbesondere der natürliche – eines Gebäudes mit der Umgebung fällt darunter. Hier hilft der Rückgriff auf typische beschreibende Kennwerte, in diesem Fall meist der Luftwechsel, um überhaupt ein Rechenergebnis zu erzielen.

Detaillierung der Kennwerte

Die Energiebilanz beschreibende Kennwerte nehmen verschiedene Detaillierungsgrade an. Sie können häufig zusammengefasst werden. Das bedeutet zumeist einen Detailverlust, aber eine Zeitbeschleunigung der Datenerhebung und Bilanzierung.

Beispielsweise soll die Energiemenge bestimmt werden, die sich aus der Transmission von Wärme aus einem Gebäude an die Umgebung ergibt. Benötigt werden dann zur Beschreibung des Phänomens:

- ein definiertes Zeitintervall,
- Temperaturen auf beiden Seiten,
- die einzelnen wärmeübertragenden Flächen,
- die Stoffeigenschaften der eingesetzten Materialien der Umschließungsflächen sowie deren Dicken,
- Wärmeübergangswiderstände an den inneren und äußeren Materialoberflächen.

Typische Kennwerte zur Erstellung der Energiebilanz sind für ein einjähriges Zeitintervall:

- eine Anzahl von Heiztagen, an denen überhaupt maßgebliche Transmission festzustellen ist,
- eine repräsentative mittlere Innentemperatur für die Heizperiode,
- eine repräsentative mittlere Außentemperatur für die Heizperiode oder entsprechende Monatswerte,
- wärmeübertragende Flächen, welche projektbezogen bestimmt werden, seltener überschlägig mit Hilfe von Kennwerten (Gebäudekompaktheit, Fensterflächenanteil),
- Wärmedurchgangskoeffizienten, die ihrerseits bereits Zusammenfassungen der Materialeigenschaften incl. Übergangswiderständen sind.

Alle genannten Werte lassen sich mit typischen – nicht projektbezogenen – Zahlen belegen. Selbst für die wärmeübertragenden Flächen gibt es typische Werte.

Zusammenfassen kann man die beiden Temperaturangaben sowie die Heizperiodendauer zu einem Gesamtkennwert, der 'Gradtagszahl'; darüber hinaus auch Flächen und Wärmedurchgangskoeffizienten zu einer Gesamtgröße: 'spezifischer Transmissionswärmeverlustkoeffizient' (oder ähnliche Benennung). Auch für die zusammengefassten Größen sind in der Literatur Ersatzwerte zu finden, welche entweder als Vergleichsgrößen herangezogen werden oder als Ersatzgrößen.

Aufbau des Abschnittes

Einleitend wird die Problematik des fließenden Übergangs von Leistung und Energie bei der Bilanzierung und der Angabe vieler Kennwerte erläutert.

Alle weiteren Abschnitte sind Kennwertsammlungen aus der Literatur, teils gefiltert und aus eigener Erfahrung ergänzt. Dabei liefern die Abschnitte 3.2 und 3.3 typische Kennwerte zur Beschreibung von Nutzungsranddaten und Standortdaten. Daten zum Baukörper und zur Beleuchtung finden sich in 3.4 und 3.5.

Der Beschreibung von Kennwerten für TGA-Anlagen zur Wärme, Warmwasser, Kälte und Luftversorgung widmen sich die Abschnitte 3.6 bis 3.10. Die Automation sowie industrielle Prozesse und ihre typischen Energie- und Bilanzkennwerte werden als Sonderthemen am Schluss des Kapitels in den Abschnitten 3.11 und 3.12 behandelt.

3.1 Leistung und Energie

Die Energiebilanzierung ergibt sich aus einer Leistungsbetrachtung über die Zeit. Dies gilt für alle zu bilanzierenden Phänomene (Transmission, Stofftransport usw.).

Zeitintervalle

Grundsätzlich muss von einer Variation der Leistung im Zeitverlauf ausgegangen werden, siehe Bild 14. Die Schwankungsbreite und -häufigkeit hängt vom zu bilanzierenden Medium oder Prozess und dem gewählten Zeitintervall ab. Je kleiner die Zeitintervalle, desto geringer die Schwankungen der Leistung im Intervall. In den eingeführten Bilanzierungsverfahren (DIN-Normen, VDI-Richtlinien usw., detaillierte Beschreibung und Quellen in Abschnitt 2.6) werden folgende Bilanzierungsintervalle häufig verwendet:

- Jahresschritte (z.B. DIN V 4701-10, IWU Energiepass),
- Monatsschritte (z.B. DIN V 4108-6, DIN V 18599-5),
- Stundenschritte (z.B. VDI 2067, DIN V 18599-3 für individuelle Systeme),
- Viertelstundenschritte (z.B. bei ingenieurmäßigen Bilanzen von Stromabnehmern)
- Zehntelstundenwerte (z.B. bei Simulationen von Raumlufttechnik).

Häufig ist der Betrachtungszeitraum insgesamt ein Jahr. Er ergibt sich aus der Summation der Einzelenergiemengen. Für jedes Teilintervall wird eine mittlere repräsentative Leistung benötigt, siehe Bild 14.

Viele Bilanzverfahren mischen die Zeitintervalle, abhängig von der zu erwartenden Schwankung der Leistung. Beispiel ist die DIN V 18599 [8], deren Hauptbetrachtungszeitraum ein Jahr ist, welches sich aus der Summation der Ergebnisse von 12 Monatswerten ergibt. Für die Bilanzierung gibt die Norm Nachfolgendes vor:

- Teil 2 der Norm bilanziert den Wärmebedarf von Gebäuden prinzipiell im Monatsverfahren, unterscheidet aber in Nutzungs- und Nebennutzungszeiten und gewichtet das Ergebnis entsprechend (über ein Jahr gesehen gibt es demzufolge 24 Teilbilanzen)
- Teil 3 der Norm bilanziert die Raumlufttechnik monatsweise mit Kennwerten; sollten diese zur Beschreibung der realen Verhältnisse nicht ausreichen, kann der Normanwender eine Bilanzierung auf Stundenebene durchführen und jeweils Monatssummen bilden
- Teil 9 der Norm bilanziert Blockheizkraftwerke in einem Jahresverfahren
- Teile 5 und 8 der Norm bilanzieren prinzipiell in Monatsverfahren, jedoch wird für die Berechnung von Wärmepumpen der Monat in Teilintervalle verschiedener Quellentemperaturen zerlegt; die Monatssumme ergibt sich aus einer Häufigkeitsverteilung der damit verbundenen Leistungsintervalle, siehe Bild 14.

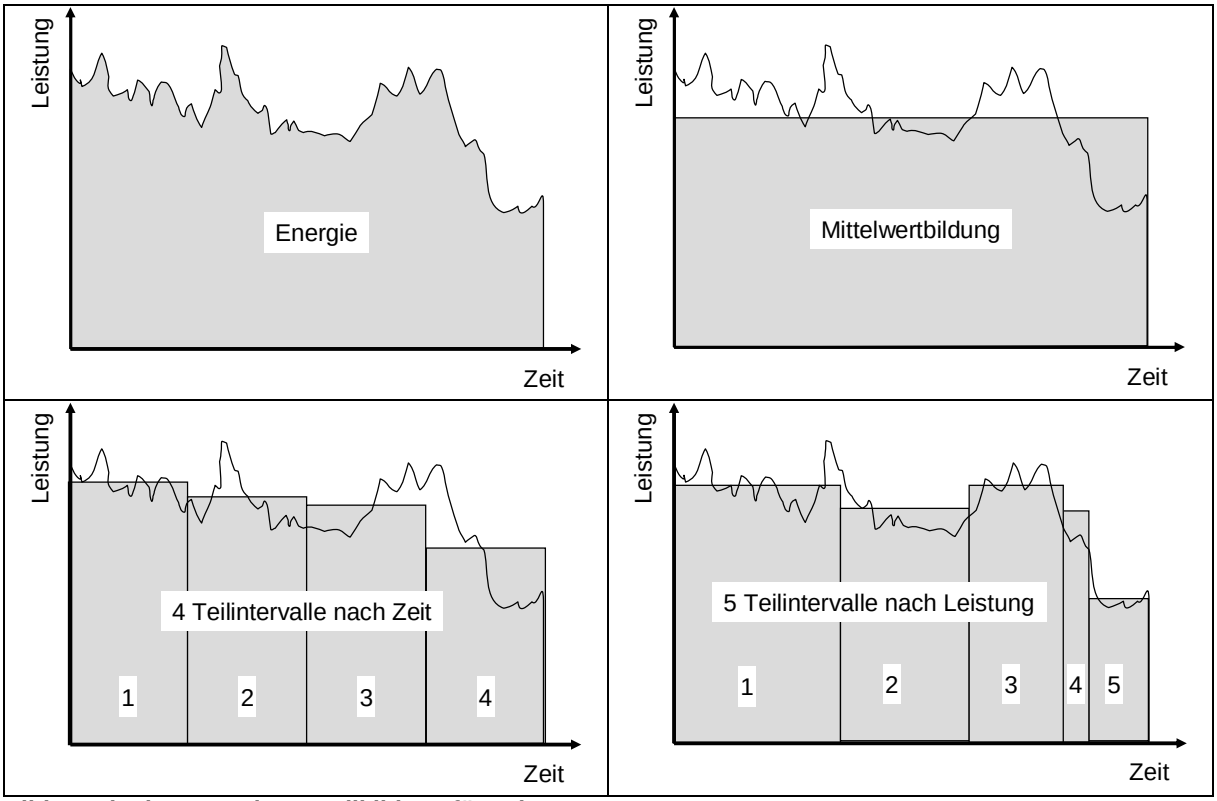


Bild 14 Mittelwert- und Intervallbildung für Leistungen

Die Unterteilung des Bilanzzeitraums in Zeit- und/oder Leistungsintervalle erleichtert die Angabe typischer (repräsentativer) Mittelwerte der Einflussgrößen auf das Bilanzergebnis.

Korrekturfaktoren für quasi-statische Betrachtungen

Innerhalb des grundsätzlich festgelegten Bilanzintervalls gibt es demnach viele Größen, die schwanken. Ist eine einfache Mittelwertbildung nicht möglich bzw. sinnvoll, werden üblicherweise Korrekturfaktoren eingeführt. Sie korrigieren die eigentlich dynamischen Verhältnisse in einen quasi-statischen Rechenwert. Folgende Beispiele sind hier zu nennen:

Ohne weitere Korrekturfaktoren kommt im Allgemeinen die Angabe einer mittleren Außentemperatur aus; sie ergibt sich als einfacher Mittelwert aller verfügbaren Einzeltemperaturen im Zeitraum.

Die Angabe einer mittleren repräsentativen Rauminnentemperatur für einen langen Zeitraum ist komplizierter; enthält der Wert doch Einflüsse von Aufheiz- und Abkühlvorgängen, die Regelgüte der Heiz- und Kühlflächen, den Einfluss von Überwärmung durch Fremdwärme sowie ggf. verschiedene Sollwertanforderungen des Raumnutzers. Für die Energiebilanzierung gibt es diverse Rechenmethoden zur Abbildung aller Effekte:

- Bilanzierung mit einer repräsentativen Temperatur, die alle Einflüsse enthält
- Bilanzierung mit einer Bilanztemperatur (welche die Solltemperatur sowie Aufheiz- und Abkühleffekte enthält) sowie mit separaten Übergabeverlusten (enthalten Korrekturen aufgrund nicht idealer Regelung) und Fremdwärmenutzungsgraden (potentielle Raumüberwärmung durch Fremdwärme)

Korrekturfaktoren bzw. Korrekturgrößen – wie Übergabeverluste und Fremdwärmenutzungsgrade – sind i. A. aus Simulationsrechungen mit sehr kleinen Rechenzeitschritten abgeleitet. Als Beispiel sei hier der Übergabeverlust zu nennen. Die Ableitung von Kennwerten kann man sich wie folgt vorstellen:

- gegeben ist ein Typraum mit konstant (= ideal) 20°C Raumsolltemperatur; dessen Transmissionswärmeverlust wird berechnet – beispielsweise für ein Jahr; beispielhaftes Ergebnis: 1000 kWh/a
- anschließend wird eine Simulation im Stundenschrittverfahren durchgeführt, wobei Überschreitungseffekte des Sollwertes aufgrund des nicht idealen Reglers, z.B. eines Thermostatventils mit Hilfe dynamischer Gleichungen abgebildet werden; der Transmissionswärmeverlust ergibt sich ebenfalls, jedoch zu 1040 kWh/a
- Schlussfolgerung: die Bilanzierung mit konstant 20°C führt zum falschen Ergebnis
- Konsequenz: Einführung einer additiven (+40 kWh) oder multiplikativen (· 1,04 Korrekturgröße, die den Namen 'Übergabeverlust' bekommt
- Konsequenz alternativ: Korrektur einer der Bilanzausgangsgrößen, hier der Innentemperatur und Einführung eines Korrekturterms (beispielsweise +0,6 K), so dass sich das gewünschte Endergebnis ergibt.

Es sei erläuternd ergänzt: die Korrektheit eines solchen Vorgehens steht und fällt mit dem Simulationsmodell und den gewählten Randdaten.

Auch durch Messung – anstelle der Simulation – lassen sich typische Langzeitmittelwerte für etliche Bilanzranddaten bestimmen. Im Falle der Innentemperatur kann anschließend allerdings kaum mehr nachvollzogen werden, aufgrund welcher Einflüsse der Langzeitmittelwert sich so eingestellt hat. Dieses Problem könnte eine sehr große vergleichende statistische Auswertung lösen.

Wirkungs- und Nutzungsgrade

Ummittelbar mit der Thematik der Leistung und Energie sind zwei dimensionslose Kennwerte zur Beschreibung der Effizienz von Prozessen verbunden:

- $$Wirkungsgrad = \frac{Nutzeistung}{Aufwandsleistung} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{zu}}$$
- $$Nutzungsgrad = \frac{Nutzenergie}{Aufwandsenergie} = \frac{Q_{Nutz}}{Q_{Aufwand}} = \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}}$$

Der Wirkungsgrad ist eine Momentaufnahme eines einzelnen Betriebszustandes. Beispielsweise eines Kessels, der in Betrieb ist und mit einer Kesselwassertemperatur von 72°C läuft. Nach Bild 15 hat er beispielsweise einen Wirkungsgrad von 92,5%.

Sofern die Kesselwassertemperatur sich ändert, ergeben sich abweichende Werte des Wirkungsgrades. Dies ist bei einer Energiebilanz zu berücksichtigen. Beispielsweise durch Bestimmung einer repräsentativen Kesselwassertemperatur vor der Ablesung des Wirkungsgrades für das Intervall.

Andererseits ist ein Kessel eine Komponente, die – bei Betrachtung langer Bilanzzeiträume – nicht ständig in Betrieb ist. Sie wechselt zwischen Betriebsphasen (es gilt der Wirkungsgrad) und Stillstandsphasen (charakterisiert durch den Betriebsbereitschaftsverlust). Geht der Kessel mit 72°C Kesselwassertemperatur in den Stillstand über, ergeben sich nach Bild 15 beispielsweise 1,6 % Verlust. Die Größe ist – wie der Wirkungsgrad – ebenfalls auf die zugeführte Brennstoffleistung bezogen.

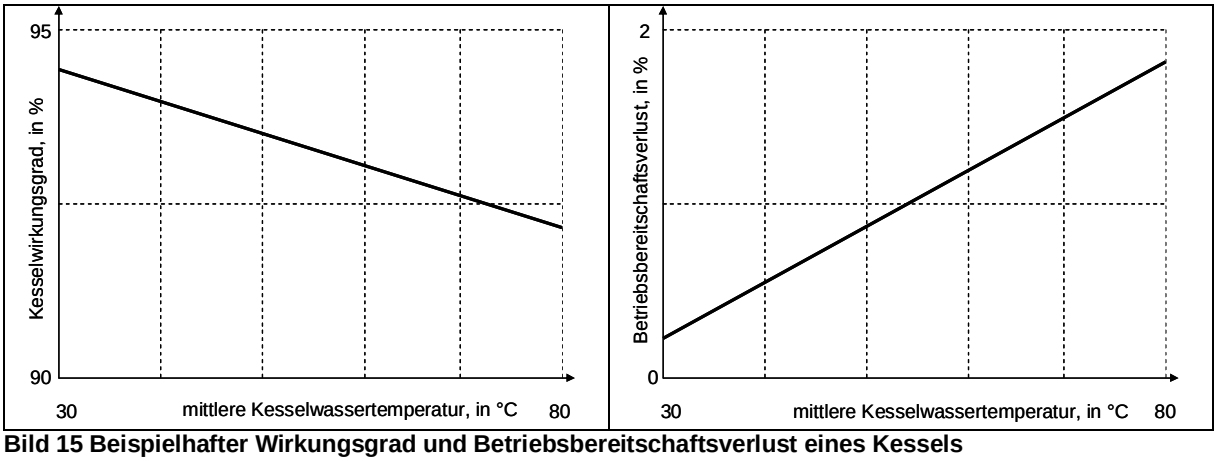


Bild 15 Beispielhafter Wirkungsgrad und Betriebsbereitschaftsverlust eines Kessels

Wird ein langer Zeitraum bilanziert, ist eine Gewichtung mindestens der Betriebs- und der Stillstandsphasen vorzunehmen. Je ein typischer Wirkungsgrad und Betriebsbereitschaftsverlust ist dazu vorher zu bestimmen. Nach diesem Prinzip arbeiten viele Bilanzverfahren (DIN V 4701-10 [15], IWU [51]).

Alternativ werden mehrere Wirkungsgrade gewichtet. Das ist beispielsweise die Vorgehensweise bei der Bestimmung des 'Normnutzungsgrades' für Kessel nach DIN 4702-8. Insgesamt 5 Betriebsphasen werden anteilig gemittelt. Allerdings ist anzumerken, dass keine Nulllastphase (also Betriebsbereitschaft) enthalten ist. Daher ist der 'Normnutzungsgrad' nicht repräsentativ für den Realbetrieb.

3.2 Nutzungsranddaten

Zu den wichtigen Merkmalen, welche die Nutzung eines Gebäudes, Gerätes oder einer Maschine beschreiben gehören in jedem Fall die Nutzungszeiten t. Typische Werte werden – in täglicher und jährlicher Auflösung – im Abschnitt 3.2.1 angegeben.

Zur Beschreibung der Gebäudenutzung benötigt man außerdem Angaben zur Innentemperatur ϑ_i. Hierbei ist in Sollwerte sowie zeitliche und/oder räumliche Mittelwerte zu unterscheiden, siehe Abschnitt 3.2.2. Luftfeuchten finden bei der energetischen Bewertung nur im Ausnahmefall Berücksichtigung: wenn der Schwerpunkt bei der Einschätzung von Raumluft- und Klimatechnikprozessen liegt.

Die Nutzung wird darüber hinaus von der Luftqualität, im energetischen Sinne von Luftvolumenströmen $\dot{V}$ bzw. Luftwechselraten n charakterisiert. Hier differieren die Angaben der Planung zu gewünschten Werten und praktischen Untersuchungen in realen Gebäuden. Abschnitt 3.2.3 macht Angaben zu typischen Bilanzkennwerten.

Bei Gebäudenutzungen mit Warmwasserbedarf resultiert eine Energiemenge für dessen Erwärmung. Die Literatur macht Angaben zu gemessenen statistisch zu erwartenden Kalt- und Warmwasserverbräuchen bzw. Gesamtwasserverbräuchen und Warmwasseranteilen, siehe Abschnitt 3.2.4. Zusammen mit einer Angabe, auf welche Endtemperatur das Wasser erwärmt wird, resultiert eine Energiemenge Q_{ww}.

Liegt der Schwerpunkt des Energiekonzeptes bei der Beleuchtung, sind nutzungscharakterisierende Beleuchtungsstärken E ein üblicher Bilanzkennwert. Hier ist zu unterscheiden zwischen Kennwerten für den Bereich der Sehaufgabe sowie mittleren Werten für gesamte Räume, siehe Abschnitt 3.2.5.

Schließlich soll als Nutzungskennwert in einer Energiebilanz auch der Stromverbrauch für Geräte verstanden werden – Haushaltsgeräte, Büroausstattung, Aufzüge, zentrale und dezentrale Kommunikationsgeräte usw. Die Energiemenge ist direkt kosten- und emissionsrelevant. Zusätzlich macht sie sich indirekt bei der Einschätzung des Heiz- und Kühlbedarfs von Gebäuden bemerkbar. Beiden Aspekten widmet sich Abschnitt 3.2.6. Für Detailfragen industrieller Stromanwendungen wird auf Abschnitt 3.12 verwiesen.

Zu Aspekten der Nutzungsbeschreibung steht eine breite Literaturpalette zur Verfügung. Insbesondere wird auf folgende Quelldaten hingewiesen:

- viele Teilaspekte der Nutzungsranddaten finden sich in den Veröffentlichungen des Instituts Wohnen und Umwelt zu Teilkennwerten im Nichtwohnbau TEK [38][39], der Toolbox zum Energiepass Heizung/Warmwasser [50] sowie in der DIN V 18599-10 [8],
- eine ausgezeichnete Fundquelle zu Verbrauchsstatistiken sowie entsprechenden Teilkennwerten für Strom und Wasser ist die VDI 3807 [76].

Weitere Literaturverweise zu Veröffentlichungen der Verbraucherzentralen, von Messdienstleistern etc. sind themenspezifisch benannt.

3.2.1 Nutzungs- und Betriebszeiten

Zur Energiebilanzierung werden Zeitangaben benötigt. Die Art der Zeitangaben hängt vom Bilanzmodell, der Auflösung in Einzelzeitschritte und dem Umgang mit Leistungen ab. Mögliche Vorgehensweisen zur Abbildung von veränderlichen Leistungen innerhalb des betrachteten Gesamtzeitraums sind:

- Modell mittlerer Leistungen im Gesamtzeitraum: ggf. Teilung des Gesamtbilanzzeitraums (oft ein Jahr) in kleinere Zeitschritte (Monate, Stunden usw.); Mittelwertbildung aller relevanten, leistungsbeeinflussenden Größen und Bestimmung der mittleren Leistung für jeden Zeitschritt; Energiemengenbestimmung aus der Multiplikation von mittlerer Leistung und Zeit
- Modell mittlerer Leistungen im Betriebszeitraum: ggf. Teilung des Gesamtbilanzzeitraums in kleinere Zeitschritte (wie oben); Teilung eines Zeitschrittes in Betriebszeit und Nichtbetriebszeit (Heizperiode – Nichtheizperiode, Tag – Nacht o. ä.); Mittelwertbildung aller relevanten, leistungsbeeinflussenden Größen und Bestimmung der mittleren Leistung innerhalb der Betriebszeit für jeden Zeitschritt; Energiemengenbestimmung aus der Multiplikation von mittlerer Leistung und Betriebszeit

- Modell maximaler Leistungen und Vollbenutzungszeit: ggf. Teilung des Gesamtbilanzzeitraums in kleinere Zeitschritte (wie oben); Bestimmung der Maximalleistungen sowie von Vollbenutzungszeit (meist Stunden); Energiemengenbestimmung aus der Multiplikation von Maximalleistung und Vollbenutzungszeit.

Die sich ergebende Energiemenge (Fläche unter der Kurve bzw. der Rechtecke) ist jeweils identisch, siehe Bild 16. Es könnte sich bei dem Beispiel um eine Heizenergiebilanz über ein Jahr handeln. Die Maximalleistung tritt nur einmal im Jahr auf, Vollbenutzungsstunden machen nur etwa 1/4 der Gesamtzeit aus. Die Betriebszeit ist in diesem Fall die Heizperiode.

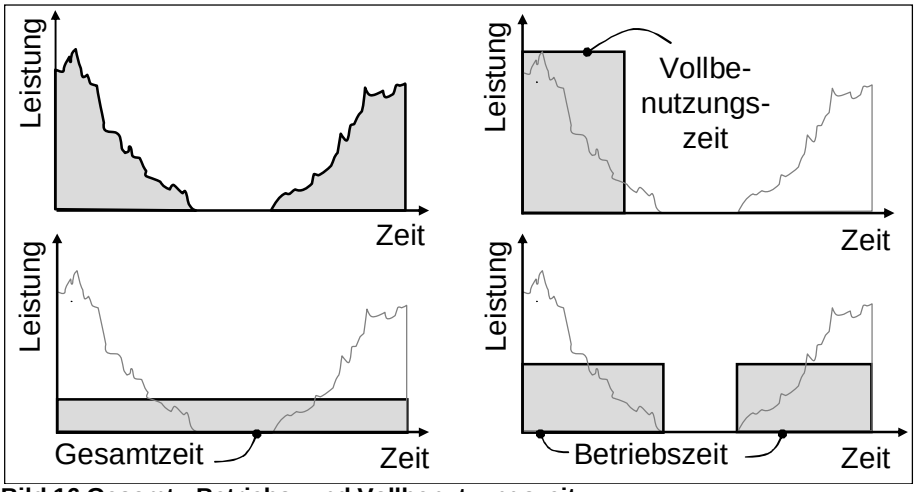


Bild 16 Gesamt-, Betriebs- und Vollbenutzungszeit

Entsprechende Überlegungen zur zeitlichen Mittelung von Leistungen können beliebig verschachtelt werden – dies ergibt sich auch aus den Kennwerten der nachfolgenden Tabellen.

Tägliche und jährliche Nutzungszeiten

Unter täglichen und jährlichen Nutzungszeiten t oder z versteht man in Tabelle 18 die Anwesenheit von Personen in den Gebäuden der genannten Nutzungsart.

Nutzungsart	Nutzungszeit			mittlerer Jahresanteil
	[h/d]	[d/a]	[h/a]	
Bettenzimmer, Pflege im Krankenhaus	24	365	8760	100%
Rechenzentrum	24	365	8760	100%
Wohnhäuser, Heime, Kasernen, Strafanstalten	14...24	365	5110...8760	79%
öff. Parkhaus	15...24	300...365	4500...8760	76%
Hotelzimmer	10...24	365	3650...8760	71%
Lager/Logistik	10...24	250...365	2500...8760	64%
Gewerbe, Produktion, Werkstatt	8...24	220...300	1760...7200	51%
Einzelhandel, Bibliothek	10...16	250...300	2500...4800	42%
Restaurant, Küche	8...14	200...300	1600...4200	33%
Bäder	6...14	250...300	1500...4200	33%
Büro, Seminar, Archiv, Labor, Praxen	8...12	220...260	1760...3120	28%
Messe, Kongress	8...14	150...250	1200...3500	27%
Turnhallen, Fitnesszentren	6...14	200...250	1200...3500	27%
Museum	6...12	200...250	1200...3000	24%
Theater, Veranstaltung, Kino, Konzersaal	6...8	200...365	1200...2920	24%
Schule, Kindergarten	6...12	200...220	1200...2640	22%
Kantine	6...12	200...220	1200...2640	22%
Hörsaal	8...12	150...200	1200...2400	21%

Tabelle 18 Tägliche und jährliche Nutzungszeiten [8][13][39][50]

Innerhalb der genannten Zeiträume ist ein Einhalten des behaglichen Raumklimas (Temperatur, ggf. Feuchte, Luftqualität, Beleuchtungsstärken) planerisch vorgesehen und in der Praxis mit hoher Wahrscheinlichkeit gegeben. Trinkwassernutzwärme wird in der Nutzungszeit benötigt. Die aktive Nutzung elektrischer Geräte fällt ebenfalls größtenteils in die Nutzungszeit.

Ob und welche Energiemengen für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung außerhalb der genannten Nutzungszeiten anfallen, hängt in großem Maße von der anlagentechnischen Regelung ab. Bei elektrischen Geräten sind Standbyverbräuche zu verzeichnen.

Viele Energiebilanzverfahren unterscheiden daher rechnerisch in die Nutzungs- und Neben- oder Nichtnutzungszeit. Sie bestimmen Teilenergiemengen für die unterschiedlichen Zeitanteile, die sich aus den unterschiedlichen Nutzungsparametern (Temperatur, Luftvolumenstrom usw.) ergeben.

Lüftungs-, Heiz- und Kühlperioden bzw. -zeiten

Die Heizperiode t_{HP} [d/a] entspricht der Zeit eines Jahres, die ein Gebäude durch die Heizungsanlage aktiv mit Wärme versorgt wird, siehe auch Abschnitt 3.3.1. Analoges gilt für die Kühlperiode t_{KP} [d/a], die sich auch dann angeben lässt, wenn keine Kühltechnik vorhanden ist. Es ist die Zeit, in der die gewünschten Raumtemperatursollwerte (oder Raumluftfeuchten) entsprechend mangels Technik überschritten werden.

Heiz- und Kühlperiode hängen von der Qualität des Baukörpers, Art der Nutzung sowie internen und solaren Wärmeeinträgen ab. Es lassen sich Heiz- und Kühlgrenztemperatur definieren. Gebäude mit einem Toleranzband für das Innenraumklima weisen einen Zeitraum auf, der weder der Heiz- noch der Kühlperiode zuzurechnen ist.

Innerhalb der Heiz- und Kühlperiode besteht die Notwendigkeit eines Anlagenbetriebs für die Heizung- und Kühlanlagen. Ob dieser durchgehend (modulierend) stattfindet oder periodisch (taktend) erfolgt, hängt von der Erzeugerleistung, den Speichermassen usw. ab. Tabelle 19 zeigt typische Heiz- und Kühlzeiten. Sie ergeben sich aus der Anwesenheit von Personen in den Gebäuden zuzüglich einer Vorlaufzeit, um das Raumklima entsprechend einzustellen.

In der restlichen Zeit des Tages kann (nicht muss) ebenfalls Anlagenbetrieb zu verzeichnen sein, jedoch mit anderen Sollwerten.

Nutzungsart	Heizung [h/d]	Kühlung [h/d]	Lüftung [h/d]
Bettenzimmer, Pflege im Krankenhaus	24 h/d	24 h/d	24 h/d
Museum	24 h/d	24 h/d	24 h/d
Bäder	24 h/d	-	24 h/d
Rechenzentrum	-	24 h/d	24 h/d
Wohnhäuser, Heime, Kasernen, Strafanstalten	24 h/d	-	t_{Nutz}
Hotelzimmer	24 h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Büro, Seminar, Archiv, Labor, Praxen	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Einzelhandel, Bibliothek	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Schule, Kindergarten	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Hörsaal	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Kantine	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Restaurant, Küche	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Gewerbe, Produktion, Werkstatt	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Theater, Veranstaltung, Kino, Konzersaal	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Messe, Kongress	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Turnhallen, Fitnesszentren	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
Lager/Logistik	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d	t_{Nutz} + 2h/d
öff. Parkhaus	-	-	t_{Nutz}

Tabelle 19 Heizungs- und Kühl- sowie Lüftungszeiten [13][eigene]

Für die tägliche Lüftungszeit gilt ebenfalls eine Kopplung an die Nutzungszeit. Bei Abwesenheit von Personen außerhalb der Nutzungszeit, besteht nur in wenigen Nutzungsarten Lüftungsbedarf (z.B. in vielen Laboren).

Ob die Lüftungsperiode das ganze Jahr umfasst oder ausschließlich die Heizperiode, hängt von der Belegungsdichte der Räume und der Möglichkeit ausreichender Schadstoffabfuhr über Fensterlüftung ab.

Beleuchtungszeiten

Tägliche Beleuchtungszeiten korrespondieren mit den Nutzungszeiten aus Tabelle 18. Für die Bestimmung von Energiemengen der Beleuchtung ist relevant, ob die Nutzungszeit eher in die Nachtzeit (in jedem Fall notwendige künstliche Beleuchtung) oder Tagzeit (Potential zur Tageslichtnutzung) fällt. Tabelle 20 gibt Aufschluss über typische Verhältnisse.

Nutzungsart	Beleuchtung	
	Anteil zur Tagzeit	Anteil zur Nachtzeit
Schule, Kindergarten	95 %	5 %
Kantine	95 %	5 %
Hörsaal	90 %	10 %
Museum	80...90 %	20...10 %
Einzelhandel, Bibliothek	80 %	20 %
Büro, Seminar, Archiv, Labor, Praxen	70...90 %	30...10 %
Gewerbe, Produktion, Werkstatt	60...95 %	40...5 %
Bäder	65 %	35 %
Restaurant, Küche	60 %	40 %
öff. Parkhaus	60 %	40 %
Turnhallen, Fitnesszentren	50...65 %	50...35 %
Messe, Kongress	50...60 %	50...40 %
Bettenzimmer, Pflege im Krankenhaus	50 %	50 %
Rechenzentrum	50 %	50 %
Lager/Logistik	50 %	50 %
Wohnhäuser, Heime, Kasernen, Strafanstalten	50 %	50 %
Hotelzimmer	20 %	80 %
Theater, Veranstaltung, Kino, Konzersaal	10...20 %	90...80%

Tabelle 20 Beleuchtungszeitanteile [13][eigene]

Die Beleuchtungsperiode – in Analogie zur Heiz- und Kühlperiode – ist das ganze Jahr.

Bewertung der Nutzungsunterbrechung

Eine Nutzungsunterbrechung äußert sich bei der Energiebilanzierung durch geringer angesetzte Nutzungszeiten (üblich für Urlaubs- und Ferienzeiten, periodische Wochenendabwesenheiten, ggf. auch Nachabwesenheit) und/oder geringere mittlere Leistungen.

Insbesondere der Wohnungsbau wird häufig als durchgehend genutzt (24 h/d und 365 d/a) bilanziert. Alle Urlaubs- und täglichen Abwesenheitszeiten äußern sich in der Annahme mittlerer (verminderter) Nutzungsranddaten, z.B. Warmwassermengen, Luftwechsel usw.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Wöchentliche und tägliche Nutzungsgewohnheiten werden bei der Erstellung individueller Energiekonzepte erfragt. Zusammenhängende Urlaubszeiten bilanziell berücksichtigt.

Die Anlagenbetriebszeiten ergeben sich aus Erfassung der Regelungseinstellungen (Zeitschaltprogramme, Grenz- und Umschalttemperaturen) sowie den Nutzungszeiten. Es gilt i. d. R. dass Anlagen mindestens so lange in Betrieb sind wie Nutzung vorhanden ist.

Einsparpotentiale

Der Faktor Zeit birgt große Energieeinsparpotentiale. Es ist zu unterscheiden zwischen:

- Nutzungszeitminderung (Verzicht), d.h. kürzere absolute Laufzeiten (z.B. Wasserverbrauch, Beleuchtungsstrom, Gerätestrom) oder kürzere Zeiten mit einzuhaltendem Sollwert und längere Zeiten ohne Sollwerterreichung (z.B. verlängerte Heiz- und Kühlpausen),
- Nutzungsbündelung, d.h. prinzipiell unveränderte absolute Nutzungszeiten, aber innerhalb eines kürzeren Zeitfensters, um z.B. Zeiten der Komplettabschaltung zu erhöhen, Betriebsbereitschaftszeiten zu mindern sowie die Anzahl von Aufheiz- und Abkühlvorgänge zu mindern,
- Betriebszeitanpassung der technischen Anlagen an die tatsächlichen Nutzungszeiten, d.h. geringe Vor- und Nachlaufzeiten im Normalmodus und Erhöhung von Zeiten mit abgeschwächten Sollwerten, aber auch Verminderung von Betriebsbereitschaft durch Totalabschaltung (falls nicht sicherheitstechnische, hygienische o. ä. Aspekte entgegen sprechen),
- Vermeidung des Gegeneinanderarbeitens technischer Anlagen, z.B. Heizung und Kühlung, Verschattung und Kunstlichtnutzung (falls nicht sicherheitstechnische, hygienische o. ä. Aspekte entgegen sprechen).

Hinsichtlich der Nutzungszeitminderung und Nutzungsbündelung ist der Faktor Mensch ausschlaggebend. Ein Energiekonzept, welches in dieser Richtung Ansprüche hat, muss Gespräche beinhalten. Die Betriebszeitanpassung ist ein rein technisches Problem.

Einsparpotentiale aus veränderten Nutzungs- und Betriebszeiten lassen sich im Rahmen von Energiekonzepten berechnen. In jedem Fall führen Nutzungsunterbrechungen zu geringeren Gesamtenergiemengen als der durchgehende Betrieb. Der Betriebsbereitschaftsverbrauch ist geringer als der Betriebsverbrauch. Bei der Gebäudeheizung und -kühlung ist aber festzustellen, dass die Verminderung von Nutzungs- und Betriebszeiten nicht zu einer proportionalen Energieeinsparung führt, da das Gebäude eine Speichermasse hat. Jedoch verbraucht die Wiederaufheizung in der Regel weniger Energie als ein durchgehender Betrieb.

3.2.2 Raumtemperatur und Raumfeuchte

Für die Energiebilanzierung wird vielfach auf eine gemittelte Innentemperatur ϑ_i [°C] zurückgegriffen. Sie enthält:

- den Sollwert der Innentemperatur je nach Nutzung und Nutzerverhalten, häufig als Mittelwert unterschiedlich temperierter Räume, wenn die Bilanzgrenzen so gesteckt werden (z.B. Bilanz eines Wohnhauses als Gesamtgebäude, ohne Unterscheidung in Wohnräume, Treppenhäuser usw.); die sich ergebenden Temperaturen benachbarter Räume hängen auch von der thermischen Kopplung der Räume untereinander ab,
- den Einfluss von Absenk- und Abschaltphasen, sofern die Bilanzzeiten so gewählt sind, dass innerhalb des Betrachtungs- oder Berechnungszeitschrittes verschiedene Temperaturzustände enthalten sind (z.B. Monatsbilanz ohne weitere Unterteilung in Tag- und Nachtphasen); Auskühl- und Aufheizvorgänge werden von der Zeitkonstante des Gebäudes beeinflusst.

Darüber hinaus ergibt sich eine für die Bilanzierung relevante Temperatur aufgrund der Güte der realen, mit Regelabweichungen verbundenen Raumregelung im Zusammenspiel mit der zentralen Vorregelung.

Weiterhin gibt es die Lufttemperatur und die Empfindungstemperatur (operative Temperatur). Letztere ist eine gewichtete Temperatur zwischen der Oberflächentemperatur der Umgebungswände eines Raumes und der Lufttemperatur.
Der Mensch empfindet die Oberflächentemperatur der Wände (aufgrund seiner Wärmeab-

strahlung) mit. Je niedriger die Oberflächentemperatur der Wände, desto höher muss die Lufttemperatur sein, um einen Ausgleich zu schaffen. In den gängigen Bilanzverfahren wird die Lufttemperatur zur Energiebilanz herangezogen.

Behaglichkeitsdefinition und Raumluftfeuchte

Die Behaglichkeit hängt neben den Temperaturen von Luft und Oberflächen von weiteren Einflussgrößen ab: der Bewegung der Innenluft, der absoluten relativen Feuchte der Innenluft, Schadstoffen und Gerüchen, Beleuchtung und Farbwiedergabe usw. Zur Vertiefung mit dem Thema "Behaglichkeitsfelder" wird auf weiterführende Literatur verwiesen, z.B. [70].

Für die Bewertung des thermischen Raumklimas – insbesondere bei Energiekonzepten für raumlufttechnische Anlagen – ist die relative Luftfeuchte von Bedeutung. Ein typisches Behaglichkeitsfeld zeigt Bild 17.

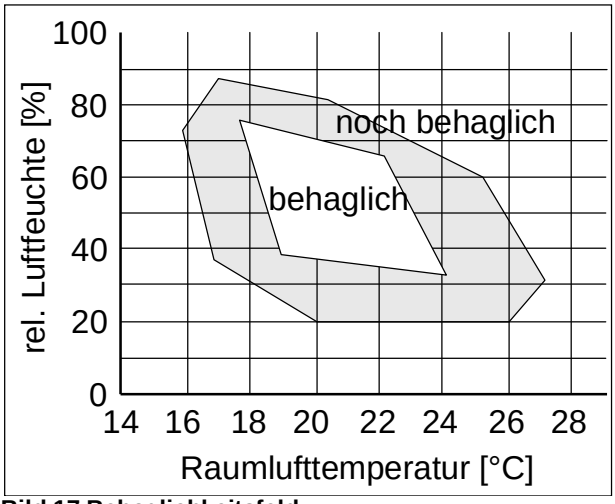


Bild 17 Behaglichkeitsfeld

Zu hohe Luftfeuchten werden als unbehaglich (schwül) empfunden. Außerdem fördert zu hohe Feuchte die Vermehrung von Mikroorganismen im Staub (z.B. Hausstaubmilben) sowie die Schimmelpilzbildung auf den Umfassungsflächen – jeweils oberhalb von Schwellwerten. Zu geringe Luftfeuchte führt zur Austrocknung der Schleimhäute, einer erhöhten Schwebstaubkonzentration in der Luft und einer höheren elektrostatischen Aufladung.

Hinsichtlich der Raumluftfeuchte werden in vielen Nutzungsarten große Kompromisse eingegangen (Werte liegen im "noch behaglichen Bereich" nach Bild 17), da entsprechende technische Lösungen zur Be- und Entfeuchtung Kosten verursachen. Lediglich höherwertige Büros, Krankenhäuser und Museen sind reale Anwendungsfälle, bei denen die Raumluftfeuchte zu den energierelevanten Nutzungsranddaten zählt.

Soll- und mittlere Raumtemperaturen

Mittlere repräsentative Innentemperaturen für Räume verschiedener Nutzung zeigt Tabelle 21. Die unter "außerhalb der Nutzungszeit" angegebenen Werte gelten für den Absenk- und/oder Abschaltbetrieb der Heiz- und Kühlanlagen. Sofern es einen solchen nicht gibt, gelten die Werte für die Nutzungszeit durchgehend.

Temperaturen in Fluren und Nebenräumen liegen in allen Nutzungen auf dem Niveau der Räume der Hauptnutzung (bei großem Luftaustausch der Räume untereinander) bzw. im Winter leicht darunter und im Sommer leicht darüber (gute thermische Entkopplung).

Nutzungsart	Innentemperatur [°C]

	Winterfall		Sommerfall	
	innerhalb der Nutzungszeit	außerhalb der Nutzungszeit	innerhalb der Nutzungszeit bei Kühlung	außerhalb der Nutzungszeit bzw. ohne Kühlung
Hallenbäder	24...28	20...26	24...28	24...28
Bettenzimmer, Pflege im Krankenhaus	21...24	18...20	22...26	22...28
Rechenzentrum	21...24	k. A.	22...24	k. A.
Restaurant, Küche	20...22	16...18	24...26	24...30
Schule, Kindergarten, Hörsaal, Bibliothek	20...22	16...18	24...26	24...28
Wohnhäuser, Heime, Kasernen, Strafanstalten	20...22	18...20	22...26	22...28
Büro, Seminar, Archiv, Labor, Praxen	20...22	16...18	22...26	22...28
Hotelzimmer	20...22	18...20	22...24	22...28
Kantine	19...21	16...18	24...26	24...28
Theater, Veranstaltung, Kino, Konzersaal, Messe, Kongress, Museum	19...21	16...18	22...24	22...26
Einzelhandel	19...21	16...18	22...24	k. A.
Turnhallen, Fitnesszentren	18...20	16...18	k. A.	22...26
Gewerbe, Produktion, Werkstatt	17...19	10...12	22...24	22...26
Lager/Logistik	15...17	10...12	k. A.	22...26

Tabelle 21 Mittlere Innentemperaturen im thermisch konditionierten Bereich [13][50][eigene]

Die in Tabelle 21 angegebenen Werte repräsentieren einen Durchschnitt für viele Gebäude. In der Praxis spielt der Baustandard eine Rolle. Für einen schlechteren Baustandard gilt:

- die Temperatur in der Nutzungszeit liegt im Winter unter und im Sommer eher über dem Mittelwert (räumliche Teilbeheizung bzw. Teilkühlung) bzw. an den oberen und unteren Rändern der angegebenen Bereiche,
- dies gilt auch für die Temperatur außerhalb der Nutzungszeit (größere Auskühlung wegen geringerer Zeitkonstante).

Für bessere Baustandards gilt entsprechend das Gegenteil.

Tabelle 21 zeigt für alle Nutzungsarten typische Mittelwerte bzw. Bandbreiten der Temperaturen. Innerhalb eines Gebäudes schwanken die Werte. Bild 18 zeigt beispielsweise die Häufigkeitsverteilung von Temperaturen in Schlaf- und Wohnzimmern.

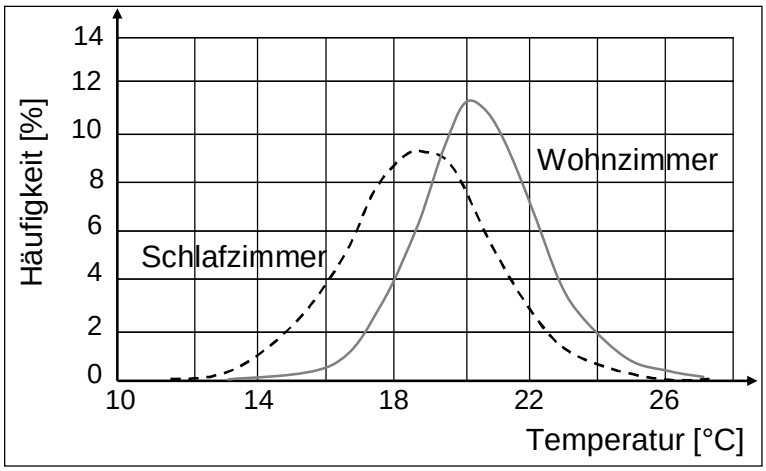


Bild 18 Häufigkeitsverteilung von Temperaturen im Wohnbau [63]

Räumlich und zeitlich veränderliche Temperaturen

Der Einfluss räumlicher und zeitlicher Teilbeheizung ist im Wohnbau gut untersucht und dokumentiert. Bild 19 zeigt ausgehend von einer Solltemperatur der aktiv genutzten Räume (z.B. Wohnräume) von 21°C den typischen Einfluss räumlicher Teilbeheizung und Nachtabsenkung. Ablesbar ist die über die Gesamtfläche und Gesamtzeit gemittelte Innentemperatur innerhalb der Heizperiode.

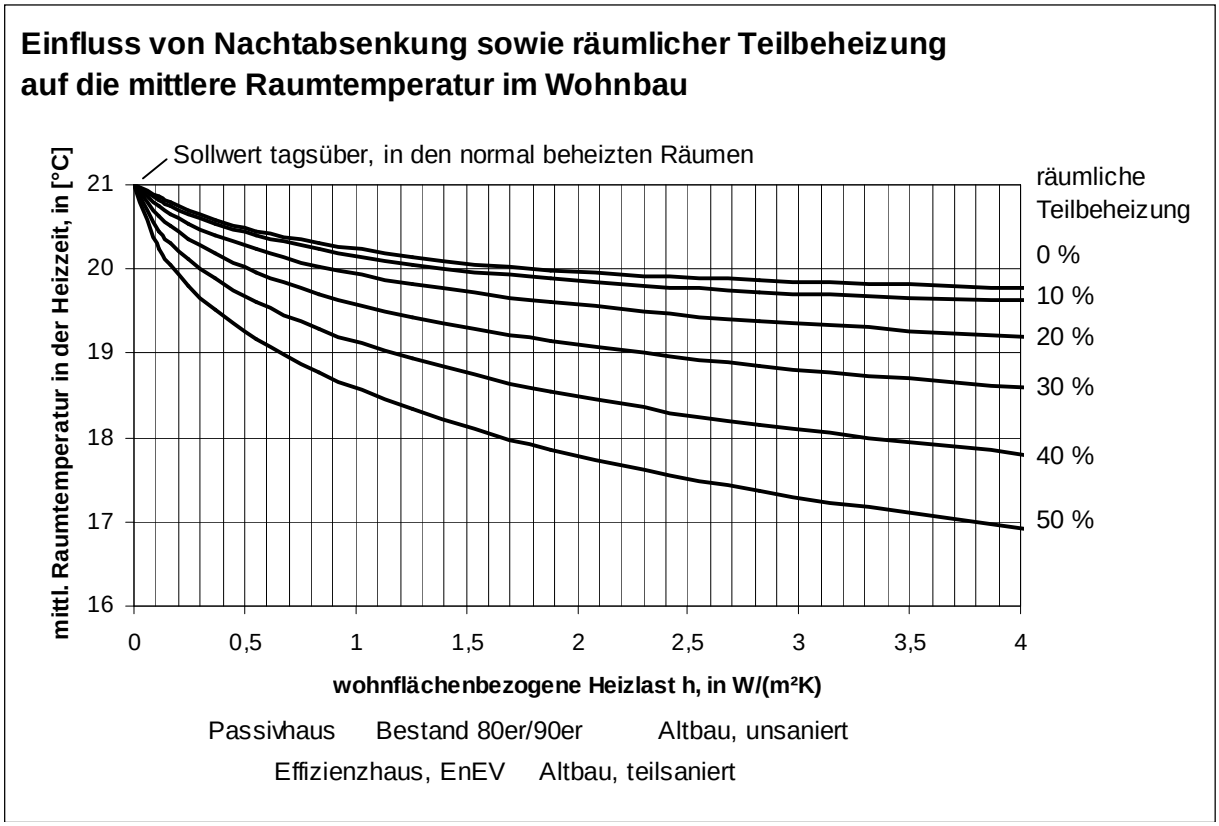


Bild 19 Einfluss von Teilbeheizung auf die Innentemperatur in der Heizperiode im Wohnbau [50]

Gebäude mit fehlendem oder schlechtem Wärmeschutz weisen geringere Zeitkonstanten auf. Damit bewirkt eine nächtliche Auskühlphase eine stärkere Temperaturabnahme. Zudem sind die Räume stärker an die Außentemperatur gekoppelt als untereinander – ebenfalls wegen des schlechteren äußeren Wärmeschutzes. Bei gleicher Teilbeheizung ergeben sich daher geringere mittlere Temperaturen als bei Gebäuden mit gutem Wärmeschutz.

Die Zusammenhänge sind prinzipiell übertragbar, wenn von einem anderen Ausgangswert als 21°C auszugehen ist. Sollwerte der Luftinnentemperaturen der aktiv genutzten Räume sind im Altbau vielfach höher, um die niedrigeren Oberflächentemperaturen (Strahlungsasymmetrie) auszugleichen. Im Gegenzug ist aber feststellbar, dass mit schlechterem baulichen Standard der Grad der Teilbeheizung einer Wohnung größer ist. Diese Abstriche im Komfort werden meist aus Kostengründen gemacht.

Im schlecht gedämmten Altbau werden somit aus 22°C Sollwert eher 18 … 19°C mittlere Temperatur, im guten Neubau aus 21°C im Mittel 19 … 20°C. Weitere Kombinationen zeigt Bild 20.

Teilbeheizung		Raumsolltemperatur: gering		mittel		hoch
		16°C	18°C	20°C	22°C	24°C
hoch	60 %	14°C	15,5°C	**17°C**	**18,5°C**	20°C
		15,5°C	16°C	**17,5°C**	**19°C**	21°C
mittel	30 %	15°C	16,5°C	**18°C**	**19,5°C**	22°C
		16,5°C	17°C	19°C	20°C	23°C
gering	0 %	16°C	18°C	20°C	22°C	24°C

Bild 20 typische mittlere Rauminnentemperatur bei Teilbeheizung [24][eigene]

Der Grad der Teilbeheizung nimmt ebenfalls mit steigender Wohnungsgröße zu. Die Untersuchungen des IWU geht typisch von 10 % in einer 50-m²-Wohnung, 30 % in einer 120-m²-Wohnung und 50 % in einer 250-m²-Wohnung aus.

Den vorherigen Grafiken und Tabellen ist gemein, dass sie für eine mittlere Bauschwere gelten. Der Einfluss der leichten und schweren Bauweise wird aus den Kennwerten der Tabelle 22 deutlich. Dargestellt ist ein typisches Einsparpotential (konkret: Korrekturfaktor der Gradtagszahl, siehe Abschnitt 3.3.1) für die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste. Die Werte gelten für einen mittleren Anteil räumlicher Teilbeheizung.

Baustandard	**8 h Nachtabsenkung**			**12 h Nachtabsenkung plus Wochenendabsenkung**		
Bauweise	**leicht**	**mittel**	**schwer**	**leicht**	**mittel**	**schwer**
Altbau, unsaniert	0,91	0,92	0,93	0,80	0,82	0,84
Altbau, teilsaniert	0,92	0,93	0,94	0,82	0,84	0,86
Baustandard 80er/90er Jahre	0,93	0,94	0,95	0,84	0,86	0,88
Effizienzhaus, EnEV	0,94	0,95	0,96	0,86	0,88	0,90
Passivhaus	0,95	0,96	0,97	0,88	0,90	0,92

Tabelle 22 Einsparpotentiale durch Nachabsenkung je nach Bauschwere [50][eigene]

Ein Faktor von 0,95 für ein schweres Gebäude aus den 1980er Jahren bedeutet: die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sind 5 % geringer als ohne die Nachabsenkung. Beträgt die Gradtagszahl ohne Absenkphasen beispielsweise 90 kKh/a, so liegt sie dann typisch bei 85,5 kKh/a. Das entspricht einer rechnerischen mittleren Innentemperatur von 19,25°C (statt 20°C).

- durchgehender Betrieb: $Gt = 250\frac{d}{a} \cdot 24\frac{h}{d} \cdot (20-5)K = 90.000\,Kh/a = 90\,kKh/a$
- mit Absenkung: $Gt = 0{,}95 \cdot 90\,kKh/a = 85.500\,Kh/a = 250\frac{d}{a} \cdot 24\frac{h}{d} \cdot (19{,}25-5)K$

In dieser Art der Berechnung erfolgt keine zeitliche Einzelbewertung der Nacht- oder Absenkphasen. Die Bilanzzeit erstreckt sich über den Gesamtzeitraum, die Innentemperatur wird zeitlich gemittelt.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Nutzer können zur räumlichen und zeitlichen Teilbeheizung häufig gute qualitative Aussagen machen. Allerdings sind Temperatursollwerte oder Mittelwerte schwieriger zu erfragen. Ein Blick auf die Stellung von Thermostatventilen hilft für Räume mit aktiver Beheizung. Die resultierenden Temperaturen in Räumen ohne aktive Heizung ergeben sich rechnerisch oder aus Langzeitmessungen.

Werden Innentemperaturen messtechnisch erfasst und zeitlich gemittelt, so wird der Effekt der Raumtemperaturabweichungen durch die Regelstrategie sowie die Regelgüte der Raumregler mit erfasst. Sie ist dann nicht zusätzlich noch einmal zu bilanzieren, siehe auch Abschnitte 3.6.4 und 3.7.4.

Einsparpotentiale

Typische Energieeinsparpotentiale ergeben sich aus:

- veränderten Raumtemperatursollwerten der aktiv genutzten Räume, d.h. Komfortänderung (winterliches Absenken und sommerliches Anheben der Sollwerte),
- erhöhten Anteilen der Teilbeheizung und -kühlung, d.h. Komfortänderung oder Vermeidung von unnötiger Versorgung,
- veränderten Zeitprogrammen für die Raumtemperatur, d.h. meist Verlängerung von Abschalt- oder Absenkphasen und damit Reduktion von Zeiten mit Überversorgung oder unnötiger Versorgung,
- verbesserten Regeleigenschaften der Raumregler, d.h. genaueres Einhalten der Raumtemperatursollwerte (geringere Überschreitungshäufigkeit).

Die Einsparpotentiale lassen sich mit Hilfe der Grafiken und Tabellen dieses Abschnittes abschätzen. Maßgeblich ist der Sollwert der Raumtemperatur, die Absenk-/Abschaltdauer, der Grad der Teilbeheizung, der Baustandard und die Bauschwere sowie die Regelgüten. Es ist im Wohnbau von 5 … 15 % Einsparung auszugehen (bezogen auf eine durchgehende Vollbeheizung).

Es sind folgende Konsequenzen zu bedenken: eine Absenkung von Innentemperaturen bei ansonsten gleichem Nutzerverhalten (insbesondere Feuchteeintrag in die Räume) erhöht die relative Luftfeuchte. Dies verschiebt den Taupunkt auf den Bauteiloberflächen und ändert (erhöht) damit das Schimmelrisiko.

3.2.3 Luftvolumenstrom und Luftwechsel

Der Luftwechsel oder die Luftwechselrate n [1/h] ist ein Maß dafür, wie oft das beheizte Luftvolumen mit Außenluft in einer Zeiteinheit ausgetauscht wird. Es strömt ein Volumenstrom $\dot{V}$ oder q [m³/h] mit höherer Qualität in die Räume und ersetzt dort die vorhandene Luft.

Der Luftwechsel des Gebäudes wird von diversen Einflussfaktoren bestimmt, zum Beispiel der Luftdichtheit der Gebäudehülle (siehe Abschnitt 3.4.5)) und der damit verbundenen Infiltration, dem mechanischen Luftwechsel einer Lüftungsanlage und vor allem dem Nutzerverhalten.

Luftvolumenströme zur Schadstoffabfuhr und Entfeuchtung

Die Luftvolumenströme dienen der Schadstoffabfuhr (Schutz der Gesundheit, Behaglichkeit) und Entfeuchtung (Schutz der Bausubstanz vor zu hoher Luftfeuchte und ggf. vor Schimmelbildung).

Die notwendigen Volumenströme variieren im Tages-, Wochen- und Jahresverlauf:

- aufgrund unterschiedlicher Nutzungsintensität (Feuchte- und Schadstofflasten),
- aufgrund unterschiedlicher Außenluftqualität (bereits enthaltene Schadstoffmengen, absolute Feuchte).

So ist für den typischen Wohnungsbau festzustellen, dass in den Übergangsjahreszeiten etwa doppelt so hohe Luftvolumenströme zur Entfeuchtung notwendig sind als im Kernwinter. Aufgrund des thermischen Antriebs ist der Luftaustausch durch Gebäudeundichtheiten im Winter am größten.

Typische personenbezogene Volumenströme zum Abtransport der von dieser Person verursachten CO_2- sowie Feuchtemengen betragen 25 … 40 m³/(h · P). Für Schulen werden leicht geringere Werte kommuniziert.

Wie der Luftaustausch zustande kommt, ist zunächst egal. Allerdings ist festzustellen, dass in Gebäuden mit hoher Belegungsdichte eine reine Fensterlüftung oft nicht ausreicht, um die großen Gesamtvolumenströme zu realisieren; es resultiert dann eine schlechtere Raumluftqualität.

Luftwechsel im Wohnbau

Für die energetische Bewertung von Wohnbauten wird auf Kennwerte des Luftwechsels zurückgegriffen. Üblich sind Angaben als zeitliche Mittelwerte für ganze Jahre, seltener für einzelne Monate. Tag- und Nachtphasen sowie alle Räume eines Wohnbaus werden bei der Angabe typischer Werte gemittelt. Je nach Belegungsdichte und Luftqualitätsanspruch ergeben sich die in Bild 21 zusammengestellten Kennwerte. Der typische Bereich ist markiert. Hinzu kommt der Fugenluftwechsel (siehe Abschnitt 3.4.5).

Luftvolumenstrom		beheizte Fläche bzw. Volumen je Person: wenig	mittel		viel		sehr viel
	m²/Person	30	40	50	60	70	80
	m³/Person	75	110	138	165	193	220
hoch	60 m³/(h·Person)	0,8	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3
		0,7	**0,5**	**0,4**	0,3	0,3	0,2
mittel	40 m³/(h·Person)	0,5	**0,4**	**0,3**	0,2	0,2	0,2
		0,4	**0,3**	**0,2**	0,2	0,2	0,1
gering	20 m³/(h·Person)	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

… Werte in h^{-1}

jeweils zzgl. Fugenlüftung von 0,1 … 0,2 h^{-1}

Bild 21 Typische Luftwechsel im Wohnbau [24][eigene]

Auch im Falle einer mechanischen Lüftungsanlage ist von Luftwechseln auszugehen, deren Summe (Anlagenluftwechsel + Infiltration + Restluftwechsel der Personen) eine ähnliche Größenordnung annimmt wie der natürliche Luftwechsel (Fensterluftwechsel der Personen + Infiltration).

Ein wohnflächenbezogener Lüftungswärmeverlust q_V [kWh/(m²a)] ergibt sich aus dem Luftwechsel, den Stoffwerten (Dichte, Wärmespeicherkapazität) der Luft, der Raumhöhe und der Gradtagszahl (siehe Abschnitt 3.3.1) wie folgt:

$$q_V = 0{,}34 \frac{Wh}{m^3 K} \cdot n \cdot h_{Raum} \cdot Gt$$

Für typische Raumhöhen und Gradtagszahlen im Wohnungsbau führt eine Änderung der Luftwechselzahl um $\Delta n = 0{,}1\ h^{-1}$ zu einer Veränderung des Lüftungswärmeverlusts um $\Delta q_V = 6...9$ kWh/(m²a).

Mindestaußenluftvolumenströme und Luftwechsel im Nichtwohnbau

Für den Nichtwohnbau sind typische Planwerte für Mindestaußenluftvolumenströme in Tabelle 23 zusammengestellt. Die Werte sind auf die Nettogrundfläche der Gebäude bezogen. Die Werte treten vor allem dann ein, wenn mechanische Lüftungsanlagen vorhanden sind. Bei reiner Fensterlüftung ist es schwierig, höhere Werte tatsächlich zu erreichen – was dann in Abstrichen in der Luftqualität mündet.

Die meisten Nutzungsprofile mit sehr großem Außenluftbedarf weisen daher Lüftungstechnik auf, z.B. Küchen, Kinos und Labore. Eine nennenswerte Ausnahme von dieser Regel bilden Bildungsgebäude, bei denen – ohne Lüftungstechnische Anlagen – regelmäßig sehr viel geringere praktische Luftwechsel (und schlechtere Luftqualitäten) gemessen werden.

Nutzungsart	Mindestaußenluftvolumenstrom [m³/(h · m²)]	
	innerhalb der Nutzungszeit	außerhalb der Nutzungszeit
Küche	90	0
Hörsaal, Theater, Veranstaltung, Kino, Konzersaal	30...40	2,5
Labor	25...30	0...30
Seminar, Kantine, Restaurant	15...18	2,5
Schule, Kindergarten, Praxen, Fitnesszentren	10...12	2,5
Parkhaus	7...8	0
Messe, Kongress	7...8	2,5
Büro, Einzelhandel, Bettenzimmer	4...6	2,5
Sanitärzonen	5	5
Museum, Bibliothek, Turnhallen, Hotelzimmer	2...3	1...2
Gewerbe, Produktion, Werkstatt	1,5...3,5	0
Heime, Kasernen, Strafanstalten	1	k. A.
Logistik/Lagerhallen, Rechenzentrum, Archiv	1...1,5	0
Technik, Verkehrsflächen	0...0,15	0

Tabelle 23 Mindestaußenluftvolumenströme [13]

Tabelle 24 zeigt typische Luftwechsel für Nichtwohnbaunutzungen. Besonders bei den Nutzungen mit starker Abhängigkeit vom Nutzereingriff ergeben sich größere Spannbreiten des Fensterluftwechsels.

Es gilt für die Fälle mit mechanischer Lüftung, dass der Fugenluftwechsel (Infiltrationsluftwechsel) zum Anlagenluftwechsel zu addieren ist, um den Gesamtluftwechsel zu erhalten.

Luftwechsel [h^{-1}]	Lüftung ohne Lüftungsanlage			Lüftung mit Lüftungsanlage			
	natürlicher Luftwechsel aus Fenster- und Fugenlüftung n			mechanischer Luftwechsel der Lüftungsanlage n_{Anl}			Restluftwechsel durch Fugen n_{Rest}
Gebäudenutzung	**in der Nutzungszeit**	**außerhalb der Nutzungszeit**	**Ø**	**in der Nutzungszeit**	**außerhalb der Nutzungszeit**	**Ø**	
Krankenhaus, Heime	0,4...0,7	0,4...0,7	0,4...0,7	0,4...0,5	0,4...0,5	0,4...0,5	0,1...0,2
Verkauf, Industrie	1,0	0,2	0,5	0,8	0,0	0,3	0,1...0,2
Labor	1,0	0,2	0,4	0,8	0,8	0,8	0,1...0,2
Verwaltung, Büro, Rechenzentrum, Restaurants	0,5...1,0	0,2	0,3...0,4	0,8	0,0	0,2	0,1...0,2
Tagesstätten, Schulen	0,5...1,0	0,2	0,3...0,4	1,0	0,0	0,3	0,1...0,2
Bühnen/Säle	0,6	0,2	0,4	0,4	0,0	0,2	0,1...0,2
Lager	0,4	0,2	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1...0,2
Bäder	0,5	0,1	0,3	0,4	0,0	0,2	0,1...0,2
Sport	0,5	0,1	0,2	0,4	0,0	0,1	0,1...0,2

Tabelle 24 Natürlicher, Anlagen- und Restluftwechsel im Nichtwohnbau [39][50][eigene]

Wärmerückgewinnung und effektiver Luftwechsel

Der energetische Vorteil einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung kann auf verschiedenen Wegen berücksichtigt werden. Weitere Erklärungen hierzu werden in Abschnitt 4.6.3 gegeben. Eine Möglichkeit ist die Angabe eines energetischen (effektiven) Luftwechsels n_{eff}.

Die Energiemenge, die sich bei der Berechnung der Lüftungswärmeverluste mit dem energetischen Luftwechsel ergibt, entspricht den Nettoverlusten nach Gutschrift der Wärmerückgewinnung. Es gilt:

$$n_{eff} = (1-\eta_{WRG}) \cdot n_{Anl} + n_{Rest}$$

Werden für den Wohnbau übliche Werte des Anlagenluftwechsels (0,3 … 0,5 h^{-1}), der Wärmerückgewinnung (80 … 90 %) und des Restluftwechsels durch Infiltration (0,1 … 0,2 [1]) eingesetzt, resultiert ein effektiver Luftwechsel von 0,15 … 0,3 h^{-1}. Dies ist der zeitliche Mittelwert für das gesamte Gebäude.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Den realen Gesamtluftwechsel messtechnisch zu bestimmen ist unmöglich. Kurzzeitmessungen zur Bestimmung des Luftwechsels zu einem definierten Zeitpunkt sind möglich. Es erfolgt dazu eine Tracergas-Messung, d.h. die Messung einer Gaskonzentrationsabnahme (spezielles Messgas) in einer bestimmten Zeit, allerdings fehlen dann immer noch Langzeitmesswerte für Jahre oder Monate.

Messtechnisch einfach und kostengünstig lassen sich Fensteröffnungszeiten bestimmen (Magnetkontaktmessungen). Wobei der Volumenstromdurchsatz durch das Gebäude nur rechnerisch daraus bestimmt werden kann. Abhängig von der Wetterlage, der Gebäudequerdurchströmung, dem Fensteröffnungsquerschnitt gibt die Literatur typische Volumenströme an.

Für die Anwendung im Rahmen einer Energiekonzepterstellung sind beide Wege nicht praktikabel. Es bleibt letztlich die Befragung der Nutzer bzw. das Auslesen von Zeit- bzw. Regelprogrammen aus einer mechanischen Lüftungsanlage.

Einsparpotentiale

Energetische Einsparpotentiale am nutzerbezogenen Luftwechsel bestehen dort, wo insgesamt zu hohe Luftwechsel realisiert werden. Ein zu hoher Luftwechsel führt zu einer Luftqualität, die besser als (grenzwertig) notwendig ist.

Solche Randdaten sind beispielsweise in etlichen Büros, aber auch bei Sanitäranlagen gegeben, bei denen über gekippte Fenster über sehr lange Zeiträume permanent Heiz- und/oder Kühlenergie nach außen abgegeben wird. In Räumen mit hoher Belegungsdichte (Klassenräume, Kindergarten, Hörsaal usw.) ohne mechanische Lüftungsanlage tritt häufig eher der umgekehrte Fall ein.

Eine Abschätzung zu Einsparpotentialen ergibt sich aus dem oben genannten Ansatz für Räume mit normalen Innentemperaturen und Raumhöhen: eine Änderung der Luftwechselzahl um Δn = 0,1 h^{-1} führt zu einer Veränderung des Lüftungswärmeverlusts um Δq_V = 6...9 kWh/(m²a).

Zu den Einsparungen durch Wärmerückgewinnung und verminderte Infiltration wird auf die Abschnitte 3.10 sowie 3.4.5 verwiesen.

3.2.4 Wassernutzung

Die Energiemenge, welche der Trink- oder Brauchwassererwärmung zugeordnet wird, ergibt sich aus den zu erwärmenden Wassermengen innerhalb eines Betrachtungszeitraum $\dot{V}$ [m³/d, m³/h usw.], den Stoffwerten für Wasser (Dichte, Wärmespeicherkapazität) sowie Anfangs-, Endtemperatur und einer Zeitangabe. Die Erwärmung erfolgt ausgehend von einer Kaltwassertemperatur ϑ_k [°C], mit der das Wasser den Bilanzraum betritt, auf eine Warmwassertemperatur ϑ_w [°C]. Mit der Zeitangabe t [h/d, d/a usw.) erfolgt eine Hochrechnung auf den Bilanzzeitraum.

$$Q_w = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_P \cdot (\vartheta_w - \vartheta_k) \cdot t$$

Es ist für die energetische Bewertung der Trinkwassererwärmung unerheblich, ob eine kleine Menge Kaltwasser zunächst auf ein sehr hohes Temperaturniveau gebracht wird und entsprechend später durch Mischung auf das Nutztemperaturniveau abgekühlt wird oder umgekehrt. Es gilt die Mischungsrechnung, siehe Bild 22.

Dem Endprodukt, d.h. der Nutzwassermenge (im Bild 19,6 m³) mit der gewünschten Temperatur (von 38°C) kann ein Energieinhalt gegenüber der Kaltwassermenge zugeordnet werden (640 kWh). Dies entspricht etwa dem durchschnittlichen jährlichen Warmwasserbedarf einer Person.

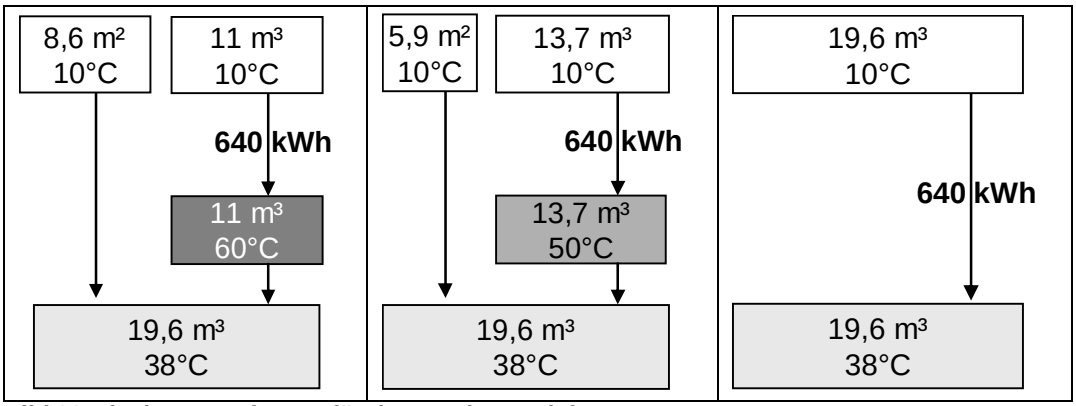


Bild 22 Mischungsrechnung für das nutzbare Trinkwarmwasser

Trotz gleicher Energiemenge ist jedoch nicht eindeutig, welche Wassermenge als "Warmwasser" deklariert wird (11 m³ oder 13,7 m³ oder 19,6 m³). Das Temperaturniveau muss immer mit vermerkt werden, um eine Eindeutigkeit herzustellen. Sofern keine weiteren Angaben gemacht werden, ist 60°C eine übliche Bezugstemperatur, wenn von "Warmwassermenge" gesprochen wird, demzufolge würde im Beispiel von "11 m³ Warmwasser bei 60°C" gesprochen.

Für die Umrechnung der Wassermenge in eine Energiemenge kann der aus Dichte und spezifischer Wärmespeicherkapazität zusammengefasste Stoffkennwert herangezogen werden, sofern es sich um Wasser im Bereich 10 … 75°C handelt: **$\rho \cdot c_P$ = 1,163 kWh/(m³ · K)**.

Dass es für einen Wärmeerzeuger relevant sein kann, welches Temperaturniveau bereitgestellt werden muss, spielt bei der Angabe der "Nutzenergiemenge" keine Rolle. Dies drückt sich in verschieden hohen Aufwendungen an Brennstoff, Strom usw. aus – siehe Abschnitt 3.8.

Typische Kennwerte für Wasservolumina

Für den Wohnungsbau ist festzustellen, dass der typische Anteil des Warmwassers (60 °C) am Gesamtwasser bei 30 % liegt. Dies gilt für kleine und große Wohngebäude gleichermaßen als typischer Mittelwert. Es ergibt sich allerdings eine starke Abhängigkeit von der Größe der einzelnen Wohneinheit, also der Belegungsdichte mit Personen [76]. Es ergehen sich die in Tabelle 25 angegebenen flächenbezogenen Kennwerte im Wohnbau.

	Mittel	Wohnung mit Wohnfläche		
		25...55 m²	70...100 m²	140...180 m²
Warmwasser	0,24...0,26	0,25...0,28	0,23...0,26	0,13...0,16
Kaltwasser	0,54...0,60	0,57...0,63	0,54...0,59	0,40...0,42
Gesamtwasser	0,78...0,86	0,82...0,91	0,77...0,87	0,53...0,58

Tabelle 25 Typische wohnflächenbezogenen Wasserverbrauchskennwerte [76]

Der typische personenbezogene Wasserverbrauch, der sich aus den Daten eines Abrechnungsunternehmens ergibt, liegt bei [63]:

- 11,4 m³/a (31 l/d) für Warmwasser je Person
- 25,4 m³/a (70 l/d) für Kaltwasser je Person

Eine Aufteilung nach Wasseranwendungen im Wohnungsbau zeigt Bild 23.

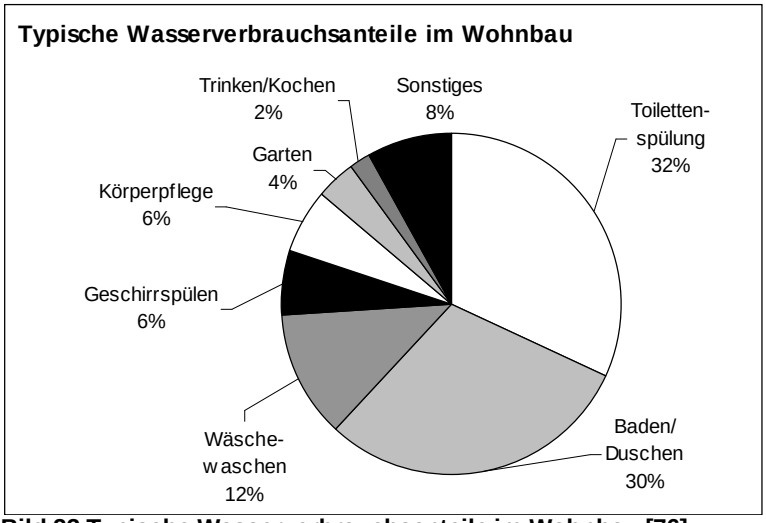


Bild 23 Typische Wasserverbrauchsanteile im Wohnbau [76]

Für den Nichtwohnbau gelten Anhaltswerte nach Tabelle 26 und Tabelle 27. Darüber hinaus kann bei Schwimmbädern von typischerweise 40 m³/(m²a) je Beckenoberfläche ausgegangen werden.

Gebäudenutzung	Gesamtwasserver-brauch [l / (a · m²$_{NGF}$)]
Justizvollzug	1700
Wohnheime	750
Kindergärten und -tagesstätten, Schulen mit Schwimmbad	320...420
Rathaus, Polizei, Turnhallen, Sporthallen	260...300
Büro und Verwaltung, Lehre und Forschung, Fachhochschule, Veranstaltung	150...180
Gericht, Verkauf, Werkstatt, Veranstaltung, Berufsschulen, Schulen	100...140
Lager	20...90

Tabelle 26 Typische flächenbezogene Gesamtwasserverbrauchskennwerte [76][84]

Gebäudenutzung	Kaltwasser [l / (d · P)]	Warmwasser bei 60°C [l / (d · P)]
Wohnnutzung, Heime und Herbergen, Krankenhäuser	90...100	25...35
Tagesstätten, Sporthallen	15...20	15...20
Büro und Verwaltung, Schulen, Bühnen	15...20	-

Tabelle 27 Typische personenbezogene Gesamtwasserverbrauchskennwerte [44][50]

Typische Kennwerte für Energiemengen

Werden die Wasserverbrauchskennwerte umgerechnet in Energiemengen, ergeben sich die typischen flächenbezogenen Werte, z.B. für den Wohnungsbau nach Bild 24.

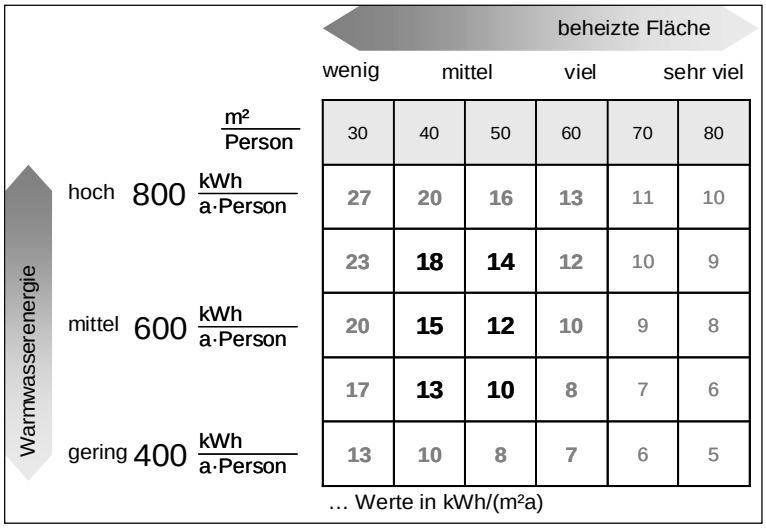


Bild 24 Warmwasserverbrauchskennwert für Wohnbauten [24][eigene]

Für die Bewertung von Gebäuden mit bekannter Nutzeranzahl sind personenbezogene Kennwerte treffsicherer als flächenbezogene. Es ergeben sich im Mittel 600 kWh/(P · a) mit einer Streubreite von 400 … 800 kWh/(P · a). Im Nichtwohnbau haben sich unterschiedliche Bezugsgrößen etabliert. Eine Zusammenstellung typischer Energiekennwerte zeigt Tabelle 28. Die Kennwerte für alle Nutzungen mit geringen Warmwasserbedarfswerten bilden eine übliche Nutzungsintensität ab. Bei den warmwasserintensiven Nutzungen können in der Realität auch sehr viel kleinere Werte auftreten.

Gebäudenutzung	[kWh / (d · x)]	Bezugsgröße x
Wäscherei	20	100 kg Wäsche
Umkleiden in Industrie und Werkstatt, Sportanlagen	1,8	Person
Bettenzimmer im Krankenhaus	6	Bett
Gewerbeküchen	0,4	Menü
Restaurant	1,1	Sitzplatz
Hotel	0,24...0,46	m²$_{NGF}$ Hotelzimmer
Heime und Kasernen	0,15...0,18	m²$_{NGF}$ Zimmer
Büro, Schulen ohne Duschen	0,4	Person
Verkaufsgebäude	0,01	m²$_{NGF}$ Verkaufsfläche
Lager	0,002...0,005	m²$_{NGF}$ Lager

Tabelle 28 Typische Energiekennwerte für Warmwassernutzung [13]

Auslegung und Bilanzierung

Für die energetische Bewertung der Warmwassernutzung über lange Zeiträume (Monate, Jahre) spielt die Leistungsbemessung (Auslegung) und das tatsächlich auftretende Zapfprofil (Verteilung der Nutzenergiemenge über die Zeit) praktisch keine Rolle.

Werden im Zusammenhang mit Simulationen (Solarthermie o. ä.) Zapfprofile mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Stunde (oder feiner) benötigt, sei auf die Literatur verwiesen, z.B. die VDI 2067.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Zur Einschätzung realer Fälle wird eine Messung der Warmwassermenge empfohlen. Abgesehen von Ferienzeiten sind Warmwasserverbräuche zeitlich sehr homogen über das Jahr verteilt. Es empfiehlt sich im Wohnbau die Messung mindestens eines Monats (außerhalb der Urlaubszeit), im Nichtwohnbau mindestens einer Woche zu Zwecken der Hochrechnung. Jahresmesswerte sind dennoch deutlich treffsicherer in der Aussage.

Der Sollwert für die Warmwassertemperatur kann in der Regel am Speicher oder Durchlauferhitzer abgelesen werden.

Ansonsten sind Schätzungen anhand von Personenzahlen den flächenbezogenen Schätzungen vorzuziehen.

Einsparpotentiale

Im Wohnungsbau beläuft sich der energetische Anteil der Trinkwassererwärmung an der Gesamtendenergiemenge auf etwa 10 % … 50 % und zukünftig mehr. Der kleinere Wert gilt für den unsanierten Altbau mit großem Heizenergieanteil, der größere Wert für das gut gedämmte Passivhaus.

Einsparpotentiale aufgrund verminderter Nutzwärmemengen sich meist gering. Aufgrund hoher Wasser- und Abwasserkosten ist das Nutzerverhalten beim Wasserverbrauch im Mittel bereits sparsam.

Ausschlaggebend für Einsparüberlegungen ist der Wasserverbrauch für das Duschen (fast der gesamte Warmwasserverbrauch), somit die Frage des Durchflusses der Duscharmaturen. Hier ergeben sich Bandbreiten von 6 l/min (Spararmatur) bis 18 l/min (Rainshower). Üblich sind Duschköpfe im Bereich 9 … 10 l/min. Eine Halbierung (oder Verdopplung) des Warmwasserverbrauchs nach Wechsel des Duschkopfs ist vorstellbar.

Der Energieverbrauch beim Baden hängt nicht von der Armatur ab, sondern von der Frage des Füllvolumens der Wanne.

Die Frage der technischen Optionen – Verminderung von Verteil-, Speicherverlusten, Aufwand der Erzeugung – klärt Abschnitt 3.8.

3.2.5 Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke als (energetisch relevantes) Nutzungsmerkmal hat sich für Nichtwohnbauten etabliert. Sie definiert sich über die Arbeitsstättenrichtlinien. Sie ist der Sehaufgabe angemessen. Darüber hinaus gibt es abhängig von der Raumnutzung auch Anforderungen an Blendfreiheit, Kontraste, Farbqualität, Flackerfreiheit, Ästhetik der Beleuchtung, usw.

Die Angabe einer Beleuchtungsstärke gilt im Rahmen der Planung nicht für den gesamten Raum homogen. Es wird unterschieden in die Flächen der Sehaufgabe, unmittelbare Umgebung und sonstige Bereiche (ohne Anforderungen).

Der **Bereich der Sehaufgabe** ist z.B. ein Büroarbeitsplatz. Dieser enthält den Schreibtisch, aber auch weitere Abstellflächen für Geräte, Akten usw. und hat die höchsten Beleuchtungsstärkeanforderungen.

Der unmittelbare **Umgebungsbereich** schließt den Bereich der Sehaufgabe ein mit einem mindestens 0,5 m breiten Streifen. In Blickrichtung der arbeitenden Person sollte der Umgebungsbereich eher genauso breit sein wie der Bereich der Sehaufgabe. In vielen Nutzungen füllt er fast die gesamte Restfläche des Raumes aus. Zahlenmäßig liegt er bei ca. 60 … 70 % des Wertes im Bereich der Sehaufgabe.

An den Rändern eines Raumes – in einem ebenfalls 0.5 m breiten Streifen – bleibt allerdings ein **Randstreifen**, in dem es keine Anforderungen gibt. Dort stehen beispielsweise Möbel.

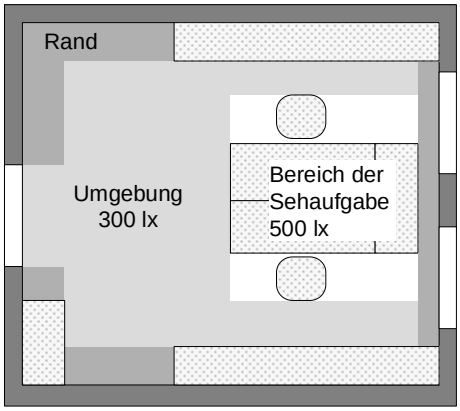


Bild 25 Beispielbüro mit Bereich der Sehaufgabe, Umgebungsbereich und Rand

Zudem ist es üblich, für Beleuchtungsstärken einen Wartungswert anzugeben. Er beschreibt die Beleuchtungsstärke, die vor der Wartung (am Ende eines Wartungsintervalls) immer noch erreicht werden soll. Im Mittel ist die Beleuchtungsstärke somit höher. Ein typisches Wartungsintervall beträgt 3 Jahre.

Typische Kennwerte

Tabelle 29 enthält typische Wartungswerte der Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe für verschiedene Nichtwohnbaunutzungen. In den betreffenden Räumen sind jedoch neben den Bereichen der Sehaufgabe auch Umgebungsbereiche und Randflächen vorhanden. Außerdem sind Lichtreflexion an Decken und Wänden maßgeblich. Der als typischer Mittelwert angegeben Wert bezieht sich auf die gesamte Nettogrundfläche.

Gebäudenutzungstyp	Beleuchtungsstärke [lx]	
	Wartungswert im Bereich der Sehaufgabe	typischer Mittelwert bezogen auf die Gesamtfläche
Parkhaus	75	40...45
Lager und Archiv, Verkehrsflächen	100	60...70
Schalterhalle, Zuschauerbereich im Theater, Ausstellungsräume, Kantine, Restaurant,	200	100...110
Bibliothek, Hotelzimmer,	200	130...140
Messehalle, Kongress, Industriehalle/schwere Arbeit	300	140...150
Kaufhaus, Foyer, Klassenzimmer, Gruppenraum	300	160...170
Sanitärräume	200	180
Turnhalle, Fitness, Bettenzimmer, Küche/Vorbereitung	300	180...190
Hörsaal, Großraumbüro, Industriehalle/leichte Arbeit, Lesesaal	500	240...280
Rechenzentrum, Gruppen- und Einzelbüro, Besprechung, Seminar, Sitzung, Labor, Arztpraxen	500	310...350
Bühnenbereich im Theater	1000	510

Tabelle 29 Mittlere Innentemperaturen im thermisch konditionierten Bereich [13][eigene]

So ergibt sich für ein Büro mit 500 lx im Bereich der Sehaufgabe im Mittel über die Gesamtfläche ein Wert von 310 … 350 lx. Diese Werte sind sinnvoll für überschlägige Einschätzungen von Gebäuden.

Wie im Bereich der Gebäudelüftung ist auch für die Beleuchtung festzustellen, dass in der Praxis häufig Sollbeleuchtungsstärken nicht erreicht werden, vor allem in untergeordneten Flächen. Dies ist beim Abgleich zwischen Praxis und Planwerten zu bedenken.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Die Beleuchtungsstärke kann gemessen werden. Für ein Energiekonzept im Bereich der Beleuchtung wird dies empfohlen.

Bei der Einschätzung von älteren Beleuchtungsanlagen im Bestand ist zu bedenken, dass sich Anforderungen an die Beleuchtungsstärke im Verlauf der Zeit verändert haben. So ergaben sich beispielsweise für das Arbeiten an Drehbänken im Verlauf der Zeit folgende Sollbeleuchtungsstärken [20]:

- 1935: 75 lx
- 1963: 100 … 200 lx
- 1979: 300 … 500 lx
- 1990: 300 … 500 lx
- heute: 500 lx

Einsparpotentiale

Einsparpotentiale durch eine Verminderung der Beleuchtungsstärken sind begrenzt, da häufig gerade so oder nicht einmal die Sollwerte erreicht werden. Falls durch eine Messung jedoch festgestellt wird, dass die Beleuchtungsstärke zu hoch ist, kann sie vermindert werden. Die elektrische Leistung ist in etwa proportional zur Beleuchtungsstärke.

Allen technischen Maßnahmen, z.B. Erhöhungen der Tageslichtnutzung oder Verbesserung der der Leuchteneffizienz widmet sich Abschnitt 3.5.

3.2.6 Gerätestrom

Als Gerätestrom soll im Zusammenhang mit der Thematik der "Nutzungsranddaten" der Elektroenergieverbrauch für die Nutzung folgender Endgeräte bezeichnet werden:

- Bürogeräte,
- Haushaltsgeräte,
- Medientechnik und Unterhaltungselektronik,
- Kommunikationsgeräte,
- Geräte für zentrale Dienste, z.B. Server und Aufzüge.

Der Stromverbrauch genannter Geräte ist einerseits ein direkter Anteil der Energiebilanz – sofern dies im Rahmen der Konzepterstellung und Beratung gewünscht ist. Es können ggf. Einsparempfehlungen ausgesprochen werden. Andererseits findet sich ein großer Teil der Stromaufwendungen innerhalb der beheizten und gekühlten Räume als Abwärme (interne Wärmequelle) wieder. Somit gibt es eine Rückkopplung auf die thermische Bilanz.

Der Stromaufwand für die sonstigen TGA-Anwendungen (Wassererwärmung, Heizung, Beleuchtung, Lüftung) wird an dieser Stelle nicht behandelt.

Gesamt- und Teilkennwerte für den Wohnbau

Für den Wohnungsbau bietet die Literatur eine Vielzahl von Statistiken. Üblich sind personen- oder haushaltsbezogene Angaben für Kennwerte. Bild 26 zeigt übliche Gesamtstromaufwendungen im Haushalt abhängig von der Haushaltsgröße. Die genannten Zahlwerte enthalten alle Stromverbräuche, auch die Aufwendungen für Pumpen und Regler. Jedoch gelten sie für Gebäude, in denen nicht mit Strom geheizt wird bzw. ohne elektrische Trinkwasserbereitung. Als grobe Richtschnur gilt der Kennwert: 1000 kWh/(Person · a). Bei einer üblichen Belegungsdichte resultiert ein wohnflächenbezogener Kennwert im Bereich 25 kWh/(m²a).

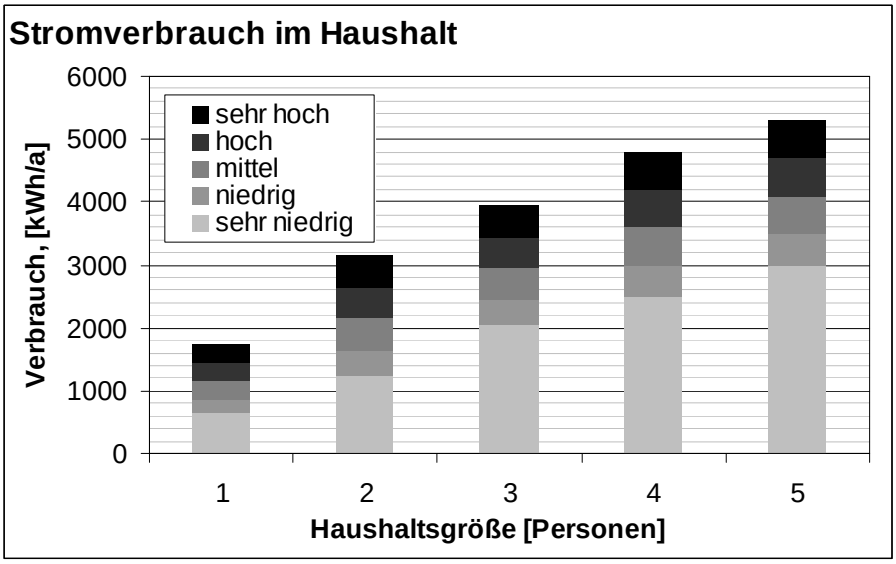


Bild 26 Stromverbrauch im Haushalt ohne Elektroheizung/Warmwasserbereitung [58]

Bild 27 schlüsselt den Verbrauch im Wohnbau auf. Entgegen der üblichen Annahme vieler Nutzer macht beispielsweise die Beleuchtung nur etwa 10 % des elektrischen Gesamtverbrauches aus.

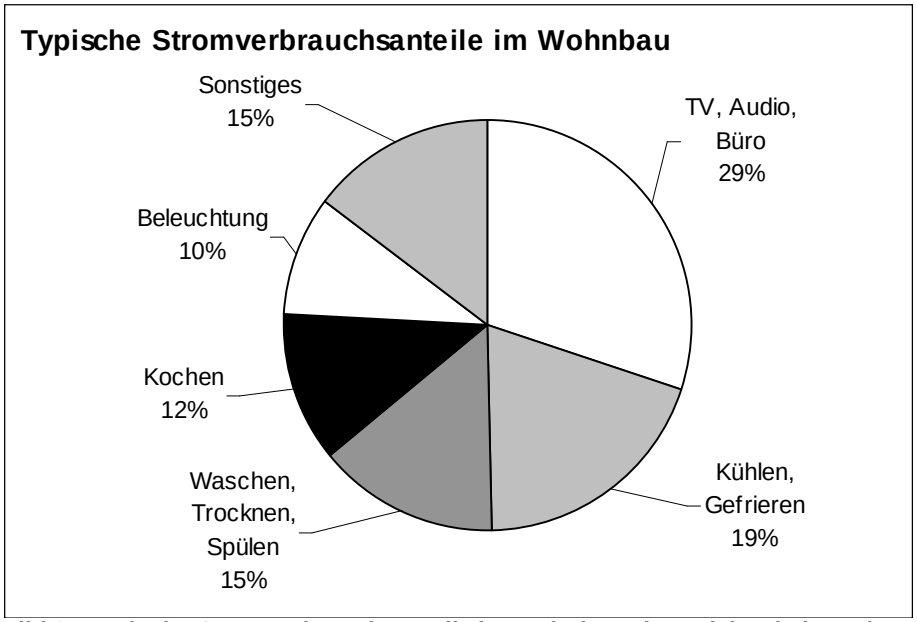


Bild 27 Typische Stromverbrauchsanteile im Wohnbau ohne Elektroheizung/Warmwasserbereitung [68]

Gesamt- und Teilkennwerte für den Nichtwohnbau

Typische Gesamtkennwerte für den Stromverbrauch von Nichtwohngebäuden zeigt Tabelle 30. Für Krankenhäuser sind Angaben je Planbett üblich: 5000 … 6500 kWh/(a · Planbett), bei Hallenbädern hat sich der Bezug auf die Beckenoberfläche etabliert: ca. 1000 kWh/(a · m²).

Die genannten Zahlwerte enthalten alle Stromverbräuche, auch die Aufwendungen der technischen Anlagen für elektrische Heizung und Trinkwassererwärmung, Beleuchtung, Lüftung und Klimatisierung, jeweils sofern vorhanden. Außerdem gelten sie für Gesamtgebäude incl. aller Verkehrs- und Sanitärflächen.

Gebäudenutzung	[kWh / (a · m^2_{NGF})]
Lager	6...20
Schulen ohne Schwimmbad, Kindergarten	11...14
Wohnheime	15...16
Gericht, Turn- und Sporthalle, Beherbergung, Veranstaltung, Parkhäuser	17...19
Verwaltung, Kindertagestätten, Berufsschulen	20...23
Lehre und Forschung, Rathaus, Fachhochschule	25...30
Justizvollzug, Hotel ohne Restaurant	49...50
Hotel mit Restaurant, Laborgebäude	100
Rechenzentrum	500...600

Tabelle 30 Typische flächenbezogene Gesamtstromverbrauchskennwerte [36][50][76][84]

Tabelle 31 schlüsselt die Gesamtverbräuche auf einzelne Nutzungsprofile auf. Es wird dabei unterschieden in die verschiedenen Hauptnutzungen sowie Verkehrs- und Sanitärflächen. Gebäudekennwerte generieren sich durch eine flächengewichtete Mittelwertbildung. Zudem ist anzumerken, dass die unter "Luftförderung" und "Kühlkälte" genannten Zahlen nur dann relevant sind, wenn eine solche Technik vorhanden ist.

Die Summation aller Spalten führt daher nicht zum Gesamtkennwert der Tabelle 30, da im statistischen Mittel nicht alle Gebäude eine Kühlung und mechanische Lüftung aufweisen.

Gebäudenutzung	Beleuchtung	Luftförderung	Kühlkälte	Arbeitshilfen
	[kWh / (a · m^2_{NGF})]			
Küche, Kochbereich	91	335	217	540
Server	60	14	247	657
Labor	45	120	25	27
Gewerbe	18...26	31	15...22	70
Bettenzimmer	49	55	19	9
Restaurant	24	69	27	4
Hörsaal	12	68	24	4
Behandlung, Praxis	27...48	21...41	14...22	6...9
Sanitärbereiche	16	61	12	-
Bibliothek (ohne Lagerflächen)	23...51	11...42	7...26	-
Einzelhandel	26...28	21	13...17	7...26
Büro	26...32	16...24	13...16	11...15
Sporthalle	33	11	20	-
Kantine	7	34	18	3
Hotelzimmer	10	21	9	16
Klassenzimmer	8	23	12	4
Ausstellung, Museum	10	22	7	-
Parkhaus	1...7	11...56	-	-
Lager	1...36	1...5	0...2	0...1
Verkehr	8...12	-	1	0...1

Tabelle 31 Typische flächenbezogene Teilstromverbrauchskennwerte [38][39]

Die unter "Arbeitshilfen" genannten Energiemengen bilden den Gerätestrom der Endanwender ab.

Aufzüge

Als ein übergeordneter Dienst innerhalb des Gebäudes zählt ein Personen- oder Lastenaufzug. Die VDI 3807 gibt einen typischen auf die Nettogrundfläche bezogenen Verbrauchskennwert von 2 kWh/(m²a) an, wenn ein Aufzug vorhanden ist [76]. Der anzustrebende Zielwert liegt 25 % niedriger.

Die Nennleistung typischer Aufzüge beziffert eine Studie des Fraunhofer Instituts UMSICHT mit 10 W/kg Nennlast [1]. Der Verbrauch je 10-Sekunden-Fahrt liegt bei 16 Wh. Die elektrische Leistung im Standby-Betrieb variiert stark zwischen 35 W und knapp 600 W für 18 untersuchte Aufzüge.

Zentrale EDV und Schwachstromanlagen

Im Bereich der zentralen EDV-Anlagen benennt die VDI 3807 [76] drei nicht näher definierte Ausstattungsgrade. Die zugeordneten Verbrauchskennwerte liegen bei 2 … 7 (mittel) … 28 kWh/(m²a) jeweils auf die Nettogrundfläche bezogen.

Für die Summe aller zentralen Telefon- und Brandmeldeanlagen sowie Zutrittskontrollsysteme werden ca. 2 kWh/(m²a) als typisch angesetzt.

Bürogeräte

Tabelle 32 gibt einen Überblick über typische Leistungen und Energieverbräuche von Bürogeräten. Aufgrund der stark veränderlichen Zeitanteile der drei angegebenen Betriebszustände differiert der Stromverbrauch in einer großen Bandbreite.

Gerät	Zustand "Ein"	Zustand "Standby"	Zustand "Aus"	Energieverbrauch
	[W]	[W]	[W]	[kWh/a]
Kopierer	100...200	20...100	0...5	118...360
PC mit Röhrenbildschirm	90...130	7...44	0...3	120...216
PC mit LED-Bildschirm	70...100	4...44	0...3	94...178
Laserdrucker	100...200	2...20	0...2	46...135
Notebook	15...25	2...8	1...2	26...48
Scanner, Tintenstrahldrucker	10...20	2...5	0...2	6...23
Telefon	1	1...2		7...14

Tabelle 32 Typischer Stromverbrauch sowie Leistung von Bürogeräten [76]

Haushaltsgeräte und Unterhaltungselektronik

Tabelle 32 gibt einen Überblick über typische Leistungsaufnahmen und Energieverbräuche einiger Haushaltsgeräte.

Gerät	Zustand "Ein"	Zustand "Standby"	Energieverbrauch
	[W]	[W]	[kWh/a]
Wäschetrockner	1800...3300	-	235 (A)...650 (alt)
Kühlschrank mit Gefrierfach	47...200	-	150 kWh + 0,2 kWh/l · V_K + 0,3 kWh/l · V_G (A+++) 250 kWh + 0,5 kWh/l · V_K + 0,8 kWh/l · V_G (alt)
Geschirrspüler	1000...3500	-	230 (A+++)...380 (alt)
Waschmaschine	1700...3300	-	150 (A+++)...260 (alt)
Röhrenfernseher	200...400	3...7	200...250
Videorekorder	10...50	0,5...35	140...250
Router mit WLAN	15...30	10...12	80...120
LED-Fernseher 32"	30...80	0,1...0,3	45...115
DVD, Konsole, Musikanlage	10...50	2...10	40...80
LED-Fernseher 19"	17...40	0,2	25...45

Tabelle 33 Typischer Stromverbrauch sowie Leistung von Haushaltsgeräten [36][eigene]

Insbesondere bei Geräten, für die ein Energielabel vergeben wurde, gibt es Anhaltswerte des Herstellers. Allerdings zeigen Realmessungen teilweise deutlich höhere Werte in der Praxis (oft aufgrund unrealistischer Testbedingungen: z.B. keine Türöffnungen beim Kühlschrank und kein Kühlgut).

Der Standbyverbrauch neuerer Fernseher, Festplattenrekorder und DVD-Player ist deutlich geringer als bei Altgeräten. Dennoch beeinflusst er den Jahresenergieverbrauch deutlich.

Fremdwärmeangebot und -nutzung

Etwa 70 % des Haushalts- und sonstigen Gerätestromverbrauchs werden im Wohnbau, Krankenhaus, Laboren (u. a. Nutzungsprofilen mit einem nennenswerten Warmwasserverbrauch über Spül- und Waschmaschinen) als interne Wärmequelle wirksam. Im sonstigen Nichtwohnbau sind es ca. 90 % [50].

Innerhalb der Heizperiode vermindert diese Abwärme den Heizbedarf, im Sommer erhöht es den Kühlbedarf bzw. die Raumtemperatur, falls es keine Kühlung gibt.

Tabelle 34 gibt einen Überblick über typische Leistungskennwerte $\dot{q}_I$ der Personen-, Beleuchtungs- und Geräteabwärme für den Wohnungsbau. Die Werte variieren mit der Nutzungsintensität eines Gebäudes. Etwa knapp die Hälfte des angegebenen Wertes entstammt der Personenabwärme [51].

Gebäudeart	EFH			MFH		
Nutzungsintensität	gering	normal	intensiv	gering	normal	intensiv
$\dot{q}_I$ [W/m²]	2	3,5	5	3	4,5	6

Tabelle 34 Typische innere Fremdwärmeleistung für Wohnbauten [70]

Die Umrechung in eine Energiemenge erfolgt durch Multiplikation mit der gewünschten Zeitangabe (Monat, Heizperiode, Kühlperiode usw.). Innerhalb der Heizperiode eines durchschnittlichen Bestandswohngebäudes kommen so etwa 20 … 25 kWh/(m²a) zusammen.

Tabelle 35 gibt einen Überblick über die täglichen Wärmemengen in Nichtwohngebäuden. Ein Abwärmeanteil aus der Beleuchtung ist – anders als beim Wohnbau – nicht enthalten.

Nutzungsart	interne Wärmeabgabe [Wh/(m² · d)	
	Geräte	Personen
Sanitärzonen, Verkehrsflächen, Archiv, Parkhaus, Lager- und Logistikhallen	0	0
Museum, Bibliothek	0	20...50
Turnhalle	0	40...80
Büro	30...80	30...50
Praxen	20...30	50
Kaufhaus mit und ohne Kühlprodukte	-200 oder 30	60...100
Hotelzimmer, Arztpraxen	25...50	60...90
Klassenzimmer, Bettenzimmer	20...30	100...120
Labor	50...150	40
Kantine, Theater, Kino, Restaurant	0...15	150...250
Industrie und Gewerbe	0...500	30...60
Hörsaal	20...30	300...500
Rechenzentrum, Küche	1500...2500	10...60

Tabelle 35 Typische innere Fremdwärmeleistung für Nichtwohnbauten [13][eigene]

Die auftretende Fremdwärme ist ungeregelt. Sie ist nicht zu jeder Zeit als Heizwärme nutzbar. Bei der Energiebilanzierung drückt ein Fremdwärmenutzungsgrad (Ausnutzungsgrad der freien Wärme) η_F aus, dass es zu zeitlichen und/oder lokalen Überwärmungseffekten kommt. Die Höhe der Fremdwärmenutzung hängt ab:

- vom Verhältnis der solaren und inneren Fremdwärmemengen $Q_I + Q_S$ zu den Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten $Q_T + Q_V$, d.h. dem Gewinn-Verlust-Verhältnis γ,
- von der Zeitkonstante des Gebäudes, die u. a. die Bauschwere berücksichtigt,
- von der Regelungstechnik und damit dem Reaktionsvermögen und der Reaktionsgeschwindigkeit der technischen Anlagen auf Fremdwärme,
- vom Nutzerverhalten und seiner Toleranz gegenüber Überwärmungsphasen, die entweder abgelüftet werden oder teilweise in die Gebäudemassen eingespeichert werden können.

Formeln für die Bestimmung des Fremdwärmenutzungsgrades werden empirisch oder durch Simulation gefunden. Eine Näherung, die für Jahresbilanzen im Wohnbau praktikabel ist, aber nur das Gewinn-Verlust-Verhältnis als Einflussparameter enthält, lautet:

$$\eta_F = 1 - 0{,}3 \cdot \gamma$$

Die Fremdwärmenutzung liegt nach diesem Ansatz im schlecht gedämmten Altbau (γ ≈ 0,1) bei 97 % und im Passivhaus (γ ≈ 0,5) bei etwa 85 %. Detailliertere Ansätze, auch für die Monatsbilanzierung, sind den eingeführten Regelwerken zu entnehmen.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Befasst sich ein Energiekonzept mit dem Stromverbrauch der Elektrogeräte, so ist eine Einstiegsmessung empfohlen. Für typische Anwendungsfälle ist meist 1 Woche ausreichend, um jeden Benutzungszustand bzw. typische Betriebszustände erfasst zu haben. Geräte, die nicht innerhalb der Woche benutzt wurden, sind voraussichtlich für den Gesamtstromverbrauch nicht relevant.

Insbesondere die Stillstandsverluste sind zu untersuchen. Gemessen wird mit Steckermessgeräten oder Strommesszangen (eine Abnahme des Gerätes vom Netz ist nicht notwendig) und Datenlogger. Hinsichtlich der Erfassung der Nutzungshäufigkeit von Geräten sind auch Nutzerbefragungen hilfreich.

3.3 Standortdaten

Zu den wichtigen Standortdaten einer Energiebilanz zählen in jedem Fall die Außentemperatur und die Solarstrahlung. Im Weiteren können auch Daten zur Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte sowie Grundwassertiefen und Bodenbeschaffenheit interessieren. Nur für Spezialprobleme benötigt man den Luftdruck und Niederschläge.

Abgrenzung der Begriffe Wetter und Klima

Ob Energiebilanzen mit Klima- oder Wetterdaten erstellt werden, hängt von der Schrittweite der Rechenintervalle sowie grundsätzlich der Intention der Bilanzierung ab.

Als Wetter wird ein kurzfristiger Zustand an einem konkreten Ort bezeichnet. Es ist ein Begriff für die aktuellen Phänomene Wind, Temperatur, Regen usw. Diese können zum Zwecke der Bilanzierung auch mit einer Wetterstation erfasst werden. Konkrete Wetterdaten sind Grundlagen für die Nachrechnung des real erlebten Geschehens und seines Einflusses auf die Energiebilanz, z.B. eines Gebäudes oder einer Photovoltaikanlage. Auch Verbrauchsdaten von Gebäuden werden mit Wetterdaten in Korrelation gebracht.

Das Klima beschreibt einen langfristigen, typischen Zustand. Üblicherweise liegen den zugehörigen Klimadaten Messwerte von mindestens 30-jährigen Zeiträumen zugrunde. Auch Klimadaten kommen bei Energiebilanzen zum Einsatz, wenn Prognosen und Bedarfsbilanzen erstellt werden.

Datenbezug aktueller und historischer Werte

Sofern spezielle Werte vor Ort benötigt werden, empfiehlt sich eine eigene Messung mit einer Wetterstation.

Üblicherweise werden jedoch die Datensätze z.B. des Deutschen Wetterdienstes (DWD) oder vergleichbarer Anbieter (teilweise fallen Kosten an!) verwendet. Der DWD betreibt ein dichtes Netz von Stationen. Er stellt für die in Bild 28 genannten Orte jeweils kostenfreie historische Tages- und Monatswerte zur Verfügung. In vielen Fällen gibt es auch Stundenwerte.

Aachen (2x), Angermünde, Arkona, Augsburg, Bamberg, Berlin (3x), Bremen, Brocken, Cottbus, Cuxhaven, Dresden, Düsseldorf, Emden, Erfurt/Weimar, Fehmarn, Feldberg, Fichtelberg, Frankfurt/Main, Freudenstadt, Fritzlar, Fürstenzell, Gera, Gießen/Wettenberg, Görlitz, Greifswald, Großer Arber, Hahn, Hamburg (2x), Hannover, Helgoland, Hof, Hohenpeißenberg, Kahler Asten, Karlsruhe, Kassel, Kempten, Kiel, Köln/Bonn, Konstanz, Lahr, Leipzig/Halle, Leuchtturm Alte Weser, Leuchtturm Kiel, Lindenberg, Lippspringe (Bad), List/Sylt, Magdeburg, Mannheim, Marnitz, Meiningen, München, Münster/Osnabrück, Neuruppin, Norderney, Nürburg/Barweiler, Nürnberg, Oberstdorf, Offenbach, Öhringen, Potsdam, Regensburg, Rheinstetten, Rostock, Saarbrücken/Ensheim, Schleswig, Schwerin, Stötten, Straubing, Stuttgart, Trier, UFS Deutsche Bucht, UFS TW Ems, Wasserkuppe, Weiden, Wendelstein, Würzburg, Zugspitze.

Bild 28 Übersicht der DWD-Wetterstationen mit kostenlosen Tages- und Monats-, ggf. Stundendaten

Für die Station Magdeburg stehen beispielsweise in stündlicher Auflösung zur Verfügung:

- Lufttemperatur und Luftfeuchte in 2 m Höhe (seit 1955)
- Erdbodentemperatur in 5 Tiefen von 2 … 50 cm (seit 1951)
- stündliche Sonnenscheinminuten (seit 1951)
- Windgeschwindigkeit und Windrichtung (seit 1957)
- Niederschlagshöhe und Form (seit 1995)

Die Werte lassen sich aus dem Archiv auch sofort kumuliert als Tages- und Monatswerte entnehmen. In den Tageswerten sind zusätzlich Luftdrücke und Bedeckungsgrade enthalten.

Repräsentative mittlere Datensätze

Aus den Datensätzen konkreter Wetterstationen lassen sich manuell durch Mittelwertbildung Langzeitwerte ableiten. Üblich sind dabei 30 Jahre als repräsentativer Zeitraum.

Darüber hinaus bieten die in Tabelle 36 genannten Regelwerke ebenfalls Informationen zu repräsentativen Klimadaten. Für Deutschland hat sich dabei ein Raster von 15 Regionen etabliert, welches in den Regelwerken immer wieder aufgegriffen wird (siehe Bild 29).

Kürzel	relevanter Inhalt	Daten	Quelle
DIN 4710	Häufigkeitsverteilungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte; Tagesgänge von Lufttemperaturen, stündliche Strahlungsdaten, mittlere stündliche Sonnenscheindauer, mittlere monatliche Windgeschwindigkeiten und -richtungen mittlere monatliche Temperaturen für Luft und Erdreich	15 Regionen Deutschlands	[50]
DIN V 18599 Teil 10	mittlere monatliche Außentemperaturen, mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, monatliche Strahlungsdaten in verschiedene Himmelsrichtungen/Neigungen	15 Regionen Deutschlands	[13]
DIN V 4108 Teil 6	monatliche Strahlungsdaten in verschiedene Himmelsrichtungen/Neigungen, Gradtagszahlen und Heizperiodenlängen für 3 Heizgrenztemperaturen, mittlere monatliche Außentemperaturen	15 Regionen Deutschlands	[14]
VDI 4710 Blatt 2	Gradtage monatlich und jährlich für 14 verschiedene Heizgrenztemperaturen	15 Regionen Deutschlands	[77]
VDI 4710 Blatt 3	Häufigkeitsverteilungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte	15 Regionen Deutschlands	
VDI 4710 Blatt 4	Häufigkeitsverteilungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte sowie Windgeschwindigkeiten	122 europäische Städte	
VDI 4710 Blatt 1	Häufigkeitsverteilungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte, Windgeschwindigkeiten u. a. Daten	20 außereuropäische Städte	

Tabelle 36 Bezugsquellen für Klimadaten

Testreferenzjahre

Testreferenzjahre (test reference years, TRY) werden vom DWD herausgegeben. Es handelt sich um synthetische Datensätze (für fiktive Orte) in stündlicher Auflösung. Sie bilden jeweils eine typische mittlere Witterung für eine Region ab. Bislang gibt es 15 Klimaregionen, künftig sollen Datensätze im Raster von 1 km² verfügbar sein.

Der Datensatz enthält Informationen zur Bedeckung des Himmels, Windrichtung und Geschwindigkeit in 10 m Höhe, Luftdruck, Lufttemperatur und -feuchte in 2 m Höhe, diffusen und direkten Strahlung sowie weiterer Strahlungsdaten. Er entspricht damit weitgehend der Messdatenbasis des DWD. Zusätzlich gibt es jeden der 15 Datensätze in 2 weiteren Ausprägungen: mit einem extrem warmen Sommer und einem extrem kalten Winter.

Die Skizze in Bild 29 zeigt die räumliche Anordnung der TRY-Regionen und ordnet ihnen Städte zu. Weitere Detaillierungen enthält Tabelle 37

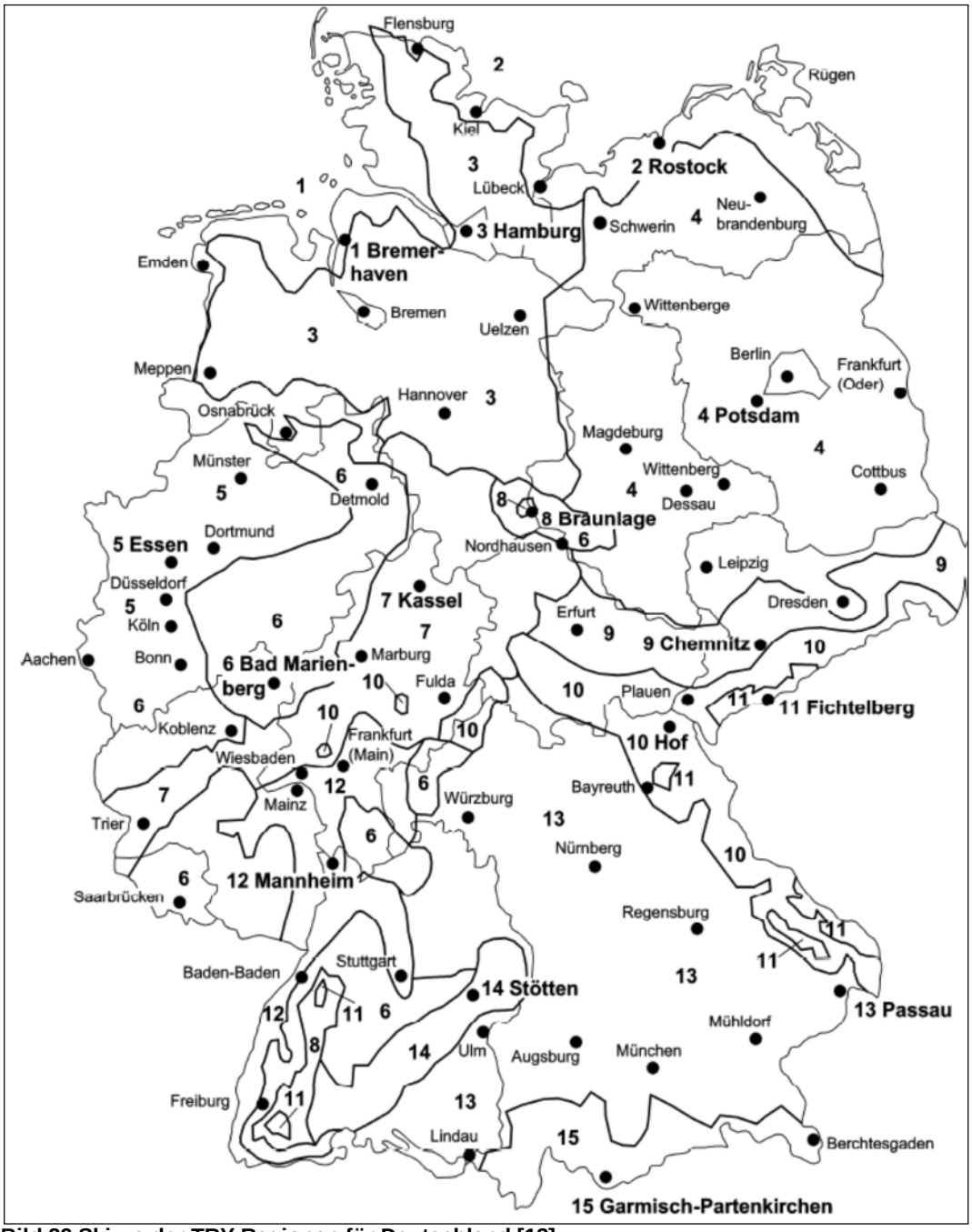


Bild 29 Skizze der TRY Regionen für Deutschland [13]

TRY	Name	zugehörige Regionen	Repräsentanzstation
1	Nordseeküste	Nordseeküste, Nordseeinseln, Schleswig-Holsteinische Marsch, Unterelbeniederung, Weser-Ems-Marsch	Bremerhaven
2	Ostseeküste	Ostseeküste, Ostseeinseln, ca. 10 – 40 km breiter Streifen entlang der Küste	Rostock-Warnemünde
3	Nordwestdeutsches Tiefland	Nordwestdeutsches Tiefland, Schleswig-Holsteinische Geest, Schleswig-Holstein, Hügelland (ohne Ostseeküste), Ratzeburger Seenplatte, Hagenower Sandplatte, Stader Geest, Ostfriesisch-Oldenburgische Geest, Ems-Hunte-Geest, Mittelweser, Hamburg, Bremen, Lüneburger Heide, Weser-Aller-Flachland, Niedersächsische Börden, nordwestliches Harzvorland	Hamburg-Fuhlsbüttel
4	Nordostdeutsches Tiefland	Nordostdeutsches Tiefland Mecklenburg-Vorpommern (ohne Küstenbereich), Altmark (mit Wendland), Bundesländer Brandenburg (mit Fläming und Niederlausitz) und Berlin, mittlere Elbniederungen bis Dresden einschl. Dresdner Elbtal, Magdeburger und Obersächsische Börden, nordöstliches und östliches Harzvorland, Goldene Aue, Sächsische Tieflandsbucht	Potsdam
5	Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland	Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland, Dümmer Geestniederung, Ravensberger Mulde, Münsterland, Ruhrgebiet, Niederrheinische Bucht, unterer Mittelrhein, Neuwieder Becken	Essen
6	Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete	Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete Eifel, nördlicher Westerwald, Bergisches Land, Sauerland, Eggegebirge, Teutoburger Wald, Harz (bis 600 m), Saar-Nahe-Bergland, Hunsrück, Pfälzer Wald, Odenwald, Bauland, Spessart, Schwarzwald (bis 650 m), Gebiete um Enz, Nagold, oberen Neckar und Fils	Bad Marienberg
7	Nördliche und westliche Mittelgebirge, zentrale Bereiche	Nördliche und westliche Mittelgebirge, zentrale Bereiche Weser- und Leinebergland, Eichsfeld, Nordwestthüringen, Hessisches Bergland, Vogelsberg ohne Gipfellagen, Moseltal, südlicher Westerwald, Taunus ohne Hochtaunus	Kassel
8	Oberharz und Schwarzwald (mittlere Lagen)	Oberharz und Schwarzwald, mittlere Lagen Harz (über 600 m), Schwarzwald (zwischen 650 und 1000 m)	Braunlage
9	Thüringer Becken und Sächsisches Hügelland	Thüringer Becken und Sächsisches Hügelland Thüringer Becken und angrenzende Randgebirge, Sächsisches Hügelland, Oberlausitzer Bergland	Chemnitz
10	Südöstliche Mittelgebirge bis 1000 m	Südöstliche Mittelgebirge bis 1000 m, Hochtaunus, Gipfellagen des Vogelsbergs, Rhön, Thüringer Wald, Vogtland, Erzgebirge, Elbsandsteingebirge, Frankenwald, Fichtelgebirge, Oberpfälzer Wald, Bayerischer Wald	Hof
11	Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald oberhalb 1000 m	Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald oberhalb 1000 m Höhenlagen oberhalb 1000 m des Fichtel- und Erzgebirges, Böhmer- und Schwarzwaldes	Fichtelberg
12	Oberrheingraben und unteres Neckartal	Oberrheingraben und unteres Neckartal Wetterau, Untermainebene, Rheingau, unteres Nahetal, Rheinhessen, Oberrheingraben mit Kaiserstuhl, Kraichgau, Neckartal ab Stuttgarter Talkessel, Hochrheintal	Mannheim
13	Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland	Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland Südthüringen, Werratal, Franken (ohne Spessart, Rhön, Frankenwald und Fichtelgebirge), Gebiete an Tauber, Jagst, Kocher, Murr und Rems, Oberpfalz (ohne Oberpfälzer Wald), Donauniederungen, Oberschwaben, Bodenseegebiet, Alpenvorland (bis 700 m)	Mühldorf/Inn
14	Schwäbische Alb und Baar	Schwäbische Alb und Baar	Stötten
15	Alpenrand und -täler	Alpenrand und -täler Alpenvorland (> 700 m), Alpenrand, Alpentäler (bis 1000 m)	Garmisch-Partenkirchen

Tabelle 37 Erläuterungen zu den Regionen des Testreferenzjahres [66]

3.3.1 Außentemperatur

Die Außentemperatur eines Standortes wird bestimmt von dessen Höhenlage, Breitengradlage (Sonneneinstrahlung), Längengradlage (in Deutschland: Kontinentaleinflüsse) sowie einer Stadt- oder Landlage.

Hinweise zur Bilanzierung

Die Außentemperatur trägt – je nach Bilanzverfahren – häufig eines der folgenden Formelzeichen: ϑ_a bzw. ϑ_e oder t_a bzw. t_e (mit dem Index a oder e für deutsch "außen" oder englisch "extern").

Bei der Bilanzierung werden mittlere Außentemperaturen für unterschiedlich lange Zeitintervalle benötigt. Üblich sind:

- stündliche bzw. zehntelstündliche Außentemperaturen für Simulationen im Bereich der Klima- und Raumlufttechnik,
- monatliche Außentemperaturen oder Heizperiodenmittelwerte für Energiebilanzierungen im Bereich der Heizungstechnik.

Für diese Bilanzschritte finden sich bereits berechnete Werte in der Literatur. Mittelwerte für abweichende Intervalle müssen aus Einzelwerten meist selbst bestimmt werden.

Tagesverlauf und stündliche Werte

Auf Basis von Stundenwerten lassen sich insbesondere Mengenverteilungen für Kühlenergien im Tagesverlauf prognostizieren. Entsprechende Tagesverläufe sind in DIN 4710 [12] enthalten, wobei in sonnige, bewölkte, bedeckte und mittlere Tage unterschieden wird. Bild 30 zeigt die Werte für einen mittleren Tag in Potsdam.

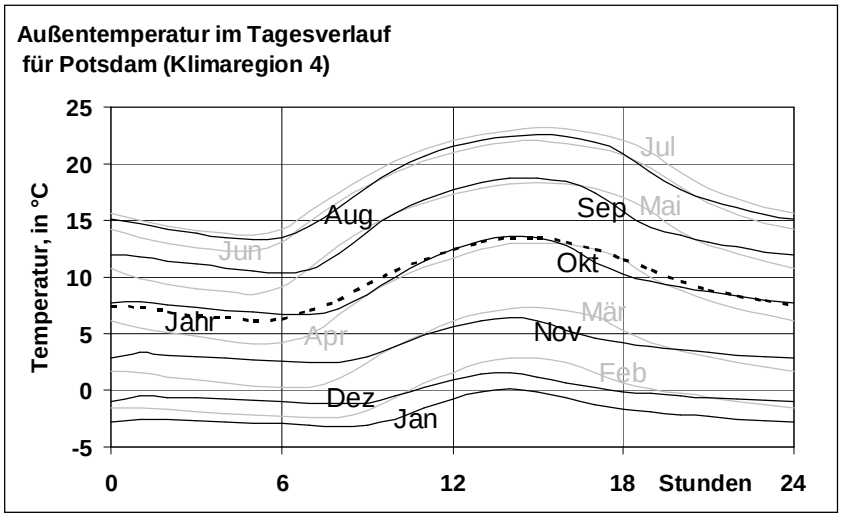


Bild 30 Tagesverlauf der Außentemperaturen für Potsdam

Mittlere Monatswerte

Auf mittleren Monatswerten beruhen u. a. die Bilanzverfahren der DIN V 4108-6 [14] sowie der DIN V 18599 [13]. Sie nutzen die Werte bei der Gebäudebilanzierung zur Berechnung der monatlichen Transmissions- und Lüftungswärmeverluste. Die mittlere monatliche Außentemperatur ersetzt 30 Einzelberechnungen. Im Vergleich mit auftretenden Gewinnen ergibt sich, ob der betreffende Monat rechnerisch ein Heiz- oder Kühlmonat ist sowie die entsprechenden Energiemengen für Heizung und Kühlung.

Für die 15 Regionen aus Bild 29 zeigt Tabelle 38 mittlere monatliche Außentemperaturen sowie einen mittleren Jahreswert. Der in DIN V 18599 als repräsentativ für Deutschland benannte Referenzort 'Potsdam' (Klimaregion) 4 ist in der Tabelle hervorgehoben.

Region	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Ø
1	2,9	3,2	5,4	9	13,1	16	17,9	18,2	15	10,6	6,1	3,2	10,1
2	2,3	2,4	4,3	8	12,4	15,6	18	18	14,7	10,2	5,5	2,6	9,5
3	2,5	2,7	4,9	8,5	12,8	15,5	17,8	17,8	14,1	9,8	5,1	2,3	9,5
4	1	1,9	4,7	9,2	14,1	16,7	19	18,6	14,3	9,5	4,1	0,9	9,5
5	3,1	3,5	6,6	9,5	13,7	15,9	18,2	18,2	14,6	10,8	6,1	3,5	10,4
6	0,1	0,5	3,6	7	11,5	14	16,1	16	12,3	8,1	3,2	0,6	7,8
7	1	2,1	5,2	8,8	13,3	15,9	18,1	17,8	13,7	9,5	4,5	1,7	9,3
8	-0,8	-0,3	2,1	5,7	10,5	12,9	15	15	11,1	7,1	2,3	-0,2	6,7
9	0,5	1	3,9	8,2	12,9	15,5	17,5	17,6	13,2	9,2	3,8	0,8	8,7
10	-1,2	-0,4	2,8	6,6	11,7	14,5	16,3	16,6	12	7,6	2,3	-0,7	7,4
11	-3,3	-3,5	-1,3	2,3	7,4	9,8	12,2	12,4	8,1	4,4	-0,6	-2,8	3,8
12	2,4	3,6	7,1	10,6	15,6	18,1	20,1	20,2	15,7	11	5,7	3,1	11,1
13	-1,2	0,4	4,3	8,2	13,7	16,4	18	17,8	13,1	8,7	3	-0,2	8,6
14	-0,5	0,3	3,4	6,8	11,8	14,4	16,6	16,7	12,3	8,5	2,6	-0,2	7,8
15	-2,3	-0,5	3,2	7	11,8	14,8	16,6	16,4	12,3	8,4	1,9	-1,8	7,4

Tabelle 38 mittlere monatliche Außentemperaturen für 15 Regionen in Deutschland [13]

Mittlere Heizperiodenwerte

Die mittlere Außentemperatur in der Heizzeit hängt von der Heizgrenztemperatur ab. Die Heizgrenztemperatur ist die Umschlagtemperatur zwischen Nichtheiz- und Heizperiode (im Frühjahr und Herbst). Die Zuordnung, welche Heizgrenztemperatur für das konkret zu bilanzierende Gebäude anzusetzen ist, erfolgt zum Beispiel anhand der Baualtersklasse, den Verhältnis von Wärmegewinnen zu Verlusten oder anhand der Heizleistung am kältesten Tag. Nähere Erläuterungen hierzu sind in Kapitel 4.2.2 zu finden.

Ort (Region)		Werte bei Heizgrenztemperatur …			ganzes Jahr	Oktober bis März
		10 °C	12 °C	15 °C		
Norderney , Husum (Region 1)	Länge der Heizzeit	300	235	205	365	182
	Ø Außentemperatur	6,7	4,7	3,7	9,0	4,7
Hamburg, Hannover, Kiel (Region 2)	Länge der Heizzeit	295	235	200	365	182
	Ø Außentemperatur	6,4	4,6	3,6	8,7	3,7
Arkona, Warnemünde (Region 3)	Länge der Heizzeit	300	240	210	365	182
	Ø Außentemperatur	6,2	4,3	3,4	7,9	3,3
Potsdam, Schwerin, Teterow (Region 4)	Länge der Heizzeit	290	235	205	365	182
	Ø Außentemperatur	5,8	4,0	3,0	8,7	2,9
Braunschweig, Dresden, Wittenberg (Region 5)	Länge der Heizzeit	280	225	195	365	182
	Ø Außentemperatur	5,9	4,1	3,1	9,2	4,4
Erfurt, Harzgerode, Lüdenscheid (Region 6)	Länge der Heizzeit	305	255	220	365	182
	Ø Außentemperatur	5,5	3,9	2,7	6,9	1,6
Essen, Köln, Münster (Region 7)	Länge der Heizzeit	280	220	190	365	182
	Ø Außentemperatur	6,9	5,2	4,1	9,6	4,8
Geisenheim, Kassel, Trier (Region 8)	Länge der Heizzeit	275	225	190	365	182
	Ø Außentemperatur	6,4	4,7	3,7	9,9	4,4
Chemnitz, Leipzig (Region 9)	Länge der Heizzeit	285	235	200	365	182
	Ø Außentemperatur	5,7	4,0	2,8	7,9	2,4
Hof, Cham (Region 10)	Länge der Heizzeit	300	255	220	365	182
	Ø Außentemperatur	4,9	3,3	2,0	6,4	0,8
Würzburg, Freudenstadt, Nürnberg, Stuttgart (Region 11)	Länge der Heizzeit	285	240	205	365	182
	Ø Außentemperatur	5,6	3,9	2,8	9,1	3,3
Mannheim, Frankfurt, Saarbrücken (Region 12)	Länge der Heizzeit	270	215	190	365	182
	Ø Außentemperatur	6,3	4,6	3,6	10,3	4,6
Freiburg, Konstanz (Region 13)	Länge der Heizzeit	260	215	185	365	182
	Ø Außentemperatur	6,3	4,6	3,6	10,8	5,3
München, Passau, Weihenstephan (Region 14)	Länge der Heizzeit	285	240	205	365	182
	Ø Außentemperatur	5,2	3,5	2,3	7,6	1,7
Garmisch-Patenkirchen, Oberstorf (Region 15)	Länge der Heizzeit	310	265	230	365	182
	Ø Außentemperatur	4,6	2,9	1,8	6,5	0,7

Tabelle 39 Typische Heizzeiten und mittlere Außentemperaturen je nach Heizgrenztemperatur [14][50]

Je niedriger die Heizgrenztemperatur ist, desto kürzer ist die Heizzeit – beispielsweise gibt es unterhalb von 15°C in Hamburg 325 Tage pro Jahr, während 214 Tage pro Jahr sogar kälter sind als 10°C.

Je kürzer die Heizzeit ist, desto kälter ist sie auch – werden für Hamburg alle Tage gemittelt, die kälter sind als 15°C, ergibt sich eine mittlere Außentemperatur von 7,6°C. Der Mittelwert für die 214 Tage, die kälter sind als 10°C liegt bei 4,6°C. Es erfolgt eine Verschiebung der Heiztage in den Kernwinter und damit ein Wegfall von Tagen in der Übergangszeit.

Typische Heizzeitlängen und mittlere Außentemperaturen für 15 Regionen Deutschland zeigt Tabelle 39. Werden das ganze Jahr bzw. das Winterhalbjahr gemittelt, ergeben sich die Werte in den beiden rechten Spalten.

Typische Werte für einen mittleren Standort in Deutschland zeigen die Grafiken in Bild 31.

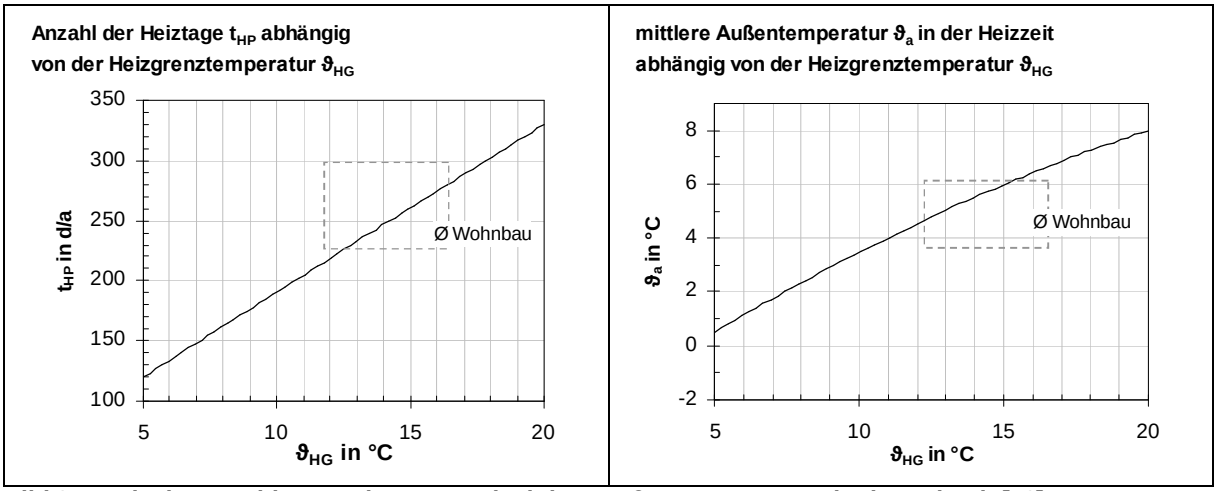


Bild 31 Typische Anzahl von Heiztagen und mittlere Außentemperaturen in der Heizzeit [70]

Gradtagszahlen und Heizgradtage

Gradtagszahlen bzw. Gradtage (Gt oder F_{Gt}) und Heizgradtage (G) lassen sich aus anderen Bilanzkennwerten ableiten, siehe Kapitel 4.2.2. Die Angabe erfolgt in der Einheit "Kd/a" oder günstiger für die Energiebilanzierung in "kKh/a".

Gradtage bzw. Gradtagszahlen enthalten Werte für die Innen- und Außentemperatur sowie die Heizzeit (ϑ_i, ϑ_e, t_{HP}). Sie werden zur Berechung von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten von Gebäuden verwendet. Für die Innentemperaturen 18°C und 20°C zeigt Bild 32 typische Gradtagszahlen abhängig von der Heizgrenztemperatur.

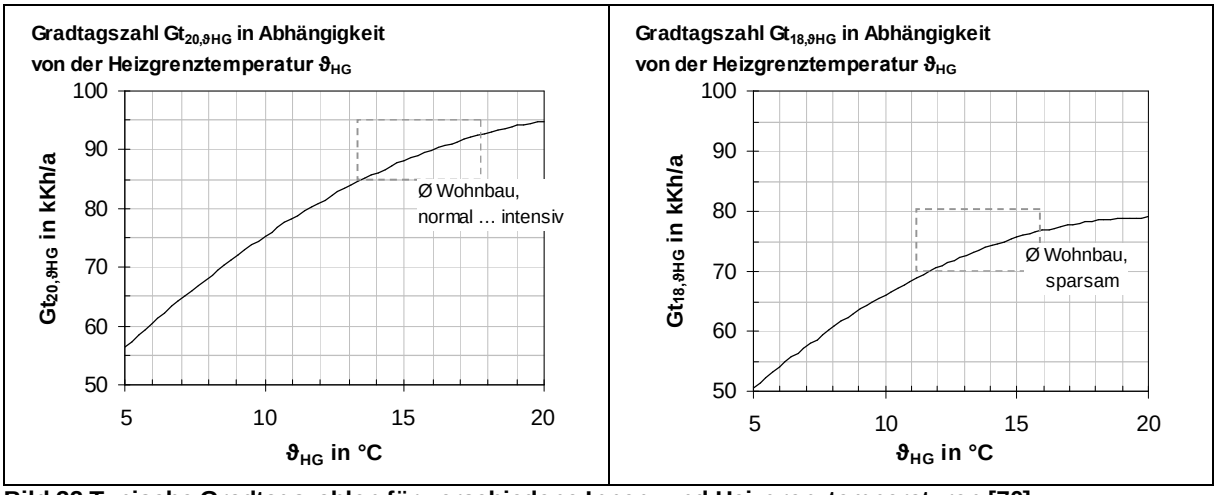


Bild 32 Typische Gradtagszahlen für verschiedene Innen- und Heizgrenztemperaturen [70]

Für andere mittlere Innentemperaturen als 20 °C (hervorgerufen durch andere Nutzungswünsche eines Gebäudes, aber auch durch Regelabweichungen der Wärmeübergabe) kann der Wert der Gradtagszahl näherungsweise wie folgt korrigiert werden:

$Gt_{\vartheta i,\vartheta HG} = Gt_{20,\vartheta HG} + t_{\vartheta HG} \cdot (\vartheta_i - 20°C)$ z.B. $Gt_{19,15} = Gt_{20,15} + t_{15} \cdot (19°C - 20°C)$

Nach diesem Ansatz bedeutet eine Änderung der Raumtemperatur um $\Delta\vartheta_i$ = 1K eine Veränderung der Gradtagszahl um etwa ± 6...7 %.

Heizgradtage hängen von Heizgrenz- und Außentemperatur sowie der Heizzeit (ϑ_i, ϑ_{HG}, t_{HP}) ab. Man kann sie zur Witterungskorrektur von Verbrauchsdaten einsetzen. Bild 33 zeigt typische Heizgradtage für ein mittleres Klima in Deutschland.

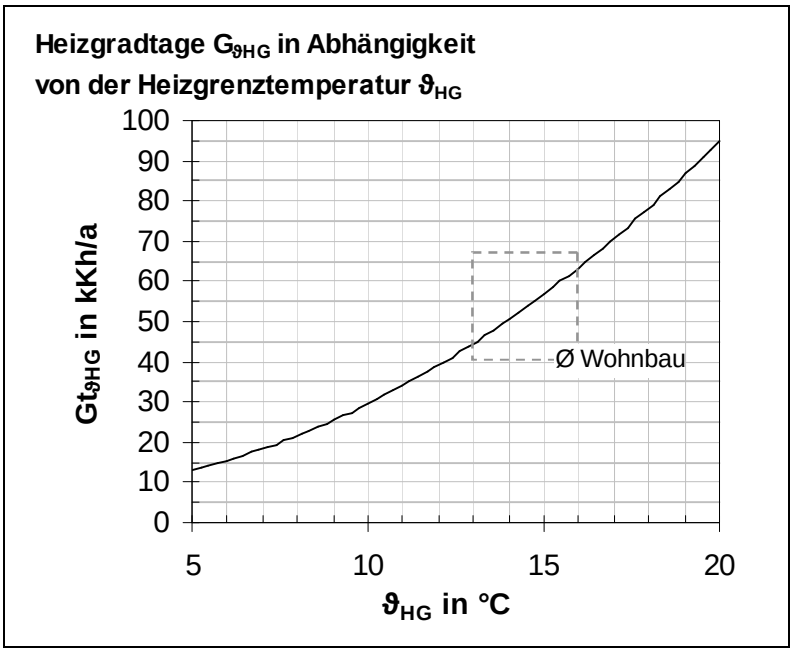


Bild 33 Typische Heizgradtage für verschiedene Heizgrenztemperaturen [70]

3.3.2 Luftfeuchte

Die absolute Luftfeuchte eines Standortes wird bestimmt von dessen Höhenlage, Breiten- und Längengradlage (in Deutschland: Seeklima oder Kontinentaleinflüsse) sowie einer Stadt- oder Landlage. Die relative Luftfeuchte ergibt sich abhängig von der absoluten Feuchte sowie der Lufttemperatur und deren maximaler Wasserdampfaufnahmefähigkeit.

Hinweise zur Bilanzierung

Die relative Luftfeuchte erhält i. A. das Formelzeichen φ, die absolute Feuchte wird mit x gekennzeichnet. Bei der Bilanzierung von energetischen Problemen in der Lüftungs- und Klimatechnik werden meist Werte für sehr kurze Zeitintervalle benötigt. Für die entsprechenden Simulationen sind stündliche bzw. zehntelstündliche Werte üblich. Monatliche Mittelwerte sind allenfalls als informative Angaben üblich.

Zehntelstundenwerte

Auf Basis von Zehntelstundenwerten lassen sich insbesondere Energiemengenverteilungen für Kühl-, Be- und Entfeuchtungsenergiemengen im Verlauf simulieren und prognostizieren. Entsprechende Häufigkeitsverteilungen für Temperaturen (dort mit dem Formelzeichen t) und Luftfeuchten (x) für verschiedene Orte sind in DIN 4710 [12] enthalten. Bild 34 zeigt die Werte für den Standort Potsdam.

t/x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	SUM
35									3	1	1										5
34									1	3	1	1	1	0							7
33					1	1	1	1	4	2	5	3	3	2							21
32					1	0	2	5	7	8	9	6	3	4	2		0				47
31			0	1	1	2	4	6	15	20	17	6	7	8	3	0					90
30				1	1	3	8	11	19	29	19	14	12	9	3	2					132
29				0	2	7	10	19	32	33	33	21	16	9	2	1	1	0			186
28				1	2	10	16	33	40	46	44	29	18	12	7	2	2	0			262
27				2	3	8	19	45	65	66	61	42	26	16	12	2	1	1			369
26				1	3	14	30	63	81	77	87	58	28	15	5	1	1	0			464
25		1		3	7	23	42	72	96	105	92	64	41	21	8	3	1		0		578
24		1		2	16	31	69	101	119	124	116	86	45	24	9	5	1				748
23			0	4	15	51	86	139	157	149	129	94	54	26	9	4	1				916
22			0	5	19	55	101	167	178	197	147	110	58	28	10	3					1079
21			1	8	29	71	143	209	218	210	185	120	72	29	13	3					1311
20			1	11	33	98	173	238	268	248	202	131	76	42	19	2					1542
19			2	17	56	121	214	302	323	303	257	163	94	56	4						1909
18			5	23	69	153	271	367	362	340	263	195	170	25							2244
17			3	37	100	166	295	413	456	390	357	315	113								2647
16			5	51	107	214	376	485	525	495	454	313	8								3033
15			10	59	136	239	421	574	630	643	641	38									3391
14			11	63	170	269	485	698	702	945	264										3606
13		0	16	74	189	330	577	810	946	839	1										3781
12		0	27	85	222	416	716	936	1338	109											3849
11		3	28	112	244	470	818	1277	686												3638
10		4	36	139	323	603	1027	1489	42												3663
9		3	53	161	364	710	1391	749													3431
8		4	66	229	515	979	1602	62													3457
7		7	76	276	700	1347	1044														3450
6		7	93	360	961	1908	134														3462
5		6	103	513	1476	1559															3658
4		12	133	664	2164	753															3726
3		10	174	947	2522	20															3672
2	1	19	207	1375	1910																3513
1	0	28	270	2073	990																3361
0		36	392	3091	24																3543
-0	0	42	515	1996																	2553
-1		62	848	1350																	2260
-2	1	79	1308	451																	1839
-3	1	101	1230	7																	1339
-4		139	894																		1033
-5	0	175	620																		795
-6		272	427																		699
-7	0	395	152																		547
-8	2	446	8																		456
-9	2	302																			304
-10	3	281																			283
-11	2	219																			221
-12	3	156																			159
-13	6	117																			122
-14	11	76																			87
-15	23	38																			61
-16	34	4																			38
-17	26																				26
-18	24																				24
-19	7																				7
-20	6																				6
-21	1																				1
-22	0																				0
-23	2																				2
-24	1																				1
SUM	156	3045	7715	14195	13373	10629	10074	9270	7311	5381	3385	1808	845	326	106	27	8	2	0		87656

Bild 34 Häufigkeit der Luftzustände in Zehntelstunden für Potsdam [50]

Monatsmittelwerte

Neben den üblichen Daten mit hoher Zeitauflösung sind auch Monatsmittelwerte bzw. Schwankungsbreiten aussagekräftig bei der Interpretation von Berechnungen oder Messungen.

Bild 35 zeigt für den Standort Potsdam typische relative Außenluftfeuchten sowie gemessene minimale und maximale Monatsmittelwerte. Es ist – wie für das Klima in Deutschland üblich – eine vergleichsweise geringe Streuung der Werte zu erkennen.

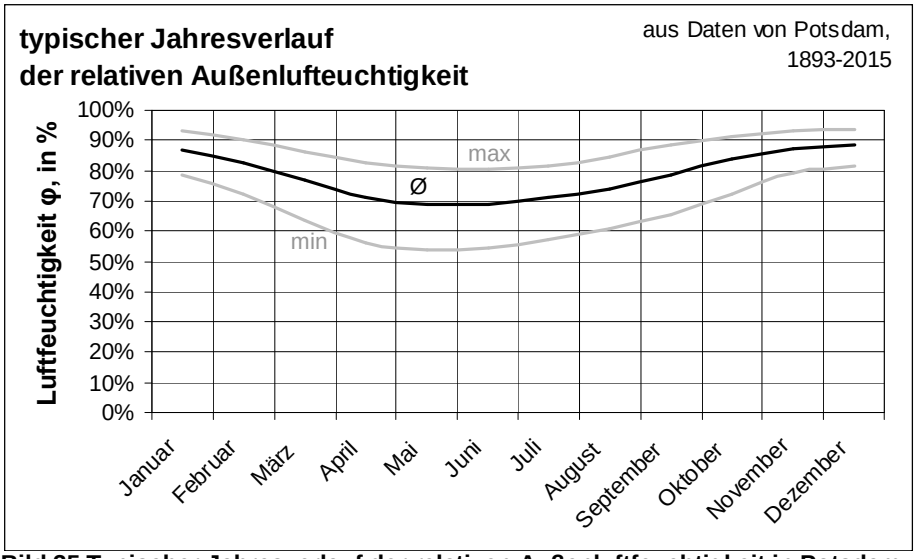


Bild 35 Typischer Jahresverlauf der relativen Außenluftfeuchtigkeit in Potsdam

3.3.3 Solarstrahlung

Die Solarstrahlung eines Standortes wird bestimmt von dessen Höhenlage, Breitengradlage (Sonneneinstrahlung), Längengradlage (in Deutschland: Kontinentaleinflüsse) sowie einer Stadt- oder Landlage. Zudem ist die Jahreszeit, d. h. der Sonnenstand von Bedeutung.

Hinweise zur Bilanzierung

Die Strahlungsleistung trägt allgemein das Formelzeichen I, als Energiemenge über einen Zeitraum wird sie häufig mit G gekennzeichnet. Bei der Bilanzierung werden Strahlungsleistungen oder Energiemengen für unterschiedlich lange Zeitintervalle benötigt. Üblich sind:

- stündliche Leistungen für Simulationen im Bereich der Photovoltaik und Solarthermie sowie Raumlufttechnik und Klimatisierung,
- mittlere monatliche Leistungen oder Heizperiodenmittelwerte für Energiebilanzierungen im Bereich der Heizungstechnik.

Für diese Bilanzschritte finden sich berechnete Werte in der Literatur. Mittelwerte für abweichende Intervalle müssen aus Einzelwerten selbst bestimmt werden.

Strahlungsleistungen oder Energiemengen werden zur Berechnung passiver Solareinträge in ein Gebäude (über transparente und opake Flächen) sowie aktiv gewonnener Solarenergie (Solarthermie, Photovoltaik) verwendet. Analoges gilt für die Auswertung entsprechender Messdaten.

Direkte und diffuse Strahlung

Bei der Beschreibung des Außenklimas durch Kennwerte kann in direkte und diffuse Strahlung unterschieden werden oder deren Gesamtwert angegeben werden.

Als direkte Strahlung wird der (kurzwellige) Teil der Globalstrahlung bezeichnet, welcher noch keine Wechselwirkungen mit der Atmosphäre aufweist. Entsprechend gilt für den (langwelligeren) Teil der Globalstrahlung das Gegenteil.

Die Angabe der Globalstrahlung als Summe von direkter und diffuser Strahlung setzt Kenntnis zur Bedeckung des Himmels voraus. Der DWD archiviert hierzu Angaben, im Regelwerk finden sich Verallgemeinerungen, z.B. in der VDI 4710. Bild 36 zeigt exemplarisch typische Zusammensetzung der Monate aus heiteren, bewölkten und bedeckten Tagen für Potsdam.

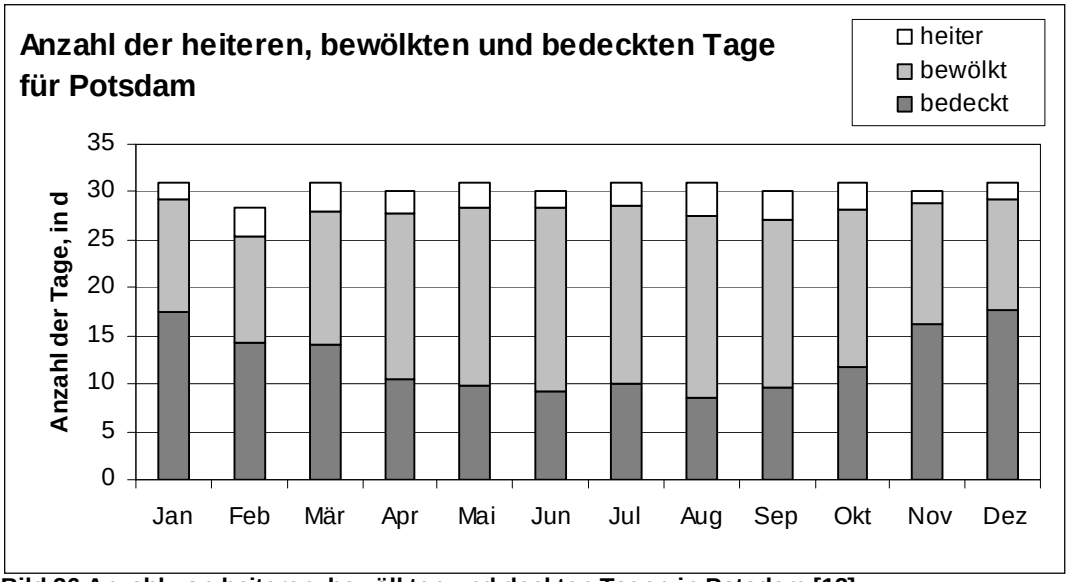


Bild 36 Anzahl von heiteren, bewölkten und deckten Tagen in Potsdam [12]

Bei wolkenlosem Himmel ergeben sich 10 … 20 % Diffusanteil. Ist es dunstig, aber die Sonne grundsätzlich als Scheibe sichtbar beträgt der Diffusanteil 20 … 80 %. Bei einem bedeckten Tag liegt der Diffusanteil der Globalstrahlung bei über 80 %. Die Gesamtstrahlungsleistung sinkt entsprechend von ca. 700 W/m² auf ca. 100 W/m² (Mittelwerte).

Mittlere Monatsleistung

Die mittlere Strahlungsleistung auf eine Fläche hängt vom solaren Strahlungsangebot sowie der Position der Fläche zur Strahlungsquelle ab. Für die Zwecke der Bilanzierung hat es sich als praktikabel erwiesen Strahlungsleistungen nach Himmelsrichtungen (meist 8 Richtungen) und Flächenneigung (meist 4 Neigungen) anzugeben. Für einen mittleren Standort zeigt Tabelle 40 monatliche Leistungsmittelwerte. Es handelt sich dabei um Mittelwerte für alle Monatsstunden, d.h. incl. Nachtzeiten.

Eine Interpolation zweier benachbarter Werte (I_1 und I_2) ist möglich. Sollen die Zusammenhänge möglichst exakt nachvollzogen werden, wird folgende Berechnung empfohlen:

$$I_x = \sqrt{I_1 \cdot I_2}$$

Beispiel: Für eine Neigung von 15° nach Süd im Januar ergibt sich aus der Leistung in der Horizontalen I_0 = 33 W/m² und der Leistung auf eine 30° geneigte Südfläche $I_{Süd,30°}$ = 51 W/m² ein Wert von $I_{Süd,15°}$ = 41 W/m².

Ist nur ein Wert für die richtungsunabhängige Globalstrahlung bekannt, kann eine Umrechnung auf beliebig geneigte und ausgerichtete Flächen erfolgen. Es ist dabei in den direkten und diffusen Anteil zu unterscheiden. Der Rechengang selbst kann in der Literatur nachvollzogen werden.

Richtung	Neigung, in °	Solare Strahlung (direkt plus diffus) auf Flächen, in [W/m²]											
		Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Horizontal	0	33	52	82	190	211	256	255	179	135	75	39	22
Süd	30	51	67	99	210	213	250	252	186	157	93	55	31
	45	57	71	101	205	200	231	235	178	157	97	59	34
	60	60	71	98	190	179	203	208	162	150	95	60	35
	90	56	61	80	137	119	130	135	112	115	81	54	33
Süd-Ost	30	45	62	93	203	211	248	251	183	149	87	49	28
	45	49	64	92	198	200	232	236	175	148	88	51	30
	60	49	62	88	185	182	208	213	161	140	85	51	30
	90	44	52	70	140	132	146	153	120	109	69	44	26
Süd-West	30	45	62	93	203	211	248	251	183	149	87	49	28
	45	49	64	92	198	200	232	236	175	148	88	51	30
	60	49	62	88	185	182	208	213	161	140	85	51	30
	90	44	52	70	140	132	146	153	120	109	69	44	26
Ost	30	33	51	78	181	199	238	240	170	129	72	38	21
	45	32	49	74	172	187	221	224	160	123	69	37	20
	60	30	46	68	160	171	201	205	148	114	65	35	19
	90	25	37	53	125	131	150	156	115	90	51	28	15
West	30	33	51	78	181	199	238	240	170	129	72	38	21
	45	32	49	74	172	187	221	224	160	123	69	37	20
	60	30	46	68	160	171	201	205	148	114	65	35	19
	90	25	37	53	125	131	150	156	115	90	51	28	15
Nordwest	30	22	39	63	151	180	222	221	150	105	57	28	16
	45	20	35	56	132	158	194	194	133	91	51	26	14
	60	18	32	49	116	139	168	170	118	81	46	23	13
	90	14	25	38	89	105	124	128	90	62	35	18	10
Nordost	30	22	39	63	151	180	222	221	150	105	57	28	16
	45	20	35	56	132	158	194	194	133	91	51	26	14
	60	18	32	49	116	139	168	170	118	81	46	23	13
	90	14	25	38	89	105	124	128	90	62	35	18	10
Nord	30	20	34	54	137	173	217	214	142	90	49	26	15
	45	19	32	47	101	143	184	180	115	66	45	24	14
	60	17	29	44	79	109	143	139	90	59	41	22	13
	90	14	23	34	64	81	99	100	70	48	33	18	10

Tabelle 40 Typische monatliche Strahlungsleistung [14]

Strahlung als Energiemenge

Die mittleren Globalstrahlungsleistungen können in Energiemengen innerhalb einer bestimmten Zeit umgerechnet werden. Bild 37 zeigt beispielsweise typische jährliche solare Energiemengen und deren Verteilung im Bundesgebiet.

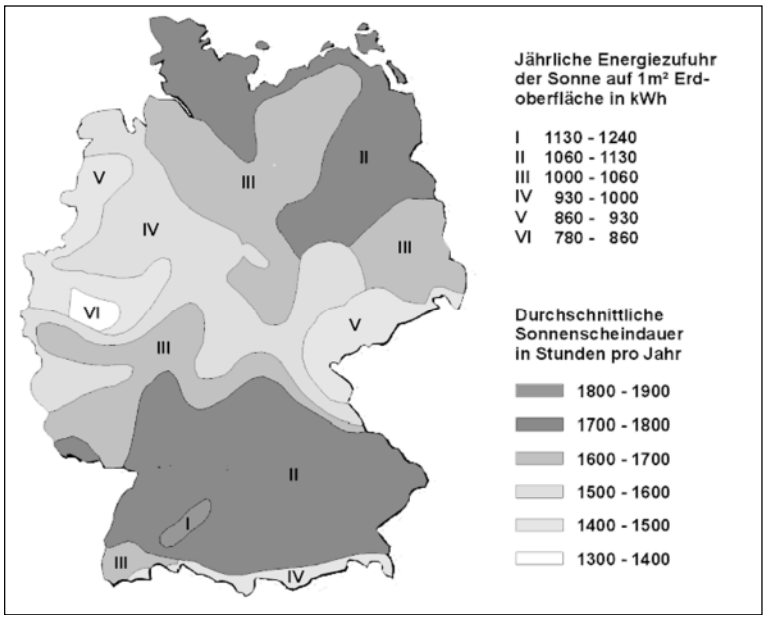


Bild 37 Typische Strahlungsenergiemengen und Sonnenscheindauern [64]

Die Angabe der Globalstrahlung als Summenwert einer Heizperiode verlangt die Angabe der zugehörigen Heizgrenztemperatur. In der Literatur sind häufig Werte für 10 °C, 12 °C oder 15 °C Heizgrenze zu finden. Typische Werte für die Globalstrahlung eines mittleren Standortes zeigt Tabelle 41.

		Globalstrahlung in der Heizzeit [kWh/(m²a)]										
			90 ° geneigt					45 ° geneigt				
		H	S	SO/SW	O/W	NO/NW	N	S	SO/SW	O/W	NO/NW	N
Werte bei Heizgrenztemperatur …	10°C	293	310	269	197	137	123	376	342	269	200	178
	12°C	492	431	399	322	234	198	572	535	445	347	306
	15°C	791	613	594	509	380	311	865	825	710	566	499
Ganzes Jahr		1119	813	808	714	540	435	1188	1143	1001	808	710
Oktober bis März		221	266	222	152	102	96	305	272	205	147	132

Tabelle 41 Typische Globalstrahlung in der Heizperiode [50]

Für die Mittelwertbildung zweier benachbarter Himmelsrichtungen oder Neigungen gelten die unter 'Leistung' gemachten Ausführungen analog.

3.3.4 Weitere Einflüsse

Für die Bilanzierung von Energiemengen bei der Energiekonzepterstellung sind weitere Einflüsse von Bedeutung. Nachfolgend werden Kennwerte für die Erdreichtemperatur sowie Windgeschwindigkeiten genannt. Außerdem werden der Einfluss des städtischen Klimas sowie die Höhenlage eines Ortes kurz umrissen.

Erdreichtemperatur

Abhängig vom Abstand zur Erdoberfläche, der Jahreszeit und Bodenbeschaffenheit ergibt sich eine Temperatur im Erdreich. Sie ist relevant zur Bestimmung der Wärmeverluste von Gebäuden, aber auch zur Einschätzung der Erträge einer Wärmepumpe. Bild 38 zeigt typische Erdreichtemperaturen für einen mittleren Standort Deutschlands.

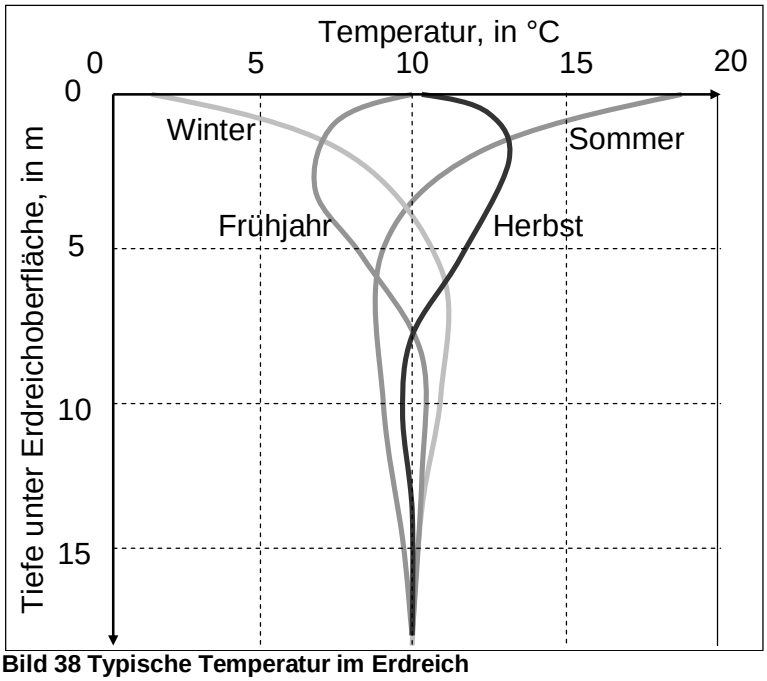


Bild 38 Typische Temperatur im Erdreich

Ab etwa 15 m unter der Erdreichoberfläche ist nahezu kein Einfluss der Jahreszeiten mehr festzustellen. Allerdings steigt im für Geothermie vorstellbaren Bereich bis ca. 200 m Tiefe – nicht mehr im Bild dargestellt – die Temperatur um etwa 0,4 K je 10 m an.

Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit und Richtung bestimmt das Lüftungsverhalten von Gebäuden und die Transmission über seine (dem Wind ausgesetzten) Flächen. Für 15 Regionen Deutschlands (siehe Bild 29) zeigt Tabelle 42 typische mittlere Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe.

Region	mittlere Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe, in [m/s]												
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Ø
1	5,5	4,5	5,6	5,0	4,1	4,3	4,4	4,7	5,0	4,8	5,0	4,5	4,8
2	4,8	6,4	4,3	3,2	3,5	5,2	4,5	4,1	5,6	4,5	4,4	4,3	4,5
3	4,3	4,1	4,8	4,0	3,3	3,1	3,2	3,2	3,5	4,3	3,3	3,9	3,8
4	4,5	4,3	4,8	4,0	3,6	3,6	3,8	3,3	4,2	4,7	4,2	3,4	4,0
5	4,7	4,5	3,9	3,9	3,4	3,1	2,7	2,4	3,9	5,3	3,6	5,4	3,9
6	4,6	3,5	3,7	3,1	2,6	2,3	2,0	2,6	2,5	3,8	2,4	3,7	3,1
7	3,2	2,7	2,5	2,0	2,1	1,8	1,8	1,7	1,8	2,7	2,7	2,4	2,3
8	3,3	2,8	3,3	3,0	2,8	2,5	2,4	2,4	2,6	2,9	3,0	4,2	2,9
9	4,6	5,6	6,8	4,4	3,5	2,6	3,1	3,5	4,0	5,0	3,6	3,8	4,2
10	3,5	3,8	3,3	2,8	3,2	2,2	2,4	2,3	2,8	4,3	3,6	3,3	3,1
11	11,8	11,3	10	7,1	7,5	6,6	7,7	5,7	6,4	9,5	10,5	10	8,7
12	3,9	2,4	1,9	2,7	2,0	2,4	2,2	2,5	2,4	2,6	3,1	2,1	2,5
13	2,4	2,6	3,7	2,5	1,8	2,2	1,78	1,5	1,8	1,5	2,1	2,6	2,2
14	5,8	4,2	5,3	5,1	3,5	3,2	3,7	3,1	4,2	4,6	5,0	5,7	4,5
15	1,0	0,5	1,1	1,2	1,1	1,0	1,2	1,0	0,8	0,9	0,6	0,9	0,9

Tabelle 42 mittlere monatliche Windgeschwindigkeiten für 15 Regionen in Deutschland [13]

Die tabellierten Werte sind ebenfalls nützlich, wenn Erträge von Windkraftanlagen grob eingeschätzt werden sollen. Im konkreten Einzelfall sind jedoch nur Lokaldaten aussagekräftig!

Innenstadt- und Stadtrandlage

Bild 39 zeigt Berechnungsergebnisse für die Endenergie eines mit Gaskessel versorgten teilmodernisierten Wohngebäudes. Grundlage sind die für die einzelnen Postleitzahlbereiche von Berlin veröffentlichten Gradtagszahlen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Der relative Endenergiemehrbedarf am Stadtrand liegt bei +3 … 4 %. Die Werte sind auch auf eine Versorgung mit Wärmepumpe übertragbar. Mit besserem Baustand sinkt die Differenz zwischen Stadtmitte und Stadtrand.

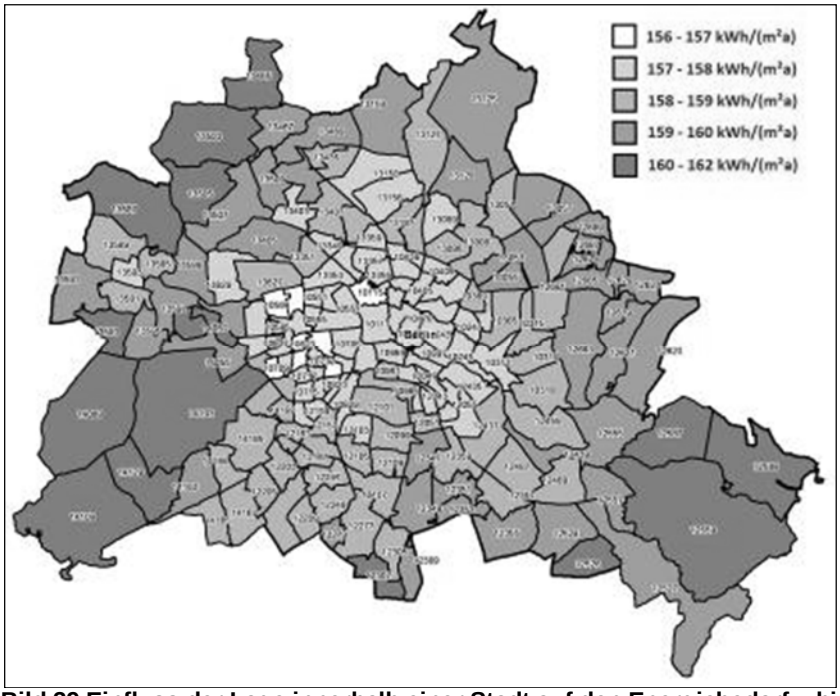


Bild 39 Einfluss der Lage innerhalb einer Stadt auf den Energiebedarf – hier am Beispiel von Berlin [41]

Die Mikroklimata einer Stadt wie Berlin weisen in der Praxis vermutlich deutlich größere Schwankungsbreiten auf als es die postleitzahlengenaue Auflösung des DWD anzeigt. Geht man von einer doppelt oder dreifach so hohen Streuung aus, ergeben sich entsprechend doppelt oder dreimal so hohe Streuungen bei der Endenergie. Der Verbrauchsunterschied zwischen Innenstadt und Standrand beträgt dann mehr als 10 %.

Höhenlage

Im Mittel nimmt die Luft – in den für die Energiebilanzierung interessanten unteren Atmosphärenschichten – um 0,6 Grad Celsius pro 100 Meter ab. Das spiegelt sich grundsätzlich auch in den Wetterdaten des DWD für verschieden hoch gelegene Stationen wieder.

Der Wert schwankt je nach Feuchtigkeitsgehalt der Luft. Ist die Luft trocken, ergeben sich Werte um 1 K/100 m. Bei feuchter Luft um 0,5 K/100 m. Für Berechnungen im Rahmen der Energiebilanzierung sollte der Mittelwert als Korrekturwert ausreichend sein, sofern keine passenden Daten einer Wetterstation vorliegen.

3.4 Kennwerte für Baukörper

Ein Baukörper wird – im Sinne der Energiebilanzierung – beschrieben durch seine Hüllflächen und sein Volumen (Kompaktheit), die Wärme- und Strahlungsdurchlässigkeit der umschließenden flächigen Bauteile (U-Werte, g-Werte) incl. Wärmebrücken sowie die Gebäudedichtheit (Infiltration).

Die Eigenschaften des Baukörpers finden sich im Wesentlichen in den Transmissionswärmeströmen, den passiven Solargewinnen sowie anteilig im Lüftungswärmestrom wieder.

Zur Einordnung der baulichen Qualität eines Gebäudes werden nachfolgend folgende Kennwerte beschrieben:

- geometrische Kennwerte (Kapitel 3.4.1): personenbezogener Flächenbedarf, Gebäudekompaktheit, Fensterflächenanteil, Kennwerte zur Gebäudehüllflächenschätzung
- Kennwerte der opaken Bauteile (Kapitel 3.4.2): U-Werte für verschiedene nicht transparente Außenbauteile, mittlere bezogene Transmissionswärmeverluste H_T' für Gesamtgebäude, Temperaturkorrekturfaktoren F_X
- Kennwerte der transparenten Bauteile (Kapitel 0): U-Werte für transparente Bauteile, g-Werte mit und ohne Einfluss von Sonnenschutzmaßnahmen, typische Solarstrahlungsgewinne
- Kennwerte für Wärmebrücken (Kapitel 3.4.4): typische Wärmebrückenzuschläge ΔU_{WB}
- Kennwerte für Gebäudedichtheit (Kapitel 3.4.5): typische Luftwechsel einer Gebäudedichtheitsprüfung n_{50}, typische Infiltrationsluftwechsel n_{inf}

Zur Vertiefung wird auf die folgende Literatur verwiesen: im Bereich der Normen geben DIN V 18599-2 [13] und DIN V 4108-6 [14] wichtige Hinweise zu Detailaspekten der Baukörperbewertung.

Darüber hinaus sind die wichtigsten Datenquellen für statistische Kennwerte die Auswertungen des Instituts Wohnen und Umwelt, für den Wohnbau der Energiepass Heizung/Warmwasser mit Toolbox [51][50], das Pauschalverfahren zur Energiebilanzierung von Wohnbauten [52] sowie die Untersuchungen zu Teilkennwerten im Nichtwohnbau TEK [38].

Weitere Quelldaten des Passivhausinstituts und der Deutschen Energieagentur sind themenspezifisch benannt.

3.4.1 Gebäudegeometrie

Bei der energetischen Beschreibung eines Gebäudes wird in der Regel auf flächenbezogene Kennwerte zurückgegriffen - zum Beispiel bei der Angabe des spezifischen Heizenergieverbrauches in kWh/(m²a). So ist eine Vergleichbarkeit verschiedener Gebäude möglich. Ein speziell untersuchtes Gebäude lässt sich innerhalb seiner Nutzungsklasse oder Baualtersklasse energetisch einordnen.

Zudem werden geometrische Daten verwendet, um Lüftungswärmeverluste (Volumen) bzw. Transmissionswärmeströme (Hüllflächen) zu berechnen und zu bewerten.

Festlegung von Systemgrenzen

Im Rahmen einer energetischen Bewertung müssen Systemgrenzen festgelegt werden. Dies gilt insbesondere zur Berechnung oder Messung der thermischen Energiemengen. Folgende Erkenntnisse lassen sich aus praktischen Beratungsprojekten ableiten:

- Bereiche unterschiedlicher Nutzungsbedingungen (Raumtemperatur, Luftwechsel, Beleuchtungsstärken etc.) können gemeinsam in einer Systemgrenze erfasst werden und anschließend gemeinsam berechnet oder gemessen werden; sinnvoll ist dieses "Einzonenmodell" bei insgesamt homogener Nutzung, z.B. für die Bilanzierung von Schulen und Wohngebäuden; es vermindert den Datenerhebungsaufwand, allerdings ist keine gegenseitige Beeinflussung der Zonen erkennbar; repräsentative Randdaten für die Nutzung ergeben sich beispielsweise aus einer Wichtung von Einzeleigenschaften über Flächen- oder Volumenanteile,
- ein "Mehrzonenmodell" definiert neben den übergeordneten Systemgrenzen zusätzlich für jede Zone Systemgrenzen; innerhalb jeder Zone gelten eigene Nutzungsbedingungen; sinnvoll ist dieses Bilanzmodell für Gebäude mit inhomogener Nutzung, z.B. Produktionsgebäuden mit Verwaltungstrakt; bei größerem Datenerhebungsaufwand lassen sich über dieses Modell Wärmeströme zwischen den Zonen sichtbar machen,
- beheizbare Räume innerhalb eigentlich unbeheizter Bereiche (z.B. Hobbyräume in Keller- oder Dachgeschossen) können außerhalb der gewählten Systemgrenzen liegen, sofern ihr Wärmebedarf als vernachlässigbar eingestuft wird; das gilt auch wenn dort Heizflächen angeordnet sind, die jedoch nicht oder nur in Ausnahmefällen benutzt werden,
- nicht direkt beheizte Räume innerhalb eigentlich beheizter Bereiche (z.B. Abstellräume oder Wohnungsinnenflure) können innerhalb der Systemgrenzen liegen; sie werden indirekt durch Transmission oder Lüftung aus den Nachbarräumen mit beheizt; es ist in diesem Zusammenhang gleichbedeutend, ob die betreffenden Räume selbst Heizflächen haben (die nicht in Betrieb sind) oder nicht; die sich ergebene mittlere Raumtemperatur innerhalb der Systemgrenzen liegt entsprechend gewichtet niedriger.

Die gegebenen Hinweise zur Festlegung der Systemgrenzen gelten für die Beratung! Im Rahmen öffentlich-rechtlicher Nachweise sind normierte Vorgehensweisen einzuhalten.

Maßbezüge

Ein Gebäude wird im Zuge einer Beratung ggf. aufgemessen, wenn detaillierte Berechungen zur Transmission, Lüftung usw. erfolgen sollen. Dafür gelten in allen Regelwerken nahezu einheitliche Maßbezüge.

Für die Bestimmung der thermisch konditionierten Flächen und des entsprechenden Volumens wird ein Aufmaß mit den Nettoinnenmaßen durchgeführt. Betrachtet werden dabei die Bereiche des Gebäudes innerhalb der gewählten Systemgrenzen. Dieses Aufmaß liefert beispielsweise die Nettogrundfläche (üblich für energetische Berechungen von Nichtwohnbauten) und das Luftvolumen. Die im Wohnungsbau übliche Wohnfläche entstammt ebenfalls einem Nettoinnenaufmaß, wobei Flächen unter Schrägen gesondert behandelt werden.

Wird die wärmeübertragende Fläche eines Gebäudes bestimmt, dient dies der Transmissionsberechnung. Es gelten für das Aufmaß folgende Grundsätze:

- Grundriss
  - Breiten und Längen werden jeweils mit Außenmaßen des thermisch konditionierten Bereiches angesetzt, d.h. die Konstruktion wird an Gebäudeecken doppelt gemessen; auch zum Erdreich, Kellern und anderen unkonditionierten Bereichen gilt der Außenmaßbezug,
  - werden Teilflächen innerhalb des thermisch konditionierten Bereiches benötigt, gilt das Achsmaß, so dass die Trennwand je zur Hälfte den beiden benachbarten Räumen oder Zonen zugeordnet wird,
- Schnitt
  - Höhenmaße beginnen in jeder Etage auf der Oberkante der Rohdecke und enden ein Geschoss darüber ebenfalls dort,
  - die Ausnahme bildet der obere Gebäudeabschluss, bei dem bis zur Oberseite der obersten wärmetechnisch wirksamen Schicht gemessen wird,
- Fenster
  - für alle Maße gilt die Rohbauöffnung
  - falls ein Anschlag vorhanden ist, gilt die größere Öffnung

Auch das umbaute Volumen eines Gebäudes (externes Volumen) wird auf Basis der genannten Grundsätze ermittelt. Es bezieht sich auf die Außenmaße der wärmeübertragenden Hülle.

Belegungsdichte bzw. personenbezogene Flächen

Insbesondere zu Abschätzung von notwendigen Luftwechseln, aber auch zur Einschätzung der Nutzung elektrischer Geräte sind Belegungsdichten hilfreich. Üblich ist allerdings die Angabe der Kehrwerte, d.h. eines personenbezogenen Flächenbedarfs.

Tabelle 43 zeigt Spannbreiten der Energiebezugsfläche A_{EB} für verschiedene Nutzungen. Betrachtet werden dabei die gesamten Gebäude, incl. aller Verkehrs- und Sanitärflächen. Sofern für Räume einzelner Nutzung Kenndaten gesucht werden, sei auf die DIN EN 13779 bzw. DIN EN 15251 verweisen.

Gebäudenutzungstyp	Fläche A_{EB} je Nutzer, in [m²/P]
EFH	40...50...100
MFH	30...40...60
Schulen, Kindertagesstätten	8...10...15
Sporthallen, Bäder, Restaurants, Berufsschulen	15...20...30
Verwaltung, Büro	20...25...35
Heime, Herbergen	25...35...50
Laborgebäude, Krankenhäuser, Bereitschaftsdienste, Rechenzentren	30...40...60
Produktion, Werkstätten, Verkauf	40...50...100
Bühnen/Säle	50...70...100
Lager	70...100...200

Tabelle 43 Energiebezugsflächen je nach Gebäudenutzungstyp [50][70][eigene]

Unter "Energiebezugsfläche" ist im Wohnungsbau der beheizte Teil der Wohnfläche und im Nichtwohnungsbau die Nettogrundfläche der beheizten/gekühlten Bereiche des Gebäudes zu verstehen.

Gebäudekompaktheit

Der Kompaktheitsgrad eines Gebäudes ist ein Kennwert, der maßgeblich für die spezifischen Wärmeverluste durch Transmission relevant ist.

Die Kompaktheit kann als Verhältnis der Hüllfläche zum umbauten Volumen angegeben werden. Dabei umschließt die Hüllfläche A den beheizten und/oder gekühlten Bereich des Gebäudes, das Volumen V_e gibt seine Größe anhand der Außenmaße wieder. Diese Grüße hat die Einheit [m²/m³] bzw. [1/m].

Eine andere Möglichkeit, die Kompaktheit eines Gebäudes auszudrücken, ist die Angabe des Verhältnisses der Hüllfläche A zur Energiebezugsfläche A_{EB}. Diese Größe ist dimensionslos. Sie gibt Auskunft darüber, wie viel Quadratmeter Außenfläche auf einen Quadratmeter beheizte Wohn- bzw. Nettogrundfläche kommen. Aus dieser Angabe ist unmittelbar ersichtlich: der spezifische Energiebedarf je Quadratmeter Bezugsfläche steigt (bei sonst gleichen Randbedingungen), wenn das Gebäude wenig kompakt ist.

Tabelle 44 enthält Richtwerte für den Kompaktheitsgrad verschiedener Gebäude. Die für das Realprojekt ermittelten Werte können mit diesen verglichen werden, um eine Einschätzung bzgl. der Transmission zu erhalten.

Gebäudenutzungstyp		A/A_{EB}, in [-]	A/V_e, in [m^{-1}]
Wohnbau	freistehendes EFH	2,3...3,3	0,7...1,0
	Reihenendhaus	2,0...2,6	0,6...0,8
	Reihenmittelhaus	1,6...2,3	0,5...0,7
	kleines Mehrfamilienhaus	1,6...2,5	0,5...0,8
	großes Mehrfamilienhaus	1,3...2,2	0,4...0,7
	Hochhaus	0,6...1,8	0,2...0,6
Nichtwohnbau	Verwaltung, Büro, Gericht, Wachen	1,2...2,5	0,3...0,6
	Kindertagesstätte, Restaurant, Gemeindehaus	1,6...2,9	0,4...0,7
	Ferienheime, Schullandheime, Hotels	0,8...1,6	0,2...0,4
	Schulen, Hochschulen, Banken, Bücherei, Museum	1,4...2,4	0,3...0,5
	Bühnen/Säle, Sportstätten, Industrie, Produktion, Bäder	1,7...2,8	0,3...0,5
	Krankenhäuser, Warenhaus	0,9...1,3	0,2...0,3
	Lager, Veranstaltungshalle	1,6...2,3	0,2...0,3

Tabelle 44 Kompaktheitsgrad von Gebäuden [38][44][52][70][81]

Fensterflächenanteil

Neben dem Kompaktheitsgrad eines Gebäudes bestimmt zusätzlich der Fensterflächenanteil den Energieverbrauch des Gebäudes. Große Fensterflächen A_{FE} ermöglichen – abhängig von der Orientierung - in der Heizperiode einen Eintrag passiver Solarwärme, die den Heizenergiebedarf senkt. In der Kühlperiode erhöhen sie den Kühlbedarf.

Als Kenwerte lassen sich die Werte je Hüllfläche (A) oder je beheizter Wohnfläche (A_{EB}) ausdrücken, siehe Tabelle 45.

Gebäudenutzungstyp		A_{FE}/A, [-]	A_{FE}/A_{EB}, [-]
Wohnbau	Einfamilienhaus	k. A.	0,18...0,22
	Mehrfamilienhaus	k. A.	0,16...0,20
Nichtwohnbau	Kindertagesstätte	0,20...0,25	k. A.
	Verwaltung, Büro, Gericht, Schulen, Hochschulen, Museum, Gemeindehaus, Krankenhäuser	0,17...0,22	k. A.
	Banken, Wachen, Ferienheime, Schullandheime, Hotels, Restaurant, Bäder	0,14...0,18	k. A.
	Bücherei, Veranstaltungshalle, Bühnen/Säle	0,12...0,16	k. A.
	Warenhaus, Lager, Verkauf, Industrie, Produktion, Sportstätten	0,03...0,08	k. A.

Tabelle 45 Fensterflächenanteil von Gebäuden [38][44][52]

Mit den Umrechnungsfaktoren der Tabelle 44 können die fehlenden Tabelleneinträge reproduziert werden. Beispiel für ein Einfamilienhaus als Reihenendhaus:

- Tabelle 45 ergibt einen wohnflächenbezogenen Fensterflächenanteil von $A_{FE}/A_{EB} \approx 0{,}2$
- Tabelle 44 ergibt eine wohnflächenbezogene Gesamthüllfläche von $A/A_{EB} \approx 2{,}3$
- damit liegt der hüllflächenbezogene Fensterflächenanteil bei: $A_{FE}/A \approx 0{,}2/2{,}3 = 0{,}087$.

Typische Hüllflächen

Hilfsmaterialien zur Schätzung von Hüllflächen – Dach, Geschossdecke, Wand, Böden – finden sich in den Veröffentlichungen des Instituts Wohnen und Umwelt. Die wichtigsten Erkenntnisse werden nachfolgend als Vergleichskennwerte angegeben.

Für den Wohnungsbau ist als Schätzgrundlage bzw. Basisvariable die Wohnfläche je Vollgeschoss zu bestimmen $A_{WF/VG}$ [m²]. Mit Hilfe der Kennwerte p und q aus Tabelle 46 und nachfolgender Gleichung ergeben sich die Baueilflächen:

$$A_{BT} = p \cdot A_{WF/VG} + q$$

		alle Gebäude		Gebäude mit Flachdach		Dachgeschoss					
						unbeheizt		teilbeheizt		beheizt	
		p [-]	q [m²]	p [-]	q [m²]	p [-]	q [m²]	p [-]	q [m²]	p [-]	q [m²]
Dach				1,33	0,3			0,92	1,2	1,51	16,4
obere Geschossdecke						1,32	2,4	0,62	0,8		
Fassade	freistehend			0,44	90	0,82	49,7	0,66	47,9	0,73	42,7
	einseitig angebaut			0,56	49,7	0,67	37,9	0,62	30,9	0,73	23,0
	zweiseitig angebaut			0,59	17,4	0,66	14,6	0,60	10,4	0,62	9,4
Fußboden		1,33	0								

Tabelle 46 Schätzansätze zur Hüllflächenermittlung im Wohnbau [52]

Basis sind über 4000 Datensätze aus dem Wohnungsbau. Tabelle 46 zeigt die Werte für die in der Mehrzahl (mehr als 95 %) vorkommenden kompakten Gebäude. Für andere Bauformen wird auf die Studie des Instituts Wohnen und Umwelt [20] verweisen. Fensterflächenanteile – welche die Hüllflächenschätzung komplettieren – sind Tabelle 45 zu entnehmen.

Für den Nichtwohnungsbau wird die Nettogrundfläche A_{NGF} herangezogen. Mit Hilfe der Kennwerte in Tabelle 47 ergeben sich die Flächen für den unteren und oberen Gebäudeabschluss sowie der Fassade (ohne Fenster). Die Stichprobe umfasst 93 Gebäude. Es ergeben sich teils hohe Standardabweichungen.

	Kellerdecke/ Bodenplatte	Dachfläche/ obere Decke	Wandfläche
	[m²BTF/m²NGF] bezogen auf die durchschnittliche Geschossfläche		bezogen auf die Gesamtnettogrundfläche [m²BTF/m²NGF]
Ämter Verwaltung, Banken, Büro, Gericht, Wachen	1,60 ± 0,67	1,65 ± 0,67	0,49 ± 0,17
Einkaufszentrum Großhandel, Kaufhaus, Warenhaus	1,56 ± 0,87	1,49 ± 0,83	0,29 ± 0,08
Hochschulen	1,55 ± 1,10	1,62 ± 1,10	0,53 ± 0,20
Hotels, Beherbergung	1,97 ± 1,56	1,90 ± 1,29	0,45 ± 0,11
Schulen, Kindertagesstätten	1,36 ± 0,71	1,41 ± 0,68	0,55 ± 0,18
Bücherei, Gemeindehaus, Museum, Ausstellung, Veranstaltung	1,39 ± 0,46	1,58 ± 0,86	0,58 ± 0,26

Tabelle 47 Schätzansätze zur Hüllflächenermittlung im Nichtwohnbau [38]

Beispiel zur Anwendung der Tabelle 47: für ein Hotel mit 3500 m² Nettogrundfläche und 5 Geschossen ergeben sich als typische mittlere Werte:

- Wandflächen: 0,45 x 3500 m² = 1575 m²
- Dachflächen: 1,90 · (3500 m² / 5) = 1330 m²
- Keller- und Bodenflächen: 1,97 · (3500 m² / 5) = 1379 m²

Flächen- und Volumenumrechnung

Hinsichtlich der Umrechnung verschiedener Bezugsflächen (Bruttogrundfläche, Nettogrundfläche, Wohnfläche etc.) wird auf Kapitel 4.7 verwiesen.

Hinsichtlich der Umrechnung von Brutto- in Nettovolumen hat sich im Wohnbau der Umrechnungsfaktor 0,8 [m³/m³] etabliert. Für kleine Gebäude mit max. 3 Vollgeschossen kann auch 0,76 [m³/m³] verwendet werden.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Es wird empfohlen, die geometrischen Daten für das reale Projekt zu erheben und alle Kennwerte dieses Kapitels lediglich zum Vergleich und zur Einordnung zu verwenden.

Die Datenerhebung erfolgt mit Plänen, digitalen Entfernungsmessgeräten, aber auch Softwareprogrammen zum Fotoausmaß (mit "Entzerrungsfunktion", d.h. die aufgrund der Perspektive des Fotografen im Bild zunächst nicht parallel bzw. rechtwinklig verlaufenden Gebäudekanten werden per Software korrigiert).

3.4.2 Opake Bauteile

Der Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m²K)] eines Bauteiles wird bestimmt durch die Wärmeleitung im Bauteil und durch die Wärmeübergänge an den Oberflächen dieses Bauteils. Die Berechnung der U-Werte für nicht-transparente, also opake Bauteile ist in DIN EN ISO 6946 genormt. Wärmeleitfähigkeiten für unterschiedliche Materialien bzw. Materialkombinationen bei mehrschichtigen Hüllflächen sind beispielsweise in DIN 4108-4 und DIN EN 12524 aufgeführt.

Opake Bauteile tragen zum sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz von Gebäuden bei. In beiden Fällen sind geringe U-Werte als positiv einzuschätzen. Die Lage der Dämmschicht ist hierbei ohne Bedeutung (ggf. Wärmebrückeneffekte). Für den sommerlichen Wärmeschutz zählt zusätzlich die Speichermasse der Bauteile, die Lastspitzen dämpft. Es ist von Vorteil, wenn Speichermassen raumseitig vorhanden sind, d.h. innengedämmte Konstruktionen schneiden im sommerlichen Fall ungünstiger ab.

Wird ein einzelner Baustoff betrachtet, ergibt sich der folgende verallgemeinerbare Zusammenhang: je höher die Dichte des Stoffes, desto besser leitet er die Wärme weiter. Ein perfektes Material hinsichtlich U-Wert und Speichermasse gibt es demzufolge nicht. Optima werden z.B. durch Mehrschichtigkeit von Bauteilen oder Materialmischungen erreicht.

Entwicklung der baulichen Standards

In Tabelle 48 sind typische Bauweisen für opake Konstruktionen zusammengestellt. Sie entstammen einer Vielzahl von Typologien, z.B. der vom Institut Wohnen und Umwelt in Darmstadt erarbeiteten "Gebäudetypologie Deutschland".

Die tabellierten Angaben gelten für den Wohnbau. Für den Nichtwohnbau gibt es kaum vergleichbare Werte. Es sind jedoch ähnliche Konstruktionen wie im Wohnbau vorhanden: in den Vorkriegsbaujahren regulär mit dickeren Konstruktionen (Tragfähigkeit), bis zur Jahrtausendwende häufig mit etwas geringeren Dämmdicken (insbesondere bei Nutzungen mit geringeren Innentemperaturen) als im Wohnbau.

	Zeitraum	Beschreibung
EFH/ZFH	Fachwerk bis 1918	vielfach örtliche Baumaterialien, Gefache aus Ziegel, Lehm, Strohlehm, regional äußere Verkleidungen (Wetterschutz), Innenputz auf Schilfrohrmatten, Gewölbekeller, Kriechkeller, Steinboden auf Erdreich, Holzbalkendecken mit Füllungen aus Strohlehm, Sand oder Schlacke
	Massiv 1918 bis 1948	kompakte Bauweise, Voll- und Lochziegel mit hoher Rohdichte, auch Sandstein oder tw. Bruchsteinmauerwerk, Kappengewölbe mit oberseitiger Füllung und Dielen, auch Massivdecken aus Stahlstein oder als Stahlbetonrippendecke, Holzbalkendecken mit Füllungen aus Strohlehm, Sand oder Schlacke
	Massiv 1949 bis 1968	vermehrt Erker und Gauben, Mauerwerk diverser Materialien (Hohlblocksteine, Gitterziegel, Porenbeton, Bims), Massivdecken aus Stahlstein oder als Stahlbetonrippendecke mit geringer Dämmung aus Mineralfaser oder Kork sowie schwimmendem Estrich, seltener Holzbalkendecken, Zwischensparrendämmung und Flachdachdämmung geringer Stärken
	Massiv 1969 bis 1983	Mauerwerk aus leichten Ziegeln, Bims, Porenbeton, teilweise Wärmedämmverbundsystem 4...6 cm, Betondecken mit Trittschalldämmung und Estrich, zum Dachgeschoss mit aufliegender Wärmedämmung bis 6 cm, Zwischensparrendämmung geringer Stärken
	Massiv 1984 bis 1995	wie vor, jedoch mit größeren Dämmdicken von 6...10 cm, regional zweischalige Konstruktion mit Klinker
	Holz 1960 bis 1978	Fertighäuser, Holzleichtbauwand mit Mineralfaserdämmung 6...8 cm, unten massive Massivdecken mit geringer Dämmung aus Mineralfaser oder Kork sowie schwimmendem Estrich, oben Holzbalkendecken mit aufliegender Wärmedämmung bis 8 cm, Zwischensparrendämmung ähnlicher Stärke
	Holz 1979 bis 1995	wie vor, jedoch mit größeren Dämmdicken von 8...12 cm, teilweise äußere Verklinkerung oder Putz
MFH	Massiv um 1900	Gründerzeit, oft Stuckverzierung, kompakte Bauweise, Voll- und Lochziegel mit hoher Rohdichte, Kappengewölbe mit oberseitiger Füllung und Dielen, auch Massivdecken aus Stahlstein oder als Stahlbetonrippendecke, Holzbalkendecken mit Füllungen aus Strohlehm, Sand oder Schlacke
	Massiv 1919 bis 1948	einfache Bauweise, teilweise Erker, sonst wenig Schmuckelemente, Voll- und Lochziegel mit hoher Rohdichte, Kappengewölbe mit oberseitiger Füllung und Dielen, auch Massivdecken aus Stahlstein oder als Stahlbetonrippendecke, Holzbalkendecken mit Füllungen aus Strohlehm, Sand oder Schlacke, bei Dachausbauten verputzte Holzwolleleichtbauplatten
	Massiv 1949 bis 1968	sehr große Gebäude, häufig im Original keine Balkone, Mauerwerk diverser Materialien (Hohlblocksteine, Loch- und Gitterziegel, Porenbeton), Massivdecken aus Stahlstein oder als Stahlbetonrippendecke mit geringer Dämmung aus Mineralfaser oder Kork sowie schwimmendem Estrich, seltener Holzbalkendecken, Zwischensparrendämmung und Flachdachdämmung geringer Stärken
	Massiv 1969 bis 1983	Mauerwerk aus Gitter- und Lochziegeln, Porenbeton, Kalksandstein, teilweise Wärmedämmverbundsystem 4...6 cm, Betondecken mit Trittschalldämmung und Estrich, zum Dachgeschoss mit aufliegender Wärmedämmung bis 6 cm, Zwischensparrendämmung geringer Stärken
	Großtafelbau	häufig Hochhäuser, Beton-Fertigteile, häufig mehrschalig, Decken mit schwimmendem Estrich und Trittschalldämmung, Wärmedämmdicken dem sonstigen zeitlichen Baustandard entsprechend

Tabelle 48 Typische Bauweisen für Gebäude [24][44][50]

Tabelle 49 skizziert die Entwicklung der vorgeschriebenen Mindest-Standards in der Zeit nach dem 2. Weltkrieg bis zum Inkrafttreten der Energieeinsparverordnung. In der Baupraxis waren jeweils auch bessere Standards anzutreffen, z.B. mehrschalige Wände mit innenliegender Dämmung in den 1970er Jahren. In den Übergangszeiten nach einer Verschärfung des Standards sind auch schlechtere Standards umgesetzt worden.

Norm/Verordnung	ab	zulässiger U-Wert, in W/(m²K)			
		Wand	Dach	obere Decke	Kellerdecke
DIN 4108	1952	1,56	1,46	0,80	1,01
DIN 4108	1969	1,56	1,10	0,80	1,01
Ergänzung DIN 4108	1974	1,56	0,89	0,68	0,83
Wärmeschutzverordnung	1977	1,06	0,45	0,45	0,80
DIN 4108-2, Wärmeschutzverordnung	1984	0,75	0,30	0,30	0,55
Wärmeschutzverordnung	1995	0,50	0,30	0,30	0,50

Tabelle 49 Mindestanforderungen an den baulichen Wärmeschutz bis zur EnEV [31][eigene]

Nach Inkrafttreten der Energieeinsparverordnung wurden im Neubau keine Einzelanforderungen an Bauteile mehr definiert, sondern Mittelwerte für die gesamte Hülle. Typische heute anzutreffende mittlere U-Werte der gesamten Gebäudehülle liegen im Bereich 0,25 … 0,45 W/(m²K). Der Wert enthält anteilig auch Fenster-U-Werte und Wärmebrückenzuschläge.

Einschätzung bestehender Bauteile

Mit nachfolgenden Grafiken können Bauteilqualitäten näherungsweise eingeschätzt werden. Entsprechende Ablesebeispiele sind zum Verständnis eingetragen.

Bild 40 gibt mit Hilfe eines Zweiquadranten-Diagramms eine Arbeitshilfe zur überschlägigen Bestimmung des U-Wertes. Benötigt wird eine Einschätzung der Dämmstoffdicke sowie die Art der Grundkonstruktion. Wird ein besseres Dämmmaterials gewählt, ergeben sich entsprechend geringere U-Werte in einer detaillierten Berechnung.

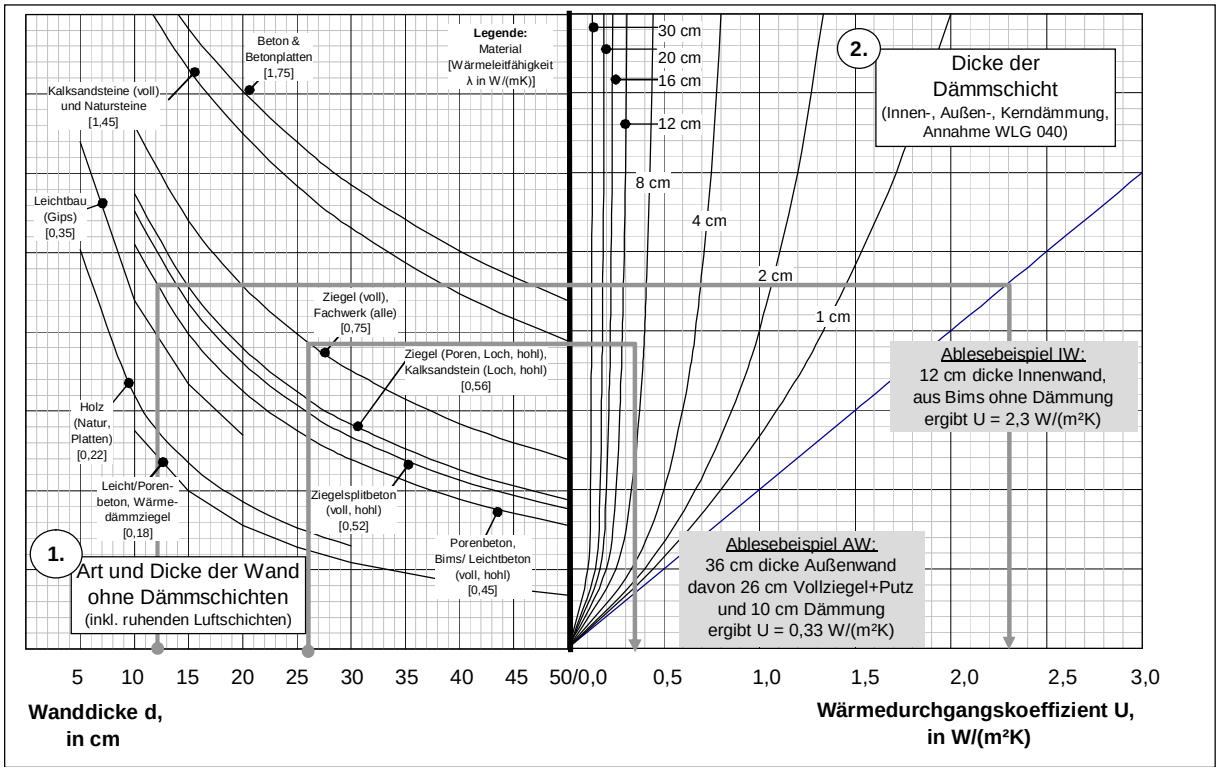


Bild 40 Nomogramm U-Werte für Innen- und Außenwände

Analog der Auftragung für die Außenwände zeigt Bild 41 die Zusammenhänge für Decken und Bodenplatten. Es wird deutlich, dass bei Dämmschichtdicken ab etwa 8 cm die Originalkonstruktion praktisch irrelevant für den U-Wert ist. Ausschlaggebend ist der Widerstand der Dämmschicht.

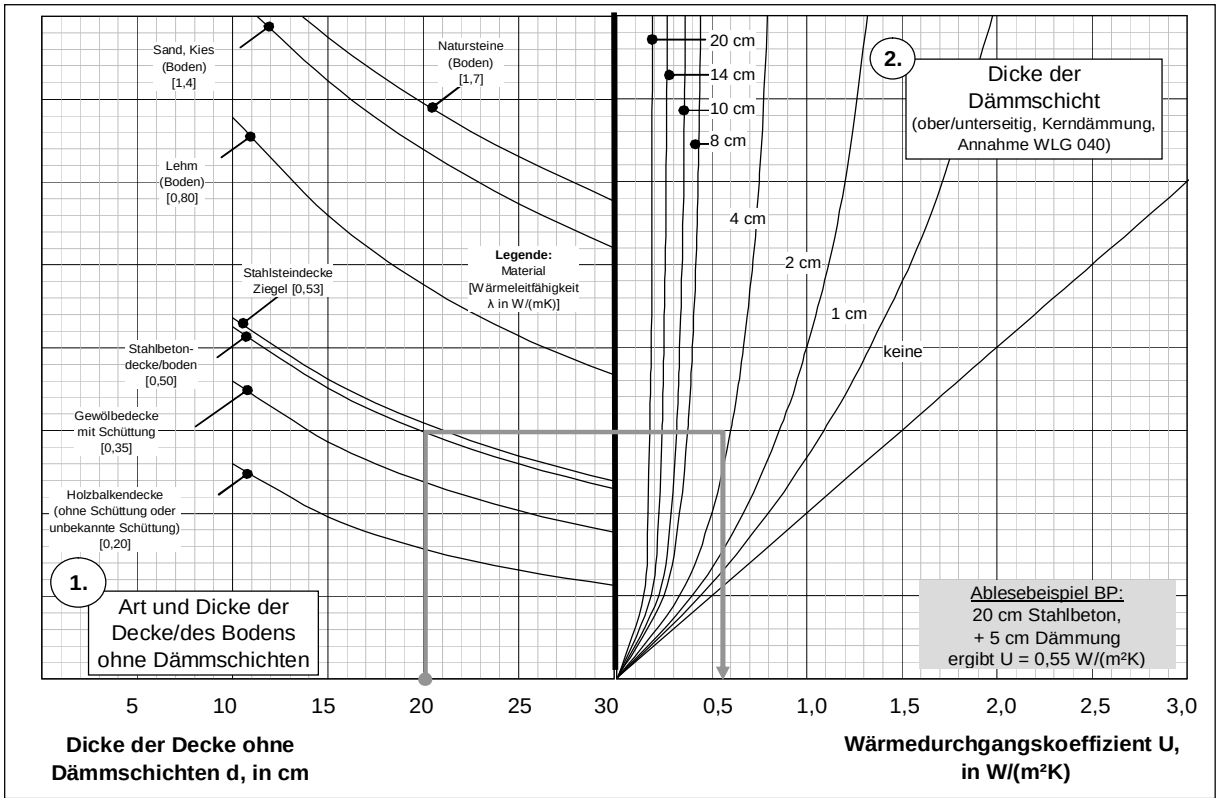


Bild 41 Nomogramm U-Werte für Decken und Bodenplatten

Bei älteren Dachkonstruktionen sind Dämmschichten oft nicht vollflächig vorhanden. Den gedämmten Gefachbereichen stehen ungedämmte Sparrenbereiche gegenüber. Es bietet sich dann zur vereinfachten Abschätzung des U-Wertes an, eine Gewichtung beider Anteile vorzunehmen und eine entsprechend dünnere vollflächige Dämmschicht ersatzweise anzusetzen. Bild 42 erläutert das Vorgehen im Ablesebeispiel.

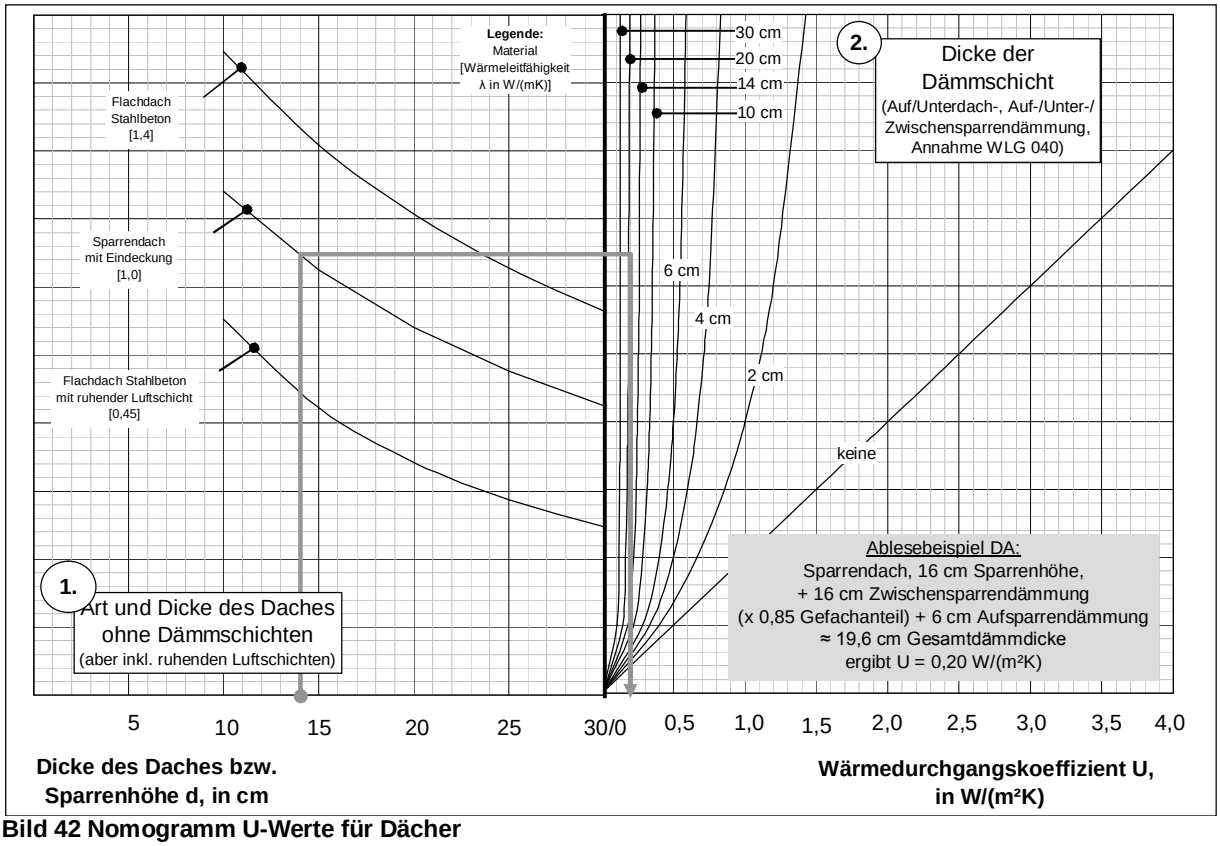


Bild 42 Nomogramm U-Werte für Dächer

Allen Nomogrammen ist anzumerken: es handelt sich um vereinfachte U-Wert-Berechnungen. Die sich daraus ergebenden Fehler sind für den Baubestand zu tolerieren, wenn durch eine Begehung vor Ort ohnehin keine konkreten Materialeigenschaften bzw. Schichtdicken mehr festzustellen sind.

Außerdem gilt: maßgeblich für den U-Wert sind die Dämmschichten. Der U-Wert nach der Dämmung wird – bei der Energiekonzepterstellung – sehr genau bestimmt.

Die DIN EN ISO 6946 beschreibt das korrekte Rechenverfahren, welches unter Verwendung von Bemessungswerten der einzelnen Baustoffe im Neubau die korrekten U-Werte liefert.

Gesamtkennwerte für die bauliche Hülle

Auf Basis der für die Baualtersklassen typischen Konstruktionen ergeben sich die in Tabelle 50 zusammengestellten U-Werte für einzelne Hüllbestandteile im Wohnungsbau – im unsanierten Originalzustand, der in vielen der ganz alten Gebäuden jedoch heute nicht mehr vorliegt.

Der als Gebäudemittelwert für den Wohnbau angegebene Wert H_T' enthält anteilig auch die U-Werte der Fenster, die jedoch nicht schlechter als 2,7 W/(m²K) für alle Baujahre vor 1984 angesetzt wurden. Des Weiteren ist der Einfluss von Wärmebrücken einbezogen sowie die abweichenden Temperaturen auf der Rückseite der betreffenden Bauteile.

In der Praxis werden selten mittlere Wärmedurchgangskoeffizienten bzw. H_T'-Werte der Gebäudehülle oberhalb etwa 1,2 W/(m²K) vorgefunden, da meist heute eine Teilmodernisierung – vor allem bei Decken und Dächern – vorliegt. Wenn ein Gebäude vollmodernisiert ist, zählt es zu dem Baustandard, welcher bei der Modernisierung erreicht wurde.

Eine Erhebung der Bauteilqualitäten am realen Objekt ist auf jeden Fall anzustreben, wenn Praxisprojekte bearbeitet werden – sei es durch Messung (Kapitel 4.3.2), Berechnung oder Bestimmung über Literatur. Die tabellierten Werte können dann als Vergleichswerte verwendet werden.

in [W/m²K)]	vor '49	'49 – '57	'58 – '77	'78 – '83	'84 – '94	'95 – '08	'09 – '15	Passiv
Dach	2,00...1,00	1,80...0,90	1,50...0,50	0,70...0,40	0,50...0,30	0,30...0,20	0,25...0,15	0,10
obere Decken	1,30...1,00	2,00...1,30	1,10...0,50	0,70...0,40	0,50...0,30	0,40...0,25	0,30...0,20	0,15...0,10
Wände	1,60...1,00	1,60...1,00	1,60...1,00	1,25...0,75	1,10...0,50	0,50...0,30	0,40...0,25	0,15...0,10
Kellerdecken	1,40...0,90	1,50...1,00	1,00...0,70	0,90...0,60	0,70...0,50	0,40...0,30	0,30...0,20	0,15...0,10
Böden	2,00...1,00	2,00...1,00	1,20...0,80	0,90...0,70	0,70...0,50	0,40...0,30	0,30...0,20	0,15...0,10
H_T'	1,70...1,30	1,60...1,30	1,50...1,20	1,20...1,00	0,90...0,70	0,60...0,50	0,50...0,40	0,30...0,25

Tabelle 50 Typische U-Werte für die Gebäudehülle [24][44][50]

Der Transmissionswärmebedarf eines Gebäudes Q_T [kWh/a] hängt von der Gradtagszahl Gt [kKh/a] sowie dem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten aller Umschließungsflächen des Gebäudes U_m bzw. H_T' [W/(m²K)] und der Größe der wärmeübertragenden Hüllfläche A [m²] ab. Die Gebäudeeigenschaft $H_T' \cdot A$ kann als spezifische Transmissionsheizlast H_T [W/K] zusammengefasst werden.

$$Q_T = H_T \cdot Gt \qquad \text{mit} \qquad H_T = H_T' \cdot A_{Hülle} = \sum (U \cdot A \cdot F_x) + H_{WB}$$

Ein wohnflächenbezogener Transmissionswärmeverlust q_T [kWh/(m²a)] ergibt sich aus dem Wert für H_T' sowie der Gradtagszahl (siehe Kapitel 3.3.1) und einem dimensionslosen Kompaktheitsgrad A/A_{Wohn} (siehe Kapitel 3.4.1).

$$q_T = \frac{Q_T}{A_{Wohn}} = \frac{H_T}{A_{Wohn}} \cdot Gt = H_T' \cdot \frac{A}{A_{Wohn}} \cdot Gt$$

Als Beispiel für einen typischen Wohnbau von 1980 ergibt sich: aus einer Gradtagszahl von 84 kKh/a, einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Hülle von 0,8 W/(m²K) sowie einer wohnflächenbezogenen Kompaktheit von 1,7 m²/m² (Mehrfamilienhaus) liegt der Transmissionswärmeverlust bei:

$$q_T = 0{,}8\frac{W}{m^2K}\cdot 1{,}7\frac{m^2}{m^2}\cdot 84\frac{kKh}{a} = 114\frac{kWh}{m^2a}$$

Temperaturkorrekturfaktoren

Bei der Berechnung der Transmissionswärmeströme gilt prinzipiell für jede Einzelfläche eine spezielle Temperaturdifferenz, abhängig von der rückseitigen Temperatur (Keller, Erdreich, anderes Gebäude usw.), d.h. die Gradtagszahl variiert streng genommen. Allerdings hat es sich durchgesetzt, Gradtagszahlen anhand der Außentemperatur zu bilden (siehe Kapitel 3.3.1).

Das übliche Regelwerk führt daher einen dimensionslosen Temperaturkorrekturfaktor F_x ein. Er drückt aus, dass für die betrachtete Teilfläche eine andere Temperaturdifferenz gilt als die Differenz zwischen Innentemperatur ϑ_i und Außenlufttemperatur ϑ_e, die in der Gradtagszahl enthalten ist.

Typische F_x-Werte sind in sehr grober Zusammenstellung im 'Energiepass Heizung/Warmwasser" vom IWU enthalten [51]. Es gibt auch sehr feinteilige Übersichten, insbesondere für erdreichberührte Flächen, z.B. in der DIN V 18599 [13].

Beschreibung der Bauteilsituation		F_x in [-]
Bauteile an Außenluft		1,0
Boden zum aufgeständerten Fußboden		0,9
Wände, Decken, Türen an unbeheizten Dachraum, Abseiten im Dach		0,8
Wände, Decken, Türen an Wintergärten aus Isolierglas usw.		0,7
Wände, Decken, Türen gegen den unbeheizten Keller	gut gedämmte Bauteile	0,65...0,85
	schlecht gedämmte Bauteile	0,45...0,75
Wände und Boden des beheizten Kellers gegen Erdreich	gut gedämmte Bauteile	0,60...0,80
	schlecht gedämmte Bauteile	0,30...0,55
Boden an Erdreich eines nicht unterkellerten Gebäudes	gut gedämmte Bauteile	0,55...0,65
	schlecht gedämmte Bauteile	0,30...0,40
Wände, Decken, Türen an unbeheizte Treppenräume, Garagen, Wintergärten aus Wärmeschutzglas usw.		0,5
Bauteile gegen gleich warme Bereiche		0,0

Tabelle 51 Typische Temperaturkorrekturfaktoren [13][14][51]

Der Korrekturfaktor F_x kann auch individuell bestimmt werden. Es wird dazu die Temperatur hinter der Fläche ϑ_x benötigt. werden die mittlere Innen- und Außentemperatur eingesetzt, die bei der Berechnung der Gradtagszahl zu Einsatz kommen. Die typischen Werte für F_x der Tabelle 51 können anhand des Ansatzes auch zurück gerechnet werden. Es gilt:

$$F_x = \frac{\vartheta_i - \vartheta_x}{\vartheta_i - \vartheta_{a,m}}.$$

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Die wärmeübertragende Gebäudehülle des Bestandes kann in ihrer Gesamtheit erfasst werden, d.h. über einen mittleren U-Wert bzw. den bezogenen Transmissionsverlust H_T'. Dazu eignet sich die Auswertung von Messwerten, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben.

Das Energieanalyseverfahren liefert einen gemessenen Summenwert H für die bezogene Transmissions- H_T und Lüftungsheizlast H_V. Davon wird der Anteil für die Lüftung rechnerisch abgezogen. Benötigt werden dazu Annahmen zum Luftwechsel n sowie Luftvolumen V und die Gesamtfläche der wärmeübertragenden Bauteile A.

$$H_T' = \frac{H - n \cdot V \cdot 0{,}34 \frac{Wh}{m^3 K}}{A}$$

Das Ergebnis kann verwendet werden, um das Gebäude hinsichtlich seiner Bauteilqualität einzuschätzen. Es kann auch Grundlage für näherungsweise Einsparberechnungen sein.

Für die Abschätzung der U-Werte einzelner Bauteile kommen verschiedene Methoden in Frage:

- Analyse von Materialproben und anschließende Berechnung eines U-Wertes (meist unrealistisch teuer, zumal nicht zerstörungsfrei)
- Messungen mit Wärmestrommessplatten (mindestens einwöchige Messungen, um Ein- und Ausspeicherungseffekte zu minimieren, nur für Bauteile, bei denen auf beiden Seiten eine Messsonde platziert werden kann)
- Abschätzungen über Typologien (baualterstypische Materialien eingrenzen) in Kombination mit Befragungen (Farbe des Bohrstaubs), kleineren Bohrungen (Schichtdickenbestimmung) oder Bauendoskopie (Füllmaterialien in Hohlräumen bestimmen).

Thermografien sind dazu eher ungeeignet. Sie zeigen in einer Momentaufnahme die Oberflächentemperaturen und damit auch Schwachstellen deutlich. Allerdings lassen sich nur stark fehlerbehaftet absolute Werte daraus generieren.

Einsparpotentiale

Einsparpotentiale an der Gebäudehülle sind im Bestand groß. Allerdings führen entsprechende Dämmmaßnahmen zu vergleichsweise hohen Investitionskosten. Unter den Dämmmaßnahmen lässt sich folgende Reihenfolge bilden, wenn es um die Kosten-Nutzen-Analyse bzw. Amortisation geht, beginnend beim erfolgversprechendsten Bauteil:

- obere Geschossdecke incl. Abseiten-, Innenwände, Innentüren oder Bodenluken zum unbeheizten Bereich,
- Kellerdecke, incl. Innenwände und -türen des Kellerabgangs,
- Außenwände mit Außendämmung,
- Steildachflächen über beheizten Räumen,
- Außenwände mit Innendämmung,
- Flachdachflächen über beheizten Räumen,
- Seitenwände des beheizten Kellers mit Außendämmung,
- Bodenplatten auf dem Erdreich unter beheizten Räumen.

Der Aufwand der Umsetzung steigt nach unten an. Vor allem bei Maßnahmen, die von der genutzten Seite der Räume aus erfolgen (Innendämmung der Außenwand, Dämmen von Bodenplatten) sind größere logistische Planungen erforderlich.

Insgesamt ist festzustellen, dass in Gebäuden mit normalen Luftwechseln und geringem bis mittlerem Warmwasserbedarf – Wohngebäude, Büros, Bibliotheken, Schulen usw. – die Transmission den größten Bilanzanteil der Wärmeenergien ausmacht. Geringere Effekte ergeben sich in Gebäuden mit großen inneren Gewinnen und Lüftungswärmeverlusten – Produktionsstätten, Läden.

Zur Abschätzung des Effektes einer Vollmodernisierung soll das o. g. Mehrfamilienhausbeispiel (siehe Tabelle 50) wieder aufgegriffen werden. Der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient der Hülle bzw. bezogene Transmissionswärmeverlust lag bei H_T' = 0,8 W/(m²K) vor der Modernisierung. Unter Annahme einer Vollmodernisierung aller Hüllbauteile mit im Schnitt 10 cm (Fenster ausgenommen, Restflächen ca. 12 … 16 cm) liefert Bild 43 einen verbesserten U-Wert von 0,25 W/(m²K). Er wird stellvertretend für alle Hüllbauteile als neuer H_T'-Wert angesetzt.

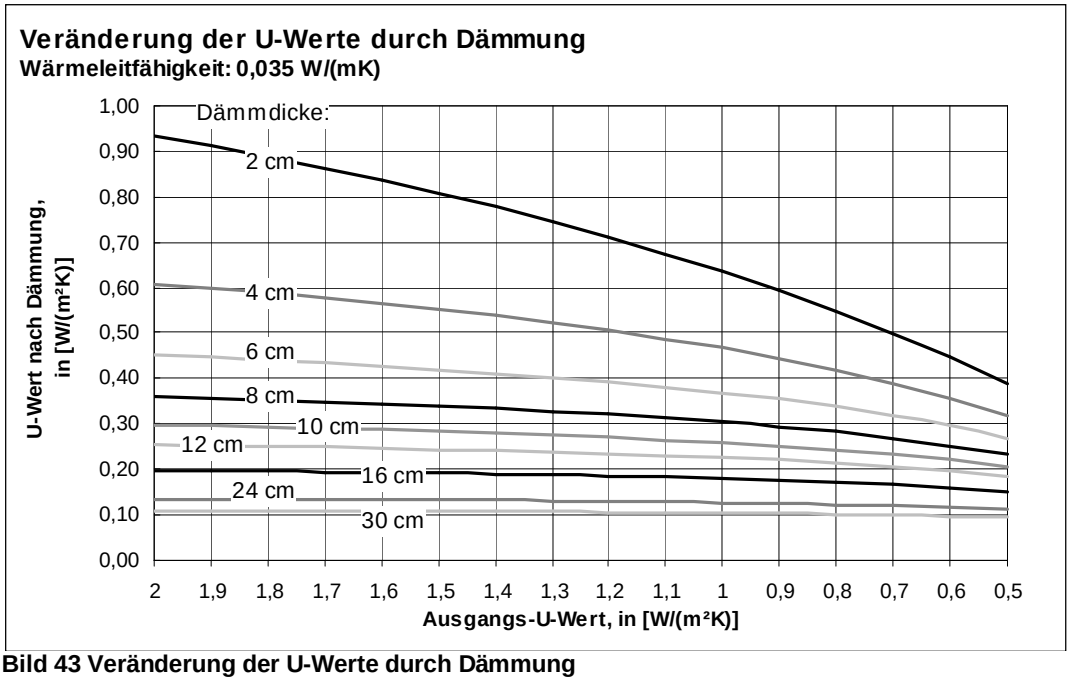


Bild 43 Veränderung der U-Werte durch Dämmung

Die Transmissionswärmeverluste sinken von 114 kWh/(m²a) auf 36 kWh/(m²a). Das ist etwa ⅓ des Ausgangswertes.

$$q_T = 0{,}25 \frac{W}{m^2 K} \cdot 1{,}7 \frac{m^2}{m^2} \cdot 84 \frac{kKh}{a} = 36 \frac{kWh}{m^2 a}$$

In Wohnbauten kann angenähert festgestellt werden, dass die Transmissionswärmeverluste in etwa dem Heizwärmebedarf entsprechen. Daher führt diese Verbesserungsmaßnahme hier zu etwa ⅔ Einsparung an Heizenergie (Warmwassermengen bleiben unberücksichtigt).

3.4.3 Transparente Bauteile

Ein transparentes Bauteil (Fenster, Fenstertür) wirkt vielfältig auf die Energiebilanz. Es ist:

- Teil der wärmeübertragenden Umfassungsfläche und damit Teil der Transmissionswärmeströme (Winter: Wärmeströme von innen nach außen, Sommer: je nach Temperaturdifferenz ggf. anders herum gerichtet),
- durchlässig für Sonnenstrahlung (von außen nach innen) und in geringerem Maße auch für Rückstrahlung aus dem Raum, somit ein Element für passive Gewinne,
- durchlässig für das Strahlungsspektrum des Tageslichtes und daher an der Bilanzierung der Energiemengen für Kunstlicht indirekt beteiligt.

Der Wärmedurchgangskoeffizient von Fenstern ergibt sich nach DIN EN ISO 10077-1 bzw. DIN 4108-4. Berücksichtigt werden Verglasung und Rahmen (flächenanteilig), Randverbund und falls vorhanden Sprossen (oder andere Fensterteilungen).

Entwicklung der baulichen Standards

Tabelle 52 skizziert die Entwicklung der vorgeschriebenen Mindest-Standards in der Zeit nach dem 2. Weltkrieg bis zum Inkrafttreten der Energieeinsparverordnung. In der Baupraxis waren jeweils auch bessere Standards anzutreffen, z.B. Kastenfenster Anfang der 1950er Jahre. In den Übergangszeiten nach einer Verschärfung des Standards sind auch schlechtere Standards umgesetzt worden.

Norm/Verordnung	ab	zulässige U-Werte, in W/(m²K)
DIN 4108	1952	5,2 (keine Festlegung, üblicher Standard)
DIN 4108	1969	
Ergänzung DIN 4108	1974	3,5 (Doppel- oder Verbundfenster empfohlen)
Wärmeschutzverordnung	1977	3,5
DIN 4108-2, Wärmeschutzverordnung	1984	3,1
Wärmeschutzverordnung	1995	1,8

Tabelle 52 Mindestanforderungen an den baulichen Wärmeschutz bis zur EnEV [31][eigene]

Mit der Wärmeschutzverordnung von 1995 wurde Wärmeschutzverglasung zum Standard. Derzeit werden Fenster mit U-Werte zwischen 1,3 W/(m²K) – Referenz-U-Wert der EnEV – bis unter 0,8 W/(m²K) als Passivhausstandard verwendet.

Einschätzung des U-Wertes

Der Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m²K)] eines Fensters ist im Wesentlichen relevant für den winterlichen Wärmeschutz. Jedoch tragen geringe U-Werte der Fenster auch im Sommer dazu bei, die Transmission in den Raum zu begrenzen.

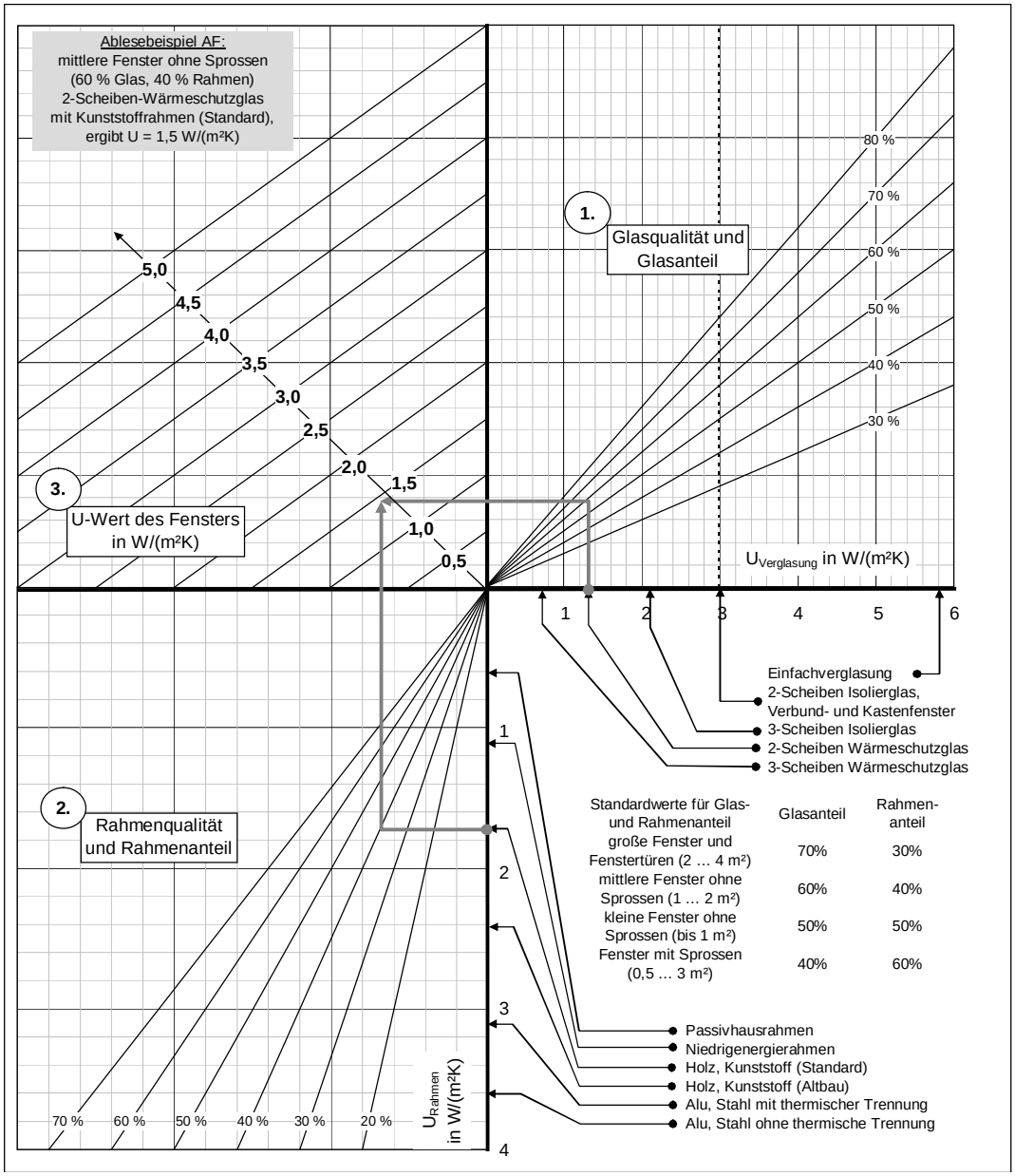


Bild 44 Nomogramm U-Werte für Fenster- und Fenstertüren

Bild 44 gibt mit Hilfe eines Dreiquadranten-Diagramms eine Arbeitshilfe zur überschlägigen Bestimmung des U-Wertes. Benötigt wird eine Einschätzung zu Glas- und Rahmenanteil, die Qualität des Glases und des Rahmens.

Anhand üblicher Fenstergrößen und Konstellationen von Rahmen und Verglasung lassen sich typische Werte ableiten, siehe Tabelle 53.

Verglasung	Rahmen	U, in [W/(m²K)]
Einfachverglasung	Holz-/Kunststoffrahmen	3,5...5,0
2-Scheiben-Isolierverglasung	Holz-/Kunststoffrahmen, auch Verbund- und Kastenfenster	2,6...3,0
	Metall-/Betonprofilrahmen	3,2...4,3
3-Scheiben-Isolierverglasung	Holz-/Kunststoffrahmen, auch Verbundfenster	2,0...2,4
2-Scheiben-Wärmeschutzglas	Holz-/Kunststoffrahmen	1,1...1,9
	Metallprofilrahmen	1,5...2,3
3-Scheiben-Wärmeschutzglas	Holz-/Kunststoffrahmen	0,7...1,3

Tabelle 53 Typische Wärmedurchgangskoeffizienten für Fenster [13][44][50][51][52]

Die jeweils angegebene Spanne für den Wärmedurchgangskoeffizienten ergibt sich aus dem technischen Fortschritt. Die ersten Modelle einer 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung Mitte der 1990er Jahre wiesen U-Werte um 1,9 W/(m²K) auf, während heute verfügbare Fenster dieser Bauart auch den Wert 1,1 W/(m²K) haben können.

Einschätzung des Energiedurchlassgrades

Der Gesamtenergiedurchlassgrad g [einheitenlos] eines Fensters beeinflusst die winterliche und sommerliche Strahlungsbilanz. Der Wert gibt für die Verglasung an, welcher Anteil an Strahlung im gesamten Wellenlängenspektrum hindurchgelassen wird. Der g-Wert erlaubt daher keinen direkten Rückschluss auf die Tageslichtnutzung.

Je größer der Wert, desto ungünstiger für die sommerliche und günstiger für die winterliche Energiebilanz. Die zu 1,0 fehlenden Anteile an Strahlung werden an der Scheibe reflektiert bzw. absorbiert und nach außen abgegeben. Eine Verringerung des g-Wertes ergibt sich bei einer Vergrößerung der Scheibenanzahl, bei dickeren Glasscheiben und durch Anordnung von Beschichtungen auf Scheibenoberflächen (Metalloxidschichten, Halbleiterschichten). Zu unterscheiden sind:

- Sonnenschutzverglasung: Beschichtung auf der äußeren Scheibe; Beschichtung mit Stoffen, die kurzwellige Sonnenstrahlung nach außen zurück reflektieren; auch Varianten mit getönten Gläsern sind am Markt
- Wärmeschutzverglasung: Beschichtung auf der inneren Scheibe; Beschichtung mit Stoffen, die kurzwellige Sonnenstrahlung von außen nach innen durchlassen und langwellige Strahlung nach innen zurück reflektieren

In beiden Fällen ist zur Erhöhung der Langlebigkeit der Beschichtung diese jeweils auf der dem Scheibenzwischenraum zugewandten Seite angebracht.

Bauart	Verglasung	g, in [-]
ältere Verglasungen ohne Sonderfunktionen	Einfachverglasung	0,80...0,87
	2-Scheiben-Isolierverglasung, auch Verbundfenster und Kastenfenster	0,65...0,78
	3-Scheiben-Isolierverglasung, auch Verbundfenster	0,60...0,70
Wärmeschutzverglasung	2-Scheiben-Wärmeschutzglas	0,60...0,70
	3-Scheiben-Wärmeschutzglas	0,50...0,55
Sonnenschutzverglasung	2-Scheiben-Sonnenschutzglas	0,25...0,48
	3-Scheiben-Sonnenschutzglas	0,16...0,34
	schaltbare Verglasung	0,20...0,45
Sonderbauarten	Lichtkuppeln/Lichtbänder	0,55...0,65
	Glasbausteine/Drahtglas	0,60

Tabelle 54 Typische Gesamtenergiedurchlassgrade für Fenster [13][44][50][51][52]

Strahlungsbilanz

Als solare Fremdwärme Q_S [kWh/a] berücksichtigen die eingeführten Energiebilanzverfahren in jedem Fall den Strahlungsdurchtritt durch transparente Flächen; seltener auch zusätzlich die Einstrahlung auf nichttransparente (opake) Flächen.

Die Strahlungsenergiemenge hängt vom Strahlungsangebot ab, welches nach Himmelsrichtung und Neigung verschieden ist. Die Strahlung kann als Strahlungsleistungsdichte I [W/m²] bzw. summierte Energiemenge in einem Zeitraum G [kWh/(m²a)] angegeben werden – jeweils bezogen auf die (von außen) bestrahlte Fläche, siehe Kapitel 3.3.3.

$$Q_S = \sum (I \cdot g \cdot A \cdot \Pi F_i) \cdot t = \sum (G \cdot g \cdot A_F \cdot \Pi F_i)$$

Die üblichen Bedarfsbilanzen verwenden zur Berechnung die Rohbauöffnungsmaße der Fenster und ggf. Türen A_F [m²]. Der tatsächliche Glasanteil des Bauteils ist geringer, was durch einen Korrekturfaktor (Glasanteil) berücksichtigt wird. Ebenfalls korrigiert werden Phänomene wie Verschattung (natürlich und durch Verschattungseinrichtungen) von Glasflächen, Verschmutzung, Reflexion an Scheiben. Es kommt für alle genannten Effekte ein Produkt diverser Korrekturen ΠF_i zum Einsatz. Je nach Rechenverfahren werden Gesamtwerte von 0,36 [51] bis 0,567 [14] in der Literatur als typisch angegeben.

Für die Bewertung von Wohnbauten lassen sich typische Werte für die passiven Solarstrahlungsgewinne in der Heizperiode abschätzen. Ein wohnflächenbezogener solarer Fremdwärmeanfall q_S [kWh/(m²a)] ergibt sich durch Bezug auf die Wohnfläche.

$$q_S = \frac{Q_S}{A_{Wohn}} \approx \frac{A_F}{A_{Wohn}} \cdot G_{mittel} \cdot g \cdot \Pi F_i$$

Die Bestimmungsgleichung lässt sich umformen. Es wird erkennbar, dass der Fensterflächenanteil A_F/A_{Wohn} relevant für das Ergebnis ist.

Tabelle 55 gibt typische zu erwartende solare Fremdwärmemengen an. Die Werte sind auf die Wohnfläche A_{Wohn} bezogen. Baustandard und Nutzungsintensität bestimmen die Heizgrenze und damit die Länge der Heizperiode und das solare Strahlungsangebot G. Der Modernisierungsgrad (der Fenster) bestimmt deren Energiedurchlassgrad g.

Baustandard	**vor WSchV77, WSchV77-84**	**vor WSchV77, WSchV77-84**	**WSchV95, EnEV02-14**	**Niedrigenergie-, Passivhaus**
Nutzungsintensität	normal	gering	normal	normal
ϑ_{HG} [°C]	17...15	15...12	ca. 15	ca. 12
G [kWh/(m²a)]	380...330	350...280	300...250	270...220
Modernisierung	keine...geringe	gering...mittel	keine	keine
g [-]	0,75...0,65	0,70...0,60	0,65...0,55	0,55...0,45
q_S [kWh/(m²a)]	22...17	18...12	15...11	12...8

Tabelle 55 Typische wohnflächenbezogene Solarstrahlungsgewinne in der Heizperiode

Die Werte gelten für typische Fensterflächenanteile von $A_F/A_{Wohn} \approx 0{,}15 \ldots 0{,}20$. Der zusammengefasste Korrekturfaktor für Verschattung, Verschmutzung, nichtsenkrechten Lichteinfall und Rahmenanteil beträgt $\Pi F_i \approx 0{,}4$.

Wirkung von Verschattungsmaßnahmen

Zusätzlich zur natürlichen Verschattung der transparenten Flächen durch Nachbarbebauung, Bäume, auskragende Balkone o. ä. lassen sich Fenster auch zusätzlich direkt verschatten. Dies kann auch aus Gründen des Blendschutzes erfolgen. Der energetische Einfluss hängt

stark vom Nutzereingriff ab. Die DIN V 18599 gibt dennoch typische Werte für g_{tot} an. Tabelle 56 zeigt einen Ausschnitt der Kennwerte.

g_{tot} [-]	außenliegender Sonnenschutz			innenliegender Sonnenschutz	
	Jalousie	Markise	geschlossener Rollladen	Jalousie	Textilrollo
2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung	0,07...0,12	0,13...0,21	0,13...0,17	0,42...0,58	0,40...0,45
3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung	0,05...0,09	0,10...0,17	0,10...0,13	0,38...0,48	0,37...0,40
2-Scheiben-Sonnenschutzverglasung	0,05...0,09	0,09...0,14	0,09...0,11	0,23...0,34	0,23...0,30
3-Scheiben-Sonnenschutzverglasung	0,04...0,06	0,07...0,10	0,07...0,08	0,21...0,23	0,20...0, 21

Tabelle 56 Typische Gesamtenergiedurchlassgrade für Fenster mit Sonnenschutzmaßnahmen [13]

Es ist erkennbar, dass der Energiedurchlassgrad des Fensters eine – wenn auch untergeordnete – Rolle spielt sowie die Frage der Anordnung der Sonnenschutzvorrichtung.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Die grundsätzliche Beschaffenheit des Rahmens (Holz, Kunststoff, Metall) sollte erkennbar sein. Innenliegende Luftkammern oder Dämmstofffüllungen sind nur zu vermuten. In Fenstern (Randverbund) eingeprägte Qualitätsangaben sind üblicherweise Werte ausschließlich für die Verglasung. Eine Wärmeschutz- oder Sonnenschutzbeschichtung lässt sich alternativ mithilfe eines Feuerzeugs feststellen. Die bedampfte Scheibe ist anhand einer anderen Reflexionsfarbe (Blau, Grün, Violett) der sich spiegelnden Flamme zu erkennen. Ob es sich um Sonnen- oder Wärmeschutzglas handelt, ergibt sich aus der Lage der Beschichtung.

Hinsichtlich der Feststellung von g-Werten (im Sonderfall g_{tot}-Werten incl. Sonnenschutz) ist es üblich, nur qualitative Einschätzungen vorzunehmen. Rahmenanteile können im Einzelfall gemessen bzw. berechnet werden.

Einsparpotentiale

Im Wohnungsbaubestand sind Fenster netto (Transmissionsverluste und Solargewinne verrechnet) für etwa 15 … 20 % der Endenergie verantwortlich. Ihre Bedeutung steigt anteilig mit besserem Baustandard.

Eine Fenstermodernisierung ergibt energetisch Vorteile bei Gebäuden mit großen Fensterflächenanteilen in der Fassade. Verallgemeinern lässt sich jedoch:

- Fenstermodernisierungen weisen verglichen mit anderen baulichen Verbesserungen eher schlechte Kosten-Nutzen-Verhältnisse auf. Dies bedeutet keine generelle Unwirtschaftlichkeit, jedoch in der Regel lange Amortisationszeiten.
- bei Fenstermodernisierungen verbessern sich in der Regel die U-Werte, jedoch verschlechtern sich die g-Werte; in der Gesamtbilanz kann festgehalten werden, dass die Nachteile der geringe Solargewinne (Winterhalbjahr) von den Vorteilen der geringeren Transmission mehr als aufgewogen werden.

3.4.4 Wärmebrücken

Wärmebrücken entstehen in Bereichen der Gebäudehülle, die einen anderen Wärmedurchfluss als ihre umgebenden Bauteile verzeichnen. Es handelt sich um Störungen des Wärmeflusses, meist hin zu größeren Werten. Die umgebenden Bauteile werden daher oft als 'ungestörte Bereiche' begrifflich abgegrenzt. Es ergeben sich aufgrund der abweichenden Wärmeströme in diesen Bereichen andere Oberflächentemperaturen (evtl. Tauwasserbildung, Schimmelbildung) und meist zusätzliche Wärmeverluste.

Wärmebrücken werden unterschieden in:

- geometrisch bedingte Wärmebrücken (der wärmezuströmenden Fläche steht eine abweichend große wärmeabströmende Fläche gegenüber), z.B. an Gebäudeecken, Bodenkanten, Ortgang, Traufe, First,
- materialbedingte Wärmebrücken (lokal unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten), z.B. Betonstürze, Stützen, thermisch nicht entkoppelte Balkon- und Terrassenplatten, Vordächer, Fensterleibung, Befestigungsanker und -dübel.

Wärmebrücken sind i. A. keine Flächen in der Konstruktion, sondern linien- oder punktförmige Bereiche. Flächen mit abweichender Konstruktion (Heizkörpernischen, Rollladenkästen) werden regulär anhand eines eigenen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert, siehe Kapitel 3.4.2 und 0) bei der Energiebilanz bewertet.

Energetische Bewertung von Wärmebrücken

Wärmebrücken werden in allen gängigen Bedarfsbilanzen rechnerisch berücksichtigt. Die Bewertungsgröße H_{WB} [W/K] ist ein Zuschlag auf die sonstigen Transmissionswärmeströme der ungestörten Regelflächen. Berücksichtigt werden sie

- pauschal über flächenbezogene Zuschläge ΔU_{WB} [W/(m²K)], welche auf die gesamte wärmeübertragende Fläche $A_{Hülle}$ [m²] angesetzt werden,
- detailliert als Summenprodukte der längenbezogenen Wärmeverlusten Ψ [W/(m·K)] und entsprechenden Lauflängen L [m] bzw. der punktförmigen Wärmeverluste χ [W/(z·K)] und zugehörigen Stückzahlen [z].

Punkt- oder linienförmige Wärmeverluste werden in Simulationsverfahren bestimmt. Es gibt zusätzlich zahlreiche Einzelveröffentlichungen verschiedener Hersteller mit Katalogen spezieller Details. DIN 4108 Beiblatt 2 [11] liefert einen Katalog mit Kennwerten für typische Wärmebrückensituationen. Auf diesen Katalog wird in allen gängigen Energiebedarfsbilanzen zurückgegriffen.

Die DIN V 18599 [13] beschreibt die Vorgehensweise bei der Berechnung der Transmission unter Rückgriff auf DIN 4108 Beiblatt 2, siehe Tabelle 57. Alternativ ist die detaillierte Berechnung möglich.

pauschaler Zuschlag	Beschreibung
ΔU_{WB} = 0,10 W/(m²K)	allgemeiner Zuschlag
ΔU_{WB} = 0,15 W/(m²K)	Zuschlag bei Außenkonstruktion mit innenliegender Dämmschicht und einbindenden Massivdecken
ΔU_{WB} = 0,03 W/(m²K)	Zuschlag, wenn für alle Anschlüsse die Merkmale und Kriterien nach Kategorie B der DIN 4108 Beiblatt 2 eingehalten sind (oder eine Gleichwertigkeit nachgewiesen ist)
ΔU_{WB} = 0,05 W/(m²K)	Zuschlag, wenn für alle Anschlüsse die Merkmale und Kriterien der DIN 4108 Beiblatt 2 eingehalten sind (oder eine Gleichwertigkeit nachgewiesen ist), jedoch nicht vollständig die Kategorie B

Tabelle 57 Pauschale Wärmebrückenzuschläge [13]

Konsequenzen der Maßbezüge

Wärmebrückenzuschläge für Einzelsituationen Ψ bzw. auch Gesamtzuschläge ΔU_{WB} können rechnerisch positive oder negative Werte aufweisen. Positive Werte stehen dabei für zusätzliche Wärmeströme gegenüber den ungestörten Regelflächen, negative entsprechend umgekehrt. Dieses Phänomen ist vor allem begründet durch das in Deutschland übliche Maßsystem. Zur Erläuterung der Problematik anhand einer Außenecke (geometrische Wärmebrücke) dient Bild 45. Zahlenwerte sind beispielhaft und können einer Simulation entstammen.

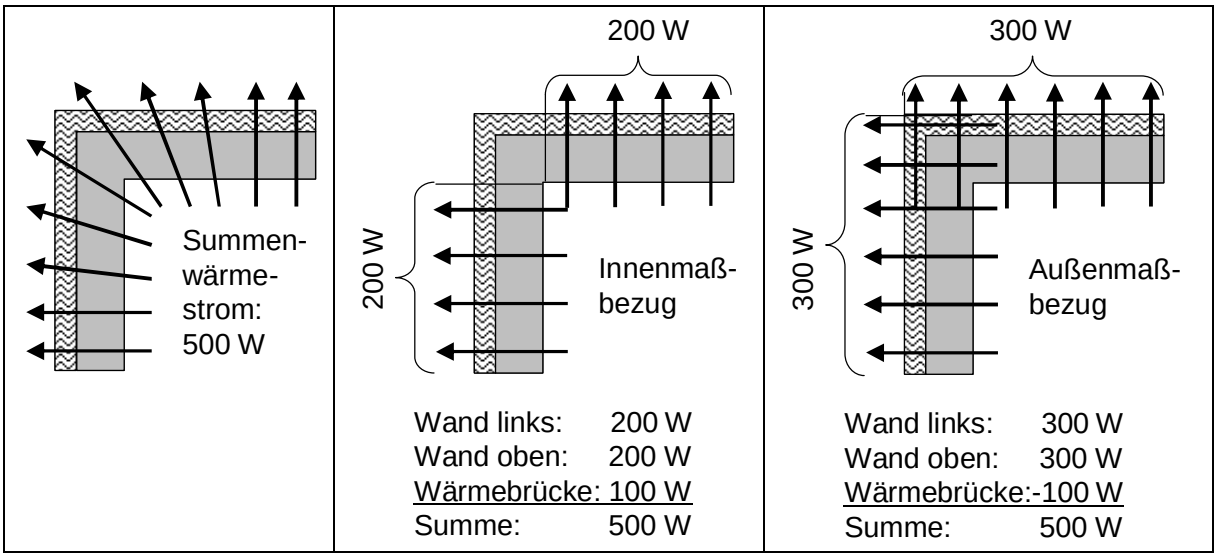


Bild 45 Bewertungsprinzip für Wärmebrücken abhängig vom Maßbezug

Zunächst ist festzuhalten, dass an der Gebäudeecke der Innenoberfläche eine größere Außenoberfläche gegenüber steht. In dieser Konstellation ergibt sich eine Unterkühlung der Oberflächentemperatur auf der Innenoberfläche – verglichen mit den Oberflächen auf der ungestörten Wand (mit entsprechendem Abstand zur Ecke).

Würde als 'ungestörte Regelfläche' jeweils die Innenwand bis zur Ecke definiert, bleibt rechnerisch ein Wärmestrom von 100 W übrig, der als positiver (zusätzlicher) Wärmebrückenzuschlag für den Verlust über die Ecke anzusetzen wäre.

In Deutschland hat sich jedoch in der Mehrzahl aller Bilanzierungsmethoden der Außenmaßbezug etabliert (siehe Kapitel 3.4.1). Demzufolge ist die 'ungestörte Regelfläche' bis zur Außenecke definiert. Der Wärmestrom über die Ecke wird damit doppelt bilanziert. Da er prinzipiell zwar größer ist, aber nicht doppelt so groß, bleibt nun rechnerisch ein negativer Wärmebrückenzuschlag übrig.

Hat ein Gebäude in diesem – für Deutschland üblichen – Außenmaßsystem viele geometrische Wärmebrücken in Form von Außenecken, bei denen sich Doppeltmessungen ergeben, erhält es am Ende auch viele negative Wärmebrückenzuschläge. Das Phänomen steigt mit der Dicke der Konstruktion.

Materialbedingte Wärmebrücken, z.B. punktförmige Durchdringungen einer Fläche durch Dübel, ergeben dagegen einen erhöhten Wärmestrom (falls der Dübel die Wärme besser leitet) und auch einen positiven Wärmebrückenzuschlag. Das Bemaßungsproblem stellt sich hier nicht.

In der Summe beider Phänomene kann es Gebäude geben, die rechnerisch negative, neutrale oder positive Wärmebrückenzuschläge (als Gebäudesummenwerte ΔU_{WB}) aufweisen.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Die Bestandsbewertung kann qualitativ oder quantitativ erfolgen. Im zuletzt genannten Fall sind Kantenlängen linienförmiger Wärmebrücken bzw. Stückzahlen punktförmiger Wärmebrücken vor Ort zu bestimmen.

Hält man sich an die gängigen Normen, sind dabei folgende Details zu berücksichtigen: Gebäudeecken, Sockelanschlüsse, Fenster- und Türanschlüsse, Dachanschlüsse, Wand- und Deckeneinbindungen, Deckenauflager, Balkonplatten und sonstige auskragende Bauteile.

Einsparpotentiale

Bezogen auf das Gesamtgebäude hängt das relative energetische Einsparpotential von folgenden Fragen ab: welchen Anteil hat die Transmission an der Summe aller Verluste im betreffenden Objekt, wie kompakt ist das Gebäude und welchen Dämmstandard haben die ungestörten Regelflächen. Tendenzen:

- je geringer andere Verlustposten in der Bilanz (Lüftungswärme, Erzeuger, Warmwasser), desto höher der relative Wärmebrückeneinfluss,
- je kompakter das Gebäude, desto geringer ist der Wärmebrückeneinfluss,
- je besser gedämmt die Regelflächen, desto höher der Wärmebrückeneinfluss.

Betrachtet man eine schlecht gedämmte Großbäckerei, ist der Wärmebrückeneffekt zu vernachlässigen. Die Energiebilanz des Objektes ist geprägt von Lüftung und internen Wärmelasten. Das Gebäude ist schon aufgrund der Größe eher kompakt und die Wärmeabflüsse über die Wärmebrücken sind nur marginal höher als über die ebenfalls schlechten Regelflächen.

Das Gegenbeispiel sei ein nachträglich gut gedämmtes frei stehendes Einfamilienhaus mit Wärmerückgewinnung in der Lüftungsanlage. Die Bilanz ist wegen der geringen Lüftungswärmeverluste 'transmissionslastig', das Gebäude weniger kompakt und die Wärmebrücken können gegenüber der Regelkonstruktion stark ins Gewicht fallen. Vor allem bei einer Modernisierung, die nicht alle Freiheitsgrade bei der Wärmebrückenvermeidung offen lässt. Es ist mit Effekten in der Größenordnung von 10 … 15 % der Gesamtenergieaufwendungen zu rechnen.

Unabhängig davon gilt für beide Projekte: zur Vermeidung von Feuchteschäden an der Konstruktion sind Wärmebrücken nicht vernachlässigbar, auch wenn ihr energetischer Einfluss im Einzelfall gering ist.

DIN 4108 Beiblatt 2 [11] liefert Hinweise – auch für die Modernisierung – mit welchen Maßnahmen Wärmebrückeneinflüsse zu vermindern sind.

3.4.5 Gebäudedichtheit

Der Einfluss der Gebäudedichtheit auf die Energiebilanz wird bei der Berechnung der Lüftungswärmeverluste berücksichtigt (Luftwechsel n, siehe Kapitel 3.2.3). Abhängig von der Anzahl der Fehlstellen in der luftdichten Ebene des Gebäudes werden höhere Gesamtluftwechsel angesetzt. Folgende Undichtheiten in der wärmeübertragenden Umfassungsfläche (Systemgrenze der Bilanz) werden häufig beobachtet:

- fehlenden Dichtungen bei Fenster und Türen bzw. verzogene oder falsch justierte Fenster und Türen,
- Durchdringungen der Fassade durch Rollläden oder Gurten,
- nicht dicht schließende Öffnungen für Einzelfeuerstätten, Dunstabzugshauben, Feuchtraumentlüftungen,
- fehlende luftdichte Ebenen in Flächen zum unbeheizten Dach oder im Dach selbst,
- unverputztes, nicht luftdichtes Mauerwerk, z.B. in abgehängten Decken oder hinter Vorwandkonstruktionen,
- Elektrodosen in nicht luftdichten Mauerwerken oder Ständerkonstruktionen.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Die Bestandsbewertung erfolgt qualitativ durch Sichtung der oben genannten Konstruktionsdetails oder quantitativ durch eine Gebäudedichtheitsmessung. Das Messverfahren ist in DIN EN 13829 beschrieben.

Die Messung – z.B. mit einer 'Blower-Door' – liefert auf Basis eines aufgebauten Über- bzw. Unterdruckes (Δp = 50 Pa) einen Leckagevolumenstrom $\dot{V}_{50}$ [m³/h] für das geprüfte Objekt. Als Kennwert wird er auf das belüftete Volumen (Resultat: n_{50}) oder die Hüllfläche (Resultat: q_{50}) bezogen. Die Messung kann auch abschnittsweise erfolgen. Häufig entspricht der geprüfte Bereich den ohnehin für die Energiebilanzierung festgelegten Systemgrenzen.

Im Detail kann die Volumenstrommessung vor Ort benutzt werden, um Leckagen zu orten und anschließend zu verbessern. Aus energetischer Sicht lässt sich anhand des Prüfkennwertes auf mittlere Jahresbedingungen (Infiltrationsluftwechsel) schließen.

Energetische Bewertung der Gebäudedichtheit

Eine Energiebilanz wird in den üblichen Rechenverfahren mit einem Gesamtluftwechsel n erstellt. Dieser ergibt sich aus Anteilen des nutzerbedingten und anlagentechnischen Luftvolumenströmen sowie der Infiltration (siehe auch Kapitel 3.2.3). In Grenzen beeinflussen sich diese drei Anteile gegenseitig. Beispielsweise sinkt in baulich sehr undichten Gebäuden der nutzerbedingte Luftwechsel. Der Wunsch nach aktiver Frischluftzufuhr geht zurück, wenn das Gebäude bereits stärker durch Infiltration belüftet wird.

Unter anderem die DIN V 18599 [13] beschreibt rechnerisch die gegenseitigen Effekte.

Zur näherungsweisen Beurteilung der Gebäudedichtheit dienen Ergebnisse n_{50} oder q_{50} einer Gebäudedichtheitsmessung. Ersatzweise – wenn Messwerte fehlen – werden typische Zahlenwerte verwendet, z.B. die in Tabelle 58 angegebenen Werte.

Beschreibung	**Luftvolumen $V_L \leq 1500$ m³, n_{50} in [(m³/h)/m³]**	**Luftvolumen $V_L > 1500$ m³, q_{50} in [(m³/h)/m²]**
Einhaltung der Anforderung an die Gebäudedichtheit gemäß DIN 4108-7, d.h. Dichtheitsprüfung wird nach Fertigstellung durchgeführt	1 (mit Lüftungsanlage) bzw. 2 (ohne Lüftungsanlage)	2 (mit Lüftungsanlage) bzw. 3 (ohne Lüftungsanlage)
zu errichtende Gebäude oder Gebäudeteile, bei denen keine Dichtheitsprüfung vorgesehen ist	4	6
Vorhandensein offensichtlicher Undichtheiten, wie z.B. offene Fugen in der Luftdichtheitsschicht der wärmeübertragenden Umfassungsfläche	10	15
andere Fälle	6	9

Tabelle 58 Typische Infiltrationsluftwechsel für die energetische Bewertung [13]

Die tabellierten Werte können verwendet werden, um das konkrete Gebäude anhand eines Messwertes einzustufen.

Der Messwert oder tabellierte Ersatzwert für n_{50} [1/h] kann mit nachfolgender Gleichung näherungsweise in einen jahresmittleren Infiltrationsluftwechsel n_{inf} [1/h] umgerechnet werden. Die Gleichung gilt für Gebäude ohne Lüftungsanlage bzw. mit abgeschalteter Lüftungsanlage und eine halbfreie Lage.

$$n_{inf} = 0{,}07 \cdot n_{50}$$

Daraus ergeben sich Infiltrationsluftwechsel für dichte Gebäude im Bereich 0,07 … 0,14 h^{-1}. Für undichte Neubauten lieg der Wert mindestens doppelt so hoch. Der typische energetische Vorteil einer bestandenen zu einer nicht bestandenen Dichtheitsmessung wird in der Literatur [14][51] beziffert mit:

$$\Delta n = 0{,}1 h^{-1}$$

Für neue Wohnbauten ohne mechanische Lüftung bedeutet dies beispielsweise nach EnEV die Berechnung mit einem Gesamtluftwechsel von typisch 0,6 h^{-1} (dichtes Gebäude) bzw. 0,7 h^{-1} (undichtes Gebäude). Ist eine mechanische Lüftung vorhanden, ergeben sich neben dem Anlagenluftwechsel von 0,4 h^{-1} ein nutzungsbedingter Luftwechsel von 0,1 h^{-1} sowie ein Infiltrationsluftwechsel von 0,1 h^{-1} (dichtes Gebäude) bzw. 0,2 h^{-1} (undichtes Gebäude). In der Addition ergibt dies die gleichen Summenluftwechsel.

Einsparpotentiale

Der energetische Einfluss eines dichten Gebäudes hängt sehr stark von der Überlagerung mit dem nutzungsbedingten Luftwechsel ab. Darüber hinaus spielt das Vorhandensein einer mechanischen Lüftungsanlage eine Rolle. Zuletzt ist der Einfluss davon abhängig, welchen Einfluss der Lüftungswärmeverlust überhaupt in der Bilanz aufweist. Tendenzen:

- je geringer andere Verlustposten in der Bilanz (Transmissionswärme, Erzeuger, Warmwasser), desto höher der relative Einfluss der Luftdichtheit,
- je höher der nutzungsbedingte und anlagentechnische Luftwechsel, desto geringer ist der relative Einfluss der Luftdichtheit.

Betrachtet man eine gedämmte Lagerhalle ohne mechanische Lüftung, bei der kaum nutzungsbedingter Luftwechsel vorhanden ist, spielt die Luftdichtheit eine größere Rolle. Sie ist ebenfalls wichtig im gut gedämmten Mehrfamilienhaus (kompakt, wenig Transmission) mit Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung. Der relative Einfluss des dichten Gebäudes auf die Gesamtenergiebilanz kann im Bereich von 5 … 10 % liegen.

Das Gegenstück ist ein Gebäude mit schlechter Dämmung und eher großen nutzungs- bzw. anlagentechnischen Luftwechseln, z.B. ein altes Hörsaalgebäude. Der Lüftungsanteil ist wegen der schlechten Dämmung eher gering. Innerhalb der Lüftungsverluste selbst überlagert der Nutzer hier die Bilanz, nicht die Dichtheit.

Jedoch gilt – wie bei Wärmebrücken auch – neben dem energetischen Einfluss spielt das dichte Gebäude für den Schutz der Bausubstanz eine Rolle.

3.5 Kennwerte für Beleuchtung

Für die Beurteilung der Beleuchtung gibt es diverse Gütemerkmale. Die DIN EN 12464 nennt neben der Beleuchtungsstärke (siehe Abschnitt 3.2.5) auch die Tageslichtversorgung, Leuchtdichteverteilung, Blendung und Lichtrichtung, Lichtfarbe und Farbwiedergabe sowie das Flimmern als relevante Parameter.

Energetisch relevant ist der elektrische Aufwand für das Kunstlicht (siehe Abschnitt 3.5.2). Er ergibt sich aus einer elektrischen Leistung für die Beleuchtung P_B [W] und einer effektiven Laufzeit t_B [h/a, h/d usw.]. Falls die Leistung nicht konstant ist, wird mit mittleren Leistungen im Betrachtungszeitraum gerechnet. Alternativ werden zeitliche Berechnungsschritte so fein gewählt, dass innerhalb jedes Schrittes eine konstante Leistung angesetzt werden kann.

Es besteht eine direkte Abhängigkeit des elektrischen Beleuchtungsaufwands von der Tageslichtnutzung (siehe Abschnitt 3.5.1), die – eine entsprechende Bedienung bzw. Regelung der Beleuchtung vorausgesetzt – die Betriebszeiten der künstlichen Beleuchtung vermindert.

3.5.1 Tageslichtnutzung

Die Nutzung von Tageslicht wird bestimmt vom Fensterflächenanteil (siehe Abschnitt 3.4.1), dem Lichttransmissionsgrad τ_{D65} der Verglasung (siehe unten) sowie aktiven und passiven Verschattungsmaßnahmen. Auch der Raum und sein Reflexionsvermögen und seine Tiefe sind maßgeblich.

Darüber hinaus spielen Beginn und Ende der Nutzungszeit eine Rolle. Sofern die Nutzung überwiegend in Nachtzeiten stattfindet, spielt das Tageslichtangebot – außerhalb der Nutzungszeit – kaum eine Rolle. Auch die Sollbeleuchtungsstärke der jeweiligen Nutzung (siehe Abschnitt 3.2.5) ist relevant. Je niedriger der Wert ist, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass Tageslicht ausreicht, um den Grenzwert zu erreichen.

Die energetische Bewertung der Tageslichtnutzung erfolgt in den üblichen Bewertungsverfahren [13][39] indirekt. Bei der Bestimmung der effektiven Betriebszeit für das Kunstlicht wird das Tageslicht positiv gewürdigt, wenn:

- das Tageslicht zur richtigen Zeit kommt,
- das Tageslicht in ausreichender Höhe zur Verfügung steht (Beleuchtungsstärke erreicht),
- oder, falls das Tageslicht nicht vollständig zur Erreichung der Beleuchtungsstärke ausreicht, eine Regelung vorhanden ist, die entsprechend das Kunstlicht so ergänzt, dass es nicht zu einer Überversorgung kommt.

Blend- und Sonnenschutz sowie Lichtlenkung

Wäre allein der Beleuchtungsenergieaufwand für die künstliche Beleuchtung maßgeblich, wäre die maximale Tageslichtnutzung anzustreben. Das spräche für große, unverschattete Fensterflächen mit hohem Strahlungsdurchgang. Allerdings verbietet sich dies in vielen Fällen aufgrund der sich ergebenden Blendung bzw. auch durch eine Erhöhung von Kühllasten im Sommerhalbjahr.

Im ersten Schritt ist daher eine möglichst blendfreie Tageslichtnutzung zu konzipieren, die jedoch einen Außensichtkontakt bietet. Für die Heizzeit gilt darüber hinaus: die mit der Tageslichtnutzung verbundenen solaren Wärmeeinträge verringern kostenlos die Menge an Heizenergie. Sie sind den Wärmeeinträgen des Kunstlichts vorzuziehen. Für das Sommerhalbjahr bzw. die Kühlperiode ist im Sinne einer Gesamtbilanz aus Kühl- und Beleuchtungsenergie abzuwägen zwischen:

- hoher Tageslichtnutzung mit gleichzeitig hohen solaren Wärmeeinträgen, aber geringem Kunstlichtaufwand,
- geringerer Tageslichtnutzung mit gleichzeitig geringeren solaren Wärmeeinträgen, aber höherem Kunstlichtaufwand.

Um allen Aspekten – Überhitzung und Blendung vermeiden, Tageslicht nutzen, um Kunstlicht zu minimieren, Sicht nach außen gewähren – gerecht zu werden, werden Systeme zum Blend- und Sonnenschutz eingesetzt, die teilweise auch Funktionen einer Lichtlenkung aufweisen.

Als Blendschutz versteht man i. A. innen liegende Rollos, Jalousien oder Vertikallamellen aus nichttransparenten Materialien. Sie vermindern den Strahlungseintrag in den Raum nur unwesentlich, verhindern aber eine Blendung.

Sonnenschutzsysteme begrenzen den Strahlungseintrag. Dies kann durch einen g_{eff}-Wert (siehe Abschnitt 3.4.3) ausgedrückt werden. Man kann unterscheiden in:

- Systeme ohne Lichtlenkung oder selektive Verschattung, z.B. übliche Außenjalousien, Raffstoren, Markisen oder Lamellen,
- selektiven Sonnenschutz zur Abschirmung vor Direktstrahlung, aber durchlässig für Diffusstrahlung (die weitgehend blendfrei ist), z.B. Folien
- Systeme mit Umlenkung des Direktanteils, z.B. durch (verspiegelte) Lamellen an Jalousien.

Als gesamtenergetisch günstig erweisen sich Fenster, die weit oben in der Fassade angeordnet sind (incl. separaten Oberlichtern) und deren oberer und unterer Glasanteil sich verschieden verschatten lassen. Durch den oberen Teil kann – z.B. mit lichtlenkenden Lamellen – Tageslicht in den Raum eingebracht werden. Die unteren Teile werden mit Blend- und Sonnenschutz versehen. Typisch und vorteilhaft sind Jalousien mit zwei unterschiedlichen, separat ansteuerbaren Lamellenwinkeln.

Lichttransmissionsgrad

Für Gläser beschreibt der Lichttransmissionsgrad τ_{D65} die Durchlässigkeit für Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichtes (Tageslicht eines trüben Tages). Im Gegensatz dazu gibt der Gesamtemissionsgrad g (siehe Abschnitt 3.4.3) die Durchlässigkeit für das gesamte Strahlungsspektrum an.

Bauart	Verglasung	τ_{D65}, in [-]
ältere Verglasungen ohne Sonderfunktionen	Einfachverglasung	0,86
	2-Scheiben-Isolierverglasung, auch Verbundfenster und Kastenfenster	0,73
	3-Scheiben-Isolierverglasung, auch Verbundfenster	0,63
Wärmeschutzverglasung	2-Scheiben-Wärmeschutzglas	0,45...0,60
	3-Scheiben-Wärmeschutzglas	0,46...0,50
Sonnenschutzverglasung	2-Scheiben-Sonnenschutzglas	0,21...0,44
	3-Scheiben-Sonnenschutzglas	0,13...0,29
	schaltbare Verglasung	0,31...0,36

Tabelle 59 Typische Lichttransmissionsgrade für Gläser ohne Sonnenschutz [13]

Der Einfluss einer zusätzlichen Verschattungsmaßnahme kann mit Hilfe der Tabellen im Abschnitt 3.4.3 abgeschätzt werden.

Tageslichtquotient

Zu Klassifizierung der Tageslichtnutzung dient der Tageslichtquotient. Er kann gemessen werden. Auch rechnerische Näherungen unter Berücksichtigung der Raumtiefen, Fensterflächenanteile, Sturzhöhen der Fenster, Verschattung aufgrund von Verbauung sind möglich [13], allerdings hinsichtlich der Beschaffung der Eingangsparameter sehr aufwändig.

Der Tageslichtquotient D [%] gibt an, welcher Anteil der Außenbeleuchtungsstärke im Innenraum vorhanden ist. Ein voll bedeckter Himmel wird für die Bestimmung (Messung) zugrunde gelegt. Werte über 6 % werden als gut eingestuft, 4 … 6 % entspricht einer mittleren, 2 … 4 % einer geringen Tageslichtversorgung. Ergebnisrelevant ist vor allem der Fensterflächenanteil.

Bild 46 zeigt für die Gewerbenutzung eine Abschätzung der Betriebszeitanteile, in denen das Tageslicht zum Erreichen der Beleuchtungsstärke ausreichend ist. Für typische geforderte Beleuchtungsstärken von 300 lx ergibt sich bei mittlerer Tageslichtversorgung (D = 5 %) ein Kennwert von 75 %. In der Restzeit muss das Kunstlicht verwendet werden. Steigt der Sollwert auf 500 lx reicht das Tageslicht nur noch in 30 % der Zeit zur ausreichenden Beleuchtung aus.

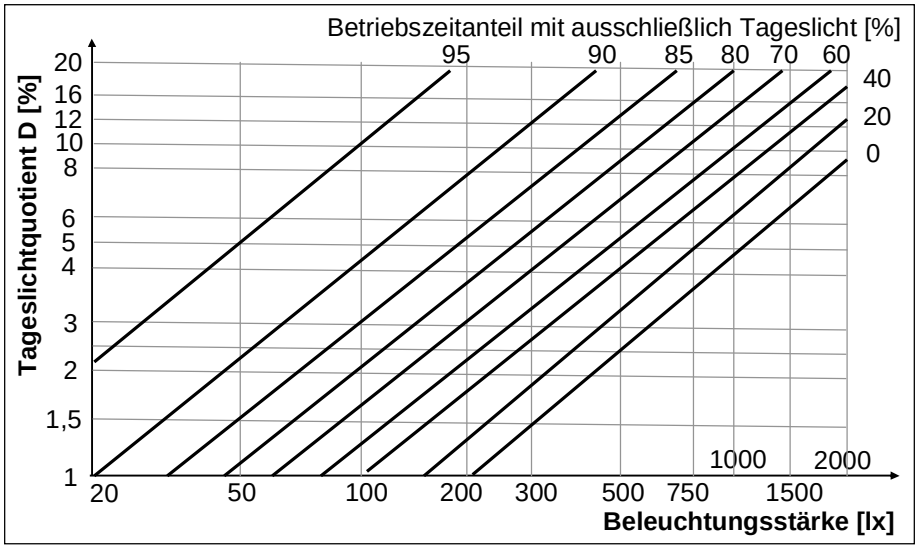


Bild 46 Einfluss des Tageslichtquotienten auf die Betriebszeit mit Tageslicht [20]

Effektive Betriebszeit

Tabelle 60 zeigt die Potentiale zur Tageslichtnutzung auf, die sich allein aufgrund der Lage der Nutzungszeit innerhalb des Tagesverlaufs ergeben. Die günstigsten Bedingungen sind in Klassenräumen und Kindertagesstätten gegeben, da praktisch die gesamte Nutzungszeit am Tage stattfindet. Dies heißt nicht, dass die jeweiligen Gebäude zu 100 % von Tageslicht versorgt werden können – es gibt zahlreiche weitere Einflüsse. Aber der Umkehrschluss ist gegeben: in einem Hotelzimmer ist die Tageslichtnutzung gering (unabhängig von Fensterflächenanteil, Lichttransmissionsgrad usw.), da eine Abend- und Nachtnutzung gegeben ist.

Gebäudenutzung	Taganteil	Nachtanteil
Klassenzimmer, Kindergarten, Kantine	ca. 100 %	ca. 0 %
Hörsaal, Arztpraxis, Messe, Kongress, Büro, Seminar, Archiv, Labor, Museum, Industrie mit Tagschichtbetrieb	90...95 %	5...10 %
Einzelhandel, Bibliothek	80...90 %	10...20 %
Turnhalle, Küche, Restaurant, Parkhaus	55...70 %	30...45 %
Bettenzimmer, Rechenzentrum, Logistikhalle, Industrie mit 3-Schichtbetrieb	50 %	50 %
Hotelzimmer, Theater	5...20 %	80...95 %

Tabelle 60 Tag- und Nachtanteil an der Nutzungszeit [13][39][eigene]

Zur Abschätzung des Potentials der Tageslichtnutzung wird aus der Nutzung heraus zunächst die gesamte Zeit bestimmt, an der eine bestimmte Beleuchtungsstärke aufgrund der Personenbelegung notwendig ist. Anschließend – z.B. mit den Kennzahlen nach Tabelle 60 die Stundenanzahl innerhalb der Zeit mit Tageslicht. Es wird unterstellt, dass – ohne Tageslichtnutzung – eine künstliche Beleuchtung in dieser Zeit durchgehend in Betrieb wäre. Anschließend wird diese Zeit aufgrund der Tageslichtnutzung – und ggf. weiterer Einflüsse – nach unten korrigiert.

Dieses Vorgehen wählt beispielsweise das IWU für die Bewertung von Nichtwohnbauten im Rahmen des Projektes TEK (Teilenergiekennwerte) [38][39]. Auch in früheren Veröffentlichungen wurde dieser Ansatz kommuniziert, siehe Bild 47.

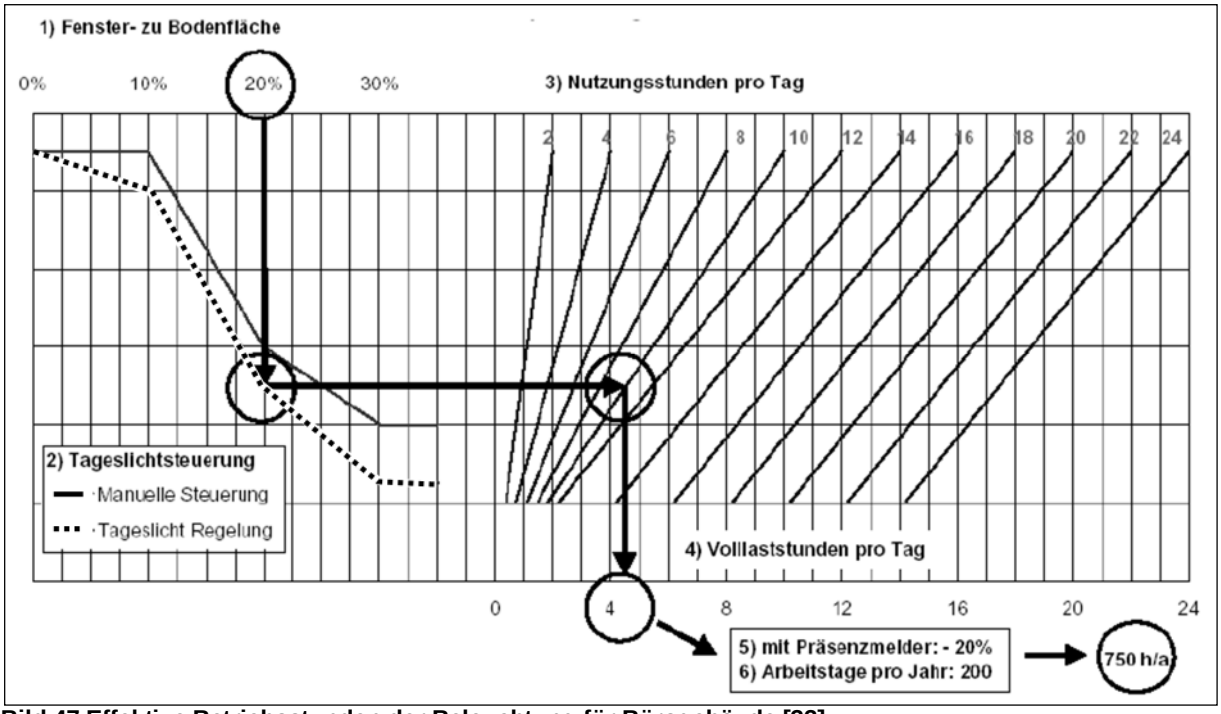


Bild 47 Effektive Betriebsstunden der Beleuchtung für Bürogebäude [33]

Für andere Nutzungsarten fehlen Nomogramme wie Bild 47. Daher wird stattdessen das tabellarische Bewertungsverfahren der DIN V 18599 vorgestellt. Die Norm definiert zwei Einflüsse im Zusammenhang mit der Tageslichtnutzung: das Tageslichtkontrollsystem (günstig, wenn vorhanden) und den Einfluss der Verschattung (ungünstig, wenn vorhanden).

Für beide Einflüsse werden Teilkennwerte definiert, die zusammen einen Korrekturfaktor für die Tageslichtnutzung F_{TL} ergeben. Es gilt:

$$F_{TL} = 1 - C_{TL,kon} \cdot C_{TL,Vers}$$

Typische Teilkennwerte für Tageslichtkontrollsysteme zeigt Bild 48. In Tabelle 61 sind Teilkennwerte für den Sonnen- und Blendschutz zusammengestellt. In beiden Fällen ist auch der Fall fehlender Technologien (d.h. manuelle Schaltung ohne Sonnen- und Blendschutz) enthalten.

Systemlösung für die Verschattung	**Korrekturfaktor $C_{TL,Vers}$**
Kein Sonnen- und/oder Blendschutz	0,70
Lichtlenkende Systeme	0,60
Tageslichtabhängig rückziehbare Sonnen- und/oder Blendschutzsysteme, Lamellenbehänge, bei denen nach dem Herunterfahren die Lamellen automatisch wieder geringfügig geöffnet werden, so dass die Lichttransmission gegenüber dem vollständig geschlossenen Behang erhöht ist.	0,40
Systeme, die Blendschutz bereitstellen, einschließlich manuell betriebener Lamellenbehänge	0,15

Tabelle 61 Einsparpotential der Tageslichtnutzung – Teilkennwert für Sonnen- und Blendschutz [13]

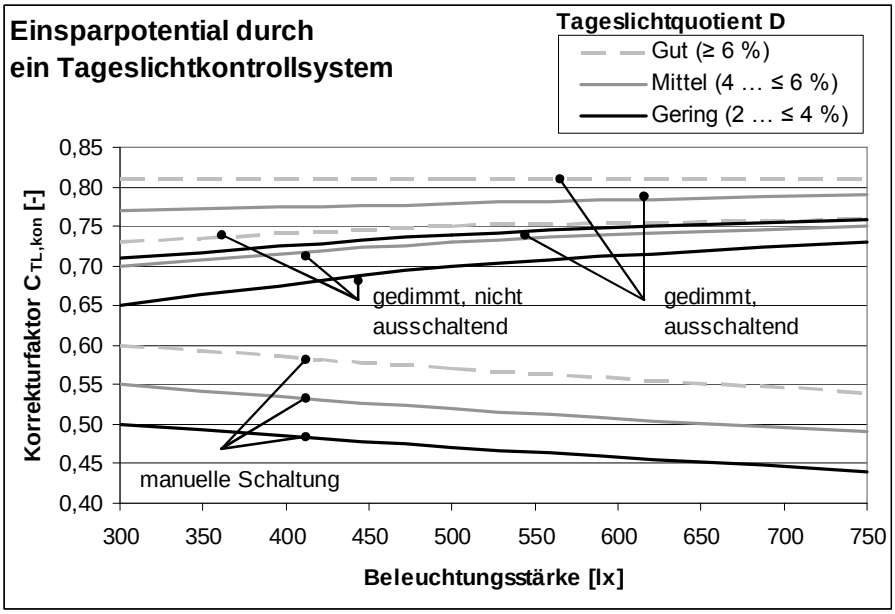


Bild 48 Einsparpotential der Tageslichtnutzung – Teilkennwert ein Tageslichtkontrollsystem [13]

Es ergibt sich beispielsweise in einem Büro mit einem Wartungswert der Beleuchtungsstärke (Begriffserläuterung siehe Abschnitt 3.2.5) von 500 Lux sowie mittlerer Tageslichtversorgung (Tageslichtquotient D = 5 %):

- bester Fall: Ausführung mit einem Tageslichtkontrollsystem, welches die Lampen dimmt und ausschaltet ($C_{TL,kon}$ = 0,78 aus Bild 48), aber ohne Sonnen- und Blendschutz ($C_{TL,Vers}$ = 0,70 aus Tabelle 61): $F_{TL} = 1 - 0{,}78 \cdot 0{,}70 = 0{,}45$
- mittlerer Fall: Ausführung mit einem Tageslichtkontrollsystem welches die Lampen dimmt, aber nicht ausschaltet ($C_{TL,kon}$ = 0,73 aus Bild 48), kombiniert mit einer tageslichtabhängig rückziehbaren Jalousie als Sonnen- und Blendschutz ($C_{TL,Vers}$ = 0,40 aus Tabelle 61): $F_{TL} = 1 - 0{,}73 \cdot 0{,}40 = 0{,}71$
- schlechtester Fall: Ausführung mit Lamellen als Blendschutz ($C_{TL,kon}$ = 0,52 aus Bild 48) sowie einer manuellen Schaltung ($C_{TL,Vers}$ = 0,15 aus Tabelle 61): $F_{TL} = 1 - 0{,}52 \cdot 0{,}15 = 0{,}92$.

Im besten Fall dezimiert sich die effektive Anzahl von Betriebsstunden auf 45%, im schlechtesten auf immer noch 92 % – jeweils bezogen auf eine durchgehende Beleuchtung innerhalb der Nutzungszeit. Das Einsparpotential der Tageslichtnutzung lässt sich als Differenz zu 100 % näherungsweise abschätzen.

Allerdings ist anzumerken, dass der Einfluss verminderter Betriebszeiten aufgrund einer Präsenzregelung $F_{Prä}$ (siehe Abschnitt 3.5.2) gleichzeitig berücksichtigt werden muss, wenn eine Gesamtaussage erfolgen soll.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Zur Beurteilung der Bestandssituation wird die Messung eines Tageslichtquotienten empfohlen. Dazu werden zwei Luxmeter benötigt. Die Einstufung des Raumes in eine "gute", "mittlere" oder "geringe" Tageslichtnutzung ist mit geringem Zeitaufwand machbar. Anschließend kann mit Hilfe der Tabellen und Grafiken dieses Abschnittes abgeschätzt werden, welche Einsparungen an Betriebszeit zu erwarten ist.

Es kann davon ausgegangen werden, dass bei einem Verhältnis der Fenster- zu Bodenfläche ab 30 % eine gute Tageslichtversorgung eintritt.

3.5.2 Kunstlicht

Je nach Art der Leuchten und deren Abstrahlcharakteristik, der Leuchtmittel und ggf. deren Vorschaltgeräten ergibt sich aus einer zu erbringenden Beleuchtungsstärke E [lx] eine elektrische Beleuchtungsleistung P_B [W]. Mit entsprechender Regelung und Steuerung lässt diese sich nach Bedarf reduzieren (dimmen) bzw. die Beleuchtung komplett abschalten. Der elektrische Energieaufwand der Beleuchtung hängt von der Anzahl von Betriebsstunden ab. Die übliche Bewertung greift auf Vollbenutzungsstunden t [h/a, h/mon usw.] für die Beleuchtung zurück [13][39][76]. Diese enthalten auch den Einfluss der Tageslichtnutzung (siehe Abschnitt 3.5.1).

Leuchten- und Lampeneffizienz

Mit Hilfe des Leuchtmittels bzw. der Lampe wird aus elektrischer Leistung [W] ein Lichtstrom [lm] erzeugt. Der Quotient ist die Lichtausbeute [lm/W]. Die üblichen Leuchtmittel weisen dabei typische Effizienzen im Bereich 10 … 20 lm/W (Glühlampe) über 50 … 80 lm/W (Leuchtstofflampe) bis 60 … 100 lm/W (LED) auf. Noch besser sind Natriumdampflampen, die allerdings wegen ihrer schlechten Farbwiedergabe (gelb-oranges Licht) überwiegend für die Straßenbeleuchtung verwendet werden.

Der aus der Lampe austretende Lichtstrom wird in der Leuchte reflektiert, gestreut, gebrochen oder absorbiert wird. Der Leuchtenwirkungsgrad gibt den Anteil des in der Lampe erzeugten Lichtes an, der die Leuchte verlässt. Folgende Werte sind typisch [39]:

- Deckeneinbauleuchte: 35 … 50 %
- geschlossene Wannenleuchte: 55 … 75 %
- Spiegelraster- und Reflektorleuchten: 70 … 90 %.

Nur ein Teil des aus der Leuchte abgegebenen Lichtstroms erreicht die Nutzebene. Dies ist abhängig von den Oberflächen des Raumes (Reflexion, Absorption), der Raumgröße und räumlichen Anordnung der Beleuchtung mit Abständen zur Nutzebene, zu Decken und Wänden, aber auch der Abstrahlcharakteristik der Leuchte (nach unten, oben, seitlich usw.). Der Raumwirkungsgrad ist ein Maß für die genannten Effekte.

Installierte Leistung

Typische auf die Nettogrundfläche bezogene Werte zeigt Tabelle 62. Die Lichtausbeute des Leuchtmittels sowie die Leuchteneigenschaften mit Abstrahlcharakteristik beeinflussen die installierte Beleuchtungsleistung. Es zeigt sich, dass im Mittel die indirekte Beleuchtung einen doppelt so hohen Leistungsbedarf ergibt wie die direkte.

System aus Lampe und Leuchte	flächenbezogene Leistung je Beleuchtungsstärke [W/(m²·lx]		
	direkte Beleuchtung	direkt/indirekte Beleuchtung	indirekte Beleuchtung
Glühlampe	0,30	0,36	0,60
Halogenglühlampe	0,25	0,30	0,50
Leuchtstofflampe, stabförmig, EVG	0,05	0,06	0,10
Leuchtstofflampe, stabförmig, KVG	0,06	0,07	0,12
Leuchtstofflampe, kompakt, externes EVG	0,06	0,07	0,12
Leuchtstofflampe, kompakt, externes KVG	0,08	0,09	0,15
Leuchtstofflampe, kompakt, integriertes EVG	0,08	0,10	0,16
Metallhalogendampf, Hochdruck, EVG	0,04	0,05	0,09
Metallhalogendampf, Hochdruck, KVG	0,05	0,06	0,10
Natriumdampf, Hochdruck, KVG	0,04	0,05	0,08
Quecksilberdampfdampf, Hochdruck, KVG	0,09	0,10	0,17
LED-Ersatzlampen für Glühlampen	0,05	0,05	0,09
LED-Ersatzlampen für stabförmige Leuchtstofflampen	0,03	0,04	0,07
LEDs in LED-Leuchten als Lichtbänder	0,02	0,03	0,05
LEDs in LED-Leuchten	0,03	0,03	0,06

Tabelle 62 Leistung verschiedener Beleuchtungssysteme [13]

Um eine absolute Leistung [W] zu erhalten, sind die zu beleuchtende Nettogrundfläche zu erheben sowie eine repräsentative Beleuchtungsstärke in dieser Fläche. Es ist zu beachten, dass bei vielen Nutzungsprofilen die Nennbeleuchtungsstärken für eine Nutzung nicht in der gesamten Raumfläche benötigt werden. Anhaltswerte für typische mittlere Beleuchtungsstärken sind in Abschnitt 3.2.5 angegeben.

Ausgehend von den notwendigen Beleuchtungsstärken und den entsprechenden Raumwirkungsgraden zeigt Tabelle 63 typische installierte Beleuchtungsleistungen. Die niedrigen Werte ergeben sich jeweils unter Einsatz sehr effizienter Lampen und Leuchten, die hohen Werte sind nicht mehr zeitgemäß, im Bestand aber noch anzutreffen.

Nutzung	Beleuchtungsleistung [W/m²]		
	niedrig	mittel	hoch
Parkhaus	1...3	4...5	6...9
Verkehrsfläche, Lager, Technikraum	2...4	5...8	10...14
Sanitärraum, Kantine, Sporthalle, Veranstaltungsraum, Museum	4...7	8...12	16...25
Klassenraum, Hotel, Bettenzimmer, Bibliothek, Restaurant	4...10	12...18	20...40
Büro, Seminar, Küche, Serverraum, Werkstatt, Fertigung, Verkauf, Schwimmhalle	7...12	15...22	25...50
Bühne	20...40	50...80	120...150

Tabelle 63 Typische installierte Beleuchtungsleistungen nach Nutzung [20][39][47][76]

Regelung und Steuerung

Eine Anpassung der Beleuchtung an den Bedarf ist durch zwei grundsätzliche Strategien erreichbar: die Präsenzsteuerung (meist ausschließlich Schaltung) und die Beleuchtungsstärkeregelung (dimmen und/oder schalten).

Hinsichtlich der Potentiale einer tageslichtabhängigen Beleuchtungsstärkeregelung wird auf die Ausführungen in Abschnitt 3.5.1 verweisen. Folgende Regelung- und Steuerungsoptionen sind denkbar abhängig von den Gegebenheiten der Nutzung:

- Gesamtbetriebszeit der Beleuchtung aufgrund der Nutzung
    - hoch: Regel- und Steuerungsoptionen ggf. sinnvoll
    - gering, z.B. in Lagerflächen oder Technikräumen: keine Steuerung und Regelung
- Personenbelegung
    - durchgehend hoch, d.h. dauernd mindestens eine Person anwesend, z.B. in Großraumbüros: Präsenzsteuerung eher unnötig, ggf. Beleuchtungsstärkeregelung
    - gering, d.h. hoher Einzeleinfluss der einzelnen Person, z.B. im Einzelbüro: Regel- und Steuerungsoptionen ggf. sinnvoll
- Schaltfrequenz aufgrund von Nutzerwechseln
    - gering: eher manuelle Schaltungen, ggf. Beleuchtungsstärkeregelung
    - hoch, z.B. in WCs und Fluren: Präsenzsteuerung sinnvoll
- Homogenität der Nutzung
    - zeitlich homogene Nutzung in periodischer Wiederholung: manuelle Schaltung (Einschalten) und Zeitschaltung oder Bewegungsmelder (Abschalten)
    - zeitlich inhomogene Nutzung mit nicht vorhersagbarem Nutzungsbeginn und -ende: eher manuelle Schaltung oder Bewegungsmelder (zum Abschalten)
- Nutzungszeit tagsüber, Tageslichtversorgung über Fenster gegeben
    - große Beleuchtungsstärken: Beleuchtungsstärkeregelung über Dimmen, d.h. zum Tageslicht wird Kunstlicht dosiert hinzugefügt; dies ist an vielen Betriebsstunden notwendig
    - geringe Beleuchtungsstärken: eher schalten, d.h. das Kunstlicht wird wenn nötig in voller Höhe eingeschaltet und führt zusammen mit dem Tageslicht ggf. zu einer zu hohen Beleuchtungsstärke, allerdings reicht über viele Jahresstunden das Tageslicht ohnehin voll zur Versorgung aus

Effektive Betriebszeit

Zur Abschätzung des Potentials der Präsenzregelung wird aus der Nutzung heraus zunächst die gesamte Zeit bestimmt, an der eine bestimmte Beleuchtungsstärke aufgrund der Personenbelegung notwendig ist.

Innerhalb der gesamten Zeit kann ein System zur Präsenzmeldung wirken und die effektive Betriebszeit senken. Tabelle 64 zeigt typische Korrekturfaktoren je nach Raumnutzung. Für den Zeitanteil am Tage – also mit möglicher Tageslichtnutzung – gilt zusätzlich ein Einfluss der Tageslichtregelung (siehe Abschnitt 3.5.1).

Nutzung	Korrekturfaktor für die Präsenz $F_{Prä}$	
	ohne Präsenzmelder	mit Präsenzmelder
Großraumbüro, Einzelhandel, Kantine, Bettenzimmer, Restaurant, Küche, Museum, Bibliothek, Arztpraxis, Gewerke und Produktion	0,95...1,0	0,95...1,0
Klassenzimmer, Gruppenraum, Hörsaal, Einzelbüro, Gruppenbüro, Labor, Turnhalle	0,85...0,88	0,72...0,76
Besprechung, Seminar, Rechenzentrum, Messe, Hotelzimmer, Logistikhalle	0,70...0,75	0,43...0,53
Verkehrsflächen, Parkhäuser, Sanitärräume, Lager, Archiv, Technikräume	0,51...0,68	0,24...0,07

Tabelle 64 Einsparpotential durch eine Präsenzmeldung [13]

Beispiel: ein Einzelbüro hat eine Jahresgesamtnutzungszeit von 2200 h/a, Davon fallen 85 % in den Zeitraum mit potentieller Tageslichtnutzung und 15 % in die Nachtzeit (siehe Abschnitt 3.2.1).

Der Tageslichtquotient beträgt 5 %. Das Büro erhält ein Tageslichtkontrollsystem, welches die Lampen dimmt, aber nicht ausschaltet, kombiniert mit einer tageslichtabhängig rückziehbaren Jalousie als Sonnen- und Blendschutz. Der Korrekturfaktor für die Nutzung des Tageslichtes beträgt F_{TL} = 0,71 (siehe Abschnitt 3.5.1).

Wenn in diesem Büro gleichzeitig eine Präsenzerfassung vorhanden ist, gilt ein Korrekturfaktor für die Präsenz $F_{Prä}$ = 0,74 (siehe Tabelle 64). Für die effektive Betriebszeit der Beleuchtung ergibt sich dann: [8]

- nachts: 0,15 · 2200 h/a · 0,74 = 244 h/a (nur Präsenzmeldung)
- tags: 0,85 · 2200 h/a · 0,71 · 0,74 = 982 h/a (Präsenzmeldung und Tageslichtregelung)
- gesamt: 1226 h/a bzw. ca. 56 % der Nutzungszeit

Die DIN V 18599 [13] berücksichtigt bei der Bestimmung der effektiven Betriebszeit zusätzlich eine Konstantlichtkontrolle. Für Details wird auf die Norm verwiesen.

Typische effektive Betriebszeiten, die sich unter Berücksichtigung aller regelungstechnischen Einflüsse ergeben, fasst Tabelle 63 zusammen.

Nutzung	effektive Betriebszeit [h/a]		
	niedrig	mittel	hoch
Klassenzimmer, Lager, Technik, Archiv	500...800	800...1000	1000...1300
Einzelbüro, Hörsaal, Kantine, Museum, Veranstaltung, Theater	600...1100	1100...1300	1300...1700
Sanitär	100...1000	1200...1500	1500...1900
Besprechung, Sitzung	500...1200	1200...1600	1600...2300
Verkehrsflächen, Hotelzimmer	700...1100	1100...1500	1500...2000
Großraumbüro, Werkstatt, Fertigung, Bibliothek	1600...2000	2000...2300	2300...2500
Bettenzimmer, Rechenzentrum, Sporthalle	1400...2500	2500...3000	3000...4000
Verkauf, Restaurant, Parkhaus, Schwimmhalle	2500...3000	3300...3600	3300...3600

Tabelle 65 Typische effektive Betriebszeiten der Beleuchtung [20][39][47][76]

Energiebedarf der Beleuchtung

Tabelle 66 fasst auf die Nettogrundfläche bezogene Beleuchtungsenergiemengen zusammen, die in verschiedenen Nichtwohnbaunutzungen vorzufinden sind.

Nutzung	Endenergie der Beleuchtung [kWh/(m²·a)]		
	niedrig	mittel	hoch
Sanitärräume, Verkehrsflächen, Lager, Technik, Archiv, Parkhaus, Klassenzimmer, Hotelzimmer, Kantine	1...5	5...15	15...40
Theater, Veranstaltung, Museum	5...10	10...20	20...30
Bibliothek, Sporthalle, Büro, Seminar, Hörsaal, Bettenzimmer	5...15	15...30	30...100
Restaurant, Werkstatt, Fertigung	15...25	25...40	40...80
Verkauf	25...35	35...60	60...100
Küchen, Rechenzentrum	20...40	40...80	80...160

Tabelle 66 Typische installierte Beleuchtungsleistungen nach Nutzung [20][39][47][76]

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Eine separate Messung der elektrischen Energie für die Beleuchtung ist in der Regel schwierig, da nur in den seltensten Fällen separate Stromkreise vorhanden sind. Aus Lastganganalysen (siehe Abschnitt 4.4) lassen sich Erkenntnisse gewinnen.

Bei der Erfassung der Beleuchtungsleistung ist zu beachten, dass es neben der auf dem Leuchtmittel verzeichneten Leistung häufig Transformatoren und Vorschaltgeräte gibt. Die DIN V 18599 gibt als typischen Zuschlag für diese Verbraucher 10 % der Leuchtmittelleistung an (Ausnahme: konventionelle Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen: dort 30 %).

Einsparpotentiale

Eine Einsparung ist gegeben durch eine Leistungsminderung (andere Leuchtmittel, bessere Leuchte, bedarfsabhängiges Dimmen) sowie durch veränderte Betriebszeiten (bedarfsabhängiges Schalten, Vermeiden von Betriebsbereitschaft).

Aus den Tabellen des vorliegenden Abschnittes lässt sich erkennen, dass folgende typische Einsparpotentiale bestehen:

- Leuchtmittel: Wechsel von direkter Beleuchtung mit stabförmiger Leuchtstofflampe mit konventionellem Vorschaltgerät auf LED bedeutet etwa 50 % Leistungsminderung (doppelt so hoher Lichtstrom je Leistung)
- Leuchte: der Ersatz einer Deckeneinbauleuchte durch eine Spiegelrasterleuchte bringt ebenfalls 50 % Leistungsminderung (doppelt so guter Leuchtenwirkungsgrad)
- Präsenzerfassung: für Verkehrsflächen und Sanitärbereiche bringt eine Minderung um 50 … 90 %, im Einzelbüro nur etwa 10 … 20 %.

In jedem Fall sind Veränderungen an der Regelung und Steuerung mit dem Nutzer zu besprechen und Bedenken Ernst zu nehmen. Für tageslichtabhängige Regelungen und Bewegungsmelder sind ggf. Übersteuerungsvorrichtungen vorzusehen, auf welche die Nutzer im Bedarfsfall zugreifen können.

Eine Minderung der Beleuchtungsenergie hat Auswirkungen auf die Heizenergie im Winter (Erhöhung) und Kühlenergie im Sommer (Minderung). Für wirtschaftliche Überlegungen ist dies zu bedenken. Dies gilt auch für die Berücksichtigung unterschiedlich langer Lebensdauern (Halogenlampe 4000 … 5000 Stunden, Leuchtstofflampen 10.000 … 20.000 Stunden, LED 15.000 … 40.000 Stunden)

3.6 Kennwerte für die Gebäudewärmeversorgung

Die im Gebäude benötigte Heizwärmemenge ergibt sich aus der Bilanz der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sowie der nutzbaren solaren und inneren Fremdwärme. Die Frage, inwieweit die Wärmeabgabe von Heizungsleitungen als Nutzwärme aufgefasst wird, beantworten verschiedene Bilanzverfahren unterschiedlich, siehe Abschnitt 2.4.

In jedem Fall wird die übliche Kette vom Erzeuger über ggf. Speicher und Verteilnetze bis zur Übergabe an den Nutzer durchlaufen. Ein Teil der eingesetzten Endenergie wird dabei als "technischer Verlust" (bzw. Mehraufwand gegenüber dem Nutzen) verbucht. Dieser Anteil kann mit Hilfe von Kennwerten für die technischen Systemkomponenten beschrieben und eingeschätzt werden.

Für die unterschiedlichen Erzeuger werden im Rahmen dieser Kennwertsammlung in Abschnitt 3.6.1 typische Nutzungsgrade η (bzw. Arbeitszahlen) zur Beschreibung angegeben. Außerdem werden für Systeme mit mehr als einem Erzeuger Deckungsanteile α zusammengestellt. Sie geben an, welchen Beitrag einzelne Erzeuger zur Gesamtenergielieferung des Systems leisten.

Abschnitt 3.6.2 stellt typische Kennwerte zur Bewertung von Speichern zusammen: installierte Volumina abhängig von der Erzeugerleistung sowie Verlustleistungen $\dot{Q}_s$. Diese sind abhängig von der Kompaktheit der Speicher, der Dämmung und der Temperaturdifferenz zur Umgebung (für welche es standardisierte Annahmen gibt).

Eine weitere Verlustquelle ist durch die Heizungsverteilung gegeben. Das Netz ist geprägt durch Leitungsverlegedichten – u. a. abhängig von der Ausführung als Ein- oder Zweirohrheizung. Darüber hinaus spielen Auslegungstemperaturen samt Temperaturregelung sowie der Dämmstandard eine Rolle. Neben den wärmetechnischen Eigenschaften gibt Abschnitt 3.6.3 auch Hinweise zu typischen Hilfsenergien (Pumpen).

Abschnitt 3.6.4 fasst wesentliche Erkenntnisse zur Beschreibung der Wärmeübergabe zusammen. Je nach Auskühlverhalten der Heizfläche, Genauigkeit der Temperaturregelung sowie weiteren Einflüssen – beispielsweise dem Vorhandensein eines hydraulischen Abgleichs – kann die Sollraumtemperatur besser oder schlechter eingehalten werden.

3.6.1 Erzeuger

Für die Gebäudeheizung kommen zentrale oder dezentrale Erzeuger zum Einsatz. Die Effizienzen fossil befeuerter Kessel lassen sich mit Nutzungsgraden η [-], Aufwandszahlen e [-] oder absoluten Verlusten Q_g [kWh/a] bewerten. Die zu verzeichnenden Verluste lassen sich einteilen in die immer vorhandenen Verluste der Betriebsbereitschaft ("Sowieso-Verlust") und auslastungsabhängige Verluste, z.B. Abgasverluste ("Umwandlungs-Verlust"). Die drei Größen lassen sich ineinander umrechnen, soweit die Erzeugernutzwärmeabgabe Q_{outg} und/oder die Endenergie Q bekannt sind.

$$Q = \frac{1}{\eta_a} \cdot Q_{outg} = e_g \cdot Q_{outg} = Q_{outg} + Q_g$$

Nutzungsgrade und Aufwandszahlen setzen Endenergie Q und produzierte Wärmemenge Q_{outg} ins Verhältnis (Nutzen je Aufwand bzw. Kehrwert). Die sich ergebenden Zahlenwerte sind i. A. nicht konstant, sondern abhängig von der Belastung oder Auslastung φ des Erzeugers. Je geringer ein Erzeuger ausgelastet ist, desto schlechter ist in der Regel seine Effizienz, da anteilig die sowieso vorhandenen Bereitschaftsverluste zunehmen. Bei Nulllast ergibt sich ein Verlust, dem kein Nutzen gegenüber steht. Der Nutzungsgrad ist null, die Aufwandszahl unendlich, siehe Bild 49

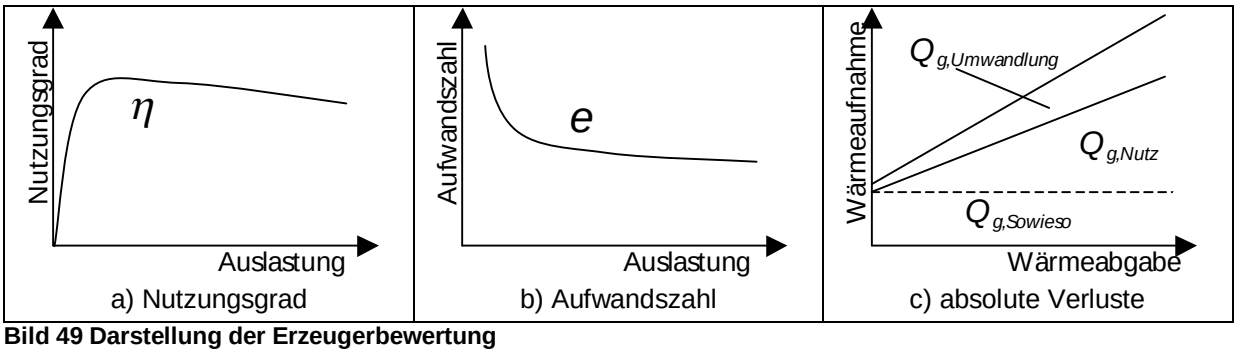


Bild 49 Darstellung der Erzeugerbewertung

Nicht jeder Erzeuger weist Sowieso- und Umwandlungsverluste auf. Entfallen die Betriebsbereitschaftsverluste ergibt sich ein konstanter Nutzungsgrad bzw. eine konstante Aufwandszahl. Für die meisten Erzeuger gilt jedoch, dass sich ihre Effizienz aus einer Gewichtung verschiedener Betriebszustände und der Betriebsbereitschaft ergibt.

Im Folgenden werden Jahresnutzungsgrade η_a tabelliert angegeben. Für brennstoffbetriebene Geräte sind sie auf den Brennwert bezogen, eine Umrechnung in heizwertbezogene Größen kann erfolgen. Abschnitt 2.5 erläutert das Vorgehen; weiter unten wird zusätzlich ein Beispiel gezeigt.

Kessel

Die Gebäudebeheizung erfolgt bis heute in den meisten Fällen über einen Kessel. Da in vielen Objekten gleichzeitig Trinkwasser erwärmt wird, ist der kombinierte Betrieb in der Heizperiode normal. Tabelle 67 zeigt typische Effizienzen für zentrale Kessel. Einfluss auf die Effizienz hat die Kesselbauart und das Baujahr, ggf. die Leistung (bessere Effizienz größerer Einheiten), ggf. die Betriebstemperatur (geringere Temperatur führt zu höherer Effizienz) sowie die Auslastung.

Nutzungsgrad η_a [-] brennwertbezogen									
gasbefeuerte Konstanttemperaturkessel									
Kesselbauart	Leistung $\dot{Q}_K$ [kW]	Baujahr bis 1978				Baujahr ab 1979			
		Auslastung φ [-]				Auslastung φ [-]			
		<0,06	0,06...0,2	0,2...0,5	0,5...1,0	<0,06	0,06...0,2	0,2...0,5	0,5...1,0
Vorrats-Wasserheizer	< 20	0,32	0,57	0,69	0,74	0,35	0,59	0,71	0,75
Umlauf-Wasserheizer	< 37	0,45	0,64	0,71	0,73	0,59	0,72	0,76	0,77
Spezialkessel mit Brenner ohne Gebläse	< 50	0,30	0,54	0,68	0,73	0,43	0,65	0,74	0,77
	> 50...120	0,35	0,59	0,71	0,75	0,48	0,68	0,77	0,78
	> 120...350	0,47	0,67	0,75	0,77	0,60	0,74	0,78	0,80
	> 350...1200	0,53	0,70	0,77	0,79	0,60	0,74	0,78	0,80
automatischer Spezialkessel mit Gebläse	< 50	0,31	0,56	0,70	0,75	0,43	0,65	0,75	0,77
	> 50...120	0,36	0,60	0,73	0,77	0,49	0,69	0,77	0,79
	> 120...350	0,48	0,68	0,77	0,78	0,61	0,75	0,79	0,81
	> 350...1200	-	0,70	0,77	0,79	-	0,75	0,79	0,81
Umstell- und Wechsel-brandkessel	< 50	0,26	0,50	0,66	0,72	0,36	0,59	0,72	0,76
	> 50...120	0,36	0,59	0,69	0,73	0,47	0,67	0,75	0,77

ölbefeuerte Konstanttemperaturkessel									
Kesselbauart	Leistung $\dot{Q}_K$ [kW]	Baujahr bis 1978				Baujahr ab 1979			
		Auslastung φ [-]				Auslastung φ [-]			
		<0,06	0,06...0,2	0,2...0,5	0,5...1,0	<0,06	0,06...0,2	0,2...0,5	0,5...1,0
automatischer Spezialkessel mit Gebläse	< 50	0,32	0,57	0,72	0,76	0,44	0,67	0,76	0,80
	> 50...120	0,38	0,62	0,75	0,78	0,50	0,71	0,79	0,82
	> 120...350	0,49	0,70	0,78	0,81	0,63	0,77	0,82	0,83
	> 350...1200	-	0,72	0,79	0,82	-	0,77	0,82	0,83
Umstell- und Wechsel-brandkessel	< 50	0,27	0,52	0,68	0,74	0,37	0,61	0,74	0,77
	> 50...120	0,37	0,60	0,72	0,75	0,48	0,69	0,76	0,79

feststoffbefeuerte Konstanttemperaturkessel				
Kesselbauart	Leistung $\dot{Q}_K$ [kW]	Kohle	Stückholz	Hackschnitzel, Pellets
automatischer Spezialkessel mit Gebläse	bis 50	0,71...0,79	0,63...0,71	0,73...0,81
	>50...120	0,73...0,81	0,65...0,73	0,76...0,84
	>120...1200	0,76...0,84	-	-
händisch be-schickter Kes-sel	bis 50	-	0,66...0,74	-

Niedertemperatur und Brennwertkessel					
Kesselbauart	Leistung $\dot{Q}_K$ [kW]	Gasbefeuerter Kessel		Ölbefeuerter Kessel	
		80/60°C 75/55°C	60/40°C, 55/45°C, Fußboden-heizung	80/60°C 75/55°C	60/40°C, 55/45°C, Fußboden-heizung
NT-Kessel mit Brenner ohne Gebläse	bis 120	0,78...0,86	0,81...0,90	-	-
	>120...1200	0,79...0,87	0,83...0,91	-	-
NT-Kessel mit Gebläse	bis 1200	0,79...0,87	0,83...0,91	0,81...0,89	0,85...0,93
Brennwertkessel	bis 50	0,83...0,91	0,87...0,95	0,81...0,90	0,86...0,94
	> 50...120	0,84...0,92	0,88...0,96	0,83...0,91	0,87...0,95
	>120...1200	0,85...0,93	0,89...0,97	0,84...0,92	0,88...0,96

Tabelle 67 Typische brennwertbezogene Nutzungsgrade für Heizkessel [15][16][50][51][76]

Die Standardwerte der Jahresnutzungsgrade in Tabelle 67 gelten für mittlere Betriebsbedingungen. In der Praxis können sowohl bessere als auch schlechtere Werte beobachtet werden. Die beiden Kesselmerkmale η_K und q_B, welche der Kennwertbildung zugrunde liegen, lassen sich auch messtechnisch im Feld mit einfachen Mitteln bestimmen, siehe 'Energieanalyse aus dem Verbrauch' (EAV) in Abschnitt 4.3.3.

Die Untersuchung der Brennwertkesseleffizienz (ca. 60 Kleinanlagen bis 35 kW, Brennstoff Erdgas) im Feld mit Hilfe der EAV ergab folgende Ergebnisse und Einflüsse [78]:

- mittlerer Wirkungsgrad: 90,0 % (brennwertbezogen)
- mittlere Anlagenauslastung 9,0 %
- mittlerer Nutzungsgrad 86,6 % (brennwertbezogen)

- Nutzungsgrad bei Thermen mit Überströmventil: 85,0 %
- Nutzungsgrad bei Kessel und Thermen ohne Überströmventil: 89,0 %
- Nutzungsgrad bei Aufstellung im beheizten Bereich: 88,5 %
- Nutzungsgrad bei Aufstellung im unbeheizten Bereich: 86,6 %

Der Nutzungsgrad ergibt sich aus einem oder gewichtet aus mehreren Wirkungsgraden sowie Angaben zur Betriebsbereitschaft. Die Normen zur EnEV verwenden Volllastwirkungsgrade η_{100} (Bild 50), Teillastwirkungsgrade bei 30 % Belastung $\eta_{30\%}$ (Bild 51) sowie Betriebsbereitschaftsverluste q_B (Bild 52).

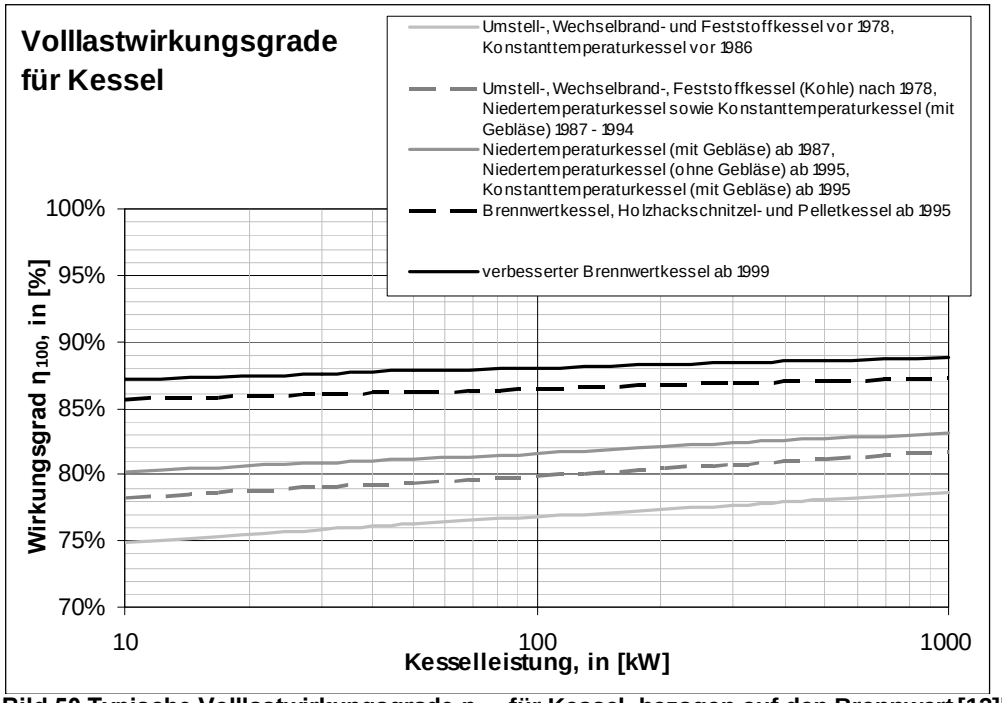


Bild 50 Typische Volllastwirkungsgrade η_{100} für Kessel, bezogen auf den Brennwert [13][15][16]

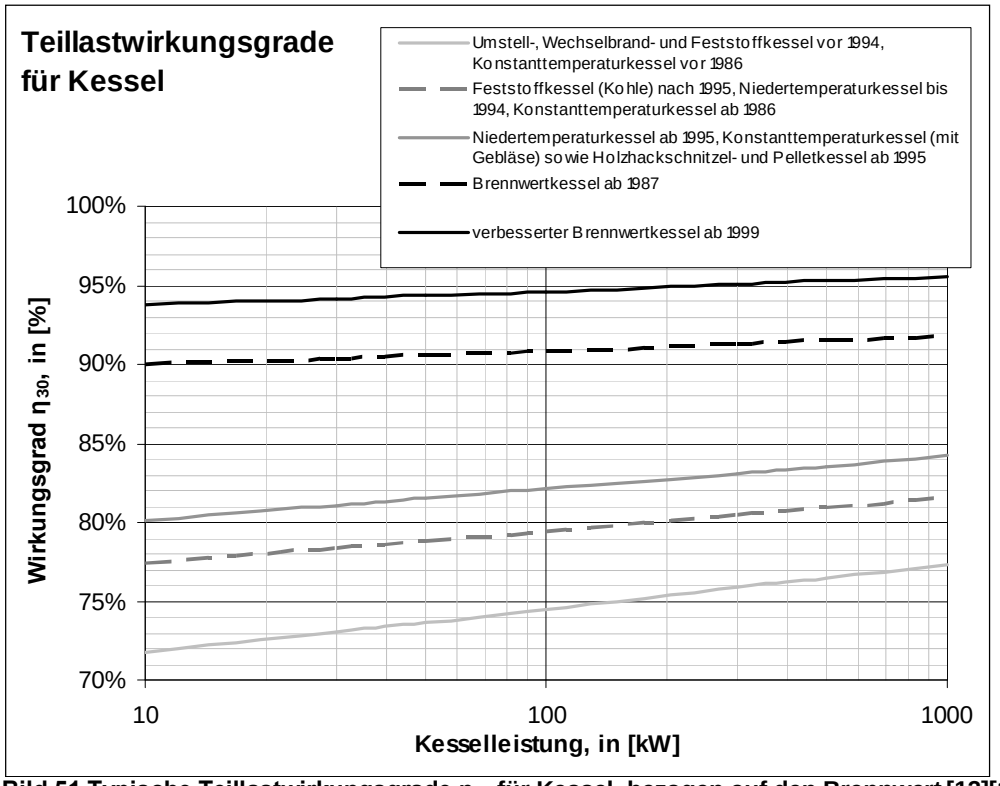


Bild 51 Typische Teillastwirkungsgrade η_{30} für Kessel, bezogen auf den Brennwert [13][15][16]

Die Kennwerte in Bild 50 und Bild 51 sind abweichend zur Darstellung in der Norm auf den Brennwert bezogen, weshalb keine Werte über 100 % erreicht werden. Die in den Bildern dargestellten Effizienzen beziehen sich auf bestimmte Prüftemperaturen, z. B. durchgängig auf 70°C als Kesselwassertemperatur bei der Volllastmessung. Eine Umrechnung auf andere Betriebsbedingungen ermöglichen die Angaben in Tabelle 68. Die Prüftemperaturen sind in der Tabelle erkennbar – bei ihnen erfolgt keine Korrektur.

Werte brennwertbezogen	Verbesserung des Wirkungsgrades	
	η_{100} bei Volllast	η_{30} bei Teillast
Konstanttemperaturkessel fossiler Festbrennstoff	-	0,04 %/K· (70°C – ϑ_{HK})
Konstanttemperaturkessel biogener Festbrennstoff	-	0,04 %/K· (70°C – ϑ_{HK})
Konstanttemperaturkessel Gas/Heizöl	-	0,04 %/K· (50°C – ϑ_{HK})
Niedertemperaturkessel Gas/Heizöl	0,04 %/K · (70°C – ϑ_{HK})	0,04 %/K· (40°C – ϑ_{HK})
Brennwertkessel Heizöl	0,04 %/K· (70°C – ϑ_{HK})	0,09 %/K· (30°C – ϑ_{RL})
Brennwertkessel Gas	0,18 %/K· (70°C – ϑ_{HK})	0,18 %/K· (30°C – ϑ_{RL})
mit ϑ_{RL} = Rücklauftemperatur, ϑ_{HK} = Heizkreistemperatur (Mittelwert Vor- und Rücklauftemperatur)		

Tabelle 68 Typische Wirkungsgradverbesserungen durch Temperaturänderung [13]

Beispiel: für einen verbesserten Heizölbrennwertkessel mit 100 kW Kesselleistung soll der Jahresnutzungsgrad bestimmt werden. Seine Belastung während der Brennerlaufzeit liegt bei 60 %. Die jahresmittlere Rücklauftemperatur liegt bei ϑ_{RL} = 38°C. Es werden zwei Wirkungsgrade bestimmt und gewichtet – in Anlehnung an die Vorgehensweise nach DIN V 18599:

- aus Bild 50 abgelesen: η_{100} (70°C) = 0,880 = 88,0 %
- Korrekturfaktor aus Tabelle 68 beträgt 0,04 %/K · (70°C – 38°C) = 1,28 %
- korrigierter Wirkungsgrad: η_{100} = 89,3 % (bei 100 % Belastung)

- aus Bild 51 abgelesen: η_{30} (30°C) = 0,947 = 94,7 %
- Korrekturfaktor aus Tabelle 68 beträgt 0,09 %/K · (30°C – 38°C) = -0,72 %
- korrigierter Wirkungsgrad: η_{30} = 94,0 % (bei 30 % Belastung)

- als typischer Mittelwert ergibt sich gewichtet nach der Belastung 92,0 %

Die Betriebsbereitschaftsverluste werden bezogen auf die Feuerungsleistung des Kessels ebenfalls dimensionslos abgegeben – q_B – siehe Bild 52. Die Prüftemperatur für diesen Verlust liegt einheitlich für alle Kessel bei 70°C. Die Umrechnung auf andere Betriebsbedingungen erfolgt mit nachfolgender Gleichung anhand der realen mittleren Heizkreistemperaturen ϑ_{HK} sowie der Innentemperatur des Aufstellraums ϑ_i:

$$q_B = q_{B,70} \cdot \frac{(\vartheta_{HK} - \vartheta_i)}{70°C - 20°C}$$

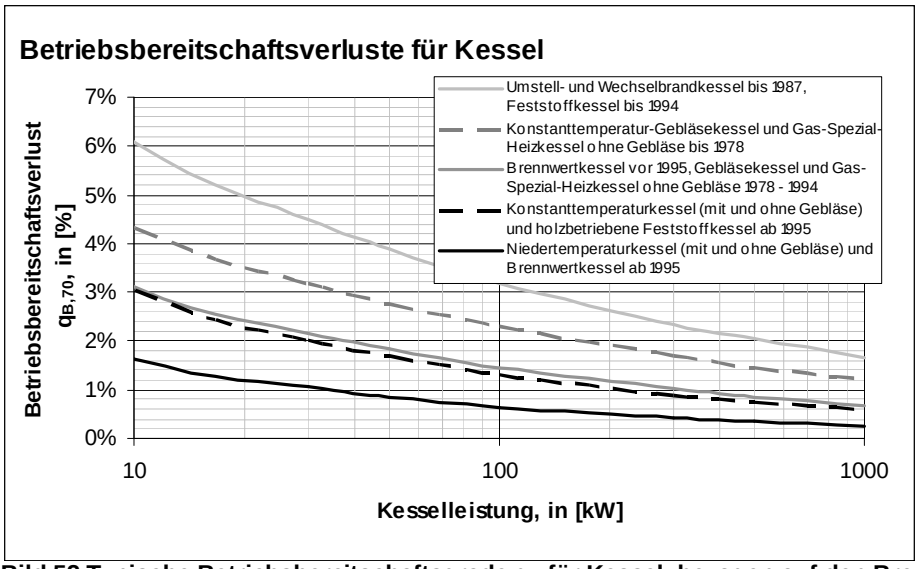


Bild 52 Typische Betriebsbereitschaftsgrade q_B für Kessel, bezogen auf den Brennwert [13][15][16]

Beispiel: für einen verbesserten Heizölbrennwertkessel mit 100 kW Kesselleistung soll der Jahresnutzungsgrad bestimmt werden. Die jahresmittlere Heizkreistemperatur liegt bei ϑ_{HK} = 43°C, er ist in 25°C warmer Umgebung aufgestellt. Während der Stillstandszeit hat er folgenden Verlust:

- aus Bild 52 abgelesen: $q_{B,70}$ (70°C) = 0,6 %
- Temperaturkorrektur: q_B = 0,6 % · (43-25) / 50 = 0,22 % = 0,0022

Der Jahresnutzungsgrad η_a ist eine Funktion der mittleren jährlichen Kesselbelastung φ:

$$\eta_a = \frac{\eta_K}{\left(\frac{1}{\varphi} - 1\right) \cdot q_B + 1}$$

Die Kesselauslastung φ ist das Verhältnis der mittleren abgegebenen Leistung $\dot{Q}_{outg}$ [kW] zur Kesselnennwärmeleistung $\dot{Q}_K$ [kW]. Sie kann auch durch das Verhältnis der Vollbenutzungsstunden des Kessels t_{VK} [h/a] bezogen auf die Kesselnennleistung zur gesamten Betriebszeit t [h/a] ausgedrückt werden.

$$\varphi = \frac{Q_{outg}}{\dot{Q}_K \cdot t} = \frac{\dot{Q}_{outg}}{\dot{Q}_K} = \frac{t_{VK}}{t}$$

Beispiel: der verbesserte Heizölbrennwertkessel mit 100 kW Kesselleistung ($\dot{Q}_K$) soll im Jahr 120 MWh/a Wärme produzieren (Q_{outg}). Er ist ganzjährig in Betrieb (t = 8760 h/a). Die Auslastung sowie der Nutzungsgrad ergeben sich zu:

- $\varphi = \frac{120.000\,kWh/a}{100kW \cdot 8760\,h/a} = 0{,}137 = 13{,}7\%$
- $\eta_a = \frac{0{,}920}{\left(\frac{1}{0{,}137} - 1\right) \cdot 0{,}0022 + 1} = 0{,}907 = 90{,}7\%$

Würde der Nutzungsgrad heizwertbezogen (auf einer Skala von 0 … 106 % bei Heizöl) angegeben, läge er entsprechend um den Faktor 1,06 höher, d.h. bei 96,2 %. Weitere Erläuterungen zu dieser Thematik siehe Abschnitt 2.5.

Wärmepumpen

Tabelle 69 zeigt typische Effizienzen von Wärmepumpen für die Gebäudebeheizung als mittlere Jahreswerte. Die Arbeitszahlen β (elektrischer Antrieb) bzw. Heizzahlen ζ (brennstoffbetriebene Wärmepumpe) sind abhängig von der Temperatur des angeschlossenen Heizkreises, der Wärmequellentemperatur sowie vom Gerätebaujahr. Arbeits- bzw. Heizzahlen sind dem Jahresnutzungsgrad η_a vergleichbar – Verhältnisse von Nutzen zu Aufwand. Allerdings enthält der Aufwand nicht die nutzbar gemachte Umweltwärme, sondern lediglich die (elektrische oder thermische) Antriebsenergie.

Die jeweils besseren Werte ergeben sich, wenn die Wärmepumpe nicht monovalent arbeitet, sondern in den Spitzenlastzeiten ein weiterer Wärmeerzeuger (elektrische Nachheizung, Kessel) zum Einsatz kommt. In der Praxis können sowohl bessere als auch schlechtere Werte beobachtet werden. Höhere Jahresarbeitszahlen sind bei exakter Dimensionierung der Wärmepumpe nach Bedarf des Gebäudes und bei regelmäßiger Wartung zu erwarten.

Wärmequelle		Arbeits- oder Heizzahl, in [-]						
		Erdreich (über Sole) Grundwasser		Außenluft		Kellerluft, Abluft mit WRG		Abluft ohne WRG
Bauart		vor 1995	ab 1995	vor 1995	ab 1995	vor 1995	ab 1995	
elektrisch β	55/45°C, 50/30°C	2,5...3,1	2,8...3,4	2,0...2,6	2,2...2,8	2,1...2,7	2,3...2,9	3,0...3,6
	Fußboden-heizung	2,8...3,4	3,2...3,8	2,2...2,8	2,6...3,2	2,3...2,9	2,7...3,3	3,4...4,0
Gasmo-torwärme-pumpen ζ	55/45°C, 50/30°C	1,3...1,6	1,4...1,7	1,2...1,5	1,3...1,6	-	-	-
	Fußboden-heizung	1,4...1,7	1,5...1,8	1,3...1,6	1,4...1,7	-	-	-
WRG = Wärmerückgewinnung								

Tabelle 69 Typische Arbeitszahlen für Wärmepumpen im Heizbetrieb [15][52][74][76] [eigene]

Verglichen mit den Normen und Regelwerken (z.B. EnEV-Nachweise) lassen sich im Feld geringere Arbeitszahlen für den Heizbetrieb feststellen. Die Tabelle 69 berücksichtigt dies. Es darf vermutet werden, dass vor allem höhere Temperaturen auf der Abnehmerseite dafür verantwortlich sind.

Die Arbeitszahl β innerhalb einer Zeitperiode t ergibt sich als integraler Mittelwert aller Leistungsziffern (ε oder COP, coefficient of performance) in dem bilanzierten Zeitraum. Dabei ergibt sich jede Leistungsziffer abhängig von der Verdampfungstemperatur T_0 sowie der Kondensationstemperatur T_C des Kältemittels. Es muss mit Kelvintemperaturen gerechnet werden (Celsiustemperatur + 273 K). Zusätzlich muss ein exergetischer Gütegrad ζ_{ex} berücksichtigt werden, der die Abweichung der realen Effizienz von der theoretischen Effizienz der Maschine ausdrückt.

$$\beta = \frac{1}{t} \cdot \int COP\, dt = \frac{Q_{outg}}{Q} \quad \text{mit} \quad COP = \zeta_{ex} \cdot \frac{T_C}{T_C - T_0}$$

Typische exergetische Gütegrade nach DIN V 18599 stellt Tabelle 70 zusammen. Mit ihrer Hilfe lassen sich für beliebige Quellen- und Senkentemperaturen Leistungszahlen COP bestimmen. Es ist anzumerken, dass die Verdampfungstemperatur unterhalb der Wärmequellentemperatur liegt ($\Delta\vartheta_u \approx$ -4 … -8 K) und die Kondensationstemperatur oberhalb der Temperatur des Abnehmers liegt ($\Delta\vartheta_o \approx$ 1 … 3 K). Beide Werte sind konstruktionsbedingt von Hersteller zu Hersteller verschieden, jedoch insgesamt bei der Berechnung zu berücksichtigen.

Wärmequelle	exergetischer Gütegrad ζ_{ex}, in [-]			
	vor 1979	1979...2993	1994...2009	nach 2010
Außenluft	0,27 ± 0,02	0,30 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,35 ± 0,02
Wasser	0,27 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,39 ± 0,03	0,39 ± 0,03
Erdreich (Sole)	0,33 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,45 ± 0,03	0,45 ± 0,03

Tabelle 70 Typische exergetische Gütegrade für Wärmepumpen nach [13]

Beispiel: für eine Außenluftwärmepumpe, Baujahr 2008 wird ein COP gesucht. Die Vorlauftemperatur des Heizkreises soll 30°C betragen (Fußbodenheizung), die Außenlufttemperatur 5°C (Mittelwert in der Heizperiode). Über- und Untertemperatur liegen bei $\Delta\vartheta_u$ = 6 K bzw. $\Delta\vartheta_o$ = 2 K. Es ergibt sich:

- exergetischer Gütegrad aus Tabelle 4 ζ_{ex} = 0,33
- Kondensationstemperatur T_C = (30 + 2 + 273) K = 305 K
- Verdampfungstemperatur T_0 = (5 - 6 + 273) K = 272 K
- $COP = 0{,}33 \cdot \frac{305}{305 - 272} = 3{,}05$

Werden Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung eingesetzt, so können diese als alleinige Erzeuger installiert sein (monovalenter Betrieb) oder durch einen oder weitere Wärmeerzeuger ergänzt sein (bivalenter Betrieb). Letzterer ist üblich, wobei unterschieden wird in Alternativbetrieb (Umschaltung auf den Spitzenlasterzeuger) oder Parallelbetrieb (Zuschalten des Spitzenlasterzeugers). Typische Bivalenzpunkte sind Außentemperaturen im Bereich -2°C bis +6°C. Es ergeben sich die Deckungsanteile nach Tabelle 71 für bivalente Systeme.

Einsatztemperatur der Wärmepumpe [°C]	Alternativbetrieb				Parallelbetrieb			
	minimale Normaußentemperatur, in [°C]							
	-10	-12	-14	-16	-10	-12	-14	-16
-6	0,97	0,96	0,94	0,90	0,99	0,99	0,98	0,97
-4	0,94	0,91	0,87	0,82	0,99	0,98	0,97	0,95
-2	0,89	0,84	0,78	0,73	0,98	0,96	0,94	0,92
0	0,82	0,76	0,68	0,63	0,96	0,93	0,90	0,87
2	0,71	0,65	0,57	0,52	0,92	0,88	0,85	0,81
4	0,59	0,53	0,45	0,40	0,87	0,83	0,79	0,74
6	0,45	0,39	0,32	0,27	0,81	0,77	0,72	0,67
8	0,28	0,23	0,21	0,19	0,75	0,71	0,65	0,59

Tabelle 71 Typische Deckungsanteile für Wärmepumpen im Heizbetrieb [74]

Je niedriger die Außentemperatur ist, bis zu der die Wärmepumpe eingesetzt wird, desto höher ist ihr jährlicher Anteil an der Jahresarbeit. An Standorten, an denen es kälter ist, ergibt sich ein kleinerer Deckungsanteil, d.h. ein größerer Restheizbedarf als in warmen Regionen.

Dezentrale Erzeuger

Tabelle 72 stellt Nutzungsgrade für dezentrale Raumheizsysteme zusammen. Die Werte für brennstoffbetriebene Geräte sind brennwertbezogen. Da die Stillstandsverluste i. A. eher gering ausfallen, entfällt hier die Unterteilung nach der Auslastung. Auch eine Brennwertnutzung ist nicht gegeben – es handelt sich um Geräte, die in ihrer Effizienz den Konstanttemperaturkesseln ähneln.

Nutzungsgrade η_a für Geräte zur Raumheizung (brennwertbezogen)			
Brennstoff und Geräteart		**bis 1985**	**nach 1985**
Gas	schornsteingebundenes Raumheizgerät	0,71	0,75
	Raumheizgerät mit Außenwandanschluss	0,68	0,71
Heizöl	Einzelofen mit Verdampfungsbrenner	0,71	0,75
Feststoffe	Kachelofen	0,65	
	Kohlebefeuerter eiserner Ofen	0,63	
Strom	Nachtspeicherofen bis 50kW	0,89	0,95
	Nachtspeicherofen >50kW	0,91	0,97
	Direktheizgeräte	0,98...1,00	

Tabelle 72 Jahresnutzungsgrade für dezentrale Geräte zur Heizung [13][51][52][76]

Anschluss an ein Wärmenetz

Erfolgt die Heizung über eine Nah- und Fernwärmeversorgung, ergeben sich die Bereitschaftsverluste der Übergabestation. Kennwerte – auch für die kombinierte Versorgung zusammen mit der Trinkwassererwärmung sind in Abschnitt 3.8.1. zusammengestellt. Dem Thema 'Kraft-Wärme-Kopplung' widmet sich Abschnitt 3.9.

Solare Heizungsunterstützung

Kollektorbezogene Erträge für kombinierte Heizungs- und Trinkwassersysteme liefert Abschnitt 3.8.1. Für die Heizungsunterstützung ist festzuhalten, dass Deckungsanteile im Bereich 5 % (Regelfall) … 15 % (Ausnahme) zu erwarten sind. Ein Einsatz von Solaranlagen zur Heizungsunterstützung ist nach Ergebnissen einer BMU-Studie [7] daher wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Hilfsenergien

Tabelle 73 zeigt verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Hilfsenergien bei der Erzeugung der Heizwärme. Die Kennwerte sind Jahreswerte und beziehen sich – unabhängig von der Datenquelle – auf die Wohnfläche.

Komponente	Leistung	Laufzeit	Energiemenge	Literatur
Regelung aller Erzeuger	0,2...0,3 W/m²	t_{HP}	0,4...0,6 kWh/(m²a)	[70]
Solepumpe bei Erdreichwärmepumpe	$1{,}3 \cdot A_{Wohn}^{0{,}9}$	$0{,}4 \cdot t_{HP}$	1,0...2,0 kWh/(m²a)	[15][52]
Grundwasserpumpe bei Grundwasserwärmepumpe	$2{,}3 \cdot A_{Wohn}^{0{,}9}$	$0{,}4 \cdot t_{HP}$	1,5...2,5 kWh/(m²a)	
Ölkessel	$170\ W + 1{,}95 \cdot \dot{Q}_{th}$	$0{,}5...0{,}7 \cdot t_{HP}$	0,7...1,5 kWh/(m²a)	[50][51]
Gaskessel	$20\ W + 0{,}85 \cdot \dot{Q}_{th}$	$0{,}5...0{,}7 \cdot t_{HP}$	0,5...1,0 kWh/(m²a)	
Holzpelletkessel	$70\ W + 2{,}9 \cdot \dot{Q}_{th}$	$0{,}5...0{,}7 \cdot t_{HP}$	1,5...2,0 kWh/(m²a)	[15][50][51]
Stückholzkessel	$10\ W + 10 \cdot \dot{Q}_{th}$	$0{,}1 \cdot t_{HP}$	0,1...0,2 kWh/(m²a)	[15]
Flächenbezug: Wohnfläche, $\dot{Q}_{th}$ = Nennwärmeleistung des Kessels in [kW], t_{HP} =Heizperiode				

Tabelle 73 Typische Hilfsenergien bei der Erzeugung der Heizwärme

Bei kombinierter Erzeugung von Trinkwarmwasser und Heizung gelten die Werte in Tabelle 73 anteilig für die Heizung. Die weiteren Hilfsenergien für die Trinkwassererwärmung werden in Abschnitt 3.8.1 zusammengestellt.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Zur Bestimmung der Effizienz von Wärmeerzeugern im Feld bietet sich der Einbau von Zählern an. Die erfassten Kennwerte werden anschließend mit der "Energieanalyse aus dem Verbrauch" ausgewertet. Das in Abschnitt 4.3.3 erläuterte Verfahren führt zu Kennwerten des Wirkungsgrades η_K, der Betriebsbereitschaftsverluste q_B, der Erzeugerauslastung φ sowie zu einem Jahresnutzungsgrad η_a.

Für Kessel und andere brennstoffbetriebene Erzeuger führen auch Abgasmessungen sowie Oberflächentemperaturmessungen zu einer Effizienzeinschätzung. Das Mess- und Auswerteverfahren ist in DIN V 18599-5 für die Heizung erläutert [13].

Einsparpotentiale

Mit Hilfe der Nutzungsgrade des vorliegenden Abschnittes 3.8.1 lassen sich aus der Verbesserung der Erzeugung resultierende Einsparungen bestimmen. Es gilt der allgemeine Zusammenhang für die absolute Einsparung an Endenergie Q_E:

$$\Delta Q_E = Q_{Nutz} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{alt}} - \frac{1}{\eta_{neu}}\right) = Q_{Nutz} \cdot \left(e_{alt} - e_{neu}\right).$$

Die relative Einsparung an Endenergie bezogen auf den Ursprungszustand ergibt sich zu:

$$\frac{Q_{E,neu}}{Q_{E,alt}} = \frac{\eta_{alt}}{\eta_{neu}} = \frac{e_{neu}}{e_{alt}}$$

Eingangsgrößen sind entweder die Nutzungsgrade η oder die Aufwandszahlen e des Erzeugers jeweils im Zustand vor und nach der Änderung. Es ist anzumerken, dass die propagierte Ersparnis durch einen Wärmeerzeugertausch in der Presse oft überzogen dargestellt wird ("… bis zu … %"). Der Nutzungsgrad von Altgeräten ist insgesamt nicht optimal; der übliche zu sanierende Kessel ist ein 20 Jahre alter Niedertemperaturkessel. 40 Jahre alte Konstanttemperaturkessel findet man nur selten, so dass die Maximaleinsparungen kaum erreicht werden können. Eine vernünftige und realistische Bewertung kann erfolgen, wenn der Nutzungsgrad messtechnisch bestimmt wurde. Darüber hinaus ist dafür Sorge zu tragen, dass der neu installierte Erzeuger optimale Betriebsbedingungen erhält.

3.6.2 Speicher

Pufferspeicher dienen der Zwischenlagerung von Heizwasser zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage. Sie sind typisch für Heizungen mit Solaranlage (Tag-Nacht-Ausgleich), Wärmepumpe (Ausgleich von Spitzenlasten und/oder tarifbedingten Sperrzeiten) und Holzkessel (Ausgleich von Abbrandzeiten und Bedarfszeiten abhängig von der Stückigkeit des Brennstoffs).

Für die Höhe der zu erwartenden jährlichen Wärmeverluste des Speichers Q_s [kWh/a] sind die Betriebszeit des Speichers t [h/a] und seine Verlustleistung bestimmend. Die Verlustleistung hängt von der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Speicherinnerem ϑ_i und der ihn umgebenden Luft ϑ_e sowie der Speicheroberfläche A_s und dem Wärmedurchgangskoeffizienten U_s ab. Es gilt:

$$Q_s = U_s \cdot A_s \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot t$$

Das Verfahren zur Bewertung der Trinkwarmwasserspeicher ist identisch, siehe Abschnitt 3.8.2.

Verluste der Betriebsbereitschaft

Die Transmissions- und Konvektionswärmeverluste von Speichern werden in den üblichen Bedarfsbilanzen aus Prüfstandswerten abgeleitet, die von Herstellern veröffentlich werden. Heizwasserspeicher werden mit 45 K Temperaturdifferenz zwischen Speicherinnerem und Aufstellraum geprüft. Das Umrechnungsverfahren auf andere Temperaturen ist in Abschnitt 3.8.2 beschrieben.

Tabelle 74 stellt typische Wärmeverlustleistungen von Pufferspeichern zusammen. Bei schlechter Dämmung (mit 2 cm) erhöht sich der Wert des üblichen Standards auf das Dreifache. Viele Speicher-(Flansch-)anschlüsse erhöhen in der Praxis die tabellierten Prüfstands- bzw. Normwerte bis zum Faktor 2. Je Anschluss kann mit zusätzlich ca. 20 … 40 W Verlustleistung gerechnet werden.

durchschnittliche Wärmeverlustleistung von Speichern, in [W]					
Aufstellung	**Volumen, in [l]**	**Auslegung auf 70/55 °C**		**Auslegung auf 55/45 °C**	
		Dämmung üblich (ca. 10 cm)	**Dämmung mäßig (ca. 5 cm)**	**Dämmung üblich (ca. 10 cm)**	**Dämmung mäßig (ca. 5 cm)**
außerhalb des beheizten Bereiches	100	70...90	110...1,4	30...50	50...80
	200	100...140	160...1,1	40...80	80...140
	500	200...250	300...0,8	100...150	150...250
	1000	300...400	500...0,6	150...200	250...400
	2000	400...600	800...0,5	200...400	400...600
innerhalb des beheizten Bereiches	100	50...70	80...110	10...30	20...50
	200	80...120	160...200	30...50	50...80
	500	150...200	250...350	50...100	80...150
	1000	200...300	400...500	100...150	100...200
	2000	300...400	600...800	150...200	200...400

Tabelle 74 Typische Verlustleistung für Heizwasserspeicher [15][70]

Speichervolumen

Installierte Pufferspeichervolumina hängen vom Verhältnis der Wärmeerzeugerleistung zum Maximalleistungsbedarf des Gebäudes sowie von der Dosierbarkeit des Brennstoffes ab (je größer die Holzstücke, desto größer der Speicher).

Folgende typische Volumina lassen sich überschlägig aus der Wärmeleistung des Erzeugers $\dot{Q}_{th}$ [kW] bzw. der Kollektorfläche A_{koll} [m²] ableiten:

- Holzkessel: $V = 400\ l + 26\ l / kW \cdot \dot{Q}_{th}$
- Wärmepumpe: $V = 80\ l + 6\ l / kW \cdot \dot{Q}_{th}$
- BHKW: $V = 100\ l + 10\ l / kW \cdot \dot{Q}_{th}$
- Solarthermie: $V = 50 \ldots 70\ l/m^2_{Koll} \cdot A_{koll}$

Es ist davon auszugehen, dass Einzelspeichervolumina über 1500 Litern selten vorkommen, sondern in Großanlagen eine Verschaltung mehrerer Einzelspeicher vorgenommen wird.

Hilfsenergie zur Speicherladung

Tabelle 75 zeigt einen Ansatz zur Bestimmung der Hilfsenergie für die Speicherladepumpe eines Pufferspeichers.

Komponente	Leistung	Laufzeit	Energiemenge	Literatur
Speicherladepumpe	$44\ W + 0{,}001 \cdot V_s^{1{,}43}$	$0{,}33 \cdot t_{HP}$	0,1...0,2 kWh/(m²a)	[15]
Flächenbezug: Wohnfläche, V_s = Volumen des Speichers, t_{HP} = Heizperiode				

Tabelle 75 Typische Hilfsenergien bei der Speicherung des Heizwassers

Typische Verlustkennwerte im Wohnungsbau

Im Wohnungsbau lässt sich das installierte Speichervolumen gut abschätzen. Daraus resultieren typische Verlustkennwerte für die Speicherung, siehe Tabelle 76. Die Wärmeverluste der Speicherung können, sofern sie im beheizten Bereich des Gebäudes auftreten, der inneren Fremdwärme Q_I zugerechnet werden. Sie beeinflussen im Mittel die Energiebilanz nur wenig, bedeuten jedoch für den Aufstellraum eine hohe punktuelle Wärmequelle (lokale Last).

Anzahl der Wohneinheiten			Wärmeverluste bezogen auf die Wohnfläche, in [kWh/(m²a)]		
			1 bis 2	3 bis 7	8 und mehr
Pufferspeicher für Wärmepumpenanlage	Keller/Dach	bis 1994	7	5	3
		ab 1995	5	3	1
	beheizter Bereich	bis 1994	5	3	2
		ab 1995	4	2	1
Pufferspeicher für Holzkesselanlage	Keller/Dach	bis 1994	12	8	4
		ab 1995	8	5	2
	beheizter Bereich	bis 1994	8	6	3
		ab 1995	6	4	2

Tabelle 76 Typische Speicherverluste im Wohnungsbau [15][52][70][eigene]

Beim Vergleich verschiedener Kennwertsammlungen ist zu prüfen, ob der absolute Verlust des Speichers ausgewiesen wird oder nur der nicht als Heizwärme nutzbare Anteil. Tabelle 76 zeigt Gesamtkennwerte.

Es ergibt sich beispielsweise für einen neuen Pufferspeicher einer Holzkesselanlage im beheizten Bereich ein Kennwerte von 6 kWh/(m²a). Ein Teil dieser Energiemenge ist je nach Aufstellraum als Heizwärme nutzbar, so dass sich ein Effektivverlust von 1 … 5 kWh/(m²a) ergeben kann.

Einsparpotentiale

Die Einsparpotentiale, die sich aus dem Verzicht von Speicherung ergeben bzw. die Zusatzverluste für die Installation eines Speichers ergeben sich aus den Kennwerten beispielsweise der Tabelle 76.

Ein Pufferspeicher gleicht Angebots- und Abnahmeleistung aus. Es sollten jedoch Pufferspeicher vermieden werden, die nicht diesem Zweck dienen: wie z. B. zur Verbesserung von hydraulischen Problemen (Fehlströmungen aufgrund falscher Pumpendimensionierung), der Kompensation fehlenden Wasserinhalts im Erzeuger (typisch für Thermen) oder der Verminderung der Schalthäufigkeit von Kesseln dienen. In diesen Fällen ist durch eine Fachplanung eine Ersatzlösung ohne Puffer zu erarbeiten.

In anderen Anwendungsfällen ist auf ausreichende Dämmung der Anschlüsse, Flansche, Blindstopfen etc. zu achten. Eine Minderung der Verluste um 30 … 50 % ist erreichbar.

3.6.3 Verteilnetze

Für die Höhe der zu erwartenden jährlichen Wärmeabgabe des Verteilnetzes Q_d [kWh/a] sind die Betriebszeit t des Netzes [h/a] (meist die Länge der Heizperiode) und seine Verlustleistung bestimmend. Die Verlustleistung hängt von der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Rohrinnerem ϑ_i und der umgebenden Luft ϑ_e sowie der Rohrlänge L und dem längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten U_R ab. Es gilt für jeden Rohr- und Zeitabschnitt:

$$Q_d = U_R \cdot L \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot t$$

In der Praxis besteht das Netz aus verschiedenen Rohrabschnitten mit unterschiedlichen Dämmdicken, Innentemperaturen (abhängig vom Eingriff der Regler) und Verlegeorten (und damit Umgebungstemperaturen). Es erfolgt eine Summenbildung unter mehrfacher Anwendung der Gleichung getrennt für die jeweiligen Rohr- und Zeitabschnitte.

Die Wärmeabgabe insbesondere der Heizungsverteilleitungen wird in den unterschiedlichen Bilanzverfahren verschieden berücksichtigt. Dies ist beim Kennwertvergleich zu berücksichtigen.

- die Wärmeabgabe von Leitungsabschnitten außerhalb des beheizten Bereichs (Keller, Erdreich usw.) wird als "Verlust" deklariert und in voller Höhe berechnet,
- die Wärmeabgabe von Leitungsabschnitten innerhalb des beheizten Bereichs wird
    - gar nicht berücksichtigt, in der Annahme dass vereinfachend die Wärmeabgabe gleichzusetzen ist mit Wärmeabgabe der Heizflächen – diese Vorgehensweise findet sich im 'Energiepass Heizung und Warmwasser' des IWU[51],
    - teilweise als Verlust angesehen, z.B. nach DIN V 4701-10 [15]; für die Anbindeleitungen an die Heizflächen werden pauschal 90 % der Wärmeabgabe als nutzbar und 10 % als nicht nutzbar (= berechneter Verlust) angesehen; bei Steigesträngen und Verteilleitungen liegt das angenommene Verhältnis von 85 % : 15%; die unter "Verteilverluste" bestimmten Energiemengen geben daher nicht die Gesamtwärmeabgabe des Netzes wieder, sondern nur den nicht nutzbaren Anteil,
    - komplett als Verlust und gleichzeitig interne Fremdwärme bestimmt, z.B. in der DIN V 18599 [13]; die Höhe der Nutzbarkeit der Leitungsabwärme hängt von der Höhe der solaren und inneren Fremdwärme insgesamt ab; die unter "Verteilverluste" berechneten Energiemengen geben die Gesamtwärmeabgabe des Netzes wieder.

In älteren Verfahren – z.B. der VDI 2067, Ausgabe der 1980/90er Jahre [74] – wird oft ein pauschaler Nutzungsgrad der Verteilung definiert. Dieser setzt die folgenden beiden Energiemengen ins Verhältnis: die Energiemenge, die aus einem Verteilsystem jährlich entnommen wird und die Energiemenge, die dafür hineinfließen muss.

Temperaturen in Heizungsnetzen

Die maßgebliche Temperatur im Rohr ϑ_i [°C] ist üblicherweise variabel im bilanzierten Zeitintervall t [h/a] – außer bei sehr klein gewählten Zeitabschnitten (z.B. Stunden), innerhalb denen von stationären Bedingungen ausgegangen wird.

Bei Jahres- und Monatsbilanzen wird für die periodisch durchflossenen Leitungsabschnitte (Anbindeleitungen) bzw. bei Netzen mit Regelfunktionen (Witterungsführung, Zeitprogramme) mit repräsentativen Mittelwerten im Zeitintervall operiert. Üblich ist die Annahme, dass das Netz belastungsabhängig nach der Außentemperatur geregelt wird und sowohl Vor- als auch Rücklauftemperatur von dieser Belastung abhängen.

Die Belastung φ ergibt sich aus dem Vergleich maximaler Temperaturdifferenzen (Auslegungsfall) zu mittleren Temperaturdifferenzen (im Bilanzintervall):

$$\varphi = \frac{(\vartheta_i - \vartheta_e)_{mittel}}{(\vartheta_i - \vartheta_e)_{\max}}$$

Mit der Belastung kann aus einer Auslegungsvorlauftemperatur $\vartheta_{V,max}$ die mittlere Vorlauftemperatur $\vartheta_{V,m}$ bestimmt werden. Es ist ein Heizflächenexponent n zu berücksichtigen (Heizkörper: n ≈ 1,3 und Flächenheizung n ≈ 1,1).

$$\vartheta_{V,m} = \varphi^{1/n} \cdot (\vartheta_{V,\max} - \vartheta_{V,\min}) + \vartheta_{V,\min}$$

Als minimale Vorlauftemperatur $\vartheta_{V,min}$ wird häufig die Raumtemperatur ϑ_i angenommen. Der Ansatz zur Bestimmung der mittleren Rücklauftemperatur $\vartheta_{V,m}$ ergibt sich analog. Für das Netz wird häufig der Mittelwert aus beiden Temperaturen angesetzt.

Zahlenbeispiel für ein Bürogebäude mit mittlerer Innentemperatur 20°C am Standort Braunschweig (minimale Außentemperatur -14°C, mittlere Außentemperatur in der Heizperiode 5,5°C) sowie einer Rohrnetzauslegung mit 50/30°C (Heizkörper):

- $\varphi = \frac{20 - 5{,}5}{20 - (-14)} = 0{,}426$
- $\vartheta_{V,m} = 0{,}426^{1/1,3} \cdot (50 - 20)K + 20°C = 35{,}6°C$
- $\vartheta_{R,m} = 0{,}426^{1/1,3} \cdot (30 - 20)K + 20°C = 25{,}2°C$
- die mittlere repräsentative Netztemperatur liegt bei 30,4°C

Diese Vorgehensweise ist als vereinfacht anzusehen. Folgende Annahmen wurden getroffen, die in der Realität anders aussehen können:

- die Belastung des Netzes hängt ausschließlich von der Außentemperatur ab; in der Realität spielen zumindest für die Rücklauftemperatur auch die genutzten Wärmegewinne eine Rolle (welche zu geringeren Rücklauftemperaturen führen),
- der Ansatz unterstellt passende Heizflächen ohne Überdimensionierung, so dass es tatsächlich zu der angesetzten Rücklauftemperatur im Auslegungsfall kommt,
- die Vorlauftemperatur kann nach einer Heizkurve geregelt sein, die nicht dem angenommenen Ansatz folgt, insbesondere kann der Fußpunkt der Heizkurve auf einen anderen Wert zulaufen als die Innentemperatur (Parallelverschiebung),
- es kann eine grundsätzlich andere Art der Regelung vorliegen, z.B. eine Referenzraumregelung, wobei auch in diesem Fall die Netztemperatur grundsätzlich dem Bedarf folgen wird,
- sofern Netze Überströmeinrichtungen zwischen Vor- und Rücklauf haben (sowie auch in Einrohrheizungen) ergeben sich höhere Rücklauftemperaturen als berechnet.

Die genannten Effekte lassen sich bei der energetischen Bewertung berücksichtigen. Dennoch ist der o. g. Näherungsansatz ein guter Einstieg in die Bewertung. Konkrete Zahlenwerte für andere Temperaturen sind Bild 54 zu entnehmen.

Leitungslängen

Zur Abschätzung von Leitungslängen existieren diverse Ansätze. Es wird regulär unterschieden in folgende Teilabschnitte:

- Verteilung: waagerechte Ebene mit zentralen Rohrabschnitten, die Heizwasser für mehr als eine Heizfläche transportieren,
- Steigestränge: vertikale Leitungen mit zentralen Rohrabschnitten, die Heizwasser für mehr als eine Heizfläche transportieren,
- Anbindeleitungen: an die Steigestränge oder die Verteilebene anschließende Rohrabschnitte zur Einzelversorgung der Heizflächen, regulär selbsttätig absperrbar durch ein Regelventil.

In der Praxis ergibt sich eine Fülle von Ausführungsvarianten. Im Altbau typisch ist die überwiegend vertikale Erschließung über Steigestränge und kurze Anbindeleitungen an die Heizkörper. Im Neubau finden sich häufig Systeme mit Leitungsverlegung im Estrich, ausgehend von einem Zentralverteiler pro Wohn- oder Nutzeinheit. Die Erschließung über etagenweise angeordnete Ringe kommt unabhängig vom Baualter häufig zum Einsatz. Weitere Details sind der Literatur zu entnehmen.

Die genannten Grundtypen lassen sich über Formelansätze typologisieren. Die Literatur liefert theoretische Ansätze aus Überlegungen zu Grundrissformen (Tabelle 77, Tabelle 78) sowie Ableitungen aus der Statistik (Tabelle 79, Tabelle 80). Im konkreten Einsatzfall kann nicht vorhergesagt werden, welcher Ansatz die Realität am besten abbildet. Für den Einstieg in die Thematik wird auf die Formelansätze aus Tabelle 79 bzw. Bild 53 verwiesen.

Einflussgrößen auf die Längenschätzung sind versorgte Flächen, ferner auch Geschosshöhen sowie ggf. Gebäudebreiten und -längen.

Tabelle 77 zeigt einen Schätzansatz des Instituts Wohnen und Umwelt für den Wohnungsbau. Die Längen ergeben sich aus der charakteristischen Gebäudelänge und -breite. Die Gebäudelänge ist für nicht rechteckige Grundrisse die Summe aller langen Seiten bei Zerlegung der Grundfläche in Rechtecke. Vereinfacht ergibt sie sich aus der Grundrissfläche des Gebäudes und einer angenommenen Breite von 10 m. Berechnet wird nur die Leitungslänge im unbeheizten Bereich.

Kenngröße	Verteilleitungen L_V in [m]	Steigestränge L_S in [m]	Anbindeleitungen L_A in [m]
Verteilung komplett im unbeheizten Bereich	$2 \cdot (2a + L_{char})$	vernachlässigt	vernachlässigt
Verteilung teilweise im unbeheizten Bereich	$2 \cdot (a + 0{,}5\ L_{char})$	vernachlässigt	vernachlässigt
L_{char} = charakteristische Länge in [m], a = charakteristische Breite in [m]			

Tabelle 77 Standardleitungslängen für Heizwassernetze im Wohnungsbau nach IWU [50]

Tabelle 78 zeigt die Ansätze der DIN V 4701-10 für den Wohnungsbau. Die Schätzung basiert auf der Nutzfläche A_N der EnEV. Sie ist ca. 20 % größer als die reale Wohnfläche. Zur Flächenumrechnung im Detail siehe Abschnitt 4.7. unterschieden wird in zwei Netztypen je nach Lage der Steigestränge.

Kenngröße	Verteilleitungen L_V in [m]	Steigestränge L_S in [m]	Anbindeleitungen L_A in [m]
Leitungslänge bei außenliegenden Strängen	$28{,}5 + 0{,}05 \cdot A_N$	$0{,}075 \cdot A_N$	$0{,}55 \cdot A_N$
Leitungslänge bei innenliegenden Strängen	$27{,}5 + 0{,}025 \cdot A_N$	$0{,}075 \cdot A_N$	$0{,}55 \cdot A_N$
A_N = Gebäudenutzfläche nach EnEV in [m²], berechnet aus dem umbauten Volumen V_e			

Tabelle 78 Standardleitungslängen für Heizwassernetze im Wohnungsbau nach DIN 4701 [15]

Tabelle 79 gibt die Formelansätze abhängig von der beheizten Nettogrundfläche A_{NGF} und der Geschosszahl wieder. Die Werte entstammen einem Forschungsvorhaben des BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung). Es wird unterschieden in vier Netztypen sowie Varianten mit Fußboden- und Einrohrheizung.

Netztyp	Verteilleitungen L_V in [m]*	Steigestränge L_S in [m]*	Anbindeleitungen L_A in [m]**
Etagenringtyp	$30\ m + 2{,}3\ m \cdot [A_{NGF}]^{0{,}79}$	$2{,}56\ m \cdot [A_{NGF}]^{0{,}1} + 0{,}0006\ m \cdot A_{NGF} \cdot h_G \cdot n$	$0{,}06\ m \cdot [A_{NGF}]^{1{,}13}$
Etagenverteilertyp**	$30\ m + 0{,}17\ m \cdot [A_{NGF} / n]^{1{,}05}$	$0{,}0080\ m \cdot [A_{NGF}]^{1{,}12}$	$0{,}30\ m \cdot [A_{NGF}]^{1{,}11}$
Steigestrangtyp	$30\ m + 2{,}6\ m \cdot [A_{NGF} / n]^{0{,}72}$	$0{,}008\ m \cdot [A_{NGF}]^{1{,}39}$	$0{,}25\ m \cdot A_{NGF}$
Strahlungs-/Luftheizung	$0{,}35\ m \cdot [A_{NGF}]^{0{,}90}$	$0{,}0007\ m \cdot A_{NGF} \cdot h_G$	$0{,}10\ m \cdot [A_{NGF}]^{1{,}13}$
* bei Einrohrheizungen halbe Werte; ** bei Fußbodenheizungen entfallen die Anbindeleitungen; A_{NGF} = Nettogrundfläche in [m²], n = Geschosszahl in [-], h_G = Geschosshöhe in [m]			

Tabelle 79 Standardleitungslängen für Heizwassernetze im Wohnungsbau nach BBSR Projekt [42]

Bild 53 zeigt eine grafische Aufbereitung der Werte für die ersten drei tabellierten Netztypen. Abhängig vom Gebäudetyp und der versorgten Fläche variiert die Verlegedichte. Ausgewertet sind das kleine Mehrfamilienhaus mit 4 Wohnungen in 2 Etagen mit 300 m² (links) bis zum großen 8-etagigen Mehrfamilienhaus mit 48 Wohnungen auf 3600 m² (rechts).

Es ist bei zentraler Versorgung von einer typischen Verlegedichte der Leitungen im Bereich 0,6 … 0,7 m/m² auszugehen. Davon liegen 0,2 … 0,3 m/m² ggf. im unbeheizten Bereich.

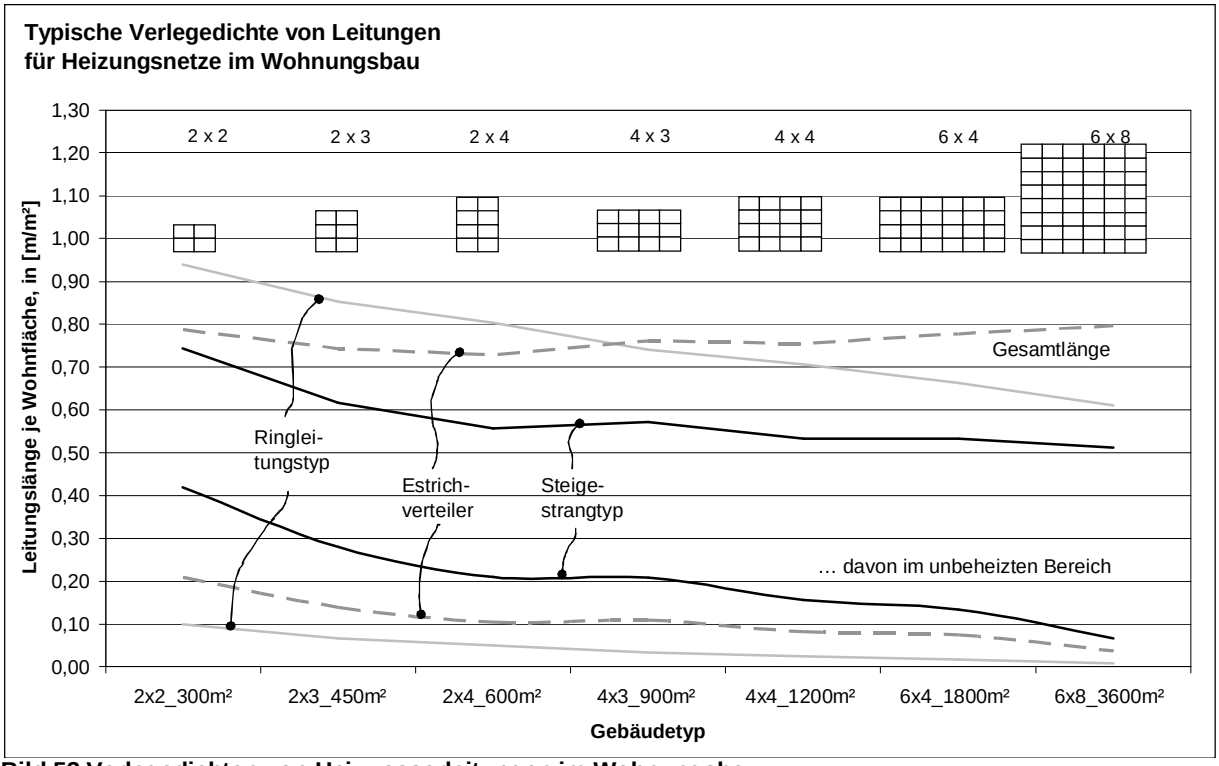


Bild 53 Verlegedichten von Heizwasserleitungen im Wohnungsbau

Ablesebeispiel: im 12-Mehrfamilienhaus mit 3 Geschossen (Bild 53, Mitte) und Erschließung über Steigestränge ist eine Verlegedichte von 0,58 m/m² typisch (→ 522 m Leitungen). Davon liegen etwa 0,20 m/m² als Verteilung ggf. im unbeheizten Keller (→ 180 m), der Rest im beheizten Bereich: 0,38 m/m² (→ 342 m).

Die Datenbasis mit Kennzahlen für den Nichtwohnungsbau ist deutlich geringer. Tabelle 80 zeigt die Ansätze der DIN V 18599 für die Beheizung verschiedener Gebäudetypen. Der formelmäßige Grundansatz ist häufig ähnlich, allerdings werden verschiedene Parameter verwendet, die maßgeblich für die Verlegedichte sind.

Gebäudegruppe	**Verteilleitungen* L_v in [m]**			**Steigestränge* L_S in [m]**			**Anbindeleitungen** L_A in [m]**	
	a	b	c	d	e	f	g	j
Netztyp I (Etagenringtyp)								
Grundgleichung	$a + b \cdot A_{NGF}^c$			$d \cdot A_{NGF}^e + f \cdot A_{NGF} \cdot h_G \cdot n$			$g \cdot A_{NGF}^j$	
1	30	2,3	0,79	2,56	0,1	0,0006	0,06	1,13
Grundgleichung	$a + b \cdot A_{NGF}^c$			$d \cdot A_{NGF} + e \cdot (h_G \cdot n)^f$			$g \cdot A_{NGF}^j$	
2	30	1,5	0,79	0,0050	1,50	1,0	0,05	1,00
3	30	1,0	0,79	0,0033	0,90	1,2	0,10	1,00
4	30	0,8	0,80	0,0003	1,75	0,9	7,10	0,42
5	30	1,0	0,79	0,0033	0,90	1,2	7,10	0,42
Netztyp II (Etagenverteilertyp)**								
Grundgleichung	$a + b \cdot (A_{NGF}/n)^c$			$e \cdot A_{NGF}^f$			$g \cdot A_{NGF}^j$	
1	30	0,17	1,05	-	0,0080	1,12	0,30	1,11
2	30	0,45	0,84	-	0,0035	1,23	0,17	1,00
3, 4	30	0,18	1,15	-	0,3000	0,70	0,13	1,20
5	30	0,45	0,84	-	0,0035	1,23	0,20	1,20
Netztyp III (Steigestrangtyp)								
Grundgleichung	$a + b \cdot (A_{NGF}/n)^c$			$e \cdot A_{NGF}^f$			$g \cdot A_{NGF}^j$	
1	30	2,6	0,72	-	0,008	1,39	0,25	1,00
Grundgleichung	$a \cdot L_{char} + b \cdot (A_{NGF}/n)^c/L_{char}$			$e \cdot A_{NGF} \cdot h_G$			$g \cdot A_{NGF}^j$	
2	2	0,022	2	-	0,026	-	0,02	1,18
3	2	0,020	2	-	0,042	-	0,23	1,00
4, 5	2	0,020	2	-	0,009	-	2,50	0,65

* bei Einrohrheizungen halbe Werte; ** bei Fußbodenheizungen entfallen die Anbindeleitungen; A_{NGF} = Nettogrundfläche [m²], h_G = Geschosshöhe [m], n = Anzahl der Geschosse, L_{char} = charakteristische Länge [m]

Gebäudegruppen:
- 1: Wohnen, Büro, Praxen, Hotels, Seminar, Bettenzimmer, Wohnheime, Kindergarten, Pflegeheime
- 2: Schule, Veranstaltungshalle, Flughafen, OP, Labor, Rechenzentrum, Bibliothek, Museum, Theater, Hörsaal
- 3: Verkaufsgebäude, Küchen, Restaurants, Kantine, auch Fleischerei, Bäckerei, Frisöre
- 4: Schwimmhalle, Turnhalle, Umkleiden, auch Umkleidegebäude von Produktionsstätten
- 5: Produktionseinrichtungen, Werkhallen, Werkstätten

Tabelle 80 Formeln für Gesamtleitungslängen Heizung, zentrale Netze [13]

Leitungsdämmung

Maßgeblich für die Wärmeübertragung ist die wärmeübertragende Oberfläche eines Rohres. Da bei Kreisquerschnitten an jeder Grenzschicht eine andere Hüllfläche zu verzeichnen ist, ergeben sich aufwändige Berechnungsgleichungen für den flächenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten. Die üblichen Bedarfsbilanzen vereinfachen die Berechnung. Es werden längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten U_R [W/(mK)] für Rohre eingeführt, die durchmesserabhängig sind.

Die Energieeinsparverordnung setzt heute verbindliche Anforderungen für die Dämmung von wärmeführenden Leitungen. Für die Heizung kann das Anforderungsniveau wie folgt zusammengefasst werden:

- Leitungsabschnitte, die im unbeheizten Bereich oder in Schächten liegen, erhalten ca. 100 % Dämmung (Dämmdicke entspricht Innendurchmesser),
- Leitungsabschnitte, die an Außenluft grenzen, erhalten 200 % Dämmung (Verlegung im Erdreich regelt die EnEV nicht),

- Leitungen innerhalb des beheizten Bereichs im Estrich werden mit 6 mm, in anderen Bauteilen mit 50 % gedämmt, wenn es sich um Verlegeorte/Bauteile zwischen verschiedenen Nutzern handelt und die Leitungen nicht absperrbar sind,
- Leitungen innerhalb des beheizten Bereichs können ungedämmt bleiben, wenn es sich um eine Verlegung in einer Nutzeinheit handelt und die Leitungen absperrbar sind.

Die EnEV bezieht sich auf Dämmstoffe mit Wärmeleitfähigkeiten von λ = 0,035 W/(mK). Die sich ergebenden U_R-Werte der Leitungen ist identisch mit denen der Trinkwassernetze, siehe Tabelle in Abschnitt 3.8.3.

Für neue Netze mit 100 %-Dämmung (Dämmdicke entspricht dem Rohrdurchmesser) ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von U_R = 0,2 W/(m²K). Im Altbau sind Matten aus Mineralfasern anzutreffen, die teils mit Pappe ummantelt, teils vergipst sind. Auch Kieselgur-, und Magnesiamassen als äußere Bekleidung der Dämmung sind anzutreffen. Typisch sind Wärmedurchgangskoeffizienten im Bereich 0,35 … 0,45 W/(mK) [52] – sofern die äußeren Schalen intakt sind.

Längenbezogene Verlustkennwerte

Aus dem Wärmedurchgangskoeffizient U_R sowie der Temperaturdifferenz zwischen Rohrinnerem und Verlegeort kann ein zusammengefasster Kennwert gebildet werden: der längenbezogene Wärmeverlust, siehe Bild 54.

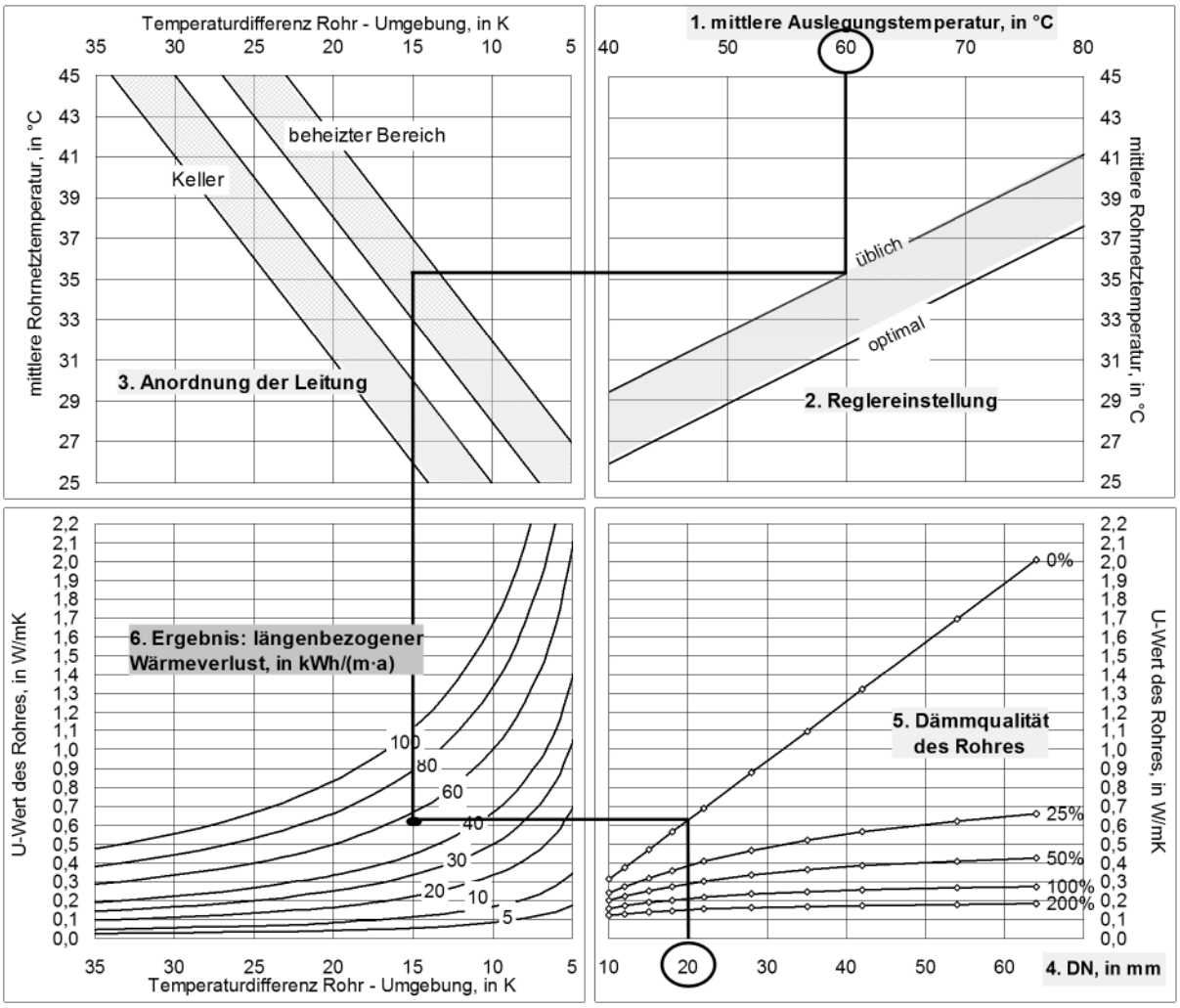


Bild 54 Typische längenbezogene Wärmeverluste für Heizungsnetze

Die mittlere Temperatur eines Rohrabschnittes ϑ_i ergibt sich unter der Annahme einer vorhandenen witterungsgeführten Regelung sowie einer Nachtabsenkung von ca. 6 … 8 h/d. Als Betriebszeit wird die Länge einer typischen Heizperiode t_{HP} (bei 15°C Heizgrenze) unterstellt.

Ablesebeispiel:

- Mehrfamilienhaus, 1980er Jahre, Auslegung auf 70/50°C
- Verteilung: DN 28 … 35 im Keller, 100 % Dämmung
- Steigestränge: ca. DN 25, ohne Dämmung
- Anbindeleitungen: ca. DN 20, ohne Dämmung

Für die einzelnen Rohrabschnitte werden folgende längenbezogene Verluste bestimmt; für die Anbindeleitungen ist das Ablesebeispiel eingetragen:

- Anbindeleitungen: 60°C Solltemperatur (Schritt 1, oben rechts) übliche Reglereinstellung (Schritt 2, Mitte rechts) → ca. 35°C mittlere Medientemperatur (oben rechts, rechte Achse); Lage im beheizten Bereich (Schritt 3, oben links) → ca. 15 K Temperaturdifferenz zwischen Rohr und Umgebung (oben links, obere Achse); ca. DN 20 (Schritt 4, unten rechts) und 0 % Dämmung (Schritt 5, Mitte rechts) → U-Wert ca. 0,63 W/(m²K) (unten rechts, rechte Achse); längenbezogener Wärmeverlust (Schritt 6, unten links) → q_d = 55 kWh/(m a)
- Steigestränge: ca. 15 K Temperaturdifferenz zum Wohnraum, ca. U = 0,80 W/(m²K) → q_d = 70 kWh/(m a)
- Verteilung: ca. 23 K Temperaturdifferenz zwischen Rohr und Keller; ca. U = 0,22 W/(m²K) → q_d = 33 kWh/(m a)

Typische Verlustkennwerte im Wohnungsbau

Aus den längenbezogenen Verlusten und der Verlegedichte lässt sich der Verteilverlust berechnen. Typische Kennwerte für den Wohnungsbau zeigt Tabelle 81. Die angegebenen Verluste gelten für die zentralen Verteilleitungen außerhalb der thermischen Hülle.

Baustandard	Gebäude vor WSchV77	WSchV77-84	WSchV95, EnEV02-14	Niedrigenergie- und Passivhaus
Ausführungs-standard	50 % EnEV	75 % EnEV	EnEV	150...200 % EnEV
Verlust $q_{d,H}$ [kWh/(m²a)]	10...25	5...20	5...10	2...6

Tabelle 81 Typische Verteilverluste für die Heizungsverteilung im unbeheizten Bereich [70]

Neben den tabellierten Werten ergeben sich Wärmeabgaben der Rohre innerhalb des beheizten Bereichs. Hier sind zwar geringere Temperaturdifferenzen (Rohr ⇔ Umgebung) festzustellen, jedoch deutlich höhere Rohranteile. Für ein typisches Mehrfamilienhaus aus den 1980ern ergibt sich Folgendes (Fortführung des Ablesebeispiels aus Bild 53 und Bild 54):

- Rohrleitungen im beheizten Bereich:
  - Verlegedichte 0,38 m/m²
  - Steigestränge q_d = 70 kWh/(m a)
  - Anbindeleitungen q_d = 55 kWh/(m a)
  - es überwiegen die Steigestränge bei dieser Art der Erschließung
  - näherungsweiser Kennwert: 0,38 m/m² · 65 kWh/(m a) = 24,7 kWh/(m² a)
- Rohrleitungen im unbeheizten Bereich:
  - Verlegedichte 0,20 m/m²
  - Verteilleitungen im Keller q_d = 33 kWh/(m a)
  - näherungsweiser Kennwert: 0,20 m/m² · 33 kWh/(m a) = 6,6 kWh/(m² a)

Neben den Verlusten im Keller von knapp 7 kWh/(m²a) fallen auch im beheizten Bereich Wärmemengen von etwa 25 kWh/(m²a) an. Damit tragen die Rohrleitungen geschätzt zu etwa einem Drittel zur Deckung des Heizwärmebedarfs bei. In einem gut gedämmten Niedrigenergiehaus mit geringerem Heizwärmebedarf wäre eine solche Erschließung über ungedämmte Steigestränge weder erlaubt (siehe EnEV) noch sinnvoll (Überwärmungsgefahr durch ungeregelte Wärmeabgabe).

Kritisch aus Sicht der Überwärmungsproblematik sind:

- bei vertikaler Erschließung kleine Räume mit einem durchlaufenden Steigestrang (hohe lokale Verlegedichte), insbesondere in der Nähe des Strangbeginns (hohe Wahrscheinlichkeit der Rohrdurchströmung),
- bei Erschließung über Etagen-Estrichverteiler die Räume, meist Flure, in denen der Verteiler liegt (Verlegedichte und Rohrdurchströmung),
- bei Erschließung über Ringleitungen Eckräume (hohe lokale Verlegedichte), insbesondere in der Nähe des Ringanfangs (hohe Wahrscheinlichkeit der Rohrdurchströmung).

Hilfsenergie

Mit der Heizwärmeverteilung sind Pumpenstromaufwendungen verbunden. Tabelle 82 zeigt verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Hilfsenergie für die Umwälzpumpe. Die Kennwerte sind Jahreswerte und beziehen sich – unabhängig von der Datenquelle – auf die Wohnfläche.

Gebäudeart/Netzart	Leistung	Laufzeit	Energie-menge	Literatur
Ein- und Zweifamilienhaus	1,0...2,5 ‰ · $\dot{Q}_{th}$	5000...7000 h/a	2...3 kWh/(m²a)	[15][50] [51][52]
Mehrfamilienhaus	0,7...1,0 ‰ · $\dot{Q}_{th}$		1...2 kWh/(m²a)	
Heizkörperheizung	0,2...0,7 W/m²		0,7...1,5 kWh/(m²a)	
Fußbodenheizung	0,5...1,2 W/m²		1,0...2,5 kWh/(m²a)	
Flächenbezug: Wohnfläche, $\dot{Q}_{th}$ = Heizlast				

Tabelle 82 Typische Hilfsenergien für Heizungspumpen

Die Kennwerte fallen deutlich geringer (als die Tabellenwerte) aus, wenn Hocheffizienzpumpen installiert werden, deren Leistungsaufnahme nur etwa ein Drittel einer konventionellen Pumpe beträgt.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Der Verteilverlust wird im Rahmen von Praxisprojekten fast immer rechnerisch (aus Länge und längenbezogenen Verlusten) bestimmt. Allerdings sind auch Messwerte denkbar. Diese ergeben sich durch Differenzbildung aus Aufwand und Nutzen.

Notwendig ist zum einen die Messung der Wärmeabgabe des Erzeugers an das Heizungssystem (Aufwand). Sollte dies nicht separat möglich sein, weil nur ein gemeinsamer Wärmemengenzähler incl. Warmwasserbereitung vorhanden ist, erfolgt eine Sommermessung zur Bestimmung des Trinkwarmwasseranteils.

Zum anderen wird der an den Heizflächen messbare Nutzen benötigt. Einige spezielle Regelarmaturen für Heizkörper weisen eine Energiemengenmessung auf, auch etliche elektronische Heizkostenerfassungsgeräte zählen näherungsweise Kilowattstunden (allerdings ungeeicht). Im System zur Abrechnung installierte Wärmemengenzähler lassen sich zumindest verwenden, um Teile der Netzverluste (meist Verteilung und Steigestränge) zu messen.

Der sich ergebende Verlust zwischen Aufwand und Nutzen kann anschließend mit den Kennwerten des vorliegenden Abschnittes verglichen werden. Für theoretische Abschätzungen empfiehlt sich in jedem Fall ein Leitungsaufmaß am realen Objekt, da die Schätzformeln für die Leitungslängen erfahrungsgemäß sehr große Fehlerbandbreiten aufweisen.

Einsparpotentiale und Sonderbauformen

Eine Neuinstallation des Netzes setzt eine sorgfältige Planung voraus: zunächst sind Leitungslängen möglichst zu minimieren und die verbleibenden Rohre sehr gut zu dämmen. Dies gilt vor allem für Leitungsteile in der Konstruktion, die Jahrzehnte nicht mehr angefasst werden. Der Standard der EnEV (50 % Dämmung im beheizten Bereich bzw. 6 mm im Estrich) darf gern überboten werden. Dies stellt eine gute Regelbarkeit der Heizflächen sicher und vermindert lokale Überwärmung sowie Diskussionen über eine Heizkostengerechtigkeit.

Bei der Sanierung sollte unterschieden werden zwischen Leitungen im unbeheizten und beheizten Bereich.

Die Leitungsdämmung im Keller ist eine der wirtschaftlichsten Maßnahmen überhaupt. Daher schreibt die EnEV die nachträgliche Dämmung ungedämmter Leitungen im unbeheizten Bereich auch vor. Allerdings sind gänzlich ungedämmte Netze im Keller eher die Ausnahme. Selbst die Verbesserung eines schlecht gedämmten Leitungsnetzes im Keller (50 %) auf Neubauniveau (100 %) vermindert typischerweise die Verluste um 5 … 15 kWh/(m²a) auf fast 50 % der Ausgangswerte. Die kleineren Werte gelten für das MFH, die größeren für EFH.

Im beheizten Bereich verbessert eine nachträgliche Dämmung von ungedämmten Steigesträngen und Etagenringen die Überwärmungsproblematik (falls vorhanden) und Heizkostengerechtigkeit (falls relevant). Dies betrifft vor allem Systeme mit Einrohrheizung.

Dem hydraulischen Abgleich eines Heizungsnetzes sollte eine wärmetechnische Verbesserung der Rohre vorausgehen. Ziel des Abgleichs ist, die Wärmeabgabe der Heizflächen entsprechend einzuregeln. Dies setzt allerdings voraus, dass in jedem Raum die Hauptwärmeabgabe auch seitens der Heizfläche erfolgt und nicht ungeregelt über Steigestränge oder Verteilleitungen.

Zur Thematik der Zweileiternetze (Vereinigung zentraler Leitungsabschnitte von Heiz- und Trinkwarmwasserleitungen) wird auf Abschnitt 3.8.3 verwiesen.

3.6.4 Übergabeeinrichtungen

Die Wärmeübergabe an den Nutzer erfolgt mit freien (z.B. Radiatoren, Konvektoren) oder bauteilintegrierten (z.B. Wand- oder Fußbodenheizung) Heizflächen. Zur Heizfläche gehört eine Regeleinrichtung. Beide Elemente zusammen führen – je nach Nutzereingriff und Fremdwärmeaufkommen – zu einer mehr oder weniger konstant und nahe dem Sollwert gehaltenen Raumtemperatur.

Die energetische Bewertung erfolgt unterschiedlich, siehe auch Abschnitt 3.1:

- keine gesonderte Berücksichtigung bei der Bilanzierung, jedoch Verwendung einer angepassten Bilanzinnentemperatur bei der Berechnung der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste, z.B. mit 20,6°C (Innentemperatur incl. Regelungs- und Übergabeeinflüssen) statt 20°C (Innentemperatur ohne Regelungs- und Übergabeeinflüssen),
- Berücksichtigung als separate Energiemenge Q_{ce} [kWh/a] – den 'Übergabeverlusten'; der Heizwärmebedarf ist zunächst berechnet ohne Berücksichtigung von Regelungs- und Übergabeeinflüssen), z.B. mit 20°C Innentemperatur; die Übergabeverluste selbst werden

- als Aufwandszahl e ausgedrückt und mit dem Heizwärmebedarf multipliziert,
- als Nutzungsgrade η ausgedrückt; der Heizwärmebedarf wird durch den Nutzungsgrad dividiert,
- als Temperaturdifferenz Δϑ ausgedrückt; der Übergabeverlust ergibt sich aus einer Umrechung in eine Energiemenge.

Insbesondere im Rahmen von energetischen Nachweisen erfolgt – aus Gründen des Systemvergleichs – eine separate Ausweisung der Übergabeverluste, z.B. in DIN V 4701-10 [15] oder DIN V 18599 [13]. Bewertet wird auf Basis von Kennwerten, die Simulationsrechnungen entnommen wurden. Einflussgrößen sind:

- die Zeitkonstante abhängig von der Art der Heizfläche (frei oder integriert) sowie den Auslegungstemperaturen,
- die Art (mit und ohne Hilfsenergie) und Regelgenauigkeit des Reglers. Es wird unterschieden in Thermostatventile (P-Regler) ggf. mit Auslegungsproportionalbereich von 1 K oder 2 K sowie in elektronische Regeleinrichtungen (PI-Regler). Ob im untersuchten Gebäude eine Regelgenauigkeit von 1 K oder 2 K vorliegt, ergibt sich allein aus der Fachplanung. Theoretisch kann mit jedem Thermostatventil am Markt sowohl der eine als auch der andere Wert erreicht werden. Entscheidend ist hier eine Fachplanung, die das Ventil passend zu Heizfläche und Raum wählt,
- die Lage der Heizfläche im Raum, wobei eine Lage an der Außenwand aus Sicht der homogeneren Temperaturverteilung positiver bewertet wird als eine Lage an Innenwänden,
- die Lage der Heizflächen vor Glasflächen, in ungedämmten oder schlecht gedämmten Außenwänden oder Decken.

Temperaturdifferenzen

Tabelle 83 fasst einige Kennwerte zur Beschreibung der Übergabe und Regelung aus der DIN V 18599 zusammen – die Norm differenziert deutlich detaillierter. Die zitierte aktuelle Normausgabe beschreibt die Einflüsse anhand von Temperaturdifferenzen (bezogen auf einen Sollwert). Die Kennwerte sind jeweils im Vergleich zueinander zu interpretieren.

Systembeschreibung		Innentemperatureinfluss
Art der Heizfläche (incl. Übertemperatur) sowie Netztyp	Zweirohrheizung mit Heizkörpern	+ 0,5...1,0 K
	Einrohrheizung mit Heizkörpern	+ 1,0...1,5 K
	Flächenheizung	+ 0,4...0,7 K
Raumtemperaturregelung	keine Raumregelung, nur witterungsgeführte Vorregelung	+ 2,7...3,0 K
	Zweirohrheizung mit Referenzraumregelung sowie Einrohrheizung	+ 1,6...2,0 K
	Zweirohrheizung witterungsgeführt mit Thermostatventilen	+ 0,7...1,2 K
	Zweirohrheizung witterungsgeführt mit elektronischen Reglern	+ 0,5...0,9 K
übergeordnete Einzelraumregelung		- 0,5...- 1,2 K
intermittierender Betrieb		- 0,2...- 0,5 K
fehlender hydraulischer Abgleich		+ 0,3...0,6 K

Tabelle 83 Auswirkungen der Übergabe und Raumregelung auf die Innentemperatur [13]

Die realen Auswirkungen der genannten Ausstattungsmerkmale auf die Innentemperatur wird in der Praxis stark vom Nutzereingriff überlagert. Je höher der Nutzereingriff in die Regelung, desto mehr wird die eigentliche Regelfunktion überlagert. Der Regelabweichung von Raumreglern kann beispielsweise entgegen gewirkt werden, indem der Sollwert in kurzen Intervallen angepasst wird. Die Norm geht zum Systemvergleich von einem gleichen Nutzerverhalten bei allen Ausstattungsvarianten aus – was in der Realität eher unwahrscheinlich ist.

Zur Einschätzung der Größenordnung: eine Veränderung der Temperaturdifferenz zwischen Gebäudeinnerem und außen um 1 K verändert den Heizwärmebedarf um etwa 5 … 8 % (je nach Ausgangsniveau).

Hydraulischer Abgleich

Mit Hilfe des Abgleichs wird dafür gesorgt, dass alle Verbraucher – unabhängig von der Lage im Netz (nah der Pumpe oder weit entfernt) – den bestimmungsgemäßen Volumenstrom erhalten. Die Überversorgung einzelner Heizflächen wird somit ausgeschlossen, was (versehentlicher) Energieverschwendung vorbeugt. Die ebenfalls vermiedene Unterversorgung anderer Verbraucher vermindert die Beschwerdequote.

Der Einfluss des hydraulischen Abgleichs kann auch messtechnisch untersucht werden. Ergebnisse eines Forschungsvorhabens zeigt Bild 55.

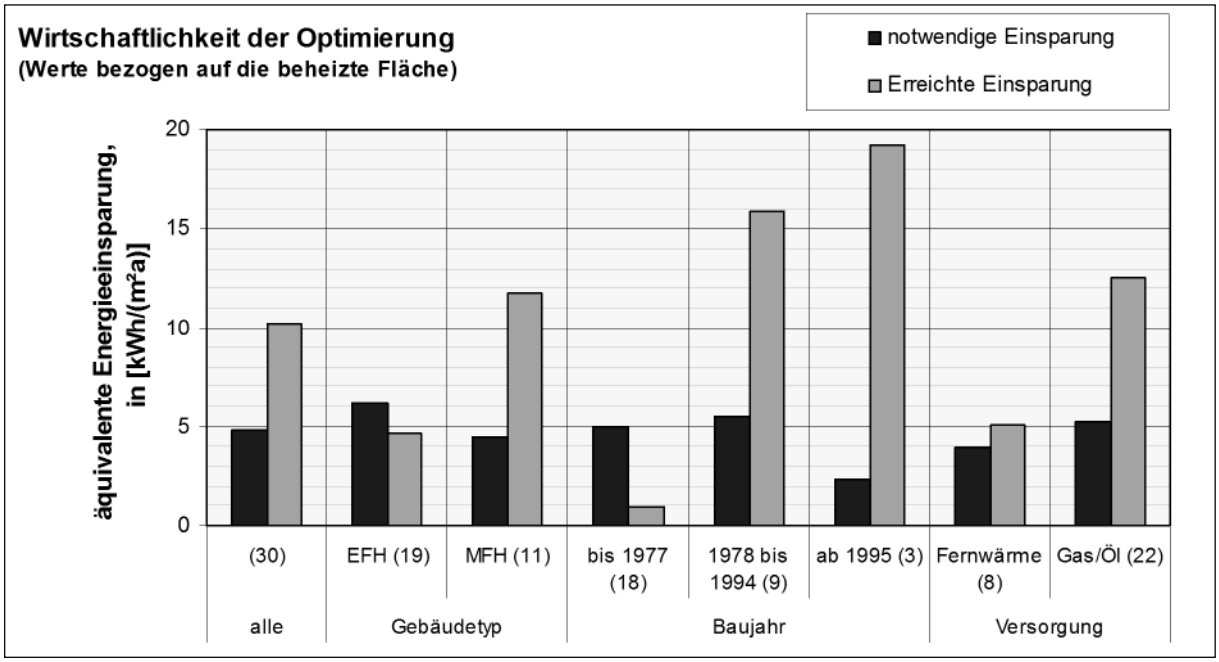


Bild 55 Wirtschaftlichkeit der Optimierung [81]

Untersucht wurden 30 Gebäude (Stichprobengröße in Klammern) auf die erreichte Einsparung an Wärme und Strom sowie die aus grenzwirtschaftlicher Sicht notwendige Einsparung. Im Mittel wurden etwa 10 kWh/(m²a) eingespart – doppelt so viel wie zur Amortisation erforderlich gewesen wäre. Die Einsparerfolge sind am größten in Mehrfamilienhäusern mit nennenswertem Dämmstandard und am geringsten im unsanierten Einfamilienhaus.

Insgesamt wurden in den untersuchten Gebäuden etwa 5 … 10 % Einsparung erreicht.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Wird in einem Bestand die Innentemperatur gemessen (Langzeitmessung über Wochen und Monate), enthält dieser Messwert bereits alle Einflüsse der Übergabe und Regelung. Dies ist zu beachten, wenn mit Software gearbeitet wird, die eigentlich für EnEV-Nachweise gedacht ist.

Beispiel: es wird in einer dreimonatigen Messperiode ein Innentemperaturmesswert von 19,7°C erfasst, mit welchem das Gebäude bilanziert werden soll – z.B. im Rahmen einer Energieberatung. Die Normen und somit das verwendete Softwareprogramm sehen für die vorgefundene Ausstattung mit Thermostatventilen einen Temperaturaufschlag von 0,9 K vor.

Dann ist der Innentemperatursollwert entsprechend um diesen Betrag niedriger einzutragen – hier mit 18,8°C – damit das Gesamtergebnis stimmt und keine Doppeltbewertung eintritt.

Diese Logik gilt auch, wenn in der Software nicht zu erkennen ist, welche Temperaturdifferenz der Übergabe und Regelung tatsächlich zugeordnet wird, z.B. weil die Übergabeverluste sofort als Energiemengen angezeigt werden. Es gilt die o. g. Näherungsformel: je 5 … 8 % Aufschlag auf den Heizwärmebedarf entsprechen etwa 1 K Temperaturdifferenz.

Beispiel: der Heizwärmebedarf beträgt – gerechnet im ersten Versuch mit 19,7 °C gemessener Innentemperatur – 60 kWh/(m²a). Das verwendete Softwareprogramm setzt standardmäßig 3,3 kWh/(m²a) für Heizkörper mit Thermostatventilen als Übergabeverlust an. Da die Übergabeverluste aufgeschlagen werden, ergibt sich als Gesamtergebnis nun 63,3 kWh/(m²a). Das ist mehr als eigentlich dem Innentemperaturmesswert entspricht, also muss die Innentemperatur bei der Bilanzierung herabgesetzt werden, so dass 60 kWh/(m²a) incl. Übergabeverlust berechnet wird. Durch Versuchen und Probieren lässt sich das Problem lösen. Rechnerisch kann dies wie folgt beschleunigt werden: die Übergabeverluste entsprechen etwa 5,5 % des Heizwärmebedarfs. Mit oben genannter Näherungsformel also ca. 0,7 … 1,1 K Innentemperaturdifferenz (Annahme 0,9 K sind korrekt). Also muss die Innentemperatur um 0,9 K bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs herabgesetzt werden, auf 18,8°C. Der Heizwärmebedarf sollte dann etwa bei 56,7 kWh/(m²a) liegen.

3.7 Kennwerte für die Gebäudekälteversorgung

Etwa 2 % der Fläche im deutschen Wohnungsbau sind mit einer Anlage zur Raumkühlung ausgestattet. Zudem werden die Anlagen in einem zeitlich nur sehr geringen Umfang betrieben, so dass sich sehr geringe Endenergieaufwendungen von 1 … 5 kWh/(m²a) für die Kühlung ergeben. Dagegen ist die flächenmäßige Durchdringung einerseits, als auch die Nutzungsintensität andererseits im Nichtwohnbau ungleich höher [54]:

- Handel: 66 % gekühlt, Endenergie 33 kWh/(m²a)
- Büro, Verwaltung: 51 % gekühlt, Endenergie 20 kWh/(m²a)
- Hotel, Restaurant: 30 % gekühlt, Endenergie 17 kWh/(m²a)
- Krankenhäuser: 20 % gekühlt, Endenergie 19 kWh/(m²a)
- Bildungsbauten: 14 % gekühlt, Endenergie 11 kWh/(m²a)

Die im Gebäude benötigte Kühlenergiemenge ergibt sich aus der Bilanz der Transmissions- und Lüftungswärmeströme sowie der solaren und inneren Fremdwärme. Im Kühlfall ist ein Überschuss an Wärmeeinträgen in die Räume vorhanden.

Bei der energetischen Bilanzierung wird die übliche Kette vom Erzeuger über ggf. Speicher und Verteilnetze bis zur Übergabe an den Nutzer durchlaufen. Ein Teil der eingesetzten Endenergie wird dabei als "technischer Verlust" (bzw. Mehraufwand gegenüber dem Nutzen) verbucht. Dieser Anteil kann mit Hilfe von Kennwerten für die technischen Systemkomponenten beschrieben und eingeschätzt werden.

Für die unterschiedlichen Erzeuger werden im Rahmen dieser Kennwertsammlung in Abschnitt 3.7.1 typische Arbeitszahlen SEER (bzw. ε) zur Beschreibung angegeben.

Abschnitt 3.7.2 stellt typische Kennwerte zur Bewertung von Speichern zusammen: ihr Einfluss auf die Effizienz des Erzeugers sowie typische Speichernutzungsgrade η_S zur Bewertung der Eigenverluste.

Eine weitere Verlustquelle ist durch die Kälteverteilung gegeben. Da die Datenlage eher dünn ist, stellt Abschnitt 3.7.3 grob zusammengefasste Nutzungsgrade η_d zusammen, die Einflüsse der Leitungsverlegedichte, Rohrdämmung sowie Betriebstemperaturen pauschal enthalten. Neben den wärmetechnischen Eigenschaften werden auch Hinweise zu typischen Hilfsenergien (Pumpen) angegeben.

Abschnitt 3.7.4 fasst wesentliche Erkenntnisse zur Beschreibung der Kälteübergabe zusammen. Je nach Speichermasse der Kühlfläche, Genauigkeit der Temperaturregelung sowie weiteren Einflüssen – beispielsweise dem Vorhandensein eines hydraulischen Abgleichs – kann die Sollraumtemperatur besser oder schlechter eingehalten werden.

3.7.1 Erzeuger

Für die Gebäudekühlung kommen zentrale oder dezentrale Kältemaschinen zum Einsatz. Zur Bewertung der Maschineneffizienz zu einem bestimmten Zeitpunkt dient eine Leistungszahl. Sie ist einheitenlos und hat das Formelzeichen ε, COP (coefficient of performance) oder EER (energy efficiency ratio). Sie ist ein Leistungsverhältnis aus der Kältenutzleistung $\dot{Q}_K$ [kW] zur eingesetzten Energie $\dot{Q}_{zu}$ [kW].

$$EER \mathrel{\hat{=}} \varepsilon \mathrel{\hat{=}} COP = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{Q}_{zu}}$$

Die Leistungszahl ist abhängig von der Verdampfungstemperatur T_0 sowie der Kondensationstemperatur T_C des verwendeten Kältemittels (als Absolutwerte auf der Kelvinskala). Es ist anzumerken, dass die Verdampfungstemperatur unterhalb der Temperatur des zur Kühlung genutzten Kaltwasserkreislaufs liegt und die Kondensationstemperatur oberhalb der Temperatur des Rückkühlkreislaufs. Analoges gilt bei direkter Luftkühlung bzw. direkter Rückkühlung an Luft. Folgende typische Werte gelten:

- Übertemperatur am Kondensator (Rückkühlseite):
  - $\Delta\vartheta_o$ = 4 K für wassergekühlte Kompressionskältemaschinen
  - $\Delta\vartheta_o$ = 10 K für luftgekühlte Kompressionskältemaschinen
- Untertemperatur am Verdampfer (Nutzkälteseite):
  - $\Delta\vartheta_u$ = 6 K für Kompressionskältemaschinen mit Kaltwasserkreis
  - $\Delta\vartheta_u$ = 20 K für Kompressionskältemaschinen mit Direktkühlung

Liegen für eine bestimmte Temperaturpaarung (Nutzkälte ϑ_{Nutz}, Rückkühlung $\vartheta_{Rück}$) Messwerte der Leistungszahl EER vor, kann wie folgt umgerechnet werden:

$$\frac{EER_1}{EER_2} = \frac{\dfrac{273K + (\vartheta_{Nutz,1} - \Delta\vartheta_u)}{(\vartheta_{Rück,1} + \Delta\vartheta_o) - (\vartheta_{Nutz,1} - \Delta\vartheta_u)}}{\dfrac{273K + (\vartheta_{Nutz,2} - \Delta\vartheta_u)}{(\vartheta_{Rück,2} + \Delta\vartheta_o) - (\vartheta_{Nutz,2} - \Delta\vartheta_u)}}$$

Folgende Standardwerte gelten für viele produktspezifische Angaben:

- Rückkühltemperatur $\vartheta_{Rück}$ = 35°C
- Nutztemperatur für Kompressionskältemaschinen mit Kaltwasserkreis ϑ_{Nutz} = 7°C
- Nutztemperatur für Kompressionskältemaschinen mit Direktkühlung ϑ_{Nutz} = 27°C

Die Effizienz innerhalb einer Zeitperiode lässt sich mit Arbeitszahlen oder Nennwärmeverhältnissen bewerten. Als Formelzeichen haben sich β (für elektrisch angetriebene Maschinen), ζ (für thermisch angetrieben Maschinen) oder SEER (saisonal energy efficiency ratio) etabliert. Es gilt:

$$SEER \triangleq \beta \cong \zeta = \frac{Q_K}{Q_{zu}}$$

Die Ableitung einer Jahresarbeitszahl aus Leistungszahlen erfordert eine Integralbildung über den gesamten Zeitraum, um Einflüsse unterschiedlicher Betriebstemperaturen, das Teillastverhalten der Verdichter usw. zu berücksichtigen. In der Praxis werden häufig Korrekturfaktoren – Teillastfaktoren PLV_{AV} (averaged part load values) – eingeführt, um eine einfache Umrechnung der leistungs- in energiemengenbezogene Kennwerte vorzunehmen.

$$SEER = PLV_{AV} \cdot EER$$

Im Folgenden werden die Formelzeichen EER und SEER zur Kennzeichnung verwendet. Sie gelten universell sowohl für elektrisch als auch thermisch angetriebene Kältemaschinen.

Zentrale Kompressionskältemaschinen

In einer zentralen Kompressionskältemaschine läuft ein Kältemittelkreisprozess ab, z.B. auf Basis des Kältemittels R134a. Der Verdichter ist elektrisch angetrieben. Das Kältemittel nimmt im Verdampfer Energie auf und gibt sie im Kondensator wieder ab. Beide Wärmeübertrager sind i. d. R. an Wasserkreisläufe angeschlossen: zur Nutzung dient der Kaltwasserkreis, zur Rückkühlung an die Umgebung der Kühlwasserkreis.

Die Arbeitszahlen EER (elektrischer Antrieb) sind abhängig von der Temperatur des angeschlossenen Kältekreises, der Rückkühltemperatur sowie von der Art des Verdichters (Kompressors) und des Kältemittels. Für das am häufigsten vorzufindende Kältemittel R134a zeigt Bild 56 typische Nennkälteleistungszahlen. Für andere Temperaturbedingungen führt die lineare Interpolation anhand der Kaltwassertemperatur zu einer guten Näherung.

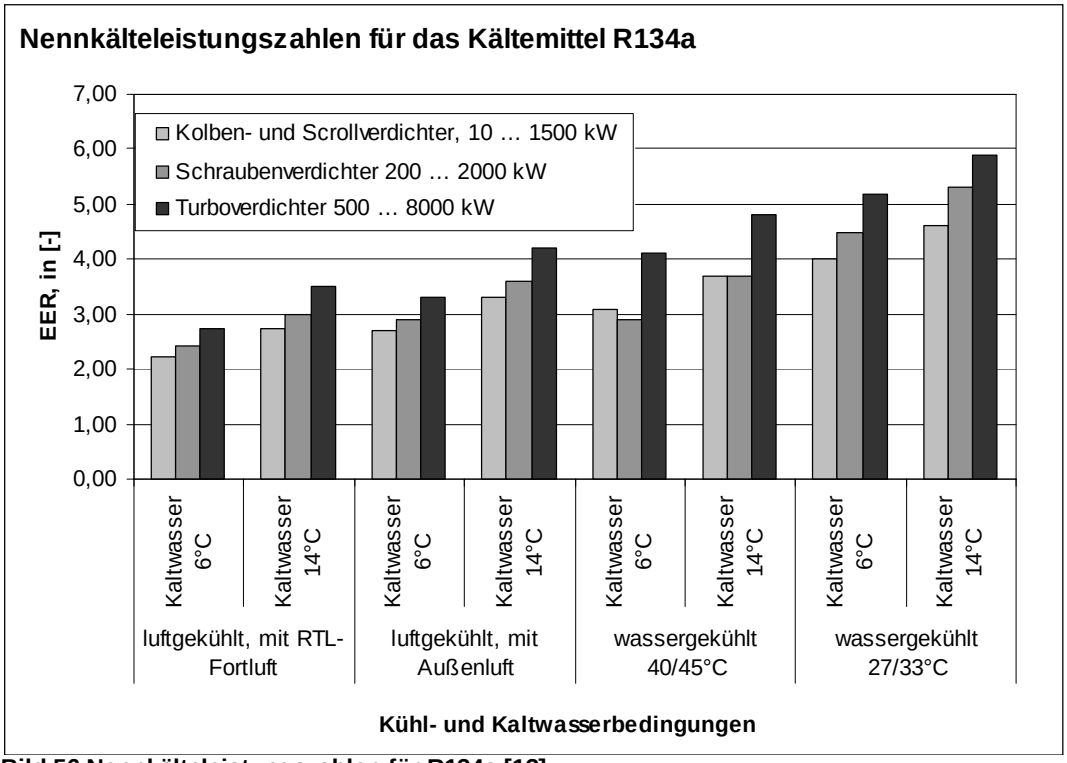


Bild 56 Nennkälteleistungszahlen für R134a [13]

Mit steigender Kompressorleistung sind im gesamten Spektrum der verfügbaren Maschinen verbesserte Leistungszahlen feststellbar. Luftgekühlte Kältemaschinen schneiden u. a. schlechter ab, weil alle Hilfsenergien der Rückkühlung in der Nennkälteleistungszahl enthalten sind. Bei wassergekühlten Maschinen werden sie separat berechnet.

Der Einsatz anderer Kältemittel führt ggf. zu abweichenden – in der Mehrzahl niedrigeren – Effizienzen, siehe Bild 57.

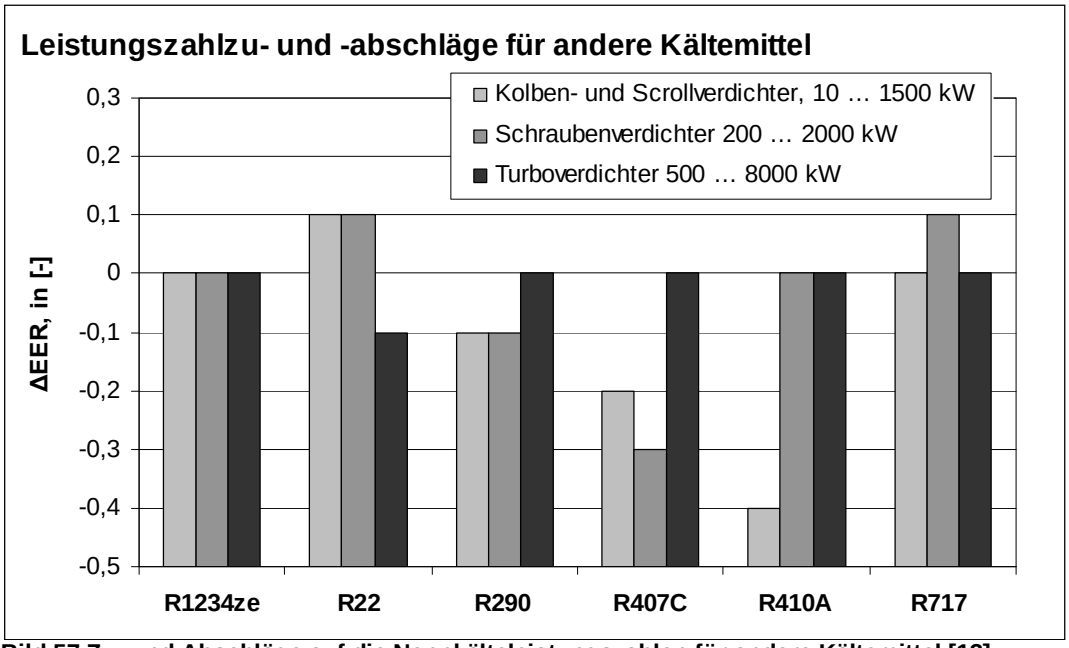


Bild 57 Zu- und Abschläge auf die Nennkälteleistungszahlen für andere Kältemittel [13]

Die Effizienz steigt mit neueren Baujahren. Die DIN V 18599 geht von einer Veränderung der Nennkälteleistungszahl um etwa ΔEER ≈ 0,7 je Jahrzehnt aus [13]. Die in Bild 56 und Bild 57 dargestellten Kennwerte gelten für die Baujahre um 2000.

In der Praxis ergeben sich für Kältemaschinen vergleichsweise geringe Gesamtbetriebszeiten und Auslastungen für Kältemaschinen. Selbst in einer intensiven Nutzung wie dem Krankenhaus wurden bei Praxisuntersuchungen nur knapp 1000 h/a Benutzungszeit und eine Auslastung von 38 % festgestellt [1].

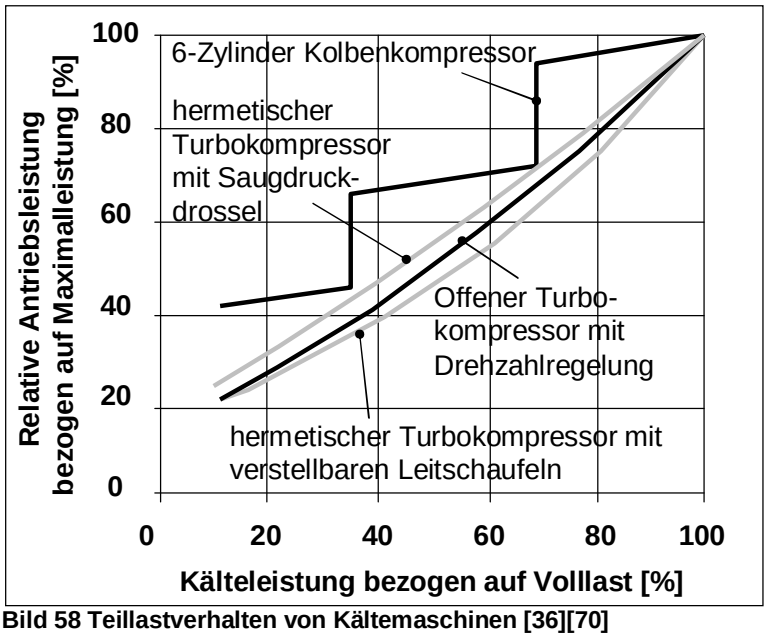


Bild 58 Teillastverhalten von Kältemaschinen [36][70]

Der Betrieb setzt also eine Regelung voraus. In der Praxis ist die taktende Betriebsweise am weitesten verbreitet (einstufig: 9 %, mehrstufig: 64 %). In 18 % der Anlagen wird die Heißgasbypassregelung genutzt. Die restlichen 9 % der Anlagen weisen andere Regelungsarten auf [34].

Das Herunterregeln der Kälteleistung geht – abhängig vom Regelkonzept – nicht unbedingt mit einer proportionalen Verminderung der notwendigen Antriebsleistung einher, wie Bild 58 zeigt.

In der DIN V 18599 werden Teillastfaktoren für insgesamt 17 Lastprofile angegeben. Für vier dieser Fälle, welche häufig gekühlt werden – Büro und büroähnliche Nutzung, Verkaufsstätten/Bibliotheken, Hotelzimmer und Serverräume – werden nachfolgend Kennwerte zusammengestellt. In anderen Fällen wird auf die Norm verwiesen [13].

Die Teillastfaktoren PLV_{AV} überführen die Nennkälteleistungszahl in eine jahresmittlere Arbeitszahl. Tabelle 84 listet Werte für wassergekühlte Kompressionskältemaschinen auf, Tabelle 85 für luftgekühlte. Die tabellierten Werte gelten für den Kältemaschinenbetrieb zur Versorgung von Raumkühlkreisen (z.B. Kühldecken) sowie der RLT-Kühlregister bei Anlagen mit Wärmerückgewinnung (keine Luftbe- und Entfeuchtung oder Luftbefeuchtung innerhalb eines Toleranzbandes).

Kühlwasservolumenstrom	Rückkühlung	Nutzung	Teillastfaktoren für wassergekühlte Kältemaschinen PLV_{AV}, [-]							
			Kolben-/Scrollverdichter mit Zweipunktregelung taktend (EIN/AUS-Betrieb)	Kolben-/Scrollverdichter mehrstufig schaltbar (mindestens vier Schaltstufen als Verdichterverbund)	Kolbenverdichter durch Zylinderabschaltung	Kolben-/Scrollverdichter mit Heißgasbypassregelung	Schraubenverdichter mit Steuerschieberregelung	Turboverdichter mit Einlassdrosselregelung	Invertergeregelte Schraubenverdichter	Invertergeregelte Turboverdichter
konstant	trocken	Büro	0,92...0,95	1,26...1,31	0,72...0,77	0,47...0,54	0,87...0,95		0,96...1,00	
		Hotel	0,96	1,31	0,65...0,73	0,40...0,49	0,77...0,89		0,90...0,98	
		Verkauf	0,92...0,96	1,27...1,32	0,71...0,75	0,46...0,52	0,85...0,93		0,95...0,99	
		Server	0,92...0,94	1,17...1,29	0,72...0,90	0,48...0,77	0,88...1,07		0,96...1,03	
	Verdunstung	Büro	0,92...0,95	1,32...1,37	0,75...0,80	0,47...0,54	0,91...0,99		1,01...1,04	
		Hotel	0,96	1,36...1,38	0,68...0,77	0,40...0,49	0,80...0,93		0,94...1,02	
		Verkauf	0,92...0,96	1,32...1,38	0,74...0,78	0,46...0,52	0,89...0,97		1,00...1,03	
		Server	0,92...0,94	1,2...1,35	0,75...0,92	0,48...0,77	0,92...1,09		1,00...1,05	
variabel	trocken	Büro		1,73...1,75	0,96...1,05		1,52...1,73	1,21...1,33	1,69...1,81	1,91...1,98
		Hotel		1,75	0,86...0,98		1,34...1,56	1,08...1,24	1,57...1,71	1,96...2,04
		Verkauf		1,73...1,77	0,94...1,02		1,50...1,68	1,19...1,30	1,68...1,77	1,92...2,02
		Server		1,69...1,77	0,98...1,29		1,60...2,04	1,25...1,51	1,75...1,97	1,76...1,99
	Verdunstung	Büro		1,54...1,59	0,87...0,94		1,06...1,16	1,10...1,19	1,17...1,22	1,70...1,80
		Hotel		1,59...1,60	0,79...0,89		0,93...1,08	0,99...1,12	1,09...1,19	1,78...1,86
		Verkauf		1,54...1,61	0,86...0,91		1,04...1,14	1,09...1,17	1,16...1,20	1,71...1,84
		Server		1,43...1,58	0,88...1,09		1,07...1,3	1,11...1,28	1,17...1,25	1,49...1,78

Tabelle 84 Teillastfaktoren für wassergekühlte Kompressionskältemaschinen [13]

Die Norm gibt darüber hinaus auch Werte an für RLT-Kühlregister bei Anlagen ohne Wärmerückgewinnung sowie einer Luftbe- und Entfeuchtung auf einen Festwert. Die dann zu erwartenden Werte liegen in einem Korridor von ± 0,05 bei den Zahlenwerten der Tabelle 84.

Nutzung	Teillastfaktoren für luftgekühlte Kältemaschinen PLV_{AV}, [-]					
	Kolben-/Scrollverdichter mit Zweipunktregelung taktend mit Pufferspeicher (EIN/AUS-Betrieb)	Kolben-/Scrollverdichter mehrstufig schaltbar (mindestens vier Schaltstufen als Verdichterverbund)	Schraubenverdichter mit Steuerschieberregelung	Schraubenverdichter mit Inverterregelung	Turboverdichter mit Inverterregelung	Digitaler Scrollverdichter
Büro	1,16...1,28	1,28...1,4	0,89...1,08	1,43...1,53	1,61...1,69	0,86...1,05
Hotel	1,16...1,23	1,28...1,35	0,87...1,02	1,45...1,48	1,64...1,65	0,83...0,98
Verkauf	1,11...1,19	1,24...1,32	0,77...0,92	1,45...1,46	1,64...1,66	0,74...0,9
Server	1,23...1,58	1,36...1,68	0,96...1,49	1,53...1,78	1,72...1,89	0,92...1,49

Tabelle 85 Teillastfaktoren für luftgekühlte Kompressionskältemaschinen [13]

Für luftgekühlte Maschinen gibt die Norm auch Teillastfaktoren für die Kühlung aus Abluft statt Außenluft an. Diese liegen im Bereich -/+ 0,05 höher oder niedriger als die in Tabelle 85 zusammengestellten Werte.

Beispiel zur Ermittlung einer Jahresarbeitszahl SEER:

- betrieben wird eine wassergekühlte Kompressionskältemaschine Baujahr 2001 in einem Hotel
- die Maschine hat eine Nennleistung von 250 kW und einen Schraubenverdichter, der mehrstufig taktend betrieben wird, das verwendete Kältemittel ist R407C
- das Kaltwasser wird im Auslegungsfall mit 14°C zur Verfügung gestellt (Kühldecke)
- die Maschine wird wassergekühlt betrieben, die Rückkühlung erfolgt mit einem Trockenrückkühler, das Temperaturniveau für die Auslegung liegt bei 40/45°C, es wird ein konstanter Kühlwasservolumenstrom verwendet

- Bild 56 liefert die Nennkälteleistungszahl einer Maschine mit dem Kältemittel R134a: $EER_{134a} = 3{,}8$
- Bild 57 korrigiert den Einfluss des Kältemittels um $\Delta EER = -0{,}3$
- die Nennkälteleistungszahl liegt demnach bei EER = 3,5
- es erfolgt keine Korrektur aufgrund des Baujahrs, da die Maschine etwa Baujahr 2000 ist
- Tabelle 84 liefert einen Teillastfaktor $PLV_{AV} = 1{,}31$
- die Jahresarbeitszahl ergibt sich zu $SEER = ERR \cdot PLV_{AV} = 3{,}5 \cdot 1{,}31 = 4{,}59$
- für jede eingesetzte Kilowattstunde Elektroenergie ergibt sich eine Kühlenergie von knapp 4,6 kWh und eine Rückkühlenergiemenge von 5,6 kWh an die Außenluft

Zentrale Sorptionskältemaschinen

In einer zentralen Sorpionskältemaschine läuft ein Kältemittelkreisprozess ab. In einer Absorptionskältemaschine wird das verdampfte Kältemittel in einer Lösung abgeführt, bei einer Adsorptionskältemaschine in einem Feststoff. Als Zweistoffgemische für die Absorption kommen z.B. Wasser (Kältemittel) und Lithiumbromid (Lösemittel) oder Ammoniak (Kältemittel) und Wasser (Lösemittel) zum Einsatz. Adsorptionskomponenten sind Wasser (Kältemittel) und Silikagel (Feststoff). Das Kältemittel nimmt bei der Vereinigung mit dem Lösemittel oder Feststoff Energie auf. Die Trennung beider Stoffe erfordert thermische Energie (im Austreiber). Diese wird der Maschine über einen Heißwasserkreislauf zur Verfügung gestellt oder das Gerät ist direkt brennstoffbetrieben.

Die Heizzahlen bzw. Nennwärmeverhältnisse ζ sind abhängig von der Temperatur des angeschlossenen Kühlkreises auf der Nutzenseite sowie von der Austreibertemperatur zur Trennung des Kältemittels. Typische Werte zeigt Tabelle 86.

Heizmitteltemperatur Vor- und Rücklauf [°C]	Rückkühltemperatur Vor- und Rücklauf [°C]	Kaltwasservorlauf [°C]	Nennwärmeverhältnis ζ [-]		
			H_2O-LiBr-Absorption	NH_3/H_2O-Absorption bis 200 kW	H_2O/Silikagel-Zeolith-Adsorption bis 200 kW
70/60	27/33	6	0,65	0,50	–
		12	0,70	0,56	0,59
		16	0,75	0,62	0,63
80/70	27/33	6	0,69	0,52	–
		12	0,71	0,60	0,52
		16	0,77	0,64	0,60
90/75	40/45	16	0,60	0,45	0,34
	27/33	6	0,69	0,57	–
		12	0,71	0,62	0,51
		16	0,73	0,64	0,55
110/95	40/45	6	0,50	0,42	–
		12	0,60	0,52	–
		16	0,70	0,58	–
	27/33	6	0,70	0,53	–
		12	0,71	0,56	–
		16	0,72	0,58	–
130/110	40/45	6	0,70	–	–
		12	0,71	–	–
		16	0,72	–	–
	27/33	6	0,71	–	–
		12	0,72	–	–
		16	0,73	–	–
direkt gasbefeuertes Gerät	40/45 und 27/33	alle	1,30	0,60	–

Tabelle 86 Nennwärmeverhältnis für Sorptionskältemaschinen [13][eigene]

Als typischer Faktor zur Teillastbewertung kann PLV_{AV} = 0,95 verwendet werden [13]. Mit diesem Wert wird der leistungsbezogene Nennwert in einen energiemengenbezogenen Jahresmittelwert überführt.

Beispiel zur Ermittlung einer Jahresarbeitszahl SEER:

- betrieben wird eine wassergekühlte Absorptionskältemaschine
- die Maschine hat eine Nennleistung von 250 kW, das Kältemittel/Lösungsgemisch ist Ammoniak/Wasser
- das Kaltwasser wird im Auslegungsfall mit 16°C zur Verfügung gestellt (Kühldecke)
- als Antriebsmedium steht Heizwasser mit 90/75°C Vor- und Rücklauftemperatur zur Verfügung
- die Maschine wird wassergekühlt betrieben, die Rückkühlung erfolgt mit einem Trockenrückkühler, das Temperaturniveau für die Auslegung liegt bei 40/45°C

- Tabelle 86 liefert ein Nennwärmeverhältnis ζ = 0,45
- der typische Teillastfaktor liegt bei PLV_{AV} = 0,95
- die Jahresarbeitszahl ergibt sich zu SEER = $\zeta \cdot PLV_{AV} = 0{,}45 \cdot 0{,}95 = 0{,}43$
- für jede eingesetzte Kilowattstunde Wärmeenergie ergibt sich eine Kühlenergie von etwa 0,43 kWh und eine Rückkühlenergiemenge von 1,43 kWh an die Außenluft

Dezentrale Kälteerzeugung

Die dezentrale Kälteerzeugung erfolgt nach dem Prinzip der strombetriebenen Kompressionskältemaschinen. Der Verdampfer nimmt – ohne weiteren zwischengeschalteten Wasserkreislauf – direkt die Wärme aus dem zu kühlenden Raum auf. Der Kondensator gibt seinerseits ebenfalls direkt – also luftgekühlt – die Abwärme an die Umgebung ab. Typische Nennkälteleistungen zeigt Bild 59.

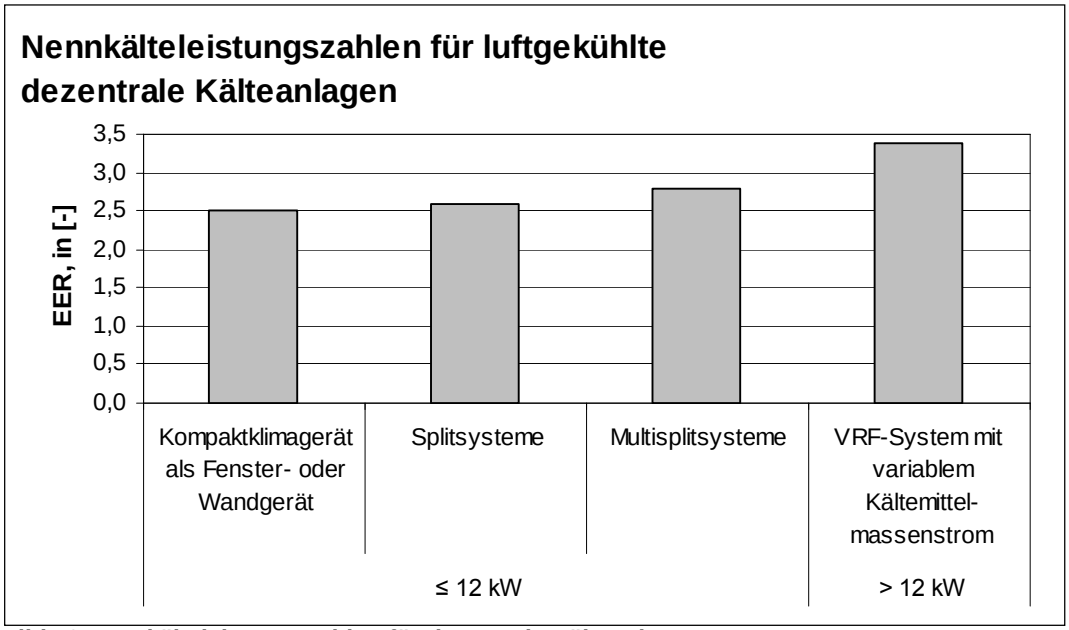


Bild 59 Nennkälteleistungszahlen für dezentrale Kälteanlagen

Raumklimageräte mit einer Nennleistung von bis zu 12 kW werden seit 2013 mit einem Energieeffizienzlabel versehen. Auf diesem ist ein typischer Jahreswert für die Arbeitszahl SEER angegeben.

Soll die Jahresarbeitszahl aus der Nennkälteleistungszahl ermittelt werden, können die Teillastfaktoren PLV_{AV} aus Tabelle 87 verwendet werden.

Nutzung	Teillastfaktoren für luftgekühlte dezentrale Kältemaschinen PLV_{AV}, [-]			
	Zweipunktregelung für Einzonensystem taktend (EIN/AUS-Betrieb)	Zweipunktregelung für Mehrzonensystem taktend (gegebenenfalls mit Schadraumzuschaltung oder Zylinderabschaltung)	Stetige Regelung für Einzonensysteme Invertergeregelt/taktend, mit elektronischem Expansionsventil	Stetige Regelung für Mehrzonensysteme Invertergeregelt/taktend, mit elektronischem Expansionsventil
Server	1,15	0,93	1,21	1,31
andere	1,24	0,84	1,37	1,29

Tabelle 87 Teillastfaktoren für luftgekühlte dezentrale Kältemaschinen [13]

Wärmepumpen als Kältemaschinen

Insbesondere im Wohnungsbau werden in manchen Fällen eigentlich zu Heizzwecken vorhandene Wärmepumpen in der Sommerperiode zur Kühlung eingesetzt. Soll die Effizienz eines solchen Gerätes mit Kennwerten eingeschätzt werden, können die Nennkälteleistungszahlen EER sowie die Teillastfaktoren PLV_{AV} aus Tabelle 88 zum Einsatz kommen.

Wärmepumpe und Wärmequelle	Regelung	EER, in [-]	PLV_{AV}, in [-]	
			EFH	MFH
Außenluft-Wasser-Wärmepumpe mit 16°C Kaltwasseraustrittstemperatur	taktend	2,4	0,87...0,88	0,87...0,88
	invertergere-gelt		1,27...1,29	1,1...1,31
Abluft-Zuluft-Wärmepumpe mit 18°C Zuluftaustrittstemperatur	taktend	2,6	0,96...0,97	0,98...0,99

Tabelle 88 Nennkälteleistungszahlen und Teillastfaktoren für Wärmepumpen im Kältebetrieb [13]

Regenerative Kühlung

Zur regenerativen Kühlung kommen verschiedene Verfahren in Betracht, welche nachfolgend mit Kennwerten beschrieben werden: die DEC-Kühlung, Freikühlung über das Rückkühlwerk, Direktkühlung mit Wasser aus dem Erdreich.

Die DEC-Kühlung (desiccative and evaporative cooling; Austrocknungs- und Verdunstungskühlung) ist eine Art der Adsorptionskühlung. Sie kommt in raumlufttechnischen Anlagen zum Einsatz, bei denen Luft gekühlt und ggf. entfeuchtet werden soll. Das Kältemittel ist Wasser, ein zwischen Zu- und Abluft rotierender Feststoff dient als Sorptionsmittel. Um das Wasser vom Feststoff zu trennen, wird Wärme benötigt. Häufig wird Solarwärme oder Abwärme eingesetzt. Es können Wärmeverhältnisse im Bereich 0,8 … 0,9 erreicht werden [18]. Bei wirtschaftlichen Vergleichen ist der Wassereinsatz zu berücksichtigen.

Freikühlung wird erreicht, wenn ein Kältemittel (direkt) oder das Kühlwasser (indirekt) mit Außenluft abgekühlt werden, ohne dass der Verdichter läuft. Sofern die Außentemperaturen nur niedrig genug sind, erfolgt die Verflüssigung des Kältemittels auch ohne zusätzlichen Einsatz von Elektroenergie. Die DIN V 18599 beschreibt die alternativ oder parallel zur Kältemaschine stattfindende Freikühlung, siehe Tabelle 89.

Dargestellt ist ein so genannter Freikühlfaktor f_{FC} [-], der als Korrekturfaktor für die ansonsten vorhandene Arbeitszahl zu verstehen ist. Die Norm liefert eine weitere Detaillierung mit Angabe von Zahlen für 10/15°C Systemtemperatur, weitere Nutzungsarten und eine Unterscheidung in verschiedene Bauschweren des gekühlten Gebäudes.

Nutzung	System-temperatu-ren	Freikühlfaktor f_{FC}, in [-]			
		Alternativbetrieb		Parallelbetrieb	
		Trockenrückkühlung	Verdunstungs-rückkühlung	Trockenrückkühlung	Verdunstungs-rückkühlung
Büro, Verkauf, Hotel	14/18°C	1,00...1,03	1,00...1,08	1,00...1,12	1,00...1,25
	6/12°C	1,00	1,00...1,01	1,00...1,01	1,00...1,03
Server	14/18°C	1,25...1,79	1,43...1,82	1,61...2,44	2,04...2,86
	6/12°C	1,01...1,22	1,02...1,28	1,11...1,47	1,18...1,45

Tabelle 89 Korrektorfaktoren für die Jahresarbeitszahl aufgrund der Freikühlung [13]

Beispiel zur Ermittlung einer korrigierten Jahresarbeitszahl SEER:

- betrieben wird eine wassergekühlte Kompressionskältemaschine in einem Hotel
- das Kaltwasser wird im Auslegungsfall mit 14°C zur Verfügung gestellt (Kühldecke)
- die Maschine wird wassergekühlt betrieben, die Rückkühlung erfolgt mit einem Trockenrückkühler
- die Jahresarbeitszahl ohne Freikühlung ergibt sich zu SEER = 4,59 (siehe Bild 56 ff.)
- eine Freikühlung im Parallelbetrieb soll erfolgen
- Tabelle 89 liefert einen Freikühlfaktor von f_{FC} = 1,00 … 1,12 je nach Gebäudeschwere – es wird von einem mittleren Wert ausgegangen
- die korrigierte Jahresarbeitszahl mit Freikühlung ergibt sich zu $SEER_{FC} = 4{,}59 \cdot 1{,}06 = 4{,}89$
- für jede eingesetzte Kilowattstunde Elektroenergie ergibt sich eine Kühlenergie von knapp 4,9 kWh

Wird direkt mit Grundwasser gekühlt, fällt kein Stromaufwand für den Verdichter an, sondern für eine Pumpe. Mit Hilfe der nachfolgenden Tabellen kann der Prozess bewertet werden.

Temperaturspreizung im Wärmesenkenkreis, in [K]	Nennkälteleistungszahlen für Grundwassernutzungsanlagen EER, in [-]	
	mit Standardpumpen	mit Hocheffizienzpumpen
5	28	30
10	55	60
15	83	89

Tabelle 90 Nennkälteleistungszahlen für die Grundwasserkühlung [13]

Für den Nennlastfall liefert Tabelle 90 das Verhältnis zwischen der Kälteleistung und der Pumpenleistung, ausgedrückt als Nennkälteleistungszahl EER.

Nutzung	Teillastfaktoren für luftgekühlte Kältemaschinen PLV_{AV}, [-]	
	ungeregelte Pumpe	geregelte Pumpe
Büro	0,40...0,50	0,74...0,85
Hotel	0,38...0,47	0,71...0,83
Verkauf	0,32...0,42	0,63...0,77
Server	0,41...0,76	0,75...1,02

Tabelle 91 Teillastfaktoren für die Grundwasserkühlung [13]

Die Teillastfaktoren aus Tabelle 91 bewerten die Pumpenregelung sowie das Lastprofil der betreffenden Nutzung und liefern einen Teillastfaktor PLV_{AV}, mit dem aus dem Nennlastfall eine jahresmittlere Arbeitszahl abgeschätzt werden kann.

Hilfsenergien

Die Nennkälteleistungszahl von luftgekühlten Kältemaschinen enthält alle systemrelevanten Hilfsenergien, nennenswert hierbei ist die elektrische Energie der Ventilatoren zur Rückkühlung.

Bei wassergekühlten Kälteanlagen wird die Stromaufnahme der Rückkühlung (Pumpen, Ventilatoren, Regelung) separat bilanziert. Tabelle 92 gibt Leistungskennwerte abhängig von der Kältenennleistung der Maschine an. Die Betriebszeiten der Rückkühlaggregate ergeben sich aus den Betriebszeiten der Kälteanlage.

Kühlwasservolumenstrom	Hilfsenergieleistung je Kältenennleistung*, in [W/kW]				
	Verdunstungsrückkühler				Trockenrückkühler
	geschlossener Kreislauf		offener Kreislauf		
	Axialventilator ohne Zusatzschalldämpfer	Radialventilator mit Zusatzschalldämpfer	Axialventilator ohne Zusatzschalldämpfer	Radialventilator mit Zusatzschalldämpfer	Axialventilator ohne Zusatzschalldämpfer
konstant	4...4,7	4,8...5,7	2,2...2,6	2,5...3	4...4,5
variabel	30...31	36...38	16...17	19...20	22...23
*für Serverraumkühlung sind alle Werte mit 1,5 zu multiplizieren					

Tabelle 92 Hilfsenergien für wassergekühlte Kompressionskältemaschinen [13]

Maßgeblichen Einfluss hat die Regelung des Kühlwasservolumenstroms. Wird der Volumenstrom im Rückkühlkreis variabel gewählt (damit die Eintrittstemperatur konstant ist), ergeben sich deutlich größere Hilfsenergieaufwendungen. Jedoch fallen dann die Jahresarbeitszahlen EER besser aus (siehe Tabelle 84).

Bei Ad- und Absorptionskältemaschinen fallen Hilfsenergien für Pumpen an. Tabelle 93 zeigt typische Leistungsansätze bezogen auf die Nennkälteleistung.

Hilfsenergieleistung je Kältenennleistung, in [W/kW]		
Absorption mit H_2O-LiBr	Absorption mit NH_3-H_2O	Adsorption mit H_2O-Silikagel-Zeolith
15	40	0

Tabelle 93 Hilfsenergien für Sorptionskältemaschinen [13]

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Zur Bestimmung der Effizienz von Kälteerzeugern im Feld bietet sich der Einbau von Zählern an. Die erfassten Kennwerte werden anschließend z.B. mit der "Energieanalyse aus dem Verbrauch" (siehe Abschnitt 4.3.3) ausgewertet. Es liefert einen lastabhängigen Zusammenhang zwischen zugeführter Leistung und Nutzkälteleistung.

Einsparpotentiale

Mit Hilfe der Arbeitszahlen EER des vorliegenden Abschnittes 3.7.1 lassen sich aus der Verbesserung der Erzeugung resultierende Einsparungen bestimmen. Es gilt der allgemeine Zusammenhang für die absolute Einsparung an Endenergie Q_E:

$$\Delta Q_E = Q_{Nutz} \cdot \left(\frac{1}{EER_{alt}} - \frac{1}{EER_{neu}} \right).$$

Die relative Einsparung an Endenergie bezogen auf den Ursprungszustand ergibt sich zu:

$$\frac{Q_{E,neu}}{Q_{E,alt}} = \frac{EER_{alt}}{EER_{neu}}$$

Eingangsgrößen sind die Arbeitszahlen EER des Erzeugers jeweils im Zustand vor und nach der Änderung. Die Kennwerttabellen und Grafiken zur Abschätzung der Erzeugereffizienz zeigen folgende Erkenntnisse:

- der Einfluss des Kältemittels, der Verdichterbauart sowie der Verdichterregelung ist vergleichsweise gering
- ein deutlich größerer Einfluss ergibt sich aus der Art der Rückkühlung (Temperaturniveau sowie Regelung des Volumenstroms)
- darüber hinaus spielt das Abnehmertemperaturniveau eine entscheidende Rolle.

3.7.2 Speicher

Kältespeicher werden in der Praxis als Kaltwasser- oder Eisspeicher ausgebildet. Sie dienen der Glättung von Lastspitzen. Die Motivation für den Einsatz ist:

- eine Optimierung der leistungsbezogenen Anteile der Energiekosten,
- eine Verminderung von Investitionskosten durch eine kleinere notwendige Kälteerzeugerleistung,
- eine Erhöhung der Erzeugerauslastung,
- eine Verbesserung der Erzeugereffizienz durch Betrieb in bestimmen Lastphasen (optimaler Kompressorwirkungsgrad) unabhängig von der restlichen Anlage.

Speichernutzungsgrad

Für die Höhe der zu erwartenden jährlichen Wärmeverluste des Speichers Q_s [kWh/a] sind die Betriebszeit und seine Verlustleistung über die Oberfläche bestimmend. Letztere hängt von der mittleren Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungstemperatur am Aufstellort und der mittleren Speichermediumstemperatur sowie der Speicheroberfläche und dem Wärmedurchgangskoeffizienten ab. Es sind jedoch kaum detaillierte Kennwerte in der Literatur zu finden, so dass in der Praxis der Speicherverlust über einen Speichernutzungsgrad η_s [-] abgeschätzt wird.

Für Jahresbetrachtungen bzw. Untersuchungen einer Kühlperiode gelten folgende zusammenhänge:

$$Q_s = Q_{Nutz} \cdot \left(\frac{1}{\eta_s} - 1 \right) = Q_{Zu} \cdot \left(1 - \eta_s \right)$$

Notwendig ist neben Kenntnis des Nutzungsgrades eine der beiden Energiemengen: die aus dem Speicher an das Netz gelieferten Energiemenge Q_{Nutz} [kWh/a]] (als Kühlenergie entgegen dem Temperaturgradienten) oder die dem Speicher zugeführte Energiemenge Q_{Zu} [kWh/a]. Tabelle 94 gibt einen Überblick über typische Speichernutzungsgrade.

Betriebsweise und Regelungskonzept	Speichernutzungsgrad η_s [-]	
	Kaltwasserspeicher	Eisspeicher
Speicher mit Wetterprognoseregelung	0,99	0,99
Speicherentladung am Folgetag parallel zur Kältemaschine	0,95	0,97
Spitzenlastspeicher	0,90	0,95
Redundanzspeicher	0,73	0,86

Tabelle 94 Typische Nutzungsgrade für Kältespeicher [13]

Rückwirkung auf die Erzeugereffizienz

Kältespeicher beeinflussen die Effizienz der Kälteerzeuger. Maßgeblich ist die Art der Erzeugerregelung, zweitrangig ist die Speicherart und -betriebsweise. Ausgehend von einer Jahresarbeitszahl der Kältemaschine ohne zusätzlichen Speicher ergibt sich ein korrigierter Wert anhand der Korrekturfaktoren in Tabelle 94.

	Korrekturfaktor für die Jahresarbeitszahl der Kältemaschine [-]					
Regelung wassergekühlter Kältemaschinen	**Kolben- und Scrollverdichter mit Zweipunktregelung, Schraubenverdichter mit Steuerschieberregelung, Turboverdichter mit Einlassdrosselregelung, Invertergeregelte Schraubenverdichter**		**Turboverdichter mit Inverterregelung, mehrstufig schaltbare Kolben- und Scrollverdichter**		**Kolbenverdichter mit Zylinderabschaltung, Kolben- und Scrollverdichter mit Heißgasbypassregelung**	
Regelung luftgekühlter Kältemaschinen	**mehrstufig schaltbare Kolben- und Scrollverdichter**		**Turboverdichter mit Inverterregelung**		**Schraubenverdichter mit Steuerschieberregelung, digitale Scrollverdichter**	
Betriebsweise und Regelungskonzept	**Kaltwasserspeicher**	**Eisspeicher**	**Kaltwasserspeicher**	**Eisspeicher**	**Kaltwasserspeicher**	**Eisspeicher**
Speicher mit Wetterprognoseregelung	1,02	1,04	0,95	0,89	1,11	1,26
Speicherentladung am Folgetag parallel zur Kältemaschine	1,07	0,85	0,97	0,71	1,23	1,07
Spitzenlastspeicher	1,02	1,03	0,95	0,88	1,11	1,25
Redundanzspeicher	1,05	0,94	0,96	0,79	1,17	1,16

Tabelle 95 Speichereinfluss auf die Kältemaschineneffizienz [13]

Der Speicher verändert die Phasen des Teil- und Volllastbetriebes sowie die Kältemitteltemperaturen (Verdampfung, Kondensation) in den Phasen der Speicherladung. Es ergeben sich in der Mehrzahl verbesserte Effizienzen, jedoch resultiert in vielen Konstellationen auch ein Effizienzverlust. Ablesebeispiel:

- ein Kaltwasserspeicher wird als Spitzenlastspeicher eingesetzt
- die Kältemaschine ist eine zentrale wassergekühlte Kompressionskältemaschine
- der Scrollverdichter wird mit Zweipunktregelung (taktend) betrieben
- abgelesen: Korrekturfaktor 1,02 → 2 % bessere Jahresarbeitszahl der Kälteerzeugung

Einsparpotentiale

Speicher führen zu Energieverlusten sowie Investitionskosten. Sie führen zu energetischen Einsparpotentialen, wenn sich die Kälteerzeugereffizienz verbessert. Dies ist bei Praxisprojekten abhängig von der Erzeugerregelung zu untersuchen. Wirtschaftliche Vorteile können auch aus vermiedenen Leistungskosten generiert werden. Es bedarf einer genauen Planung.

3.7.3 Verteilnetze

Wie bei anderen Komponenten, in denen ein Medium zirkuliert, kann ein Kälteverlust des Verteilnetzes Q_d [kWh] bestimmt werden. Maßgebend sind Netzlänge, Temperaturdifferenz zwischen Umgebungstemperatur am Verlegeort und Mediumstemperatur, der Wärmedurchgangskoeffizient des Leitungsabschnitts sowie die Betriebszeit.

Insbesondere über typische Netzlängen sind kaum Kennwerte verfügbar, so dass in der Praxis der Verteilverlust über einen Verteilungsnutzungsgrad η_d [-] abgeschätzt wird. Es sind ausschließlich Jahreswerte bzw. Werte für eine Kühlperiode dokumentiert. Notwendig ist entweder die Kenntnis der aus dem Netz an die Verbraucher gelieferten Energiemenge Q_{Nutz} [kWh/a] oder der Aufwand an Energie, welche dem Netz zugeführt wird Q_{Zu} [kWh/a]. Es gilt:

$$Q_d = Q_{Nutz} \cdot \left(\tfrac{1}{\eta_d} - 1\right) = Q_{Zu} \cdot \left(1 - \eta_d\right)$$

Leitungsdämmung

Analog zu wärmeführenden Leitungsabschnitten setzt die Energieeinsparverordnung verbindliche Anforderungen für die Dämmung von kälteführenden Leitungen. Das Anforderungsniveau kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Leitungsabschnitte, die im unbeheizten Bereich oder in Schächten liegen, erhalten ca. 100 % Dämmung (Dämmdicke entspricht Innendurchmesser),
- Leitungsabschnitte, die an Außenluft grenzen, erhalten 200 % Dämmung (Verlegung im Erdreich regelt die EnEV nicht),
- Leitungen innerhalb des beheizten Bereichs im Estrich werden mit 6 mm, in anderen Bauteilen mit 50 % gedämmt, wenn es sich um Verlegeorte/Bauteile zwischen verschiedenen Nutzern handelt und die Leitungen nicht absperrbar sind,
- Leitungen innerhalb des beheizten Bereichs können ungedämmt bleiben, wenn es sich um eine Verlegung in einer Nutzeinheit handelt und die Leitungen absperrbar sind (allerdings wird aus Schutz vor Oberflächenkondensation in der Praxis ohnehin lückenlos gedämmt).

Die sich ergebenden längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten U_R [W/(mK)] für Rohre sind identisch mit denen der Trinkwassernetze, siehe Bild 66 in Abschnitt 3.8.3. Für neue Netze mit 100 %-Dämmung (Dämmdicke entspricht dem Rohrdurchmesser) ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von U_R = 0,2 W/(m²K).

Verteilungsnutzungsgrad

Ausgehend von einer typischen Verlegedichte der Netze sowie üblicher Dämmung ergeben sich die in Tabelle 96 zusammengestellten Verteilungsnutzungsgrade. Werte für andere Systemtemperaturen können entsprechend abgeschätzt werden.

Systembeschreibung		Verteilungsnutzungsgrad η_d [-]	
		Netz innerhalb des beheizten/gekühlten Bereiches	Netz außerhalb des beheizten/gekühlten Bereiches (Keller, Dach)
Kaltwasser	6/12°C	0,95	0,90
	14/18°C	0,95	0,90
	18/20°C	1,00	1,00
Kältemittel bei Direktverdampfern		0,95	0,90

Tabelle 96 Verteilungsnutzungsgrade für Kältenetze [13]

Hilfsenergie

Mit der Kaltwasserverteilung im Gebäude sowie der Kühlwasserverteilung (Rückkühlung) sind Pumpenstromaufwendungen verbunden. Anhand von Pumpenleistungen sowie Laufzeiten kann der Aufwand an elektrischer Hilfsenergie abgeschätzt werden. Die DIN V 18599 liefert hierzu ein detailliertes Verfahren sowie zusätzlich die Kennwerte nach Tabelle 97. Grundlage der Kennwertbildung ist die Kühl- bzw. Kälteleistung der Kälteversorgungseinheit im Auslegungsfall $\dot{Q}_Z$ [kW].

Systembeschreibung	**Kennwert für den elektrischen Hilfsenergieaufwand $Q_{el}/\dot{Q}_Z$ [kWh/(a · kW)]**		
	ineffizient	**typisch**	**optimiert**
	hoher Druckverlust im Rohrnetz, saisonaler Betrieb, kein hydraulischer Abgleich, Überströmungen, ungeregelte Pumpe	mittlere Druckverluste im Rohrnetz, intermittierender Betrieb, ungeregelte oder geregelte Pumpen	geringe Druckverluste im Netz, bedarfsgesteuerte Pumpenlaufzeit, optimale Auslegung, Regelpumpen
Primärkreispumpe	16	5	2
Pumpe für zentrale RLT-Kühlung	48	20	7
Pumpe für Gebäudekühlkreise	170	45	25
Pumpe im Rückkühlkreis	90	30	10

Tabelle 97 Typische Hilfsenergien für die Kalt- und Kühlwasserverteilung [13]

Aufgrund der eher geringen Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf (2 ... 6 K) ergeben sich hohe umlaufende Volumenströme. Darüber hinaus sind viele Rückkühlkreise mit einem Wasser-/Glykolgemisch mit höherer Viskosität gefüllt. Beide Aspekte führend zu einem hohen Hilfsenergieaufwand – verglichen mit Heizungsanwendungen.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Da die Literatur eher ungenaue Einschätzungen anhand des Nutzungsgrades macht, empfiehlt sich für Praxisprojekte entweder die Messung oder eine detailliertere Berechnung aus Leitungslängen, U-Wert, Temperaturdifferenz und Betriebszeit – analog 3.6.3.

Einsparpotentiale

Es sind vielfach bereits sehr gute Dämmstandards sowie eine lückenlose Dämmung – auch der Armaturen – in Kälteverteilnetzen vorzufinden. begründet ist dies durch den notwendigen Schutz vor Kondensatbildung an den Rohroberflächen. In der Praxis ergeben sich Einsparpotentiale daher vor allem durch Optimierung der Leitungslängen bei Neubauten sowie der Pumpen im Bestand. Der Übergang von typischen zu optimierten Systemen führt zu einer Halbierung bis Drittelung der Hilfsenergieaufwendungen, siehe Tabelle 97.

3.7.4 Übergabeeinrichtungen

Die Kälteübergabe an den Nutzer erfolgt mit freien (z.B. Induktionsklimageräten) oder bauteilintegrierten (z.B. Kühldecken) Kühlflächen. Zur Kühlfläche gehört eine Regeleinrichtung. Beide Elemente zusammen führen – je nach Nutzereingriff, Fremdwärmeaufkommen und ggf. ungewollter Entfeuchtung – zu einer mehr oder weniger konstant und nahe dem Sollwert gehaltenen Raumtemperatur.

Die energetische Bewertung erfolgt unterschiedlich, siehe auch Abschnitt 3.1. In der DIN V 18599 wird zur energetischen Bewertung ein Übergabeverlust Q_{ce} [kWh] verwendet.

Übergabenutzungsgrad

Der Übergabenutzungsgrad η_{ce} [-] enthält zusammengefasst den Einfluss der Temperaturregelgenauigkeit als auch der ggf. ungewollten Entfeuchtung. Die DIN V 18599, aus der die Kennwerte abgeleitet wurden, gibt beide Einflüsse getrennt an. Tabelle 98 gibt typische Werte an.

System		Nutzungsgrad η_{ce} [-]	Beispielanwendung
Kaltwasser	6/12°C	0,88	-
	8/14°C	0,91	Ventilatorkonvektor
	14/18°C	1,00	Induktionskälte
	16/18°C	1,00	Kühldecke
	18/20°C	0,91	Bauteilaktivierung
Kaltluft	passive Kühlung	1,00	Erdreichwärmeübertrager
	aktive Kühlung	0,91	Abluft-/Zuluft-Kältemaschine
Direktverdampfung		0,88	-

Tabelle 98 Übergabenutzungsgrade für Kälteanwendungen [13]

Mit dem Übergabenutzungsgrad η_{ce} wird der Übergabeverlust Q_{ce} aus der an den Raum oder die Luft abgegebene Nutzenergiemenge Q_{Nutz} ermittelt:

$$Q_{ce} = Q_{Nutz} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{ce}} - 1\right)$$

Beispiel: unterstellt wird ein Nutzkältebedarf von 1000 kWh/a für ein Großraumbüro – unter der Annahme einer idealen Regelung und ohne ungewollte Entfeuchtung. Ein Übergabenutzungsgrad von 0,91 für einen Ventilatorkonvektor bedeutet, dass etwa 1/0,91 = 1,10 Mal so viel Energie aus dem Verteilnetz entnommen wird, als es dem Idealzustand entspricht. Der Übergabeverlust entspricht dem Mehraufwand von 100 kWh/a.

Hilfsenergien

In einigen Versorgungssystemen wird für die Übergabe der Kälte an den Raum eine zusätzliche Hilfsenergie benötigt. Der Ventilatorstromaufwand Q_{el} [kWh] steigt proportional zur an den Raum abgegebenen Kälteenergie Q_C [kWh] an. Typische Kennwerte liefert Tabelle 99.

Systembeschreibung		Energieaufwand Q_{el}/Q_c
Raumklimageräte, Direktverdampfung	Luftverteilung über Kanäle und individuelle Luftdurchlässe	0,06
	Deckenkassetten, Wand- und Brüstungsgeräte	0,04
Ventilatorkonvektoren, kaltwasserversorgt	Brüstungs- und Deckengeräte Kaltwasser 6 °C	0,04
	Brüstungs- und Deckengeräte Kaltwasser 14 °C	0,07
	Deckengeräte mit Luftverteilung über Kanäle Kaltwasser 14 °C	0,08

Tabelle 99 Hilfsenergieaufwand für die Übergabe von Kälte an den Raum [13]

Sofern eine Ventilatorleistung bekannt ist, kann die Energiemenge auch aus Leistung und Laufzeit berechnet werden. Sind stufige oder geregelte Ventilatoren vorhanden, sind Zeitintegrale zu bilden bzw. die Phasen gleicher Leistung rechnerisch zusammenzufassen.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Wird in einem Bestand die Innentemperatur gemessen (Langzeitmessung über Wochen und Monate), enthält dieser Messwert bereits alle Einflüsse der Übergabe und Regelung. Es ist dann nicht mehr erforderlich, zusätzliche Wärmeübergabeverluste rechnerisch zu berücksichtigen. Weitere Erläuterungen enthält der Abschnitt 3.6.4.

3.8 Kennwerte für die Trinkwassererwärmung

Die Trinkwarmwasserversorgung ist geprägt durch einerseits einen Wechsel zwischen extremen Lastspitzen und Stillstandszeiten (Konsequenzen für die Erzeugerleistung und ggf. Speicherung) sowie andererseits durch hygienische Anforderungen der Legionellenvermeidung im Lebensmittel 'Trinkwasser' (thermische Desinfektion oder Vermeidung von Bevorratung). Technische Systeme müssen beiden Anforderungen gerecht werden.

Die in Abschnitt 3.2.4 bezifferte Nutzenergie für Trinkwarmwasser, welche aus den Zapfstellen entnommen wird, muss erzeugt, ggf. gespeichert und verteilt werden. Die dafür notwendige Endenergiemenge kann mit Hilfe von Kennwerten für die technischen Systemkomponenten beschrieben und eingeschätzt werden.

Für die unterschiedlichen Erzeuger werden im Rahmen dieser Kennwertsammlung typische Nutzungsgrade η (bzw. Arbeitszahlen) zur Beschreibung verwendet. Außerdem werden für Systeme mit mehr als einem Erzeuger Deckungsanteile α zusammengestellt. Sie geben an, welchen Beitrag einzelne Erzeuger zur Gesamtenergielieferung des Systems leisten. Darüber hinaus weisen die meisten Systeme zur Trinkwasserbereitung einen Hilfsenergieaufwand für die Regelung, Pumpen, Gebläse und sonstige Antriebe auf. Auch hierfür liefert Abschnitt 3.8.1 typische Kennwerte.

Abschnitt 3.8.2 stellt typische Kennwerte zur Bewertung von Speichern zusammen. Es handelt sich hierbei einerseits um installierte Volumina – abhängig von der zu versorgenden Fläche. Andererseits können Speicher mit Verlustleistungen $\dot{Q}_s$ oder täglichen Wärmeverlusten q_B beschrieben werden. Diese sind abhängig von der Kompaktheit der Speicher, der Dämmung und der Temperaturdifferenz zur Umgebung (für welche es standardisierte Annahmen gibt).

Der größte Verlustposten des Systems Trinkwassererwärmung ist das Verteilnetz. Es kann zum einen mit Leitungsverlegedichten für das Netz beschrieben werden. Darüber hinaus gibt es längenbezogene Wärmeverluste für die Rohrleitungen, abhängig vom Dämmstandard und vor allem von der Trinkwarmwassertemperatur. Hier spielt der Betrieb oder Verzicht einer Zirkulation die entscheidende Rolle. Neben den wärmetechnischen Eigenschaften gibt Abschnitt 3.8.3 auch Hinweise zu typischen Hilfsenergien (Pumpen).

Der Schwerpunkt des gesamten Kapitels liegt dabei bei den Wohngebäuden, in denen die Trinkwassererwärmung standardmäßig vorkommt. Dennoch sind Kennwerte übertragbar auf andere Nutzungsarten. Allen gemein ist der Zusammenhang zwischen Speichervolumen, Erzeugerleistung und Ladedauer, wie er in Bild 60 für Wohnbauten gezeigt wird.

Für die Trinkwassererwärmung sind extrem kurze Bedarfszeiträume (in denen die Zapfung stattfindet), jedoch mit großen Leistungen festzustellen. Das bedeutet für die Anlagentechnik:

- der Verzicht auf einen Speicher führt zu einer sehr großen Erzeugerleistung und in der weiteren energetischen Betrachtung zu sehr gering ausgelasteten Erzeugern (Bild 60, obere Linie "Durchlaufsystem")
- der Einbau eines kleinen bis mittleren Speichers führt zu einer mittleren Ladeleistung, sowie mittleren Ladezeiten (Bild 60, mittlere Linien "typisch: Kessel"), Erzeuger sind besser ausgelastet, jedoch ergeben sich nun Speicherverluste
- der Einbau eines großen Speichers führt zu kleinen Ladeleistungen sowie den längsten Ladezeiten (Bild 60, untere Linien "typisch: Wärmepumpen"), Erzeuger sind über lange Zeiten ausgelastet, es ergeben sich die größten Speicherverluste.

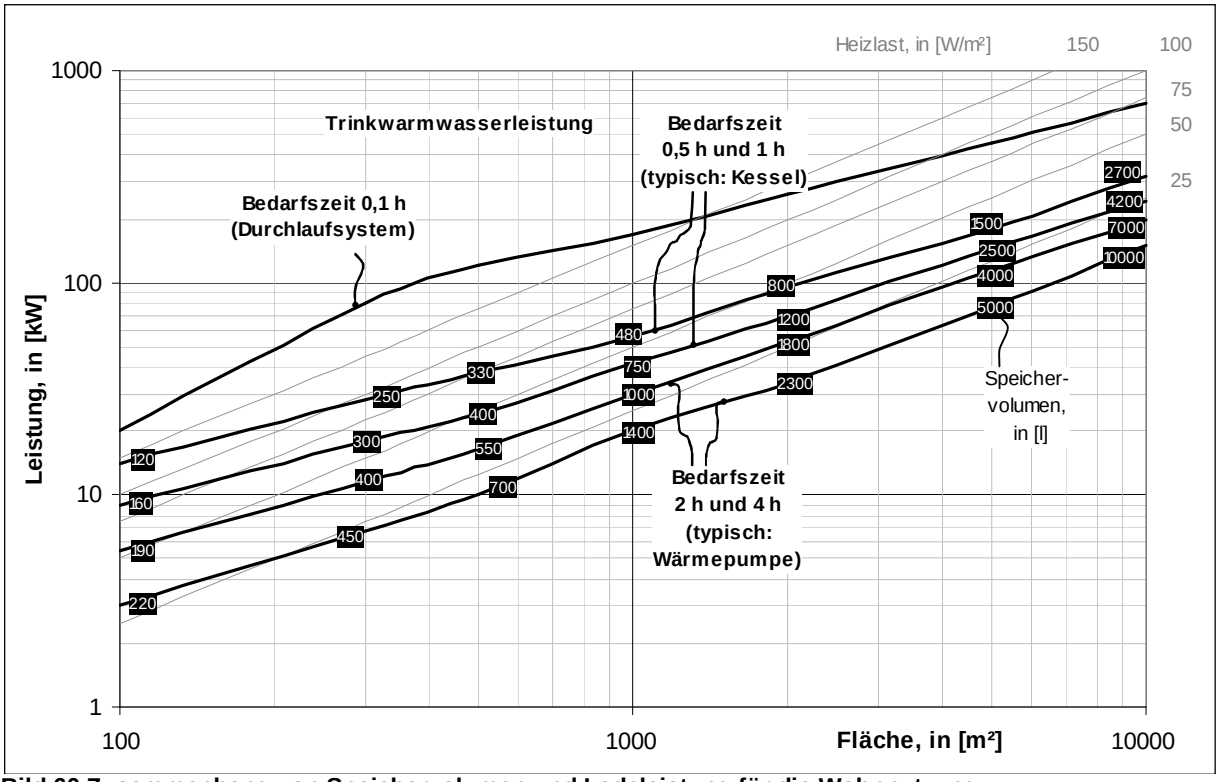


Bild 60 Zusammenhang von Speichervolumen und Ladeleistung für die Wohnnutzung

Die Darstellung in Bild 60 gilt für eine Wohnungsnutzung mit üblicher Personenbelegung (ca. 35 … 40 m² Wohnfläche je Person), üblichen Armaturen (keine "Rain-Shower"-Ausstattung) sowie unter der Annahme einer relevanten Zapfstelle (Badewanne oder Dusche) je Wohnung, welche benutzt wird (keine gleichzeitige Nutzung von Gäste-Badezimmern). Andere Konstellationen lassen sich z.B. mit DIN 4708 berechnen.

		Verteilsystem		Auswirkung auf die Investitionen	Auswirkungen auf die Energiebilanz
		zentral	dezentral		
Speicher-/Erzeugersystem	Durchlaufprinzip	Frischwasserstation	mit Gas oder Strom betriebene Durchlauferhitzer	große Erzeugerleistung, höhere Erzeugerkosten, keine Speicherkosten	geringere Erzeugerauslastung, ggf. höhere Betriebsbereitschaftsverluste des Erzeugers, kein Speicherverlust
	Speicherprinzip	indirekt beheizter Speicher, direkt beheizter Gasspeicher, zentraler Elektrospeicher oder Elektronachtspeicher	direkt mit Gas beheizter Speicher, Elektrokleinspeicher	kleinere Erzeugerleistung, geringere Erzeugerkosten, Speicherkosten	Speicherverlust, bessere Erzeugerauslastung, ggf. geringere Betriebsbereitschaftsverluste
Auswirkung auf die Investitionen		höhere Investitionen in das Netz, geringere in die Erzeuger	höhere Investition in die Erzeuger, geringere in das Netz		
Auswirkungen auf die Energiebilanz		hohe Netzverluste, gute Einbindung regenerativer Energien möglich	geringe Netzverluste, kaum Einbindung regenerativer Energien		

Tabelle 100 Vor- und Nachteile der Systemvarianten für die Trinkwassererwärmung

Wird neben der Frage der Speicher auch noch das Netz in die Systematisierung einbezogen, ergeben sich Vor- und Nachteile nach Tabelle 100. Neben den dargestellten Systemen gibt es Zwischen- und Zwitterlösungen, z.B. teildezentrale Systeme mit lokalen Speichern, aber zentralen Netzen. Diese Sonderlösungen werden in den Abschnitten 3.8.2 und 3.8.3 besprochen.

Die Dreierkonstellation aus Erzeugerleistung, Speichervolumen und Ladezeit sowie das Vorhandensein eines Netzes lassen sich im Zuge konkreter Projekte untersuchen und ein individuelles Optimum finden. Es ergeben sich gegenläufige Einflüsse auf die Gesamtkosten aus den Investitionskosten und den Betriebsbereitschaftsverlusten (jeweils für Speicher, Erzeuger und Netz).

3.8.1 Erzeuger

Für die Trinkwassererzeugung kommen zentrale oder dezentrale Erzeuger zum Einsatz. Ihre Effizienzen lassen sich – wie für die Heizungserzeuger in Abschnitt 3.6 beschrieben – mit Nutzungsgraden oder Aufwandszahlen bewerten. Die Theorie wird an dieser Stelle nicht wiederholt.

Zur Darstellung der Effizienzen wird auf Nutzungsgrade η_a (Jahreswerte) oder Jahresarbeitszahlen β bzw. Jahresheizzahlen ζ zurückgegriffen. Sie ergeben sich aus dem jährlichen Verhältnis von produzierten Nutzwärmemengen zum Endenergieeinsatz. Aufwandszahlen e_g werden nicht dargestellt; sie sind jeweils die Kehrwerte der tabellierten Zahlen. Für brennstoffbetriebene Geräte werden die Nutzungsgrade auf den Brennwert bezogen, eine Umrechnung in heizwertbezogene Größen kann erfolgen. Abschnitt 2.5 erläutert das Vorgehen; weiter unten wird zusätzlich ein Beispiel gezeigt.

Für die meisten Erzeuger gilt zudem, dass sich ihre Effizienz aus einer Gewichtung verschiedener Betriebszustände und der Betriebsbereitschaft ergibt. Daher sind Effizienzangaben belastungs- oder auslastungsabhängig: je geringer die Belastung φ, desto schlechter die Effizienz, da Stillstandsverluste anteilig zunehmen.

Zentrale Kessel

Die zentrale Trinkwassererwärmung erfolgt in den meisten Fällen über einen Kessel. Da in fast allen betroffenen Objekten gleichzeitig geheizt wird, ist der kombinierte Betrieb in der Heizperiode normal. Tabelle 101 zeigt typische Effizienzen für zentrale Kessel in dieser Betriebsweise. Für detailliertere Kesseleffizienzen (auch abhängig vom Baujahr des Kessels) wird auf die Kennwerte nach Abschnitt 3.6.1 verwiesen.

Kesselbauart	Leistung $\dot{Q}_K$ [kW]	Nutzungsgrad η_a [-] brennwertbezogen	
		Gasbefeuerter Kessel	Ölbefeuerter Kessel
Niedertemperaturkessel (atmosphärische Brenner)	bis 120	0,78...0,86	-
Niedertemperaturkessel (Gebläsebrenner)	alle	0,79...0,87	0,81...0,89
Brennwertkessel	bis 50	0,83...0,91	0,81...0,90
	> 50...120	0,84...0,92	0,83...0,91
	>120...1200	0,85...0,93	0,84...0,92

Tabelle 101 Typische brennwertbez. Nutzungsgrade für Kessel zur Trinkwassererwärmung [44][51][70]

Der Nutzungsgrad ergibt sich aus einem Wirkungsgrad und Angaben zur Betriebsbereitschaft. Im Falle der Trinkwassererwärmung ist zur Effizienzberechnung die Verwendung des Volllastwirkungsgrades η_{100} (bei 100 % Kesselbelastung) typisch. Es wird von einer Speicherladung (oder Versorgung einer Frischwasserstation) mit voller Kesselleistung ausgegangen.

Bild 61 zeigt die Standardannahmen der DIN V 4701-10 für Kessel mit Baujahren nach 1995. Unter einem "verbesserten Brennwertkessel" ist ein Gerät zu verstehen, das bei der Prüfstandsmessung erhöhe Anforderungen erreicht hat (Bestätigung vom Hersteller per Zertifikat). Fast der gesamte heutige Gerätemarkt erfüllt diese Kriterien. Die Werte sind heizwertbezogen – üblich in der genannten Norm. Eine Umrechnung in brennwertbezogene Kennwerte kann erfolgen, wobei die Ablesewerte durch den Umrechnungsfaktor Brennwert/Heizwert dividiert werden.

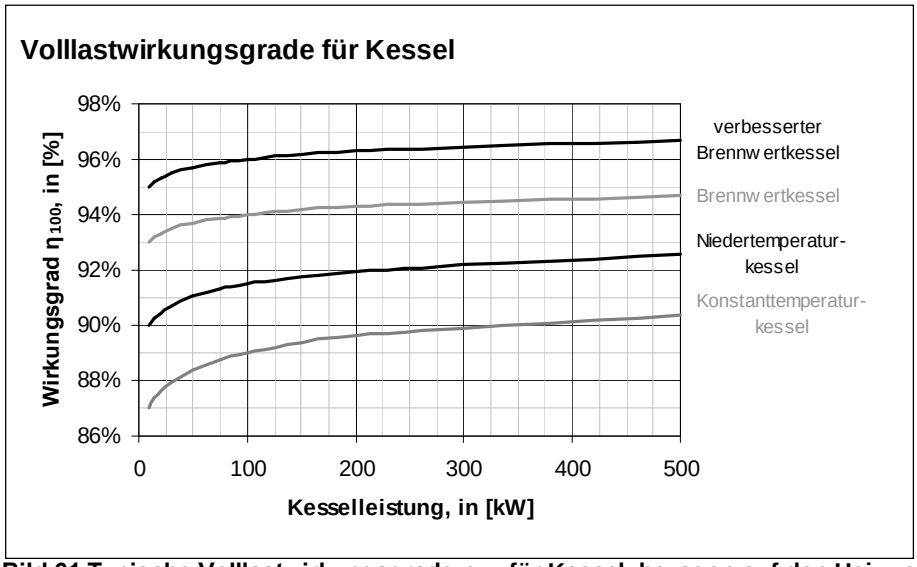


Bild 61 Typische Volllastwirkungsgrade η_{100} für Kessel, bezogen auf den Heizwert [15]

Der Betriebsbereitschaftsverlust q_B nach Bild 62 entstammt ebenfalls der DIN V 4701-10. Er ist – für Trinkwarmwasserbewertungen üblich – auf 70°C Kesseltemperatur bezogen.

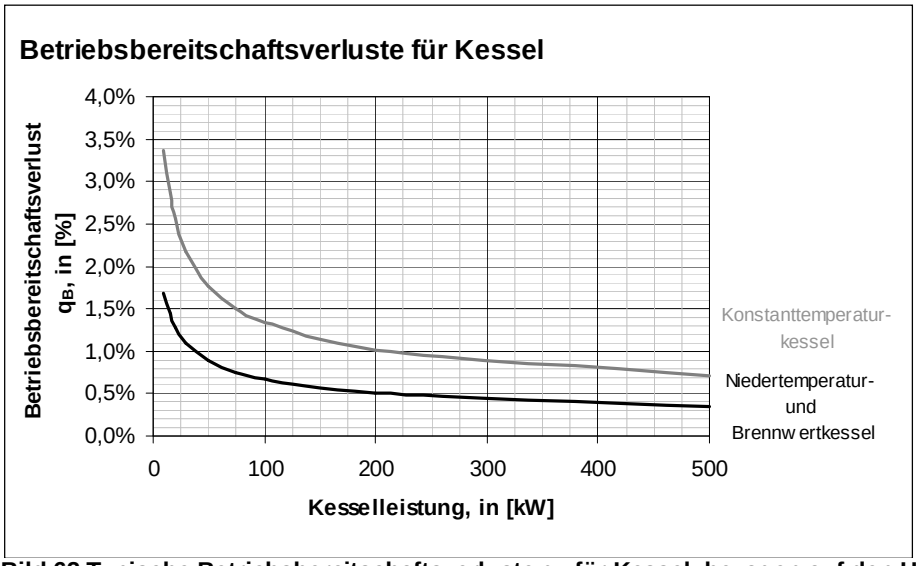


Bild 62 Typische Betriebsbereitschaftsverluste q_B für Kessel, bezogen auf den Heizwert [15]

Werden Kessel ausschließlich zur Trinkwassererwärmung eingesetzt, ergeben sich deutlich schlechtere Werte als in Tabelle 101 dargestellt. Dies liegt an der dann sehr geringen Kesselbelastung. Individuelle Werte sollten in diesem Fall unter Verwendung des Wirkungsgrades η_{100} und des Betriebsbereitschaftsverlustes q_B ermittelt werden. Beispiel:

- 12-Familienhaus mit 36 Personen
- je Person 600 kWh/a Nutzwärmemenge für Trinkwarmwasser
- Verteilungs- und Speichernutzungsgrad η_{d+s} = 50 %
- Niedertemperaturkessel mit 70 kW Leistung, gasbetrieben
- Betriebszeit der Trinkwassererwärmung t_{ww} = 365 d/a = 8760 h/a
- Wirkungsgrad (heizwertbezogen) des Kessels η_{100} = 91,5 % (aus Bild 61 abgelesen)
- Betriebsbereitschaftsverlust des Kessels q_B = 0,8 % (aus Bild 62 abgelesen)

Die Bilanz liefert zunächst eine zu produzierende Wärmemenge und zusammen mit der Kesselleistung $\dot{Q}_K$ eine Kesselauslastung φ:

$$\varphi = \frac{Q_{Nutz,ww} / \eta_{d+s}}{\dot{Q}_K \cdot t_{ww}} = \frac{36P \cdot 600 \frac{kWh}{Pa} \cdot \frac{1}{0,5}}{70kW \cdot 8760 \frac{h}{a}} = 0,07$$

Die Auslastung φ von 7 % bedeutet, dass der Kessel mit seiner Nennleistung $\dot{Q}_K$ die gewünschte Wärmemenge in 7 % der Zeit produzieren könnte. Unter der Annahme, dass der Kessel in der restlichen Zeit nur Betriebsbereitschaftsverluste aufweist, ergibt sich ein heizwertbezogener Jahresnutzungsgrad η_a im reinen Trinkwarmwasserbetrieb:

$$\eta_a = \frac{\eta_{100}}{\left(\frac{1}{\varphi} - 1\right) \cdot q_B + 1} = \frac{0,915}{\left(\frac{1}{0,07} - 1\right) \cdot 0,008 + 1} = 0,827$$

Wegen der immensen Stillstandszeiten verschlechtert sich der Wirkungsgrad im Betrieb 91,5 % auf einen Jahresmittelwert von 82,7 %. Wird dieser Nutzungsgrad in eine brennwertbezogene Größe umgerechnet, ergibt sich für einen Gaskessel mit den Stoffeigenschaften aus Abschnitt 2.5 ein Wert von nur knapp 75 %:

$$\eta_a(H_S) = \frac{\eta_a(H_i)}{f_{HSHI}} = \frac{0,827}{1,11} = 0,745 .$$

Die sehr schlecht ausfallenden Ergebnisse zeigen deutlich, dass ein Kessel für den reinen Trinkwasserbetrieb energetisch nicht sinnvoll ist. Bei kombiniertem Betrieb ergeben sich die berechneten schlechten Nutzungsrade allerdings in der sommerlichen Heizpause.

Die in den Normen und Kennwertsammlungen für die Trinkwassererwärmung kommunizierten Kennwerte sind vergleichsweise realistisch. Es wird bei Brennwertkesseln von keiner nennenswerten Kondensation ausgegangen, da die Abgastemperaturen zu hoch sind. Dies bildet den Realbetrieb gut ab.

Wärmepumpen

Tabelle 102 zeigt typische Effizienzen von Wärmepumpen für die Trinkwarmwasserbereitung als mittlere Jahreswerte. Die Arbeitszahlen (elektrischer Antrieb) bzw. Heizzahlen (brennstoffbetriebene Wärmepumpe) gelten für eine Trinkwarmwassertemperatur von etwa 50°C. Mit steigender Quellentemperatur steigt die Effizienz. Weitere rechnerische zur Bestimmung der Arbeitszahl zu berücksichtigende Zusammenhänge sind in Abschnitt 3.6.1 erläutert.

Die jeweils besseren Werte ergeben sich, wenn die Wärmepumpe nicht monovalent arbeitet, sondern in den Spitzenlastzeiten ein weiterer Wärmeerzeuger (elektrische Nachheizung, Kessel) zum Einsatz kommt. Für Außenluft-, aber auch Sole-Wasser-Wärmepumpen sind Alternativbetrieb (Umschaltung auf den Spitzenlasterzeuger) oder Parallelbetrieb (Zuschalten des Spitzenlasterzeugers) üblich.

Wärmequelle	Arbeits- oder Heizzahl, in [-]						
	Erdreich (über Sole), Grundwasser		Außenluft		Kellerluft, Abluft mit WRG		Abluft ohne WRG
Bauart	**vor 1995**	**ab 1995**	**vor 1995**	**ab 1995**	**vor 1995**	**ab 1995**	
elektrisch β	2,5...2,8	3,1...3,4	2,0...2,3	2,3...2,6	2,5 .. .2,7	2,6...2,9	3,0...3,5
Gasmotorwärmepumpen ζ	1,4...1,7	1,6...1,9	1,2...1,4	1,4...1,6	-	-	-
WRG = Wärmerückgewinnung							

Tabelle 102 Typische Arbeitszahlen für Wärmepumpen im Trinkwarmwasserbetrieb [13][15][52][eigene]

Typische Bivalenzpunkte sind Außentemperaturen von -2°C bzw. 6°C. Es ergeben sich die Deckungsanteile nach Tabelle 103 für bivalente Systeme.

Hinweise zum System		Deckungsanteile α [-]	
		Grundlasterzeuger	Spitzenlasterzeuger
Wärmepumpe plus Elektronachheizung	Erdreich, Grundwasser, Abluft ohne WRG	0,90...0,95	0,05...0,10
	Außenluft, Kellerluft, Abluft mit WRG	0,80...0,90	0,10...0,20
Wärmepumpe plus Kessel	alternativer Betrieb	0,50...0,80	0,30...0,50
	paralleler Betrieb	0,80...0,98	0,02...0,20

Tabelle 103 Typische Deckungsanteile für Trinkwassererwärmung [13][15][70][eigene]

Verglichen mit den Normen und Regelwerken lassen sich im Feld etwas geringere Arbeitszahlen feststellen. Die Tabelle 102 berücksichtigt dies. Jedoch fällt die Überschätzung der Effizienzen nicht so hoch aus wie für den Heizbetrieb.

Dezentrale Erzeuger

Tabelle 104 stellt Nutzungsgrade für dezentrale Trinkwassererwärmer zusammen. Die Werte für gasbetriebene Geräte sind brennwertbezogen.

Nutzungsgrade η_a für Geräte zur Trinkwarmwasserbereitung (brennwertbezogen)										
zu deckender Wärmebedarf pro Gerät, in [kWh/a]		**250**	**500**	**750**	**1000**	**1500**	**2000**	**3000**	**5000**	**8000**
Gas	Durchlauferhitzer mit dauernd brennender Flamme	0,14	0,24	0,32	0,37	0,44	0,50	0,56	0,62	0,67
	Durchlauferhitzer mit elektronischer Zündung	0,75...0,80								
	Speicherwassererwärmer	0,72...0,76								
Strom	Kochendwassergerät	0,96...0,98								
	elektronischer Durchlauferhitzer, Heizstab	0,99...1,00								

Tabelle 104 Jahresnutzungsgrade für dezentrale Geräte zur Warmwasserbereitung [15][51][70][76]

Elektrisch betriebene Durchlauferhitzer sowie auch gasbetriebene Geräte mit elektronischer Zündung weisen einen nur geringen Anteil an Betriebsbereitschaftsverlusten auf, so dass sich Nutzungsgrade ergeben, die nur wenig von der Belastung der Geräte abhängen.

Für Gasspeicherwassererwärmer sowie elektrische Heizstäbe, welche Speicher erhitzen, ist zu berücksichtigen, dass zusätzlich zum genannten Nutzungsgrad der Oberflächenverlust des Speichers zu berücksichtigen ist – siehe Abschnitt 3.8.2.

Anschluss an ein Wärmenetz

Erfolgt die Trinkwassererwärmung über eine Nah- und Fernwärmeversorgung, ergeben sich die Bereitschaftsverluste der Übergabestation. Es kann für praktische Anwendungsfälle davon ausgegangen werden, dass ein kombinierter Betrieb mit der Heizung vorliegt.

Werden die Verluste der Übergabestation im Winterhalbjahr komplett der Heizung zugeschlagen, ergeben sich die in Tabelle 105 zusammengestellten Nutzungsgrade für die Trinkwassererwärmung als typische Jahresmittelwerte.

Bauart	Nutzungsgrad der Übergabestation η [-]		
	Heizung in der Heizperiode	Warmwasser in der Sommerperiode	Warmwasser Jahresmittelwert
Kompaktübergabestation mit Gehäuse	0,98	0,90	0,96
individuelles System aus Einzelrohrleitungen, gut gedämmt	0,95	0,85	0,93
individuelles System aus Einzelrohrleitungen, mäßig gedämmt	0,90	0,80	0,88

Tabelle 105 Jahresnutzungsgrade für Übergabestationen [51]

Die standardmäßige Aufwandszahl im EnEV-Nachweis bei Verwendung der DIN V 4701-10 [15] wird als zu schlecht angesehen (e_g = 1,14 bzw. η_a = 0,877).

Solare Trinkwassererwärmung

Bei der Bilanzierung der solaren Trinkwassererwärmung wird rechnerisch häufig auf Deckungsanteile zurückgegriffen. Mit ihrer Hilfe kann abgeschätzt werden, welchen Anteil der benötigten Energiemenge der Spitzenlasterzeuger liefern muss.

Alternativ kann mit absoluten Energiemengen bilanziert werden. Tabelle 106 zeigt typische Erträge, die auf die Kollektorfläche (Apertur) bezogen sind. Die tabellierten Werte decken sich mit Erfahrungen aus einem Forschungsvorhaben des BMU. Das Projekt macht vor allem Abweichungen zwischen Simulationsberechnungen und Feldmessungen bei solaren Großanlagen aufmerksam:

"Der Solarkollektorertrag in den Feldmessungen der Gebäudeanlagen liegt bei ca. 320 kWh/($m^2_{Koll.-Fl.}$ a). Der Kennwert liegt in der gleichen Größenordnung wie Auswertungen von 360 installierten und geförderten Anlagen in der Region Hannover: 310 kWh/($m^2_{Koll.-Fl.}$ a).

Die parallel innerhalb des Projektes durchgeführten Simulationsberechnungen ergeben Werte von 440 … 540 kWh/($m^2_{Koll.-Fl.}$ a) für ein Niedrigenergie-Mehrfamilienhaus, je nach Dimensionierung der Solaranlage." [7]

Beschreibung		Ertrag je m² Kollektorfläche, in kWh/(m²a)
Kleinanlagen bis 30 m² Kollektorfläche, keine Trinkwasserzirkulation	Trinkwarmwasserbereitung	300...400
	Trinkwarmwasserbereitung und Heizung	250...350
Großanlagen über 30 m² Kollektorfläche, mit Trinkwasserzirkulation	Trinkwarmwasserbereitung	250...350
	Trinkwarmwasserbereitung und Heizung	200...300
Schwimmbadvorwärmanlagen		300...600

Tabelle 106 Abschätzung der Erträge von Solarthermieanlagen [7][76][eigene]

Die in Tabelle 106 zusammengestellten Erträge gelten für eine übliche Dimensionierung. Im Falle der reinen Trinkwasserbereitung sind 0,7 … 1,5 m² Kollektorfläche je Person üblich (Tendenz: je kleiner das Gebäude, desto größer der Kennwert). Bei Kombianlagen mit Heizungsunterstützung werden etwa 1,5-fach größere Kollektorfelder installiert.

Bei der Dimensionierung ist festzustellen: je größer Anlagen ausgelegt werden, desto höher steigen die Deckungsanteile, aber desto geringer fallen die kollektorflächenbezogenen (nutzbaren) Erträge aus. Typische Deckungsanteile zeigt Tabelle 107.

Kollektorbemessung		solarer Deckungsanteil für die Trinkwassererwärmung α [-]	
A_{Koll}/A_{Wohn} [-]	A_{Koll}/Person [m²/P]	System mit Zirkulation	System ohne Zirkulation
0,040	1,6	0,47...0,50	0,55...0,60
0,035	1,4	0,45...0,47	0,50...0,55
0,030	1,2	0,43...0,45	-
0,025	1,0	0,40...0,43	-
0,020	0,8	0,35...0,40	-

Tabelle 107 Typische Deckungsanteile für die solare Trinkwassererwärmung [13][15][eigene]

Die Kombination von Solarthermie und permanenter Trinkwarmwasserzirkulation verschlechtert die Anlageneffizienz deutlich. Daher liegt das Hauptaugenmerk auf dem Einsatz im Ein- und Zweifamilienhaus. Künftig ist von einem wachsenden Einsatz der Photovoltaik zur Trinkwarmwasserbereitung über thermische Speicher, Wärmepumpen und langfristig elektrochemische Speicher (Batterie) auszugehen. Praktische Erkenntnisse aus Feldmessungen liegen noch nicht vor. Ein Einsatz von Solaranlagen in Mehrfamilienhäusern ist nach den Ergebnissen der BMU-Studie [7] nicht sinnvoll.

Wärmerückgewinnung aus Duschwasser

Eine Technologie zur Verminderung des Energieaufwandes der Trinkwassererwärmung ist die direkte Rückgewinnung von Wärme aus dem Duschwasser. Sie hat sich vor allem in den Niederlanden weit verbreitet.

Es kann davon ausgegangen werden, dass etwa 65 % des Warmwassers zum Duschen verwendet werden. Der temperaturbezogene Nutzungsgrad incl. Verschmutzung liegt bei 24 % (Normalfall) bis 43 % (hocheffizientes System). Die Werte gelten für einen Durchfluss von 12,5 l/min sowie einen ausbalancierten Betrieb (Massenstrom der Vorwärmung ist so groß wie der Massenstrom des Duschabwassers) [13].

Hilfsenergien

Tabelle 108 zeigt verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Hilfsenergien bei der Erzeugung des Trinkwarmwassers. Die Kennwerte sind Jahreswerte und beziehen sich – unabhängig von der Datenquelle – auf die Wohnfläche.

Komponente	Leistung	Laufzeit	Energiemenge	Literatur
Niedertemperatur- und Brennwertkessel	-	-	0,1...0,3 kWh/(m²a)	[15][52]
Solarkreispumpe	20 W + 5 W/WE · n_{WE}	1500 h/a	2,5 % · Q_{sol}	[13][51][50]
Solepumpe bei Erdreichwärmepumpe	0,6...1,0 W/m²	400 h/a	0,3...0,4 kWh/(m²a)	[15]
Grundwasserpumpe bei Grundwasserwärmepumpe	1,0...1,6 W/m²	-	0,5...0,7 kWh/(m²a)	[15]
Flächenbezug: Wohnfläche, WE = Wohneinheit, Q_{sol} = erzeugte Solarenergiemenge				

Tabelle 108 Typische Hilfsenergien bei der Erzeugung des Trinkwassers

Bei kombinierter Erzeugung von Trinkwarmwasser und Heizung gelten die Werte in Tabelle 108 anteilig für die Trinkwassererwärmung. Die weiteren Hilfsenergien für den Heizfall werden in Abschnitt 3.6.1 zusammengestellt.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Zur Bestimmung der Effizienz von Wärmeerzeugern im Feld bietet sich der Einbau von Zählern an. Die erfassten Kennwerte werden anschließend mit der "Energieanalyse aus dem Verbrauch" ausgewertet. Das in Abschnitt 4.3.3 erläuterte Verfahren führt zu Kennwerten des Wirkungsgrades η_K, der Betriebsbereitschaftsverluste q_B, der Erzeugerauslastung φ sowie zu einem Jahresnutzungsgrad η_a.

Für Kessel und andere brennstoffbetriebene Erzeuger führen auch Abgasmessungen sowie Oberflächentemperaturmessungen zu einer Effizienzeinschätzung. Das Mess- und Auswerteverfahren ist in DIN V 18599-8 für die Trinkwassererwärmung erläutert [13].

Einsparpotentiale

Mit Hilfe der Nutzungsgrade des vorliegenden Abschnittes 3.8.1 lassen sich aus der Verbesserung der Erzeugung resultierende Einsparungen bestimmen. Es gilt der allgemeine Zusammenhang für die absolute Einsparung an Endenergie Q_E:

$$\Delta Q_E = Q_{Nutz} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{alt}} - \frac{1}{\eta_{neu}}\right) = Q_{Nutz} \cdot \left(e_{alt} - e_{neu}\right).$$

Die relative Einsparung an Endenergie bezogen auf den Ursprungszustand ergibt sich zu:

$$\frac{Q_{E,neu}}{Q_{E,alt}} = \frac{\eta_{alt}}{\eta_{neu}} = \frac{e_{neu}}{e_{alt}}$$

Eingangsgrößen sind entweder die Nutzungsgrade η oder die Aufwandszahlen e des Erzeugers jeweils im Zustand vor und nach der Änderung.

3.8.2 Speicher

Für die Höhe der zu erwartenden jährlichen Wärmeverluste des Speichers Q_s [kWh/a] sind die Betriebszeit des Speichers t [h/a] und seine Verlustleistung bestimmend. Die Verlustleistung hängt von der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Speicherinnerem ϑ_i und der ihn umgebenden Luft ϑ_e sowie der Speicheroberfläche A_s und dem Wärmedurchgangskoeffizienten U_s ab. Es gilt:

$$Q_s = U_s \cdot A_s \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot t$$

Verluste der Betriebsbereitschaft

Die Transmissions- und Konvektionswärmeverluste von Speichern werden in den üblichen Bedarfsbilanzen aus Prüfstandswerten abgeleitet, da wärmeübertragende Hüllflächen A_S aufgrund der komplizierteren Speichergeometrie schwer bestimmbar sind. Es gilt die Annahme, dass die wärmeübertragende Fläche A_S und deren Wärmedurchgangskoeffizient U_S konstant sind. Damit lässt sich ein Prüfstandsverlust $Q_{Prüf}$ in einen Realwert Q_s umrechnen.

Es müssen die Prüfstandstemperaturdifferenz sowie die realen Betriebs- und Aufstellraumtemperaturen bekannt sein, so dass nachfolgende Verhältnisgleichung zur Umrechnung benutzt wird.

$$(U \cdot A)_s = \frac{Q_s}{t \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)} = \frac{Q_{Prüf}}{t \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)_{Prüf}}$$

Tabelle 109 zeigt typische Prüfstandsenergieverluste für verschiedene Speicher bei einer Prüfstandstemperaturdifferenz $(\vartheta_i - \vartheta_e)_{Prüf}$ = 45 K. Tabelliert sind Jahreswerte, die sich aus den üblichen Norm- und Herstellerwerten für Tagesverluste (q_B in kWh/d) ergeben. Die Werte gelten für die jeweils im Baualterszeitraum typische Dämmstärke.

Volumen in [l]	jährlicher Speicherwärmeverlust Q_S [kWh/a] für 45 K Temperaturdifferenz zum Aufstellraum						
	Indirekt beheizte Trinkwasserspeicher				Elektrisch beheizte Trinkwasserspeicher		
	vor 1978	1978 - 1986	1987 - 1995	ab 1995	vor 1989	1989 - 1995	ab 1995
50	770	680	620	500	370	330	260
80	1010	850	750	570	470	420	340
100	1150	960	830	610	530	480	380
125	1330	1070	910	650	610	540	440
150	1490	1180	990	690	680	610	490
200	1780	1370	1120	750	820	730	590
250	2060	1550	1240	810	950	850	680
500	3260	2270	1720	1020	1550	1380	1110
750	4280	2860	2090	1180	2090	1860	1490
1000	5200	3370	2400	1300	2590	2310	1850

Tabelle 109 Jährliche Wärmeverluste von Trinkwasserspeichern bei 45 K Temperaturdifferenz [15][16][69]

Viele Speicher-(Flansch-)anschlüsse erhöhen in der Praxis die tabellierten Prüfstands- bzw. Normwerte bis zum Faktor 2. Je Anschluss kann mit zusätzlich ca. 20 … 40 W Verlustleistung gerechnet werden.

Die Werte der Tabelle 109 können auch zum Einsatz kommen, wenn Pufferspeicher und externe Frischwasserstationen zur Trinkwassererwärmung eingesetzt werden. Allerdings weist das Pufferspeicherwasser in Systemen mit Zirkulation eine um ca. 5 K höhere Temperatur auf als das Trinkwasser, also ca. 55 … 65 °C. Für die sonst üblichen mit Trinkwasser gefüllten Speicher kann als Medientemperatur im Jahresmittel von etwa 50 … 60°C ausgegangen werden.

Eine leistungsbezogene Darstellung liefert Bild 63. Ebenfalls für 45 K Temperaturdifferenz zeigt die Grafik Verlustleistungen von indirekt beheizten Speichern abhängig von der Dämmdicke.

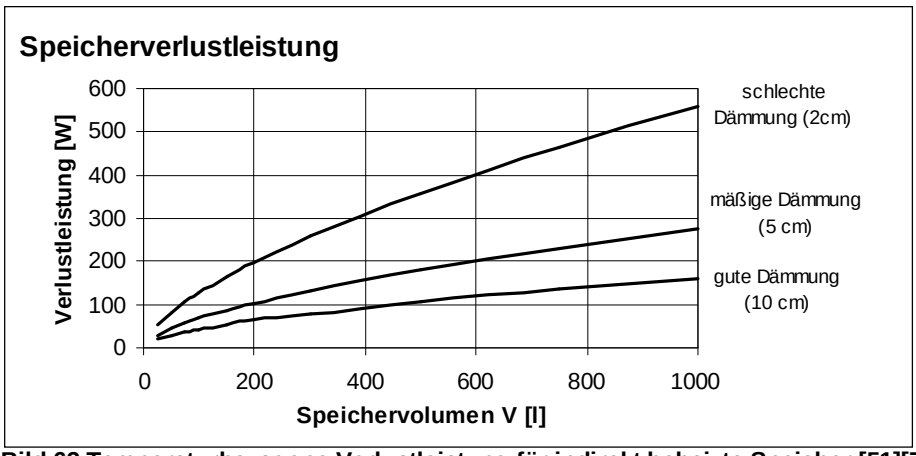


Bild 63 Temperaturbezogene Verlustleistung für indirekt beheizte Speicher [51][70]

Speichervolumen

Die Speicherverluste sind volumenabhängig, wobei bei größeren Speichern die Kompaktheit (Verhältnis Oberfläche zu Volumen) günstiger ist als bei kleinen. Das gilt für alle Bauarten. Unterschieden wird in direkt beheizte und indirekt beheizte Speicher. Direkt beheizte Speicher (z. B. Elektrospeicher, Gasspeicherwassererwärmer) vereinen Wärmeerzeuger und den Speicher in einem Gerät. Indirekt beheizte Speicher werden durch einen externen Wärmeerzeuger über einen (internen oder externen) Wärmeübertrager erwärmt.

Bild 64 zeigt typische installierte Speichervolumina für verschiedene Speicherausführungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass das dargestellte Volumen sich aus den Einzelvolumen mehrerer Speicher ergibt. Die typische Größe eines Elektrokleinspeichers beträgt 5 Liter, ein Gasspeicherwassererwärmer hat ein Maximalvolumen von 500 Litern, die anderen Speicherarten von 1000 Litern.

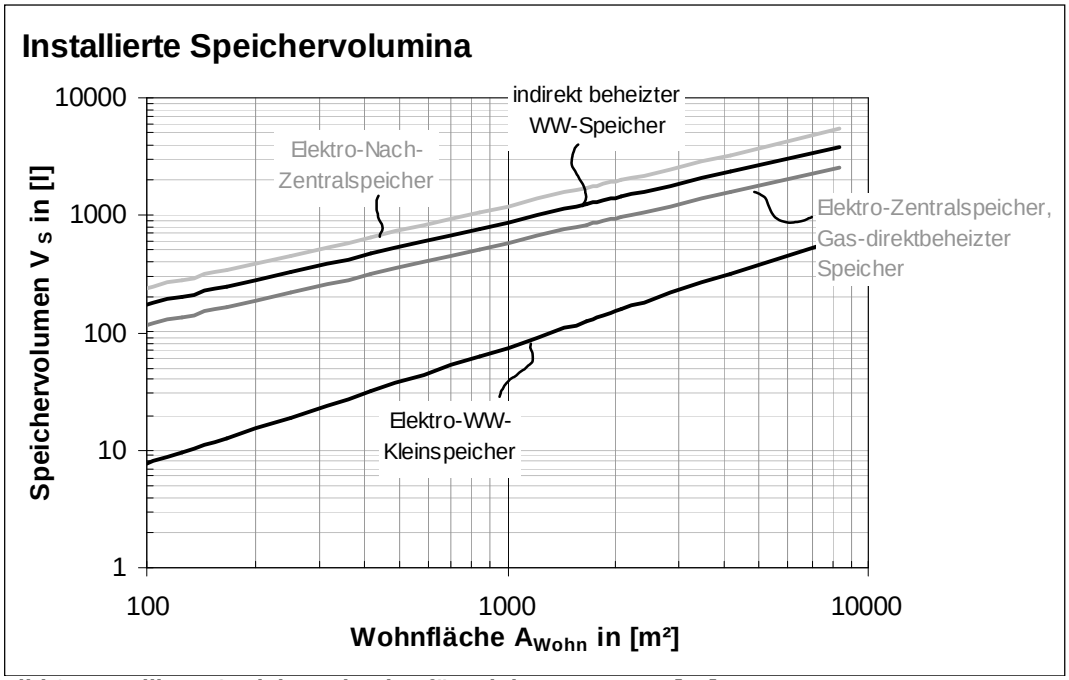


Bild 64 Installierte Speichervolumina für Trinkwarmwasser [15]

In Solarthermieanlagen kann von 50 … 70 l/m^2_{Koll} als Speichervolumen je installierter Kollektorfläche ausgegangen werden.

Hilfsenergie zur Speicherladung

Tabelle 110 zeigt verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Hilfsenergie für die Speicherladepumpe von indirekt beheizten Speichern. Die Kennwerte sind Jahreswerte und beziehen sich – unabhängig von der Datenquelle – auf die Wohnfläche.

Komponente	Leistung	Laufzeit	Energiemenge	Literatur
Speicherladepumpe	$44\ W + 0{,}005 \cdot V_s^{1,43}$			[13]
Speicherladepumpe in Ein- und Zweifamilienhäusern	0,3...0,6 W/m²	200...300 h/a	0,10 kWh/(m²a)	[15][50] [51][70]
Speicherladepumpe in Mehrfamilienhäusern	0,1...0,2 W/m²	300...700 h/a	0,05 kWh/(m²a)	
Flächenbezug: Wohnfläche, V_s = Volumen des Speichers in [l]				

Tabelle 110 Typische Hilfsenergien bei der Speicherung des Trinkwassers

Typische Verlustkennwerte im Wohnungsbau

Im Wohnungsbau lässt sich das installierte Speichervolumen gut abschätzen. Daraus resultieren typische Verlustkennwerte für die Speicherung, siehe Tabelle 111. Dabei treten höhere Verluste für schlecht gedämmte Speicher älterer Bauart, aber auch für kleine Gebäude, d.h. einem großen Speichervolumen je Quadratmeter Nutzfläche, auf.

Die Wärmeverluste der Speicherung können, sofern sie im beheizten Bereich des Gebäudes auftreten, der inneren Fremdwärme Q_I zugerechnet werden. Sie beeinflussen im Mittel die Energiebilanz nur wenig, bedeuten jedoch für den Aufstellraum eine hohe punktuelle Wärmequelle (lokale Last).

Wärmeverluste bezogen auf die Wohnfläche, in [kWh/(m²a)]					
Anzahl der Wohneinheiten			**1 bis 2**	**3 bis 7**	**8 und mehr**
indirekt beheizter Speicher	Keller/Dach	bis 1994	11	4,2	2,0
	beheizter Bereich	ab 1995	6	2,5	1,1
	Keller/Dach	bis 1994	9	3,2	1,5
	beheizter Bereich	ab 1995	5	1,9	0,8
Elektrokleinspeicher im beheizten Bereich		bis 1994	2,5		
		ab 1995	1,5		
Gasbeheizter Speicher im beheizten Bereich		bis 1994	25	-	-
		ab 1995	20	-	-

Tabelle 111 Typische Speicherverluste im Wohnungsbau [15][52][70]

Einsparpotentiale

Die Einsparpotentiale, die sich aus dem Verzicht von Speicherung ergeben bzw. die Zusatzverluste für die Installation eines Speichers ergeben sich aus den Kennwerten beispielsweise der Tabelle 109. Für ein Einfamilienhaus bedeutet ein zusätzlicher indirekt beheizter Speicher einen jährlichen Wärmeverlust von knapp 1000 kWh/a. Je nach Aufstellort des Speichers ist zumindest ein Teil dieser Abwärme im Winterhalbjahr nutzbar.

Weist der Wärmeerzeuger genügend Leistung auf und enthält zudem eine ausreichend große Heizwassermenge – wie dies bei einem bodenstehenden Kessel im Einfamilienhaus häufig der Fall ist – kann über ein System ohne Trinkwasserspeicher nachgedacht werden.

Alternativ kann bei ausreichend großem Speichervolumen im Einfamilienhaus eventuell auf die Speichernachladung nach dem Zapfvorgang verzichtet werden. Der Speicher wird nur einmal täglich nachts vor der ersten morgendlichen Dusche geladen, das Wasser dann fast vollständig gezapft. Im weiteren Verlauf des Tages ergeben sich nur geringe Verluste über die Speicheroberfläche, da im inneren überwiegend Kaltwasser gelagert wird. Dieses Vorgehen setzt voraus, dass es keine Trinkwasserzirkulation gibt.

Für alle Anwendungsfälle mit Speichern ist auf ausreichende Dämmung der Anschlüsse, Flansche, Blindstopfen etc. zu achten. Eine Minderung der Verluste um 30 … 50 % ist erreichbar.

Insgesamt sind in Bezug auf die Verwendung von Speichern und zugehörigen technischen Gesamtsystemen derzeit zwei Trends neben dem üblichen festzustellen:

- einerseits ein kompletter Verzicht auf Speicher und Verteilnetze und Installation von dezentralen elektrischen Durchlaufsystemen,
- andererseits eine Verwendung von Pufferspeichern und Frischwasserstationen in zentralen Systemen.

3.8.3 Verteilnetze

Für die Höhe der zu erwartenden jährlichen Wärmeverluste des Verteilnetzes Q_d [kWh/a] sind die Betriebszeit t des Netzes [h/a] und seine Verlustleistung bestimmend. Die Verlustleistung hängt von der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Rohrinnerem ϑ_i und der umgebenden Luft ϑ_e sowie der Rohrlänge L und dem längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten U_R ab. Es gilt für einen Rohr- und Zeitabschnitt:

$$Q_d = U_R \cdot L \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot t$$

In der Praxis besteht das Netz aus verschiedenen Rohrabschnitten mit unterschiedlichen Dämmdicken, Innentemperaturen (abhängig von vorhandener oder nicht vorhandener Zirkulation) und Verlegeorten (und damit Umgebungstemperaturen). Es erfolgt eine Summenbildung unter mehrfacher Anwendung der Gleichung getrennt für die jeweiligen Rohr- und Zeitabschnitte.

Temperaturen in Trinkwarmwassernetzen

Die mittlere Temperatur eines (aus Gründen der thermischen Desinfektion gegen Legionellen) ständig auf Temperatur gehaltenen Rohrabschnittes der Warmwasserverteilung kann mit $\vartheta_i \approx$ 55 … 60°C angenommen werden. Die DIN V 18599 geht von 57,5°C aus [13]. Der Wert der DIN V 4701-10 von 50°C wird zumindest im Mehrfamilienhaus als zu gering angesehen [15].

Für nicht ständig auf Temperatur gehaltene Rohrleitungen hängt sie stark von der Zapfhäufigkeit und der Dämmung ab. Wird selten gezapft und hat das Rohr eine geringe Dämmung, so stellt sich im Rohrinneren über weite Zeiten des Jahres fast Umgebungstemperatur ein. Bei häufiger Zapfung und guter Dämmung ergibt sich entsprechend im Mittel eine höhere Temperatur.

Die DIN V 18599 gibt folgende Zahlenwertgleichungen für die Rohrinnentemperatur (in °C) abhängig vom Wärmedurchgangskoeffizienten U (in W/(mK)) an [13]:

- zentrales Netz ohne Zirkulation bzw. mit ausgeschalteter Zirkulation: $\vartheta_i = 25 \cdot U_R^{-0,2}$
- dezentrale Erzeuger, welche die geforderte Zapftemperatur bereitstellen: $\vartheta_i = 20 \cdot U_R^{-0,2}$

Für eine übliche Ausführung im Neubau mit U = 0,2 W/(mK) ergeben sich 34°C bzw. 28°C als repräsentative Mittelwerte.

Leitungslängen

Zur Abschätzung von Leitungslängen existieren diverse Ansätze. Es wird regulär unterschieden in folgende Teilabschnitte:

- Verteilung: waagerechte Ebene mit zentralen Rohrabschnitten, die Wasser für mehr als eine Zapfstelle transportieren; ggf. parallel laufende Zirkulationsleitungen,
- Steigestränge: vertikale Leitungen mit zentralen Rohrabschnitten, die Wasser für mehr als eine Zapfstelle transportieren; ggf. parallel laufende Zirkulationsleitungen,
- Stichleitungen: an die Steigestränge oder die Verteilebene anschließende Rohrabschnitte zur Einzelversorgung der Zapfstellen oder Zapfstellengruppen; regulär ohne parallel laufende Zirkulation.

In der Praxis ergibt sich eine Fülle von Ausführungsvarianten, die sich nur schwer in einfachen Formelansätzen typologisieren lassen. Die Literatur liefert theoretische Ansätze aus Überlegungen zu Grundrissformen (Tabelle 112, Tabelle 113) sowie Ableitungen aus der Statistik (Tabelle 115, Tabelle 116). Im konkreten Einsatzfall kann nicht vorhergesagt werden, welcher Ansatz die Realität am besten abbildet. Für den Einstieg in die Thematik wird auf die Formelansätze aus Tabelle 114 bzw. Bild 65 verwiesen.

Einflussgrößen auf die Längenschätzung sind versorgte Flächen, ferner auch Geschosshöhen sowie ggf. Gebäudebreiten und -längen.

Tabelle 112 zeigt einen Schätzansatz des Instituts Wohnen und Umwelt für den Wohnungsbau. Die Längen ergeben sich aus der charakteristischen Gebäudelänge sowie der Anzahl der versorgten Wohneinheiten. Die Gebäudelänge ist für nicht rechteckige Grundrisse die Summe aller langen Seiten bei Zerlegung in Rechtecke. Vereinfacht ergibt sie sich aus der Grundrissfläche des Gebäudes und einer angenommenen Breite von 10 m.

Kenngröße	Verteilleitungen L_V in [m]	Steigestränge L_S in [m]	Stichleitungen L_{SL} in [m]
Netze mit Zirkulation, $L_{char} \leq 12m$	4 m	$2 \cdot (n_{WE} + 1) \cdot h_G$	$0{,}5 \cdot a \cdot n_{WE}$
Netze mit Zirkulation, $L_{char} > 12m$	$2 \cdot (L_{char} – 10\ m)$		
Netze ohne Zirkulation, $L_{char} \leq 12m$	2 m	$(n_{WE} + 1) \cdot h_G$	
Netze ohne Zirkulation, $L_{char} > 12m$	$(L_{char} – 10\ m)$		
L_{char} = charakteristische Länge in [m], n_{WE} = Anzahl der Wohneinheiten, a = charakteristische Breite in [m]			

Tabelle 112 Standardleitungslängen für Trinkwarmwassernetze im Wohnungsbau nach IWU [50]

Tabelle 113 zeigt die Ansätze der DIN V 4701-10 für den Wohnungsbau. Die Schätzung basiert auf der Nutzfläche A_N der EnEV. Sie ist ca. 20 % größer als die reale Wohnfläche. Zur Flächenumrechnung im Detail siehe Abschnitt 4.7.

Kenngröße	Verteilleitungen L_V in [m]	Steigestränge L_S in [m]	Stichleitungen L_{SL} in [m]
Leitungslänge mit Zirkulation, gebäudezentrales Netz	$26 + 0{,}02 \cdot A_N$	$0{,}075 \cdot A_N$	-
Leitungslänge ohne Zirkulation, gebäudezentrales Netz	$13 + 0{,}01 \cdot A_N$	$0{,}038 \cdot A_N$	-
Stichleitungslänge nur bei Übergabe in angrenzenden Räumen mit gemeinsamer Installationswand	-	-	$0{,}050 \cdot A_N$
Stichleitungslänge im Standardfall; Leitungslänge für wohnungszentrale Versorgung	-	-	$0{,}075 \cdot A_N$
A_N = Gebäudenutzfläche nach EnEV in [m²], berechnet aus dem umbauten Volumen V_e			

Tabelle 113 Standardleitungslängen für Trinkwarmwassernetze im Wohnungsbau nach DIN 4701 [15]

Tabelle 114 gibt die Formelansätze abhängig von der beheizten Nettogrundfläche A_{NGF} und der Geschosszahl wieder. Die Werte entstammen einem Forschungsvorhaben des BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung). Es wird unterschieden in eine überwiegend vertikale Erschließung über Steigestränge (Steigestrangtyp) und eine überwiegend horizontale Erschließung, z.B. in abgehängten Decken (Ebenentyp).

Netztyp	Verteilleitungen* L_V in [m]	Steigestränge* L_S in [m]	Stichleitungen L_{SL} in [m]
Erschließung überwiegend vertikal	$0{,}11 \cdot (A_{NGF} / n)^{1{,}24}$	$0{,}005 \cdot A_{NGF}^{1{,}38}$	$0{,}09 \cdot A_{NGF}$
Erschließung überwiegend horizontal	$0{,}035\ m \cdot (A_{NGF} / n)^{1{,}50}$	$0{,}36 \cdot A_{NGF}^{0{,}58}$	$0{,}09 \cdot A_{NGF}$
dezentral	-	-	$0{,}09 \cdot A_{NGF}$
* ohne Zirkulation sind die Werte zu halbieren; A_{NGF} = Nettogrundfläche in [m²], n = Geschosszahl			

Tabelle 114 Standardleitungslängen für Trinkwarmwassernetze im Wohnungsbau nach BBSR Projekt [42]

Bild 65 zeigt eine grafische Aufbereitung der Werte für den deutlich häufiger auftretenden Fall der vertikalen Erschließung. Abhängig vom Gebäudetyp und der versorgten Fläche variiert die Verlegedichte. Ausgewertet sind das kleine Mehrfamilienhaus mit 4 Wohnungen in 2 Etagen mit 300 m² (links) bis zum großen 8-etagigen Mehrfamilienhaus mit 48 Wohnungen auf 3600 m² (rechts). Es ist bei zentraler Versorgung von einer typischen Verlegedichte der Leitungen im Bereich 0,25 … 0,3 m/m² auszugehen. Der Trend ist jedoch: vielgeschossige Gebäude schneiden besser ab als flache. Das betrifft einerseits die Gesamtlänge der verlegten Leitungen als auch den Anteil der Verteilung im Keller.

Ablesebeispiel: im 12-Mehrfamilienhaus mit 3 Geschossen (Bild 65, Mitte) ist eine Verlegedichte von 0,30 m/m² typisch (→ 270 m Leitungen). Davon liegen etwa 0,14 m/m² als Verteilung ggf. im unbeheizten Keller (→ 130 m).

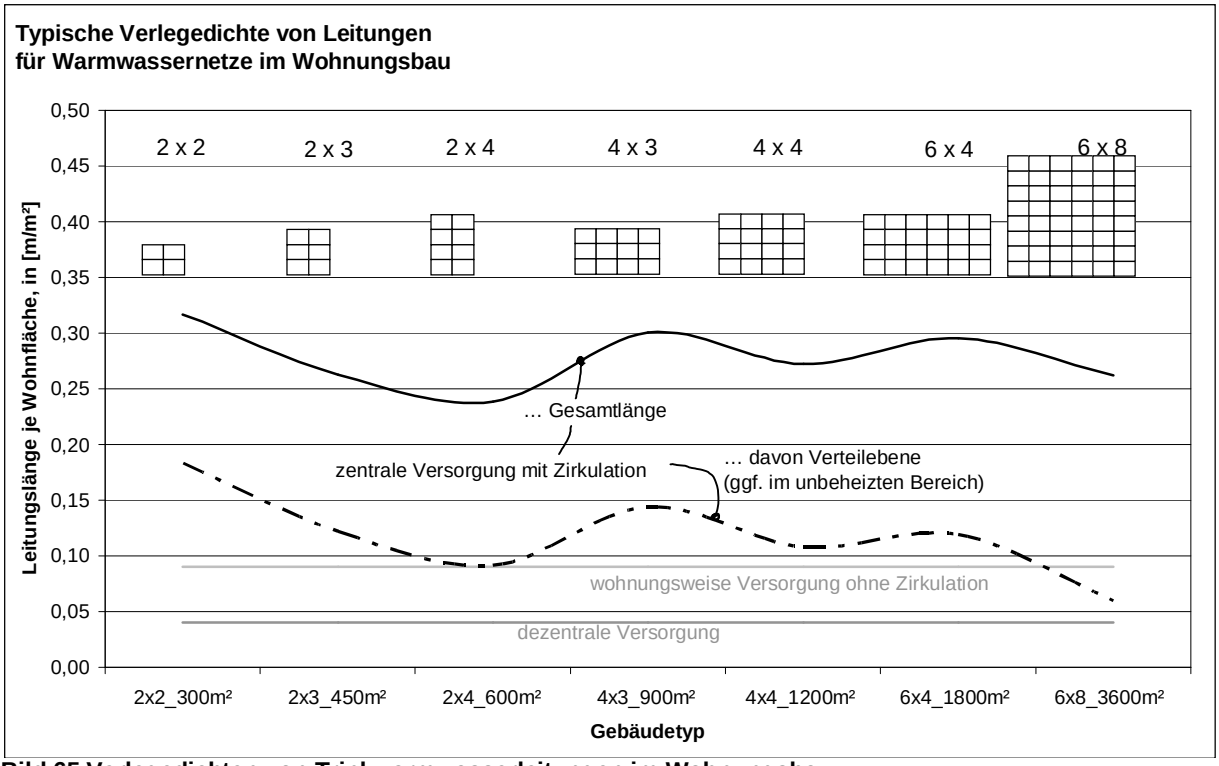


Bild 65 Verlegedichten von Trinkwarmwasserleitungen im Wohnungsbau

Die Datenbasis mit Kennzahlen für den Nichtwohnungsbau ist deutlich geringer. Tabelle 115 zeigt die Ansätze der DIN V 18599 für die zentrale Trinkwasserverteilung in verschiedenen Gebäudetypen. Der formelmäßige Grundansatz ist jeweils ähnlich, allerdings werden verschiedene Parameter verwendet, die maßgeblich für die Verlegedichte sind. Sofern keine Zirkulation vorhanden ist, werden die Leitungslängen der Verteilebene und Steigestränge halbiert.

Rohrnetzabschnitt	**Verteilung***				**Steigestrang***				**Stichleitungen**			
Grundgleichung	$L_V = a \cdot (A_{NGF}/n)^b$ **in [m]**				$L_S = c \cdot A_{NGF}^d$ **in [m]**				$L_{SL} = e \cdot A_{NGF}^f$ **in [m]**			
Erschließung überwiegend...	**vertikal**		**horizontal**		**vertikal**		**horizontal**		**vertikal**		**horizontal**	
Gebäudegruppe	a	b	a	b	c	d	c	d	e	f	e	f
Wohnen, Bettenzimmer, Hotels, Kindergarten, OP-Gebäude, Pflegeheime, Wohnheime	0,11	1,24	0,035	1,50	0,005	1,38	0,36	0,58	0,09	1,00	0,09	1,00
Büro, Praxen, Seminargebäude, Labor, Verkaufseinrichtungen, Restaurants und Küchen, Kantinen, Werkstätten, auch Fleischerei, Bäckerei, Frisöre	5,40	0,49	1,7	0,67	0,025	0,97	0,72	0,44	0,02	1,00	0,02	1,00
Hörsaal, Museum, Schule, Theater, Veranstaltungshallen, Bibliotheken, Flughafengebäude	5,40	0,49	1,9	0,67	0,025	0,97	0,72	0,44	2,39	0,43	2,39	0,69
Schwimmhalle, Turnhalle, Umkleiden, auch Umkleidegebäude von Produktionsstätten	2,30	0,69	32	0,19	0,002	1,50	2,90	0,10	2,39	0,43	2,39	0,69
* ohne Zirkulation sind die Werte zu halbieren; A_{NGF} = Nettogrundfläche [m²], n = Anzahl der Geschosse												

Tabelle 115 Formeln für Gesamtleitungslängen Trinkwarmwasser, zentrale Netze [13]

Tabelle 116 enthält typische Werte für dezentrale Netze, abhängig von der Nettogrundfläche der Gesamtobjekte.

Gebäude	dezentral
Wohnen, Bettenzimmer, Hotels, Kindergarten, OP-Gebäude, Pflegeheime, Wohnheime	$3{,}48 \cdot A_{NGF}^{\ 0{,}67}$
Büro, Labor, Praxen, Verkaufsstätten, Schule, Seminar, Theater, Bibliothek, Flughafen, Hörsaal, Museum, Veranstaltungshalle	$0{,}085 \cdot A_{NGF}^{\ 0{,}66}$
Werkstätten, Restaurant und Küche, Kantine, auch Fleischerei, Frisör	$0{,}51 \cdot A_{NGF}^{\ 0{,}35}$
A_{NGF} = Nettogrundfläche [m²]	

Tabelle 116 Formeln für Gesamtleitungslängen Trinkwarmwasser, dezentrale Netze [45]

Leitungsdämmung

Die Energieeinsparverordnung setzt heute verbindliche Anforderungen für die Dämmung von wärmeführenden Leitungen. Für die Trinkwarmwasserbereitung kann das Anforderungsniveau wie folgt vereinfacht zusammengefasst werden: alle Leitungsabschnitte, die in den Zirkulationskreislauf eingebunden sind, erhalten ca. 100 % Dämmung (Dämmdicke entspricht Innendurchmesser), die anderen unterliegen nicht der EnEV. In der Praxis werden aber auch diese Stichleitungen gegen Fließ- und Knackgeräusche gedämmt, mit ca. 25 … 50 % Dämmdicke.

Eine Leitungsdämmung im Bereich der Trinkwasserversorgung ist schon seit vielen Jahrzehnten üblich – wenn auch mit ggf. geringerer Dämmdicke. Bild 66 fasst typische Kennwerte für den längenbezogenen Wärmeverlust U_R zusammen.

		Dämm-standard	Verlegeart	Skizze	Beschreibung	Rohrdurch-messer	UR [W/(m·K)]	im Verlegeraum verfügbarer Anteil des Wärmeverlustes	effektiver Wärmeverlustfaktor f_a bei Anordnung innerhalb der therm. Hülle: Rohre nicht absperrbar	effektiver Wärmeverlustfaktor f_a bei Anordnung innerhalb der therm. Hülle: Rohre absperrbar
Baualtersklassen Verteilsystem	50er bis 70er	ungedämmt	freiliegend		Stahl-/Kupferrohr; abhängig vom Rohrdurchmesser	≤ 18 mm	0,6	100 %	0,15	0,10
						> 18 bis 35 mm	1,0			
						> 35 bis 64 mm	2,0			
						> 64 mm	3,0			
			unter Putz in Außenwand ohne Außendämmung		Stahl-/Kupferrohr mit Wellpappe, Filz o.ä. ummantelt oder WICU-Rohr verlegt unter Putz im massiven Mauerwerk ohne Außenwanddämmung/U_{Wand} > 0,8W/(m²K)		1,4	61 %	0,48	0,45
			unter Putz in Außenwand mit Außendämmung		Stahl-/Kupferrohr mit Wellpappe, Filz o.ä. ummantelt oder WICU-Rohr verlegt unter Putz im Massiven Mauerwerk ohne Außenwanddämmung/U_{Wand} ≤ 0,8W/(m²K)		1,0	93 %	0,21	0,16
		mäßig gedämmt	freiliegend		Mineral-/Glaswolle in Form von Matten, Formstücken, Dämmschnüren oder gestopft/Kieselgur, Magnesia als plastische Massen oder Formstücke usw./mit Hart- oder Blechmantel		0,4	100 %	0,15	0,10
	80er, 90er, NEU	ungedämmt	unter Putz in Außenwand ohne Außendämmung		Stahl-/Kupferrohr mit Wellpappe, Filz o.ä. ummantelt oder WICU-Rohr verlegt unter Putz im porosierten Mauerwerk λ = 0,16 ohne Außenwanddämmung/U_{Wand} ≤ 0,8W/(m²K)		0,8	76 %	0,35	0,32
			unter Putz in Außenwand mit Außendämmung		Stahl-/Kupferrohr mit Wellpappe, Filz o.ä. ummantelt oder WICU-Rohr verlegt unter Putz im porosierten Mauerwerk λ = 0,81 ohne Außenwanddämmung/U_{Wand} ≤ 0,8W/(m²K)		1,0	93 %	0,21	0,16
		HeizAnlV bzw. EnEV	(Pauschalwerte DIN V 4701-10 für innerhalb der thermischen Hülle verlegte Rohrleitungen)				0,255	100 %	0,15	0,10
			halbe Dämmstärke		in Wohnungstrennwänden und -decken		0,3			
			Standard		generell in unbeheizten Räumen		0,2			
			doppelte Dämmstärke		vorbildlicher Energiesparstandard		0,15			

Bild 66 U-Werte von Rohrleitungen [69]

Längenbezogene Verlustkennwerte

Aus dem Wärmedurchgangskoeffizient U_R sowie der Temperaturdifferenz zwischen Rohrinnerem und Verlegeort kann ein zusammengefasster Kennwert gebildet werden: der längenbezogene Wärmeverlust.

Bild 67 zeigt Typische Werte für den Wohnungsbau unter der Annahme, dass das Rohrnetz ganzjährig in Betrieb ist.

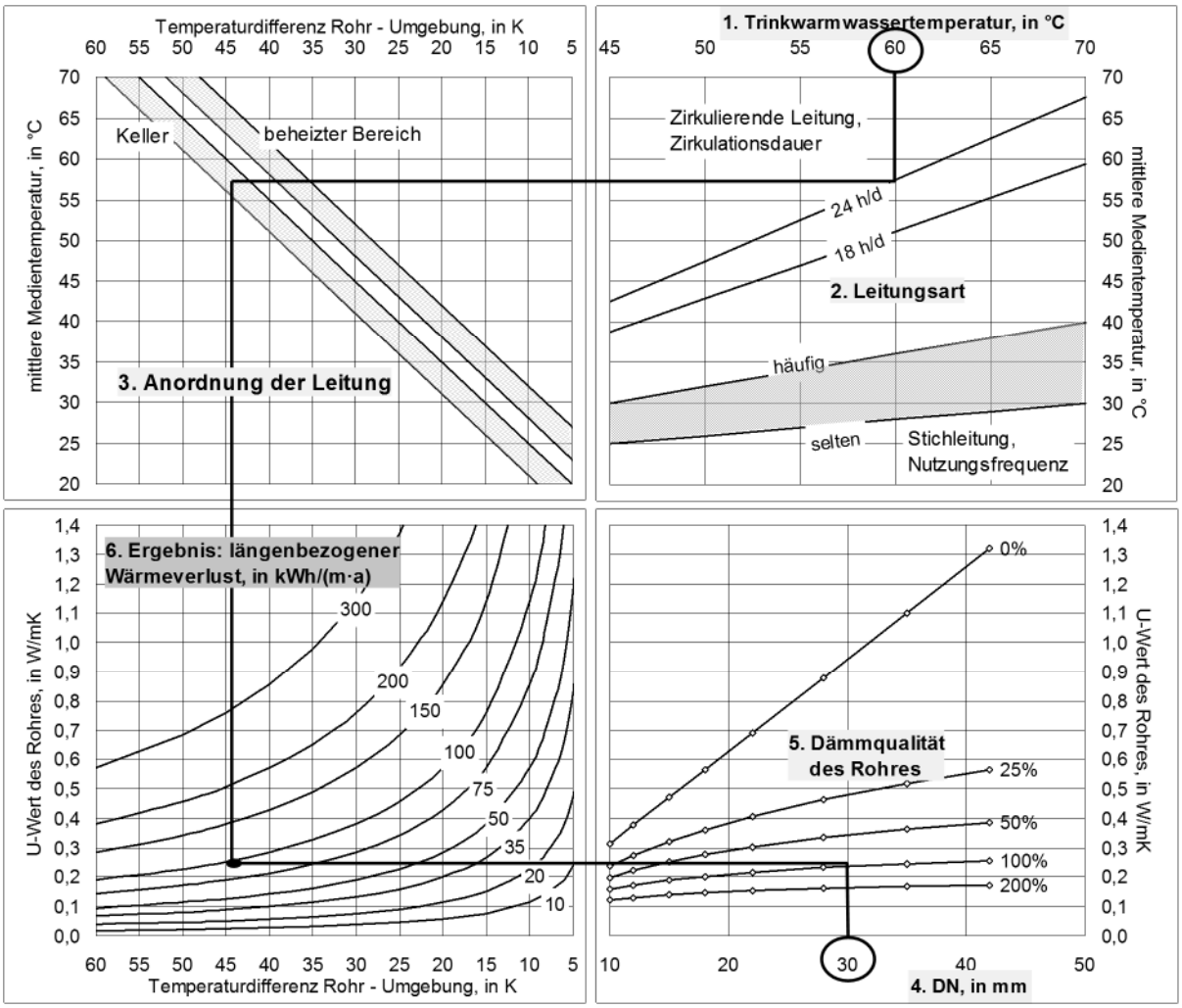


Bild 67 Typische längenbezogene Wärmeverluste für Trinkwarmwassernetze

Ablesebeispiel:

- Mehrfamilienhaus, 1980er Jahre, ganztägige Zirkulation
- Verteilung: DN 28 … 35 im Keller, 100 % Dämmung
- Steigestränge: ca. DN 22, 100 % Dämmung
- Stichleitungen: ca. DN 10 … 15, 25 % Dämmung

Für die einzelnen Rohrabschnitte werden folgende längenbezogene Verluste bestimmt; für die Verteilung ist das Ablesebeispiel eingetragen:

- Verteilung: 60°C Solltemperatur (1) und 24 h Zirkulation (2) → ca. 57°C mittlere Medientemperatur; Lage im Keller (3) → ca. 44 K Temperaturdifferenz zwischen Rohr und Keller; ca. DN 30 (4) und 100 % Dämmung (5) → U-Wert ca. 0,22 W/(m²K); längenbezogener Wärmeverlust (6) → q_d = 90 kWh/(m a)
- Steigestränge: ca. 37 K Temperaturdifferenz zum Wohnraum, ca. U = 0,22 W/(m²K) → q_d = 70 kWh/(m a)
- Stichleitungen: ca. 32°mittlere Medientemperatur, ca. 13 K Temperaturdifferenz zum Wohnraum, ca. U = 0,28 W/(m²K) → q_d = 30 kWh/(m a)

Typische Verlustkennwerte im Wohnungsbau

Aus den längenbezogenen Verlusten und der Verlegedichte lässt sich der Verteilverlust berechnen. Typische Kennwerte für den Wohnungsbau zeigt Tabelle 117. Die angegebenen Verluste gelten für eine Verlegung der zentralen Verteilleitungen außerhalb der thermischen Hülle. Im beheizten Bereich sind die Werte etwa 10 … 25 % geringer.

Gebäude	MFH/EFH		EFH		alle
Netzart	zentral mit Zirkulation		zentral ohne Zirkulation		dezentral
L/A_{Wohn} [m/m²]	0,25...0,40	0,25...0,40	0,15...0,30	0,15...0,30	< 0,08
Ausführungsstandard	75...100 % EnEV	150...200 % EnEV	75...100 % EnEV	150...200 % EnEV	alle
Verlust $q_{d,W}$ [kWh/(m²a)]	20...35	12...25	7...14	5...10	< 3
Gewinn q_l [kWh/(m²a)]	10...20	5...15	2...5	1...3	≈ 0

Tabelle 117 Typische Verteilverluste und interne Wärmegewinne für die Trinkwarmwasserverteilung [70]

Es wird ersichtlich, dass die Verteilverluste ungleich höher sind als Speicherverluste. Außerdem liegt in zentralen Systemen der Verteilverlust in der Höhe des bereitgestellten Nutzens – ca. 12 … 17 kWh/(m²a), siehe Abschnitt 3.2.4 oder sogar darüber. Dies führt zu Verteilungsnutzungsgraden um 50 % bis 30% in Extremfällen.

Jedoch ist anzumerken, dass die Wärmeabgabe der Trinkwarmwasserleitungen in der Heizperiode teilweise zur Beheizung verwendet werden können. Dies allerdings nur bis zur Höhe des benötigten Heizwärmebedarfs der Räume. Da die Wärmeabgabe ungeregelt stattfindet, kann es zu einer Überwärmung insbesondere der Küchen und Bäder (höhere Verlegedichte) kommen, die zum Ablüften der Überschüsse führt. Im Sommerhalbjahr produziert die Wärmeabgabe der Rohre einen permanenten Kühlbedarf. Das Problem verschärft sich mit besserem Baustandard der Gebäude und beim Vorhandensein von Lüftungsanlagen, da Küchen und Bäder Ablufträume mit vernachlässigbaren Lüftungswärmeverlusten sind.

Hilfsenergie

Mit dem Betrieb einer Zirkulation sind Pumpenstromaufwendungen verbunden. Tabelle 118 zeigt verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Hilfsenergie für die Zirkulationspumpe. Die Kennwerte sind Jahreswerte und beziehen sich – unabhängig von der Datenquelle – auf die Wohnfläche. Unter den Hilfsenergieaufwendungen nimmt die Zirkulationspumpe eine zentrale Rolle ein, da sie in fast allen Realanlagen die längste Laufzeit aller vorhandenen Pumpen aufweist.

Systembeschreibung	Leistung	Laufzeit	Energiemenge	Literatur
Ein- und Zweifamilienhaus	0,2...0,3 W/m²· A_{Wohn}	12...18 h/a	1,1 kWh/(m²a)	[15][51][50][70]
Mehrfamilienhaus	0,1 W/m²· A_{Wohn}	18...24 h/d	0,7 kWh/(m²a)	
Altanlage	27 W + 0,07 · A_{Wohn}			[16]
Neuanlage	27 W + 0,01 · A_{Wohn}			[15]
alle Fälle	30 W + 5 W/WE · n_{WE}			[52]
Flächenbezug: Wohnfläche, n_{WE} = Zahl der Wohneinheiten				

Tabelle 118 Typische Hilfsenergien für Zirkulationspumpen

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Der zusammengefasst Verteil- und Speicherverlust kann indirekt durch Differenzbildung aus Aufwand und Nutzen bestimmt werden. Notwendig ist zum einen die Messung der Wärmeabgabe des Erzeugers an das Trinkwarmwassersystem (Aufwand). Sollte dies nicht separat möglich sein, weil nur ein gemeinsamer Wärmemengenzähler incl. Heizung vorhanden ist, erfolgt eine Sommermessung. Zum anderen wird die gezapfte Warmwassermenge im selben Zeitraum erfasst (in m³ oder l) und in eine Energiemenge umgerechnet, siehe Abschnitt 3.2.4.

Der sich ergebende Verlust zwischen Aufwand und Nutzen kann anschließend mit den Kennwerten des vorliegenden Abschnittes verglichen werden. Für theoretische Abschätzungen empfiehlt sich in jedem Fall ein Leitungsaufmaß am realen Objekt, da die Schätzformeln für die Leitungslängen erfahrungsgemäß sehr große Fehlerbandbreiten aufweisen.

Einsparpotentiale und Sonderbauformen

Die Gründe zur Installation eines zentralen Trinkwassersystems sind vielfältig. Ist es vorhanden, muss die Notwendigkeit einer Zirkulation geprüft werden. Sie erhöht den Komfort, dient aber vor allem der thermischen Desinfektion zur Legionellenprophylaxe.

Der Verzicht auf die Zirkulation im kleinen Objekt (Ein- und Zweifamilienhaus) sollte geprüft werden. Das Einsparpotential ist groß, da einerseits fast die Hälfte der Rohrleitungen entfällt und andererseits die mittlere Rohrnetztemperatur im verbleibenden Restnetz deutlich absinkt. Die Verluste vermindern sich auf etwa 30 … 40 % des vorherigen Wertes [81].

Im größeren Objekt kann eine Zirkulation vermieden werden, indem eine zwangsweise lokale Nacherwärmung mit thermischer Desinfektion vorgesehen wird. Ein typisches System dieser Bauart ergibt sich bei Einsatz einer zentralen Solarthermie mit Trinkwasserspeicher, aber ohne zentrale Nacherwärmung. Mit elektrischen Durchlauferhitzern in der Nähe der Zapfstellen erfolgt die Beheizung auf über 60°C – wobei der Wert aus Gründen des Legionellenschutzes nicht vom Nutzer herabgesetzt werden kann. Hier vermindern sich die Verluste im Vergleich zur Alternativlösung mit Zirkulation um 50 … 75 %.

Zur Minimierung der Leitungslängen sind so genannte Inline-Systeme im Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein Doppelrohr, bei dem im Inneren die Warmwasserleitung und im Ringspalt herum die Zirkulation angeordnet ist. Trotz der leicht höheren Außendurchmesser führen solche Systeme zu einer Verminderung der Verluste auf knapp 50 % der Normalausstattung. Allerdings sind sie mit deutlich höheren Installationskosten verbunden, so dass die Marktdurchdringung gering ist.

Zuletzt sind Zweileitersysteme zu nennen. Anstelle von zwei parallelen Ausführungen der Verteilleitungen und Steigestränge getrennt für Heizung und Trinkwarmwasser wird bis in die Wohnungen nur ein Netz verlegt. Es entspricht in seiner Länge und Dämmung in etwa dem Trinkwarmwassernetz. In den meisten Fällen weist dieses Netz eine konstante Temperatur von mindestens 50°C auf. In den Wohnungen kann Trinkwasser bis auf 45°C erwärmt werden, eine Zirkulation entfällt. Das Heiznetz kann ausgehend von diesem Temperaturniveau geregelt betrieben werden. Häufig wird aus Kostengründen darauf verzichtet, was zu einer deutlich verschlechterten Regelung der Einzelraumregler (Thermostatventile) führt. Zusätzlich sind wohnungsweise Übergabestationen und ggf. wohnungweise Heizkreispumpen zu installieren. Insgesamt ergibt diese Betriebsweise eine Einsparung. In der Praxis werden Objekte vielfach mit ganzjährig höheren Temperaturen betrieben, so dass sie energetisch fast auf dem Niveau der Vierleitersysteme liegen [46].

Bei jeglicher Vermeidung von Verteilverlusten ist jeweils zu bedenken, dass die Endenergieeinsparung in Gebäude nicht proportional ausfällt. In der Heizperiode und im beheizten Bereich müssen die Verluste durch einen erhöhten Heizwärmeeinsatz kompensiert werden. Dieser ist jedoch geregelt, so dass das Überwärmungsproblem entfällt!

Bei Zirkulationspumpen lassen sich durch Einsatz von Hocheffizienzmodellen die typischen Hilfsenergieaufwendungen etwa dritteln.

3.9 Kennwerte für externe Energiebereitstellung

Sofern die Energie nicht im Gebäude erzeugt werden soll oder kann, kommt der Einsatz externer Zentralen in Frage. Dies ist vor allem für die Wärmeversorgung etabliert: bei einer Befragung von 207 Unternehmen in der Branche wurden 1324 Wärmenetze als Warm- oder Heißwassernetze, jedoch nur 48 Dampfnetze und 31 Fernkältenetze statistisch erfasst [59].

Mehr als 80 % der Wärme in Netzanlagen stammt aus Kraft-Wärme-Kopplung. Kennwerte für diese Art der Versorgung mit Wärme und Strom – die auch ohne Netz direkt im Gebäude zum Einsatz kommt – gibt Abschnitt 3.9.1 an.

Am Ort der externen Bereitstellung kann ggf. ein Speicher installiert werden, als Sonderfall auch Saisonspeicher, siehe Abschnitt 3.9.2.

In jedem Fall bedingt die externe Energiebereitstellung die Verlegung von Leitungsnetzen bis zu den Verbrauchern. Kennwerte für die Wärmedämmung sowie die Verlustbewertung liefert Abschnitt 3.9.3.

Neben dem Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung gewinnt auch die Stromerzeugung und Speicherung von Strom aus Photovoltaik an Bedeutung. Kennwerte zur Bewertung liefert Abschnitt 3.9.4.

3.9.1 Heizzentralen

Die am häufigsten zu findende Art der externen Wärmebereitstellung ist die Heizzentrale mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Spitzenlastkessel. Im kleinen Leistungsbereich ist die Anlage zur Kraft-Wärme-Kopplung ein Blockheizkraftwerk (BHKW), im größeren Leistungsbereich entstammt die Wärme auch Gasturbinenanlagen mit Abhitzekesseln oder Heizkraftwerken mit Dampfkesseln und Gasturbinen oder Gasmotoren. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf den Einsatz von BHKW für Gebäude- oder Anlagenenergiekonzepte.

Da häufig der stromerzeugende Prozess nicht zur vollständigen Wärmedeckung ausreicht, gibt es Spitzenlasterzeuger, z.B. Heizkessel. Sie unterscheiden sich in Heizzentralen – bis auf ggf. die Geräteleistung – nicht von denen bei gebäudeweiser Versorgung. Kennwerte für diese Erzeuger werden in Abschnitt 3.6.1 angegeben.

Kraft-Wärme-Kopplung

In einem Blockheizkraftwerk (BHKW) werden unter Einsatz einer Energiemenge Q [kWh/a] gleichzeitig Wärme $Q_{outg,th}$ [kWh/a] und Strom $Q_{outg,el}$ [kWh/a] produziert. Die Bewertung der Gesamteffizienz einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erfolgt analog zu Kesseln wie folgt:

$$\eta_a = \frac{Q_{outg}}{Q} = \frac{Q_{outg,th} + Q_{outg,el}}{Q} \approx \frac{\dot{Q}_{th} + P_{el}}{\dot{Q}_F}$$

Der Nutzungsgrad η_a ist das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Bei der energetischen Bewertung von KWK-Anlagen werden häufig – abweichend von der sonst üblichen Vorgehensweise – Wirkungs- und Nutzungsgrade gleich gesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass die Phasen der Betriebsbereitschaft nicht vorhanden oder sehr klein sind, so dass Leistungsverhältnisse den Energiemengenverhältnissen entsprechen.

Zur Charakterisierung der Anteile der beiden Nutzleistungen ($\dot{Q}_{th}$ und P_{el}) und bei der Energiebilanzierung der beiden Energiemengen ($Q_{outg,th}$ und $Q_{outg,el}$) wird die Stromkennzahl σ verwendet:

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{th}} \approx \frac{Q_{outg,el}}{Q_{outg,th}}$$

Für die KWK können zwei separate Wirkungsgrade (entsprechend näherungsweise Nutzungsgrade) angegeben werden, die nur die thermische oder die elektrische Effizienz charakterisieren:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_F} \text{ und } \eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_F} \text{ mit } \eta = \eta_{th} + \eta_{el}$$

Es gibt geschlossene (Stirlingmotor) oder offene (Otto-, Dieselmotor) Kreisprozesse, die im Rahmen der eingeführten Bedarfsbilanzen nach dem gleichem Grundprinzip bewertet werden. Typische Effizienzmerkmale für BHKW können aus Tabelle 119 abgeschätzt werden.

Kreisprozess/ Brennstoff	P_{el} [kW]	brennwertbezogener Nutzungsgrad η_a [-]	Stromkennzahl σ [-]
Erdgas, Propan, Butan	bis 15	0,75...0,80	0,35
	> 15...35	0,76...0,82	0,40
	> 35...100	0,77...0,84	0,50
	> 100...500	0,80...0,86	0,60
	> 500	0,81...0,88	0,65
Heizöl (Diesel)	bis 15	0,74...0,79	0,40
	> 15...35	0,75...0,81	0,45
	> 35...100	0,76...0,83	0,70
	> 100...500	0,77...0,85	0,80
	> 500	0,78...0,87	0,90
Stirling	bis 15	0,70...0,78	0,10

Tabelle 119 Kennwerte für Blockheizkraftwerke [13][51][70][74][76][eigene]

Die Stromkennzahl verbessert sich mit zunehmender Leistung der Geräte. Für BHKW nach dem Otto- oder Dieselmotorprinzip können folgende Schätzformeln zum Einsatz kommen:

- abhängig von der Wärmeleistung: σ = 0,4996 + 0,0002 · [$\dot{Q}_{thermisch}$ in kW]
- abgängig von der elektrischen Leistung: σ = 0,4997 + 0,0003 · [$\dot{Q}_{elektrisch}$ in kW]

Deckungsanteile und Jahresdauerlinie

Zur Erreichung eines wirtschaftlichen Betriebs sind für BHKW lange jährliche Betriebszeiten notwendig. BHKW sind daher meist Grundlasterzeuger, die nur einen Teil der Jahresarbeit liefern. Je nachdem, welchen Leistungsanteil das BHKW bei der Auslegung abdeckt, ändert sich der Beitrag zur Jahresarbeit. Bild 68 zeigt typische Anteile auf Basis der Klimadaten für den Standort Magdeburg.

Ablesebeispiel zu Bild 68:

- Mehrfamilienhaus, 18 Wohneinheiten, durchschnittlich sanierter Bestand
- Heizlast (Auslegung): 60 kW
- BHKW-Leistung für Heizung: 12 kW → Leistungsanteil 12 kW / 60 kW = 20 %
- Energiemengenanteil für eine Heizgrenztemperatur von 15°C abgelesen → 60 % (40 % der Leistung liegt im Leistungsbereich ≥ 12 kW...60 kW und muss vom Spitzenlastkessel übernommen werden)
- Heizenergiemenge: 80.000 kWh/a (insgesamt) → BHKW erzeugt 48.000 kWh/a davon

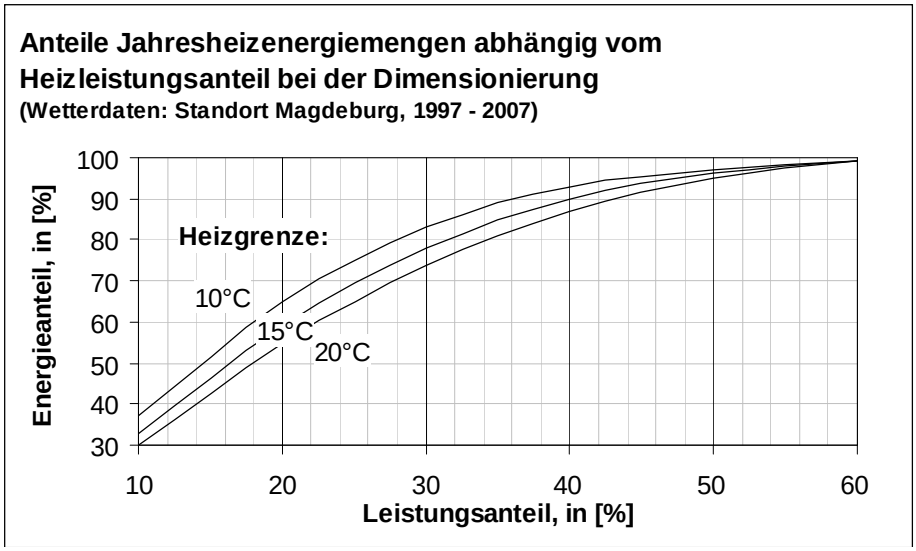


Bild 68 Heizenergiemengenanteile abhängig von der BHKW-Dimensionierung

Dargestellt ist nur der Heizenergieanteil; die Trinkwassererwärmung ist separat zu berücksichtigen. Es ist davon auszugehen, dass – entsprechende Speicher zur Glättung der Lastspitzen vorausgesetzt – das BHKW ebenfalls in der Lage ist, die gesamte Trinkwassererwärmung im Wohnungsbau abzudecken. Gleiches gilt für andere Energieabnahmen, die als Grundlast einzustufen sind, z.B. auch Wärmenetzverluste ans Erdreich (siehe Abschnitt 3.9.3).

Das MFH-Beispiel kann wie folgt fortgeführt werden und wird um die Trinkwarmwasserbereitung ergänzt:

- Energiemenge für Trinkwarmwasser: 35.000 kWh/a → entspricht einer mittleren jährlichen Dauerleistung von 35.000 kWh/a : 8760 h/a = 4 kW (Annahme: das BHKW erzeugt die gesamte Energiemenge und lädt permanent einen Speicher, der die Leistungsspitzen glättet)
- BHKW-Leistung für Trinkwarmwasser: 4 kW
- BHKW-Leistung insgesamt: (12 + 4 = 16) kW
- Energiemengenanteil insgesamt im Gebäude: (48.000 + 35.000 = 83.000) kWh/a von (80.000 + 35.000 = 11.500) kWh/a → 72 %

Im kombinierten Heizungs- und Warmwasserfall hängen typische Deckungsanteile von der Dimensionierung des BHKW ab, jedoch auch vom Verhältnis BHKW-begünstigender Grundlasten (z.B. Trinkwarmwasser) und Lasten mit starkem Jahresprofil (z.B. Heizung).

Die DIN V 18599 geht im Jahresmittel für den Bereich der Mikro-KWK (Wärmeleistung bis 20 kW) im Wohnungsbau von einem mittleren Gesamtdeckungsanteil von 80 % aus [13]. Das IWU gibt eine Bandbreite von 60 … 85 % an [51]. Für das reale Projekt empfiehlt sich eine Planung mit detaillierter Berechnung über eine möglichst gemessene oder aus typischen Lastgängen abgeleitete Jahresdauerlinie, siehe Abschnitt 4.5.

Bild 69 zeigt eine Jahresdauerlinie für das beispielhaft beschriebene Mehrfamilienhaus. Der Energiebedarf für Warmwasser führt zu einer Grundleistung (4 kW), der Heizleistungsbedarf ist darüber angeordnet und unterhalb der Heizgrenze (Heizperiode umfasst ca. 270 d/a) nicht mehr vorhanden. Das BHKW deckt alle Leistungen unterhalb von 16 kW ab, ein Spitzenlasterzeuger den Rest.

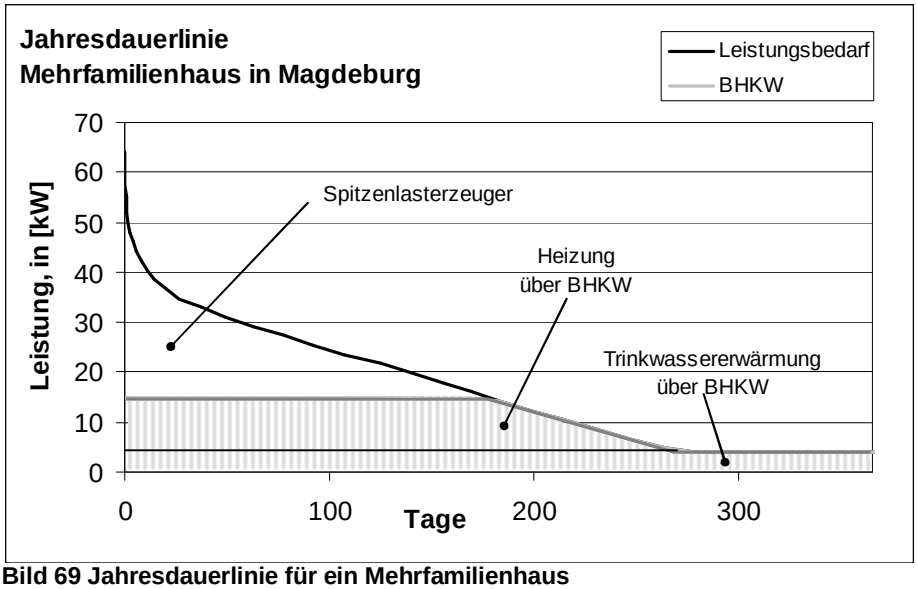


Bild 69 Jahresdauerlinie für ein Mehrfamilienhaus

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Für BHKW-Anlagen empfiehlt sich zur Beurteilung der realen Effizienzen eine Messung der produzierten Strom- und Wärmemengen, im optimalen Fall auch der eingesetzten Brennstoffmengen. In vielen Anlagen erfolgt dies auf Gründen der steuerlichen Trennung, Heizkostenumlage o. ä. ohnehin. Sofern einstufige, nicht regelbare Geräte zum Einsatz kommen, sind auch Betriebsstundenzähler hilfreich.

Einsparpotentiale

Ob sich aus dem Betrieb eines BHKW ein Einsparpotential – für Endenergie, Emissionen und/oder die Gesamtkosten – ergibt, ist für das konkrete Objekt im Einzelfall zu ermitteln. Da sich die Randdaten ständig ändern, werden seit einigen Jahren Verallgemeinerungen schwieriger.

Günstig für den wirtschaftlichen BHKW-Einsatz sind:

- Objekte oder Siedlungen mit ganzjährig konstantem Wärmebedarf (Schwimmbad, Krankenhaus, Wohnbauten mit geringem Heizwärmebedarf o. ä.) und gleichzeitig anteilig hohem Trinkwarmwasserwärmebedarf,
- Objekte oder Siedlungen mit insgesamt hohem Wärmebedarf (Wäschereien, Produktionsanlagen),
- Objekte oder Siedlungen mit gleichzeitigem Strombedarf,
- Versorgungsstrukturen mit geringen anteiligen Netzverlusten.

Günstig für den ökologischen BHKW-Einsatz verglichen mit alternativen Lösungen sind:

- emissionsarme Brennstoffe für das BHKW verglichen mit den Stoffen, die sonst für die Wärme- und Stromproduktion eingesetzt würden.

Der Anteil von Strom aus regenerativen Quellen hat im Laufe der letzten Jahre zugenommen. Dies erschwert die Konkurrenzfähigkeit von BHKW-Strom – zumindest, wenn er aus Erdgas oder Heizöl produziert ist. Dies ist bei der Erstellung von eigenen Energiekonzepten zu beachten.

3.9.2 Wärmespeicherung

In Heizzentralen mit BHKW werden Kurzzeitspeicher eingesetzt. Dies dient dem Ausgleich kurzzeitiger Lastspitzen, evtl. Abschaltzeiten oder dient der Laufzeitverlängerung (BHKW). Energiekennwerte für diese üblichen Puffer- oder Trinkwarmwasserspeicher sind den Abschnitten 3.6.2 oder 3.8.2 zu entnehmen.

Darüber hinaus werden in Verbindung mit Heizzentralen ggf. Langzeit- bzw. Saisonspeicher geplant. Es werden vier Varianten als Pilotanlagen und Forschungsprojekte betrieben [56][60]:

- Behälterspeicher: ober-/unterirdisch, mit definierten künstlichen Außenwänden (Metall, Kunststoff, Beton) und meist Dämmung, Fassungsvermögen 3000 … 12000 m³, wassergefüllt, Speicherkapazität 60 … 80 kWh/m³, Kosten: 160 … 180 €/m³ Wasseräquivalent (aus vier realen Projekten)
- Erdbeckenspeicher: ins Erdreich eingelassen, mit gegossenen Betonwänden oder nur mit Folie auf dem Erdreich, meist gedämmt durch eine Blähglasgranulatschicht, oben mit Folie abgedeckt, Fassungsvermögen 1000 … 10.000 m³ (oder größer), Speichermaterial ist Wasser oder Gemische aus Wasser und Kies oder Wasser und Erdreich, Speicherkapazität 30 … 50 kWh/m³, Kosten: ca. 130 €/m³ Wasseräquivalent (aus zwei realen Projekten)
- Erdsondenspeicher: senkrechte oder schräge Bohrungen ins Erdreich, durch Rohrleitungen erschlossen, Fassungsvermögen 10.000 … 60.000 m³, Speichermaterial ist Gestein, Speicherkapazität 15 … 30 kWh/m³, Kosten: ca. 70 … 80 €/m³ Wasseräquivalent (aus zwei realen Projekten)
- Aquiferspeicher: natürliche abgeschlossene Grundwasserspeicher im Erdreich, durch Brunnen erschlossen, Fassungsvermögen 20.000 m³, Speichermaterial ist Grundwasser sowie das umgebende Material, Speicherkapazität 30 … 40 kWh/m³.

Alle Speicherarten wurden exemplarisch getestet. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sind Saisonspeicher ohne Fördermittel nicht zu rechtfertigen. Die Anzahl der Testanlagen sind so gering und die Datenlage zu dünn, als dass Wärmeverluste verallgemeinerbar (als Kennwerte) angegeben werden könnten.

3.9.3 Nah- und Fernwärmenetze

Der sinnvolle Einsatz von Netzlösungen muss mit Hilfe wirtschaftlicher und ökologischer Betrachtungen gefunden werden. In Anbetracht sinkender Wärmeabnahmen, welche sich aus der Gebäudemodernisierung ergeben, fallen Netzverluste deutlich mehr ins Gewicht als früher. Netzlösungen bieten sich an in Lieferungsstrukturen mit folgenden Randdaten:

- große Besiedlungs- bzw. Abnehmerdichten,
- schlechte Baustandards, z.B. Gebäude unter Denkmalschutz, Prozesswärmebedarf,
- Einsatz von zentralen Erzeugern, die es für den Einzelabnehmer nicht gibt, z.B. eine Müllverbrennungsanlage,
- Einsatz von zentralen Erzeugern, die prinzipiell auch für Kleinanlagen verfügbar wären, aber deren Kosten bei Einzelbeschaffung unverhältnismäßig hoch wären oder deren Effizienz als Kleinanlage nicht (ausreichend) hoch ist, z.B. eine Holzhackschnitzelheizung,
- Verfügbarkeit von Abwärme aus ohnehin stattfindenden (industriellen) Prozessen, der Stromerzeugung oder dauerhafter Kälteproduktion (Wärme-Kälte-Verschiebung)

Dämmdicken und U-Werte

Wärmenetze werden in Deutschland regulär im Erdreich verlegt. Der heute verwendete Dämmstoff der Mantelrohre ist PUR Hartschaum. Seine Wärmeleitfähigkeit verschlechtert sich ausgehend von sehr guten Anfangswerten um λ = 0,022 … 0,028 W/(mK) über die Lebensdauer von 30 Jahren in den Bereich um λ = 0,026 … 0,038 W/(mK).

Die AGFW (früher Arbeitsgemeinschaft Fernwärme, heute Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.) empfiehlt Dämmdicken lt. Tabelle 120 und sieht die "Stufe 1" als üblichen Standard an.

Rohrinnendurchmesser d_i, in [mm]	Dämmdicke $d_{DÄ}$, in [mm]			Verhältnis $d_{DÄ}$ / d_i		
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
28,5	26	36	43	91 %	126 %	151 %
54,5	30	37	47	55 %	68 %	86 %
82,5	33	43	52	40 %	52 %	63 %
107,1	40	52	64	37 %	49 %	60 %
210,1	43	62	68	20 %	30 %	32 %
393,7	68	102	146	17 %	26 %	37 %
595,8	83	132	182	14 %	22 %	31 %

Tabelle 120 Dämmung von Fernwärmeleitungen nach AGFW [55]

Die Dämmqualitäten der "Stufe 1" sind insbesondere bei großen Durchmessern geringer als die Anforderungen der Energieeinsparverordnung an Heizungs- oder Trinkwarmwasserleitungen im unbeheizten Bereich. Die EnEV stellt jedoch keine Anforderungen an erdreichverlegte Leitungen.

Der längenbezogene Wärmeverlust der Leitungen kann mit der anvisierten Dämmstoffqualität individuell berechnet werden. Es gilt folgende Näherungsgleichung für ein einzelnes konzentrisches Rohr (die vergleichsweise geringe Dämmwirkung des Rohrmaterials selbst wird dabei vernachlässigt, ebenso die geringen inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände):

$$U_{Rohr} \approx \frac{2 \cdot \Pi \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{DN + 2s}{DN}\right)}$$

Eine Beispielrechnung verdeutlicht die Größen und deren Einheiten:

- Rohr DN 80 als Kunststoffmantelrohr mit Außendurchmesser d_a = 88,9 mm, Wandstärke 3,2 mm sowie Innendurchmesser 82,5 mm
- DN = 80 mm wird vereinfacht als innerer Durchmesser der Dämmschicht angesetzt,
- Dämmung aus PUR in Wärmeleitgruppe 028, λ = 0,028 W/(mK) mit s = 33 mm Dicke
- $U_{Rohr} \approx \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}028 W/(mK)}{\ln\left(\frac{80mm + 2 \cdot 33mm}{80mm}\right)} = 0{,}29 \frac{W}{mK}$

Mit dem korrekten inneren Durchmesser der Dämmung (der dem Außendurchmesser des Rohres entspricht) ergäbe sich ein U-Wert von 0,317 W/(mK). Werden allerdings zusätzlich die – wenn auch geringe – Dämmwirkung des inneren Rohrmaterials und äußeren Mantels berücksichtigt, nähert sich der reale Wert an den überschlägigen.

Aus der allgemeinen Gleichung kann durch Regression eine Zahlenwertgleichung abgeleitet werden, bei der als Eingabegrößen lediglich die prozentuale Dämmdicke DÄ (bezogen auf den Durchmesser, Angabe in %) sowie die Wärmeleitfähigkeit verbleiben:

$$U_{Rohr} \approx \lambda \cdot 5{,}77 \cdot DÄ^{-0{,}69}$$

Bezogen auf das obige Beispiel ergibt sich:

- die prozentuale Dämmdicke des Rohres beträgt (Bezugsmaß ist der Innendurchmesser): 33 mm / 82,5 mm = 0,4 = 40 %
- $U_{Rohr} \approx 0{,}028 \frac{W}{mK} \cdot 5{,}77 \cdot 0{,}4^{-0{,}69} = 0{,}30 \frac{W}{mK}$

Für nicht konzentrische Rohrdämmungen oder Trassen mit 2 Leitungen in einer Dämmhülse sind Herstellerwerte zu recherchieren. Die resultierenden Werte liegen in ähnlicher Größenordnung wie diejenigen konzentrischer Rohre (es gelten die gleichen energetischen Standards), jedoch lassen sich aufgrund der Bauform evtl. Einsparungen bei der Verlegung der Netze erzielen.

Längenbezogene Wärmeverluste

Der Verteilverlust von Wärmeleitungen ergibt sich analog zu dem der Heizungsleitungen im Gebäude, siehe Abschnitt 3.6.3. Es werden mittlere Medien- und Erdreichtemperaturen für die Berechnung zugrunde gelegt. Typische auf die Trassenlänge bezogene Ergebnisse zeigt Tabelle 121, jeweils für zwei separate, parallel im Erdreich verlegte Leitungen.

Beschreibung		**Wärmeverlust, bezogen auf 1 m Trassenlänge, in kWh/(m · a)**
Netze für Betrieb von Heizung und Prozesswärme (z.B. Trinkwassererwärmung)	schlechte Dämmung, Netztemperaturen ca. 80 – 100°C	350
	übliche Dämmung, Netztemperaturen ca. 70 – 90 °C	250
	gute Dämmung, Netztemperaturen ca. 60 – 80 °C	200
Netze für reinen Heizbetrieb	schlechte Dämmung, Netztemperaturen ca. 80 – 100°C	200
	übliche Dämmung, Netztemperaturen ca. 70 – 90 °C	150
	gute Dämmung, Netztemperaturen ca. 60 – 80 °C	100

Tabelle 121 Längenbezogene Wärmenetzverluste [76][82]

Verteilungsnutzungsgrad

Der Nutzungsgrad ist das Verhältnis von gelieferter Energiemenge zum Energieeinsatz. Üblich ist die Angabe von Jahreswerten.

Je geringer die Anschlussleistungen am Netz, desto schlechter der Jahresnutzungsgrad. Eine Querauswertung verschiedener real gebauter Netze ergibt die in Bild 70 abgeleitete Regressionsformel. Maßgeblich ist die Wärmeleistungsliniendichte, d.h. das Verhältnis der maximalen Anschlussleistung der Verbraucher zur Länge der Trasse.

Die AGFW kommt bei einer Auswertung von 1324 Netzen im Bundesgebiet zu einem mittleren Nutzungsgrad von 88 %. Die durchschnittliche Trassenlänge je Hausstation liegt bei 58 m, die durchschnittliche Leistung bei 138 kW. Dies führt zu einer Wärmeleistungsliniendichte von knapp 2,4 MW/km [59].

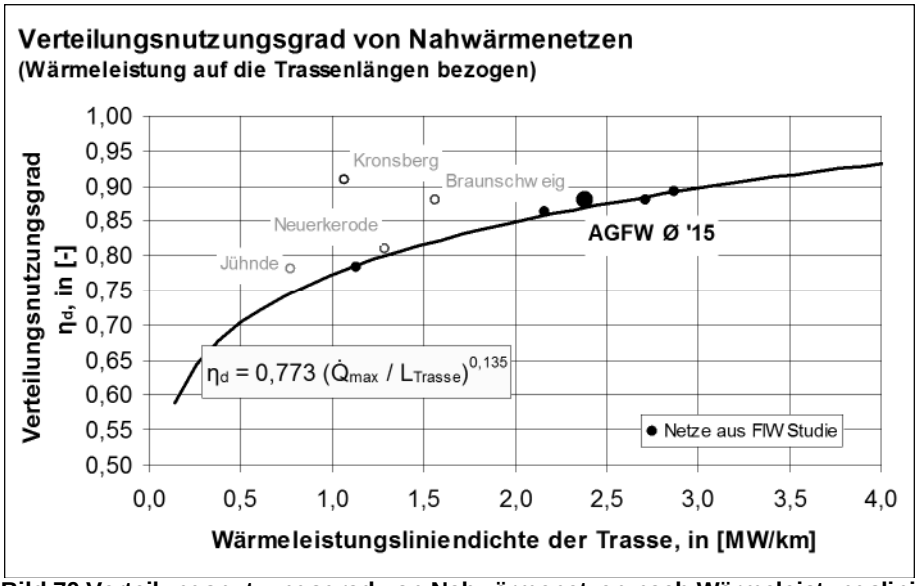


Bild 70 Verteilungsnutzungsgrad von Nahwärmenetzen nach Wärmeleistungsliniendichte [82]

Jedoch schneiden Niedertemperaturnetze sowie neuere Trassen besser ab, z.B. das 1999 errichtete Stadtviertelnetz in Hannover Kronsberg.

Flächenbezogene Wärmeverluste

Flächenbezogene Wärmeverluste ergeben sich aus einem Bezug auf die Fläche der angeschlossenen Verbraucher. Die Verluste liegen außerhalb der Gebäudehülle, so dass diese Wahl nicht sofort offensichtlich ist. Jedoch lässt sich das Ergebnis problemlos mit gebäudeinternen Kennwerten vergleichen und in Relation setzen.

Typische Werte je nach Siedlungsstruktur des zu versorgenden Gebietes zeigt Tabelle 122. Es wird deutlich, dass mit abnehmender Besiedlungsdichte nennenswerte Verteilverluste entstehen.

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

Tabelle 122 Netzlänge nach Siedlungsstruktur [10][eigene]

Mit Hilfe der Kennwerte lassen sich Überschlagskalkulationen erstellen. Für eine in Planung befindliche Beispielsiedlung mit gemeinsamer Heizzentrale soll folgendes gelten:

- neue Reihenhaussiedlung → typischer Verteilverlust 20 kWh/(m²a)
- anvisierter Baustandard 30 % besser als EnEV → typische Wärmeabnahme der Gebäude für Heizung und Trinkwarmwasser (40 + 30 = 70) kWh/(m²a)
- geplant ist eine Nahwärme mit BHKW als Erzeuger in einem lokalen Heizhaus → Gesamtenergieaufwand ab Zentrale (20 + 70 = 90) kWh/(m²a)
- Nutzungsgrad des Netzes: η_d = 70 / 90 = 78 %

Der Netzverlust erhöht den Energiepreis auf dem Weg von der Zentrale bis zum Abnehmer. Für das obige Beispiel wird folgendes unterstellt:

- kalkulierter Wärmepreis in der Heizzentrale: $k_{ohne\ Netz}$ = 0,072 €/kWh (Vollkosten)
- resultierender Wärmepreis am Hausanschluss des Kunden:
  $k_{Endkunde}$ = 0,072 €/kWh / 0,78 = 0,092 €/kWh

Die wohnflächenbezogenen Netzverluste sollten bei Neubauten und energetisch modernisierten Bestandsbauten Werte von 10 … 15 kWh/(m² a) nicht überschreiten. Ausnahme: die Abwärme steht kostenlos und nicht subventioniert zur Verfügung.

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Die Einschätzung bestehender Netze lässt sich mit Wärmemengenmessungen einfach realisieren. Häufig sind bereits an der Abnehmerseite des Netzes Zähler zur Abrechnung installiert. Daher wird lediglich ein weiterer Zähler am Netzeinspeisepunkt benötigt.

Diese Differenzmessung wird insbesondere für erdverlegte Leitungen empfohlen, da eine Beurteilung des energetischen Zustandes ohne Öffnung der Trassen kaum möglich ist. Nur für oberirdische Leitungen kann einigermaßen sicher eine Einschätzung anhand von Kennwerten erfolgen.

Einsparpotentiale und Sonderbauformen

Einsparpotentiale ergeben sich bei Betrachtung der Berechnungsgleichung der Wärmeverluste: bessere Rohrdämmung (U), geringere Netzlängen (L), geringere Temperaturdifferenzen ($\Delta\vartheta$) also Netztemperaturen sowie kürzere Betriebszeiten.

Da – bis auf wenige Ausnahmen – von Leitungen im Erdreich auszugehen ist, erfordert die nachträgliche Dämmung eine Öffnung der Rohrgräben. Anschließend werden Dämmschichten erhöht oder eine komplett neue Dämmung angebracht. Im Normalfall ist dies so aufwändig, dass die Verbesserung der Dämmung nur in Angriff genommen wird, wenn das Netz ohnehin repariert oder ausgetauscht wird. Das bedeutet: die einmal gewählte Dämmschichtdicke ist für die gesamte Lebensdauer relevant.

Aus heutiger Sicht sollten die von der AGFW vorgeschlagenen Stufen 1 bis 3 (Tabelle 120) im Zuge der Neu- oder Sanierungsplanung daher alternativ wirtschaftlich miteinander verglichen werden, um eine langfristig ausreichende und vertretbare Schichtdicke zu installieren.

Ebenfalls lassen sich bessere U-Werte erzielen, wenn Rohrgräben teilweise (rund um die Rohre) mit Schaumglasschotter befüllt werden. Dies ist allerdings eine nicht alltägliche Einzelleistung.

Die Einsparpotentiale durch verminderte Betriebszeiten ergeben sich bei einer Sommerabschaltung – sofern die Nah- und Fernwärme nicht für die Warmwasserbereitung benutzt wird. Liegenschaften mit diesen Randdaten gibt es in der Praxis nicht häufig, da die jährlich übertragene Wärmemenge entsprechend geringer ist, was bei praktisch gleichem Installationsaufwand zu unwirtschaftlicheren Randdaten führt. Im Nichtwohnbau, z.B. im Umfeld von Hochschulen sind solche Netze zu finden. Hier sind regelungstechnische Maßnahmen zu ergreifen, die einen klaren Sommer- und Winterbetrieb sicherstellen. Auch lassen sich in solchen Netzen die Betriebstemperaturen mit einer Heizkurve an die Witterung anpassen.

Eine weitere Strategie zur Verlustverminderung ist die Installation einer "kalten Nahwärme". In solchen Systemen liegt die Netztemperatur unterhalb der Nutztemperatur – es werden bei den Abnehmern Wärmepumpen oder andere Zusatzerzeuger benötigt, um das Endtemperaturniveau zu erreichen. Die Netzverluste sinken bis auf null, wenn die Medientemperatur Erdreichtemperatur aufweist.

Allerdings werden in diesen Netzen insgesamt geringere Energiemengen an die Verbraucher übertragen als bei konventioneller Nah- und Fernwärme – nicht umsonst ist eine lokale Nachheizung erforderlich. Da die lokalen Erzeuger ebenfalls Investitionskosten verursachen ist die Wirtschaftlichkeit kritisch zu prüfen. Netze dieser Art können sinnvoll sein, wenn Niedertemperaturabwärme aus ohnehin vorhandenen Prozessen nahezu kostenlos zur Verfügung steht.

Die letzte Option ist die Minimierung der Leitungslängen. Im Rahmen der Planung sollten mehrere Verlegeoptionen verglichen werden und ein Optimum gefunden werden.

Alternativ ist die gänzliche Vermeidung des Netzes zu untersuchen. Ein Wärmenetz außerhalb von Gebäuden führt zu einem Wärmeverlust an die Umwelt, den es ohne dieses Netz nicht gäbe. Ob sich trotzdem ein energetischer, ökologischer oder wirtschaftlicher Vorteil ergibt, ist zu prüfen. Folgende Fälle sind zu unterscheiden – die in Klammern angegeben Zahlen geben die anteilige Einspeisung von Wärme in 1324 von der AGWF ausgewerteten Netzen an [59]:

- Erzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung KWK (83 %)
- Erzeugung ohne KWK, d.h. Heizwerke (15%)
- Nutzung industrieller Abwärme (2 %)

Heizwerke: aus früherer Sicht (z.B. einer zentralen Koksfeuerung) konnte argumentiert werden, dass der zentrale Wärmeerzeuger einen so großen Nutzungsgradvorteil gegenüber den Einzelerzeugern hat, dass die Netzverluste aufgewogen werden. Das ist aus heutiger Sicht praktisch nie der Fall. Bleibt also nur der wirtschaftliche Vergleich incl. Einbezug der Investition, Wartungs- und Unterhaltskosten.

Wärme aus KWK: sie wird vielfach als ohnehin verfügbare Abwärme einer Stromproduktion angesehen, wobei dies nicht immer korrekt ist. Insbesondere in GUD Kraftwerken reduziert die Wärmeentnahme den elektrischen Wirkungsgrad, was bei ökologischen und wirtschaftlichen Vergleichen zu bedenken ist. Werden die Netzverluste bis zu den Abnehmern hinzu addiert, gibt es Versorgungsgebiete, in denen die reine Stromauskopplung ohne Wärmenutzung sinnvoller ist. Die Gebäude erhalten dann lokale Einzelerzeuger, z.B. Gaskessel.

3.9.4 Gebäudenahe Stromerzeugung

Zunehmend gewinnt die Stromerzeugung aus Photovoltaik für Gebäudeenergiekonzepte an Bedeutung. Sie verdrängt die Solarthermie trotz schlechterer Wirkungsgrade. Dies ist durch die universellere Nutzbarkeit des hochwertigeren Energieträgers Strom begründet. Dagegen ist der Einsatz von gebäudenaher Windkraft weitgehend auf Pilotanlagen, Forschungsvorhaben oder Werbezwecke beschränkt. Für beide Technologien werden nachfolgend Kennwerte angegeben.

Die Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW) wird in Abschnitt 3.9.1 besprochen.

Erträge Photovoltaik

Grundlage für die Abschätzung der Erträge ist das Strahlungsangebot – siehe Abschnitt 3.3.3. Darüber hinaus beeinflussen verschiedene Zelltypen sowie Einbausituationen das Ergebnis.

Tabelle 123 fasst den Zellwirkungsgrad sowie Korrekturfaktoren aufgrund der Temperaturentwicklung (Stauwärme) zusammen. Die angegebenen Werte sind Jahreswerte. Mit Simulationsverfahren lassen sich temperaturabhängige Ertragsminderungen den Jahreszeiten zuordnen.

Einbausituation	Systemwirkungsgrad, in [%]		
	Monokristallines Silizium Polykristallines Silizium	Amorphes Silizium	Organisch
Unbelüftete Module (direkt auf Dämmung bzw. Unterkonstruktion)	10...11	4...5	2...3
Mäßig belüftete Module	11...12	5	
Stark belüftete oder freistehende Module	12...13	5...6	

Tabelle 123 Systemwirkungsgrade (incl. Einbausituation) für Photovoltaik [13]

Die am häufigsten anzutreffenden Zellen bestehen aus polykristallinem Silizium. Unter optimaler Ausrichtung und Neigung führen Sie zu einer Maximalleistung (Peakleistung) von 125 W/m² - ausgehend von mittleren Klimadaten für Deutschland. Dieser Wert vermindert sich um 20 … 30 % aufgrund der Einbaulage und Belüftung.

Insgesamt sind bei optimaler Ausrichtung und Neigung im Verlauf eines Jahres 900 … 1100 kWh/a Ertrag je 1 kW_{peak} zu erwarten – die Werte schwanken je nach Klimastandort.

Batteriespeicher

Zur Stromspeicherung sind verschiedene physikalische Prinzipien geeignet, die zu entsprechenden technischen Umsetzungen führen:

- Kondensatoren und Spulen,
- Schwungräder, Pumpspeicherwerke und Druckluftspeicher,
- elektrochemische Akkumulatoren (Batterien) und stoffliche Speicherung nach Umwandlung (Wasserstoff, Methan).

Sofern der Strom ohnehin der Wärmeversorgung dienen soll, sind auch Wärmespeicher denkbar. Trotz sehr unterschiedlicher Energiedichten weisen alle Technologien Stillstandsverluste und ggf. begrenzte Lebensdauern bzw. Anzahlen an Lade- und Entladezyklen auf.

Aus heutiger Sicht – und für den Anwendungsfall eines Anlagen- oder Gebäudeenergiekonzeptes – sind Batteriespeicher die einzige Alternative, die ggf. zu einem wirtschaftlichen Betrieb führen. Kennwerte für verschiedene Batterietypen zeigt Tabelle 124.

Batterietyp	Maximale Entladetiefe	Systemwirkungsgrad	Entladezeit [h]	Zyklenzahl
Batterien auf Basis von Lithium und Lithium-Verbindungen	83 % (50...99 %)	90 ± 3 %	ca. 1,5...2,5	5000...6000
Blei- und Bleigel-Batterie	ca. 50 %	87 ± 3 %	ca. 2...3	2500...3000
Nickel-Eisen-Batterie	ca. 70 %	92 ± 3 %	ca. 1...1,5	ca. 3000

Tabelle 124 Typische Kennwerte für Batterien [13][eigene]

Für die energetische Bewertung ist vor allem der Systemwirkungsgrad relevant. Er enthält Verluste durch Selbstentladung und die Umrichter.

Mit Hilfe der maximalen Entladetiefe der Batterie kann eingeschätzt werden, wie groß die Überdimensionierung ausfallen soll. Sie ist das Verhältnis der effektiv nutzbaren Batteriekapazität zur Nennkapazität. Insbesondere bei Lithium-Batterien sind sehr unterschiedliche Herstelleraussagen zu verzeichnen. Im Mittel bieten sie jedoch die größte Entladetiefe. Dies ist für die Kostenschätzung relevant.

Ebenfalls für wirtschaftliche Untersuchungen wichtig ist die Zyklenzahl. Sie gibt an, wie viele Entladungen bis zur maximalen Entladetiefe mit anschließender maximaler Vollladung möglich sind, bis die Batterie ihr Lebensende erreicht. Eine Vielzahl aus Teilzyklen – anstelle eines Vollzyklus' – sind ebenfalls möglich und werden unter Fachleuten i. A. als unkritischer für die lange Lebensdauer angesehen als Vollzyklen.

Die in Tabelle 124 angegebene typische Entladezeit schwankt bei Betrachtung von realen Produkten extrem. Sie gibt an, wie viele Stunden es dauern würde, die effektiv nutzbare Speicherkapazität mit dem maximalen Entladestrom aus der Batterie zu entnehmen. Je kleiner der Wert, desto größer die Entladeleistung, was günstiger für den Betrieb leistungsstarker Geräte ist.

Selbstnutzungsquote und Autarkie im Wohnungsbau

Werden in einem typischen Haushalt mit Photovoltaikanlage das Stromangebotsprofil und das Stromlastprofil (beide in sehr hoher zeitlicher Auflösung bzw. als Momentanleistungen) übereinander gelegt, kann abgeschätzt werden:

- wann der Stromverbrauch aus den Lieferungen der PV-Anlage gedeckt werden kann und wann Netzstrom bezogen werden muss; typische Werte zeigt Bild 71,
- welcher Anteil des PV-Stroms selbst genutzt werden kann und welcher ins Netz zurückgespeist werden muss; typische Werte siehe Bild 72.

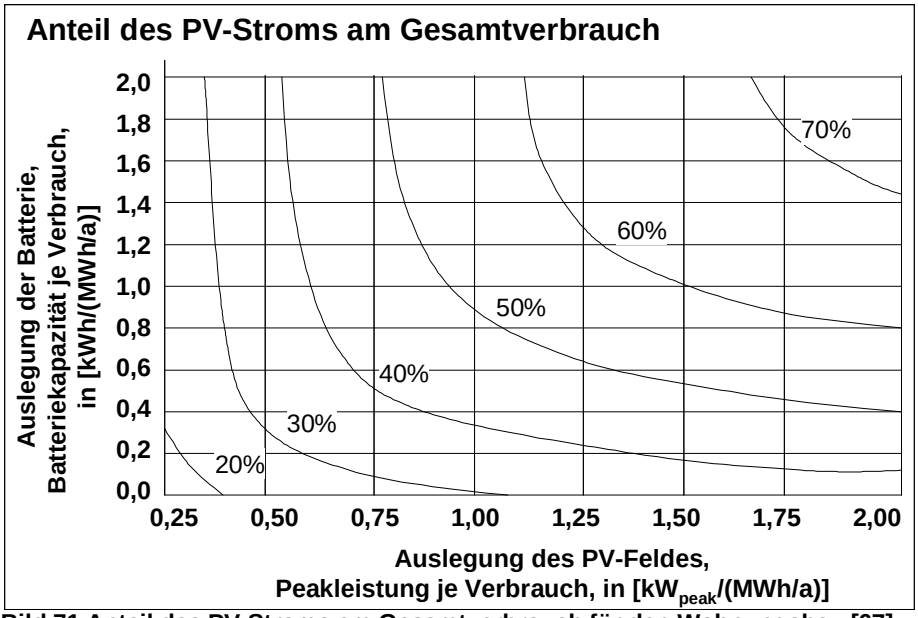


Bild 71 Anteil des PV-Stroms am Gesamtverbrauch für den Wohnungsbau [67]

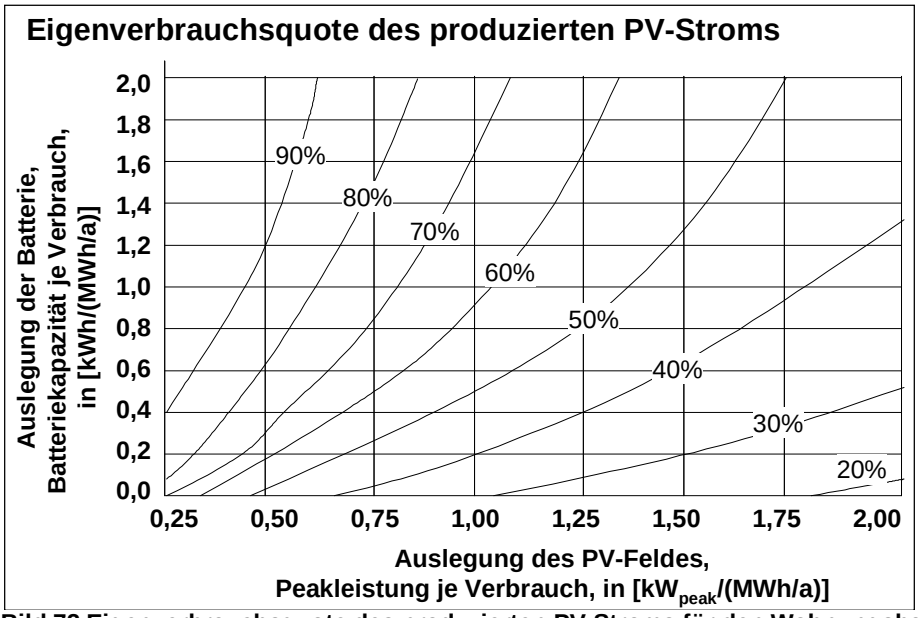


Bild 72 Eigenverbrauchsquote des produzierten PV-Stroms für den Wohnungsbau [67]

Für Bild 71 und Bild 72 gilt: die gezeigten Kennwerte sind mittlere Jahreswerte, die nur für den Wohnungsbau – mit der dort zu erwartenden zeitlichen Verteilung des Stromverbrauchs – gelten.

Der Wert auf der Abszisse ist ein Maß für die Anlagendimensionierung, d.h. die Maximalleistung des PV-Feldes wird im Verhältnis zum Stromverbrauch des Gebäudes gesetzt. Eine heute typische Auslegung führt zu einem Kennwert von 1 kW_{peak} / (MWh/a). Die Ordinate zeigt die Dimensionierung der Batteriekapazität im Verhältnis zum Verbrauch. Sofern eine Batterie vorhanden ist, ergibt sich ebenfalls ein heute typischer Wert von 1 kWh / (MWh/a).

Das bedeutet für ein beispielhaftes Einfamilienhaus:

- Stromverbrauch 5000 kWh/a = 5 MWh/a → PV-Anlage mit einer maximalen Leistung von 5 kW_{peak} → unter typischen Bedingungen PV-Ertrag von 5000 kWh/a
- Bild 71: für den Fall ohne Batterie ergibt sich ein Anteil des PV-Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch von knapp 30 %; 1500 kWh/a des Verbrauchs werden aus PV-Strom gedeckt, die anderen 3500 kWh/a werden zugekauft
- Bild 72: für den Fall ohne Batterie liegt die Selbstnutzungsquote bei etwa 30 %; 1500 kWh/a des selbst erzeugten Stroms können sofort genutzt werden, die anderen 3500 kWh/a werden ins öffentliche Netz gespeist.

Der Einsatz einer Batterie ist weniger häufig anzutreffen, jedoch verbessert bereits eine sehr kleine Speicherkapazität die Bilanz deutlich.

- falls eine Batterie vorhanden ist, hat sie eine Speicherkapazität von typisch 5 kWh, was knapp einem Drittel des Tagesbedarfs entspricht
- Bild 71: für den Fall mit Batterie ergibt sich ein Anteil des PV-Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch von etwa 53 %; 2700 kWh/a des Verbrauchs werden aus PV-Strom gedeckt, die anderen 2300 kWh/a werden zugekauft
- Bild 72: für den Fall mit Batterie liegt die Selbstnutzungsquote bei etwa 62 %; 3100 kWh/a des selbst erzeugten Stroms können sofort genutzt werden, 1900 kWh/a Überschuss werden ins öffentliche Netz gespeist.
- die Differenzenergiemenge beider Betrachtungen (400 kWh/a) sind Batterieverluste

Mikro- und Mini-Windkraft

Bild 73 zeigt typische Erträge für gebäudenahe Mikro- und Mini-Windkraft. In Anbetracht der recht großen baulichen Vorarbeiten für die Errichtung eines z.B. 10 m hohen Windrades mit einer Rotorfläche von 3 m² sind die Jahreserträge (unter 500 kWh/a) aus wirtschaftlicher Sicht nicht ausreichend zur Amortisation.

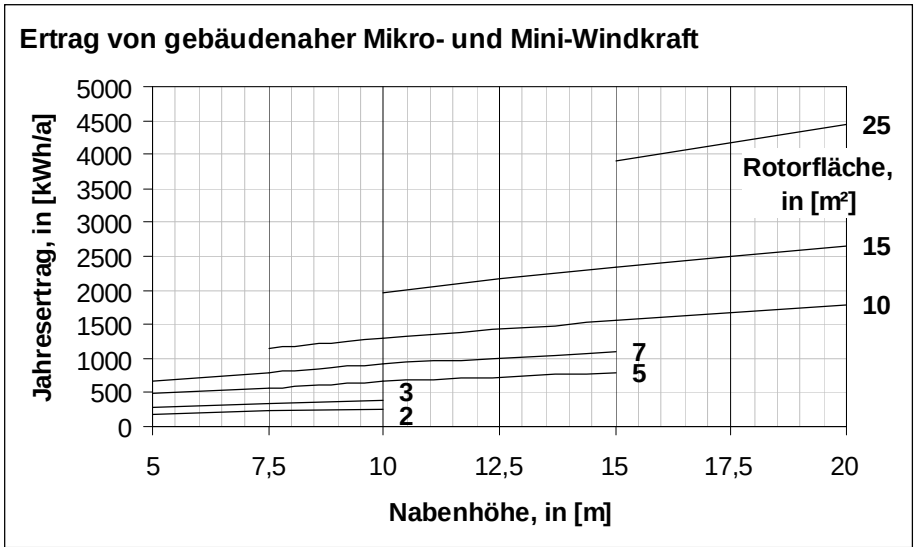


Bild 73 Erträge von gebäudenaher Mikro- und Mini-Windkraft [13]

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Die produzierten Stromerträge sowie Einspeisungen in das öffentliche Netz sollten gemessen werden.

3.10 Kennwerte für mechanische Belüftung und Raumlufttechnik

Die im Gebäude benötigten Heizwärme- oder Kühlenergienmengen können über Wasser als Energieträger in die Nutzungsbereiche eingebracht werden. Alternativ wird Luft als ausschließlicher oder zusätzlicher Energieträger verwendet. Dies erscheint sinnvoll, wenn ohnehin ein definierter Frischluftbedarf benötigt wird.

Etwa 2 % aller Wohngebäude sind mit einer Lüftungsanlage ausgestattet, im Neubau liegt die Quote bei etwa 10 %. Der Anteil der Anlagen mit Wärmerückgewinnung beträgt insgesamt etwa 50 %, im Neubau liegt er über 80 %. Eine Klimaanlage mit Kühlfunktion hat nur 1 % der Wohnbauten – Tendenz im Neubau steigend [9].

Die Marktdurchdringung von RLT im Nichtwohnbau wird allgemein als deutlich höher eingeschätzt. Der FGK (Fachverband Gebäudeklimatisierung) schätzt die Gesamtanzahl der zentralen RLT-Anlagen mit Kühlung in Deutschland auf 200.000 … 300.000 Systeme [34]. Das heißt, etwa 10 … 15 % der Nichtwohnbauten sind mit RLT ausgestattet.

Die europäischen Effizienzrichtlinien sehen zukünftig eine verstärkte Berücksichtigung von Kriterien zur thermischen Behaglichkeit und zur Raumluftqualität vor.

Nachfolgend werden vor allem zwei Aspekte mit Hilfe von Energie- und Bilanzkennwerten näher erläutert: die Einschätzung des Ventilatorenergieaufwandes in Abschnitt 3.10.1 sowie die Wärme- und ggf. Feuchterückgewinnung in Abschnitt 3.10.2.

Die Energiebereitstellung für die Versorgung der RLT-Anlage kann auf Basis der Kennwerte aus den Abschnitten 3.6 (Gebäudewärmeversorgung) und 3.7 (Gebäudekälteversorgung) erfolgen.

Anlagen der Raumlufttechnik werden divers klassifiziert, z.B. nach:

- Art der Geräteanordnung: zentral oder dezentral
- Art der Lüftungsfunktion: mit (Außenluftanlagen) und ohne (Umluftanlagen) Lüftungsfunktion sowie gemischte Betriebsweisen
- Art der Luftbehandlung: Vorhandensein von Heizfunktion, Kühlfunktion, Be- und Entfeuchtung
- Art der Volumenstromregelung: konstant oder variabel
- Volumenstrombalance: ausgeglichen (balanciert), Zuluftüberschuss (Überdruck), Abluftüberschuss (Unterdruck)

Die DIN 13779 benennt Anlagen mit reiner Lüftungsfunktion als "Lüftungsanlage". Ist eine Heizfunktion vorhanden, handelt es sich um eine "Luftheizungsanlage". In einer "Vollklimaanlage" kann Luft erwärmt, gekühlt, be- und entfeuchtet werden. Eine "Teilklimaanlage" deckt die restlichen Fälle ab. Eine Luftfilterung kann es immer geben.

3.10.1 Luftförderung und Verteilung

Die Ventilatorstromaufnahme P_{vent} [W, kW] hängt vom geförderten Volumenstrom $\dot{V}$ bzw. q [m³/h, m³/s], der notwendigen Gesamtdruckerhöhung des Ventilators Δp_{tot} [Pa] sowie dem Gesamtwirkungsgrad des Ventilators η – mit allen Teileffizienzen des Motors, der Welle, der Getriebe usw. – ab. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$P_{vent} = \frac{P_{hyd}}{\eta} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_{tot}}{\eta}$$

Das Produkt aus Volumenstrom und Druckerhöhung ergibt die hydraulische Leistung P_{hyd} [W], welche als Nutzleistung zu verrichten ist.

Die Leistungsbilanz ist eine Momentaufnahme für einen bestimmten Betriebszustand. Zur Bestimmung der Energiemenge muss eine Integration aller Leistungszustände erfolgen. Es ergeben sich üblicherweise variable Volumenströme und Druckdifferenzen während eines längeren Betrachtungszeitraumes. Auch die Wirkungsgrade sind keine konstanten Werte. Dennoch können nachfolgend für den Auslegungszustand typische Werte angegeben werden.

Druckverluste und Druckerhöhung

Die Druckverluste in einer RLT-Anlage ergeben sich beim Durchströmen der Kanalnetze einschließlich Auslässen und Klappen sowie des Zentralgerätes mit Filtern, Schalldämpfern, Anlagen zur Wärmerückgewinnung, Heiz- und Kühlregistern, Einrichtungen zur Befeuchtung – wobei nicht in jeder Anlage alle Komponenten vorhanden sind. Der Ventilator gleicht die jeweils vorhandenen Druckverluste durch eine entsprechende Druckerhöhung aus.

Abhängig von der Art der Luftbehandlung im Zentralgerät (Vorhandensein von mehr oder weniger vielen zentralen Bauteilen) sowie der Anlagengröße (Druckverluste im Netz) können typische Druckverluste festgestellt werden. Tabelle 125 fasst auf dieser Basis die notwendige Gesamtdruckerhöhung der Ventilatoren zusammen.

Anlagenart	Volumenstrom [m³/h]	Richtwert Δp_{tot} [Pa]
Abluftanlage	bis 300	150...250
	1000	200...300
	ab 10.000	300...400
Zu- und Abluftanlagen ohne Wärmerückgewinnung	1000	400...600
	ab 10.000	600...800
Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung	bis 300	300...500
	1000	450...700
	ab 10.000	600...1000
Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung sowie Heiz- und/oder Kühlregistern	1000	600...1000
	ab 10.000	900...1200

Tabelle 125 Typische Gesamtdruckerhöhungen in Lüftungs- und Klimaanlagen [36]

Die tabellierten Werte gelten für beide Strömungswege zusammen. Das heißt die Summation umfasst:

- wenn vorhanden die gesamte Zuluftstrecke, beginnend bei der Außenluftansaugung, Außenluftkanal, Zentralgerät, Zuluftkanal, endend bei den Zuluftauslässen im Raum sowie
- die gesamte Abluftstrecke, beginnend im Raum bei den Ablufteinlässen, Abluftkanalnetz, Zentralgerät, Fortluftkanalnetz bis wieder die freie Umgebung erreicht ist.

In der Zuluftstrecke sind regulär größere Druckverluste aufgrund vorhandener Filter, Heiz- und Kühlregister usw. zu verzeichnen. Insgesamt sind Anlagen zur Wärmerückgewinnung mit nennenswerten zusätzlichen Druckverlusten behaftet.

In einer Vollklimaanlage entfallen erfahrungsgemäß auf das Kanalnetz nur ca. 20 … 40 % des Gesamtdruckverlustes (je zur Hälfte auf die geraden Kanalstrecken bzw. Formstücke und Klappen). Die restlichen Druckverluste resultieren aus dem Zentralgerät, Schalldämpfern sowie den Differenzdrücken an den Luftauslässen. Zur korrekten Funktion von Düsen, Drallauslässen, Induktionsgeräten im Raum ist eine Mindestdruckdifferenz erforderlich.

Ventilatorwirkungsgrad und bezogene Leistungsaufnahme

Die Wirkungsgrade η von Ventilatoren werden einerseits von der Bauart, andererseits von der Einbausituation im System bestimmt. Folgende typischen Kennwerte sind zu verzeichnen [36]:

- Radialventilatoren
  - Trommelläufer mit vorwärts gekrümmten Schaufeln: 50 … 65 %
  - Hochleistungsventilator mit rückwärts gekrümmten Schaufeln: 75 … 90 %
- Axialventilatoren
  - Ventilator ohne Leitwerk: 60 … 70 %
  - Ventilator mit Leitwerk: 75 … 85 %
  - zwei gegenläufige Axialventilatoren: 80 … 90 %

Die Wirkungsgrade von Anlagen zur Förderung größerer Volumenströme sind insgesamt höher als bei Kleinanlagen.

Gebräuchlicher für die Kennzeichnung von Ventilatoren ist die Angabe der volumenstrombezogenen Leistung SFP (specific fan power). Er bezieht die Ventilatorleistung P_{vent} auf den geförderten Volumenstrom $\dot{V}$. Es sind unterschiedliche Einheiten gebräuchlich, siehe Tabelle 126. Der Kennwert wird wie folgt bestimmt:

$$SFP = \frac{P_{vent}}{\dot{V}} = \frac{\Delta p_{tot}}{\eta}$$

Tabelle 126 stellt typische Kennwerte aus der Literatur zusammen. Die schlechteren Werte gelten für ältere Geräte mit Baujahren vor der Jahrtausendwende. Für Zuluftventilatoren ergeben sich aufgrund der größeren notwendigen Druckerhöhungen schlechtere Kennwerte.

Ventilatorart	Anlagenart	spezifische elektrische Leistungsaufnahme		
		Anlage im Nichtwohnbau	Anlage im Wohnungsbau	
			AC-Ventilator	DC/EC-Ventilator
		kW/(m³/s)	W/(m³/h)	
Abluftventilator	zentrale Anlage	1,25	0,20...0,30	0,10...0,20
	zentrale Anlage mit Abluftwärmepumpe		0,35...0,45	0,20...0,30
	zentrale Anlage mit Wärmerückgewinnung		0,25...0,35	0,15...0,25
	dezentrales System	-	0,35...0,45	0,20...0,30
Zuluftventilator	zentrale Anlage mit Luftheizung	1,60	0,25...0,35	0,15...0,25
	zentrale Klimaanlage mit Wärmerückgewinnung sowie Heiz- und Kühlregister	2,00	0,35...0,45	0,20...0,30
	dezentrales System	-	0,40...0,50	0,25...0,35

Tabelle 126 spezifische Leistungsaufnahme von Ventilatoren [13][15][69]

Hinsichtlich der Motorentechnik wird unterschieden in Asynchronmotoren, welche mit Wechselstrom (AC) betrieben werden. Das Magnetfeld wird hierbei elektrisch erzeugt. Darüber hinaus gibt es Motoren, in denen auf das Feld eines Permanentmagneten zurückgegriffen wird; dies sind Gleichstrommotoren (DC) bzw. elektronisch kommutierende Motoren ohne Schleifkontakte (EC). Zur weiteren Erläuterung wird auf die Fachliteratur verweisen.

Hinsichtlich der Kennwerte ist festzuhalten, dass mit DC/EC-Motoren geringere Stromaufnahmen erreicht werden können.

Einfluss der Regelung

Die Klassifizierung von Ventilatoren anhand des SFP-Wertes bezieht sich auf den Nennbetriebszustand. Für den Teillastfall gelten in einer RLT-Anlage – unter der Voraussetzung turbulenter Strömungsverhältnisse – folgende Proportionalitäten:

- $\Delta p \sim \dot{V}^2$
- $P_{hyd} \sim \dot{V}^3$

Mit sinkenden Volumenströmen sinken die Druckverluste in den Komponenten quadratisch und die notwendige hydraulische Leistung in dritter Potenz. Ob die tatsächlich vorhandene Druckerhöhung des Ventilators entsprechend ebenfalls sinkt, hängt auch von der Regelung ab. Bild 74 zeigt für verschiedene Regelungsarten die Veränderung der Ventilatorleistung. Sofern die Bypass-Regelung gewählt wird, ändert sich die Ventilatorleistung in Teillast nicht.

Mit der Drehzahlregelung – dem technischen Optimum – wird der theoretische Verlauf der Ventilatorleistung (Anlagenkennlinie) näherungsweise nachgebildet. Eine Volumenstromreduktion auf 40 % des Nennwertes führt zu einer Leistungsminderung auf ca. 27 % der Ausgangsleistung.

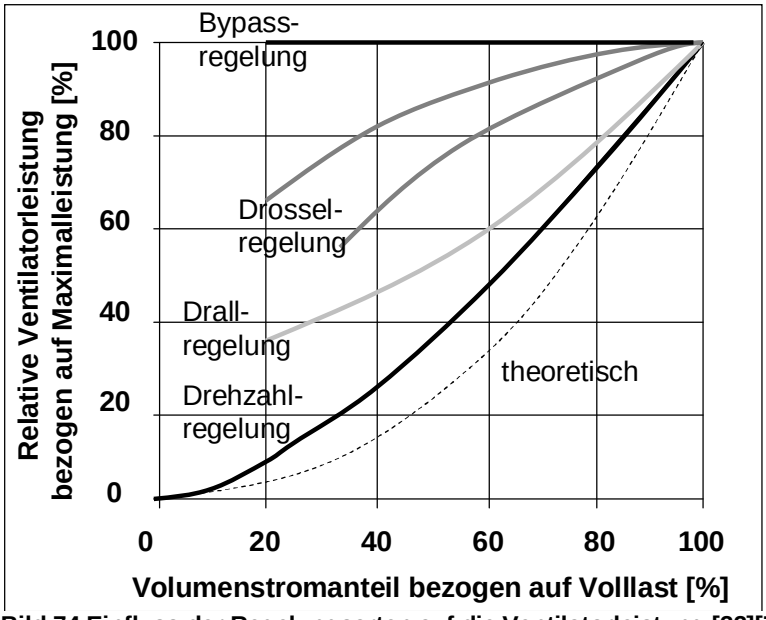


Bild 74 Einfluss der Regelungsarten auf die Ventilatorleistung [33][70]

Flächenbezogene Leistungen und Hilfsenergien

Tabelle 127 gibt Anhaltswerte für mittlere Leistungen und Laufzeiten für die zu berücksichtigenden Hilfsenergien im Wohnungsbau. Zwischenwerte können interpoliert werden. Die Laufzeit [h/a] entspricht i. A. der Länge der Heizperiode, kann jedoch bis zu einem Jahr betragen. Die Leistungsangaben sind auf die Wohnfläche A_{Wohn} [m²] bezogen.

Anlagenart	Ventilatorbauart	Leistung, in [W/m²]	Laufzeit, in [h/a]	Energiemenge, in [kWh/(m²a)]
zentrale Zu-Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung	AC	0,4...0,7	6000...8760	2,5...5,5
	DC/EC	0,2...0,5		2,0...4,0
zentrale Abluftanlagen	AC	0,3...0,5		1,5...2,5
	DC/EC	0,1...0,3		1,2...2,0
dezentrale Lüftungsanlagen	-	1,0...2,0		5,0...10
Flächenbezug: Wohnfläche				

Tabelle 127 Typische Energiekennwerte für die Luftförderung im Wohnbau [15][70]

Auch für Nichtwohnbaunutzungen kann eine Energiemenge für die Luftförderung abgeschätzt werden, siehe Tabelle 128. Entsprechende Kennwerte gehen von einer Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung aus. Sofern ausschließlich eine Abluftanlage vorhanden ist, liegt der resultierende Kennwert bei 30 … 50 % der genannten Zahlen, da einerseits ein Ventilator komplett entfällt und andererseits deutlich weniger Druckverluste im System festzustellen sind.

Gebäudeart	Energiemenge, in [kWh/(m²a)]
Bettengebäude / Hotel	15...25
Büro	5...15
Handel	15...25
Produktion	20...40
Restaurant	30...60
Schule	10...15
Sporthalle	10...20
Hinweis: Belüftung der Hauptnutzflächen mit Zu- und Abluftanlage; Flächenbezug: Nettogrundfläche	

Tabelle 128 Typische Energiekennwerte für die Luftförderung im Nichtwohnbau [38][39][eigene]

Kanalnetze und Verteilverlust

Luft wird über Kanalnetze verteilt. Sofern die Temperatur im Kanalnetz von der Umgebungstemperatur am Verlegeort abweicht, ergeben sich Verteilverluste. Je nach Jahreszeit – und somit Heiz- oder Kühlfall – bedeuten die Verluste des Netzes für die umgebenden Räume entweder ungeregelte Wärme- oder Kälteeinträge.

Die rechnerische Bewertung der Kanalnetze folgt der für Heizung und Trinkwarmwasser beschriebenen Vorgehensweise: es werden Kanalnetzlängen L [m], längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{(L)}$ [W/(mK)], die Temperaturdifferenz zwischen Kanal und Umgebung $\Delta\vartheta$ [K] benötigt. Alternativ wird ein oberflächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient $U_{(A)}$ [W/(m²K)] verwendet, der für die wärmeabgebende Kanalfläche A [m²] repräsentativ ist.

$$\begin{aligned} Q_d &= U_{(L)} \cdot L \cdot \Delta\vartheta \cdot t_{Betrieb} \\ &= U_{(A)} \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot t_{Betrieb} \end{aligned}$$

Sofern die Temperaturdifferenz variabel ist, ist über den Betrachtungszeitraum zu integrieren. Alternativ werden mittlere Bedingungen innerhalb der Betriebszeit $t_{Betrieb}$ [h] in die Gleichung eingesetzt.

Bei Luftheizungsanlagen ist mit mittleren Kanalnetztemperaturen in der Größenordnung von Niedertemperaturheizungsanlagen oder Fußbodenheizungen zu rechnen – ausgehend von 35 … 50°C Lufttemperatur (Auslegungswert). Es findet häufig eine witterungs- oder raumtemperaturgeführte Regelung statt. Zur Bestimmung der mittleren Temperatur im Kanalnetz innerhalb einer Heizperiode kann Bild 54 in Abschnitt 3.6.3 zum Einsatz kommen. Ein Ablesebeispiel ist dort vorhanden.

Für die Luftkühlung sind minimale Lufttemperaturen von 16 … 20 °C (Auslegungsfall) festzustellen.

Für den Wohnungsbau sind nachfolgende längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten typisch [13][15]. Sie gelten für Rundkanäle mit 125 mm Durchmesser bzw. andere Kanalformen mit einem Umfang von ca. 35 … 40 cm:

- Dämmdicke 50 mm: 0,45 W/(mK)
- … 30 mm: 0,65 W/(mK)
- … 20 mm: 0,85 W/(mK)

Für Netze in Nichtwohnbauten wird in DIN V 18599 pauschal mit 9 W/m² (Kühlfall) bzw. 16 W/m² (Heizfall) bilanziert [13]. Der Kennwert ist die zusammengefasst Größe $U_{(A)} \cdot \Delta\vartheta$ aus obiger Gleichung. Die zur weiteren Bilanzierung notwendige Kanaloberfläche ist die äußere Oberfläche des ungedämmten Kanals (ohne Einbezug der Dämmung gemessen).

Eine Typisierung von Verteilleitungslängen im Nichtwohnbau ist in der Literatur nicht zu finden. Für den Wohnungsbau zeigt Tabelle 129 einige Kennwerte. Unterschieden wird in die zentrale Verteilung (waagerecht, mehrere Hauptleitungen), Steigestränge (senkrecht, Hauptleitungen) und die Anbindung (an einzelne Luftauslässe).

Kenngröße	Verteilung L_V in [m]	Steigestränge L_S in [m]	Anbindung L_A in [m]
	innerhalb oder außerhalb der thermischen Hülle	innerhalb der thermischen Hülle	
Länge der Zuluftleitungen	$10 + 0{,}02 \cdot A_N$		$0{,}11 \cdot A_N$
Länge der Abluftleitungen	$7{,}5 + 0{,}02 \cdot A_N$	nicht relevant	
A_N = Gebäudenutzfläche nach EnEV in [m²], berechnet aus dem umbauten Volumen V_e			

Tabelle 129 Standardlängen für Lüftungskanäle im Wohnungsbau nach DIN V 4701-10 [15]

Wärmeübergabe an den Raum

Sofern die Lüftungsanlage eine Heiz- und Kühlfunktion aufweist, wird die an die Räume gelieferte Energiemenge u. a. von der Regelgenauigkeit der Einzelraumregelung beeinflusst. Die Bewertung der Wärmeübergabe wird im Abschnitt 3.6.4, die der Kälteübergabe in Abschnitt 3.7.4 näher erläutert.

Für zentrale und dezentrale Regler in Luftheizungsanlagen kann eine elektrische Leistungsaufnahme von 0,1 W (als Dauerleistung) angesetzt werden [13].

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Für Ventilatoren im Bestand wird eine Messung der elektrischen Leistungsaufnahme sowie des geförderten Volumenstroms und der erzielten Druckdifferenz empfohlen. Eine Kurzzeitmessung – z.B. unter Nennbedingungen – liefert die Betriebsleistung und rechnerisch den SFP-Wert oder den Wirkungsgrad des Ventilators.

Sofern Hochrechnungen des Verbrauchs auf gesamte Jahre erfolgen sollen, sind längere Messzeiträume sinnvoll. In vielen Anlagen, die eine reine Lüftungsfunktion haben bzw. keine witterungsabhängigen Volumenstromanpassungen aufweisen, sind Wochenmessungen sinnvoll. Dieser Zeitraum enthält alle typischen wiederkehrenden Zeitprogramme und Abläufe (Absenkphasen, Betriebspausen usw.).

Die thermische Bewertung der Kanalnetze erfolgt in der Praxis rechnerisch, ggf. unter Einbezug von Messwerten zur Temperatur. Die direkte Energiemengenmessung der Verteilverluste ist – aufgrund fehlender Messeinrichtungen im Raum – nicht möglich.

Einsparpotentiale

Ein großes Einsparpotential ergibt sich in raumlufttechnischen Anlagen aus Volumenstromreduzierungen in den Nebenbetriebszeiten. In vielen Nichtwohnbaunutzungen beträgt die Nebennutzungszeit ⅔ der Zeit eines Jahres (Labor, Büro). Anhaltswerte sind Abschnitt 3.2.1 zu entnehmen.

Die Luftvolumenströme können in den Nebenzeiten erfahrungsgemäß auf 20 … 40 % der Normalwerte reduziert werden oder Anlagen komplett abgeschaltet werden. Unter der Voraussetzung einer Drehzahlregelung vermindern sich die elektrischen Leistungsaufnahmen dann auf 10 … 25 % der Nennwerte, siehe Bild 74.

Dazu sind ggf. Drehzahlregelungen nachzurüsten. In Kleinanlagen ist die Wirtschaftlichkeit zu prüfen, mit steigender Anlagengröße erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Wirtschaftlichkeit. Der FGK (Fachverband Gebäude-Klima e. V.) geht davon aus, dass ab einer Anlagengröße von 15.000 m²/h eine Wirtschaftlichkeit grundsätzlich gegeben ist [34].

Der Ersatz von AC- durch EC-motorische Ventilatoren vermindert den Stromverbrauch um etwa ein Drittel.

Zur Verminderung des Verbrauchs an elektrischer Energie kann im Zuge der Energiekonzepterstellung auch untersucht werden, ob (evtl. bislang unterdimensionierte) Zentralgeräte oder Einbauteile vergrößert werden können. Die verminderten Strömungsgeschwindigkeiten führen zu geringeren Druckverlusten und damit Ventilatorstromaufwendungen. Dies betrifft vor allem die Komponenten mit hohem Druckverlust: Wärmerückgewinnung und Schalldämpfer.

3.10.2 Thermische Luftbehandlung

Wärme- und Feuchterückgewinnung

Vor der Angabe typischer Kennwerte sollen die üblichen drei Begrifflichkeiten erläutert werden, die zur Charakterisierung der Höhe der Rückgewinnung verwendet werden:

- Rückwärmzahl bzw. Temperaturänderungsgrad: ist ein reines Temperaturverhältnis (ohne Berücksichtigung der latenten Wärme des Wasserdampfes bzw. der relativen Luftfeuchte), welcher keine Abwärme von Ventilatoren oder anderen Bestandteilen des Zentralgerätes berücksichtigt (analoges gilt für die Rückfeuchtzahl)
- Wärmerückgewinnungsgrad: ist ein Enthalpieverhältnis mit Berücksichtigung von Lufttemperatur und Luftfeuchte, aber ohne Berücksichtigung der Ventilatorabwärme o. ä.
- Wärmebereitstellungsgrad: ist ein Enthalpieverhältnis mit Berücksichtigung von Lufttemperatur und Luftfeuchte sowie mit Berücksichtigung der Ventilatorabwärme o. ä. Abwärmeeinträgen in den Luftströmen

Üblicherweise gelten Angaben aus der Literatur für einen Betrieb ohne Leckageluft sowie mit ausbalancierten (gleich hohen) Volumenströmen auf beiden Seiten des Wärme- bzw. Feuchteübertragers.

Die Rückwärmzahl Φ [-] kann auf den Zuluft- oder den Abluftvolumenstrom bezogen sein, wobei erstere Angabe häufiger auftritt. Sie setzt die tatsächlich erreichte Temperaturänderung der Zuluft ins Verhältnis zu der maximal erreichbaren:

$$\Phi = \frac{\vartheta_{ZU} - \vartheta_{AU}}{\vartheta_{AB} - \vartheta_{AU}}$$

Am Beispiel des Heizfalls beschrieben: erfolgt ist eine Erwärmung des Frischluftvolumenstroms von Außentemperatur (AU) auf Zulufttemperaturniveau (ZU). Die maximale Erwärmung der Frischluft hätte bis zum Ablufttemperaturniveau (AB) erfolgen können, was einem verlustfreien Prozess entspricht (Φ = 1). Analoge formelmäßige Zusammenhänge gelten für die Rückfeuchtzahl (absolute Feuchten anstelle der Temperaturen), den Wärmerückgewinnungs- oder Wärmebereitstellungsgrad (Enthalpien statt Temperaturen).

In Wohnungslüftungsanlagen werden Wärmebereitstellungsgrade von über 90 % erreicht. Die DIN V 4701-10 bilanziert konservativ mit Werten von maximal 0,8 [15]. Die DIN V 18599 verwendet die Rückwärmzahl zur Bilanzierung und geht für den Wohnungsbau von 0,6 (Standardfall) bis 0,8 (verbesserte Effizienz) aus.

Für den Nichtwohnbau wird eine Bandbreite zwischen 0,45 und 0,75 angenommen [13]. Der untere und mittlere Bereich gilt für Kreislaufverbundsysteme (KVS), die höheren Werte für Plattenwärmeübertrager. Auch Rotationswärmeübertrager weisen Rückwärmzahlen um 60 … 65 % auf. Weitere Werte sind in Tabelle 130 zusammengestellt.

Art der Wärmerückgewinnung		Rückwärmzahl bzw. Temperaturänderungsgrad [-]	Rückfeuchtzahl bzw. Feuchteänderungsgrad [-]
Plattenwärmeübertrager (Kreuzstrom)		0,50...0,65	0
Kreislaufverbund	Kompaktwärmeübertrager	0,40	0
	Hochleistungs-Gegenstrom-Wärmeübertrager	0,70	0
Rotationswärmeübertrager	nicht sorptiv	0,70	0
	sorptiv	0,70	0,7

Tabelle 130 Kennwerte für die Wärme- und Feuchterückgewinnung [13]

Erfolgt die Wärmerückgewinnung im Kreislaufverbundsystem, werden sowohl im wärmeabgebenden als auch im wärmeaufnehmenden Luftstrom ein oder mehrere Wärmeübertrager platziert. Diese sind indirekt über einen Wasserkreislauf (oder anderes Trägermedium) verbunden, so dass kein Kontakt der beiden Luftströme besteht (kein Leckagerisiko im Wärmeübertrager). Es fällt für die Pumpe, welche das Zwischenmedium befördert, eine Hilfsenergie an. Folgende Leistungskennwerte gelten typischerweise bezogen auf den Außenluftvolumenstrom, welcher durch das KVS-System strömt [13]:

- ungeregelte Pumpe: P_{Pumpe} = 0,030 W/(m³/h)
- geregelte Pumpe: P_{Pumpe} = 0,015 W/(m³/h)

Wird ein Rotationswärmeübertrager eingesetzt, kann die Antriebsleistung abgeschätzt werden zu:

- Motorleistung: P_{Motor} = 0,010 W/(m³/h)

Für beide Systeme ist die Betriebszeit projektbezogen zu ermitteln, wenn die Energiemenge bestimmt werden soll.

Erdreichwärmeübertrager und regenerative Kühlung

Wird Außenluft unterhalb der Raumlufttemperatur zur Kühlung verwendet, spricht man von freier Kühlung. Sie kann direkt (als Luft) oder indirekt (über einen Wasser- oder Kühlmittelstrom) erfolgen. Die DIN V 18599 bewertet den Effizienzvorteil über eine verbesserte Arbeitszahl der vorhandenen Kältemaschine. Vor allem für Serverräume ergeben sich nennenswerte Verbesserungen um den Faktor 1,2...1,7 [13]. Die Norm unterscheidet detaillierter nach Temperaturniveau im Kältekreis sowie regelungstechnische Einbindung des Freikühlers. Weitere Ausführungen finden sich in Abschnitt 3.7.1.

Eine typische Dimensionierung eines Erdreichwärmeübertragers führt zu einer Temperaturerhöhung in der Heizperiode von knapp 1 K (Übergangsjahreszeiten) bis 4 K (Kernwinter) [13]. Dabei werden Luftleitungen aus PVC etwa 1 m tief im Erdreich verlegt.

Jahresnutzenergiemengen

Über Luft als Wärmeträger kann den versorgten Räumen Energie zugeführt oder aus diesen Energie abgeführt werden. Der notwendige Energieaufwand zur Erwärmung bzw. Abkühlung der Luft hängt unter anderem ab von:

- der Ausgangstemperatur und -feuchte der zur Verfügung stehenden Außenluft
- der gewünschten Zulufttemperatur und –feuchte
- der Höhe der Wärmerückgewinnung
- dem Vorhandensein von Einrichtungen zur Befeuchtung

Bild 75 zeigt notwendige Wärmeenergieaufwendungen für den Standort Potsdam (Referenzklima der Energieeinsparverordnung) als volumenstrombezogene Jahreswerte. Angenommen ist ein täglicher Betrieb der RLT-Anlage von 12 Stunden. Bild 76 gilt analog, jedoch für den Kühlenergiebedarf.

Die DIN V 18599 enthält Formelansätze zur Umrechnung der Kennwerte auf andere tägliche Laufzeiten, darüber auch (monatsweise) Datensätze für Dampfbefeuchtung, 60 % Wärmerückgewinnung sowie Befeuchtung auf eine konstante Feuchte.

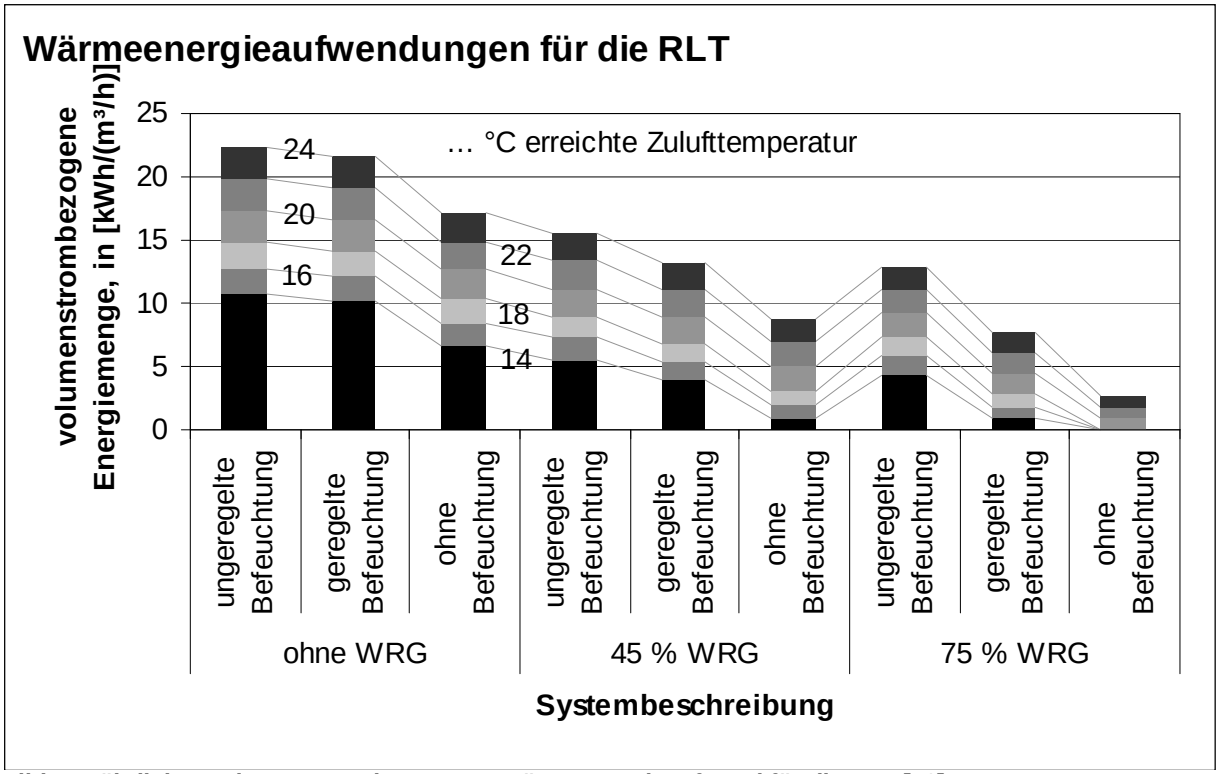


Bild 75 Jährlicher volumenstrombezogener Wärmeenergieaufwand für die RLT [13]

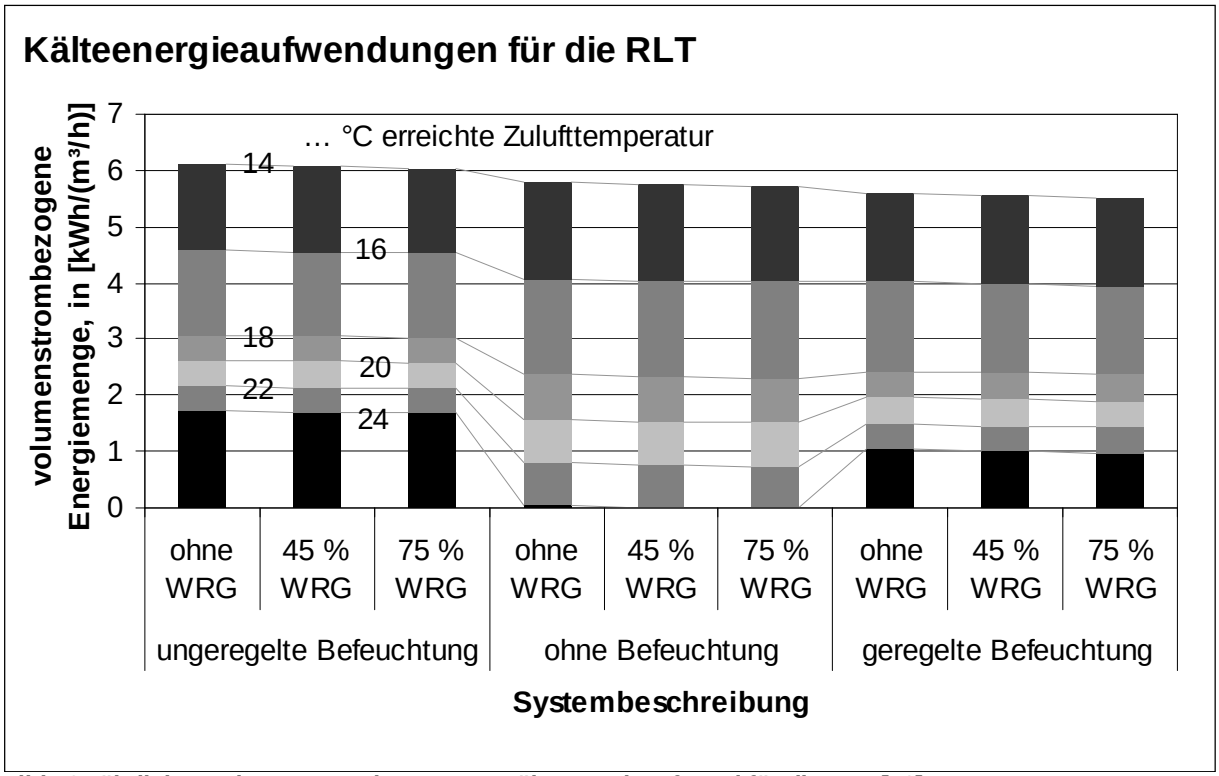


Bild 76 Jährlicher volumenstrombezogener Kälteenergieaufwand für die RLT [13]

Ablese- und Anwendungsbeispiel: gegeben ist eine RLT-Anlage mit 10.000 m³/h Volumenstrom in einem ein Bürogebäude. Es gibt keine Befeuchtung. Die Zulufttemperatur betrage 20°C. Untersucht wird der Vorteil einer Wärmerückgewinnung (WRG).

Aus Bild 75 folgt:

- System ohne WRG: 13 kWh/(m³/h)
- System mit 75 % WRG: 1 kWh/(m³/h)
- absolute Ersparnis an Heizenergie innerhalb eines Jahres: (13 – 1) kWh/(m³/h) · 10.000 m³/h = 120.000 kWh

Aus Bild 76 folgt:

- System ohne WRG: 5,8 kWh/(m³/h)
- System mit 75 % WRG: 5,7 kWh/(m³/h)
- absolute Ersparnis an Kühlenergie innerhalb eines Jahres: (5,8 – 5,7) kWh/(m³/h) · 10.000 m³/h = 1.000 kWh

Soll eine Gesamtbetrachtung erfolgen, schließt sich die Untersuchung der Wärme- und Kälteerzeugereffizienz an. Außerdem muss eingeschätzt werden, welcher Mehraufwand an Hilfsenergie und Ventilatorstrom sich aus den zusätzlichen Druckverlusten der Wärmerückgewinnung ergeben.

Befeuchtung

Die Luftbefeuchtung führt zu einer Luftabkühlung – außer bei der Dampfbefeuchtung. Sie führt somit zu geringerem Kühlbedarf, aber erhöhtem Wärmeenergiebedarf – siehe Bild 75 und Bild 76.

Darüber hinaus führt die Befeuchtung zu einem Hilfsenergieaufwand für die Pumpe. DIN V 18599 gibt nachfolgende Leistungskennwerte an, welche sich auf den Volumenstrom der befeuchteten Zuluft beziehen [13]:

- ungeregelte und ventilgeregelte Kontakt- und Rieselbefeuchter: 0,01 W/(m³/h)
- ungeregelte und ventilgeregelte Umlaufsprühbefeuchter: 0,2 W/(m³/h)
- getaktete Umlaufsprühbefeuchter: 0,07 … 0,1 W/(m³/h)
- drehzahlgeregelte Umlaufsprühbefeuchter: 0,04 … 0,06 W/(m³/h)
- Hochdruckbefeuchter: 0,01 … 0,02 W/(m³/h)
- Hybridbefeuchter: 0,01 W/(m³/h)

Anteilige Jahresheizarbeiten im Wohnungsbau

Für den Heizfall im Wohnungsbau liefert Tabelle 131 typische jährliche Deckungsanteile für unterschiedlichen Luftheizungserzeuger. Beim Passivhausstandard können 50 … 75 % der Jahresheizwärme aus der Wärmerückgewinnung gedeckt werden. Diese führen – bis auf den anteiligen Ventilatorstromaufwand – zu keiner weiteren Endenergie. Die verbleibenden 25 … 50 % liefert eine Zuluft-/Abluft-Wärmepumpe oder ein Luftheizregister bzw. eine Kombination beider Erzeuger.

Da die Lasten im Gebäude nicht gleichverteilt sind (räumlich ungleiches Aufkommen an solarer und innerer Fremdwärme) sind lokal angeordnete Heizregister einem zentralen Heizregister vorzuziehen. Die tabellierten Kennwerte gehen von maximalen Zulufttemperaturen im Wohnungsbau von ca. 50°C (Auslegungsfall) aus.

Im Gebäudestandard nach EnEV 2009 und 2014 ist davon auszugehen, dass eine lokale Nachheizung über statische Heizflächen erforderlich wird. Hierbei werden dann in der Praxis die Grenzkennwerte für Passivhäuser – Heizwärmeverbrauch kleiner 15 kWh/(m²a) – wegen nicht idealer Wärmeübergabe durch statische Heizflächen sowie zusätzlichen ungeregelten Wärmeeintrag über Heizleitungen meist nicht erreicht. Die Heizwärmeverbräuche liegen dann typisch zwischen 20 und 30 kWh/(m²a).

Gebäudestandard	Deckungsanteile der Erzeuger α [-]		
	Wärmerückgewinnung	Abluft / Zuluft-Wärmepumpe	zentrale Heizregister oder lokale Nachheizung
Gebäude nach EnEV 2009 und 2014	0,20...0,35	0,40...0,65	0,05...0,10
	0,20...0,35	-	0,65...0,80
	-	0,80...1,00	0,00...0,20
Gebäude nach EnEV 2016 und KfW-Effizienzhaus 55	0,35...0,55	0,45...0,65	-
	0,35...0,55	-	0,45...0,65
	-	0,95...1,00	0,00...0,05
Passivhaus, KfW-Effizienzhaus 40	0,50...0,75	0,25...0,50	-
	0,50...0,75	-	0,25...0,50
	-	0,95...1,00	0,00...0,05

Tabelle 131 Deckungsanteile für Wohngebäude mit Luftheizung [44][eigene]

Hinweise zur Bestandsbeurteilung

Sollen Jahresenergiemengen für witterungs- oder bedarfsgeführte Luftheiz- und/oder -kühlanlagen bewertet werden, empfiehlt sich die monatliche oder wöchentliche Messung über ein Jahr. Nur so können alle externen Einflüsse erfasst werden.

Die Bewertung einer Einrichtung zur Wärme- und/oder Feuchterückgewinnung kann durch Kurzzeitmessungen erfolgen. Je nach Platzierung der Thermo- oder Hygrometer wird der Einfluss der Ventilatorabwärme mit erfasst und damit der Wärmebereitstellungsgrad (nicht der Wärmerückgewinnungsgrad oder die Rückwärm-/Rückfeuchtzahl). Dies ist bei Vergleichen mit Hersteller- und Literaturangaben zu bedenken. Ebenfalls sind Fehlerbetrachtungen hinsichtlich der Kurzschlussvolumenströme im Zentralgerät vorzunehmen sowie nicht balancierte Volumenströme zu berücksichtigen.

Einsparpotentiale

Das größte Einsparpotential ergibt sich aus der Nachrüstung einer Wärmerückgewinnung. Der FGK schätzt [34], dass ca. 20 % aller RLT-Anlagen im Bestand keine Einrichtungen zur Wärmerückgewinnung aufweisen. Insbesondere in Gebäudearten mit hohen Luftwechseln sowie wenig Transmissionswärmeverlusten (kompakte Hallenbauten, gute Wärmedämmung) sind nennenswerte Einsparungen zu erzielen.

Sofern eine Befeuchtung vorgesehen ist, sind Einrichtungen zur Regelung nachzurüsten. Eine ungeregelte Befeuchtung erhöht vor allem den Heizenergieaufwand im Winter (aufgrund der latenten Kühlung der Luft), siehe Bild 75 und Bild 76.

In Anlagen, welche gleichzeitig Wärme und Kälte bereitstellen können, sind regelungstechnische Vorkehrungen zur gegenseitigen Verriegelung vorzusehen.

3.11 Kennwerte für Gebäudeautomation und Monitoring

Die Gebäudeautomation umfasst nach DIN 276 einerseits ein übergeordnetes Gebäudemanagementsystem (auch Gebäudeleittechnik GLT) sowie andererseits ein oder mehrere Anlagenautomationssysteme incl. Schaltschränken (für die zentralen Heizungs-, Lüftung-, Kühlungs-, Klimatisierungsanlagen) sowie die Raumautomationssysteme (für Beleuchtungs-, Sonnenschutz- und Raumklimaregelung).

Aufgaben der Gebäudeautomation sind die gewerkeübergreifende Überwachung, Steuerung, Regelung und Optimierung von Gebäuden bzw. Anlagen in Gebäuden. Auch die Verbrauchsüberwachung fällt darunter. Dennoch

Anpassung des Anlagenbetriebs an die Nutzung

Für die technischen Anlagen eines Gebäudes können mit Hilfe der GLT zur Nutzung passende Betriebszeiten vorgesehen werden. Im optimalen Fall werden auch Ferien, Urlaub und Feiertage berücksichtigt. Eine weitere Option sind optimierte (Belegung, thermische Trägheit o. ä.) anstelle fester Ein- und Ausschaltzeiten.

Mit Hilfe der GLT können Sollwerte in den Räumen zentral verwaltet, vorgegeben und geändert werden. Ein Beispiel sind an die Außentemperatur angepasste Sollwerte für die Raumtemperatur.

Außerdem kann mit GLT verhindert werden, dass gleichzeitig geheizt und gekühlt wird, bei offenen Fenstern gekühlt (oder geheizt) wird, bei deaktivierter Verschattung gekühlt wird. Weitere Maßnahmen zur Anlagenverriegelung sind denkbar.

Einschränkungen hinsichtlich der Nutzeranforderungen (z. B. thermischer Komfort, Raumluftqualität), die im Zusammenhang mit der Anwendung der Gebäudeautomation stehen, sind nicht zulässig [13]. Daher sind Raumbelegungen zu erfassen und bei der Regelung und Steuerung zu berücksichtigen.

Zuordnung von Regelungsoptionen zu Automatisierungsgraden

Die Bilanzierung des energetischen Vorteils kann beispielsweise mit Hilfe der DIN V 18599 erfolgen. Dazu werden zwei Varianten angelegt und entsprechende Endergebnisse - üblicherweise die Endenergie – verglichen. Die Norm definiert vier Automatisierungsgrade, zwischen denen jeweils deutliche Ergebnisunterschiede sichtbar werden, siehe Tabelle 132.

Gewerk	Automatisierungsgrad			
	D	C	B	A
Heizung, Kühlung	keine Regelung der Raumtemperatur, konstante Vorlauftemperatur, keine Verriegelung von Heizen und Kühlen	Thermostatventile oder lokale elektronische Regler ohne Kommunikation, witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung ohne Raumtemperaturaufschaltung, Zeitprogramme mit festen Schaltpunkten, keine Verriegelung von Heizen und Kühlen	Thermostatventile oder lokale elektronische Regler mit Zeitprogramm/ Vorlauftemperaturadaption, witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung mit Raumtemperaturaufschaltung, teilweise Verriegelung von Heizen und Kühlen	Bedarfsgeführte Einzelraumregelung mit Kommunikation und automatischer Präsenzerfassung, bedarfsgeführte Vorlauftemperaturregelung, Zeitprogramm mit optimierten Ein-/Ausschalten, Verriegelung von Heizen und Kühlen
Lüftung	Keine oder manuelle Regelung, Wärmerückgewinnung ohne Sommer-/ Winterumschaltung	Zentrale Vorregelung, Regelung nach Führungsraum, zeitabhängige Steuerung, Wärmerückgewinnung mit manueller Sommer-/ Winterumschaltung	Präsenzabhängige Steuerung, Zonenregelung, Wärmerückgewinnung mit witterungsgeführter Sommer-/Winterumschaltung	Bedarfsgeführte Einzelraumregelung (z. B. CO_2) mit Kommunikation, Wärmerückgewinnung mit witterungsgeführter Sommer-/Winterumschaltung und Monitoring
Beleuchtung, Sonnenschutz	Ein/Aus-Schalter manuell, ohne Präsenzmelder, manueller oder manuell gesteuerter motorischer Sonnen- bzw. Blendschutz	Ein/Aus-Schalter manuell und zusätzliches zentrales Ausschalt-Signal, automatisch betriebener Sonnen- bzw. Blendschutz (z. B. strahlungsabhängig)	automatisch betriebener Sonnen- bzw. Blendschutz mit Lamellennachführung	tageslichtabhängig gedimmtes System, Präsenzmelder
Pumpen	feste Drehzahl	Drehzahlstufen	Differenzdruckregelung	bedarfsgeführtes Pumpenmanagement mit Kommunikation

Tabelle 132 Zuordnung von Regelungsoptionen zu Automatisierungsgraden [13]

Hilfsenergieaufwand

Die Gebäudeautomation ist mit zusätzlichem Hilfsenergieaufwand verbunden, insbesondere wenn der höchste Automatisierungsgrad A erreicht werden soll. Das Gebäude muss mit Raumcontrollern (Bewegungsmelder, Fensterkontakt, Temperaturmessung, Luftgütemessung, Beleuchtungsstärkemessung o. ä.), dezentralen Automationsstationen sowie übergeordneten PC-Arbeitsplätzen ausgestattet werden. Tabelle 133 zeigt typische Stromaufwendungen für die Automation.

Gerät		Stromaufwand [kWh/a]
PC-Arbeitsplatz mit Drucker	ggf. kein Drucker erforderlich	100...240
Dezentrale Automationsstation	für je 50 Raumcontroller oder andere Ein- und Ausgänge	150...200
Raumcontroller, Datenpunkte	Mess-, Anzeige und Bediengerät	20...30

Tabelle 133 Typischer Stromaufwand der Automation im Automatisierungsgrad A [13]

Für ein größeres Bürogebäude mit 3000 m² Fläche ergibt sich folgende beispielhafte Kalkulation des gesamten Stromaufwandes der Automation:

- die Bürofläche beträgt ca. ⅔ der Gesamtfläche, also 2000 m²,
- es sind wenige Einzel-, überwiegend Doppel- und wenige größere Büros vorhanden, Annahme einer mittleren Bürogröße von 25 m² führt zu 80 Räumen der Hauptnutzung,
- jeder Raum erhält eine Temperaturmessung, einen Bewegungsmelder, eine Beleuchtungsstärkemessung, 2 Fensterkontakte, ein Anzeige- und Bediengerät, also 6 Datenpunkte,
- insgesamt ergeben sich in den Büros 480 Datenpunkte,
- für die anderen Flächen (Flure, WC o. ä.) werden weitere 50 Datenpunkte geschätzt,
- für die Technikzentralen der Heizung, Kälte und RLT je 50 Datenpunkte (Temperaturen, Drücke, Volumenströme, Schaltzustände etc.),
- insgesamt werden 14 dezentrale Automationsstationen sowie ein PC mit Drucker für die 680 Datenpunkte erforderlich,
- Gesamtstromaufwand: 680 · 25 kWh/a + 14 · 175 kWh/a + 1 · 150 kWh/a = 19600 kWh/a
- dies entspricht einem flächenbezogenen Energiekennwert von 6,5 kWh(m²a).

3.12 Kennwerte für gewerbliche, industrielle und landwirtschaftliche Prozesse

Die Verallgemeinerung der Energieflüsse von industriellen und landwirtschaftlichen Prozessen mit Ableitung von Energiekennwerten ist schwierig. Vor allem ist die Datenlage ähnlicher Objekte oder Prozesse – anders als z. B. bei Wohn- und Bürogebäuden – deutlich geringer. Dennoch gibt es Hilfen für die Erstellung von Energiekonzepten und Einschätzung von Einsparpotentialen. Nachfolgend eine kurze Zusammenstellung hilfreicher Datenquellen:

- Fraunhofer ISI mit Informationen zur Druckluft unter www.druckluft-effizient.de
- Bayerisches Landesamt für Umwelt unter https://www.lfu.bayern.de/ mit Informationen zu Bäckereien, Einzelhandel, Friseuren, Kfz-Werkstätten, Fleischereien, Mühlen, Druckereien, Gebäudereinigung und Metallhandwerk
- Energieagentur NRW unter http://www.energieagentur.nrw mit Branchenenergiekonzepten für die Textilindustrie, Krankenhäuser, Recycling- und Papierindustrie sowie Druckluft und Antriebe
- Wirtschaftskammer Österreich, www.wko.at mit Branchentipps und Best-Practice für energieeffiziente Betriebe (Bäcker, Fleischer, Friseure, Kfz-Betriebe und Tischlereien, Hotellerie, Metall- und Kunststoffverarbeitung, Textilreinigungen und Wäschereien, Mühlen Handel und Warenlager)
- Landwirtschaftskammer NRW unter www.landwirtschaftskammer.de mit Informationen zur Energieeffizienzverbesserung in der Landwirtschaft (Tierzucht, Lagerhallen)
- Bundesamt für Energie BFE der Schweiz unter http://www.bfe.admin.ch/ unter anderem mit Informationen zur rationellen Energieanwendung in der Landwirtschaft

Motoren und Antriebe

Für Förderprozesse sind Gesamteffizienzen aus der Motoreffizienz (einschließlich ggf. seiner Regelung), der Kraftübertragung (Getriebe) sowie ggf. vorhandener Ventilator- oder Pumpenwirkungsgrade zu bilden. Die derzeit geltende Klassifizierung der Wirkungsgrade für Antriebsmotoren zeigt Bild 77.

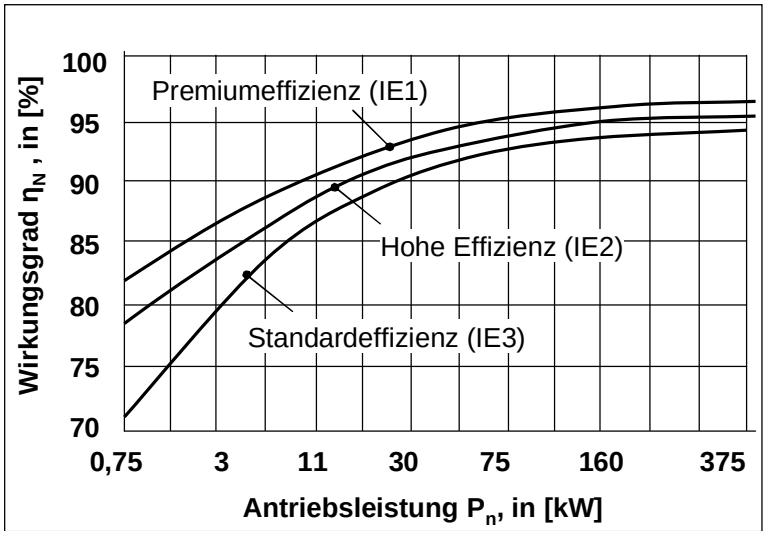


Bild 77 Wirkungsgrade für Antriebsmotoren [62]

Die Kraftübertragung im Getriebe variiert zwischen 87 … 93 % (Flach- … Keilriemen) und 97 … 98 % (Zahnriemen und Kettengetriebe).

Druckluft

Die Erzeugung und der Einsatz von Druckluft sind stark verlustbehaftet. Etwa 90 % des im Kompressor eingesetzten Stroms wird in Wärme umgewandelt, die restlichen 10 % stehen der eigentlichen Anwendung – z. B. dem Betrieb einer Werkzeugmaschine – zur Verfügung. Leckagen im System vermindern die Gesamteffizienz weiter. Tabelle 134 stellt Leckagevolumenströme zusammen sowie die daraus resultierenden mittleren Dauerleistungen für einen Druckluftkompressor (zur Kompensation der Leckage). Energiemengen ergeben sich durch Multiplikation mit der Betriebsdauer.

Betrieb bei	... bei 6 bar		... bei 7 bar	
Lochdurchmesser, in [mm]	Leckagevolumenstrom, in [l/s]	zusätzliche Kompressorleistung, in [kW]	Leckagevolumenstrom, in [l/s]	zusätzliche Kompressorleistung, in [kW]
1	1,2	0,3	1,8	0,48
3	11,1	3,0	16,4	4,4
5	31	8,3	45	12
10	124	33	178	48

Tabelle 134 Typische Kompressorleistung zur Kompensation von Druckluftleckagen [22]

Kühlmöbel im Einzelhandel

Im Einzelhandel sind Ausstattungen mit Kühlgeräte für die Energiebilanzierung von Bedeutung. Einerseits sind die Geräte selbst Kälte- und damit regulär Stromverbraucher, andererseits beeinflussen sie als interne Lasten die Heiz- und Kühlenergiebilanz. Tabelle 135 zeigt typische Energiekennwerte für Kühl- und Tiefkühlgeräte.

Gerät		Energieverbrauch (Kälte), in [kWh/a]
Tiefkühltruhe mit 1 m³ Nutzinhalt	mit Abdeckung	9.500
	ohne Abdeckung	7.600
Molkereiproduktteregal, 7,5 m Laufmeter	mit einfachem Luftschleier	37.500
	mit doppeltem Luftschleier	33.000
	mit Glastür	22.000

Tabelle 135 Typischer Energieverbrauch (Kälte) für Kühl- und Tiefkühlgeräte [21]

Energieverbrauch für das Kochen

Kennwerte lassen sich bilden, wenn der Energieeinsatz auf die Anzahl der warmen Gerichte bezogen wird, siehe Tabelle 136.

Küchentyp	Energieverbrauch (Strom) je warmes Essen, in [kWh/Essen]
Fast-Food-Restaurant	1,5
Altersheim	2,5
Krankenhaus, Restaurant	3,0
Gaststätte	4,5

Tabelle 136 Typischer Energieverbrauch für das Kochen [23]

Für den Wohnungsbau veröffentlicht die VDI 3807-5 [76] einen anteiligen Erdgasverbrauch (bei Ausstattung mit Gasherd) von:

- 600 ± 350 kWh/(a · Person) im Einpersonenhaushalt,
- 1200 ± 400 kWh/(a · Person) im Mehrpersonenhaushalt.

Energieverbrauch für Wäschereien

Der Energieverbrauch von dampfbetriebenen Wäschereigeräten hängt unter anderem vom benötigten Dampfdruckniveau ab. Wäschemangeln und Bügelmaschinen benötigen das höchste Druckniveau (9 … 13 bar), Waschmaschinen und Trockner kommen häufig mit Dampfdrücken im Bereich 1,5 … 6 bar aus.

In Gegenstrom- und Durchlaufwaschmaschinen laufen Waschgut und Wasserstrom einander entgegen, d.h. für jede Wäscheladung wird nur einmal Wasser erwärmt. Das Wasser wird zuerst als Spülwasser für die fertig gereinigte Wäsche genutzt, anschließend für die End- und dann die Vorwäsche. Die Maschinen haben entweder entsprechend mehrere Kammern, in denen entweder die Wäsche (das Wasser rotiert durch mehrere Kammern) oder das Wasser verbleibt (die Wäsche rotiert durch mehrere Kammern). Tabelle 137 zeigt den typischen Dampfverbrauch für alte Maschinen bzw. Gesamtprozesse.

Wäscheart	Dampfverbrauch je Trockenwäschemasse, in [kg/kg]	
	Gegenstromverfahren mit Schleuder	Durchlaufverfahren mit Quetsche
Bügelwäsche	1,3...1,7	
Mangelwäsche	1,4...1,9	
Trocknerwäsche	2,3...2,7	2,4...2,9

Tabelle 137 Dampfverbrauch für Wäschereien [74]

Die Österreichische Energieagentur veröffentlicht zusätzlich Zahlen für den thermischen und elektrischen Energieeinsatz [17] von Wäschereien – ebenfalls auf die Trockenwäschemasse bezogen – als Branchenmittelwert:

- Wärmeenergie: 2,69 kWh/kg,
- Strom: 0,28 kWh/kg.

Die Schweizerische Gesamtenergiestatistik erweitert die Datenlage um den Wasserverbrauch [17]: Sie liefert auch Detaildaten für Waschen, Trocknen, Mangeln und Finishen.

- Wärmeenergie: 3,0 kWh/kg,
- Strom: 0,4 kWh/kg,
- Wasserverbrauch: 25 l/kg.

Energieverbrauch für industrielle Prozesse

Für einzelne energieintensive Industrieanwendungen sind ebenfalls Kennwerte verfügbar, z. B. die Metall- und Kunststoffverarbeitung, siehe Internetlinks oben. Für die Altpapieraufbereitung liefert Tabelle 138 einen beispielhaften Überblick. Zur Erläuterung der einzelnen Fachbegriffe sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur verweisen.

Prozess	Wärmeenergie, in [kWh/t]	Elektrische Energie, in [kWh/t]
Auflösen	-	15...50
Sortieren	-	20...50
Reinigen	-	30...50
Eindicken	-	5...20
Druckfarbenentfernung	-	20...50
Dispergieren	100...300	100...200
Bleichen	0...100	30...50

Tabelle 138 Energieverbrauch bei der Altpapieraufbereitung je Altpapiergewicht [61]

Energieverbrauch in der Landwirtschaft

Der Energieverbrauch in der Landwirtschaft ergibt sich aus der Wärme- und Stromversorgung von Mastbetrieben, dem Kraftstoffverbrauch für die Bestellung von Acker- und Grünland, aber auch die Trocknung von Getreide sowie die Lagerung der landwirtschaftlichen Erzeugnisse. Tabelle 139 gibt einen Überblick über verschiedene typische Kennwerte.

Zweig bzw. Prozess		Bezugs-größe	Stromver-brauch, in [kWh/a]	Wärmever-brauch, in [kWh/a]	Dieselver-brauch
Tierproduktion	Sauenhaltung (mit Ferkeln)	je Sau	270	950	-
	Mastschweine	je Platz	35	50	-
	Milchviehhaltung	je Kuh	400	-	-
	Kälbermast	je Platz	100	400	-
	Hähnchenmast	je Tier	0,3	1,1	-
Ackerbau	Ackerland	je ha	-	-	100 l/a
	Grünland	je ha	-	-	80 l/a
Trocknung von Getreide (von 18 % auf 14 %)	Umlauftrocknung	je Tonne	-	-	8...10 l
	Durchlauftrocknung	je Tonne	-	-	6...8 l

Tabelle 139 Energiekennwerte für die Landwirtschaft [19]

4 Analyse und Bewertung

Energieverbraucher wie Gebäude, Maschinen usw. werden anhand von gemessenen Energiemengen (Verbrauch) und/oder berechneten Energiemengen (Bedarf) und den sich daraus ableitbaren Kennwerten analysiert und bewertet.

Eine solche Untersuchung kann ohne Bezug auf Referenzprojekte oder Kennzahlen aus der Literatur stattfinden. Beispielsweise kann der Gesamtverbrauch eines Gebäudes in Anteile aufgeteilt werden, die sich hinsichtlich des jeweiligen Einsparpotentials interpretieren lassen. Auch Liegenschaftsanalysen können so durchgeführt werden: mehrere Verbraucher einer Stichprobe werden untereinander verglichen, wobei für alle die gleiche Auswertemethodik gilt. Ähnliches gilt für Zeitreihen und daraus abgeleitete Indexvergleiche eines Verbrauchers, z. B. für den Energieverbrauch einer Anlage.

Allen diesen Untersuchungen gemein ist: es ergeben sich fast ausschließlich relative Vergleiche. Vorteilhaft hierbei ist: die Analyse- und Bewertungsregeln können prinzipiell frei gewählt werden, solange sie dem Zweck dienlich sind.

Die Alternative hierzu ist der Rückgriff auf veröffentlichte Vergleichskennwerte, Typologien und Stichproben. Das eigene Projekt kann im ganzen oder in Teilen mit anderen verglichen werden. Je größer der allgemeine Erfahrungsschatz, desto höher ist die Tendenz einer absoluten Einordnung. Üblicherweise ist der Erkenntnisgewinn einer solchen Analyse und Bewertung größer. Jedoch gelten nun Spielregeln für die Auswertung, die der Vergleichbarkeit halber beachtet werden müssen.

Aufbau des Abschnittes und Inhaltsüberblick

Der Abschnitt 4.1 beschreibt grundlegende Herangehensweisen, wie ein Energieverbraucher eingeschätzt werden kann: durch Vergleich der Gesamtenergiemenge mit der ähnlicher Objekte einer großen Stichprobe, Einordnung in Typologien, Zeitreihenvergleiche etc. Auch Teilenergiemengen, aber am besten Kennwerte sind für solche Vergleiche geeignet.

Das wichtigste Mittel zur energetischen Analyse und Bewertung einer Siedlung, eines Gebäudes, einer Anlage oder eines Gerätes ist dabei der Energieverbrauch. Abschnitt 4.2 erläutert die Erfassung, Witterungs- und Zeitkorrektur für Jahresverbrauchswerte.

Unterjährige Messwerte können den Erkenntnisgewinn über den Verbraucher erhöhen. Mit Wochen- oder Monatswerten lassen sich beispielsweise Charakteristika von Gebäuden und Wärmeerzeugern ableiten. Die Anwendung dieser Energieanalyse beschreibt Abschnitt 4.3. Für die Bewertung von Stromverbrauchern haben sich Lastganganalysen etabliert – siehe Abschnitt 4.4. Sie arbeiten mit einer noch sehr viel genaueren zeitlichen Auflösung im Bereich von Minuten und Sekunden.

Auch Energiebedarfsbilanzen sind Mittel der Analyse und Bewertung. Mit ihnen werden real ablaufende Prozesse nachgebildet. Dabei ist die Aussagekraft einer Energiebedarfsberechnung abhängig von zwei grundlegenden Einflussparametern: der Realitätsnähe des gewählten Modells und der Wahl geeigneter Randdaten bei der Berechnung. Abschnitt 4.6 erläutert den Ablauf üblicher Bilanzverfahren und gibt die wichtigsten Modelle wieder, mit denen Energieverbrauchsprozesse abgebildet werden.

4.1 Bewertungsmethoden

Einen Überblick über Möglichkeiten zur Einordnung der Energieeffizienz eines Verbrauchers oder Projektes zeigt Bild 78. Die möglichen Arten von Energiekennzahlen sind an den zusammenfassenden Forschungsprojektbericht von LÖFFLER [48] angelehnt, welcher als weiterführende Literatur empfohlen wird.

Einordnung der Energieeffizienz …	mit externem Vergleichsmaßstab	ohne externen Vergleichsmaßstab
absolute zahlen	… selten sinnvoll möglich	… nur sinnvoll mit eigener ausreichend großer Stichprobe
Beziehungs-zahlen	… über Typologien, Kennwertsammlungen, Literaturvergleiche sehr gut möglich	
Quoten, Anteile		… über Vergleich der Anteile untereinander
Indexzahlen, Zeitreihen	… ggf. Abgleich mit Indexreihen anderer Indikatoren	… über den erkennbaren Trend

Bild 78 Einordnung der Energieeffizienz nach Arten der Kennzahl und Vergleichsmaßstab

Externer Vergleichsmaßstab

Den externen Vergleichsmaßstab zur Bewertung von Energiemengen, -kosten und Emissionen liefert die Literatur in Form von Normen und Richtlinien, Projektberichten, Typologien und brancheninternen Datenbanken oder ähnlichen Quellen.

Sind für das zu bewertende Projekt absolute Verbräuche, Mengen oder Kosten (z. B. Endenergiemengen in kWh/a) vorhanden, lassen sich praktisch kaum Vergleichswerte finden. Dies setzt eine größere Menge dokumentierter Vergleichsprojekte ähnlicher Größe, Nutzung, Alters, Effizienzmerkmalen usw. voraus, die nur in seltenen Fällen verfügbar sind.

Ein Gegenbeispiel für einen komplexen Energieverbraucher sind Einfamilienhäuser. Hier findet man in der Literatur Angaben zum Absolutverbrauch: das typische Bestandsobjekt hat einen Verbrauch von 20.000 … 25.000 kWh/a.

Bei weniger komplexen Verbrauchern, z. B. Haushaltsgeräten wie Kühlschränken, ist die Datenlage absoluter Vergleichswerte besser. Abhängig vom Volumen und der Kühltemperatur ergeben sich 70 … 500 kWh/a. Wobei diese Vorhersage vor allem möglich ist, weil der Nutzereingriff bei diesem Gerät vergleichsweise klein ist.

Eine Kennzahlenbildung führt regulär zu besseren Vergleichswerten. Beispielsweise auf Basis von Beziehungszahlen, bei denen die Energiemenge, -kosten oder Emissionen ins Verhältnis zu einer Größe mit anderer physikalischer Einheit gesetzt werden (z. B. Energiekennwerte in kWh/m²a oder Emissionen in t CO_2 / Person, Energiekosten in €/Stück einer Produktion).

Auch Indexzahlen (einheitenlos, ein definierter Bezugswert) oder Zeitreihen einer Größe lassen sich mit Werten aus der Literatur vergleichen. Beispielsweise die indizierten Energiekosten einer untersuchten Liegenschaft mit dem deutschen Mittelwert.

Kein externer Vergleichsmaßstab

Fehlen externe Vergleichsmaßstäbe aus der Literatur, sind Einordnungen der Energieeffizienz möglich, aber schwieriger.

Hilfreich sind in diesem Zusammenhang Indexzahlen und Zeitreihen. Sie liefern Trendaussagen, die mit durchgeführten Änderungen am System (gewollte und ungewollte) in Beziehung gesetzt werden können. Es bedarf einer tiefen Fach- und Faktenkenntnis für die Interpretation solcher Daten, insbesondere bei komplexen Untersuchungen. Beispiel: es sollen die Energieverbräuche der letzten 5 Jahre für ein Hotel anhand einer Zeitreihe (monatlich) oder einer indizierten Zeitreihe (1. Monat = 100 %) interpretiert werden.

Es bedarf einer Kenntnis über Ausreißer bei der Belegung wegen Messetätigkeiten, Havarien, Betriebsferien, Witterungseinflüssen usw.

Aus den Werten komplexer Systeme lassen sich Anteile bilden, die in Relation untereinander eingeschätzt werden können. Beispielsweise kann bei der Untersuchung eines Produktionsbetriebes versucht werden, einen Gesamtstromverbrauch den Hauptabnehmern (Produktionsstrecke, Lüftung, Beleuchtung, Sanitärräume) zuzuordnen. Die Bedeutung der Anteile zeigt potentielle Angriffpunkte für die Verbesserung, sagt aber nichts über deren Einzeleffizienzen aus.

Absolute Verbräuche, Mengen oder Kosten, aber auch daraus ableitbare Beziehungszahlen liefern als Einzelwerte ohne jeglichen Maßstab keine Aussage. Sofern die Untersuchung selbst eine größere Stichprobe ergibt, können die Werte untereinander eingeordnet werden. Beispiel: eine Kommune betreibt über eigene Schulen 8 Kantinen und Mensen. In Ermangelung externer Vergleiche könnten auch die sich ergebenen 8 Kennwerte "Energiekosten je Essen" erste Aufschlüsse für Handlungsbedarf geben.

4.1.1 Stichproben

Das Anlegen eigener Stichprobenauswertungen empfiehlt sich bei der Energiekonzepterstellung, wenn mehrere ähnliche Verbraucher untersucht werden. Dies können die Gebäude einer Siedlung sein, aber auch die Lüftungsanlagen eines Krankenhauses oder die Kopierer einer Hochschule.

Insbesondere bei fehlenden Referenz- und Vergleichswerten aus der Literatur, Herstellerangaben usw. lassen sich mit Hilfe von Stichproben die Bestandsdaten systematisieren und filtern. Aber auch bei gegebenen Vergleichsmaßstäben kann diese Art der Auswertung sinnvoll sein.

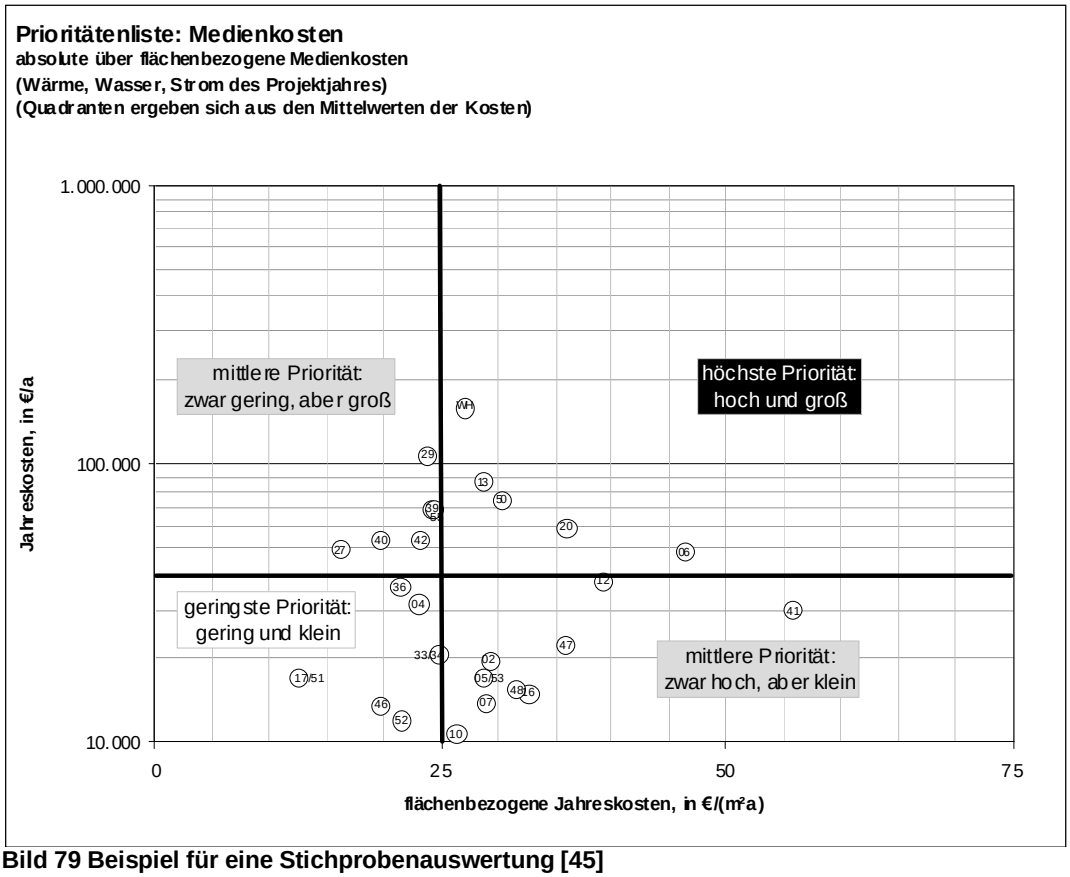


Bild 79 Beispiel für eine Stichprobenauswertung [45]

Eine Beispielauswertung zeigt Bild 79. Eingetragen sind Energiekosten für 42 Gebäude einer Liegenschaft, als absolute und flächenbezogene Kennwerte. Zumindest für die flächenbezogenen Werte hätte die Literatur übliche Werte liefen können. Diese Stichprobenauswertung führt zu einer Filterung von 5 aus 42 Objekten, die im Quadranten der höchsten Priorität liegen.

Die Objekte werden im Sinne des Betreibers als aussichtsreiche Kandidaten mit Detailenergiekonzepten näher untersucht. Es handelt sich einerseits um Gebäude mit einem hohen Energie- und Energiekostenkennwert, also voraussichtlich hohem Einsparpotential. Außerdem sind die Objekte flächenmäßig groß, so dass bei einer Sanierung große Sprünge nach unten (bei wenigen Baustellen in der Liegenschaft) erreicht werden können.

Der Vorteil von Stichprobenauswertungen sind die Freiheitsgrade hinsichtlich der Datenaufbereitung: im Beispiel erfolgte keine Witterungskorrektur der Wärmeverbrauchskennwerte. Diese wäre zum Vergleich mit externen Daten angebracht bzw. notwendig. Auch die Interpretation, hier durch Mittelwertbildung zur Unterteilung in Quadranten, ist sehr individuell möglich.

Solange für die Stichprobe insgesamt gleiche Spielregeln gelten (Art des Flächenbezugs, Heiz- oder Brennwertbezug, mit oder ohne Mehrwertsteuer, End- oder Primärenergie usw.) und die Stichprobe ausreichend groß ist, lassen sich schnell und einfach Prioritätenlisten erstellen.

4.1.2 Zeit- und Indexreihen

Im Zeitvergleich von Größen lassen sich einerseits Auswirkungen von zurückliegenden Veränderungen nachvollziehen und interpretieren. Andererseits sind Zeitreihen übliche Darstellungsarten für Änderungsprognosen im Rahmen der Energiekonzepterstellung. Es kann eine indizierte Darstellung der Größen erfolgen, wobei ein Bezugsjahr gewählt werden muss.

Zeitreihen

Als Zeitreihen werden in dieser Übersicht Auswertungen bezeichnet, bei denen einheitenbehaftete Größen über der Zeitachse aufgetragen werden. Bild 80 zeigt die beispielhafte Auftragung von Energiemengen (in kWh/a) über einen Zeitraum von 13 Jahren.

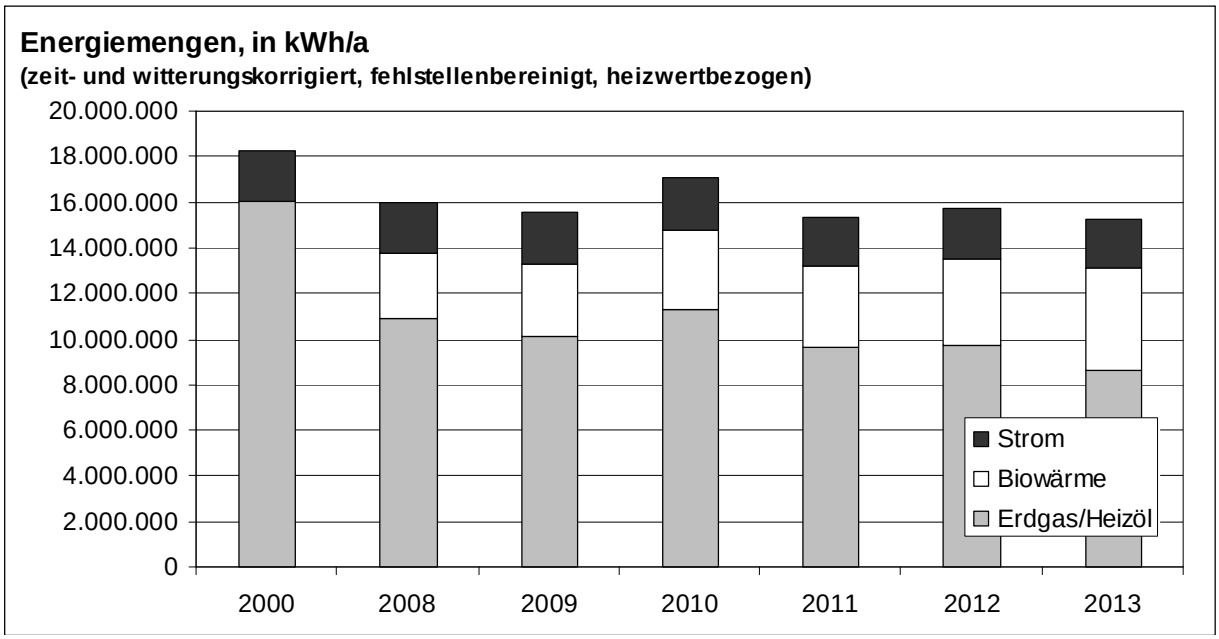


Bild 80 Zeitreihenauswertung für Energiemengen einer diakonischen Einrichtung [46]

Nachteilig – verglichen mit Indexreihen – ist, dass in dieser Art der Darstellung nur Größen gleicher Einheit eingetragen werden können. Vorteilig ist, dass auch Größen ausgewertet werden können, die nicht über den gesamten Zeitraum verfügbar sind, hier Biowärme. In der einheitenbezogenen Darstellung sind die Gewichtungen der Teilmengen untereinander sichtbar.

Die Zeitreihenauswertung kommt zur Visualisierung der Auswirkungen von Energiekonzepten zum Einsatz. Bild 81 zeigt beispielhaft die Entwicklung des Gesamtenergieverbrauches nach Sektoren, wie es das Leitszenario 2010 der Bundesregierung prognostizierte. Eine Markierung des Überganges von Realwerten zu Prognosewerten (hier durch einen räumlichen Abstand) ist empfehlenswert.

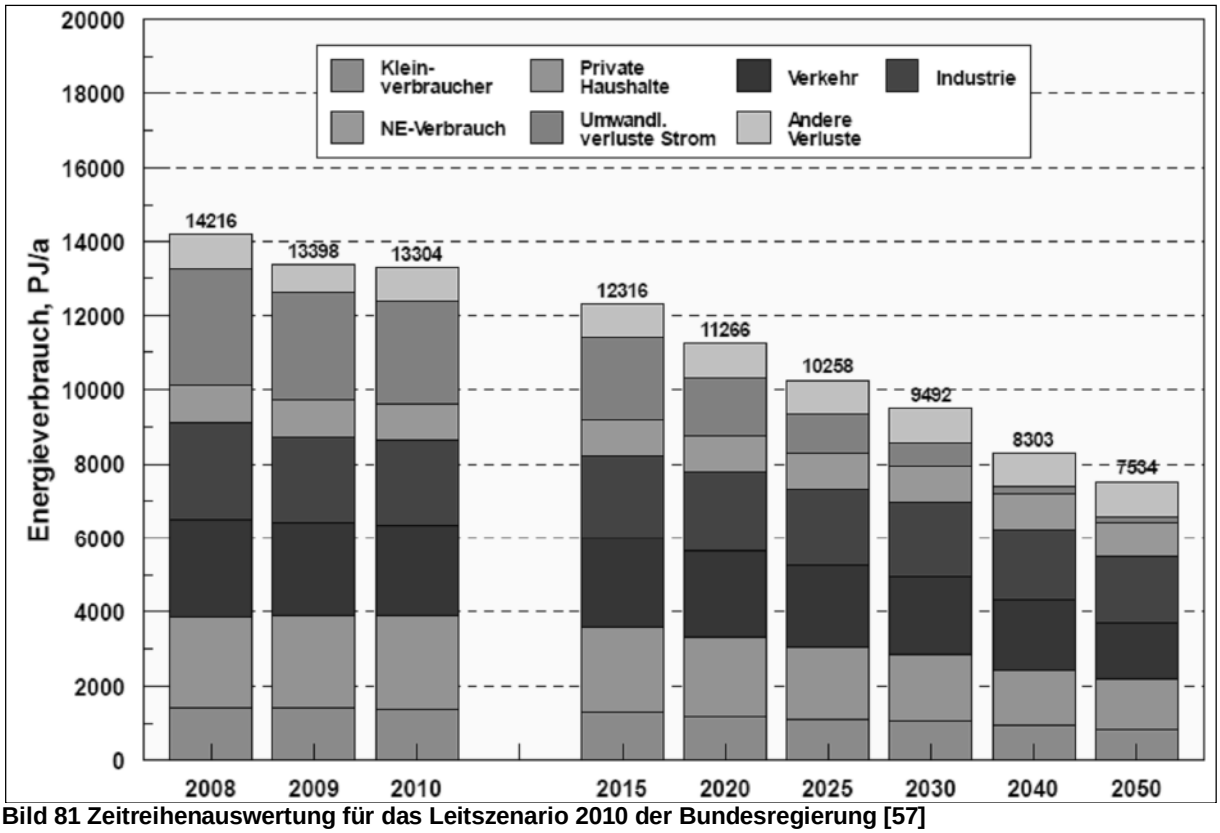


Bild 81 Zeitreihenauswertung für das Leitszenario 2010 der Bundesregierung [57]

Indexreihen

Werden die Größen im Zeitverlauf dargestellt und auf einen Bezugszeitpunkt normiert, so dass sie einheitenlos sind, spricht man von Indexreihen.

Grundsätzlich haben sie keine andere Aussage als einheitenbehaftete Zeitreihen, wenn sie entsprechend interpretiert werden. Vor allem die Wahl des Bezugszeitpunktes ergibt (subjektiv) andere Aussagen. Dies ist im Vergleich von Bild 82 zu Bild 83 zu beachten. Die Zahlenbasis für beide Bilder ist identisch mit der für Bild 80.

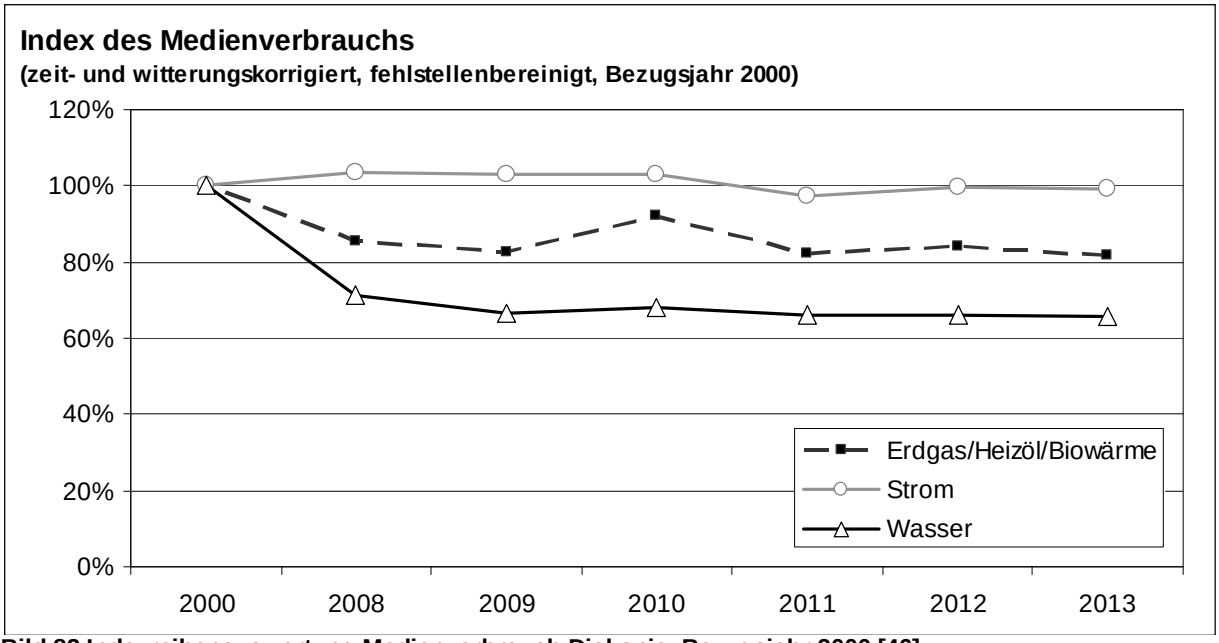


Bild 82 Indexreihenauswertung Medienverbrauch Diakonie, Bezugsjahr 2000 [46]

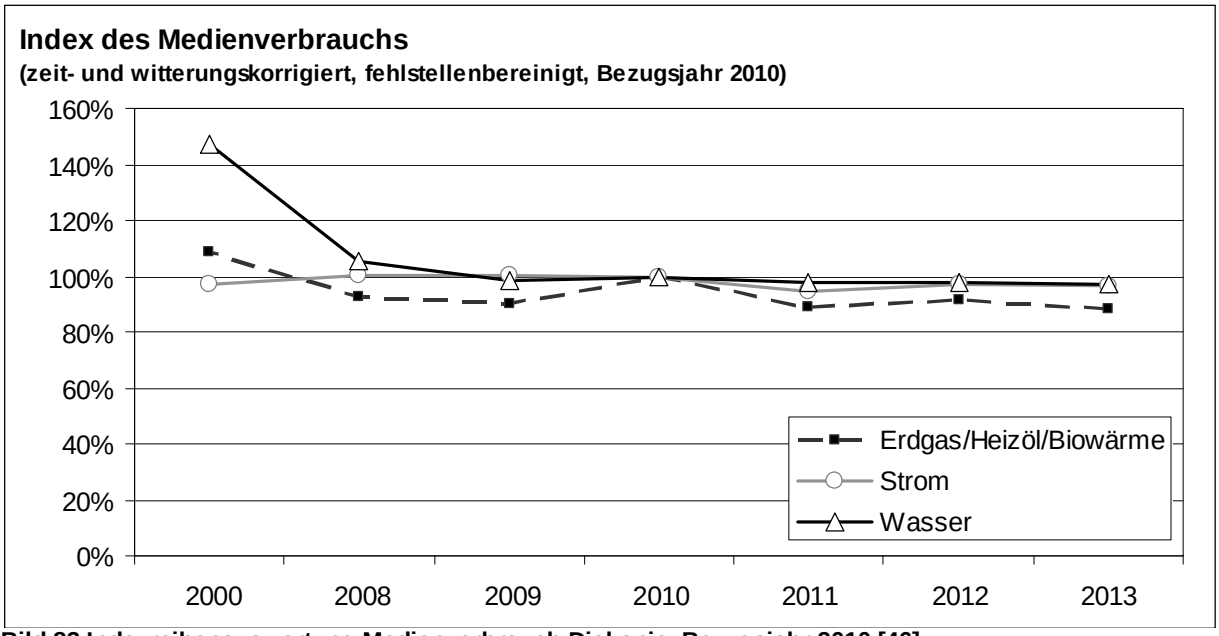


Bild 83 Indexreihenauswertung Medienverbrauch Diakonie, Bezugsjahr 2010 [46]

Zusätzlich lassen sich in der indizierten Darstellung auch Größen mit anderen Grundeinheiten (hier zusätzlich der Wasserverbrauch) vergleichend eintragen. Allerdings können Größen, die zum Bezugszeitpunkt noch nicht vorhanden waren (Biowärme in Bild 82) nicht dargestellt werden. In den Bildern wurde daher eine Summe gebildet.

Die quantitativen Unterschiede der Teilmengen (Wärme, Strom, Wasser) gehen in dieser Darstellung verloren.

Querauswertung mehrerer Größen und Trendbeobachtungen

Für die Auswertung von Messwerten können nachfolgende Erfahrungen verallgemeinert werden. Für eine Interpretation von Verbrauchstrends wird empfohlen, mindestens 2, besser 3 Messgrößen (beispielsweise Medienverbräuche: Wärme, Wasser, Strom) gegenüberzustellen – als Zeit- oder Indexreihen.

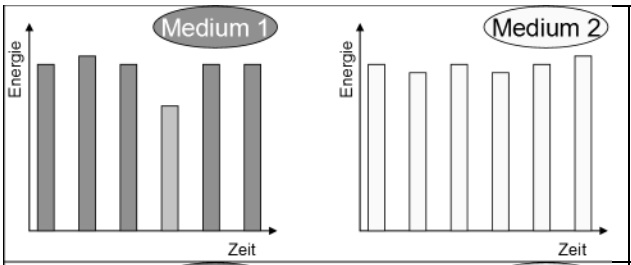
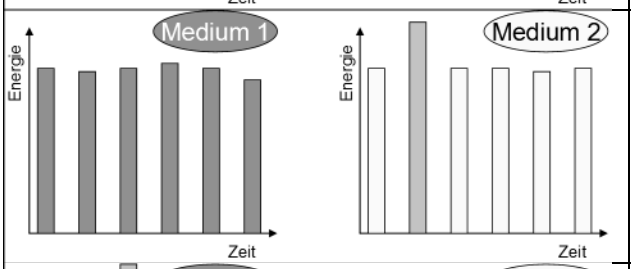
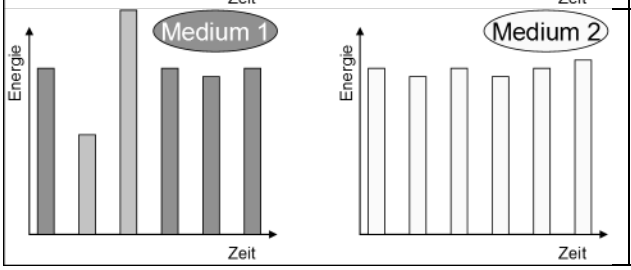
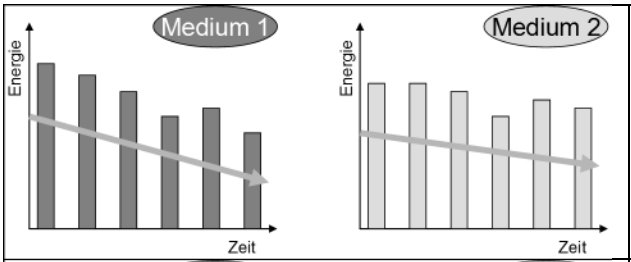
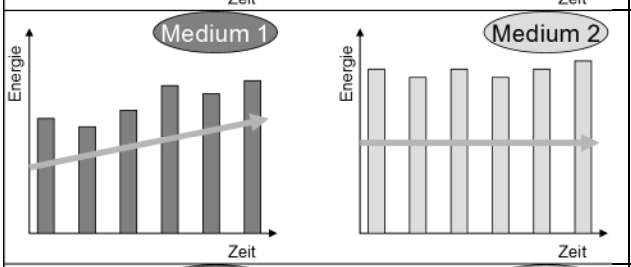
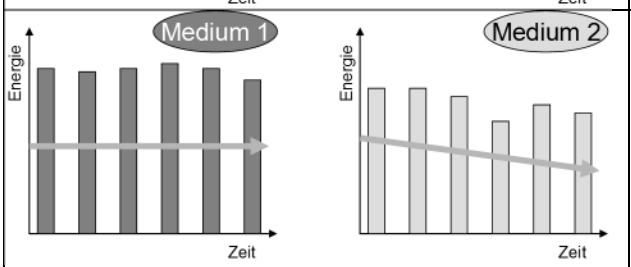
	Ausreißer: geringer Verbrauch. In einem Jahr ergibt sich ein nicht repräsentativer Wert aufgrund von Zählerdefekten o. ä. Er lässt sich weder im nächsten Jahr beobachten, noch in den anderen Medien und wird daher als Ausreißer eingestuft.
	Ausreißer: hoher Verbrauch. In einem Jahr ergibt sich ein nicht repräsentativer Wert aufgrund von Zählerdefekten o. ä. Er lässt sich weder im nächsten Jahr beobachten, noch in den anderen Medien. Gebäude mit diesem sprunghaften Anstieg des Verbrauchs werden im Folgejahr detailliert untersucht.
	Ablesefehler und Zahlendreher. Sofern bei einer Endablesung (Jahr, Monat) die Zahlenwerte falsch abgelesen werden, ergibt sich dieses Phänomen. Es gleicht sich im Folgejahr aus, sofern immer noch der gleiche Zähler verwendet wird, da dieser fortlaufend Daten erfasst.

Tabelle 140 Trendbeobachtung – Fehler und Ausreißer [46]

Bei der Interpretation von Langzeittrends ist es besonders wichtig, sowohl steigende als auch fallende Medienverbräuche zu beobachten und nachzuverfolgen, z. B. mit Befragungen oder Begehungen. Die Erkenntnisse zu positiven oder negativen Trends (Nutzerverhalten, Technikdefekten o. ä.) können in größeren Liegenschaften auf andere Verbraucher übertragen werden und dort vorbeugend eingesetzt werden.

	Permanenter Abfall aller Medien. Wenn alle Medien gleichermaßen fallen, kann regulär von einer Nutzungsextensivierung ausgegangen werden. Sie ist z. B. durch geringere Belegung oder Nutzerschulung begründet. Der umgekehrte Fall wäre analog. Alternativ hat hier tatsächlich eine sukzessive Verbesserung technischer Randdaten stattgefunden.
	Permanenter Anstieg eines Mediums. Wenn der Verbrauch nur eines Mediums steigt, ist dies unbedingt nachzuverfolgen. Eine allgemeine Nutzungsintensivierung wirkt sich regulär auf mehrere Medien gleichermaßen aus. Hier können technische Defekte oder Fehlbedienungen eine Ursache sein.
	Permanenter Abfall eines Mediums. Höchstwahrscheinlich gab es technische Änderungen, die sich nur auf ein Medium positiv auswirkten. Ist dies auszuschließen, ergibt sich Bedarf einer Nachverfolgung. Eine allgemeine Nutzungsextensivierung wirkt sich regulär auf mehrere Medien gleichermaßen aus. Hier können technische Defekte oder Fehlbedienungen eine Ursache sein, die das Abfallen des anderen Mediums verhindert.

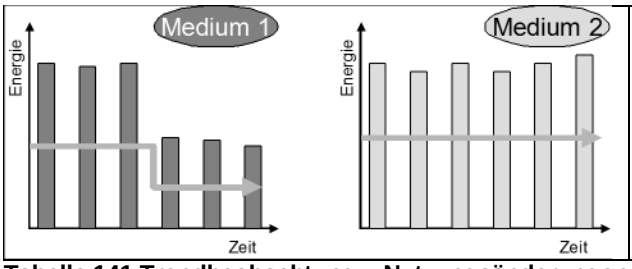
	Modernisierung. Diese ist regulär in einem einmaligen Verbrauchssprung der von der Modernisierung betroffenen Medien zu erkennen.

Tabelle 141 Trendbeobachtung – Nutzungsänderungen [46]

4.1.3 Energiekennwerte und Typologien

Das Optimum zur Interpretation von konkreten Projektdaten ist der Vergleich mit einer statistischen Erkenntnislage. Es werden regulär dimensionsbehaftete Kennwerte (z. B. flächenbezogene Energiemengen) oder dimensionslose Kennwerte (z. B. Nutzungsgrade oder Anteile) mit denen einer typischen Stichprobe verglichen.

Regulär basieren die Kenndaten des untersuchten bestehenden Projektes auf Verbrauchsauswertungen. Aber auch rein rechnerische Kennwerte für Neubauten lassen sich mit Hilfe von Kennwertsammlungen und Typologien vergleichen und einordnen. Viele Projekte sind Mischfälle, in denen Verbrauchswerte mit rechnerischen Mitteln zerlegt werden in Teilkennwerte, die dann interpretiert werden.

Der Vergleich von konkreten Projektdaten mit einer vorhandenen Typologie setzt voraus:

- dass bei Energiemengen geklärt ist,
    - ob die Größen heiz- oder brennwertbezogen angegeben werden (siehe Abschnitt 2.5),
    - ob Nutz-, End- oder Primärenergien angegeben werden und wie diese im konkreten Fall definiert sind (siehe Abschnitt 2.4),
    - ob eine Witterungskorrektur erforderlich ist, gemacht wurde und welches Bezugsklima und welcher Bezugsort gelten (siehe Abschnitt 4.2),
- dass bei Emissionen die Art und der Umfang der Vorkettenbewertung eindeutig ist (siehe Abschnitt 2.5),
- dass bei Energiekosten der Umgang mit Arbeits- und Leistungspreisen sowie die Frage der enthaltenen Mehrwertsteuer eindeutig ist (siehe Abschnitt 2.5),
- dass die Bezugsgröße eindeutig definiert ist (Fläche, Personenzahl usw., siehe Abschnitt 4.7),
- dass die Stichprobe Daten enthält, die grundsätzlich einen Vergleich zulassen (ähnliche Nutzung von Gebäuden, ähnlicher Typ von Maschinen usw.)

Änderung von Bau- und Technikstandards

Zur Interpretation von Typologien werden nachfolgende Tabellen vorausgeschickt. Sie zeigen wichtige Änderungszeitpunkte, die für die Dateninterpretation relevant sein können. Für Energiekonzepte im industriellen Bereich sind den Autoren solche Zusammenstellungen nicht bekannt.

Die Angaben von Zeitpunkten für die Einführung von technischen Produkten in den Massenmarkt (Tabelle 143) sind als Anhaltswerte zu verstehen! Insbesondere bei technischen Lösungen sind oft mehrere Jahre bis zu einer erkennbaren Marktdurchdringung festzustellen.

Auch ordnungsrechtliche Änderungen (Tabelle 142) – z. B. das Inkrafttreten von Wärmeschutzverordnungen – wirken frühestens nach ein bis zwei Jahren im Markt, wegen des Abstandes zwischen Bauantrag und Baufertigstellung.

Jahr	Grund
1918	Nachkriegswiederaufbau, Bauordnung von 1918
1946	Nachkriegswiederaufbau
1952	Mindestwärmeschutz DIN 4108 (in der BRD)
1958	Mindestwärmeschutz DIN 4108 (in der BRD)
1965	TGL 10686/3 (in der ehemaligen DDR)
1968	Mindestwärmeschutz DIN 4108 (in der BRD)
1979	1. Wärmeschutzverordnung (in der BRD)
1981	TGL 35424/03 (in der ehemaligen DDR)
1984	Novellierung Wärmeschutzverordnung (in der BRD)
1995	Novellierung Wärmeschutzverordnung
2002	1. Energieeinsparverordnung
2009	Novellierung Energieeinsparverordnung
2016	Novellierung Energieeinsparverordnung

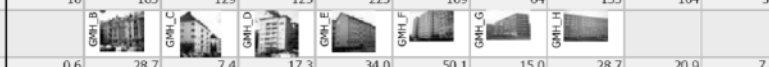
Tabelle 142 Geschichtlich und verordnungsrechtlich bedingte Änderungen des Baustandards

Wobei auch immer in kleinerer Anzahl Projekte das gerade gesetzlich geltende Niveau unterschreiten. Regulär ausgelöst durch Fördermittel. Beispielsweise wurden 2012 mehr als die Hälfte aller Wohnungen in Neubauten über die KfW gefördert (Quelle: KfW). Drei Viertel dieser Gebäude waren mindestens 30 % besser als der geltende gesetzliche Standard der EnEV, die anderen noch besser. Trotz der bekannten Differenzen zwischen Planung und Betrieb kann davon ausgegangen werden, dass damit zumindest in Teilen eine Verwischung der energetischen Standards zwischen den Baualtersklassen einhergeht.

Jahr	Änderung im Massenmarkt
ca. 1980	Niedertemperaturkessel
ca. 1980	Kompaktleuchtstofflampen
ca. 1980	1. Generation Wärmepumpen (nach der Ölkrise)
ca. 1985	Solarthermie
ca. 1990	Gas-Brennwerttechnik
ca.1995	Öl-Brennwerttechnik
ca.1995	Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (im Wohnbau)
ca.1995	Zweischeibenwärmeschutzverglasung
ca.1995	Wärmedämmung von Rohrleitungen im unbeheizten Bereich mit ca. 100 %
ca. 2000	Photovoltaik
ca. 2002	2. Generation Wärmepumpen (zusammen mit der EnEV)
ca. 2002	Holzpelletkessel (zusammen mit der EnEV)
ca. 2005	Hocheffizienzpumpen
ca. 2005	Mikro-KWK
ca. 2010	LED-Technologie
ca. 2010	Dreischeibenwärmeschutzverglasung

Tabelle 143 Geschichtlich und verordnungsrechtlich bedingte Änderungen des Technikstandards

Bei der Typologisierung von Gebäuden, z. B. durch das Institut Wohnen und Umwelt in Darmstadt wird auf die sich ergebenden Baualtersklassen Rücksicht genommen, siehe Bild 84.

Auswertung der Gebäude- und Wohnungszählung 2011	Baualtersklassen										Summe	Anteil
	bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2009		
Stichtag: 9.5.2011	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
Deutscher Wohngebäudebestand Baujahre bis 2009												
EFH												
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	330	966	1.131	859	1.509	1.507	704	1.160	1.035	775	**9.976**	*55%*
Anzahl Wohnungen in Tsd.	399	1.213	1.389	1.060	1.948	1.915	881	1.397	1.204	858	**12.263**	*31%*
Wohnfläche in Mio. m²	46	135	150	116	218	233	110	178	158	119	**1.463**	*41%*
RH												
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	148	492	710	447	633	611	335	652	619	384	**5.030**	*28%*
Anzahl Wohnungen in Tsd.	181	617	840	546	749	685	374	722	674	409	**5.796**	*15%*
Wohnfläche in Mio. m²	19	62	82	52	76	79	45	85	80	52	**633**	*18%*
MFH												
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	54	442	388	356	586	412	146	309	244	85	**3.023**	*17%*
Anzahl Wohnungen in Tsd.	214	2.177	1.911	2.003	3.348	2.313	852	1.826	1.390	461	**16.495**	*42%*
Wohnfläche in Mio. m²	16	163	129	125	225	169	64	133	104	39	**1.168**	*33%*
GMH												
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	0,6	28,7	7,4	17,3	34,0	50,1	15,0	28,7	20,9	7,6	**210**	*1%*
Anzahl Wohnungen in Tsd.	11	526	126	308	818	1.366	356	605	408	151	**4.674**	*12%*
Wohnfläche in Mio. m²	0,7	35,8	7,9	17,0	47,1	86,7	21,9	34,8	25,5	10,4	**288**	*8%*
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	**533**	**1.929**	**2.236**	**1.679**	**2.762**	**2.580**	**1.200**	**2.150**	**1.919**	**1.251**	**18.239**	
Anteil	*3%*	*11%*	*12%*	*9%*	*15%*	*14%*	*7%*	*12%*	*11%*	*7%*		
Anzahl Wohnungen in Tsd.	**806**	**4.533**	**4.265**	**3.915**	**6.863**	**6.279**	**2.463**	**4.550**	**3.675**	**1.880**	**39.228**	
Anteil	*2%*	*12%*	*11%*	*10%*	*17%*	*16%*	*6%*	*12%*	*9%*	*5%*		
Wohnfläche in Mio. m²	**82**	**396**	**370**	**309**	**567**	**569**	**240**	**431**	**368**	**220**	**3.552**	
Anteil	*2%*	*11%*	*10%*	*9%*	*16%*	*16%*	*7%*	*12%*	*10%*	*6%*		

Gewählte Zuordnung: EFH: freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser; RH: Ein-/Zweifamilienhäuser als Doppelhaushälfte,Reihenhaus oder sonstiger Gebäudetyp
MFH: Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen, GMH: Mehrfamilienhäuser ab 13 Wohnungen
Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf Wohngebäude (ohne Wohnheime, ohne "sonstige Gebäude mit Wohnraum", ohne "bewohnte Unterkünfte")

IWU

Bild 84 Typologisierung des Wohnbaubestandes nach IWU [49]

Energiekennwerte für den Wohnungsbau

Für Gebäude im Allgemeinen und den Wohnungsbau im speziellen gibt es eine sehr gute Datenbasis für Vergleichskennwerte und Typologien. Nachfolgende Tabellen geben einen Überblick über statistische Mittelwerte des Verbrauchs nach Energieträger, Art der Warmwasserbereitung und Baustandard.

Der typische mittlere Verbrauch eines Wohnbaus mit vollständig zentraler Versorgung durch einen Kessel liegt bei knapp 160 kWh/(m²a), wovon etwa 30 kWh/(m²a) auf die Trinkwarmwasserbereitung entfallen. Beide Werte sind auf den Heizwert und die Wohnfläche bezogen. Wenn ein Gebäude keine zentrale Warmwasserbereitung aufweist, ist sein Raumheizungsbedarf um etwa 16 kWh/(m²a) höher. Es gibt mehrere Gründe, unter anderem auch die fehlende Abwärme der Trinkwarmwasserzirkulationsleitungen, die in der genannten Größenordnung liegt.

Endenergie, in [kWh/(m²a)]	Gebäude mit dezentraler Warmwasserbereitung	Gebäude mit zentraler Warmwasserbereitung	
Energieträger	**Raumheizung**	**Raumheizung**	**Warmwasser**
Erdgas	142	127	32
Heizöl	140	129	28
Fernwärme	112	91	26
Werte witterungskorrigiert, heizwertbezogen, bezogen auf die Wohnfläche			

Tabelle 144 Energieverbrauch MFH nach Energieträger und Art der Warmwasserbereitung [72]

Endenergie, in [kWh/(m²a)]	Fernwärme		Gas/Öl	
Baustandard	**2 WE**	**>16 WE**	**2 WE**	**>16WE**
Altbau bis 1977 unsaniert	... 126	... 94	... 147	... 130
1977 – 1994	126...102	94...80	147...127	130...110
1995 - 2001	102...78	80...70	127...103	110...91
2002 - 2008	78...56	70...57	103...76	91...66
2009 und jünger	56 ...	57 ...	76 ...	66 ...
Werte witterungskorrigiert, heizwertbezogen, bezogen auf die Wohnfläche				

Tabelle 145 Heizenergieverbrauch MFH nach Gebäudegröße, Energieträger und Baustandard [72]

Hinsichtlich des Vergleiches von Energiekennwerten aus unterschiedlichen Datenquellen ist im Wohnungsbau zu beachten:

- die Mehrzahl der in der Literatur veröffentlichten Kennwerte sind heizwertbezogen angegeben, nur sehr selten gibt es brennwertbezogene Werte (bei Unklarheit der Datenlage: Heizwert annehmen),
- es existieren parallel nebeneinander wohnflächenbezogene Kennwerte (regulär von Abrechnungsunternehmen oder aus der Wohnungswirtschaft veröffentlicht) und gebäudenutzflächenbezogene Werte (regulär im Zusammenhang mit der EnEV veröffentlicht, z. B. von der Deutschen Energieagentur und in Studien der Ministerien),
- es sind verbrauchs- und bedarfsbezogene Kennwerte (weitere Erläuterungen siehe Kapitel 2.3) veröffentlicht, wobei in Studien zu künftigen Entwicklungsszenarien, den Begleitstudien zur EnEV, der Mehrzahl von Forschungsvorhaben zum Thema Energieeinsparung eher der Bedarf dominiert.

Einen statistischen Zusammenhang zwischen Energiebedarf (rechnerische Bilanz) und Energieverbrauch (gemessene Werte) zeigt nachfolgendes Bild 85. Da für beide Achsen der gleiche Flächenbezug sowie Heizwertbezug gilt, macht das Bild die Fehleinschätzung von Gebäuden mit schlechtem Dämmstandard deutlich.

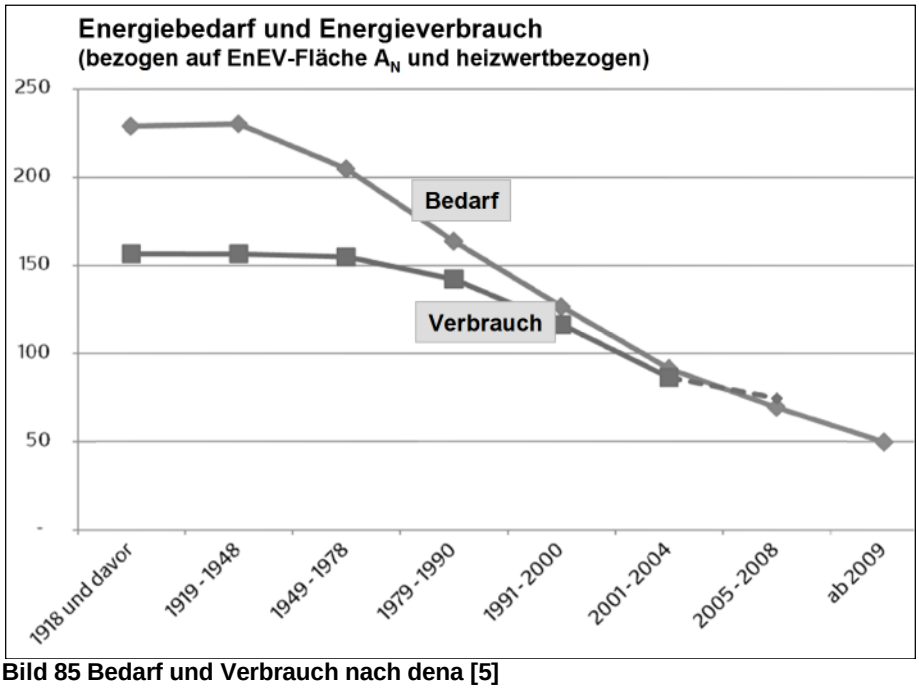


Bild 85 Bedarf und Verbrauch nach dena [5]

Die Tatsache, dass der typische Verbrauch des Bestandes in Bild 85 geringer ist als nach obigen Tabellen ist der Bezugsfläche geschuldet (A_N bzw. A_{Wohn}), siehe Abschnitt 4.7.

Energiekennwerte für den Nichtwohnungsbau

Einen Überblick über Gesamtenergiekennwerte für Wärme und Strom liefert Tabelle 146.

Endenergie, in [kWh/(m²a)] Gebäude/Nutzungsart	Anmerkung	Wärme	Strom
Büro	nur beheizt	150	50
	temperiert und belüftet	160	120
	Vollklimaanlage	190	150
Gerichtsgebäude	≤ 3500 m²	125	25
	>3500 m²	100	35
Verwaltungsgebäude, normale technische Ausstattung	≤ 3500 m²	115	30
	>3500 m²	120	45
Verwaltungsgebäude, mit höhere technischer Ausstattung		120	60
Polizeidienstgebäude		125	40
Rechenzentren		125	220
Hörsaalgebäude		115	55
Institutsgebäude für Lehre und Forschung		150	95
Institutsgebäude für Forschung und Untersuchung		190	90
Fachhochschulen		115	40
Krankenhäuser	bis 250 Betten	205	120
	251...1000 Betten	250	115
	über 1000 Betten	285	115
Freiberufliches Gesundheitswesen und Praxen		285	50
Allgemeinbildende Schulen	≤ 3500 m²	150	15
	>3500 m²	125	15
Berufsbildende Schulen		115	25
Kindertagesstätten		160	15
Weiterbildungseinrichtungen		130	30
Gemeinschaftsunterkünfte, Betreuungseinrichtungen, Verpflegungseinrichtungen, Beherbergungsstätten		150	30
Gebäude für Produktion, Werkstätten, Lagergebäude	≤ 3500 m²	160	30
	>3500 m²	160	90
Gebäude für öffentliche Bereitschaftsdienste		145	25
Gebäude für kulturelle und musische Zwecke		90	30
Ausstellung		110	60
Bibliothek		80	55
Veranstaltungsgebäude		155	60
Gemeinschaftshäuser		195	45
Justizvollzugsanstalten		260	60
Hotel	ohne Stern, Pensionen, Gasthäuser	215	70
	1 ...2 Sterne	120	75
	3 Sterne	135	85
	4...5 Sterne	150	95
Jugendherberge, Gästehäuser, Ferien-, Schulland-, Vereinsheime		125	25
Gaststätten	Ausschankwirtschaft	340	100
	Restaurant	290	135
Kantine/Mensa		170	105
Kino		80	115
Opernhaus, Theater, Stadthalle		155	60
Sporthalle		170	50
Mehrzweckhalle		345	55
Schwimmhalle, Hallenbad		550	150
Sportheim, Vereinsheim		115	25
Fitnessstudio		140	170
Handel Non-Food	≤ 300 m²	195	65
	>300 m²	105	85
Handel Food	≤ 300 m²	180	105
	>300 m²	135	375
Kaufhäuser, Warenhäuser, Einkaufszentren		100	120
Geschlossene Lagerhäuser, Speditionen		45	50
Kosmetik/Friseur		220	90
Werte witterungskorrigiert, heizwertbezogen, bezogen auf die Nettogrundfläche			

Tabelle 146 Energieverbrauchskennwerte im Nichtwohnungsbau [2]

Die Datenlage im Nichtwohnungsbau ist insgesamt deutlich schlechter als im Wohnungsbau. Folgendes ist festzustellen:

- sehr gute Datenlage: öffentliche Verwaltung, Schulen und Kindergärten, Rathäuser und Gerichte,
- gute Datenlage: Universitäten, Krankenhäuser, Sport- und Schwimmhallen, Polizei und Bereitschaftsdienste, Heime, Justizvollzugsanstalten, Museen und Bibliotheken, Opernhäuser und Theater
- mittlere Datenlage: private Büros, Banken, Hotels, Arztpraxen, Weiterbildungseinrichtung, Kantinen und Restaurants, Theater und Kinos, private Dienstleistungen
- schlechte Datenlage: Einzel- und Großhandel, Kirchen, private Gästehäuser, verarbeitendes Gewerbe, Tierhaltung und Pflanzenaufzucht
- sehr schlechte Datenlage: industrielle Produktionsgebäude, Werkstätten und Lagergebäude

Hinsichtlich des Vergleiches von Energiekennwerten aus unterschiedlichen Datenquellen ist im Nichtwohnungsbau zu beachten:

- die Mehrzahl der in der Literatur veröffentlichten Kennwerte sind heizwertbezogen angegeben, nur sehr selten gibt es brennwertbezogene Werte (bei Unklarheit der Datenlage: Heizwert annehmen),
- es existieren parallel nebeneinander unterschiedliche flächenbezogene Kennwerte; sehr weit verbreitet sind die Bruttogrundfläche (bei Interessensverbänden, Abrechnungsunternehmen oder Liegenschaftsmanagement) und die Nettogrundfläche (regulär im Zusammenhang mit der EnEV veröffentlicht, z. B. von der Deutschen Energieagentur und in Studien der Ministerien),
- es werden insgesamt deutlich häufiger verbrauchs- als bedarfsbezogene Kennwerte veröffentlicht.

Tabelle 147 gibt einen Überblick über Teilkennwerte für die Hauptenergieanwendungen (im Bereich Wärme). Die Zahlen stammen aus der VDI 3807-5. Aufgrund der sehr großen Streubreiten der Zahlenwerte sind die Werte nur als grobe Einschätzungen anzusehen.

Energiekennwerte, in [kWh/(m²a)] / **Gebäudegruppe**	**Gesamtverbrauch**	**Brennstoffdirektnutzung**	**Erzeugerverlust**	**Nutzwärme Heizung (incl. Netzverluste im Gebäude)**	**Nutzwärme Trinkwarmwasser (incl. Netzverluste im Gebäude)**	**Nutzwärme für Prozesse**	**Erläuterung der Prozesse**
Schulen gesamt mit Schwimmbad	130		13	81	5	31	Schwimmbad
Schulen gesamt mit Turnhalle	96		10	81	5		
Kindertagesstätten	116		12	99	5		
Kindergärten	129		13	111	5		
Weiterbildungseinrichtungen	122		12		2		
Mehrzweckhallen	155		16		2		
Wohnheime	140		14	101	25		
Gemeinschaftsunterkünfte	185		19	126	40		
Betreuungseinrichtungen	126		13	78	35		
Verpflegungseinrichtungen	195	12	18	20	50	95	Zentralküche
Beherbergungseinrichtungen	129		13	91	25		
Ausstellungsgebäude	67		7	58	2		
Veranstaltungsgebäude	141		14	125	2		
Werte witterungskorrigiert, heizwertbezogen, bezogen auf die Bruttogrundfläche, Stand 2014							

Tabelle 147 Teilenergiekennwerte nach VDI 3807-5 [76]

Energiekennwerte für Geräte und Maschinen

Datenbanken zum Energieverbrauch von Produktionsmaschinen stehen nicht zur Verfügung. Für Kleingeräte (Unterhaltungssektor, Haushalt, Bürotechnik) gibt es im Internet mehrere Übersichten, z. B. unter www.buy-smart.info.

Hinweise zu Quelldaten und weiterer Recherche

Als Datenlieferanten für Energiekennwerte kommen bei einer Literaturrecherche in Frage:

- die Richtlinienreihe VDI 3807 [76], welche Gesamt- und Teilenergiekennwerte für Wärme, Wasser und Strom von Gebäuden bereitstellt
- die Regeln zur Datenerfassung von Verbrauchsdaten für Wohn- und Nichtwohnbauten mit typischen statistischen Mittelwerten [2]

- die Daten der Energieagentur Nordrhein-Westfalen (www.energieagentur.nrw.de) mit einer sehr guten Kennwertsammlung für die Industrie, das Handwerk und gewerbliche Energieverbraucher
- die Deutsche Energieagentur (www.dena.de), mit einem Schwerpunkt bei Wohnbauten, z. B. im dena Gebäudereport [5]
- die Daten der Österreichischen Energieagentur, die auch viele Daten und Fakten zur Privatwirtschaft und Energiekennwerten in Industrie und Gewerbe liefert (www.energyagency.at)

- die Internetseite des Institutes Wohnen und Umwelt (www.iwu.de) mit einem Schwerpunkt bei Daten und Typologien zu Wohngebäuden, jedoch zunehmend auch Nichtwohnbauten, z. B. im Forschungsprojekt TEK [38]
- die Internetseite der Gesellschaft für Energieplanung und Systemanalyse (www.ages-gmbh.de) mit Häufigkeitsverteilungen für Energiekennwerte im Wohn- und Nichtwohnbau, deren Abfrage teilweise kostenpflichtig ist
- die Internetseiten von CO2online, die beispielsweise einen bundesweiten Heizspiegel bieten (www.heizspiegel.de)

- die Daten von Messdienstleistern und Energieabrechnungsunternehmen, vor allem Techem mit seinen sehr detaillierten Daten zu wohnungswirtschaftlichen Fragen [72]
- die Daten der Bundesverbände einzelner Industrie- und Dienstleistungsbranchen, z. B. der DEHOGA mit Branchendaten (vielfach nur intern).

4.1.4 Steckbriefe

Für die Energiekonzepterstellung großer Liegenschaften ist es sinnvoll, Steckbriefe für alle Objekte anzulegen. Sie helfen, die notwendigen Ein- und Ausgangsdaten, wichtige Kennwerte übersichtlich und mit Wiedererkennungswert zu archivieren. Außerdem erleichtern sie den Quervergleich von Objekten. Wenn bestimmte Größen immer an derselben Stelle im Formularblatt stehen, lässt sich die übergreifende Auswertung gut automatisieren.

Auch für andere Energiekonzeptvarianten – jenseits der Gesamtgebäudebewertung – sind Kennwertsammlungen in Form von Steckbriefen denkbar: Sammlungen von Daten zu Geräten und Maschinen, Heiz- und Kältezentralen usw.

Wohnhaus II	53
auch:	Beamtenhaus II
Nutzung:	Wohnhaus für eine Wohngruppe im betreuten Wohnen
Baujahr(e)	1904
beheizte Fläche	531 m²
zugehörige Nebenflächen	unbeheizter Keller und Spitzboden
Nutzer	6
Gebäudegruppe:	**A - Gebäude mit Pflegenutzung**

VERBRAUCHSDATEN / GEBÄUDEKENNWERTE 2007/2008

Wärme	**103**	MWh/a	**194**	kWh/(m²a)	**17179**	kWh/(Person a)
Wasser	**603**	m³/a	**1,1**	m³/(m²a)	**275**	l/(Person d)
Strom	**13**	MWh/a	**24**	kWh/(m²a)	**2141**	kWh/(Person a)

Kennwerte aus der Energieanalyse:

flächenbezogene Steigun	2,2 W/(m²K)
Heizgrenze ϑ_{HG}	15 °C
flächenbezogene Grundla	7,6 W/m²

Gebäudekennnwerte:

Hüllfläche	1151 m²
Umbautes Volumen	1724 m³
Kompaktheit	0,67 m²/m³

BEWERTUNG DES GEBÄUDES

Langfristige Weiternutzung	**100**	% (subjektiv)	sicher	unsicher
Pflege/Arbeitsqualität	**80**	% (subjektiv)	hoch	niedrig
Wohn/Nutzungsqualität	**70**	% (subjektiv)	hoch	niedrig
Energ. Investitionsbedarf	**311**	€/m²	niedrig	hoch
Allgemeiner Zustand	**3**	Schulnote (subj.)	gut	schlecht
Energetischer Zustand	**4**	Schulnote (subj.)	gut	schlecht
Umsetzbarkeit v. Maßnahmer	**4**	Schulnote (subj.)	einfach	schwierig

Fazit kurzfristig Umsetzung der hochwertigen Modernisierung

WÄRMEKENNWERTE AUS DEN ENERGIEKONZEPTEN

		Endenergiekennwerte			Heizlast	Energetischer Investitionsbedarf		äquivalenter Energiepreis
	Empfehlung	MWh/a	kWh/(m²a)	Einsparg.	W/m²	1.000 €	€/m²	€/kWh
	Bestand	117,4	221		96			0,195
	Normalsanierg.	56,5	106	52%	47	131	247	0,174
x	Hochwert. San.	41,9	79	64%	34	165	311	0,176
	Passivsanierg.	29,0	55	75%	24	195	367	0,201

STROMKENNWERTE AUS DEN ENERGIEKONZEPTEN

		Endenergiekennwerte			Energetischer Investitionsbedarf		äquivalenter Energiepreis
	Empfehlung	MWh/a	kWh/(m²a)	Einsparg.	1.000 €	€/m²	€/kWh
	Bestand	12,6	24				0,219
	Beleucht.san.	12,5	24	0%	5,1	10	11,2
(x)	Kleinverbr.san.	8,4	16	33%	11,5	22	0,283

Bild 86 Beispielhafter Kennwertesteckbrief [45]

Der Kennwertesteckbrief aus Bild 86 entstammt einem Beratungsprojekt für eine große Diakonische Liegenschaft mit 50 Gebäuden. Für jedes Objekt wurden Flächen- und Nutzungsdaten, Verbrauchs- und Bedarfskennwerte, Ergebnisse einer Investitionskostenschätzung, aber auch Nutzerbefragungen (im Schulnotensystem) erfasst. Auf einen Blick ist somit die Arbeit mehrerer Wochen Untersuchungszeit im immer gleichen Layout archiviert.

Die weitere Vorgehensweise der Datenauswertung und Konzepterstellung wird in Abschnitt 8.4.6 erläutert.

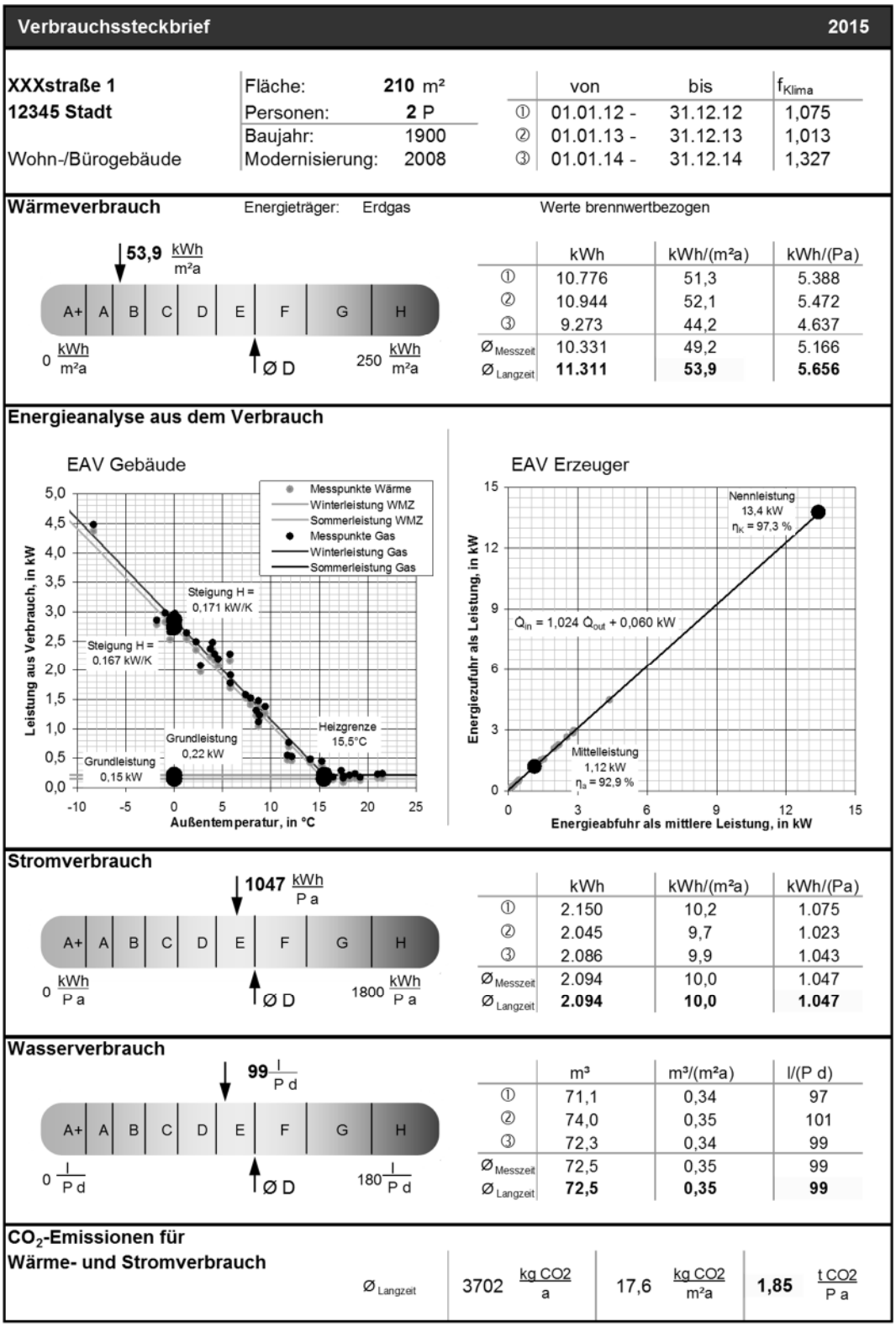


Bild 87 Beispielhafter Verbrauchssteckbrief

Der Verbrauchssteckbrief in Bild 87 ist eine Sammlung von Messwerten für ein Gebäude über den Zeitraum von 3 Jahren. Der Detailumfang ist dabei deutlich größer als im klassischen Energieausweis. Die unter Energieanalyse abgedruckten Grafiken und Kennwerte werden in Abschnitt 4.3 näher erläutert.

4.1.5 Klassifizierung mit dem Energieausweis

Der Bewertung von Gesamtenergiemengen dient seit 2007 auch der Energieausweis nach der Energieeinsparverordnung.

Wohnbau

Es ist im Wohnungsbau festgelegt:

- die Energiemengen sind auf die Fläche A_N, die sich aus dem umbauten Volumen des Gebäudes ableitet, bezogen,
- im Falle von Bedarfskennzahlen wurde bis einschließlich EnEV 2009 mit Klimadaten für einen mittleren Standort Deutschland (Werte näherungsweise Würzburg), seit der EnEV 2014 mit Klimadaten für Potsdam gerechnet; bei Verbrauchskennzahlen werden gleichermaßen diese Klimadaten für die Witterungskorrektur verwendet,
- in dem Zahlenstrahl werden die Primärenergie und die Endenergie (Summe aller Energieträger für Heizung, Warmwasser, Lüftung, ggf. Kühlung, incl. Hilfsenergien) eingetragen, wobei die Primärenergie beim Verbrauchsausweis erst seit der EnEV 2014 eine Bewertungsgröße ist,
- die Primärenergie des realen Objektes ist immer heizwertbezogen,
- die Endenergie des realen Objektes ist nach EnEV 2009 bzw. 2014 brennwertbezogen, sofern ein Bedarfsausweis nach DIN V 18599 erstellt wird, sonst heizwertbezogen.

Bild 88 zeigt die Vergleichskennzahlen, die in den verschiedenen EnEV-Ausgaben zur Interpretation des Ausweises dienen. Die Zahlenstrahlen sind den Ausweisvordrucken entnommen. Sie gelten für Bedarfs- und Verbrauchsausweise gleichermaßen, obwohl eine systematische Abweichung (vgl. Bild 85) bekannt ist.

Seit der EnEV 2014 ist der Zahlenstrahl insgesamt verkürzt auf einen Skalenendwert von 250 kWh/(m²a). Die Markierung "Durchschnitt Wohngebäude(bestand)" wurde von ca. 300 kWh/(m²a) im Jahr 2007, über 260 kWh/(m²a) in der EnEV 2009 auf nunmehr ca. 160 kWh/(m²a) herabgesetzt.

Es ist unklar, ob die Vergleichskennwerte für die End- oder die Primärenergie gelten sollen. Darüber hinaus, ob die Skalenteilung brennwert- oder heizwertbezogen ist.

Für die Interpretation von Endenergieverbrauchswerten dürfte die Skala 2014 die realistischsten Ergebnisse liefern. Für Bedarfswerte der Endenergie nach DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 passt die verbale Klassifizierung der EnEV 2009. Wurde nach DIN V 18599 gerechnet, ergeben sich Endenergien, die realistisch eher im Bereich der Skala von 2007 angesiedelt sind. Jeweils festzustellen ist: Endenergiekennwerte für Wärmepumpen fallen auf dem Raster, genauso wie Primärenergiekennwerte für Systeme mit Holzkesseln und Blockheizkraftwerken.

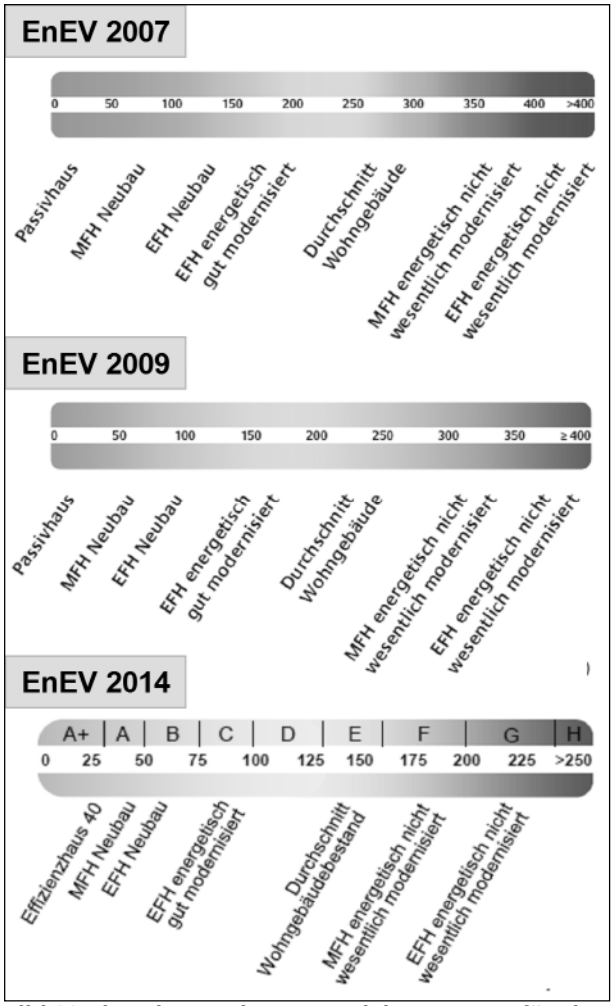


Bild 88 Einordnung eines Energiekennwertes für ein Wohngebäude nach EnEV [28][29][30]

Nichtwohnbau

Auch im Nichtwohnbau muss zur Interpretation von Daten in der Bewertungsskala Hintergrundwissen vorhanden sein. Im Falle der Bedarfsberechnung nach DIN V 18599 gilt:

- die Energiemengen sind auf die Nettogrundfläche A_{NGF} bezogen,
- bis einschließlich EnEV 2009 wurde mit Klimadaten für einen mittleren Standort Deutschland (Werte näherungsweise Würzburg), seit der EnEV 2014 mit Klimadaten für Potsdam gerechnet,
- in dem Zahlenstrahl wird die Primärenergie (für Heizung, Kühlung, Warmwasser, Raumlufttechnik, Beleuchtung, incl. Hilfsenergien) eingetragen und mit dem Kennwert für das Referenzgebäude der EnEV verglichen,
- die beiden Primärenergien sind heizwertbezogen.

Der Zahlenstrahl ergibt sich aus dem Bilanzergebnis des Referenzgebäudes. Der Skalenendwert liegt beim 4,2-fachen des Energiekennwertes des Referenz-Neubaus.

Für den Verbrauchsausweis gilt:

- die Energiemengen sind auf die Nettogrundfläche A_{NGF} bezogen,
- Referenzklimadaten für die Witterungskorrektur wie beim Bedarfsausweis,
- es gibt zwei Zahlenstrahlen: Wärme (ggf. incl. Warmwasser) und Strom (Gesamtstrom für alle Anwendungen),
- alle Werte sind heizwertbezogen.

Der Zahlenstrahl ergibt sich aus Vergleichskennwerten, die im Zusammenhang mit der EnEV veröffentlich werden. Der Skalenendwert liegt beim 2-fachen des Vergleichskennwertes, siehe Bild 89.

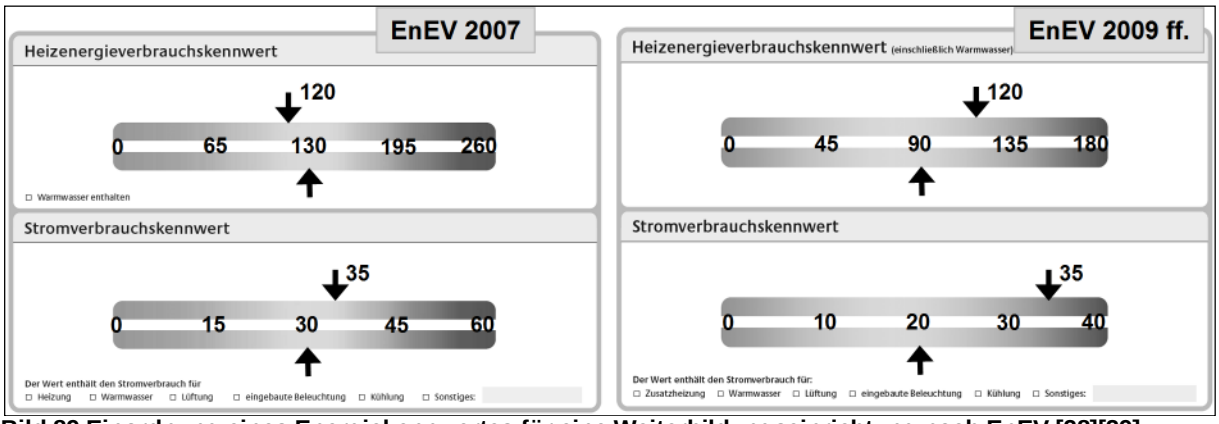


Bild 89 Einordnung eines Energiekennwertes für eine Weiterbildungseinrichtung nach EnEV [28][29]

Die Vergleichskennwerte der EnEV 2007 entsprechen in etwa statistischen Verbrauchskennwerten für die jeweilige Gebäudekategorie. Im statistischen Mittel muss demzufolge bei einer großen Stichprobe von Gebäuden der Markierungspfeil für das reale Gebäude in der Mitte der Zahlenstrahlen liegen.

Mit der EnEV 2009 wurden die Vergleichskennwerte auf 70 % des statistischen Mittels gekürzt und dann auf 5 kWh/(m²a) genau gerundet. Durch diese Skalenverschiebung liegt ein typisches Gebäude nunmehr immer rechts der Mitte, da die Skala nur ca. 1,4 Mal so lang ist wie das statistische Mittel. Dies muss bei der Interpretation beachtet werden!

4.2 Jahresverbrauchswerte

Auf Basis von Jahresverbrauchswerten lassen sich (grobe) Klassifizierungen und Einstufungen für Energieverbraucher vornehmen. Das betrifft Einzelverbraucher und Geräte, aber auch Gebäude bis hin zu komplexen Liegenschaften. Notwendig sind i. d. R. Vergleichskennwerte (siehe 4.1.3).

Wichtig ist auch eine gemeinsame Vergleichsbasis, d.h. es ist notwendig, denselben Bezug – meist Flächenbezug (siehe auch 2.2 und 4.7) – zu verwenden. Auch muss bei Brennstoffen die Basis des Vergleichs: Heiz- oder Brennwert identisch festgelegt sein. Zu guter letzt müssen bei einem Vergleich auch gleiche Zeiträume (meist Jahreswerte) und ähnliche Klimabedingungen (Standardklimata) gegeben sein.

Die dazu notwendige Zeit- und Witterungskorrektur wird nachfolgend erläutert. Es werden Hinweise zur Verbrauchserfassung und Zählerausstattung gegeben. Zur Vertiefung wird auf die VDI 3807 [76] verwiesen.

4.2.1 Verbrauchserfassung

Für jede Art von Verbrauchsdatenanalyse müssen zunächst die verbrauchten Mengen sinnvoll protokolliert und anschließend ggf. noch in Energiemengen umgerechnet werden.

Datenerfassung leitungsgebundener Energieträger

Die leitungsgebundenen Energieträger Gas, Strom und Fernwärme lassen sich einfach erfassen. Bei Strom und Fernwärme entfällt die zusätzliche Umrechnung in Energiemengen, sie werden vom Versorger bzw. mit entsprechenden Zählern als Energiemengen erfasst (bei Wärmemengenzählern durch Integration von Volumenstrom mal Temperaturdifferenz über die Zeit direkt im Rechenwerk des Zählers).

Es ist sinnvoll, bei diesen Energieträgern Abrechnungsbelege der letzten 1 bis 3 Jahre auszuwerten. Nach oben sind dem Datenzeitraum keine Grenzen gesetzt, sofern die in der Vergangenheit liegenden Messperioden den zu bilanzierenden Zustand repräsentieren.

Den Belegen werden die verbrauchten Mengen und die zugehörigen Messzeiträume entnommen.

Eine besondere Empfehlung gilt für das Auslesen von Wärmemengenzählern mit Speicherfunktion. Diese Modelle neueren Baujahres haben häufig ein Speicherwerk, das die Stichtagswerte (1. des Monats, 0:00 Uhr oder Monatsmittenwerte) speichert. Monatsdaten liefern weitere Erkenntnisse über die Verbraucher, siehe 4.3. Noch weitergehende Möglichkeiten bestehen beim Einsatz von kommunikationsfähigen Zählern (M-Bus, Funk), die damit in ein Energiemanagementsystem eingebunden werden können.

Datenerfassung nicht leitungsgebundener Energieträger

Bei den nicht leitungsgebundenen Energieträgern Öl, Kohle, Flüssiggas oder Holz ist die Erfassung der Mengen mit mehr Sorgfalt durchzuführen. Es empfiehlt sich, sofern vorhanden, in diesem Fall Einkaufsbelege der letzten mindestens 5 Jahre auszuwerten.

Werden Mengen nicht geregelt erfasst (selbst geschlagenes Holz o. ä.), müssen sie geschätzt werden. Im Falle von Holz durch Vermessen (Länge x Breite x Höhe) des Lagerraumes oder mit anderen Hilfsmitteln. Die – vor allem in Form von Holz – meist zusätzlich verbrauchten Mengen sollten keinesfalls bei der Verbrauchsanalyse unterschlagen werden.

Ansonsten ist bei der Erfassung der Mengen der Lagerbestand am Anfang und Ende der Messung zu achten. Sofern der Lagerbestand zum Anfang (A) und Ende (E) bekannt ist, z. B. bei jeweils voll getankten Öltanks, lässt sich eine Verbrauchsmenge (V) direkt erfassen. Sie ergibt sich aus:

- immer volle Lager nach dem Kauf: die hinzu gekaufte Menge (T) wurde im Zeitraum seit dem letzten Einkauf verbraucht (V = T),
- immer leere Lager vor dem Kauf: die hinzu gekaufte Menge (T) wird im Zeitraum bis zum nächsten Einkauf verbraucht (V = T).

Ist unbekannt, ob jeweils immer voll getankt oder die Lager immer geleert werden, sind die Lagerbestände zu berücksichtigen:

- die seit dem letzten Kauf verbrauchte Menge (V) ergibt sich aus der damals gekauften Menge (T) zzgl. des Anfangslagerbestandes damals (A) abzüglich des Endlagerbestandes heute (E).

Ist der Anfangslagerbestand unbekannt, kann er geschätzt werden. Er liegt zwischen null (leeres Lager) und der Differenz aus maximalem Speicherinhalt und der ersten bekannten Brennstofflieferung (maximal möglicher Zukauf). Es ergibt sich eine Ungenauigkeit, die bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden muss.

Alternativ erfolgt die Auftragung der Verbrauchsmengen kumuliert über der Zeit in einem Diagramm mit Bildung der Ausgleichsgeraden, siehe Bild 90. Der Verbrauch (V) innerhalb der Messzeit ergibt sich aus der Zeitdifferenz mal der Steigung.

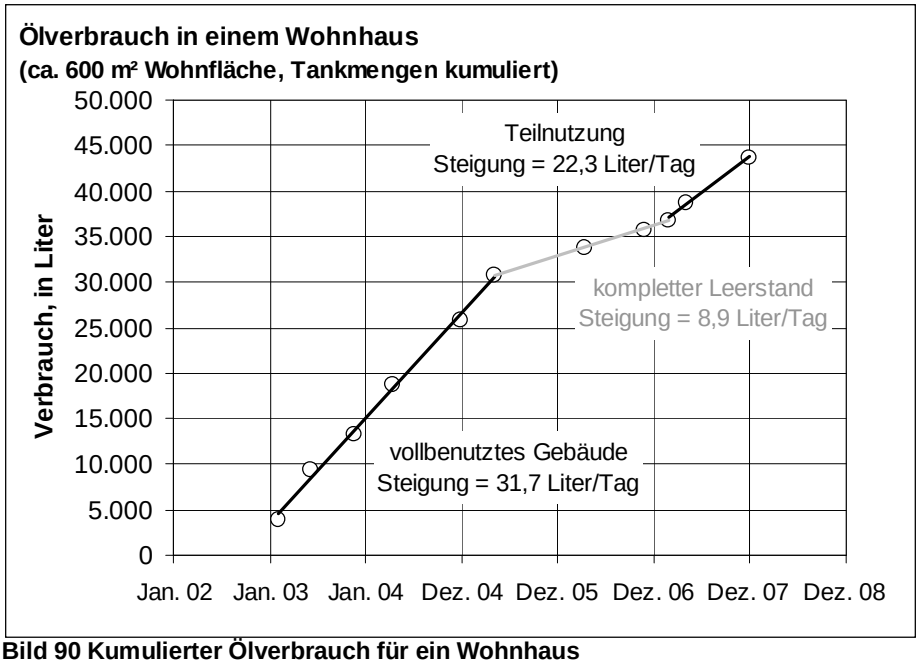


Bild 90 Kumulierter Ölverbrauch für ein Wohnhaus

Diese Art der Darstellung bietet die Chance, auch die Qualität der Messdaten zu überprüfen. Vorteil der kumulierten Darstellung ist, dass Unregelmäßigkeiten auffallen, sofern ausreichend Messpunkte gegeben sind:

- fehlen Rechnungsbelege, macht die Kurve einen Knick (flacher Verlauf), verläuft danach aber wieder in der typischen Steigung weiter.
- wurden Einsparmaßnahmen durchgeführt oder die Nutzung geändert, ändert sich die Steigung der Gerade.

Umrechnung in Energiemengen

Der Mengenerhebung folgt die Umrechnung in Energiemengen. Diese ist bei Strom und Fernwärme nicht erforderlich – hier werden Kilowattstunden abgerechnet. Bei allen anderen Energieträgern (Erdgas, Flüssiggas, Heizöl, Holz, Kohle) muss die verbrauchte Menge in eine Energiemenge umgerechnet werden – sofern dies nicht schon seitens des Versorgers erfolgt ist. Eine Tabelle mit Umrechnungsfaktoren ist in Abschnitt 2.5 gegeben.

Die Entscheidung, ob der Heiz- oder Brennwert als Umrechnungsgröße verwendet wird, ergibt sich aus den verfügbaren Vergleichswerten bzw. der weitere Datenverwendung.

Viele gängigen Energiebilanzverfahren (Handrechnungen und Softwareprogramme) rechnen bis heute mit Heizwerten, daher müssen gemessene Verbrauchswerte ebenfalls als Heizwerte vorliegen – wenn man am Ende beide vergleichen will.

Anordnung von Zählern und Empfehlungen zur Messtechnik

Um mehr als einen Gesamtkennwert je Untersuchungsobjekt zu erhalten, empfiehlt sich die in Bild 91 beispielhaft an einem Wohngebäude (mit Heizung und Trinkwassererwärmung) dargestellte Ausstattung mit Zählern. Sie wird grundsätzlich auch für andere Medien (Strom, Kälte) und Erzeuger empfohlen.

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

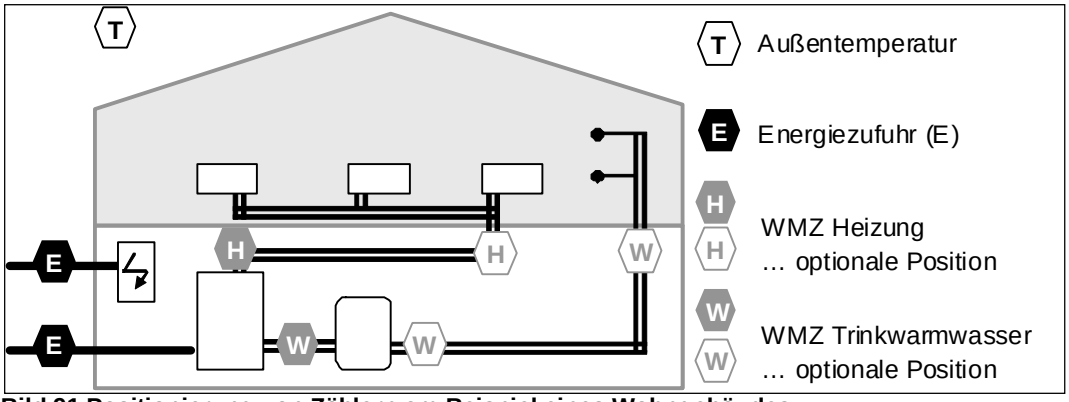


Bild 91 Positionierung von Zählern am Beispiel eines Wohngebäudes

Die Ausstattung der Erzeuger und Zentralen mit Zählern ermöglicht deren Einzelbewertung. Es wird empfohlen, bei jedem Erzeuger die zugeführte Energiemenge und die die gesamte erzeugte Nutzenergie (mit Wärmezählern) zu erfassen. Eine Ausnahme bildet die Solarthermie, bei der nur die produzierte Nutzenergie (mit Wärmezählern) gezählt wird, nicht jedoch die auf den Kollektor auftreffende Solarenergie.

Darüber hinaus sind relevante Unterverbraucher (Wärme und Kälte, statische und dynamische Verbraucher, witterungsabhängige und witterungsunabhängige Verbraucher) separat zu erfassen. Empfehlungen zur wünschenswerten Messwerterfassung sind in Tabelle 148 dargestellt.

	Energiezufuhr		Energieproduktion		Abgas-verluste	Betriebs-stunden	Starts
	aktiv per Energieträger	Umwelt	thermisch	elektrisch			
Erzeuger							
Kesselanlage	○ ■		■		○ ▲	○ ▲	○ ▲
BHKW	○ ■		■	● ■		● ▲	● ▲
Wärmepumpe	● ■		● ■			● ▲	● ▲
Solarthermieanlage		▲	■				
dezentrale Erzeuger	○ ▲		▲		○ ▲		
RLT-Anlage	○ ■					○ ▲	
Kältemaschine	○ ■		■			● ▲	● ▲
Verbraucher							
Heizwärme	■					▲	
Kälte	■					▲	
Warmwasser	○ ■					▲	
Prozessenergie	○ ■					▲	
Legende							
	● üblicher Messwert	○ teilweise verfügbarer Messwert		■ wünschenswerter Messwert		▲ falls möglich, Messwert erfassen	

Tabelle 148 Empfehlungen für die Messwerterfassung [76][eigene]

Sofern zwischen den Gebäuden einer Liegenschaft Wärmenetze (insbesondere im Erdreich) verlegt sind, wird empfohlen, neben der Wärmeabnahme auch die ab Zentrale eingespeiste Wärmemenge zu erfassen, um durch eine Bilanzierung die Verteilverluste des Netzes bestimmen zu können. Insbesondere für Liegenschaften mit geringen Nutzwärmeabnahmen (extensive Nutzung, modernisierte Gebäude, optimierte Prozesse) kann so einfach geprüft werden, ob die Aufrechterhaltung des Netzes überhaupt sinnvoll ist.

Ein witterungsabhängiger Verbraucher kann problemlos mit einem witterungsunabhängigen Verbraucher gemeinsam gezählt werden, z. B. ein Heizkreis und die Trinkwassererwärmung. Sofern ein Jahresprofil beispielsweise anhand von Monatswerten erfasst wird, lassen sich die Anteile nach dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen Verfahren trennen. Sind dagegen verschiedene Verbraucher gegenläufig von der Witterung abhängig, wie z. B. Heizung und Kälteerzeugung aus Wärme, sollten diese getrennt erfasst werden.

Nichtthermischer Brennstoffverbrauch

Wird ein Brennstoff nicht der Gebäudeenergieversorgung zugeführt, spricht man von "nichtthermischem Brennstoffverbrauch". Dieser ist beispielsweise in experimentellen Laboren vorzufinden. Auch im Wohnbau wird ggf. ein Teil des Erdgases als Kochgas umgesetzt. Der Anteil wird regulär nicht separat gemessen. Die Abschätzung dieser Menge beschreibt VDI 3807 [76] wie folgt:

- Kochgas 1-Personenhaushalt: 600 ± 350 kWh/(Person · a)
- Kochgas Mehr-Personenhaushalt: 1200 ± 400 kWh/(Person · a)

4.2.2 Witterungskorrektur

Um den Energieverbrauch eines Gebäudes mit dem Verbrauch anderer (ähnlich genutzter) Gebäude oder anderer Zeiträume zu vergleichen, ist (für die witterungsabhängigen Verbrauchsanteile) eine Witterungskorrektur erforderlich. Diese gleicht zum einen unterschiedliche Außentemperaturen, zum anderen unterschiedlich lange Messintervalle aus. Streng genommen handelt es sich also nicht nur um eine reine Witterungskorrektur, sondern um eine Zeit- und Witterungskorrektur. Das Nutzerverhalten wird nicht korrigiert.

Sofern Verbrauchswerte über sehr viele Jahre vorliegen, ergibt deren Auswertung auch ohne explizite Witterungskorrektur einen repräsentativen Langzeitwert.

Gradtagszahl und Heizgradtage

Zur Erläuterung der Thematik wird eine Unterscheidung von Gradtagszahlen und Heizgradtagen vorangestellt. Die Grafiken in Bild 92 dienen der Veranschaulichung.

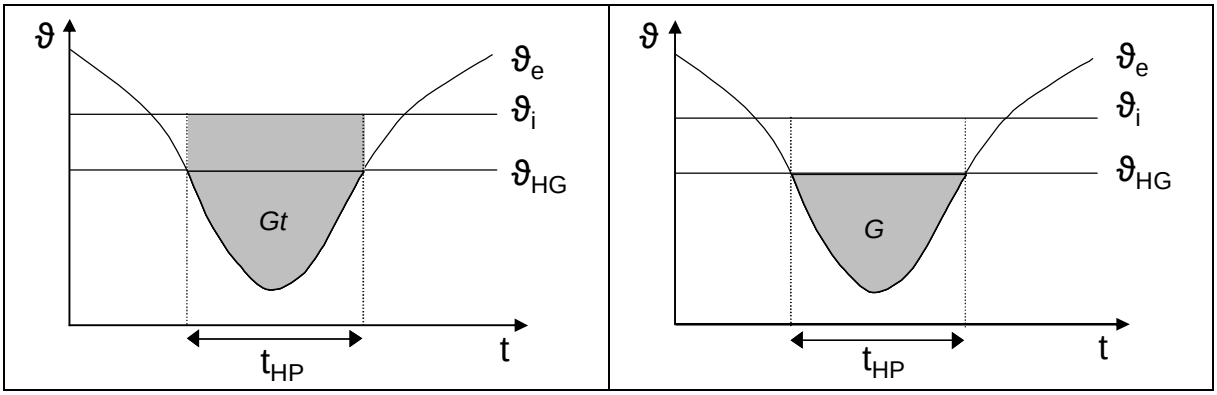


Bild 92 Schematische Darstellung von Gradtagszahlen und Heizgradtagen

Die Gradtagszahlen Gt sind das Flächenintegral zwischen der Innentemperatur ϑ_i und der Außentemperatur ϑ_a im Verlauf einer Heizperiode t_{HP}. Gradtagszahlen erhalten zur Kennzeichnung üblicherweise zwei Indizes: die Innentemperatur und die Heizgrenze, z. B. $Gt_{20,15}$.

$$\mathrm{Gt}_{\vartheta i,\vartheta \mathrm{HG}} = \int_{HP} (\vartheta_i - \vartheta_a)\, dt = \sum_{tHP} (\vartheta_i - \vartheta_a) = (\vartheta_i - \vartheta_{a,m}) \cdot t_{HP}$$

Heizgradtage G sind das Flächenintegral zwischen der Heizgrenztemperatur ϑ_{HG} und der Außentemperatur ϑ_a in einer Heizperiode t_{HP}. Die Heizgradtage G erhalten einen Index je nach Heizgrenztemperatur. Beträgt die Heizgrenztemperatur beispielsweise ϑ_{HG} = 15 °C, werden die Heizgradtage G_{15} genannt.

$$G_{\vartheta HG} = \int_{HP} (\vartheta_{HG} - \vartheta_a)\, dt = \sum_{tHP} (\vartheta_{HG} - \vartheta_a) = (\vartheta_{HG} - \vartheta_{a,m}) \cdot t_{HP}$$

Praktisch gebildet werden diese Werte nicht als Flächenintegrale, sondern als tageweise summierte Temperaturdifferenzen zwischen Innen- oder Heizgrenz- und Außentemperatur z. B. vom Deutschen Wetterdienst DWD.

Grundkorrekturgleichungen

Im Sinne der theoretischen Energiebilanzierung ist die Gradtagszahl proportional zu der Energiemenge, die ein Gebäude in der Heizzeit aufgrund von Wärmeverlusten für Transmission und Lüftung verliert. Diese Verluste werden gedeckt aus zwei Quellen: der aktiven Beheizung, z. B. mit Heizkörpern sowie aus Fremdwärmequellen (innere und solare Wärmeeinträge).

Den "Umschlagpunkt" zwischen einer Versorgung des Gebäudes ausschließlich über Fremdwärmequellen ("Gewinne") beschreibt die Heizgrenztemperatur. Liegt die Außentemperatur oberhalb der Heizgrenztemperatur werden die Verluste des Gebäudes allein von den Wärmegewinnen gedeckt. Liegt sie darunter, wird zusätzlich aktiv geheizt. Die Heizgradtage sind daher proportional zu der Energiemenge, die dem Gebäude als Nutzwärmemenge (von der Heizung z. B. über Heizkörper) zuzuführen ist.

Formal korrekt müsste demnach die Witterungskorrektur mit den Heizgradtagen erfolgen. In der Praxis werden jedoch beide Ansätze parallel nebeneinander benutzt.

Dies ist vor allem durch statistische Auswertungen begründet. Das "korrekte Verfahren" liefert für eine große Anzahl von Objekten bei zwei oder mehr aufeinander folgenden Jahren identische witterungskorrigierte Verbräuche. Je nach Studie, Witterung in den Messjahren und Umfang Stichprobe führt mal die Gradtagszahl- mal die Heizgradtagbereinigung zu einer besseren Übereinstimmung.

Der Anteil am Gesamtwärmeverbrauch eines Gebäudes, der von der Witterung abhängt, wird nachfolgend Q_H genannt. Es gibt folgende zwei Witterungskorrekturgleichungen:

$$Q_{\mathrm{H,bereinigt}} = Q_{\mathrm{H,mess}} \cdot \frac{Gt_{\mathrm{standard}}}{Gt_{\mathrm{mess}}}$$

$$Q_{\mathrm{H,bereinigt}} = Q_{\mathrm{H,mess}} \cdot \frac{G_{\mathrm{standard}}}{G_{\mathrm{mess}}}$$

Die Autoren neigen für die praktische Anwendung zur Verwendung der Heizgradtage. Im Rahmen der Energieausweiserstellung werden Gradtagszahlen eingesetzt. In jedem Fall werden im Zähler des Korrekturbruches meist 30-Jahres-Mittelwerte für das Klima eingesetzt, im Nenner die Werte für den Messzeitraum.

Die Ansätze der Witterungsbereinigung gleichen aus, dass im Untersuchungsjahr eine andere Außentemperatur und damit Heizzeitlänge aufgetreten ist. Abweichungen im Verbrauch, die auf diesen Unterschied – vgl. Bild 93 – zurückzuführen sind, werden korrigiert.

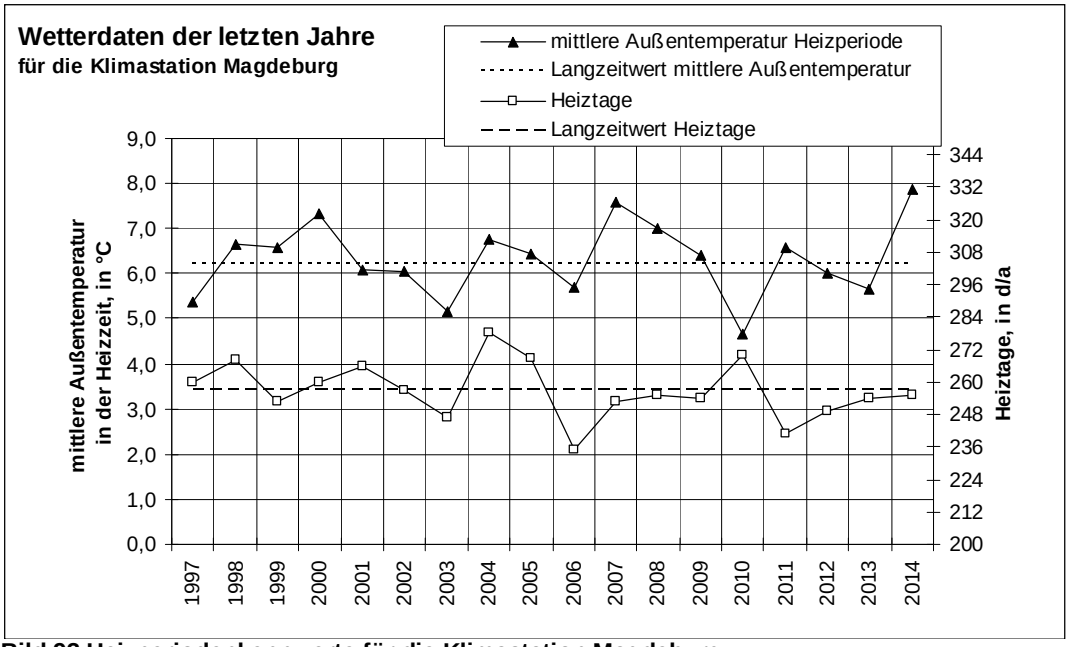


Bild 93 Heizperiodenkennwerte für die Klimastation Magdeburg

Ein verändertes Lüftungsverhalten der Bewohner in unterschiedlich warmen Jahren sowie die unterschiedliche Solarstrahlung werden nicht korrigiert. In der Praxis zeigt sich jedoch eine starke Abhängigkeit des Luftwechsels von der Außentemperatur bzw. vom Wetter.

Eine weitere Vertiefung der Thematik ist in [81] gegeben.

Wahl einer Heizgrenztemperatur

Die Heizgrenztemperatur eines Gebäudes ist die Außentemperatur, unterhalb der geheizt wird. Oberhalb reichen die inneren und solaren Wärmegewinne aus, um auch ohne aktive Beheizung das Raumklima aufrecht zu erhalten. Für beide Witterungskorrekturverfahren muss die Heizgrenztemperatur festgelegt werden.

In der theoretischen Energiebilanzierung gilt: je geringere Wärmeverluste und je höhere Wärmegewinne ein Gebäude hat, desto niedriger liegt die rechnerische Heizgrenze. In der Praxis verwischen die gemessenen Grenzwerte. Bei unbekannten Verhältnissen wird daher von 15 °C als Heizgrenze ausgegangen, da dies in der Mehrzahl untersuchter, auch sehr gut gedämmter Gebäude anzutreffen ist.

Die Höhe der Heizgrenztemperatur hängt stark von der Innentemperatur im Gebäude ab. Die real feststellbaren geringen Unterschiede von Heizgrenztemperaturen im Alt- und Neubau sprechen dafür, dass bei Gebäuden mit guter Dämmung deutlich höhere mittlere Innentemperaturen erreicht werden. Die Gründe bzw. Kombinationen aus Begründungen sind in der derzeitigen Fachdiskussion noch unklar. Möglich sind:

- verändertes Nutzerverhalten in sanierten/gut gedämmten gegenüber unsanierten Objekten (höherer Komfort im Neubau, d.h. Reboundeffekt bzw. aus Kosteneinspargründen verminderte Raumtemperaturen im Bestand),
- sehr viel größere Zeitkonstanten des gedämmten Baukörpers (kaum noch nächtliche Auskühlung des Gebäudes),
- bei guten Baustandard sehr starke wärmetechnische Kopplung der Räume untereinander (geringe räumliche Auskühlung von Nebenräumen),
- hohes Erwärmungs- und Überwärmungspotential der Räume durch Fremdwärme (z. B. ungeregelte Wärmeabgabe von Rohrleitungen).

Ein Hilfsmittel zur Zuordnung ist in Bild 94 gegeben.

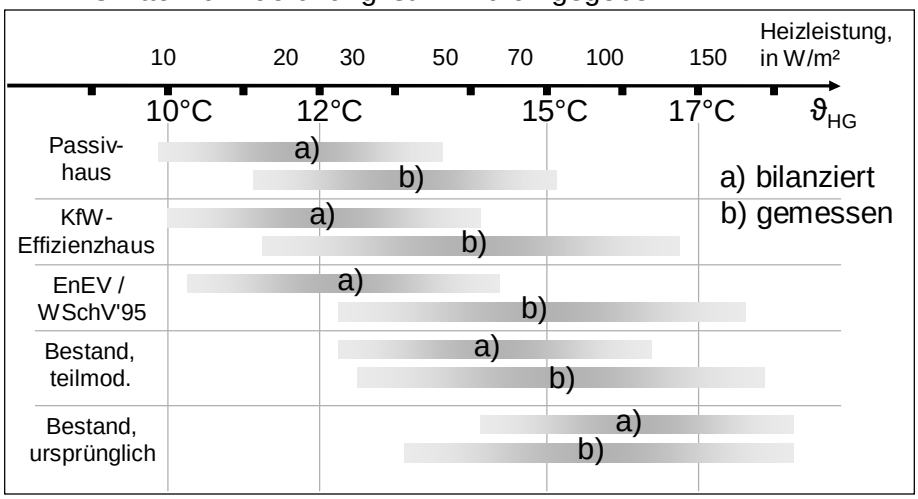


Bild 94 Typische Heizgrenztemperaturen

Die Heizgrenztemperatur hängt – mit großer Streubreite – vom Heizwärmeverbrauch (gemessen nach dem Wärmeerzeuger und bezogen auf die Wohnfläche, nachfolgend q_H) des Gebäudes ab. Sie ergibt sich aus [81] aus folgendem Zusammenhang:

$$\vartheta_{HG} \approx 14°C + 0{,}02 \frac{K}{kWh/(m^2 a)} \cdot q_H$$

Eine Heizgrenztemperatur kann im konkreten Einzelfall auch messtechnisch bestimmt werden, siehe Abschnitt 4.3.

Herkunft der Klimadaten

Der Deutsche Wetterdienst DWD stellt Klimadaten für lange Zeiträume, aber auch stunden- und tageweise Werte (derzeit für knapp 80 Stationen frei) zur Verfügung. Die Gradtagszahlen oder Heizgradtage der konkreten Untersuchungsjahre lassen sich damit ausreichend genau bestimmen. Kostenlose Auswertungstools der DWD-Daten finden sich unter www.delta-q.de sowie www.iwu.de.

Die Langzeitklimadaten, die der Normierung der Verbrauchsdaten dienen, können

- ebenfalls dem Datenpool des DWD für konkrete Stationen entnommen werden,
- aus Normen stammen, z. B. DIN V 4108-6 oder DIN V 18599-10,
- Werte fiktiver Testreferenzjahre (TRY) sein, die der Standardisierung von Klimaregionen dienen.

Im Rahmen der Berechnungen zur Wärmeschutzverordnung und EnEV galt bis 2014 der Standort Würzburg als Referenz, seitdem ist es Potsdam. Die zugrunde gelegten Klimadaten sind häufig 30-Jahres-Mittelwerte (derzeit ca. 1980 – 2010).

Da nicht immer eindeutig ist, welche Referenzorte und -zeiträume zugrunde gelegt werden, ergeben sich bei der Bestimmung der Klimadaten geringe Unsicherheiten.

Mögliche Ergebnisse der Witterungskorrektur und deren Verwertung

Die Stufen der Witterungskorrektur zeigt schematisch Bild 95. Ausgangslage sind Heizenergieverbrauchswerte für 11 Monate eines Gebäudes in Mainz.

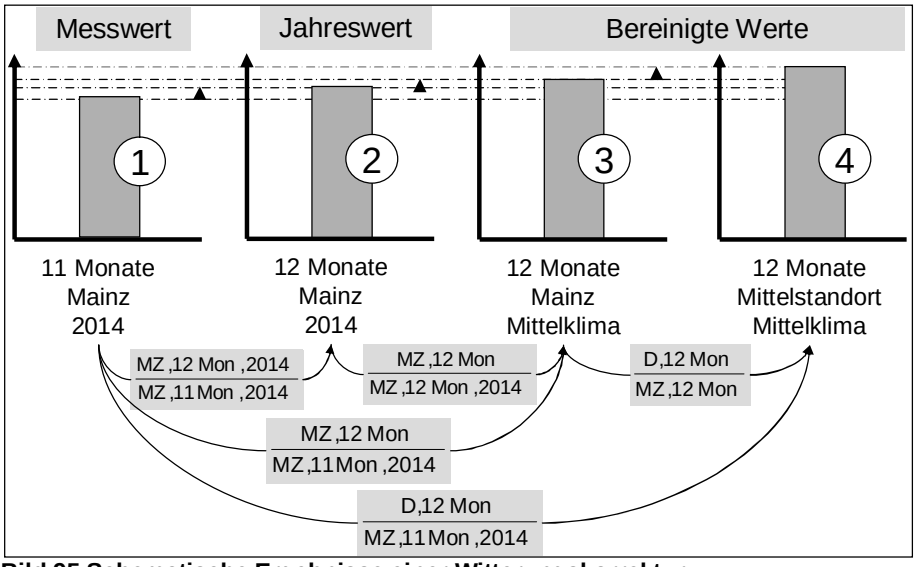


Bild 95 Schematische Ergebnisse einer Witterungskorrektur

Die o. g. Witterungskorrekturgleichung kann mehrfach angewendet werden: zuerst können die 11 Monate auf 12 Monate in Mainz hochgerechnet werden. Dann können die 12 Monate der Heizperiode 2014 auf ein mittleres Klima in Mainz umgerechnet werden. Im letzen Schritt folgt eine Korrektur vom typischen Jahr in Mainz auf das typische Jahr eines Standardstandortes in Deutschland.

In jedem Bruch sind im Zähler und Nenner die entsprechenden Heizgradtage G bzw. Gradtagszahlen Gt zu ergänzen. Die Kettenrechnung kann auch abgekürzt werden!

- Der Übergang von 1 nach 3 ist relevant für die Energieberatung. Für Berater und Kunden ist interessant, welchen Verbrauch das Gebäude bei typischem Mainzer Klima hat. Hier besteht freie Wahl hinsichtlich der Verwendung von G oder Gt zur Bereinigung.
- Der Übergang von 1 nach 4 ist relevant für die Energieausweiserstellung. Referenzort für das mittlere Klima ist "Potsdam". Es ergibt sich ein Verbrauch, den das Mainzer Haus in Potsdam hätte. Dies dient dem Vergleich von unterschiedlichen Orten. Hierbei legt die EnEV fest, dass Gradtagszahlen Gt zur Bereinigung verwendet werden müssen.

Ausblick auf Korrekturverfahren für Kälteverbrauch

Eine Witterungs- und Standortkorrektur erfolgt derzeit nur für den Heizungsanteil. Für den Kälteverbrauch liegt kein erprobtes Korrekturverfahren vor.

Für Klimatisierungs-, Kühlungs- und Beleuchtungsaufwendungen wird in der Praxis häufig nur eine Zeitkorrektur durchgeführt, auch wenn eine Bereinigung mit Kühlgradtagen (analog den Heizgradtagen) denkbar wäre.

4.2.3 Zeitkorrektur

Zum Vergleich von Verbrauchsanteilen, die nicht (oder nur schwach) von der Witterung abhängen, erfolgt eine Zeitkorrektur. Diese gleicht unterschiedlich lange Messintervalle aus. Das Nutzerverhalten wird dabei nicht korrigiert.

Grundkorrekturgleichung

Der Anteil am Gesamtverbrauch eines Gebäudes, der nicht von der Witterung abhängt, wird nachfolgend Q_W genannt. Es gibt folgende Korrekturgleichung:

$$Q_{\mathrm{W,bereinigt}} = Q_{\mathrm{W,mess}} \cdot \frac{t_{\mathrm{standard}}\ (bzw.365\,d/a)}{t_{\mathrm{mess}}}.$$

Der Index "W" wurde gewählt, weil beispielsweise der Warmwasseranteil an der Gebäudeversorgung nahezu witterungsunabhängig ist. Aber auch Stromverbrauchskennwerte für Elektrogeräte, viele Prozessenergien u. ä. fallen darunter.

Mögliche Ergebnisse der Zeitkorrektur und deren Verwertung

Die Stufen der Zeitkorrektur zeigt schematisch Bild 96. Ausgangslage sind Energieverbrauchswerte für Trinkwarmwasser für 11 Monate eines Gebäudes in Mainz.

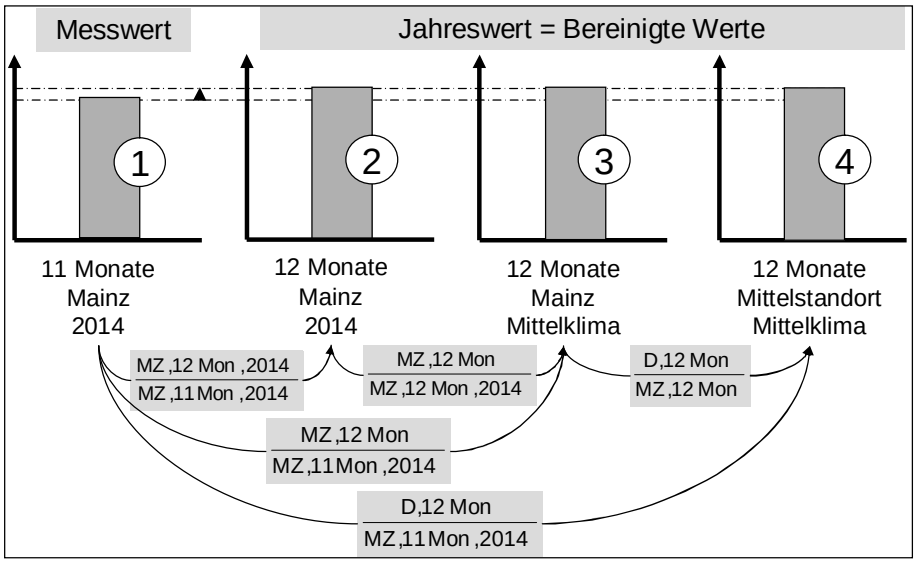


Bild 96 Schematische Ergebnisse einer Zeitkorrektur

In jedem Bruch sind im Zähler und Nenner die entsprechenden Messtage bzw. 365 Tage/Jahr zu ergänzen. Diese Art der Normierung ist standortunabhängig. Es ergeben sich für die Beratung (Balken 3) und den Energieausweis (Balken 4) identische Zahlenwerte.

Anteiliger witterungsunabhängiger Verbrauch

Die getrennte messtechnische Erfassung von witterungsabhängigen und witterungsunabhängigen Verbrauchsanteilen mit je einem Zähler ist optimal. Ist nur ein gemeinsamer Zähler vorhanden, ist die Bestimmung des witterungsunabhängigen Grundverbrauchs durch eine Sommermessung oder Energieanalyse möglich, vgl. Abschnitt 4.3.

Eine grobe Aufteilung erlauben auch die in Abschnitt 4.1.3 angegebenen flächenbezogenen Teilkennwerte für die Trinkwassererwärmung.

Insgesamt genauer ist die Abschätzung der Endenergie für die Trinkwassererwärmung anhand von Personenzahlen. Jedoch sind dann zusätzlich Anlagentechnikverluste (Verteilung, Speicherung, Erzeugung) zu berücksichtigen. Vor allem für kleine Objekte kann der Trinkwarmwasseranteil sinnvoll anhand nachfolgender Gleichung mit Hilfe der Personenzahl geschätzt werden:

$$Q_{W,mess} \approx \frac{1}{\eta_{Gesamt}} \cdot 600 \frac{kWh}{Person \cdot a} \cdot Personen$$

Ein typischer Nutzwärmeverbrauch für Trinkwarmwasser (= aus dem Hahn gezapfte Energiemenge) liegt bei 600 kWh/(Person a). Als Nutzungsgrade für das Gesamtsystem können in Anlehnung an die Heizkostenverordnung η_{Gesamt} = 0,5 für Kesselanlagen und η_{Gesamt} = 0,6 für Fernwärmeanlagen verwendet werden. Sind genauere Angaben über die Nutzungsgrade bzw. Technikverluste bekannt, können selbstverständlich diese Werte eingesetzt werden.

4.3 Energieintervallmessung und Energieanalyse aus dem Verbrauch

Jahresverbrauchswerte ergeben eine erste Gesamtbewertung von Gebäuden, Liegenschaften oder anderen komplexen Energieverbrauchern. Sehr viel detailliertere Informationen liefern Messwerte aus kürzeren Zeiträumen als ein Jahr – z. B. aus wochen- oder monatsweisen Intervallen. Die Verbrauchswerte sind dabei in Korrelation mit der zugehörigen Belastung (Außentemperatur, mittlere Kesselbelastung usw.) zu bringen.

Im Folgenden werden zwei Detailverfahren für die Auswertung von Messwerten des Wärmeverbrauchs beschrieben:

- die Energieanalyse aus dem Verbrauch (EAV) oder Energiesignatur für Wärmeverbraucher mit Auswertung des Verbrauchs über der Außentemperatur zur Gewinnung von Heizgrenzen, lastabhängigen und lastunabhängigen Energiekennwerten,
- die EAV oder Energiesignatur für Kessel mit Auswertung der Erzeugernutzwärmeabgabe und Erzeugerenergiezufuhr (Endenergie) zur Gewinnung lastunabhängiger Verluste sowie der Effizienz der Energieumwandlung.

4.3.1 Datenaufbereitung

Ziel der Datenaufbereitung ist die Auftragung der Messwerte in eines der nachfolgenden Diagramme:

- $\dot{Q}$-ϑ_a-Diagramm (witterungsabhängige Darstellung mit absoluten Kennwerten, auch "Fingerabdruck des Gebäudes und der Nutzung")
- $\dot{Q}_{zu}$-$\dot{Q}_{ab}$-Diagramm (lastabhängige Darstellung mit absoluten Kennwerten, auch "Fingerabdruck des Erzeugers")
- w_{auf}-β-Diagramm (lastabhängige Darstellung mit normierten Kennwerten)

Datenerfassung und Leistungsumrechnung

Die Empfehlungen zur Datenerfassung aus Abschnitt 4.2.1 gelten unverändert. Die Detailanalyse beginnt mit einer Umrechnung der im Messintervall t_{mess} (in h/Messzeitraum) erfassten Energiemengen Q_{mess} (in kWh/Messzeitraum) in mittlere Leistungen $\dot{Q}$ (in kW):

$$\dot{Q} = \frac{Q_{mess}}{t_{mess}}$$

Normierte Kennwerte werden zusätzlich für die Auswertung von Wärmeerzeugern benötigt. Dazu werden die mittleren Leistungen $\dot{Q}$ zusätzlich durch die Erzeugernennleistung $\dot{Q}_{K,N}$ dividiert. Dies erfolgt für die dem Erzeuger zugeführten und von ihm abgegebenen Leistungen gleichermaßen:

$$w_{auf} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{Q}_{K,N}} \text{ und } \beta = \frac{\dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{K,N}}$$

Die beiden entstehenden Größen sind der normierte Energieaufwand w_{auf} und die Auslastung β. Ableitung des Verfahrens und Vertiefung siehe [8].

Mittlere Temperaturen

Wenn eine Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Außentemperatur dargestellt werden soll, werden mittlere Außentemperaturen ϑ_e für die Messintervalle benötigt. Die notwendigen Tagesdaten sind kostengünstig oder kostenlos über den Deutschen Wetterdienst (DWD) erhältlich. Kostenlose Auswertungstools der DWD-Daten finden sich unter www.delta-q.de sowie www.iwu.de.

Anwendungsgrenzen

Dem Analyseverfahren sind hinsichtlich der zeitlichen Auflösung der Daten Grenzen gesetzt. Es wird auf Basis der Erkenntnisse mehrerer Feldtests empfohlen:

- wenn eine außentemperaturabhängige Auswertung erfolgt, wird für Gebäude und Liegenschaften auf Wochen- bis Zweimonatsintervalle zurückgegriffen:
    - bei kleineren Intervallen korrelieren aufgrund der Zeitkonstanten (Bauschwere usw.) die Energiemengen nicht mehr mit den Außentemperaturen im jeweiligen Messintervall,
    - bei größeren Intervallen steigt die Ergebnisunsicherheit aufgrund fehlender Messpunkte (z. B. fehlende Messpunkte im Sommer),
- wenn eine lastabhängige Auswertung erfolgen soll, wird für Wärmeerzeuger auf Tages- bis Zweimonatsintervalle zurückgegriffen.

4.3.2 Gebäudeanalyse

Die Bestimmung einer Energieanalyse aus dem Verbrauch (EAV) bzw. Energiesignatur erfolgt durch Auftragung des Verbrauchs über der Außentemperatur ($\dot{Q}$-ϑ_a-Diagramm). Anhand dieses Verfahrens können die Heizgrenze sowie lastabhängige und lastunabhängige Energieanteile bestimmt werden. Das Verfahren ist u. a. in DIN EN 15203, DIN EB 12831 Beiblatt 2, VDI 3807-5 [76] oder DIN V 18599 Bbl. 1 [13] beschrieben.

Daten aus Wärmemengenzählern

Bild 97 zeigt die beispielhafte Auftragung einer Gebäude-EAV. Der ausgewertete Wärmemengenzähler erfasst die Energiemengen für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung. Es gibt insgesamt 14 Messintervalle und damit Messpunkte.

Es ergibt sich ein charakteristisches Bild des Verbrauchers mit folgenden wichtigen Detailerkenntnissen:

- die Grundleistung $\dot{Q}$ (in kW), welche zusätzlich auf die Gebäudefläche bezogen werden kann ($\dot{q}$ in W/m²), als Maß für den witterungsunabhängigen Verbrauch,
- die Heizgrenze (in °C), oberhalb der kein Heizungsverbrauch mehr erkennbar ist,
- die Steigung H (in kW/K), welche zusätzlich auf die Gebäudefläche bezogen werden kann (h in W/m²K), als Maß für den witterungsabhängigen Verbrauch.

Als Kernheizzeit wird ein Bereich angesehen, in dem (ohne Unterbrechungen) alle Tage im jeweiligen Messintervall unter der Heizgrenze lagen. Bei ca. 3- bis 4-wöchigen Messintervallen endet die Kernheizzeit bei geschätzt 8 … 9 °C. Es schließt sich bis zur Heizgrenze eine Übergangszeit an, dann der heizfreie Sommer.

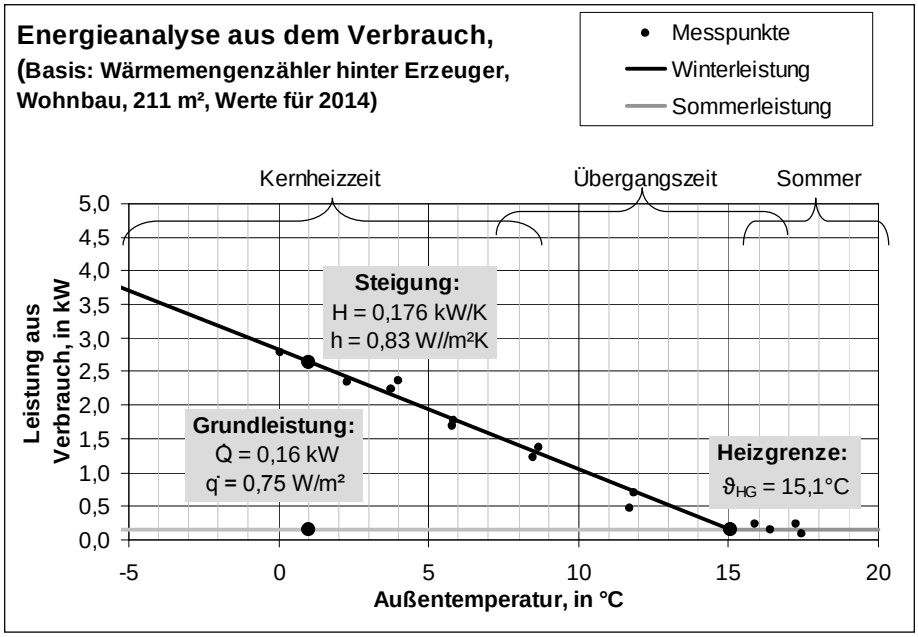


Bild 97 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Wärmemengenzählerwerten

Diese Auswertung liefert den Anteil witterungsunabhängigen Verbrauches (bezogen auf den Jahresverbrauch). Nach Bild 97 ergibt sich ein Wert von 1400 kWh/a (aus der Grundleistung):

$$Q_{unabhängig} = \dot{Q}_{Grund} \cdot 8760\, h/a\ .$$

Der witterungsabhängige Heizungsverbrauch kann als Differenz zum Gesamtverbrauch bestimmt werden:

$$Q_{abhängig} = Q_{mess} - Q_{unabhängig}\ .$$

Alternativ ergibt er sich auch aus der Steigung H und den Heizgradtagen G:

$$Q_{abhängig} = H \cdot G\ .$$

Je nachdem, welche Heizgradtage G eingesetzt werden (der Wert für den Messzeitraum oder der Langzeitwert) ergibt sich der spezielle Jahreswert oder der witterungskorrigierte Verbrauch, siehe auch Erläuterungen in Abschnitt 4.2.2.

Die Messwerte beschreiben je nach Lage und Anzahl der Zähler, siehe Bild 91:

- die Wärmeabgabe des Erzeugers (Zähler direkt hinterm Erzeuger), d.h. die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich des Gebäudes plus Verteil- und Speicherverluste im unbeheizten Bereich,
- die Wärmezufuhr in den beheizten Bereich (Zähler in der Nähe der Verbraucher), d.h. die Wärmeabgabe des Erzeugers abzüglich Verteil- und Speicherverluste im unbeheizten Bereich.

Mit Hilfe der Kennwerte in Abschnitt 3 lassen sich die Verteil- und Speicherverluste rechnerisch abschätzen und die Messwerte somit korrigieren. Die Erfahrung mit Praxisprojekten zeigt, dass dies nur bei sehr detaillierten Analysen notwendig ist.

Dateninterpretation

Grundlage für die Dateninterpretation sind Werte, die hinter einem Wärmeerzeuger mit einem Wärmemengenzähler gemessen wurden (ohne Erzeugerverluste). Es wird ein Verlustkennwert h [in W/(m²·K)] gebildet, indem die Steigung H der Regressionsgeraden [in W/K] auf die Wohnfläche A_{Wohn} [in m²] bezogen wird. Messungen an Realprojekten [81] haben folgende typische Werte ergeben:

- Altbau unsaniert: 2 … 3 W/(m²K)
- Altbau teilsaniert: 1,5 … 2,5 W/(m²K)
- Bestand der 1980er und 1990er Jahre: 1,0 … 2,0 W/(m²K)
- EnEV-Neubau, Effizienzhäuser: 0,7 … 1,3 W/(m²K)
- Passivhaus und sehr gute Effizienzhäuser: 0,5 … 1,0 W/(m²K)

Günstigere, d.h. niedrigere Werte ergeben sich bei guten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) der Gebäudehülle, kompakter und luftdichter Bauweise sowie bei höherer Teilbeheizung.

Zur Interpretation der Heizgrenze sei auf die Grafik in Bild 94 mit Angabe typischer Werte für den Wohnungsbau verwiesen.

Angenäherte Heizlast

Da die Steigung H ein Maß für die Verluste aus Transmission und Lüftung ist, kann eine maximale Heizlast angenähert abgeschätzt werden. Die bezogene Heizlast in W/K ist mit der maximalen Temperaturdifferenz bei der Auslegung zu multiplizieren. Für die mittleren Regionen Deutschlands sind dies beispielsweise 34 K (20 °C Innentemperatur und -14°C Außentemperatur). Für das Beispiel nach Bild 97 ergibt sich eine Heizlast von 176 W/K · 34 K ≈ 6 kW.

$$\dot{Q}_{H,\max} \approx H \cdot 34\,K$$

Dieser Wert ist – sofern er auf Basis von Wärmemengenzählerwerten hinter einem Erzeuger abgeleitet wurde – ein Anhaltswert für die maximal notwendige Erzeugerleistung (zur Gebäudebeheizung!). Er kann verwendet werden, um grob zu schätzen, ob der Leistungsanschluss (Gas, Fernwärme) für ein Gebäude zu groß ist. Eine genauere Prüfung durch Messung von Leistungsspitzen bzw. genaue Heizlastberechnung kann folgen.

Die Extrapolation der Regressionsgeraden bis zur gewünschten minimalen Außentemperatur liefert ein kleineres Ergebnis, die effektive Heizlast (incl. Wirksamkeit von Fremdwärmemengen).

Übergang zur Bedarfsanalyse

Die Steigung H (in W/K) entspricht der Summe aus Transmissionsheizlast H_T und Lüftungsheizlast H_V einer Energiebedarfsrechnung:

$$H = H_T + H_V = H_T' \cdot A + n \cdot V \cdot 0{,}34 \tfrac{Wh}{m^3 K} \text{ . mit } H_T' = \sum (U \cdot A \cdot F_x) + \Delta U_{WB} \cdot A$$

Der Summenwert ist abhängig von den U-Werten, Flächen A, Wärmebrücken ΔU_{WB}, dem Gebäudevolumen V und effektivem Luftwechsel n. Mit einer Änderung dieser Werte ergibt sich eine veränderte Steigung, siehe Bild 98.

Wichtig für weitergehende Überlegungen ist die Tatsache, dass die Steigung der Regressionsgeraden von einer mittleren Raumtemperatur unabhängig ist. Eine veränderte Innentemperatur verschiebt die Gerade parallel.

Die gemessene Steigung lässt sich mit der berechneten im Rahmen einer Energiekonzepterstellung vergleichen (Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich). Alternativ und den Prozess stark vereinfachend wird bei der Bestandsbewertung, z. B. im Rahmen einer Energieberatung, komplett auf die detaillierte Aufnahme und Abschätzung der Güte der Gebäudehülle verzichtet und nur auf Basis des Messwertes gerechnet.

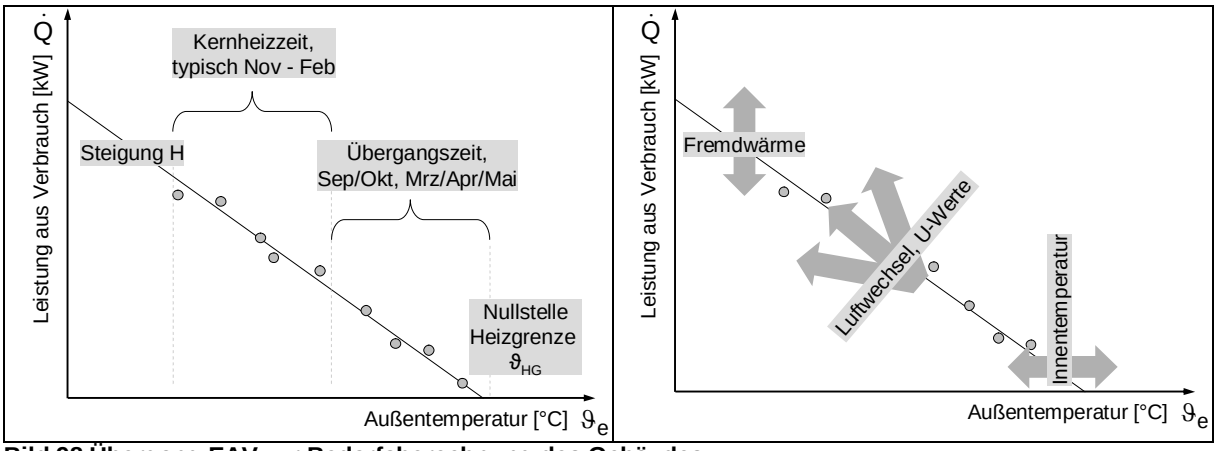


Bild 98 Übergang EAV zur Bedarfsberechnung des Gebäudes

Gäbe es keine Fremdwärme, wären Heizgrenztemperatur und Innentemperatur identisch. Die im Gebäude freiwerdende Fremdwärme verschiebt die Gerade in erster Näherung parallel – unter der Annahme über das Jahr konstanter interner und solarer Lasten. Dieser Ansatz ist eine Näherung, da die solare Last in der Übergangszeit steigt, wobei die internen Lasten nachweislich leicht sinken.

Eine Abschätzung der mittleren Fremdwärmeenergie (als Summe aus Q_I und Q_S) kann nach folgender Gleichung erfolgen (Vertiefung in [40]):

$$Q_{Fremd} \approx Q_H \cdot \frac{\vartheta_i - \vartheta_{HG}}{\vartheta_{HG} - \vartheta_{em}} .$$

Für das Beispiel aus Bild 97 ergibt sich mit einem gemessenen Heizwärmeverbrauch von Q_H = 7400 kWh/a und der Annahme einer Raumtemperatur von ϑ_i = 19°C eine Fremdwärmemenge von 4000 kWh/a in der Heizperiode. Die Länge der Heizperiode lag bei 255 d/a, die mittlere Außentemperatur in der Heizperiode bei 7,9 °C (beides DWD).

Auch die gemessenen Werte für die Heizgrenztemperatur und ggf. die Grundleistung (für die Trinkwarmwasserbereitung) lassen sich – ebenso wie die Fremdwärmeleistung – mit den Annahmen der Bedarfsbilanz abgleichen.

Die messtechnische gegebene Energiesignatur des Gebäudes und der Nutzung kann rechnerisch nachgebildet werden – mit der Gleichung oberhalb von Bild 98. Allerdings ist die Lösung nicht eindeutig. Die Außentemperatur ϑ_e, die Hüllfläche A und das Luftvolumen V des Gebäudes werden zunächst als bekannt vorausgesetzt. Darüber hinaus gilt:

- ein mittlerer Luftwechsel n und der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient H_T' bestimmen die Steilheit der Kurve (siehe Bild 98),
  → es gibt mehrere Paare für H_T' und n, die zur gleichen Steigung führen (kleine Luftwechsel + schlechte U-Werte und umgekehrt),

- die Innentemperatur ϑ_i und die Fremdwärme Q_{Fremd} verschieben die Ergebniskurve parallel nach oben und unten (siehe Bild 98),
  → es gibt mehrere Paare für ϑ_i und Q_{Fremd}, die zur gleichen Parallelverschiebung führen (kleine Innentemperatur + kleine Fremdwärmemenge und umgekehrt).

Es lassen sich also jeweils nur (mehr oder weniger wahrscheinliche) Paare dieser Größen finden, für welche die gemessene und die rechnerische Kurve deckungsgleich sind. Bei dokumentierten Werten für die Güte der Hülle (H_T'), welche seit etwa Wärmeschutzverordnung 1995 gegeben sein müssten, ist eine Interpretation der Steigung sehr zuverlässig [80].

Praxiserfahrungen: Qualitätssicherung mit der EAV

Das Verfahren der EAV oder Energiesignatur eignet sich als Mittel der Qualitätssicherung und Einschätzung des Nutzerverhaltens. Aus der Extrapolation der Verbrauchswerte in der Kernheizzeit (etwa November bis Februar) kann eine theoretisch erreichbare Heizgrenze bestimmt werden. Ebenfalls lassen sich diese "gefilterten" Werte verwenden, um eine Steigung H_{Kern} nur der Kernheizzeit zu berechnen.

In der Kernheizzeit ist die innere und solare Fremdwärme fast konstant, so dass auch viele Realprojekte eine sehr gute Regression der Messwerte zur H-Linie zeigen. In der Übergangszeit sind die Verbrauchswerte sehr viel stärker dem Einfluss des Nutzerverhaltens und der solaren Einstrahlung unterworfen. Sie liegen i. d. R. nicht mehr so eindeutig auf der "Kernheizzeit-Regressionsgeraden", sondern streuen mehr. Es gibt folgende Tendenzen:

- In den Übergangszeiten Frühjahr und Herbst entsteht durch die höheren Solareinstrahlungen eine erhöhte mittlere Fremdwärmeleistung. Dies führt bei unverändertem Nutzerverhalten zu einer niedrigeren Heizgrenztemperatur. Die Verbrauchswerte liegen tendenziell unter der "Kernheizzeit-Regression" (Bild 99 links).
- Da in den Übergangszeiten aus den verschiedensten Gründen aber häufig viel stärker gelüftet wird, kann jedoch auch der gegenteilige Effekt auftreten, die Heizgrenztemperatur verschiebt sich trotz zusätzlicher solarer Einstrahlung zu höheren Werten. Die Verbrauchswerte liegen tendenziell über der "Kernheizzeit-Regression" (Bild 99 rechts).
- Die zusätzlichen solaren Lasten ermöglichen etwas höhere Lüftung, wobei die beiden Effekte sich in etwa aufheben (Bild 97 oben).

Reale Beispiele siehe Abschnitt 4.3.4.

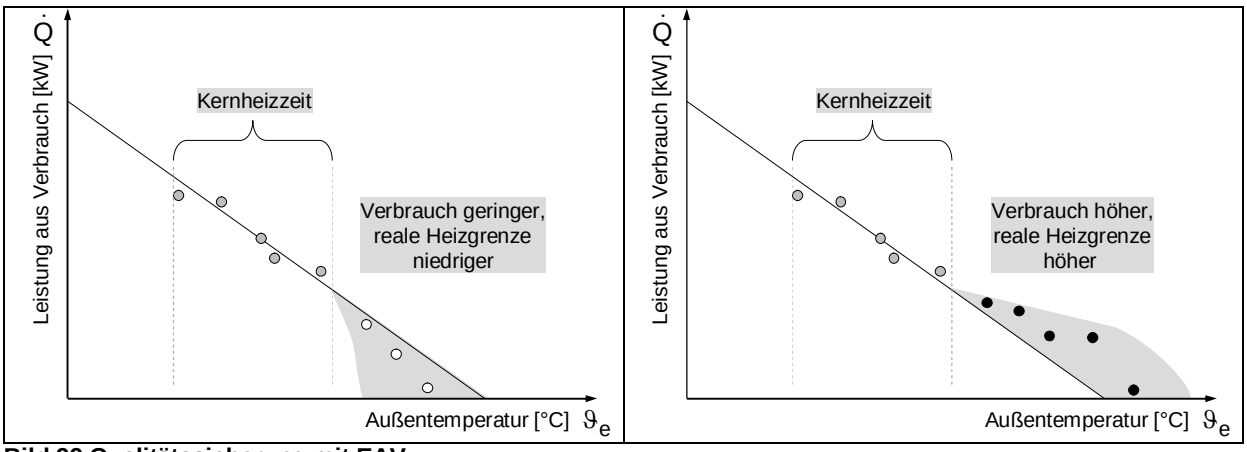


Bild 99 Qualitätssicherung mit EAV

Durch einen Vergleich aus der theoretisch erreichbaren Steigung und den zugehörigen Heizgradtagen G_{Kern} (die Heizgrenze ergibt sich als Nullstelle der Linie H_{Kern} oder vereinfacht für eine automatische Auswertung mit fester Heizgrenze von 15°C) mit dem echten Heizwärmeverbrauch Q_h kann ein Verschwendungspotential abgeschätzt werden:

$$\Delta Q = Q_H - H_{Kern} \cdot G_{Kern}$$

Diese Überlegungen gehen davon aus, dass das Nutzerverhalten in der Kernheizzeit korrekt und angemessen ist. Die Verschwendung in der Übergangszeit entsteht überwiegend durch Lüftung, da der Transmissionsanteil an der Steigung kaum veränderliche Größen aufweist. Die Lüftung kann durch den Nutzer selbst motiviert sein ("den Frühling in die Wohnung lassen"), aber auch durch die Anlage aufgezwungen (hohe nicht regelbare Wärmeabgabe von Rohrleitungen, z. B. Etagenringleitungen). Weitere Vertiefung in [40].

Daten aus Endenergiezählern

Aus Werten der Endenergiezähler lässt sich ebenfalls ein $\dot{Q}$-ϑ_a-Diagramm erstellen, siehe Bild 100. Auch damit kann eine Aufteilung in die beiden Verbrauchsanteile: witterungsabhängig- und unabhängig vorgenommen werden.

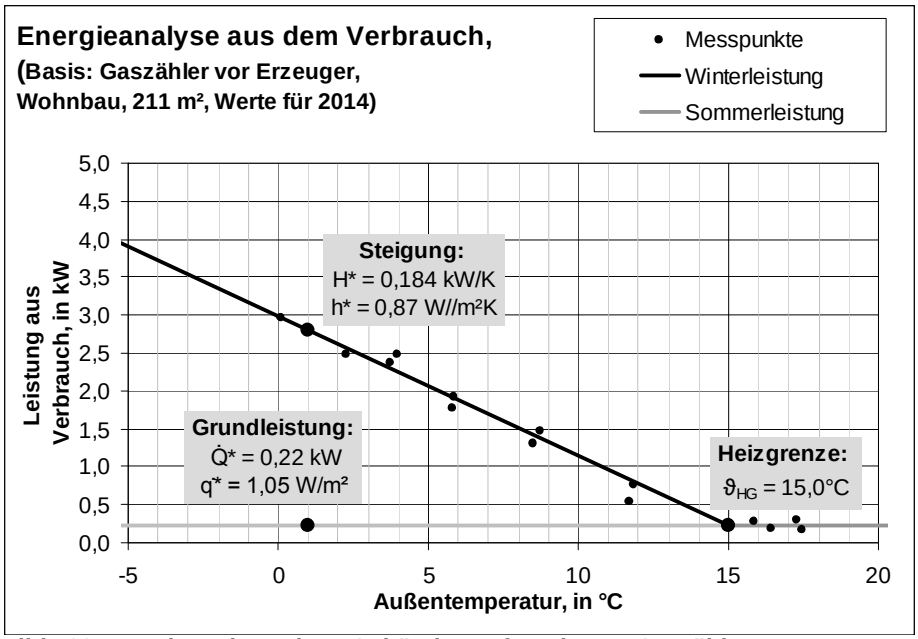


Bild 100 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Gaszählerwerten

Alle Kennwerte (Grundleistung, Steigung und daraus abgeleitete Größen) lassen sich ebenso wie nach Bild 97 bestimmen. Jedoch enthalten sie die (unbekannte) Effizienz des Erzeugers – daher sind sie im Bild zusätzlich mit einem Stern (*) gekennzeichnet.

Ist ein sehr guter Kessel vorhanden, dessen Effizienz nahe 100 % liegt, ergeben sich ähnliche Zahlwerte wie bei der Auswertung von Wärmemengenzählerwerten hinter dem Erzeuger (vgl. Bild 97 mit Bild 100). Dies ist aber auf keinen Fall verallgemeinerbar! Vor allem, weil der Nutzungsgrad von Kesseln oder die Arbeitszahl von Wärmepumpen weder über der Außentemperatur konstant sind und die Jahreswerte in der Praxis sehr stark schwanken können (siehe Abschnitt 3.6).

Die korrekte Datenbasis zur Bestimmung der Heizlast, der Steigung H als Maß für die Qualität der Gebäudehülle und Nutzung und der Sockelleistung liefert nur ein Wärmemengenzähler hinter dem Erzeuger. Darüber hinaus erlaubt nur er die Effizienzauswertung des Erzeugers selbst.

4.3.3 Erzeugeranalyse

Die dem Kessel zugeführte Energie verlässt diesen als:

- Nutzenergieabgabe (Zählermesswert),
- weitgehend lastunabhängige Verluste (Betriebsbereitschaftsverluste)
- lastabhängige Verluste (Abgas- und Strahlungsverluste).

Dieser Zusammenhang ist in Bild 101 als $\dot{Q}_{zu}$-$\dot{Q}_{ab}$-Diagramm dargestellt (gleiches Gebäude wie in Bild 97 und Bild 100). Der Aufwand ist über dem Nutzen aufgetragen. Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die Effizienz der Umwandlung von Energie im Betrieb, der Achsenabschnitt ist ein Maß für die Betriebsbereitschaftsverluste.

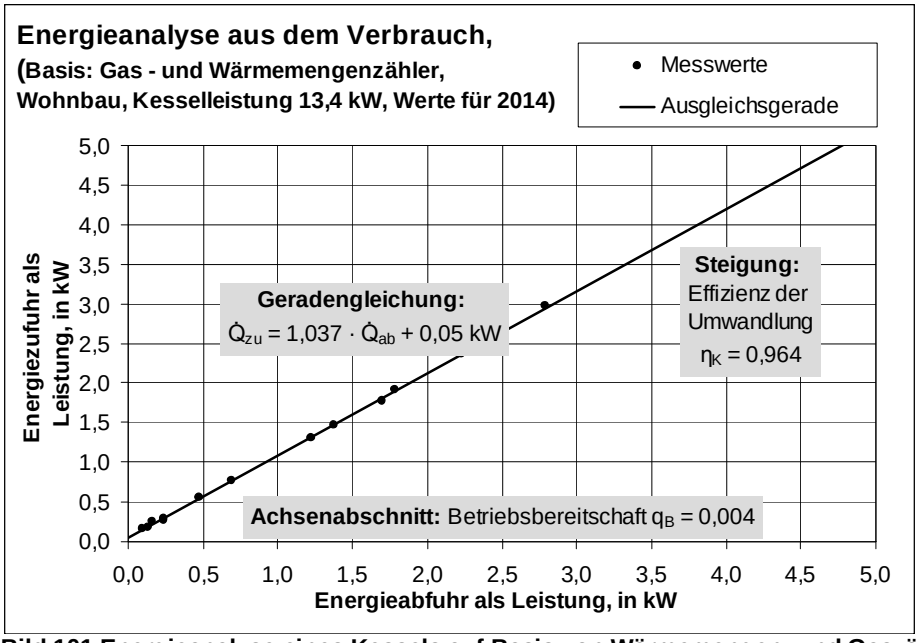


Bild 101 Energieanalyse eines Kessels auf Basis von Wärmemengen- und Gaszählerwerten

Für den in Bild 101 gemessenen Gasbrennwertkessel ergibt sich aus 14 Messpunkten ein Achsenabschnitt von 50 W (Betriebsbereitschaft bei Nulllast) sowie die Erkenntnis, dass jeweils 3,7 % mehr Energie für die Umwandlung aufgewendet werden muss als nutzbar gemacht wird.

Übergang zur Bedarfsanalyse

Der Zusammenhang in der Kessel-EAV bzw. Energiesignatur des Kessels lässt sich in einer Gleichung darstellen:

$$\dot{Q}_{zu} = Steigung \cdot Q_{ab} + \dot{Q}_{Sockel} \,.$$

Der Achsenabschnitt (Parallelverschiebung aus dem Ursprung nach oben) ist ein Maß für die lastunabhängigen Verluste (Bereitschaftsverluste). Die Steigung ist das Maß für die Effizienz der Energieumwandlung (Wirkungsgrad). Je steiler der Anstieg, desto ineffizienter die Energieumwandlung, siehe Bild 102.

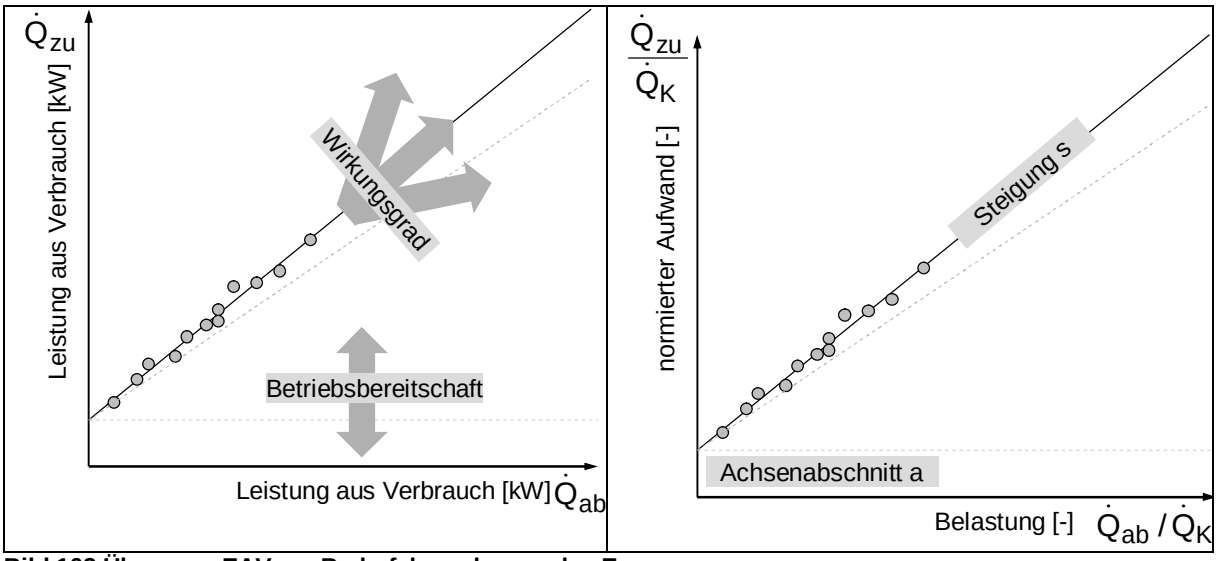


Bild 102 Übergang EAV zur Bedarfsberechnung des Erzeugers

Wird die Gleichung normiert, d.h. sowohl X- als auch Y-Werte des Diagramms durch die Kesselnennleistung dividiert ergibt sich im w_{auf}-β-Diagramm:

$$w_{auf} = Steigung \cdot \beta + Verschiebung = s \cdot \beta + a$$

Die Belastung β kann Werte zwischen 0 (Nulllast) und 1 (Volllast) annehmen. Die Steigung erreicht als Maximum den Wert $1/\eta_K$ (Effizienz bei Volllast). Aus der Geradengleichung können zwei Kennwerte abgeleitet werden. Es gilt Folgendes für die Verschiebung und den Achsenabschnitt:

- $s = \frac{1 - q_B}{\eta_K}$ und $a = \frac{q_B}{\eta_K}$
- $\eta_K = \frac{1}{a + s}$ und $q_B = \frac{a}{a + s}$

Wenn somit der Bereitschaftsverlust des Kessels sowie der Kesselwirkungsgrad bekannt sind, können Steigung und Achsenabschnitt bestimmt werden. Bei der Analyse eines Kessels aus Messwerten ist es umgekehrt: Steigung und Achsenabschnitt sind aus Messwerten reproduzierbar. Mit diesen Ansätzen ergeben sich die in Bild 101 genannten Zahlenwerte.

Ein Nutzungsgrad kann berechnet werden, indem Nutzen durch Aufwand geteilt werden. Der Jahresnutzungsgrad entsprechend mit dem Jahresmittelwert von β und w_{auf}.

$$\eta_a = \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} = \frac{\dot{Q}_{ab.mittel}}{\dot{Q}_{zu.mittel}} = \frac{\beta_{mittel}}{w_{auf,mittel}}$$

Dateninterpretation

Die gewonnenen Erkenntnisse zum Kesselwirkungsgrad und zur Betriebsbereitschaft können mit Herstellerwerten oder typischen Werten – siehe Abschnitt 3 – verglichen werden. In der Praxis ergeben sich große Differenzen zwischen gemessenen Werte und Prüfstandswerten.

Praxiserfahrungen: Qualitätssicherung mit der EAV

Eine Qualitätssicherung kann für einzelne Kessel erfolgen. Alternativ lassen sich über große Stichproben Einflüsse von Einzelmerkmalen herausarbeiten. Bild 103 zeigt beispielsweise den Vergleich von Brennwertkesseln mit (35 Anlagen) und ohne (23 Anlagen) Überströmventil als w_{auf}-β-Diagramm.

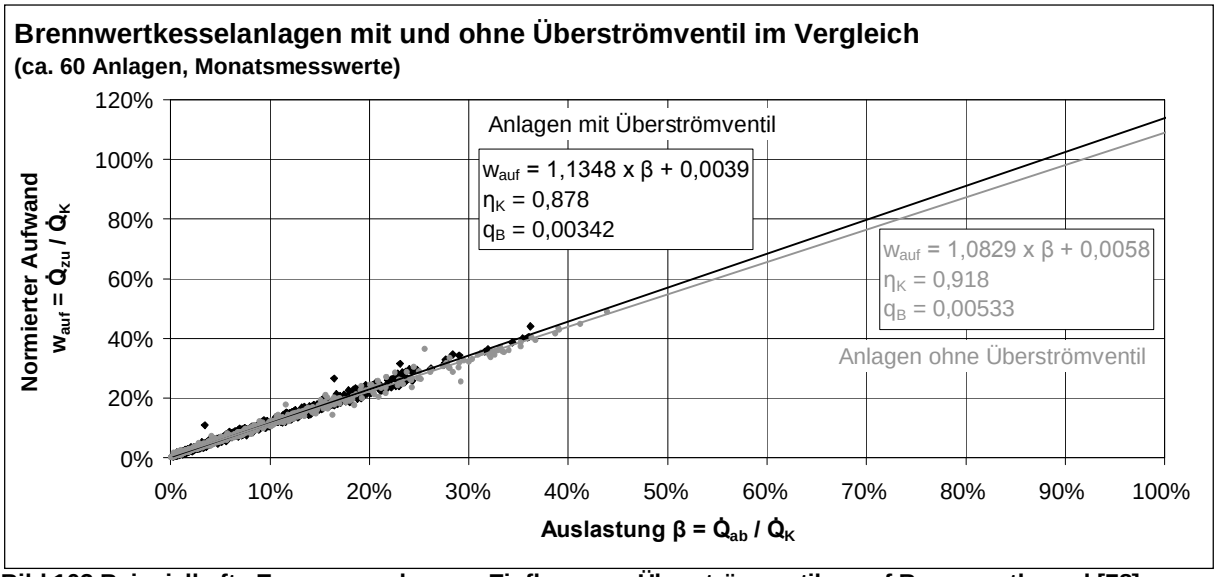


Bild 103 Beispielhafte Erzeugeranalysen – Einfluss von Überströmventilen auf Brennwertkessel [78]

Die Steigung der Regressionsgeraden für die Thermen mit Überströmventil ist höher als bei den Thermen und Standkesseln ohne Überströmventil. Das ergibt einen 4 Prozentpunkte schlechteren Kesselwirkungsgrad ($\Delta\eta_K$ = 0,918 – 0,878 = 0,04).

Die Häufung der Punke in der Grafik zeigen, dass die Kesselbelastung von 25 … 30 %, mit der üblicherweise gerechnet wird, nicht erreicht ist. Die mittlere Kesselbelastung der ca. 60 Anlagen liegt bei nur 9 %. Eine Vertiefung der Thematik findet sich in [78].

4.3.4 Weitere Anwendungen

Nachverfolgungen von Modernisierungen

Die EAV bzw. Energiesignatur kann verwendet werden, um die Erfolge von Modernisierungen sichtbar zu machen. Bild 104 zeigt die Nahwärmemesswerte eines Pflegeheimes aus den 1970er Jahren, welches mit Passivhauskomponenten modernisiert wurde. Sowohl die Steigung als auch die Grundleistung sind gesunken. Durch den sehr flachen Verlauf nach der Modernisierung ist der Übergang von Heiz- zu Sommerperiode nicht mehr gut erkennbar.

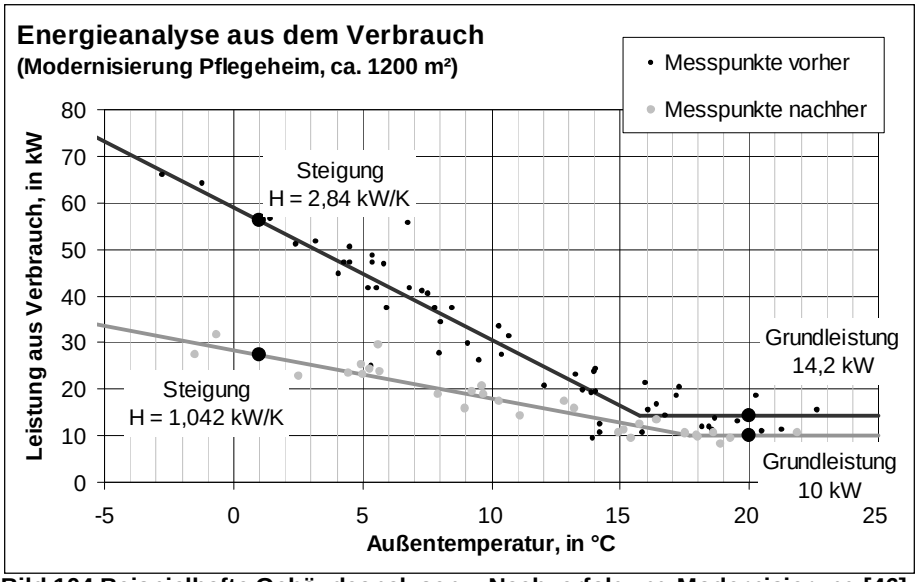


Bild 104 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Nachverfolgung Modernisierung [46]

Sommerheizung und Zwangswärmekonsum

Bild 105 zeigt die Auftragung eines reinen Heizwärmezählers als Gebäude-EAV. Erkennbar ist eine eindeutig definierte Steigung, aber auch ein undefinierter Sockel von Verbrauchswerten im Sommer (oberhalb ca. 16°C). Hier wurde mit der Energiesignatur ein vermeidbarer Sommerverbrauch sichtbar gemacht, der sich aus einer direkten Nahwärmeversorgung (ohne Systemtrennung) ergab.

Phänomene wie diese lassen sich nur erkennen, wenn die Heizwärme (mit einem Wärmemengenzähler) separat erfasst wird! Anderenfalls werden sie als Trinkwasseranteil im Sommer eingestuft (Leistung im Sockel).

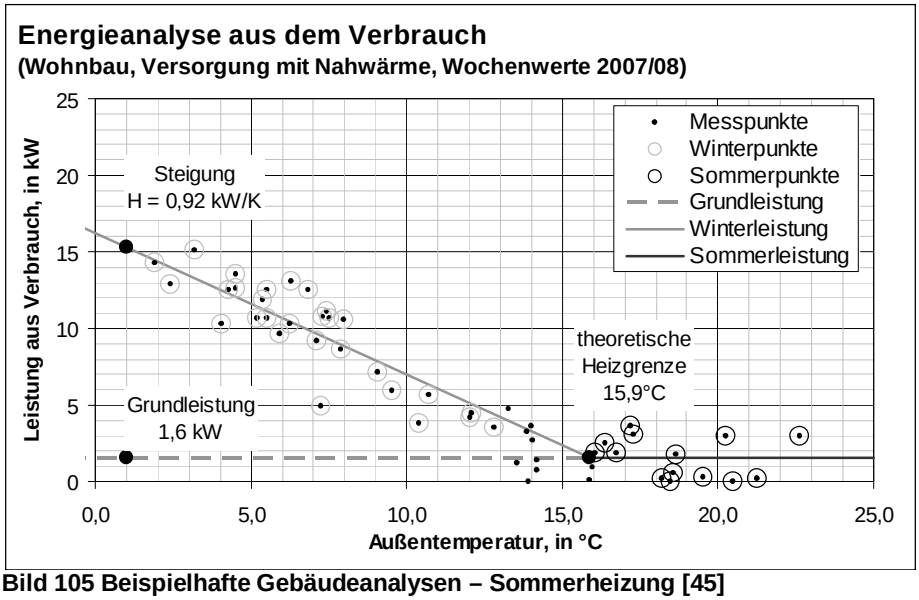


Bild 105 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Sommerheizung [45]

Bild 106 zeigt die Energiesignatur für eine Einrohrheizung mit "Zwangswärmekonsum". Unabhängig von der tatsächlichen Notwendigkeit wird das Objekt bis zu einer theoretischen Heizgrenztemperatur von 22°C mit Wärme versorgt. Weitere Hinweise zum Thema siehe Abschnitt 3.6.3.

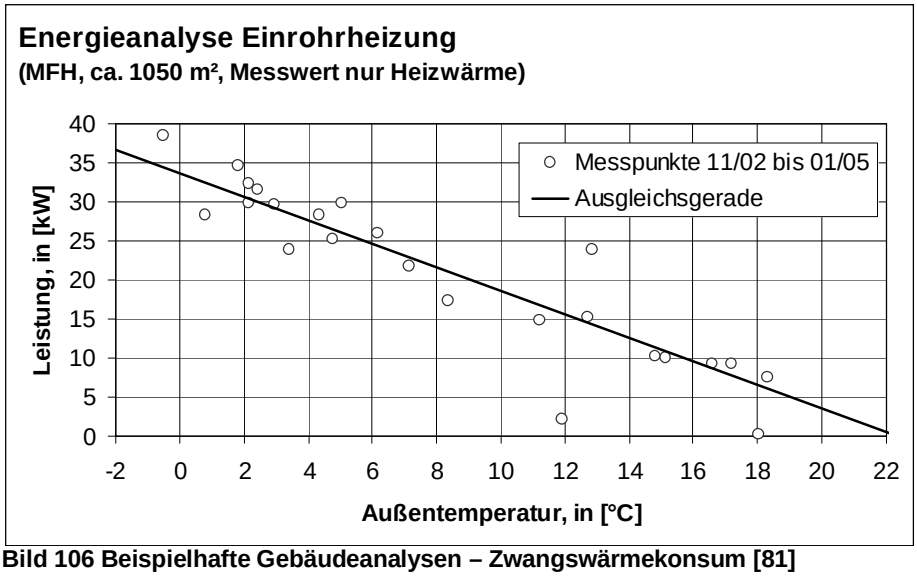


Bild 106 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Zwangswärmekonsum [81]

Analyse komplexer Systeme

Große Liegenschaften lassen sich – eine entsprechende Zählerstruktur vorausgesetzt – ebenfalls mit EAV untersuchen. Bild 107 zeigt die Analyse einer Nahwärme mit zwei Erzeugern: einer Gaskesselzentrale und einer Abwärmeeinspeisung aus einem Biogas-BHKW. Es lassen sich in dem Diagramm die Netzverluste als Differenz zwischen Netzzufuhr und Gebäudewärmeabnahme erkennen.

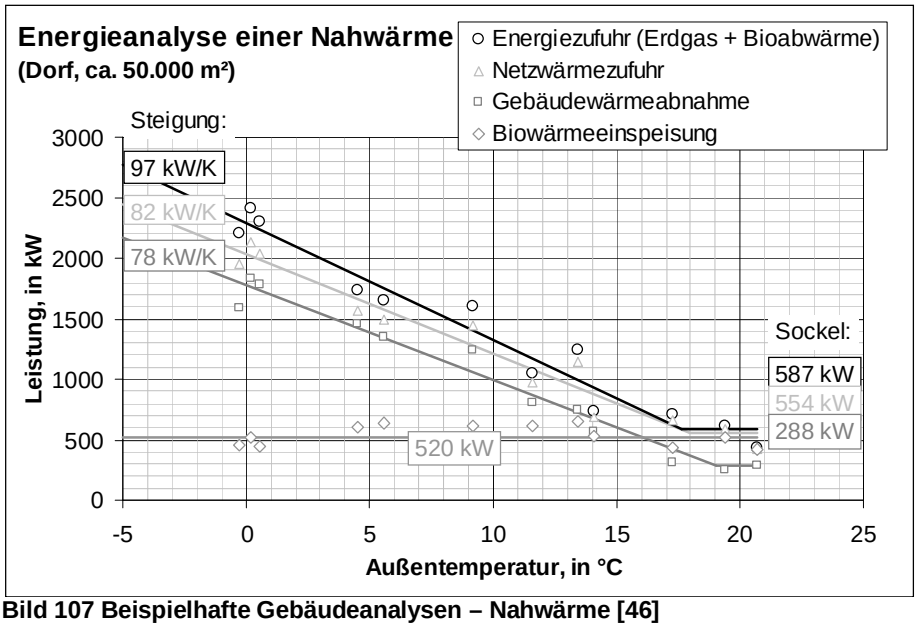


Bild 107 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Nahwärme [46]

Auswertung von Wasser-, Strom- und Kälteverbräuchen

Wasser- und Stromverbräuche lassen sich sehr gut mit der Gebäude-EAV auswerten und über der Außentemperatur auftragen, wobei regulär keine nennenswerten Witterungsabhängigkeiten erkennbar sind.

Das Verfahren für Kälteauswertungen funktioniert grundsätzlich, jedoch sind kaum Feldmessungen dokumentiert. Hier sind künftig noch Bewegungen im Monitoringmarkt zu erwarten.

4.4 Lastganganalysen

Die Lastganganalyse ist ein Verfahren zur Erfassung des Energieverbrauchs (Wärme-, Kälte- und Strom) in Abhängigkeit der Zeit, Messperioden sind Tage, Wochen, Monate oder Jahre. Messintervalle sind Sekunden, Minuten, maximal Stunden.

Die Lastganganalyse mit Auswertung des Verbrauchs über der Zeit kann verwendet werden, um Laufzeiten, Leistungsanteile und Energieanteile wichtiger Verbraucher zu bestimmen.

In erster Linie werden Stromlastgänge aufgezeichnet. Aber auch Wärme- und Kälteenergiemengen können gemessen werden. Die Messperiode zur Bildung von Leistungsmittelwerten beträgt dabei in aller Regel 15 Minuten. Die Ergebnisse werden zur Leistungsoptimierung verwendet.

Lastganganalysen dienen bei der Energiekonzepterstellung auch der Gewinnung von Informationen zu Zeit-, Leistungs- und Energieanteilen von mehreren Verbrauchern an einem Zähler. Werden Lastgänge verschiedener Monate (andere äußere Klimadaten) überlagert, können Abhängigkeiten der Verbraucher von der Außentemperatur ermittelt werden (Leistung der Kühlung, Beleuchtung usw.).

Lastganganalysen über längere Zeiträume

Bild 108 zeigt die Lastganganalyse des Hauptstromzählers einer großen diakonischen Einrichtung (Dorf, ca. 50 Gebäude) mit Mischnutzung. Es zeigt sich Folgendes:

- der Mittelwert der Leistung beträgt 260 kW,
- es gibt einen ausgeprägten Jahresgang der Tagesmittelleistung zwischen Sommer 220 kW und Winter 310 kW,
- der Wochengang der Tagesmittelleistung zeigt eine Differenz zwischen Woche und Wochenende von 80 kW
- der Tagesgang der 15-Minutenleistung ergibt minimal ca. 140 kW und maximal ca. 530 kW

Die Grundlast der Liegenschaft resultiert aus der Summe der Kleinverbraucher und Beleuchtung. Die Großverbraucher Küche und Wäscherei führen zu immer wiederkehrenden Leistungsspitzen (Wäscherei nur in der Woche, Küche an allen Tagen).

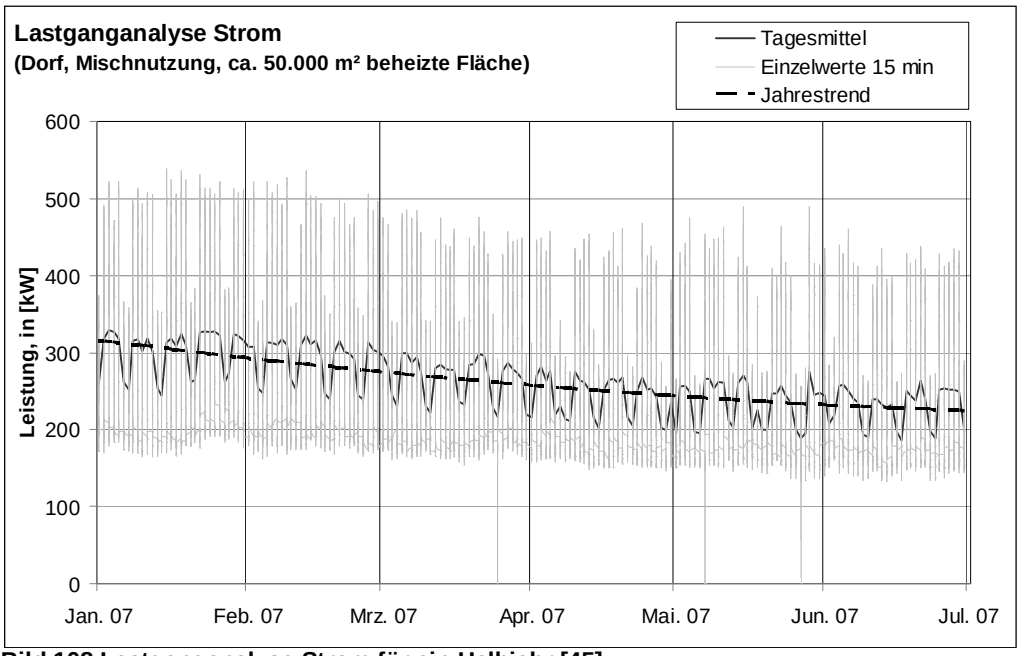


Bild 108 Lastganganalyse Strom für ein Halbjahr [45]

Werden verschiedene der genannten Nutzungen zusammen mit einem Zähler erfasst, kann - unterschiedliche Zeitprofile der Nutzungen vorausgesetzt – eine Kurzzeitmessung zur überschlägigen Aufteilung des Verbrauchs verwendet werden. Ein detaillierter aufgelöstes Wochenprofil einer Lastganganalyse für Gas (schematisiert) zeigt Bild 109.

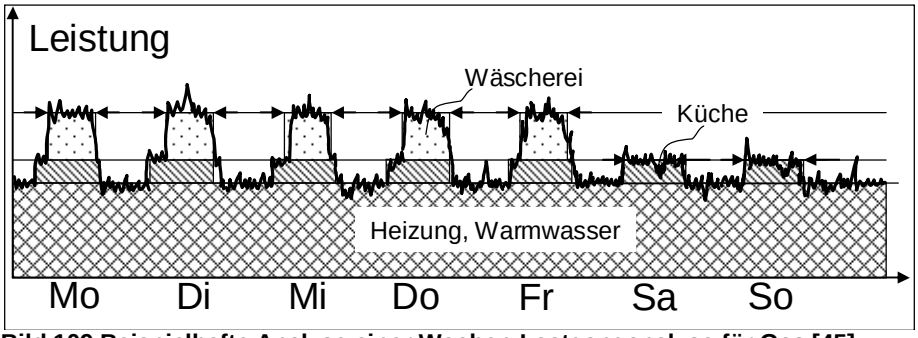


Bild 109 Beispielhafte Analyse einer Wochen-Lastganganalyse für Gas [45]

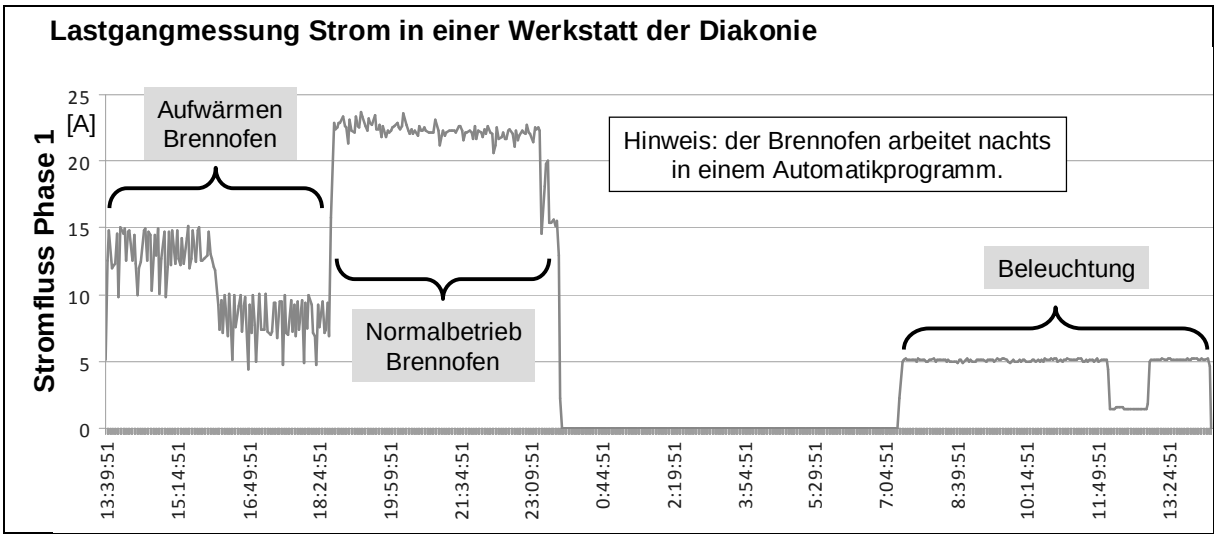
Die Wochenmessung zeigt einen Grundsockel für Heizung und Trinkwassererwärmung, eine Küche mit Wochen- und Wochenendbetrieb und eine Wäscherei mit Wochentagsbetrieb. Die Energiemengen für Küche und Wäscherei lassen sich hieraus abschätzen. Eine Separierung von Heizung und Trinkwarmwasser ist aufgrund dieser Kurzzeitmessung nicht möglich, kann aber nach dem EAV-Verfahren in Abschnitt 4.3 erfolgen.

Lastganganalysen über kurze Zeiträume

Wird der Lastgang eines Tages ausgewertet, liefern Zu- und Abschaltpunkte Hinweise auf die Leistung der entsprechenden Verbraucher sowie deren Betriebsdauer.

Bild 110 zeigt eine Strommessung (alle 3 Stromphasen separat) für eine Werkstatt mit einem Brennofen für Tonprodukte. vor Ort war es nicht möglich, den Lastverlauf des Brennofens separat zu messen, da die Anschlussleitungen des Gerätes dann offen zugänglich im Raum gelegen hätten. Aus diesem Grund wurde die gesamte Werkstatt gemessen. Die Messung lief ca. 24 Stunden.

Die Grafiken zeigen nicht nur das Betriebsverhalten des Ofens, sondern lassen (durch Bilden des Flächenintegrals unter der Kurve) auch Rückschlüsse auf den Verbrauch der Beleuchtung, Kühlschränke und Spülmaschine zu. Die Lastganganalyse offenbart neben diesen energetischen Auswertungen auch die Tatsache, dass der Brennofen in der 3. Phase nicht sichtbar wird. Dies ist ein Defekt (Kabelbruch), der im Nachgang behoben werden konnte.



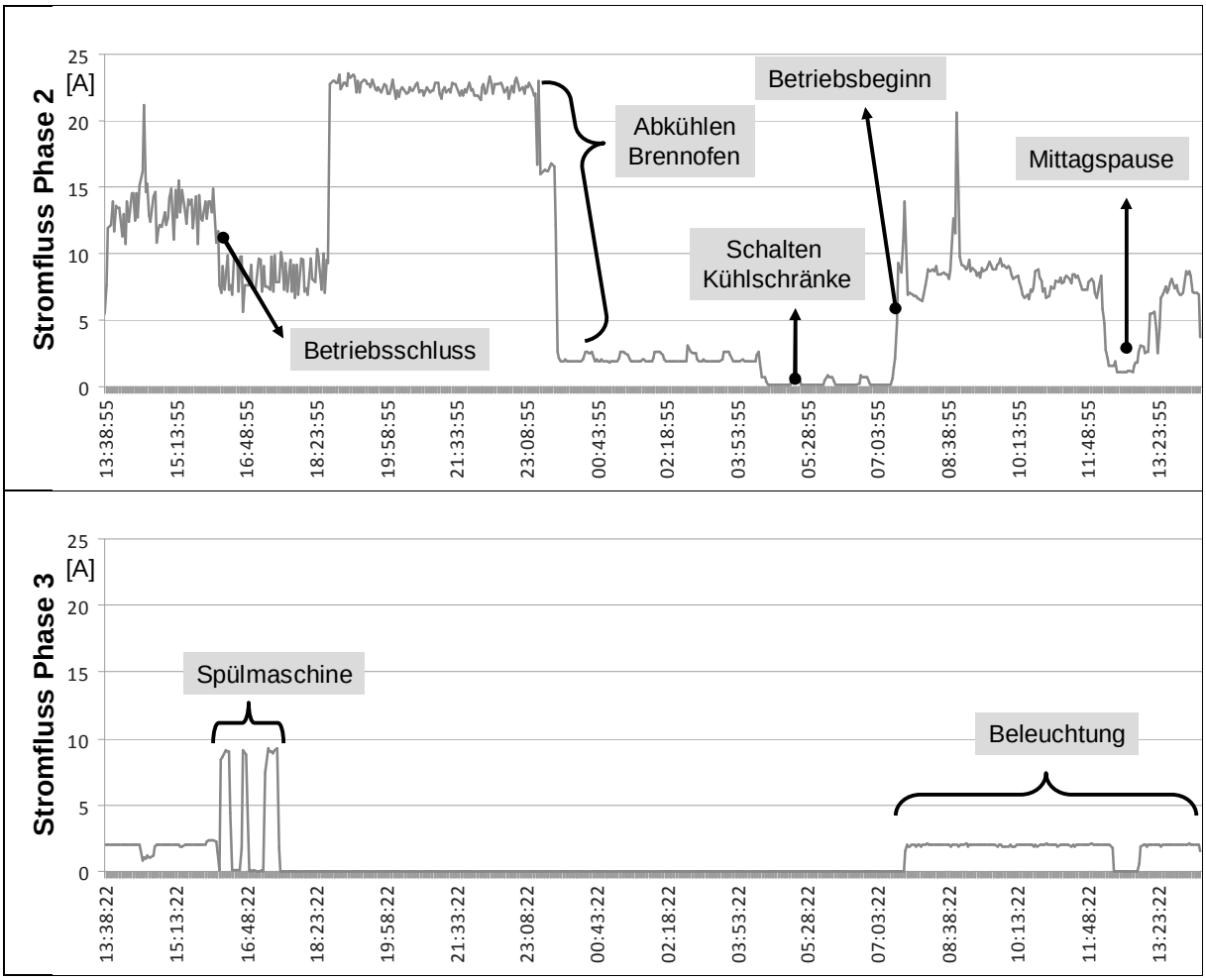


Bild 110 Stromlastgangmessung eines Tages mit Detailanalyse [45]

Insbesondere das Takten von Geräten und eine gleichzeitig sehr feine Datenerfassung erschweren allerdings die Interpretation. Dies zeigt auch Bild 111 für eine Dampfmengenmessung im 10-Sekundentakt. Durch nachträgliche Mittelwertbildung (Integralbildung) lassen sich Energieanteile der einzelnen Verbrauchsgeräte besser erkennen.

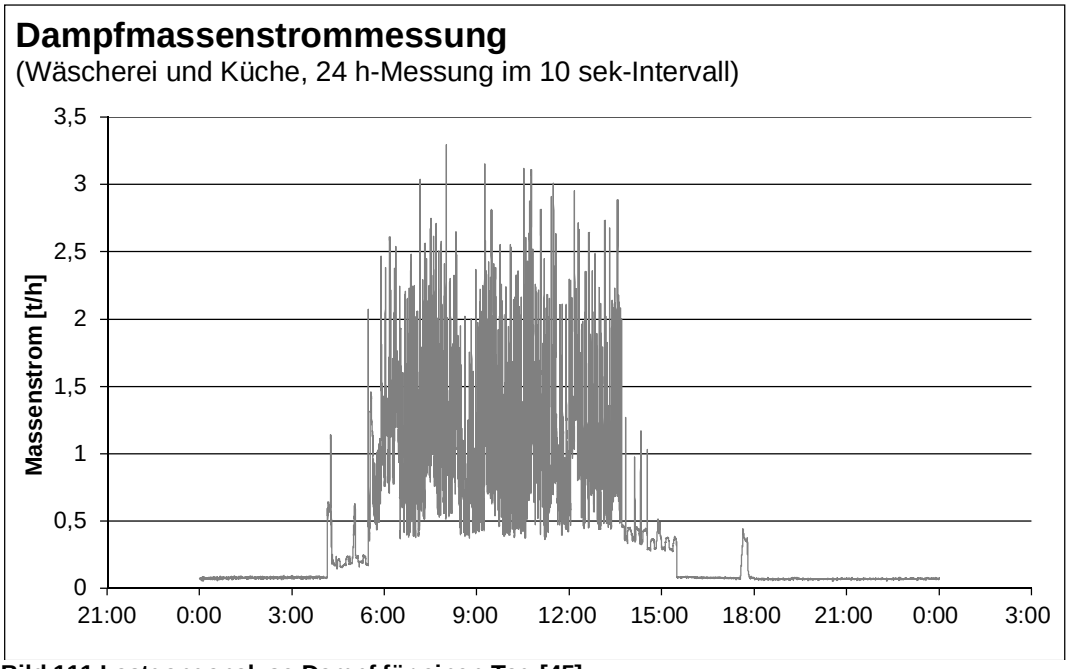


Bild 111 Lastganganalyse Dampf für einen Tag [45]

Hinweise zur Messdatenauswertung

Bei Lastganganalysen und Datenaufzeichnungen mit einer sehr feinen Auflösung müssen insbesondere die Totzeiten des gemessenen Systems und der Messtechnik beachtet werden.

Als Fehleranfällig in der Praxis erweisen sich individuell aufgebaute Wärmemengenmessungen mit Abtastraten unterhalb einer Minute. Während der Volumenstrom mit einer geringen Totzeit ermittelt wird, gibt es Temperaturmessungen mit Totzeiten im Bereich mehrerer Sekunden. Die erfassten Volumenströme und Temperaturen bilden u. U. nicht denselben Zeitpunkt ab, auch wenn die Messzeit scheinbar identisch ist.

Diese Fehler werden vernachlässigbar klein, wenn die Messintervalle länger sind.

Abgrenzung Lastermittlung und Energieanalyse

Die Verfahren der Energieanalyse aus dem Verbrauch (EAV) für Gebäude und Erzeuger streben eine lastabhängige Auswertung an. Die klassische Lastganganalyse ist dagegen eine Auftragung über der Zeit.

4.5 Jahresdauerlinie

Die Jahresdauerlinie ist eine Auftragung einer Leistung über der Zeit ($\dot{Q}$-ϑ_a-Diagramm). Hierbei wird nicht der tatsächlich gemessene Lastverlauf dargestellt (siehe Lastganganalyse in Abschnitt 4.4). Es erfolgt eine – üblicherweise absteigende – Sortierung der in einem Zeitraum auftretenden Leistungen.

Bild 112 zeigt einen beispielhaften Tagesverlauf der Leistung eines Verbrauchers. In der Darstellung des tatsächlichen Tagesverlaufs (links) sind drei Lastspitzen im Tagesverlauf festzustellen. Es gibt eine Schwachlastphase nachts. Werden die Leistungen sortiert (rechts), ist keine Zuordnung zur konkreten Tageszeit mehr gegeben; es handelt sich um einen 24-stündigen Zeitraum. Allerdings ist erkennbar, dass die Schwachlastphase etwa 6 Stunden Zeitumfang hat. Die beispielhafte Darstellung ist eine Tagesdauerlinie.

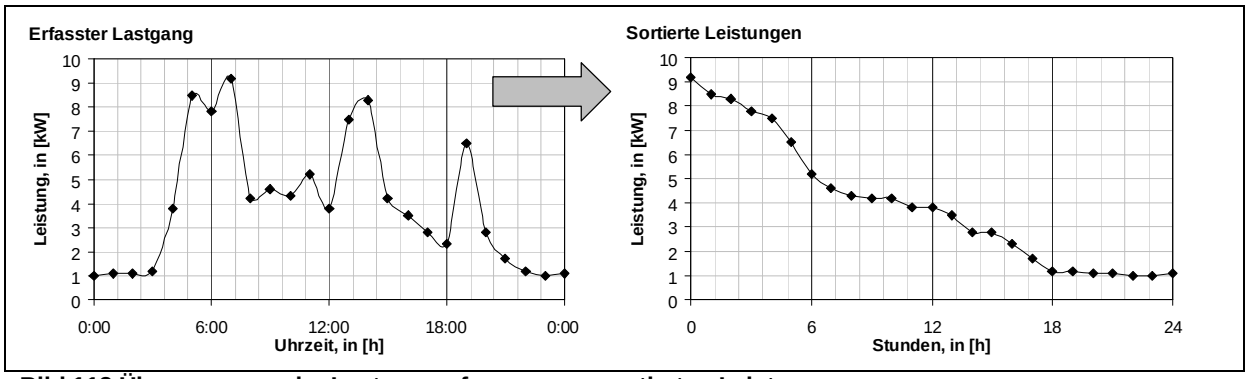


Bild 112 Übergang von der Lastgangerfassung zur sortierten Leistung

In Dauerlinien sortierter Leistungen kann durch Auswertung von Flächenanteilen bestimmt werden, welche Arbeitsanteile unterhalb bestimmter Leistungen liegen. Auch Laufzeitanteile oberhalb und unterhalb bestimmter Grenzleistungen lassen sich bestimmen. Bild 113 zeigt dies anhand der Grenzleistung von 5 kW.

In 26 % der Zeit eines Tages ergeben sich Leistungen oberhalb von 5 kW. Sofern mehrere Erzeuger zum Einsatz kommen sollen, um die notwendige Leistung bereitzustellen, lässt sich aus solchen Überlegungen die Einsatzdauer der Spitzenlasterzeuger ableiten. Ein Spitzenlasterzeuger, der immer dann zum Einsatz kommt, wenn mehr als 5 kW Leistung benötigt wird, ist 6,3 h von 24 h in Betrieb.

Der Grundlasterzeuger ist hingegen 6,3 h (26 %) des Tages mit maximaler Leistung in Betrieb und die restliche Zeit (74 %) mit verminderter Leistung oder taktend.

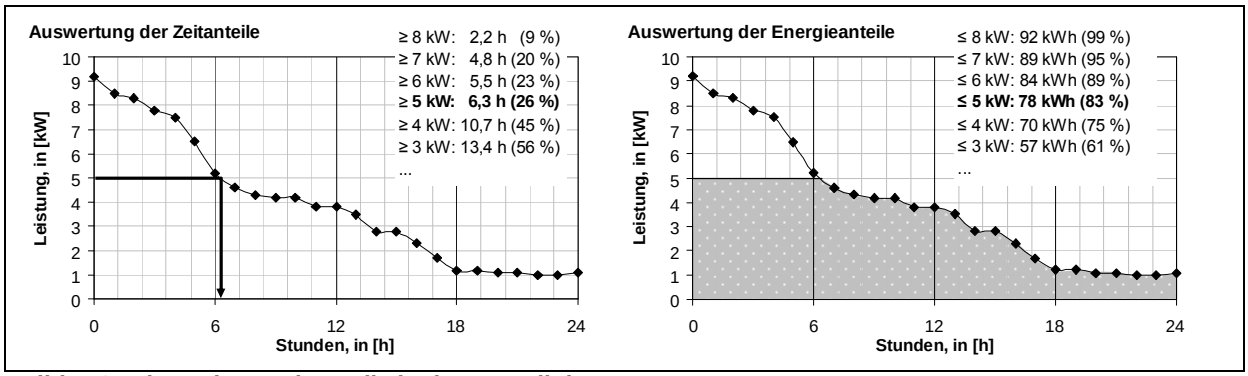


Bild 113 Zeit- und Energieanteile in der Dauerlinie

Die Auswertung der Energiemengenanteile (Deckungsanteile) für zwei Erzeuger ergibt: der auf 5 kW Leistung begrenzte Grundlasterzeuger liefert 83 % der Tagesarbeit, in den Leistungsbereich oberhalb von 5 kW fallen demzufolge 17 % der Energiemenge (für den Spitzenlasterzeuger).

Das anhand eines Tages mit stündlichen Mittelwerten der Leistung geschilderte Verfahren wird analog angewendet, um eine Jahresdauerlinie zu erstellen. Die Erkenntnisse zu Zeit- und Deckungsanteilen lassen sich verwenden, um BHKWs (siehe Abschnitt 3.9.1) und Wärmepumpen (siehe Abschnitt 3.6.1) im Rahmen von Energiekonzepten zu bewerten bzw. auch deren Leistung zu planen.

Jahresdauerlinie aus einer großen Zahl gemessener Leistungswerte

Liegen Einzelleistungswerte im Stundentakt, Viertelstundentakt, Zehntelstundentakt o. ä. für den Gesamtzeitraum eines Jahres vor, kann eine Jahresdauerlinie projektspezifisch erstellt werden. Die Leistungswerte sind dazu lediglich zu sortieren und entsprechend in einem Diagramm darzustellen.

Ob die erfassten Messwerte ein typisches Jahr repräsentieren (Einflüsse der Witterung, Nutzung) – und damit Zeit- und Deckungsanteile verallgemeinerbar sind – ist projektbezogen zu entscheiden.

Jahresdauerlinie aus hochaufgelösten Bedarfssimulationen

Aus Bedarfsenergiebilanzen mit hoher zeitlicher Auflösung (üblich Stunden) lassen sich Jahresdauerlinien ableiten, die für mittlere Klima- und Nutzungsdaten gelten. Plausible Ergebnisse – im Abgleich mit der späteren Realität – sind zu erwarten, wenn das Nutzerverhalten realistisch eingeschätzt wird und die simulierte Jahresenergiemenge (Fläche unter der Kurve) in etwa dem tatsächlichen Verbrauch an Energie entspricht.

Jahresdauerlinie aus der EAV

Die Energieanalyse aus dem Verbrauch – EAV siehe Abschnitt 4.3 – liefert einen messtechnischen Zusammenhang von Leistung und Außentemperatur ($\dot{Q}$-ϑ_a-Diagramm). Die Überführung in eine Jahresdauerlinie (sortiertes $\dot{Q}$-t-Diagramm) setzt die Kenntnis der Häufigkeiten bestimmter Außentemperaturen (sortiertes ϑ_a-t-Diagramm) voraus.

Bild 114 zeigt die Häufigkeiten bestimmter Außentemperaturen für den Standort Magdeburg. Basis sind die Tageseinzelwetterdaten (des Deutschen Wetterdiensten) für einen 20-Jahres-Zeitraum. Eine Außentemperatur von 0°C ist beispielsweise an etwa 13 Tagen eines Jahres gemessen worden. Etwa 37 Tage sind in Summe kälter als 0°C. Die niedrigste erfasste Außentemperatur liegt bei etwa -17°C – sie kommt aber statistisch nur 0,2 Tage im Jahr vor.

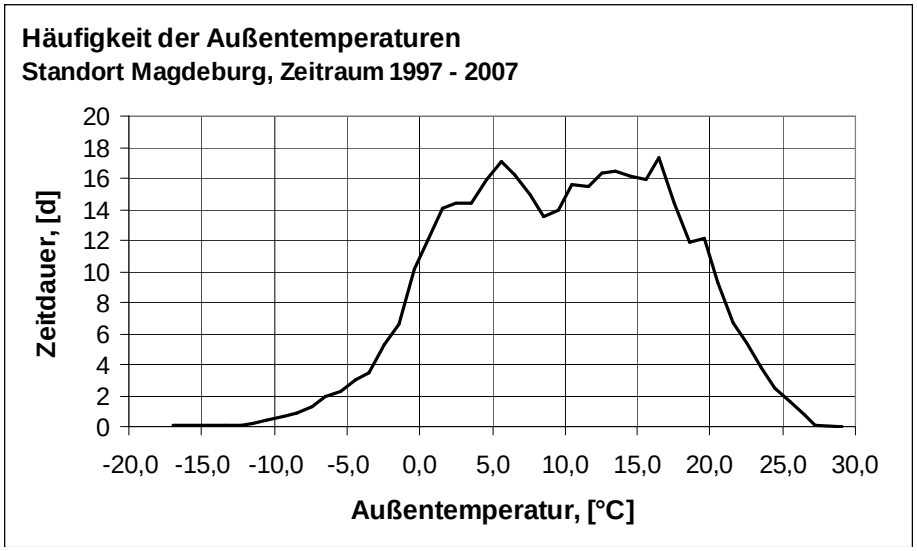


Bild 114 Häufigkeitsverteilung von Außentemperaturen für den Standort Magdeburg

Aus der Energieanalyse aus dem Verbrauch müssen bekannt sein:

- sofern vorhanden die Grundleistung als Maß für den witterungsunabhängigen Verbrauch, z. B. 4 kW
- die Heizgrenze ϑ_{HG}, oberhalb der kein Heizungsverbrauch mehr erkennbar ist, weil es interne und solare Gewinne im Gebäude gibt, z. B. 15°C
- die Steigung H als Maß für den witterungsabhängigen Verbrauch, z. B. 1,88 kW/K

Die angegebenen Beispielwerte gelten für ein Mehrfamilienhaus mit 18 Wohneinheiten als durchschnittlich sanierter Bestand.

Die Reproduktion der Jahrsdauerlinie läuft – z. B. mit Hilfe einer Tabellenkalkulation wie folgt ab:

- für jede Außentemperatur unterhalb der Heizgrenze wird beginnend mit der minimalen Außentemperatur bestimmt, welche witterungsabhängige Leistung sich jeweils ergibt,
- die witterungsunabhängige Leistung wird ggf. addiert,
- die Gesamtleistung wird über die Zeitdauer der Häufigkeit der betreffenden Außentemperatur in ein Diagramm eingetragen; es entsteht eine Teilfläche proportional zu der Energiemenge

Beispielsweise ergibt sich für 0°C Außentemperatur und das genannte Mehrfamilienhaus:

- witterungsabhängig: $\dot{Q}_{Heiz} = H \cdot (\vartheta_{HG} - \vartheta_a) = 1{,}88 \frac{kW}{K} \cdot (15-0)K = 28{,}2\,kW$
- witterungsunabhängig: $\dot{Q}_{Warmwasser} = 4\,kW$
- Gesamtleistung: $\dot{Q}_{Gesamt} = 32{,}2\,kW$
- im Zeitraum von 13 Tagen: $Q_{Gesamt} = 32{,}2\,kW \cdot 13\,d \cdot 24 \frac{h}{d} = 10.046\,kWh$

Das Diagramm der Jahresdauerlinie ergibt sich durch eine Aneinanderfügung der einzelnen Teilflächen in absteigender Leistung. Die Fläche maximaler Leistung ist nur sehr schmal. Insgesamt liegen 37 Tage unterhalb von 0°C, so dass sich das beispielhafte Rechteck zwischen dem 38. und 50. Tag erstreckt. Nach etwa 270 Tagen ist am Standort Magdeburg die Heizgrenze von 15°C erreicht und nur noch die Grundlast ist relevant. Mit Hilfe der Tabellenkalkulation werden die entstehenden Rechtecke ausgeglichen und eine homogene Fläche ohne erkennbare Leistungssprünge entsteht.

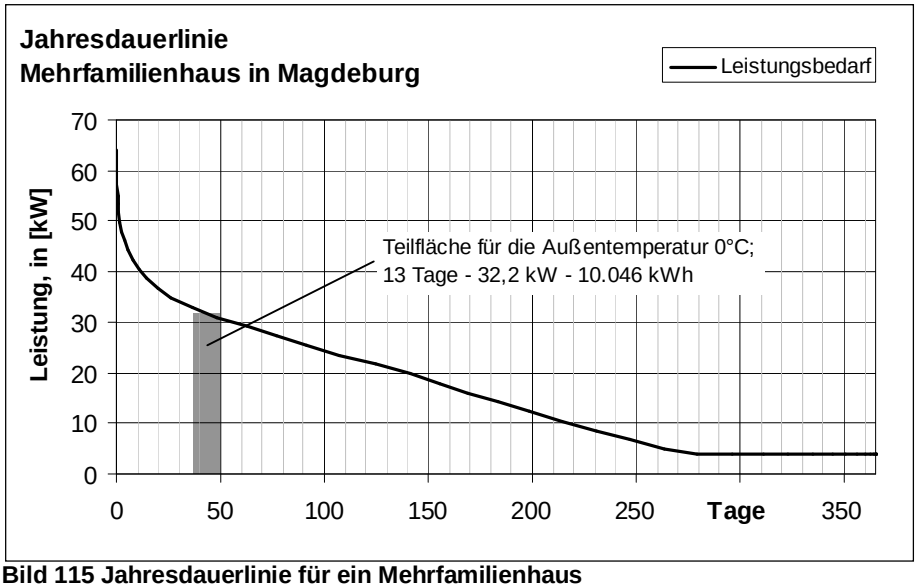


Bild 115 Jahresdauerlinie für ein Mehrfamilienhaus

Diese Art der Reproduktion der Jahresdauerlinie liefert sehr gleichförmige Leistungsverläufe, da von tagesmittleren Außentemperaturen ausgegangen wird und auch die internen und solaren Lasten vereinfacht ganzjährig konstant angesetzt werden. Es wird im gewählten Beispiel davon ausgegangen, dass die Wärmegewinne die Heizgrenze um ca. 5 K unter die vermutete Raumtemperatur von 20°C verschiebt. Entsprechend sind 5 K · 1,88 kW/K = 9,4 kW Fremdwärmeleistung im Mittel verfügbar.

Wichtig ist jedoch, dass die Fremdwärmeleistung bei der Bestimmung der Jahresdauerlinie und abschließender Auswertung der Deckungsanteile von Grund- und Spitzenlasterzeuger berücksichtigt wird.

Das Beispiel wird in Abschnitt 3.9.1 mit Wahl eines BHKW zu Ende geführt.

Jahresdauerlinie aus Heizlast

Sofern eine Heizlastberechnung für ein Gebäude vorliegt, kann diese ebenfalls Basis für die Erstellung einer Jahresdauerlinie sein. Anstelle der minimalen Außentemperatur wird jede beliebige höhere Außentemperatur in die Berechnung eingesetzt, z. B. in 1 K-Schritten. Die sich ergebenden Leistungen sind über der Zeitdauer ihres Auftretens aufzutragen. Das Verfahren ähnelt der Überführung der EAV in die Jahresdauerlinie.

Da die Heizlastberechnung i. A. keine Wärmegewinne berücksichtigt, sind diese anschließend zu berücksichtigen, z. B. mit Hilfe der Kennwerte aus Kapitel 3.2.6 (interne Wärmegewinne) und Kapitel 3.4.3 (solare Wärmegewinne). Die Gewinne sind von der Heizlast abzuziehen. Zudem ist ein ggf. vorhandener Leistungssockel, der sich aus der Trinkwassererwärmung ergibt zusätzlich zu berücksichtigen.

Jahresdauerlinie aus Monatsenergiebilanz

Sofern eine Monatsbilanz – z. B. aus einem EnEV-Nachweis – vorliegt, kann diese ebenfalls in eine näherungsweise Jahresdauerlinie überführt werden. Die Monatsenergiemengen für Heizung und Warmwasser (in kWh) sind durch die Stundenanzahl des Monats zu dividieren und somit in eine mittlere Dauerleistung (in kW) umzurechnen. Anschließend sind die Werte absteigend zu sortieren und grafisch aufzubereiten, siehe Bild 116. Das gewählte Beispiel ist ein neues Wohnhaus mit ca. 600 m² Fläche.

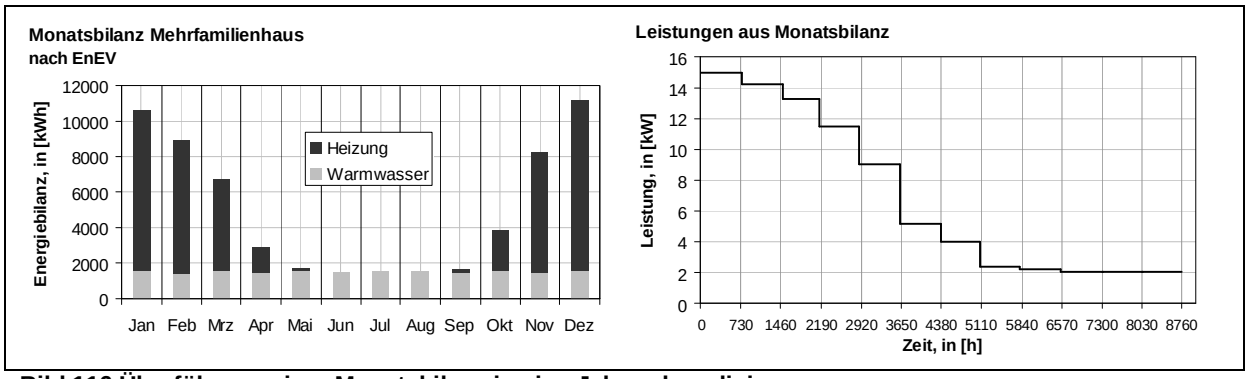


Bild 116 Überführung einer Monatsbilanz in eine Jahresdauerlinie

Durch die sehr grobe Auflösung mit nur 12 Einzelleistungen wird insbesondere der kälteste Monat nicht korrekt abgebildet. Die Lastspitzen sehr kalter Tage können nicht dargestellt werden. Eine zusätzliche Heizlastberechnung liefert weitere Erkenntnisse. Die sich ergebenden Deckungsanteile zweier Erzeuger werden dennoch vergleichsweise gut wiedergegeben, sofern die Leistung des Grundlasterzeugers nicht zu hoch angesetzt wird.

4.6 Energiebedarfsbilanz

Parallel zur Verbrauchsauswertung werden Energiebedarfsbilanzen zur Analyse und Bewertung eingesetzt – insbesondere in Fällen, bei denen keine Verbrauchsmessungen möglich sind, z. B. vor Errichtung des Gebäudes oder Inbetriebnahme einer Anlage. Bei der Energiekonzepterstellung wird heute noch weitgehend auf Bedarfsbilanzen zurückgegriffen, um den zukünftigen Energiekennwert nach Optimierung, Modernisierung usw. zu prognostizieren.

Mit Bedarfsbilanzen werden reale Prozesse modelliert. Dabei ist die Aussagekraft der Ergebnisse abhängig von einerseits der Realitätsnähe des Modells und andererseits der Wahl geeigneter Randdaten bei der Berechnung. Einen Überblick über die gängigen Modelle, mit denen Energieumwandlungsprozesse ("Energienutzung") abgebildet werden, geben nachfolgende Ausführungen. Realitätsnahe Randdaten ergeben sich aus dem konkreten Projekt. Typische Werte sind in Abschnitt 3 zusammengestellt.

In vielen Projekten ergibt sich – wenn das Konzept aussagekräftig sein soll – ein fließender Übergang zwischen der Messung von Energiemengen (Verbrauchsbewertung) und der Berechnung (Bedarfsbewertung). Dies gilt umso mehr, wenn Sonderverbraucher aller Art bilanziert und bewertet werden sollen. Da es häufig an tiefgründigem theoretischen Wissen und typischen Kennwerten fehlt, greift der Berater auf eine Mischung aus Messwerten und wenigen physikalischen Grundgleichungen zur Analyse zurück.

4.6.1 Grundsätzlicher Bilanzablauf

Die Energiebedarfsbilanz hat das Ziel eine Energiemenge rechnerisch zu prognostizieren. In der Regel handelt es sich dabei um die Endenergie oder eine daraus abgeleitete Größe (Primärenergie, Emission, Energiekosten, Brennstoffmenge). Die Endenergie für Liegenschaft, Gebäude, Gerät usw. ergibt sich aus einer Reihe von Teilkennwerten/Einflussgrößen, die additiv oder multiplikativ (jeweils incl. Kehrwert) miteinander verrechnet werden.

Grundsätzlicher Aufbau aller Bilanzverfahren

Die Energiebedarfsbilanz beginnt regulär bei der Feststellung oder Festlegung eines Nutzens. Die Rechenoperationen für komplexe Verbraucher verfolgen alle vorgelagerten Prozesse anschließend entgegen des Energieflusses. Die Bilanzrichtung erfolgt in Richtung der Bedarfsentwicklung (vom Nutzen ① über die Zwischenschritte "a" bis "c" bis zur Endenergie ⑦), also entgegen des Energieflusses, siehe Bild 117.

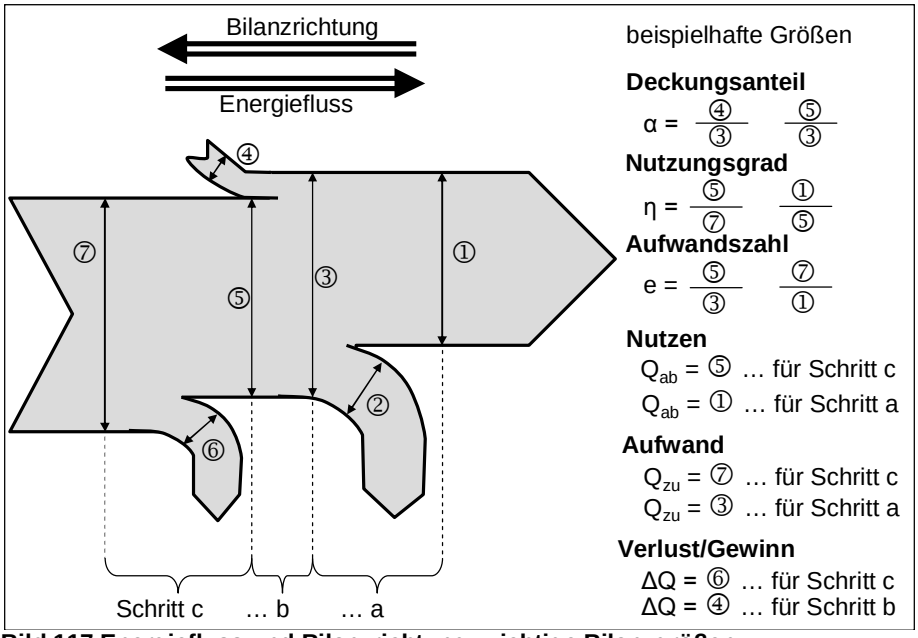


Bild 117 Energiefluss und Bilanzrichtung, wichtige Bilanzgrößen

Erläuterung: Bild 117 könnte beispielsweise das Bilanzflussbild für den Endenergiebedarf der Trinkwarmwasserbereitung (⑦) darstellen. Zunächst wird die benötigte Nutzenergie (①) ermittelt, d.h. die im gezapften Trinkwarmwasser enthaltene Energiemenge. Sie ist der Ausgangswert für die weitere Bilanzierung.

Anschließend werden mit der Anlagentechnik verbundene Verlustgrößen (Schritte "a" und "c") und Gewinngrößen (Schritt "b") bestimmt. In der Reihenfolge der Berechnung: Verteil- und Speicherverluste (②, Schritt "a"), Gewinn einer Solarthermieanlage (④, Schritt "b"), Abgas- und Betriebsbereitschaftsverluste der Erzeugung über einen Kessel (⑥, Schritt "c").

Die Bewertung aller Prozesse zwischen Nutzen (①) und Endenergie (⑦) erfolgt mit Hilfsgrößen bzw. Teilkennwerten.

Dies sind absolute bzw. einheitenbehaftete Größen (②, ④, ⑥, in kWh, kWh/m² o. ä.), die addiert oder subtrahiert werden. Oder es wird auf relative bzw. einheitenlose Größen zurückgegriffen. Dies sind Nutzungsgrade (η, Nutzen je Aufwand) oder Aufwandszahlen (e, Aufwand je Nutzen), die einen oder mehrere zusammengefasste Prozessschritte bewerten. In Bild 117 sind einige, aber nicht alle möglichen Nutzungsgrade und Aufwandzahlen dargestellt.

Zu guter letzt finden sich bei der Beschreibung einer Bedarfsbilanz auch Deckungsanteile (α) wieder, ebenfalls relative Größen. Sie kommen zum Einsatz, wenn mehrere Prozesse parallel ablaufen und einen gemeinsamen Nutzen bereitstellen. Im Beispiel wären das die Solarthermieanlage (Deckungsanteil ④/③) und der Kessel (Deckungsanteil ⑤/③). Die Summe aller Deckungsanteile (eines Prozessschrittes) ist 1,0.

Das Bilanzflussbild ist reproduzierbar, wenn für jeden Prozessschritt zwischen Aufwand und Nutzen entweder eine Verlust/Gewinnenergiemenge (additiv, einheitenbehaftet) oder relative Größen (multiplikativ, einheitenlos) zur Beschreibung bekannt sind. Viele Energiebilanzverfahren mischen die Verwendung von einheitenbehafteten und einheitenlosen Größen.

Das für eine Wärmeanwendung geschilderte Verfahren ist grundsätzlich auch auf andere Arten von Energieumwandlung übertragbar, d.h. die Ermittlung der Endenergie für eine Heizungspumpe aus der hydraulischen Arbeit mit Verlusten für Pumpe und Motor.

Hinweis: den Autoren ist bekannt, dass es im eigentlichen Sinne keine "Gewinne und Verluste" gibt, wenn über Energieumwandlungsprozesse gesprochen wird. Die beiden Begriffe stehen

(unter anderem in vielen einschlägigen Regelwerken) für Energieströme, die in den vorher definierten Bilanzraum von außen eindringen oder ihn nach außen verlassen.

Grundgleichungen der Endenergie für Gebäude

Der häufigste Fall der Energiekonzepterstellung betrifft Gebäude. Im Wohnungsbau ist ein Endenergieeinsatz für Wärme und Strom zu verzeichnen. Es ergeben sich folgende Grundgleichungen:

- Heizwärmebedarf: $Q_h = Q_T + Q_V - (Q_I + Q_S)_{Nutz}$
- zu erzeugende Wärmeenergie: $Q_{outg} = Q_h + Q_w + Q_d + Q_s$
- Endenergie für Wärme: $Q_E = Q_{outg} + Q_g - Q_{reg}$
- Endenergie für Strom: $Q_E = Q_{HE} + Q_{B+G} - Q_{reg}$

Der Heizwärmebedarf (Q_h) entspricht der Energiemenge, die den beheizten Räumen zugeführt werden muss. Je nach Bedarfsbilanzverfahren mit leicht veränderter Definition: entweder als Wärmeabgabe der Heizflächen oder als Wärmeabgabe des Systems aus Heizflächen und Rohrleitungen. Weitere Erläuterungen siehe Abschnitt 2.4.

Der Heizwärmebedarf ergibt sich aus der Bilanz der Verluste für Transmission (Q_T) und Lüftung (Q_V) sowie der nutzbaren Gewinne aus inneren Quellen (Q_I) und Solarstrahlung (Q_S). Die eingeführten Bedarfsbilanzen wählen verschiedene Ansätze, um die Nutzbarkeit einer Fremdwärme zu bestimmen. Auch ist der Umfang der bilanzierten Gewinne verschieden. Als innerer Gewinn zählt seltener die Abwärme der gebäudetechnischen Anlagen, als solarer Gewinn nur manchmal der Ertrag über nichttransparente Hüllflächen.

Die zu erzeugende Wärmeenergie (Q_{outg}) beinhaltet den Heizwärmebedarf (Q_h) sowie die Nutzwärmemenge für Trinkwarmwasser (Q_w), welche die gezapfte Warmwassermenge repräsentiert. Neben den beiden Nutzwärmemengen fallen im System ggf. Verteilverluste (Q_d) und Speicherverluste (Q_s) an, die ebenfalls zu erzeugen sind. Die eingeführten Bedarfsbilanzen ergänzen und modifizieren diese Grundgleichung. Die Verlustgrößen werden teilweise als Nutzungsgrade oder Aufwandszahlen ausgedrückt. Darüber hinaus werden teilweise zusätzliche Größen eingeführt, um die Effizienz der Übergabe und Regelung auszudrücken.

Die Endenergie für Wärme (Q_E) ergibt sich aus der zu erzeugenden Wärmemenge (Q_{outg}) sowie den Verlusten des eingesetzten Erzeugers (Q_g). Wird im Gebäude regenerative Energie (Q_{reg}) nutzbar gemacht, wird diese abgezogen, da die Endenergie üblicherweise nur den Aufwand von käuflich erworbenen Energiemengen umfasst. Die eingeführten Bedarfsbilanzen wählen ggf. modifizierte Arten der Darstellung dieser Bilanz mit Deckungsanteilen, Nutzungsgraden und Aufwandszahlen.

Die Endenergie für Strom (Q_E) setzt sich zusammen aus den Hilfsenergien (Q_{HE}) sowie den weiteren Mengen für die Beleuchtung und Gerätenutzung (Q_{B+G}). Die eingeführten Bilanzverfahren erfassen in der Mehrheit nur den erstgenannten Anteil. Darüber hinaus kann ebenfalls nutzbar gemachte regenerative Energie (Q_{reg}) als Gewinn abgezogen werden. Ein Teil der Stromaufwendungen (insbesondere Q_{B+G}) ist gleichzeitig als innerer Gewinn (Q_I) zu verbuchen.

Die Grundgleichungen finden auch im Nichtwohnbau Anwendung. Sie werden entsprechend (analog) ergänzt, wenn für das Gebäude zusätzlicher Aufwand für Kälteversorgung, Dampfversorgung oder raumlufttechnische Anlagen notwendig ist sowie elektrische Maschinen betrieben werden.

Wenn Liegenschafen mit gemeinsamer Versorgung bilanziert werden, dann sind Kettenrechnungen erforderlich. Die innere Ebene der Bilanz mit Nutz- und Verlustmengen wird durch die

Gebäude gebildet. Für sie ergibt sich jeweils eine Endenergie. Die externen Versorgungsanlagen bilden die äußere Ebene. Für diese sind ebenfalls Nutz- und Verlustmengen zu bilanzieren. Dabei sind die Endenergien der Gebäude gleichzeitig die Nutzenergiemengen des externen Versorgungssystems.

Arten von bilanzierten Energiemengen

Jeder Energiestrom, der in den Bilanzraum hineinfließt, bzw. jeder Energiestrom, der aus diesem wieder herausfließt, kann bilanziert werden. Die aufgewendeten Energien sind meistens:

- elektrische Energie (Strom),
- Wärmeenergie (Fernwärme, Nahwärme, Personenabwärme),
- Strahlungsenergie (Solarwärme) oder
- chemisch gebundene Energie (Gas, Öl, Kohle, Holz)

Im Bilanzraum werden sie genutzt, das heißt teilweise umgewandelt, und treten im Allgemeinen in Form von Wärmeenergie aus dem Bilanzraum aus.

Eine Energiebilanz erfasst alle oder einen Teil dieser Energien in einer definierten Zeitperiode (z. B. ein Jahr). Dabei spielt es keine Rolle, ob eintretende oder austretende Energien bilanziert werden, denn aufgrund der Energieerhaltung sind diese beiden Mengen gleich groß.

Üblicherweise ist das Ziel einer Energiebilanz, den Teil der einfließenden Energien zu bilanzieren, für dessen Bereitstellung ein Primärenergieträger verbraucht wird (endlicher Rohstoff) oder der käuflich erworben werden muss. Diese Energiemenge stimmt nicht zwangsläufig mit dem Energieinput überein. Denn der Energieinput umfasst auch Energien (wie solare Einstrahlung usw.), die nicht gekauft werden müssen oder die keinen endlichen Rohstoff verbrauchen.

Kennwerte für Klima, Nutzung, Gebäude und Technik

Die meisten Energiekonzepte werden – aus heutiger Sicht – für Einzelgebäude erstellt. Die damit verbundenen Fragestellungen betreffen Auswirkungen der Änderung der Gebäudehülle (Dämmung, Dichtheit), Wärme- und Kälteversorgungstechnik (Art der Erzeugung, Verteilnetze, Speicher), Beleuchtung, seltener auch den Gerätestrom. Darüber hinaus sind die mit der Nutzung (Raumklimabedingungen, Behaglichkeit, Nutzungszeiten) und Betriebsführung (Regelung, Automation) verbundenen Einflüsse auf Energieströme interessant.

Die Bedarfsbilanz muss demzufolge die in Bild 118 dargestellten Einflussgrößen sinnvoll abbilden, d.h. als Einzeleinfluss, aber auch hinsichtlich der gegenseitigen Beeinflussung.

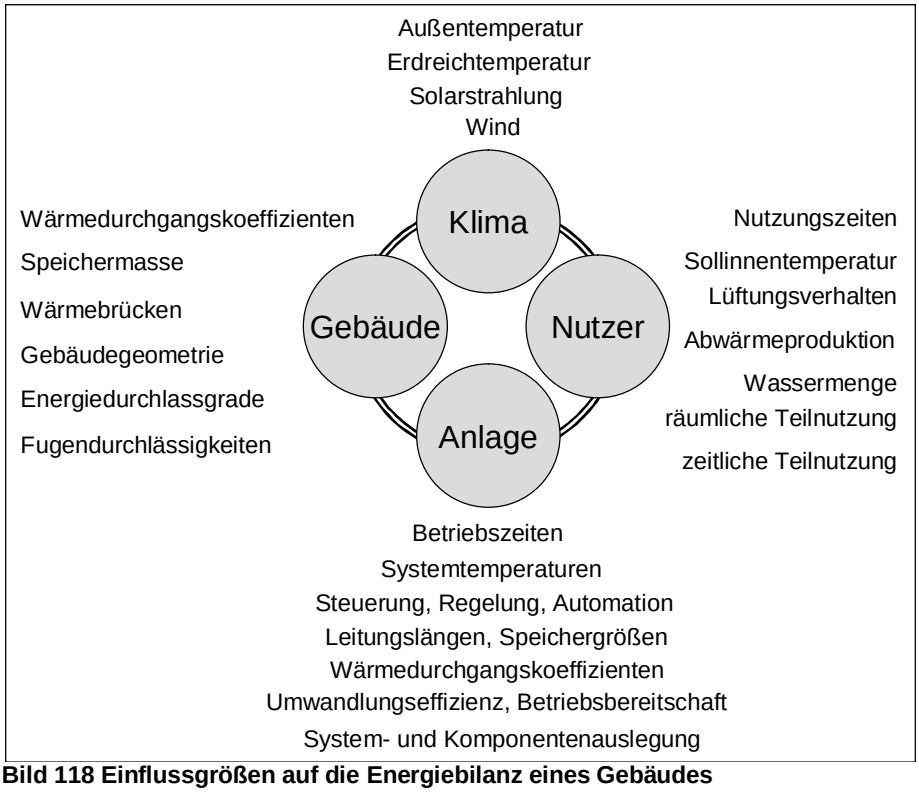


Bild 118 Einflussgrößen auf die Energiebilanz eines Gebäudes

Normierte und reale Randdaten

Eine Energiebedarfsbilanzierung kann unter Verwendung von normierten oder realen Randdaten erfolgen – je nach Anwendungszweck und angestrebter Realitätsnähe.

Normiert werden beispielsweise Klima- und Nutzungsranddaten, sofern die Bilanzergebnisse in EnEV-Nachweisen, Energieausweisen, KfW-Fördermittelanträgen (Effizienzhaus) verwendet werden.

Es gibt auch standardisierte Kennwerte für Gebäuderanddaten (U-Werte, Wärmebrückenzuschläge usw.) und zur Beschreibung der Anlagentechnik (Erzeugereffizienzen, Kennwerte für die Regelgüte, Leitungslängen usw.). Sie werden eingesetzt, sofern entsprechende reale Werte:

- bei Bestandsbauten nicht (mehr) ermittelbar sind,
- bei Neubauverfahren noch nicht exakt bekannt,
- nur mit aufwändigen Berechnungen und Simulationsverfahren ermittelbar wären.

Bei der Ergebnisinterpretation ist die gewählte Vorgehensweise zu berücksichtigen. So kann (nicht muss!) das Bilanzergebnis bei Verwendung von normierten Randdaten sehr weit weg von realen Verbrauchsdaten liegen. Dennoch lassen sich mehrere unter normierten Randdaten berechnete Bedarfsergebnisse untereinander vergleichen (das ist das Ansinnen von EnEV-Nachweisen und Energieausweisen).

Zuordnung der Phänomene

Für die mathematische Beschreibung der Energieflüsse wird auf Gleichungen zurückgegriffen, die teils empirisch abgeleitet wurden, teils physikalisch nachvollziehbar sind. Bild 119 fasst die Einflussgrößen auf das Bilanzergebnis eines Gebäudes mit ähnlicher Herangehensweise bei der Bewertung zusammen.

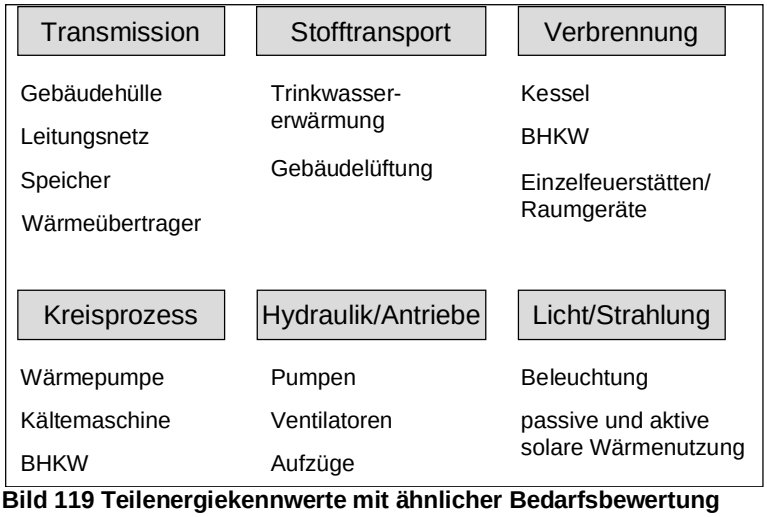


Bild 119 Teilenergiekennwerte mit ähnlicher Bedarfsbewertung

Den Transmissionsvorgängen gemein sind die fehlende Energieumwandlung und der fehlende Stofftransport. Es handelt sich um reine Wärmetransportvorgänge, wie sie sich durch die Wandflächen von Gebäuden, Rohrleitungen, Speichern und Wärmeübertragern (Übergabestation) aufgrund von Temperaturdifferenzen beiderseits der Wand ergeben. Eine nähere Beschreibung üblicher Rechenansätze folgt unter Abschnitt 4.6.2.

Die mit dem Stofftransport verbundenen Bilanzgleichungen erfassen Luft- und Wasserströme, die den Bilanzraum mit einer anderen Temperatur verlassen als sie diesen betreten haben. Weitere Erläuterungen folgen unter Abschnitt 4.6.3.

Bei Verbrennungsprozessen innerhalb des Bilanzraumes wird die Effizienz der chemischen Umwandlung bewertet, siehe Abschnitt 4.6.4. Die Bewertung von Kreisprozessen in Wärmepumpen und Kältemaschinen folgt rechnerisch den thermodynamisch-theoretischen Ansätzen von Carnot, siehe Abschnitt 4.6.5.

Prozesse der Ausübung mechanischer Arbeit bei Pumpen, Ventilatoren, im weiteren Sinne auch Aufzügen und anderer Motoren werden mit ähnlichen Ansätzen bewertet, siehe Abschnitt 4.6.7.

Es bleibt eine Reihe von weiteren Einzelphänomenen, die separate Rechenansätze erhalten, z. B. die Bewertung von Photovoltaikanlagen, solare Einstrahlung durch Fenster bzw. auf eine Solarthermieanlage.

Bilanzzeit und Zeitschritte

Der übliche Gesamtzeitraum für eine Energiebilanz ist ein Jahr. Die dabei gewählten Längen eines Zeitschrittes variieren stark von Sekunden (z. B. Simulation von Kesseln) über Zehntelstunden (z. B. Simulation von RLT), Stunden (z. B. Solar-, Photovoltaik-, Gebäudesimulation) und Monate (z. B. Gebäudebilanz im EnEV-Nachweis) bis zu einem Jahr. Bei einer Bilanzschrittweite von einer Stunde und weniger spricht man i. A. von "Simulation", sonst von "Berechnung".

Je länger der gewählte Zeitschritt, desto mehr Aufwand bedeutet es, repräsentative Randdaten für das Intervall so festzulegen, dass das Bilanzergebnis mit dem tatsächlichen Verbrauch übereinstimmt. Als Beispiel sei der Luftwechsel genannt, für den im EnEV-Nachweis die Angabe eines repräsentativen Wertes für eine gesamte Heizperiode notwendig ist (incl. Tag-/Nachtphasen, An-/Abwesenheit im Gebäude, Einfluss der Witterung und Gebäudedichtheit, Einfluss von internen Lasten wie Kochvorgängen u. ä.).

Je kürzer der gewählte Zeitschritt, desto genauer müssen alle veränderlichen Eingangsdaten in die Bilanz aufgelöst sein, um eine Rechengenauigkeit nicht nur vorzutäuschen: es ist bei einer Simulation nicht sinnvoll, nur einzelne Randdaten stündlich zu verändern, andere Veränderliche jedoch nicht, wenn Wechselwirkungen vorhanden sind. Beispiel: bei der Simulation eines Gebäudes müssen die oben genannten Größen, d.h. Witterung, Nutzerverhalten incl. An-/Abwesenheit, interne Lasten stundengenau eingesetzt werden, um deren Beeinflussung, Überlagerung usw. sichtbar zu machen. Es ist nicht sinnvoll, die Witterung stundengenau vorzugeben, aber den Nutzer mit über den Tag konstantem Verhalten.

Umgang mit zeit- bzw. lastunveränderlichen Randdaten

Die genannten Phänomene der Transmission, des Stofftransports, der Verbrennung usw. lassen sich realitätsnah und mit einfachen physikalischen Gleichungen abbilden, solange es sich um stationäre Vorgänge mit zeit- bzw. lastunveränderlichen Randdaten handelt. Solche Prozesse gibt es bei der Bewertung von Energieverbrauchern jedoch nur selten: der Betrieb vieler Antriebe von wechselnden Drehzahlen und drehzahlabhängigen Wirkungsgraden ist instationär, der Betrieb eines Gebäudes ist geprägt von Aufheiz- und Abkühlvorgängen.

Die Energiebedarfsbilanz muss in der Lage sein, instationäre Vorgänge und lastveränderliche Größen möglichst korrekt abzubilden – und zwar unabhängig von der gewählten Zeitschrittweite für die Bilanzierung.

Die korrekte Bilanzierung lastveränderlicher Größen ist problematisch, wenn der gewählte Bilanzschritt (z. B. ein Monat) deutlich größer ist als die real auftretenden Lastwechsel (z. B. innerhalb von Minuten) und Zusammenhänge von Bilanzgrößen nichtlinear sind. Beispiel: bilanziert wird der Pumpenstrom im Monatsbilanzverfahren, der Pumpenwirkungsgrad hängt nichtlinear mit der Auslastung der Pumpe zusammen, die realen Lastwechsel erfolgen im Minutentakt. Es ist nur bedingt korrekt, die monatsmittlere Auslastung anzusetzen. Denn es macht einen Unterscheid, ob die Pumpe permanent bei 25 % Auslastung oder zur einem Drittel bei 5 % und zu zwei Dritteln der Zeit mit 35 % Auslastung gelaufen ist. Für lastabhängige Größen wird der Fehler bei der Bilanzierung klein, wenn:

- die lastveränderliche Größe grundsätzlich mathematisch beschreibbar ist (Funktion Pumpenwirkungsgrad abhängig von der Belastung),
- Lastwechsel bzw. Lastanforderungen zeitlich genau bekannt sind (wann wird wie viel Volumenstrom und Druckerhöhung benötigt)
- in der Energiebilanz die Weite der Bilanzzeitschritte entsprechend klein gewählt wird.

Diese optimalen Randdaten sind in realen Energiebilanzverfahren meist nicht (komplett) gegeben, so dass mit Korrekturfaktoren operiert wird. Sie gleichen die Fehler einer Bilanzierung mit sehr kleinen Zeitschritten und der gewählten groben zeitlichen Rasterung aus. Abgleitet werden sie aus Simulationen oder empirisch durch Vergleich mit Messwerten.

Eine Alternative ist die Verwendung von (typisierten) Häufigkeitsverteilungen für bestimmte Lastfälle innerhalb des betrachteten Bilanzzeitschrittes. So werden häufig Wärmepumpen- bzw. Kältemaschineneffizienzen gewichtet, wenn der Fehler aufgrund der groben Bilanzraster (Monate) zu groß werden würde.

Korrekturverfahren aller Art nähern die Realität jedoch nur an! Im Einzelfall bleiben Fehler.

Ein ähnlich gelagertes Problem ergibt sich aus allen Phänomenen der Ein- und Ausspeicherung von Energiemengen und damit einer Unterbrechung der ansonsten stationären Vorgänge. Beispiel: die Auskühlung und Aufheizung eines Gebäudes mit jeder Nachtphase. Der Fehler bei der Bilanzierung wird klein, wenn:

- Speichervorgänge zeitlich genau bekannt sind (wann findet welche Temperaturerhöhung und Absenkung im Gebäude statt) und in der Energiebilanz die Weite der Bilanzzeitschritte entsprechend klein gewählt wird,
- oder wenn die instationären Anteile am Gesamtenergiefluss gering sind (einmaliges Wiederaufheizen eines Gebäudes nach einem Urlaub).

Die Energiebedarfsbilanzen führen auch für die Abbildung instationärer Phänomene Näherungsgleichungen und/oder Korrekturterme ein. Alternativ wird versucht, durch Wahl und Festlegung geeigneter Mittelwerte der betroffenen Größen (Temperaturen, Luftwechsel) eine Näherung zu erzielen.

Von der Näherung betroffene lastveränderliche oder instationäre Größen bzw. Phänomene im Überblick:

- Auswirkungen der Regelungstechnik auf die Technik in Wechselwirkung mit dem Nutzer (Pumpen- und Beleuchtungsregelung, Regelung von Wärmepumpen und Kältemaschinen, Regelung der Temperatur im Raum je nach Speichermasse der Heizfläche),
- Änderungen der internen und solaren Lasten (kurzfristige Lastwechsel durch verändertes Nutzerverhalten oder Solarstrahlung und Rückwirkungen auf die Wärmeenergiebilanz),
- Nacht- und Wochenendabsenkungen und -schaltungen sowie alle Arten intermittierender Betriebsweisen von Technik.

4.6.2 Wärmetransportvorgänge

Das am häufigsten vorkommende Phänomen, welches in einer Bedarfsberechung abgebildet werden soll, ist die Transmission. Der übliche Formelansatz lautet:

$$Q = U \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot t$$

Die Energiemenge ergibt sich aus einem Wärmedurchgangskoeffizienten (U), der wärmeübertragenden Fläche (A), abhängig von den beiden Temperaturen beiderseits der Fläche (ϑ_1, ϑ_2) sowie der betrachteten Zeit (t).

Die Wärmetransportgleichung erscheint in dieser ursprünglichen Form seltener im üblichen Regelwerk (Normen, Richtlinien) für die Bedarfsbilanzierung. Die modifizierten Varianten sollen nachfolgend vorgestellt werden.

Gebäudehülle

Wenn der Wärmefluss über die Gebäudehülle beschrieben wird, ergibt sich zunächst eine Summation aller Einzelwärmeflüsse der gesamten wärmeübertragenden Umfassungsflächen des Bilanzraumes.

$$Q = \sum (U \cdot A \cdot F_x) \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot t = H_T \cdot Gt$$

Für die Erfassung der Flächen (A) gilt im üblichen Regelwerk für Deutschland der Außenmaßbezug.

Für jede Fläche (A_i) gilt prinzipiell eine spezielle Temperaturdifferenz, abhängig von der rückseitigen Temperatur (Keller, Erdreich, anderes Gebäude usw.). Das übliche Regelwerk ändert die Gleichung jedoch dahingehend, dass stattdessen ein Temperaturkorrekturfaktor (F_x) ergänzt wird. Er drückt aus, dass für die betrachtete Teilfläche eine andere Temperaturdifferenz gilt (als die Differenz von Innentemperatur ϑ_i zu Außenlufttemperatur ϑ_e). Typische F_x-Werte werden in Abschnitt 3.4.2 angegeben.

Der Wärmedurchgangskoeffizient U enthält die Wärmeleitung im Bauteil, aber auch anteilig den Wärmeübergang durch Konvektion und Strahlung an den Oberflächen. Typische U-Werte werden in Abschnitt 3.4.2 (opake Bauteile) und 0 (transparente Bauteile) angegeben.

Die einzusetzenden Temperaturen ϑ_i und ϑ_e sind im Allgemeinen repräsentative Mittelwerte für das festgelegte Zeitintervall t. Soll beispielsweise eine Monatsbilanz erfolgen, sind repräsentative Monatsmittelwerte einzusetzen. Die Innentemperatur enthält somit alle zeitveränderlichen Effekte von vorhandenen Absenkphasen.

Der Term aus Temperaturdifferenz und Zeit $(\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot t$ ist die Gradtagszahl, typische Werte siehe Abschnitt 3.3.1. Der Teilterm $\Sigma(U \cdot A \cdot F)$ wird als spezifischer Transmissionswärmeverlust (H_T) zusammengefasst. Er enthält regulär zusätzlich Wärmebrücken, siehe nachfolgende Erläuterungen.

Wärmebücken

Wärmebrücken sind Orte eines veränderten Wärmeabflusses in der Gebäudehülle und werden in allen gängigen Bedarfsbilanzen rechnerisch berücksichtigt. Sie stellen einen linien- oder punktförmigen Transmissionswärmestrom dar. Berechnet werden üblicherweise nur die längenbezogenen Werte aufgrund von Materialwechseln, Einbaukanten, Gebäudeecken usw. Der Rechenansatz wird entsprechend modifiziert. Anstelle der Regelflächen ergibt sich das Summenprodukt aus längenbezogenen Wärmeverlusten (Ψ) und entsprechenden Lauflängen der Wärmebrücken (L).

$$Q = \sum (\Psi \cdot L) \cdot Gt = (\Delta U_{WB} \cdot A) \cdot Gt$$

Vereinfacht wird mit pauschalen flächenbezogenen Zuschlägen (ΔU_{WB}) hantiert, die auf die gesamte wärmeübertragende Fläche (A) angesetzt werden. Typische Werte siehe Abschnitt 3.4.4.

Rohrnetz

Die Wärmeabgabe des Rohrnetzes ist ebenfalls ein Transmissionsphänomen. Da ein Rohrnetz regulär aus mehreren Abschnitten besteht, ergibt sich ebenfalls eine Summation über alle Abschnitte.

$$Q = \sum (U \cdot L \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot t)$$

Maßgeblich für die Wärmeübertragung ist die wärmeübertragende Oberfläche des Rohres. Da bei Kreisquerschnitten an jeder Grenzschicht eine andere Hüllfläche zu verzeichnen wäre, vereinfachen die üblichen Bedarfsbilanzen das Problem. Es werden längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten (U) für Rohre eingeführt, die allerdings durchmesserabhängig sind. Typische Werte siehe Abschnitte 3.6.3 (Heizung), 3.8.3 (Trinkwarmwasser) und 3.9.3 (Nah- und Fernwärme). Zusätzlich wird die Lauflänge der Rohre (L) benötigt.

Die maßgeblichen Temperaturen im Rohr (ϑ_i) und in der Umgebung der Verlegung (ϑ_e) hängen wiederum von der Bilanzzeit (t) ab. Für durchgängig und temperaturkonstant betriebene Rohre (24 h-Trinkwarmwasserzirkulation) sind Randdaten einfach bestimmbar. Bei periodisch durchflossenen Leitungsabschnitten (Stichleitungen, Anbindeleitungen) und bei Netzen mit Regelfunktionen (Witterungsführung, Zeitprogramme) wird mit repräsentativen Mittelwerten im Zeitintervall operiert.

Speicher

Die Transmissionswärmeverluste von Speichern ergeben sich in den üblichen Bedarfsbilanzen aus Prüfstandswerten, da wärmeübertragende Hüllflächen aufgrund der komplizierteren Speichergeometrie schwer bestimmbar sind. Es gilt die Annahme, dass die wärmeübertragende Fläche (A) und deren U-Wert (U) konstant sind. Damit lässt sich ein Prüfstandsverlust ($Q_{Prüf}$) in einen Realwert (Q) umrechnen. Es müssen die Prüfstandstemperaturdifferenz $(\vartheta_i - \vartheta_e)_{Prüf}$ sowie die realen Betriebstemperaturen bekannt sein.

$$U \cdot A = \frac{Q_{Prüf}}{t \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)_{Prüf}} = \frac{Q}{t \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)}$$

Hinsichtlich repräsentativer Temperaturen im betrachteten Zeitraum (t) gelten die für das Rohnetz getätigten Aussagen entsprechend. Typische Speicherkennwerte siehe Abschnitte 3.6.1 (Heizung) und 3.8.1 (Trinkwarmwasser).

Wärmeübertrager

Die Transmissionsgleichung gilt ebenfalls für alle Wärmeübertrager, z. B. eine Übergabestation in der Fernwärme oder eine Wärmerückgewinnungseinrichtung einer Lüftungsanlage. Einerseits kann der Übertrag von Wärme des einen Mediums auf das andere bilanziert werden, andererseits der Wärmeverlust des Bauteils an seine Umgebung.

Die üblichen Bedarfsbilanzen erfassen das erstgenannte Phänomen nicht separat. Es wird häufig von verlustfreier Übertragung ausgegangen, d.h. die dem einen Stoffstrom (z. B. Fernheizwasser) entnommene Wärmemenge ist genauso groß wie die dem zweiten Stoffstrom (z. B. Gebäudeheizwasser) zugeführte.

Einige Bedarfsbilanzverfahren berechnen allerdings das zweitgenannte Phänomen, d.h. Oberflächenverluste der Wärmeübertrager (analog zu allen anderen Komponenten einer Versorgungsanlage) oder Mehraufwendungen aufgrund nicht optimaler Regelung.

Für Wärmeübertrager sind dennoch Effizienzmerkmale bestimmbar. Sie kennzeichnen Verhältnisse von übertragener Energie zu maximal übertragbarer Energie. Mit Hilfe eines bekannten "Übertragungsgrades", "Wärmerückgewinnungsgrades" o. ä. und der Transmissionsgleichung lassen sich die Temperaturen auf beiden Übertragerseiten berechnen.

Wärmeübertragung durch Strahlung

Ein besonderes Phänomen ist die Wärmeübertragung durch Strahlung. Für nichttransparente Oberflächen enthält der Wärmedurchgangskoeffizient (U) anteilig dieses Wärmetransportphänomen. Die üblichen Bedarfsbilanzen berechnen den Strahlungsdurchtritt durch die transparente Gebäudehülle separat nach folgendem Grundansatz:

$$Q = \sum (I \cdot g \cdot A \cdot \Pi F_i) \cdot t$$

Die Strahlungsenergiemenge hängt vom Strahlungsangebot außerhalb des Gebäudes (I) ab, welches nach Himmelsrichtung und Neigung der Fläche verschieden ist. Typische Werte siehe Abschnitt 3.3.2. Darüber hinaus werden die transparenten Flächen benötigt. Die üblichen Bedarfsbilanzen verwenden allerdings zum Berechnen die Rohbauöffnungsmaße der Fenster und ggf. Türen (A). Der tatsächliche Glasanteil des Bauteils ist geringer, was durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt wird. Ebenfalls korrigiert werden Phänomene wie Verschattung (natürlich und durch Verschattungseinrichtungen) von Glasflächen, Verschmutzung, Reflexion an Scheiben. Es kommt für alle genannten Effekte regulär ein Produkt diverser Korrekturen (ΠF_i) zum Einsatz. Weiterhin spielt der Energiedurchlassgrad (g) der Scheiben eine Rolle. Typische Werte für transparente Bauteile siehe Abschnitt 3.4.3.

Für die zeitveränderlichen Größen, d.h. die Strahlungsleistung (I) sowie Energiedurchlassgrade (g) und diverse Korrekturfaktoren (F) sind ggf. repräsentative Mittelwerte für den Bilanzzeitraum (t) einzusetzen.

Die Strahlungsumwandlung solarthermischer Anlagen und der Photovoltaik siehe Abschnitt 4.6.8.

4.6.3 Stofftransportvorgänge

Die mit einem Stoffstrom verbundenen Energieflüsse werden in der Bedarfsbilanz über folgenden üblichen Bilanzansatz abgebildet:

$$Q = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_P \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot t = \dot{m} \cdot c_P \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot t$$

Die Energiemenge ergibt sich aus einem Volumen- oder Massenstrom ($\dot{V}$, $\dot{m}$) und dessen Stoffeigenschaften (Dichte ρ, Wärmespeicherkapazität c_P). Darüber hinaus abhängig von den beiden Temperaturen des Stoffen vor und nach einer Temperaturänderung (ϑ_1, ϑ_2) sowie der betrachteten Zeit (t).

Die Stofftransportgleichung erscheint in dieser ursprünglichen Form seltener im üblichen Regelwerk (Normen, Richtlinien) für die Bedarfsbilanzierung. Die modifizierten Varianten sollen nachfolgend vorgestellt werden.

Gebäudelüftung

Wenn der Wärmefluss beschrieben wird, der sich mit der ins Gebäude einströmenden Luft verbindet, verwenden die üblichen Bilanzverfahren einen Luftwechsel (n), das Luftvolumen (V) und die Stoffwerte der Luft ($\rho \cdot c_P$). Diese Größen lassen sich als spezifischer Lüftungswärmeverlust (H_V) zusammenfassen. Der Term aus Temperaturdifferenz und Zeit (ϑ_i - ϑ_e) · t ist die Gradtagszahl, typische Werte siehe Abschnitt 3.3.1. Die einzusetzenden Temperaturen ϑ_i und ϑ_e sind im Allgemeinen repräsentative Mittelwerte für das festgelegte Zeitintervall t.

$$Q = n \cdot V \cdot \rho \cdot c_P \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot t = H_V \cdot Gt$$

Der Luftwechsel (n) ist ein Maß für die Anzahl der Luftaustausche in einer Stunde. Er ergibt sich aus Anteilen nutzerbedingten Lüftens, Infiltration und dem Volumenstrom einer Lüftungsanlage (wenn vorhanden), wobei diese Größe sich gegenseitig beeinflussen. Er ist eine stark zeitveränderliche Größe und nur mit großen Unsicherheiten als repräsentativer Wert anzugeben. Typische Werte siehe Abschnitte 3.2.3 (Nutzung), 3.4.5 (Infiltration) und 3.10 (Raumlufttechnik).

Berücksichtigung von Wärmerückgewinnungseinrichtungen

Wenn Luft mit Technik vorgewärmt oder vorgekühlt wird, strömt sie mit einer anderen Temperatur (abweichend von der Außentemperatur ϑ_e) in den Bilanzraum ein. Dieser Effekt auf die bilanzierte Energiemenge wird in den eingeführten Bilanzverfahren auf verschiedene Arten rechnerisch ausgedrückt.

Einerseits wird bei der Bilanzierung die Temperatur des zuströmenden Volumenstroms entsprechend geändert und mit dem effektiv vorhandenen Wert gerechnet (ϑ_{eff}). Alternativ wird der Luftwechsel in die Gleichung vermindert angesetzt mit einem effektiven Wert (n_{eff}). Beide Werte führen zum selben Ergebnis.

$$\begin{aligned} Q &= n \cdot V \cdot \rho \cdot c_P \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{e,eff}) \cdot t \\ &= n_{eff} \cdot V \cdot \rho \cdot c_P \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot t \end{aligned}$$

Der Ansatz des effektiven Luftwechsels folgt der Logik der Temperaturkorrekturfaktoren (F_x) für die Transmission, siehe Abschnitt 4.6.2. Das verfolgte Ziel ist es, in der Gleichung mit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ($\vartheta_i - \vartheta_e$) rechnen zu können und alle Abweichungen davon in anderen Größen darzustellen.

Warmwassernutzung

Die Nutzung von Warmwasser wird ebenfalls nach dem allgemeinen Ansatz berechnet. Die üblichen Bedarfsbilanzen gehen dabei von täglichen zu erwärmenden Wassermengen ($\dot{V}$) aus. Die Erwärmung erfolgt von einer Kaltwassertemperatur (ϑ_k), mit der das Wasser den Bilanzraum betritt, auf eine Warmwassertemperatur (ϑ_w), mit der das genutzte Wasser den Bilanzraum verlässt

$$Q = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_P \cdot (\vartheta_w - \vartheta_k) \cdot t$$

Die Gleichung kann auch verwendet werden, wenn Wasser gekühlt wird. Auch feinere oder gröbere Zeitraster für den Volumenstrom ($\dot{V}$) können zugrunde gelegt werden.

Rohr- und Kanalnetz

Für die in einem Netz strömenden Flüssigkeiten und Gase kann mit Hilfe der Stofftransportgleichung bestimmt werden, welche Temperaturänderung sich über der Weglänge ergibt. Die Energiemenge, welches über die Rohr-/Kanalnetzoberflächen abgegeben wird, ergibt sich aus der Differenz zwischen der Eintrittstemperatur (ϑ_{ein}) und der Austrittstemperatur (ϑ_{aus}) des strömenden Stoffes ($\dot{V}$).

$$Q = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_P \cdot (\vartheta_{ein} - \vartheta_{aus}) \cdot t$$

Diese Rechenoperation ist in dem üblichen Bedarfsbilanzen nicht enthalten. Für die Wärmeabgabe über die gesamte Netzoberfläche (Transmissionsgleichung, siehe Abschnitt 4.6.2), setzen die Bedarfsbilanzen regulär repräsentative Temperaturen im Netz an, d.h. mittleren Werte aus Ein- und Austrittstemperatur. Bei gut gedämmten Netzen liegen Ein- und Austrittstemperaturen nah beieinander.

Das Rechenverfahren ist theoretisch iterativ. Die Wärmeabgabe über die Oberfläche ergibt sich aus der repräsentativen mittleren Innentemperatur, welche sich ihrerseits aus dem Wärmeverlust des Rohres ergibt.

Erzeuger und Übergabeeinrichtungen, Wärmeübertrager

Die Wärmeabgabe oder Aufnahme in Erzeugern und Übergabeeinrichtungen – allgemein allen Wärmeübertragern – lässt sich ebenfalls nach dem allgemeinen Ansatz berechnen.

$$Q = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_P \cdot (\vartheta_{ein} - \vartheta_{aus}) \cdot t$$

Je nachdem, wie die beiden Temperaturen (ϑ_{ein}, ϑ_{aus}) in die Gleichung eingesetzt werden, ergibt sich das Vorzeichen der Energiemenge. Dieser Rechenschritt ist in den eingeführten Energiebilanzverfahren unüblich. Der eigentliche Wärmeübertragungsprozess wird als verlustfrei angesehen, insofern erfolgt die Bilanzierung von Oberflächenverlusten der Wärmeübertrager (analog zu allen anderen Komponenten einer Versorgungsanlage) oder Mehraufwendungen aufgrund einer nicht optimalen Regelung.

4.6.4 Verbrennungsvorgänge und konventionelle Wärmeerzeuger

Unter konventionellen Wärmeerzeugern sollen vorrangig Kessel verstanden werden. In diesen wird ein Brennstoff in Nutzwärme umgewandelt. Dabei treten Verluste auf. Wird der Begriff etwas weiter gefasst, können auch Elektrodirekterzeuger und Übergabestationen/Wärmetauscher darunter verstanden und bewertet werden.

Die Verluste von Heizkesseln können wie folgt untergliedert werden:

- Verluste in Betrieb und Betriebsbereitschaft (Unterteilung nach Zeitphasen) oder
- Verluste über das Abgassystem bzw. bei der Brennstoffumwandlung und über die Geräteoberfläche (Unterteilung nach Verlustart).

Während der Betriebsphase überwiegt der Abgasverlust, während der Betriebsbereitschaftsphase überwiegt der Oberflächenverlust. Hersteller drücken die Effizienzmerkmale von Kesseln mit Hilfe von Wirkungsgraden η_K (Beschreibung der Betriebsphase) und einem bezogenen Bereitschaftsverlust q_B für die Stillstandzeiten aus.

Aus einer anteiligen Wichtung der beiden Zeitanteile im Bilanzzeitraum wird der Gesamtverlust bestimmt. Die Gesamteffizienz, welche Betriebs- und Stillstandszeiten gleichermaßen berücksichtigt, ist der Nutzungsgrad (η, als Jahreswert η_a) oder die Aufwandszahl (e_g). Es gilt der allgemeine Ansatz:

$$\eta = \frac{\eta_K}{\left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \cdot q_B + 1} = \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} \text{ und } e_g = \frac{1}{\eta} == \frac{Q_{zu}}{Q_{ab}} \text{ mit } \beta = \frac{Q_{ab}}{\dot{Q}_{K,N} \cdot t}$$

Der Nutzungsgrad (η) ist das Verhältnis der vom Kessel produzierten Nutzwärmemenge (Q_{ab}) zur eingesetzten Brennstoffmenge (Q_{zu}). Die Aufwandszahl (e_g) ist der Kehrwert. Einflussgrößen sind neben dem Kesselwirkungsgrad und dem Betriebsbereitschaftsverlust die Kesselbelastung (β). Sie ist das Verhältnis der produzierten Nutzwärmemenge (Q_{ab}) zu der maximal produzierbaren Wärmemenge, welche von der Kesselnennleistung ($\dot{Q}_{K,N}$) und dem betrachteten Zeitraum (t) abhängig ist.

Die einzusetzenden Produktkennwerte (η_K, q_B) sind im Allgemeinen repräsentative Mittelwerte für das festgelegte Zeitintervall t. Typische Kennwerte für Erzeuger (η_K, q_B, η_a/e_g) sind in den Abschnitten 3.6.1 (Heizung) und 3.8.1 (Trinkwarmwasser) zu finden.

Der absolute Kesselverlust Q ergibt sich aus der Differenzbildung zwischen der aufgewendeten (Q_{zu}) und abgegebenen (Q_{ab}) Energiemenge.

Modifikationen

Die Gleichung wird in den üblichen Bilanzverfahren ggf. um Korrekturfaktoren für verschiedene Brennstoffe erweitert (Berücksichtigung von Effizienzverlusten durch Verschmutzung).

Auch gibt es Bilanzansätze, die eine Gewichtung der verschiedenen Prüfstandswirkungsgrade η_K (100 %/Volllast, 30 %/Teillast) vorsehen bzw. berücksichtigen, dass der Wirkungsgrad temperaturabhängig und somit variabel ist.

Darüber hinaus kann der Betriebsbereitschaftsverlust q_B an die reale Temperaturdifferenz zwischen Kessel und Aufstellraum angepasst werden (mit einem Verfahren, das dem für Speicher ähnelt, siehe Abschnitt 4.6.2).

Elektroerzeuger

Für Elektrodirekterzeuger entfällt regulär der Wirkungsgrad bei der Umwandlung. Es gibt je nach Bauart prinzipiell nur einen Betriebsbereitschaftsverlust, vor allem für Geräte mit Wasserbevorratung.

Eine Variante der Abbildung dieser Erzeuger in den eingeführten Bilanzverfahren ist die Verwendung von Jahresnutzungsgraden (η_a) und Aufwandszahlen (e_g) von 1,0 – wobei der ggf. vorhandene Betriebsbereitschaftsverlust als Speicherverlust ausgewiesen wird. Alternativ werden pauschale Effizienzen für die Energieumwandlung – sehr nahe bei 1,0 – definiert, die den Oberflächenwärmeverlust berücksichtigen.

Etliche Bilanzverfahren definieren zusätzlich für Raumheizgeräte einen Übergabeverlust, der ein Maß für die Genauigkeit des Einhaltens der Raumsolltemperatur ist. Dies ist eine Größe, die nicht die Technik allein bewertet, sondern ihr Zusammenspiel mit Baukörper und Nutzer. Weitere Ausführungen zu Größen dieser Art (instationäre Prozesse) siehe Abschnitt 4.6.1.

Übergabestationen

Übergabestationen sind rein technisch betrachtet keine Erzeuger. In den eingeführten Bedarfsbilanzverfahren werden sie regulär unter dem Abschnitt "Erzeugung" aufgeführt, um die übliche Bilanzlogik (Übergabe – Verteilung – Speicherung – Erzeugung) nicht zu unterbrechen. Die für Elektrodirekterzeuger getätigten Aussagen gelten sinngemäß.

4.6.5 Wärmepumpen und Kältemaschinen

Mit Hilfe eines zirkulierenden Kältemittels wird eine Energiemenge von geringerem Temperaturniveau auf ein höheres Temperaturniveau befördert. Dies erfolgt unter Einsatz einer Antriebsenergie. Das Kältemittel wird verdampft, verdichtet, kondensiert und entspannt – im thermodynamischen Druck-Enthalpie-Diagramm ergibt sich ein Kreisprozess entgegen des Uhrzeigersinns, daher wird von linksdrehenden Kreisprozessen gesprochen.

Die technische Umsetzung dieses Kraft-Wärme-Prozesses sind Wärmepumpen und Kältemaschinen. Ist der Antrieb ein Kompressor, handelt es sich um eine Kompressions-Maschine. Werden Zweistoffgemische (Salzlösungen o. ä.) als Kältemittel verwendet und Wärme als Antriebsenergie, spricht man von Sorptions-Maschinen.

Die üblichen Bedarfsbilanzen verwenden ähnliche Ansätze zur Bewertung für beide Erzeugerarten.

Strombetriebene Wärmepumpen

Die übliche Bewertung der Kompressionswärmepumpen erfolgt mit Arbeitszahlen (β), die grundsätzlich den Nutzungsgraden von Kesseln entsprechen. Alternativ kommen deren Kehrwerte zum Einsatz, Aufwandszahlen (e_g). Es gilt:

$$\beta = \frac{1}{t} \cdot \int COP\, dt = \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} \text{ und } e_g = \frac{1}{\beta} == \frac{Q_{zu}}{Q_{ab}} \text{ mit } COP = \varsigma_{ex} \cdot \frac{T_C}{T_C - T_0}$$

Die Arbeitszahl (β) innerhalb einer Zeitperiode (t) ergibt sich als integraler Mittelwert aller Leistungsziffern (ε oder COP, coefficient of performance) in dem bilanzierten Zeitraum.

Dabei ergibt sich jede Leistungsziffer (COP) abhängig von der Verdampfungstemperatur (T_0) sowie der Kondensationstemperatur (T_C) des Kältemittels. Zusätzlich muss ein exergetischer Gütegrad (ζ_{ex}) berücksichtigt werden, der die Abweichung der realen Effizienz von der theoretischen Effizienz der Maschine ausdrückt. Vor allem die in die Gleichung einzusetzenden Temperaturen sind zeit- bzw. lastvariable Größen.

Mit Hilfe der Arbeitszahl (β) oder der Aufwandszahl (e_g) kann die der Wärmepumpe zugeführte Antriebsenergiemenge (Q_{zu}) bestimmt werden, wenn die zu produzierende Wärmemenge (Q_{ab}) bekannt ist – und umgekehrt.

In den eingeführten Bilanzverfahren wird regulär das Integral nicht rechnerisch gelöst. Es werden stattdessen repräsentative COP-Werte zeitanteilig gewichtet oder nur ein mittlerer COP-Wert verwendet. Die Leistungsziffern stammen aus Herstellermessungen oder Typologien (Praxiserfahrungen), so dass die Berechnung mit den Kelvintemperaturen regulär entfällt.

Die Umrechnung der Herstellermesswerte ($COP_{prüf}$) in konkrete Werte für den Einzelfall (COP) erfolgt üblicherweise mit Korrekturfaktoren, die aus nachfolgenden Formelansatz abzuleiten sind:

$$\frac{COP}{COP_{prüf}} = \frac{\varsigma_{ex} \cdot \frac{T_C}{T_C - T_0}}{\left(\varsigma_{ex} \cdot \frac{T_C}{T_C - T_0}\right)_{prüf}}$$

Sofern man einen konstanten exergetischen Gütegrad ζ_{ex} bei der Umrechnung unterstellt, sind nur noch die Prüfstandstemperaturen und die realen Betriebstemperaturen im Kältemittelkreislauf von Belang. Es ist anzumerken, dass die Temperatur der Wärmequelle oberhalb der Verdampfungstemperatur liegt (ca. 4 … 8 K) und die Temperatur des Abnehmers unterhalb der Kondensationstemperatur liegt (ca. 1 … 3 K). Beide Werte sind konstruktionsbedingt von Hersteller zu Hersteller verschieden, jedoch insgesamt bei der Berechnung zu berücksichtigen.

Typische Kennwerte für Wärmepumpen sind in den Abschnitten 3.6.1 (Heizung) und 3.8.1 (Trinkwarmwasser) angegeben.

Kompressionskältemaschinen

Die geschilderten Zusammenhänge für Wärmepumpen gelten analog. Da jedoch die dem Verdampfer zugeführte Energie die "Nutzkälte" ist, gilt entsprechend:

$$COP = \varsigma_{ex} \cdot \frac{T_0}{T_C - T_0}$$

Die eingeführten Bilanzverfahren operieren bei der Bilanzierung von Kältemaschinen ebenfalls mit typischen Effizienzen (als Periodenmittelwerte) sowie Korrekturfaktoren für den Teillastbetrieb und abweichende Temperaturen.

Typische Kennwerte für Kältemaschinen sind im Abschnitt 3.7.1 zu finden.

Wärmebetriebene Wärmepumpen und Kältemaschinen

Wärmepumpen und Kältemaschinen mit Wärmeantrieb, z. B. direkt mit Gas befeuerte Absorptionsmaschinen, werden in den üblichen Bedarfsbilanzen analog den Kompressionsmaschinen behandelt. Anstelle der Leistungszahl (ε oder COP) wird die Jahresheizzahl bzw. das Nennwärmeverhältnis (ζ) verwendet.

4.6.6 Kraft-Wärme-Kopplung

In Wärme-Kraft-Prozessen wird unter Verwendung einer Wärmeenergie eine Antriebsenergie erzeugt. Im thermodynamischen Sinne sind diese Prozesse rechtsdrehend (z. B. im Druck-Enthalpie-Diagramm), umgekehrt als bei Kältemaschinen und Wärmepumpen.

Für die Versorgung von Gebäuden und Liegenschaften ist die technische Umsetzung dieses Funktionsprinzips die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), z. B. das Blockheizkraftwerk (BHKW). Es gibt geschlossene (Stirlingmotor) oder offene (Otto-, Dieselmotor) Kreisprozesse, die im Rahmen der eingeführten Bedarfsbilanzen nach dem gleichem Grundprinzip bewertet werden.

Allen Geräten gemein ist, dass sie unter Einsatz einer Energiemenge (Q_{zu}) gleichzeitig Wärme ($\dot{Q}_{th}$ bzw. Q_{th}) und Strom (P_{el} bzw. W_{el}) produzieren. Brennstoffe (für die Gebäude- und Liegenschaftsversorgung) sind Erdgas, Heizöl oder auch Biogas, Bioöle und Holz.

Die Bewertung der Gesamteffizienz einer Kraft-Wärme-Kopplung erfolgt analog zu Kesseln wie folgt:

$$\eta = \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} = \frac{Q_{th} + W_{el}}{Q_{zu}} \text{ und } e_g = \frac{1}{\eta} == \frac{Q_{zu}}{Q_{ab}}$$

Der Nutzungsgrad (η, als Jahreswert η_a) ist das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand, die Aufwandszahl (e_g) sein Kehrwert. Bei der energetischen Bewertung von KWK-Anlagen werden regulär – abweichend zur allgemeinen Vorgehensweise – Wirkungs- und Nutzungsgrade gleich gesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass die Phasen der Betriebsbereitschaft nicht vorhanden oder sehr klein sind, so dass Leistungsverhältnisse den Energiemengenverhältnissen entsprechen.

Zur Charakterisierung der Anteile der beiden Nutzleistungen (und bei der Energiebilanzierung der beiden Energiemengen) wird die Stromkennzahl (σ häufig auch S) verwendet:

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{th}} \approx \frac{W_{el}}{Q_{th}}$$

Typische Werte für Stromkennzahlen und Wirkungsgrade der KWK sind in Abschnitten 3.6.1 (Heizung) und 3.8.1 (Trinkwarmwasser) angegeben.

Thermischer und elektrischer Wirkungsgrad

Für die KWK können zwei separate Wirkungsgrade (entsprechend Nutzungsgrade) angegeben werden, die nur die thermische oder die elektrische Effizienz charakterisieren:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{zu}} \text{ und } \eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} \text{ mit } \eta = \eta_{th} + \eta_{el}$$

Bei der Bilanzierung mit diesen Teilwirkungsgraden im Rahmen der Energiekonzepterstellung ist deren Aussage zu beachten. Zahlenbeispiel für ein heizöl- oder gasbefeuertes BHKW mittlerer Größe:

- Gesamtwirkungsgrad η = 0,9
- thermischer Wirkungsgrad η_{th}=0,6
- elektrischer Wirkungsgrad η_{el}=0,3

Variante 1: erzeugt werden sollen 360 MWh/a Strom. Wird bei der Bilanzierung der elektrische Wirkungsgrad verwendet, ergibt sich ein Brennstoffeinsatz von 1200 MWh/a. Die erzeugte Wärme taucht bei dieser Variante der Bilanzierung nicht auf. Sie wird wie Abwärme behandelt, die nicht nutzbar ist bzw. genutzt wird.

Variante 2: erzeugt werden sollen 720 MWh/a Wärme. Wird bei der Bilanzierung der thermische Wirkungsgrad verwendet, ergibt sich ein Brennstoffeinsatz von 1200 MWh/a. Der erzeugte Strom taucht bei dieser Variante der Bilanzierung nicht auf – analog Beispiel 1.

Variante 3: erzeugt werden sollen 360 MWh/a Strom. Wird bei der Bilanzierung der Gesamtwirkungsgrad verwendet, ergibt sich ein Brennstoffeinsatz von 400 MWh/a. Er repräsentiert nur den anteiligen Brennstoffeinsatz für die Stromerzeugung. Die gleichzeitige Wärmeproduktion und deren Brennstoffeinsatz sind separat zu bilanzieren – dann ebenfalls mit dem Gesamtwirkungsgrad. Diese Bilanz ergibt dann, dass für die Erzeugung von 720 MWh/a Wärme weitere 800 MWh/a Brennstoff einzusetzen sind. Beide Teilbilanzen mit jeweils dem Gesamtwirkungsgrad sind nicht voneinander trennbar.

Die Variante 3 verfährt nach der Methode der "energetischen Allokation" (meint: Zuordnung). Sie ordnet den Endenergieeinsatz und daraus ableitbar die Emissionen, den Ressourcenverbrauch, die Kosten, Primärenergie usw., siehe Abschnitt 2.5, nach dem Leistungsverhältnis (σ und entsprechend dem Energiemengenverhältnis) der Wärme und dem Strom zu. Die Variante 1 ordnet alles der Erzeugung von Strom zu – Wärme gibt es "kostenlos" nebenbei. Die Variante 2 verfährt genau anders herum.

Es gibt weitere Allokationsmethoden, die an dieser Stelle nicht näher erläutert werden sollen. Bei korrekter Bilanzierung von jeweils Wärme und Strom ist die Art der Allokation egal, da sie nichts an den Summenkosten, -emissionen usw. ändert.

KWK in der Bilanzierung nach EnEV

Eine Besonderheit bei der Bilanzierung der KWK stellt die Vorgehensweise im Rahmen des EnEV-Nachweises dar. Er greift auf eine der verschiedenen Allokationsmethoden zurück, welche an dieser Stelle kurz erläutert werden soll, da die Bilanzierungsnormen häufig angewendet werden: die "Gutschrift-Methode". Bilanziert werden bei einem EnEV-Nachweis End- und Primärenergie wie nachfolgend beschrieben.

Die als Endenergie bilanzierte Energiemenge ist dabei die aus dem BHKW (und ggf. dem Spitzenlasterzeuger) an das Gebäude gelieferte Wärme. Die Rechenverfahren verstehen als Endenergie also weder den anteiligen Brennstoffeinsatz für Wärme, noch die gesamte Brennstoffaufwendung (für Wärme und Strom). Der berechnete Endenergiebedarf berücksichtigt nicht die parallel erfolgte Stromproduktion oder die Erzeugerverluste des Systems. Diese Endenergie lässt sich somit nicht ohne weiteres in Energiekosten umrechnen.

Als Primärenergie wird nicht die gesamte Menge, sondern nur der Wärmeanteil ausgewiesen. Die Zuordnung der Primärenergie auf die beiden Nutzenergiemengen Wärme und Strom erfolgt rechnerisch. Dem über KWK erzeugten Strom wird eine Primärenergiemenge zugeordnet, die angefallen wäre, wenn er in einem Grundlastkraftwerk erzeugt worden wäre. Die restliche Primärenergie entfällt rechnerisch auf die Wärme. Es kann ein Primärenergiefaktor für Wärme (f_P) bestimmt werden. Mit den Zahlen von oben:

- Brennstoffeinsatz Q_{zu} = 1200 MWh/a, d.h. dem System zugeführte Primärenergie $Q_{P,zu}$ = 1,1 · 1200 MWh/a = 1320 MWh/a (für den Energieträger Erdgas oder Heizöl)
- erzeugter Strom Q_{el} = 360 MWh/a, d.h. im Grundlastkraftwerk vermiedene Primärenergie $Q_{P,Strom}$ = 2,8 · 360 MWh/a = 1008 MWh/a
- erzeugte Wärme Q_{th} = 720 MWh/a, d.h. anteilige Restprimärenergie nach Gutschriftmethode $Q_{P,Wärme} = Q_{P,zu} – Q_{P,Strom}$ = 1200 MWh/a - 1008 MWh/a = 312 MWh/a
- Primärenergiefaktor für Wärme $f_P = Q_{P,Wärme} / Q_{th}$ = 312 / 720 = 0,43
- Endenergie = an den Abnehmer gelieferte Wärme: Q_{th} = 720 MWh/a

Wenn eine reale Anlage bilanziert wird, in der es auch einen Spitzenlasterzeuger gibt, ergeben sich Zahlenwerte um f_P = 0,7. Das konkrete Rechenverfahren ist in DIN V 18599-1 oder -9 nachzulesen [13]. Es fällt rechnerisch eine Primärenergie in Höhe von 70 % der erzeugten Wärmemenge an.

Diese Art der Bilanzierung einer KWK-Anlage eignet sich nicht für die Energiekonzepterstellung, was bei Anwendung von Software zu beachten ist. Viele Bedarfsbilanzprogramme am Markt lassen eine Energieberatung unter freien Randdaten zwar zu, folgen jedoch trotzdem bei dem EnEV Modus. Die notwendigen Rechenschritte der Bestimmung der korrekten Endenergie für den Brennstoff, der damit verbundenen Kosten, der erzeugten Strommenge sind dann händisch zu ergänzen.

4.6.7 Elektrisch betriebene Maschinen, Geräte und Beleuchtung

Für elektrisch betriebene Geräte und Maschinen sowie die Beleuchtung ergibt sich die Energiemenge (Q) innerhalb eines Zeitraumes (t) aus einem Leistungsintegral. Zu jedem Zeitpunkt ist die Leistung zu erfassen. Rechnerisch ist dies praktisch unmöglich oder mit einem sehr hohen Prognoseaufwand verbunden.

In der üblichen Bedarfsbilanzierung wird daher versucht, das Flächenintegral in überschaubare Zeitabschnitte (i) zu zerlegen und dann Energiemengen zeitabschnittsweise zu berechnen und anschließend zu summieren.

$$Q = \int \dot{Q}\, dt \quad Q = \sum_i \dot{Q}_{\max} \cdot t_{voll,i} = \sum_i \dot{Q}_{mittel,Betrieb,i} \cdot t_{Betrieb,i} = \sum_i \dot{Q}_{mittel,i} \cdot t_i$$

Innerhalb eines Zeitraumes (i) werden multipliziert:

- die maximale Leistung ($\dot{Q}_{max}$) und eine Anzahl von Vollbenutzungsstunden (t_{voll}); übliche Vorgehensweise für Geräte, die nicht regelbar sind und taktend betrieben werden, mit Modifikation der Formel auch sinnvoll für stufig betriebene Geräte
- die mittlere Betriebsleistung ($\dot{Q}_{mittel,Betrieb}$) und eine effektive Betriebszeit ($t_{Betrieb}$); sinnvoll für regelbare Geräte; bei Geräten mit Stillstandsverlusten werden Betriebs- und Stillstandsphasen nach analogem Ansatz berechnet
- die mittlere Leistung ($\dot{Q}_{mittel}$) innerhalb einer Zeit, incl. Stillstandsphasen und die Gesamtdauer des betrachteten Zeitraums (t); seltener verwendeter Bilanzansatz, ggf. bei Kühlgeräten.

Alle Ansätze führen zum selben Ergebnis. Im verfügbaren Normen- und Regelwerk wird der erste Ansatz für die Beleuchtung sowie stufige Produktionsmaschinen präferiert, der zweite für Pumpen und regelbare Motoren.

Alternativ werden für zyklisch betriebene Geräte auch deren Laufzyklenzahlen bestimmt und mit dem Energieverbrauch je Zyklus multipliziert (üblich für Spülmaschinen, Waschmaschinen, Trockner, Großküchen- und Wäschereigeräte, Sterilisatoren, Aufzüge). Dies bietet sich an, wenn innerhalb eines Zyklus' stark schwankende Leistungen auftreten (Aufheizphasen, Abkühlphasen) und viele verschiedene Stromverbraucher zum Gerät gehören, welche in unterschiedlicher Ansteuerung nacheinander und parallel laufen (Pumpen, Motoren, Elektroheizung usw.).

Typische Kennwerte für Leistungen und Laufzeiten der Beleuchtung werden in Abschnitt 3.5 angegeben. Mit Geräten in Haushalt und Büro befasst sich Abschnitt 3.2.6, Kenwerte für industrielle Anwendungen werden in Abschnitt 3.12 benannt.

Für die detaillierte Beschreibung von Antrieben, Pumpen, Motoren sind Berechnungen mit Wirkungsgraden (η) üblich. Sie sind – wie bei Wärmeanwendungen – das Verhältnis der Nutzleistung ($\dot{Q}_{nutz}$) zur aufgewendeten elektrischen Leistung ($\dot{Q}_{zu}$):

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{nutz}}{\dot{Q}_{zu}}$$

Wirkungsgrade sind regulär nicht konstant über die Auslastung der betreffenden (regelbaren) Geräte. An beiden Seiten des Leistungsspektrums sind sie niedriger als im mittleren Bereich. Die oben geschilderte Vereinfachung des Leistungsintegrals umfasst in diesen Fällen auch die Berücksichtigung schwankender Wirkungsgrade.

4.6.8 Regenerative Energienutzung

Als regenerative Energien zählen bei der Energiebedarfsrechnung für übliche Energiekonzepte die Umweltwärmenutzung (mit Wärmepumpen, siehe Abschnitt 4.6.5), Umweltkältenutzung, Solarthermie und Photovoltaik. Auch die Rückgewinnung von Wärme wird häufig in diesem Zusammenhang bilanziert, wenn auch die Energie ggf. ursprünglich fossil erzeugt wurde.

Solarthermie

Die Verfahren zur Berechnung der Solarthermienutzung weisen eine große Bandbreite in der Detaillierung auf: von stündlicher Simulation bis zu gröberen Schätzverfahren des Jahresertrags. Die Schwierigkeit liegt nicht in der Prognose des solaren Angebotes, sondern in der Berechnung des davon nutzbaren Anteils. Es fließen die Kollektorbauart, die Art der Anlage und hydraulische Verschaltung, die Speichergröße sowie Netzverluste, der Nutzwärmebedarf und dessen Temperaturniveau u. v. m. ein. Die Vielzahl von Einflussgrößen erschwert die genaue Bedarfsprognose.

Es gibt insgesamt vergleichsweise viele Bedarfsberechnungsverfahren. Zur Ergebnisdarstellung werden kollektorflächenbezogene Erträge gewählt, aber auch solare Deckungsanteile (α). Typische Kennwerte werden in den Abschnitten 3.6.1 (Heizung) und 3.8.1 (Trinkwassererwärmung) angegeben.

Photovoltaik

Die Verfahren zur Bedarfsprognose von Photovoltaik sind deutlich weniger zahlreich. Wie bei der Solarthermie kann mit vergleichsweise wenigen Parametern der Ertrag stundengenau prognostiziert werden – mittlere Klimadaten vorausgesetzt. Jedoch benötigt die Simulation oder Berechnung einer Nutzung des Stroms zum Erzeugungszeitpunkt (oder später) detaillierte Kenntnisse zum Nutzungsprofil, ggf. eines Speichers, der Lade- und Entladelogik. Die dazu notwendigen Rechenroutinen sind prinzipiell vorhanden, es scheitert vielmehr an der Kenntnis des Bedarfs.

Zur Ergebnisdarstellung werden PV-flächenbezogene Erträge oder Angaben je Spitzenleistung (Peakleistung) gewählt. Typische Kennwerte werden im Abschnitt 3.9 zusammengefasst.

Wärmerückgewinnung

In den eingeführten Bedarfsberechnungsverfahren wird eine Wärmerückgewinnung insbesondere für die mechanische Lüftung bilanziert. Regulär fassen die Bilanzverfahren diesen Vorteil als verminderte Lüftungswärmeverluste auf, siehe Abschnitt 4.6.3.

4.7 Bezugsflächen und andere Bezugsgrößen

Für die Darstellung und zum Vergleich von Energiemengen werden üblicherweise Energiekennwerte eingesetzt. Ihnen dienen häufig Flächen, seltener andere Größen (Personen, Stückzahlen) als Bezugsmaß.

Zum Vergleich von Kennwerten müssen identische Bezugsgrößen gewählt werden.

Flächen im Wohnbau

Folgende Bezugsflächen werden bei der Bewertung von Wohnbauten verwendet:

- die Wohnfläche (WF) A_{Wohn} nach BGBl. II "Verordnung über wohnungswirtschaftliche Berechnungen", sie enthält ggf. anteilig die Flächen der Balkone und unbeheizte Keller, vermindert Flächen unter Schrägen, jedoch keine Flächen für beheizte Treppenräume im Geschosswohnungsbau
- die Energiebezugsfläche A_{EB} als Summe aller Wohn- bzw. Nutzflächen eines Gebäudes, für deren Nutzung eine Beheizung notwendig ist; die beheizte Nutzfläche ergibt sich nach DIN 277-2 "Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau; Gliederung der Nutzflächen, Funktionsflächen und Verkehrsflächen"; hierin sind Treppenräume enthalten, jedoch Balkone und unbeheizte Keller nicht
- die Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV und begleitenden Normen; sie wird aus dem äußeren Gebäudevolumen V_e berechnet ($0{,}32\ m^{-1} \cdot V_e$); maßgeblich ist dazu das Gebäudevolumen, das den beheizten Bereich umschließt, also üblicherweise der gedämmte Bereich des Gebäudes

Darüber hinaus sind Brutto- und Nettogrundfläche (BGF, NGF) definiert. Tabelle 149 zeigt typische Umrechnungsfaktoren, ausgehend von der Bruttogrundfläche als Bezugswert. Die fiktive Fläche A_N ist mit einsortiert, um die Größenverhältnisse zu verdeutlichen

Gebäudeart	BGF	NGF	AEB	WF	AN
Ein- und Zweifamilienhäuser	100 %	75...85 %	65...75 %	65...75 %	(80...90 %)
Geschosswohnungsbau	100 %	80...85 %	65...75 %	55...65 %	(80...90 %)

: 1,2 … 1,3

· 1,1 … 1,3

· 1,05 … 1,2

· 1 … 1,15

Tabelle 149 Umrechnung für Flächen im Wohnbau [13][76][83][eigene]

Die EnEV-Fläche A_N ist größer als die beheizte Energiebezugsfläche, wie auch die statistische Auswertung in Bild 120 zeigt.

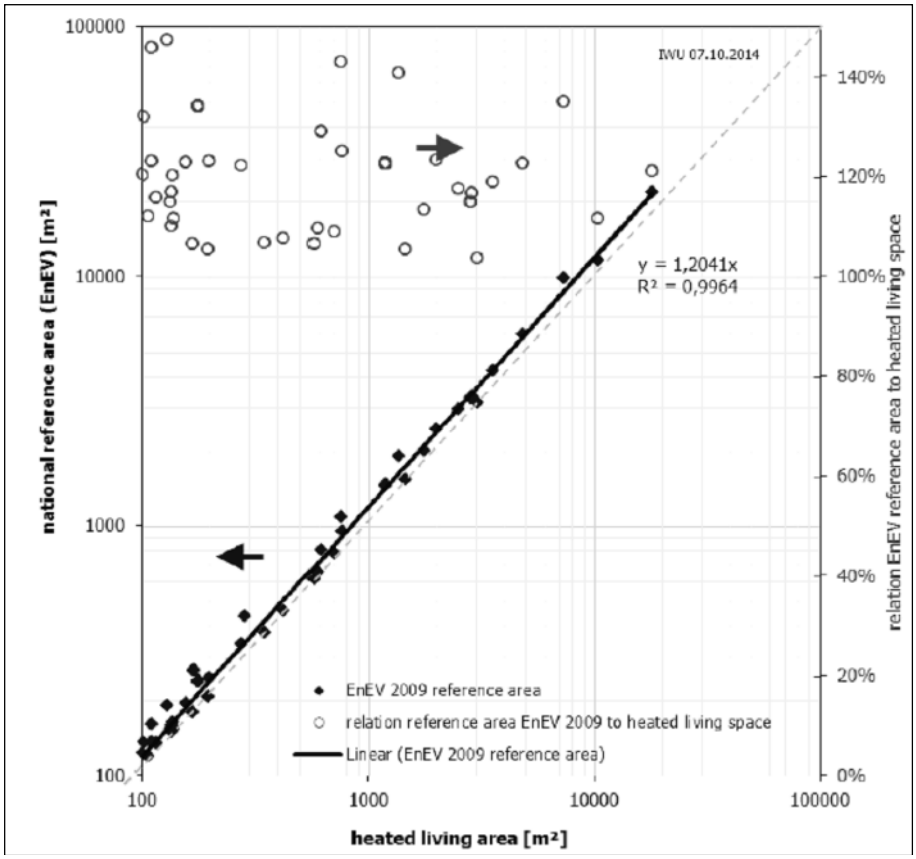


Bild 120 Unterschied zwischen EnEV-Nutzfläche und beheizter Wohnfläche [49]

Flächen im Nichtwohnbau

Bezugsflächen im Nichtwohnbau sind – absteigend sortiert – die Bruttogrundfläche (BGF), die Nettogrundfläche (NGF), die Nutzfläche (NF) und die Hauptnutzfläche (HNF). Die genauen Definitionen sind VDI 3807 [76] zu entnehmen.

Typische Kennwerte für Nichtwohnbauten, ausgehend von der Bruttogrundfläche als Bezugswert zeigt Tabelle 150.

Gebäudeart	BGF	NGF	NF	HNF
Wohnheime, Betreuungseinrichtungen	100 %	85...87 %	60...66 %	43...56 %
Ausstellungsgebäude, Veranstaltungsgebäude	100 %	87...90 %	65...69 %	60...65 %
Bereitschaftsdienste, Feuerwehren	100 %	86...87 %	75...76 %	57...58 %
Bibliotheken	100 %	90 %	68 %	63 %
Gebäude für Produktion, Werkstätten	100 %	89...91 %	77...79 %	63...75 %
Gericht	100 %	83...91 %	53...60 %	42...51 %
Hochschulen, wiss. Lehre und Forschung	100 %	81...89 %	52...61 %	45...53 %
Justizvollzugsanstalten	100 %	84 %	58 %	51 %
Kindertagesstätten	100 %	84...90 %	63...66 %	53...59 %
Krankenhäuser und Unikliniken, Gesundheitswesen	100 %	79...86 %	47...58 %	37...52 %
Lager	100 %	89 %	84 %	80 %
Mensen	100 %	91 %	62 %	55 %
Polizei	100 %	83...84 %	59...61 %	47 %
Rechenzentrum	100 %	88 %	57 %	51 %
Schulen	100 %	88...90 %	64...66 %	56...59 %
Schwimmhallen	100 %	87...88 %	56...63 %	45...51 %
Sporthallen, Sportbauten	100 %	90...93 %	68...78 %	60...66 %
Verkaufsstätten, Warenhäuser	100 %	87...88 %	70...73 %	60...66 %
Verwaltungsgebäude, Ämter	100 %	84...87 %	61...65 %	48...51 %

Tabelle 150 Umrechnung für Flächen im Nichtwohnbau [2][76][83]

5 Erstellung von Energiekonzepten

Auf Basis der allgemeinen Erkenntnisse zur Energiebilanzierung (Abschnitt 2), den dabei typischen Energie- und Bilanzkennwerten (Abschnitt 3) sowie deren Analyse und Bewertung (Abschnitt 4) kann ein Energiekonzept erstellt werden. Es spielen wiederum Bedarfsanalysen (rechnerische Bilanz) und Verbrauchsauswertungen von Messwerten sowie Kombinationen beider Ansätze eine Rolle.

Aufbau des Abschnittes und Inhaltsüberblick

Zunächst sollte geklärt werden, welche Beweggründe es für die Erstellung des Konzeptes gibt. Für bestimmte Personenkreise – vom Einfamilienhausbesitzer über den Wohnungsbaugenossen und vom Betriebsingenieur in der Industrie bis zum Kommunalpolitiker ist eine breite Streuung von inhaltlichen Schwerpunkten und Motivationen erkennbar. Dieser Thematik widmet sich Abschnitt 5.1.

Teilweise bedingt durch den Auftraggeber, aber auch durch das Untersuchungsobjekt variiert die Art des Konzeptes. Abschnitt 5.2 stellt Individual- und Globalkonzepte gegenüber. Für typische Fälle werden typische Bilanzumfänge, Zeitaufwendungen, Hinweise zur Detaillierung und Software gegeben. Angefangen vom kleinen Betrachtungsumfang des Energiekonzeptes für einen einzelnen Prozess, ein Gerät oder einer Maschine bis hin zu Konzepten für Gebäude, Quartiere und Kommunen.

Die Abschnitte 5.3 bis 5.5 skizzieren den Weg von der Aufstellung der Vorüberlegungen und Zielsetzungen über die systematische energetische, ökologische und wirtschaftliche Auswertung bis zu Entscheidungsfindung mit einer Wertanalyse. Abschnitt 5.6 liefert ein entsprechendes Praxisbeispiel für ein Energiekonzept im Bereich der Diakonie. Es verzeichnet mehrere übliche Schwerpunkte: die Nutzung- und Gebäudeentwicklung, die Energieversorgung, aber auch Sonderthemen wie Prozessdampfkonzepte und Straßenbeleuchtung.

5.1 Motivation

Die Motivation der Erstellung und Umsetzung eines Energiekonzeptes hängt zunächst von der Stellung des Auftraggebers ab. Unterschieden werden sollen nachfolgend in:

- private Auftraggeber,
- gewerbliche/industrielle Auftraggeber,
- öffentliche Auftraggeber.

Privater Auftraggeber

Bei privaten Auftraggebern befasst sich das Energiekonzept regulär mit einer einzelnen Immobilie, die in der Mehrzahl der Fälle selbst genutzt wird. Der Auftraggeber ist Investor und Nutzer in einer Person. Der Konzeptersteller ist eine externe Person, die ansonsten mit der Immobilie nichts zu tun hat, so dass ein gewisser Abstand zum Beratungsobjekt besteht.

Die konkreten Motivationsgründe der Auftraggeber für Veränderungswünsche sind vielschichtig, siehe Bild 121.

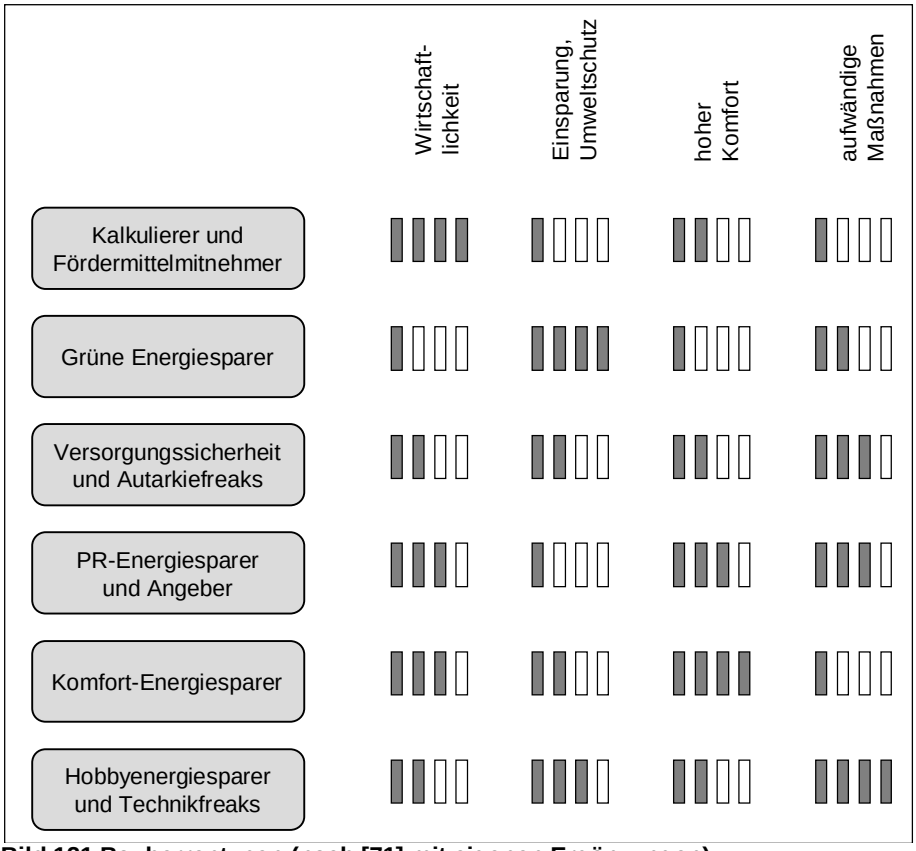


Bild 121 Bauherrentypen (nach [71] mit eigenen Ergänzungen)

Für den kühlen Kalkulierer zählt vor allem die Frage, ob sich die Investition rechnet. Eine Abwandlung dieses Bauherrentyps zielt dabei – teilweise ohne kritische Reflektion der Sinnhaftigkeit – auf Fördermittel ab. Ein größerer Teil des technisch nicht interessierten Personenkreises findet sich hier wieder.

Für die ökologisch eingestellten Bauherren sind aus persönlicher Überzeugung die höchsten Ziele der Umweltschutz und die Verminderung von Emissionen. Sie nehmen dafür in gewissem Rahmen Unwirtschaftlichkeiten und Komforteinbußen in Kauf.

Ein anderer Menschenschlag sind sicherheitsorientierte Bauherren mit einem Hang zu autarker Versorgung. Sie wollen der Abhängigkeit vom klassischen Versorgungsunternehmen entfliehen, weil sie sich ausgeliefert fühlen und teils früher schon schlechte Erfahrungen mit Energieabrechnungen gemacht haben. Der technische Aufwand, den sie tolerieren ist entsprechend hoch, die mögliche Unwirtschaftlichkeit ebenfalls.

Ähnlich gelagert sind Energiekonzepte von und für Technikfreaks. Sie investieren allerdings bewusst in aufwändige Technik, damit sie ein Hobby haben. Insbesondere aktive Maßnahmen – als Gegenstück zur passiven Energievermeidung – haben für sie Konjunktur. Da sie die mit der Energieversorgung zusammenhängenden Prozesse grundsätzlich verstehen, ist das Sparen als solches auch interessant für sie, nicht so sehr allerdings die Wirtschaftlichkeit.

Wie in anderen Bereichen des täglichen Zusammenlebens auch, gibt es Auftraggeber, denen es um die Profilierung – hier z. B. gegenüber den Nachbarn oder den Arbeitskollegen – geht. Maßnahmen für diesen Personenkreis müssen vor allem gut sichtbar sein, die Einsparung an Energie ist sekundär. Sie wollen allerdings nicht so sehr Abstriche beim Komfort machen, da dies für eine Profilierung kontraproduktiv ist.

Bei den Komfortenergiesparern darf es technisch gern einfach sein, solange das Gebäude nur behaglich wird. Die Motivation zur Veränderung des derzeitigen Zustandes wird vom Wunsch geleitet, innerhalb des verfügbaren Finanzrahmens heizen und duschen zu können, ohne sich ständig beschränken zu müssen. Auch in dieser Gruppe finden sich viele technisch nicht übermäßig interessierte Personen wieder. Die Gefahr von Rebound-Effekten bei Einsparmaßnahmen ist sehr hoch.

Die Liste kann weiter fortgeführt werden. Wichtig ist, zu Beginn der Energiekonzepterstellung zu klären, mit welchem Bauherrentypen zu rechnen ist. Entsprechende Erläuterungsgespräche und Argumentationen pro oder contra bestimmte Energieeinsparmaßnahmen sind darauf abzustimmen. Die persönliche Meinung des Beraters darf einfließen, jedoch gilt es die Investoren zu überzeugen. Es ist damit zu rechnen, dass bei Ehepaaren nicht beide Partner identisch "ticken".

Gewerbliche und industrielle Auftraggeber

Bei gewerblichen und industriellen Auftraggebern ist der Gegenstand des Energiekonzeptes schwerer zu verallgemeinern. Es handelt sich um einzelne Maschinen und Produktionsstrecken oder ganze Anlagenparks, eine oder mehrere Immobilien, Energieversorgungsanlagen usw.

Investor und Nutzer der Verbesserungsmaßnahmen sind vielfach nicht identisch, was bei der Konzepterstellung und allen damit zusammenhängenden Gesprächen, Berechnungen und Dokumentationen zu bedenken ist. Folgende Konstellationen sind typisch:

- große gewerbliche Immobilienbesitzer – wie die Wohnungswirtschaft – lassen ein Energiekonzept erstellen, von dem in einer Linie später die Mieter profitieren; Gesprächspartner für den Konzeptersteller ist fast ausnahmslos einseitig nur der Investor
- industrielle oder gewerbliche Auftraggeber lassen ein Energiekonzept für den eigenen Gebäude-, Maschinen- oder Gerätepark erstellen; Gesprächspartner für den Konzeptersteller sind vielfach beide Seiten, d.h. die finanzierende und die nutzende, jedoch in Form verschiedener Personen und Abteilungen
- ein Energieversorgungsunternehmen lässt ein Energiekonzept für den vorhandenen Anlagenpark oder Netze erstellen; Gesprächspartner für den Konzeptersteller ist der Investor

Der Konzeptersteller kann eine externe Person sein, die ansonsten mit der Immobilie oder dem sonstigen Beratungsgegenstand nichts zu tun hat. Je größer das zu beratende Unternehmen, desto höher die Wahrscheinlichkeit, als Berater einen adäquaten fachlichen Gesprächspartner zur Äußerung der Bauherrenwünsche, der Grunddatenbeschaffung usw. zu treffen.

Bei entsprechender Größe kann der Konzeptersteller demnach auch aus den eigenen Reihen kommen. Der Informationsfluss ist dann viel reibungsloser, die Treffsicherheit von guten Optimierungsvorschlägen vermutlich höher, jedoch besteht das Risiko mangelnder Objektivität.

Insgesamt zählen für die Zielgruppe der industriellen und gewerblichen Konzeptempfänger stärker betriebswirtschaftliche Aspekte, Verminderung von Folgekosten, Wartung und Instandhaltung sowie das Einhalten gesetzlicher Regelungen.

Bei der Beratung trifft der Konzeptersteller jedoch auf eine oder mehrere Personen, die sich im Privaten den Bauherrentypen nach Bild 121 zuordnen lassen, also eine gewisse Grundeinstellung zu der Thematik aufweisen. Es darf davon ausgegangen werden, dass diese Meinung sich auch in den Gesprächen und Entscheidungen über das Energiekonzept der Industrieanlage oder der Gewerbeimmobilie wiederfindet oder zumindest abfärbt.

Es erfolgt somit eine Mischung zwischen Privatmeinung und Berufsmeinung. Davon ganz abgesehen, dass auch der Berater selbst seine persönliche Einstellung hat. Dieser Umstand lässt sich nicht aufheben, der Berater sollte sich dessen bewusst sein.

Öffentliche Auftraggeber und Sozialwirtschaft

Wenn die öffentliche Hand oder die Sozialwirtschaft als Auftraggeber eines Energiekonzeptes auftritt, geht es um Immobilien im Dienstleistungsbereich. Investor und Nutzer der Verbesserungsmaßnahmen sind eigentlich identisch. Folgende Praxisfälle sind typisch:

- bei großen Auftraggebern sind die Zuständigkeiten auf viele unterschiedliche Abteilungen aufgeteilt, die jede für sich eine hohe Fachkenntnis aufweisen, wobei nirgends die Fäden so richtig zusammenlaufen; der Berater agiert ähnlich wie im Umfeld gewerblicher und industrieller Konzepte als Vermittler und Mediator;
- insbesondere bei kleinen Auftraggebern fehlen Personen mit Fachkenntnissen; die Beratung ähnelt dem von privaten Bauherren, jedoch müssen erschwerend zunächst Bauherrenwünsche erkannt und formuliert werden.

Im Umfeld öffentlicher Auftraggeber und der finden sich ebenfalls interne und externe Berater – mit den Vor- und Nachteilen zum Informationsfluss und der Objektivität, die sich daraus ergeben.

Die Vermischung von Privat- und Berufsmeinung der am Projekt Beteiligten ist erfahrungsgemäß noch stärker als in Gewerbe und Industrie. Dazu kommt bei Kommunalkonzepten noch die politische Dimension aller Entscheidungen. Insgesamt zählen für die Zielgruppe neben betriebswirtschaftlichen Aspekten und dem Einhalten gesetzlicher Regelungen auch Image und Marketing, Fördermittel sowie Komfort- und Nutzungsverbesserung.

Die Politik als Auftraggeber

Als Sonderfall sind Energiekonzepte und Energieszenarien anzusehen, die sich aus politischen Prozessen ableiten, z. B. das Energiekonzept der Bundesregierung, Wirtschaftlichkeitsberechnungen im Vorfeld von Gesetzesverschärfungen usw. Hier stehen – je nach Auftraggeber – im Fokus:

- Einsparung von Energie,
- Verminderung von Emissionen,
- Versorgungssicherheit,
- Betriebswirtschaftlichkeit,
- Volkswirtschaftlichkeit.

Praktisch nie stehen konkrete Immobilien oder Maschinen im Mittelpunkt, sondern immer nur die verallgemeinerte Gesamtheit, siehe Abschnitt 5.2.6.

5.2 Konzeptarten

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über typische Konzeptarten, deren Auftraggeber und Konzeptersteller. Es werden Hinweise zur möglichen und notwendigen Detaillierung gemacht sowie der Zeitaufwand abgeschätzt. Sofern Software und andere sinnvolle Arbeitshilfen bekannt sind, werden sie benannt.

5.2.1 Individuelles und globales Konzept

Die beiden Begriffe "individuelles Konzept" und "globales Konzept" werden im Rahmen dieser Veröffentlichung verwendet, um eine Abgrenzung zwischen konkreten Fragestellungen und übergeordneten Problemen vorzunehmen.

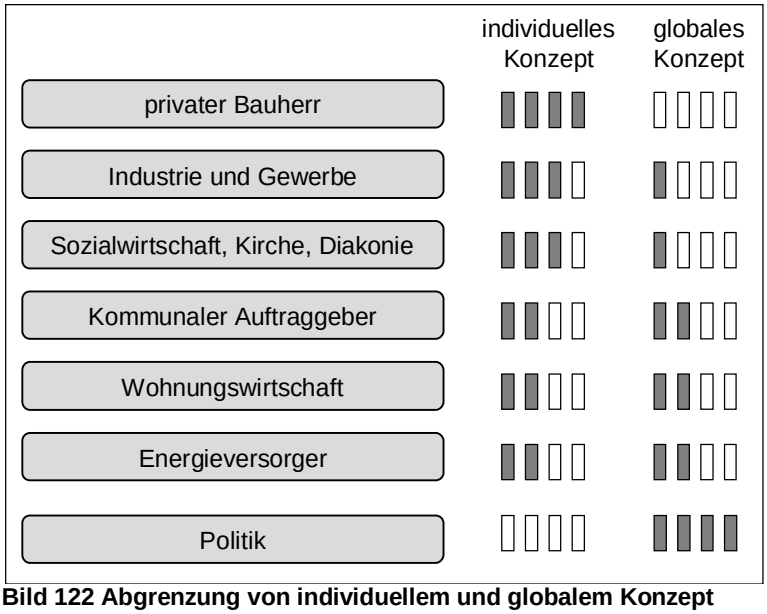


Bild 122 Abgrenzung von individuellem und globalem Konzept

Der private Bauherr sucht praktisch immer eine konkrete Lösung für (s)ein konkretes Problem, d.h. meist das selbst genutzte Gebäude, welches es zu verbessern gilt. Aus Sicht des Auftraggebers handelt es sich um ein Unikat, es braucht keine allgemeinen – auf andere Objekte übertragbaren – Verbesserungsvorschläge.

In der Industrie, beim produzierenden Gewerbe, vielfach auch in der Sozialwirtschaft, Kirche und Diakonie als Auftraggeber von Energiekonzepten überwiegt dieser Anspruch ebenfalls deutlich. Die zu untersuchenden Gebäude, Liegenschaften, Produktionsprozesse sind meist sehr speziell und bedürfen einer individuellen Untersuchung und Lösung. Eher selten werden universell kopierbare Lösungen gefordert.

Treten kommunale Auftraggeber, die Wohnungswirtschaft oder Energieversorger als Auftraggeber für ein Energiekonzept auf, läuft es oft auf exemplarische Konzepte heraus. Am Beispiel eines typischen, realen Gebäudes oder einer häufig vorkommenden realen Anlagentechnik werden Vorschläge zur Verbesserung erarbeitet. Die ausgearbeiteten Maßnahmen samt zugehörigen allgemeinen Überlegungen sind dann auf größere Bestände übertragbar. Modifikationen eines Grundkonzeptes kommen vor, setzen aber voraus, dass fachliche Expertise beim Auftragnehmer vorhanden ist.

Tritt die Politik als Auftraggeber auf – vom kommunalen Energiekonzept bis zur Erarbeitung künftiger Standards einer EnEV – dann geht es praktisch nie um konkrete Einzelfälle. Eine Gesamtmenge an Gebäuden, Anlagen, Geräten oder Prozessen wird betrachtet und mittel- oder langfristige Strategien für deren Verbesserung festgelegt.

Individuelles Konzept

Das individuelle Konzept bedarf einer detaillierten Analyse der derzeitigen konkreten Randdaten sowie absehbarer künftiger Veränderungen für:

- die Nutzung (gewünschte Behaglichkeit, erforderliche Produktionsziele usw.),
- die Betriebsführung (Zeitprogramme, Flexibilität usw.),
- technische Fragestellungen (Effizienzmerkmale für Gebäude und Anlagen),
- den Rechtsrahmen,
- die Finanzierung.

Bei der Energiebilanzierung und Maßnahmenerarbeitung ist das Einzelgebäude oder der einzelne Prozess möglichst realistisch abzubilden. Es empfehlen sich in diesen Fällen für Energiekonzepte im Bestand einstufende Messungen (siehe Abschnitte 4.2 bis 4.4). Für die zugehörigen Bedarfsbilanzen (siehe Abschnitt 4.6) sind realistische Randdaten einzusetzen, auch wenn diese nicht dem Durchschnitt entsprechen (atypische Nutzungszeiten, Temperaturen usw.).

Das Konzept sollte eine überschaubare (!) Parametervariation enthalten, um den Auftraggeber bzgl. besonders einflussreicher Parameter zu sensibilisieren.

Globales Konzept

Das globale Konzept soll verallgemeinern. Es Bedarf einer ausgedehnten Analyse wahlweise typischer mittlerer Randdaten oder einer Häufigkeitsverteilung der oben genannten Größen.

Im mittel sollten der rechnerische Energiebedarf sowie ein zugehöriger Verbrauch übereinstimmen. Die Energiebilanzierung darf Abstriche in der Detaillierung enthalten (es handelt sich um eine Verallgemeinerung).

Es empfiehlt sich aber eine deutlich umfangreichere Parametervariation, um die Konsequenzen der Typisierung und Mittelwertbildung deutlich zu machen.

5.2.2 Geräte- und Anlagenkonzept

Gegenstand des Energiekonzeptes ist ein gut abzugrenzender einzelner Energieverbraucher oder Energieerzeuger (Gerät, Anlage). Mögliche Beispiele sind:

- einzelner Wärme-, Kälte- oder Dampferzeuger,
- Zentrale mit mehreren Erzeugern,
- raumlufttechnische Anlage,
- Druckluftanlage,
- Beleuchtungsanlage,
- Motoren und Antriebe,
- Aufzüge und Rolltreppen,
- Gerät der Küchen- und Wäschereitechnik,
- medizinisches Großgerät,
- Geräte der Büro- und Medientechnik,
- Haushaltsgeräte,
- Kühlzelle oder Ladenkühlgerät,
- Schwimmbecken mit entsprechender Technik,
- Pumpen,
- usw.

Untersucht wird der Verbraucher relativ abgegrenzt von seiner Umgebung. Vielfach wird angenommen, dass die äußeren Randdaten– insbesondere der gewünschte Nutzen (zu erzeugende Wärme, Kälte, zu waschende Wäschemenge, Essenanzahl usw.) – konstant bleiben. Eine Zusammenstellung der Besonderheiten von Geräte- und Anlagenkonzepten zeigt Bild 123.

Die Konzepte untersuchen in erster Linie technische Effizienzverbesserungen, veränderte Betriebsbereitschaftsverluste, Teil- oder Komplettaustausch von Komponenten, im weiteren auch die Optimierung von Zeitprogrammen und Regelstrategien. Weitergehende Rückkopplungen auf andere Verbraucher werden ausgeblendet oder nur am Rande untersucht (fehlende Abwärme bei effizienterer Beleuchtung usw.).

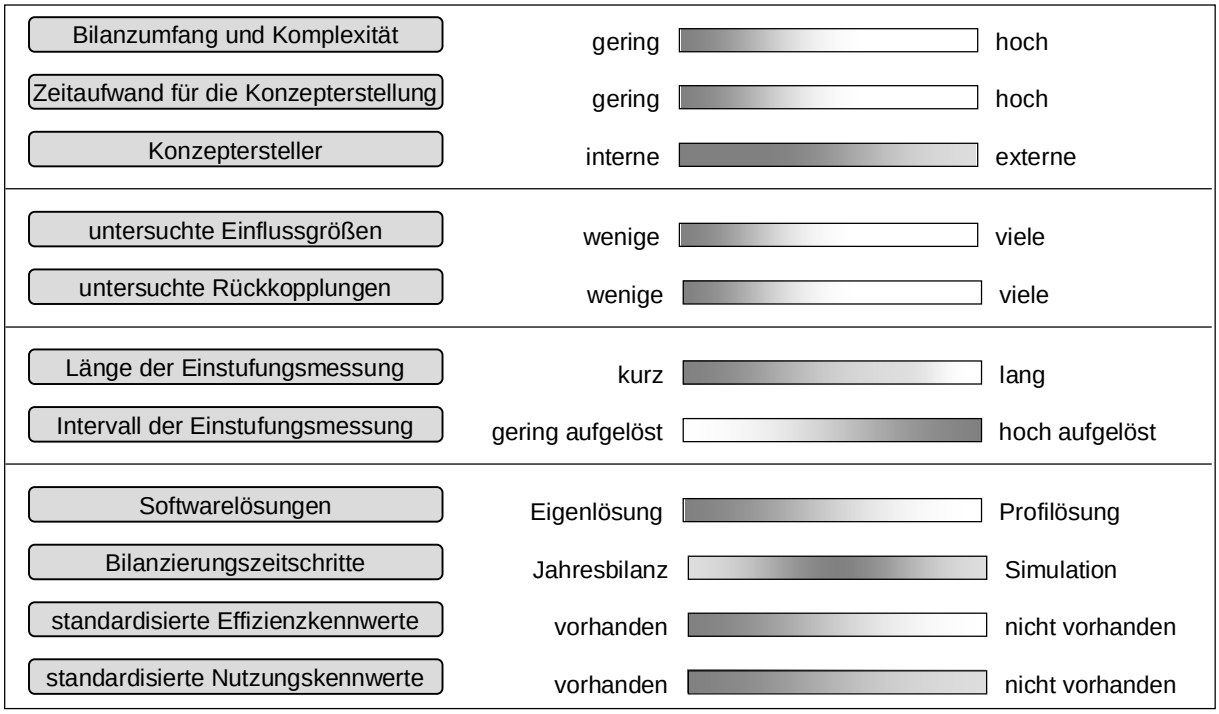


Bild 123 Besonderheiten von Geräte- und Anlagenkonzepten

Messung und Bilanzierung

Die Energiebilanz ist sehr klar abgegrenzt und umfasst nur einen oder wenige Prozessschritte mit definiertem Nutzen und meist nur einem Energieträger als Input. Häufig betrifft die Bilanzierung Verbraucher, die keine ausgeprägte Abhängigkeit von der Witterung aufweisen, sondern Zeitprogrammen oder anderen kurzfristig wiederkehrenden Regelprogrammen unterliegen.

In der praktischen Anwendung wird für die notwendigen formelmäßigen Berechnungen häufig auf selbst programmierte Tabellenkalkulationen zurückgegriffen. Es gibt seltener professionelle Software, weil die abzubildenden Zusammenhänge technisch bzw. formelmäßig eher einfach sind (Ansätze siehe Abschnitt 4.6.2 ff.) und eine professionelle Programmierung daher nicht lohnt.

Für das Geräte- und Anlagenkonzept im Bestand empfehlen sich einstufende Messungen von Aufwand (Energiemenge) und Nutzen (Energiemenge, Stückzahlen o. ä.). Wenn keine oder nur eine geringe Abhängigkeit von der Witterung vorliegt, kann die Messung kurz ausfallen, aber zeitlich höher aufgelöst sein. Beispielsweise empfehlen sich häufig Messungen über wenige Stunden bis Wochen mit Intervallen von Minuten bis Stunden. Aus diesen lassen sich sehr gut Zeitprofile ableiten und verallgemeinern.

Wenn grundsätzlich Abhängigkeiten von der Witterung vorliegen, kann eine zusätzliche Langzeitmessung über ein Jahr vorgenommen werden (dann in gröberem Messintervall). Alternativ wird der Witterungseinfluss rechnerisch mit Hilfe der Kurzzeitmessung abgeschätzt und hochgerechnet. Dies erfolgt über Verhältnisbildungen:

- Tageslichtzeit zu Gesamtbetriebszeit für Beleuchtungsanlagen,
- Auslastung von Erzeugern und Pumpen aufgrund der Witterung,
- usw.

Im Segment der Geräte- und Anlagenkonzepte kommen auch Simulationen mit Hilfe professioneller Programme (z. B. mit TRNSYS) zum Einsatz. Da der Umfang der Einflussgrößen sowie die Anzahl der ablaufenden Prozesse begrenzt sind, bleibt der Modellierungsaufwand, die Rechendauer und die Ergebnisinterpretation überschaubar. Die Randdaten der Simulation (alle zeitabhängige Größen) müssen entsprechend genau vorliegen.

Standardwerte

Zur Konzepterstellung wird – neben den Messwerten – auf Standardwerte zurückgegriffen. Es lässt sich dabei folgende Verfügbarkeit für notwendige Kennwerte feststellen:

- gute Datenbasis: Effizienzmerkmale für Wärme- Kälte- und Dampferzeuger, Raumlufttechnik, Pumpen, Innenbeleuchtung, Speicher, Medientechnik, Bürotechnik,
- mittel: Effizienzmerkmale für Motoren und Antriebe, Aufzüge und Rolltreppen, Ladenausstattung, Drucklufttechnik, Außenbeleuchtung, Haushaltsgeräte
- eher schlechte Datenbasis: Schwimmbadtechnik, Küchen- und Wäschereitechnik, Großgeräte der Medizin, Bäckereiausstattung und Trocknungsanlagen
- fast keine Datenbasis: spezielle Technologien und Maschinen aus der Produktion

Für die Nutzung der Geräte und Anlagen im Sektor der Wohn- und Dienstleistungsgebäude existieren teilweise Erfahrungen zu typischen Zeit- bzw. Belastungsprofilen. Der Bereich der Geräte und Anlagen aus der Produktion lässt sich nur schwer standardisieren. Hier sind Randdaten im Einzelfall zu erheben bzw. in der Planung festzulegen.

Im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitungen können als Hilfsmittel die allgemeinen Vorgehensweisen (Verbrauchsdatenanalyse und Bedarfsberechnung siehe Abschnitt 4) bereitgestellt werden, darüber hinaus einige Kennwerte zur Einschätzung und Bewertung (siehe Abschnitt 3).

Auftraggeber und Konzeptersteller

Individuelle Geräte- und Anlagenkonzepte sind eher für den Nichtwohnbau typisch. Hier werden – in Dienstleistungsgebäuden, aber auch in der Produktion – große Einzelverbraucher detailliert untersucht und verbessert. Konzeptersteller sind beauftragte, externe Bearbeiter, aber auch der interne Personenkreis der Betriebsingenieure und -techniker.

Darüber hinaus veröffentlichen Verbraucherverbände, Produkthersteller, Energieagenturen und ähnliche Einrichtungen auch entsprechende Empfehlungen zur Verbesserung einzelner Verbrauchseinrichtungen (Lampen, Pumpen, Kühlschränke etc.) oder Erzeuger.

Beispiele

In Abschnitt 5.6 werden beispielhaft zwei Konzepte für Pumpen und Außenbeleuchtung vorgestellt, welche im Rahmen der Beratung einer diakonischen Einrichtung erstellt wurden.

5.2.3 Prozesskonzept

Gegenstand des Energiekonzeptes ist eine geschlossene Kette von Verbrauchern (Prozess). Mögliche Beispiele sind in der Produktion und im Dienstleistungssektor angesiedelt:

- Zentralküche incl. Koch-, Brat- und Warmhaltegeräte sowie Spülstraße,
- Wäscherei mit Wasch- und Trocknerstraße, Mangel und Sortierung,
- Lebensmittelverarbeitung (Bäckerei, Schlachterei, Brauerei, Molkerei usw.)
- Gießerei und andere Metallverarbeitung,
- Papierproduktion und Druckerei,
- usw.

Die genannten Kernprozesse dominieren den Energieverbrauch der Produktionsstätte. Daneben gibt es nur noch wenige weitere Energieanwendungen, z. B. für die Gebäudebeheizung oder Mitarbeiterduschen. Eine Zusammenstellung der Besonderheiten von Prozesskonzepten zeigt Bild 124.

Untersucht wird der Prozess mit allen Einflussgrößen. Häufig werden dabei nicht nur technische Randdaten und Effizienzen variiert, sondern auch der gewünschte Nutzen (Wäschemenge, Essenanzahl, Produktionsgewichte oder -stückzahlen usw.). Untersuchungsziel können auch Auswirkungen veränderter Zeitprogramme und Regelstrategien sein.

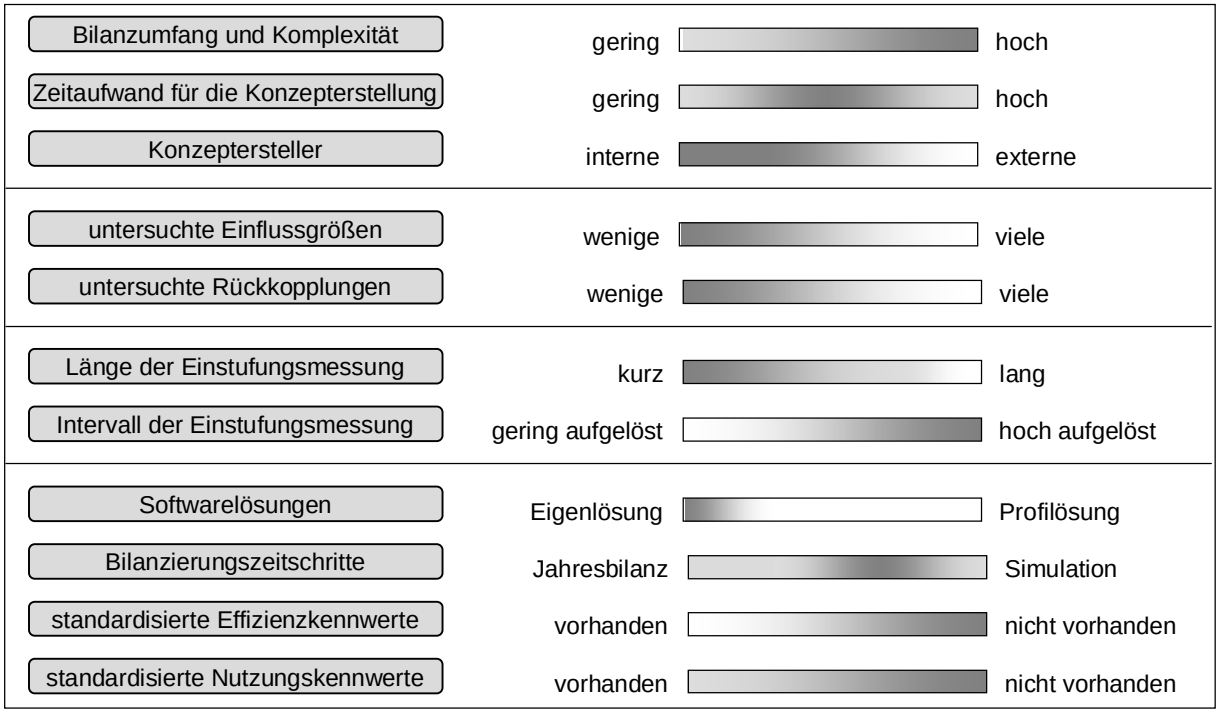


Bild 124 Besonderheiten von Prozesskonzepten

Messung und Bilanzierung

Die Energiebilanz ist sehr klar abgegrenzt. Sie umfasst aber – je nach Komplexität der ablaufenden Prozesse – viele einzelne Schritte. Der Nutzen ist meist klar festgelegt oder bestimmbar, es gibt häufig mehrere Energieträger als Input. in der Regel betrifft die Bilanzierung Verbraucher, die fast keine Abhängigkeit von der Witterung aufweisen, sondern Zeitprogrammen oder anderen kurzfristig wiederkehrenden Regelprogrammen unterliegen.

In der praktischen Anwendung wird für die notwendigen formelmäßigen Berechnungen häufig auf selbst programmierte Tabellenkalkulationen zurückgegriffen. Es gibt seltener professionelle Software, weil die abzubildenden Prozesse in der vorliegenden Reihenfolge und Verknüpfung mehr oder weniger Unikate sind. Eine professionelle Programmierung lohnt aufgrund der potentiell geringen Anwendungsfallzahlen meist nicht.

Für das Prozesskonzept im Bestand sind einstufende Messungen von Aufwand (Energiemengen) und Nutzen (Stückzahlen, Produktionsmengen o. ä.) mit relevanten Zwischenschritten unabdingbar.

Bei leistungsvariablen Prozessen muss eine Messung unter verschiedenen Belastungsprofilen erfolgen. Der Messzeitraum richtet sich nach typischen, wiederkehrenden Zeitabläufen. In vielen Fällen der Produktion reichen Tage oder eine Woche, um einen kompletten Zyklus zu erfassen. Das Messintervall muss den Lastwechseln angepasst sein. Es ist davon auszugehen, dass eher kurze Messintervalle im Bereich von Minuten bis Stunden sinnvoll sind.

Für Prozesskonzepte kommt eher selten professionelle Simulationssoftware zum Einsatz. Die notwendigen formelmäßigen Programmblöcke sind mitunter ohnehin nicht verfügbar. Darüber hinaus stehen Datenerhebungs- und Programmieraufwand in keinem günstigen Verhältnis.

Der Ersteller des Konzeptes muss stattdessen unbedingt in der Lage sein, mit den üblichen physikalischen Grundgleichungen (Thermodynamik, Hydraulik, Elektrotechnik, Verbrennungslehre) sicher umzugehen. Darüber hinaus muss selbstständig eine sinnvolle zeitliche Auflösung der Berechnungen eingeschätzt werden (Übergang von Leistungs- in Energiemengenbetrachtungen durch Intervallbildung, Einschätzung von Häufigkeitsverteilung bestimmter Betriebszustände).

Standardwerte

Die Datenbasis für Standardwerte ist sehr begrenzt. Es liegen zwar insgesamt energieintensive Prozesse vor, aber die Fallzahlen zur Verallgemeinerung sind meist nicht gegeben bzw. eine branchenübergreifende Datensammlung nicht feststellbar.

Sowohl hinsichtlich der Effizienzmerkmale der technischen Komponenten als auch hinsichtlich der Nutzungs- Zeit- und Belastungsprofile gelten Projektranddaten. Dies erhöht mitunter den Rechercheaufwand enorm.

Im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitungen können als Hilfsmittel nur die allgemeinen Vorgehensweisen (Verbrauchsdatenanalyse und Bedarfsberechnung siehe Abschnitt 4) bereitgestellt werden, nicht jedoch übertragbare Kennwerte.

Auftraggeber und Konzeptersteller

Prozesskonzepte sind für den Nichtwohnbau, speziell in der Produktion typisch. Ein vertieftes (teils langjähriges) Fachwissen in der entsprechenden Branche ist notwendig. Eine interne Konzepterstellung dürfe daher der Standardfall sein, Bearbeiter sind entsprechende Betriebsingenieure. Sofern externe Konzeptersteller involviert sind, muss der Zugang zu interner Kompetenz gewährleistet sein.

Beispiel

In Abschnitt 5.6 werden beispielhaft ein Konzept für eine Wäscherei vorgestellt, welches im Rahmen der Beratung einer diakonischen Einrichtung erstellt wurde.

5.2.4 Gebäudeenergiekonzept

Gegenstand des Energiekonzeptes ist ein Wohngebäude, Nichtwohngebäude oder gemischt genutztes Gebäude. Sofern das Nichtwohngebäude der Produktion dient, ist ein Energiekonzept für die ablaufenden Prozesse erforderlich (siehe Abschnitt 5.2.3), das Gebäude als thermische Hülle spielt dann eine eher untergeordnete Rolle.

Untersucht wird das Gebäude mit seinen Abhängigkeiten von Klima (meist standardisiert) und Nutzung (standardisiert oder individuell). Eine Variation der Nutzungsranddaten innerhalb eines Energiekonzeptes ist eher untypisch – außer es werden spezielle Umnutzungskonzepte erstellt. Jedoch kann diese Betrachtung sinnvoll sein, wenn Änderungen (Familienzuwachs, Wegzug der Kinder, Erbfälle, Verkauf usw.) absehbar sind.

Die Konzepte untersuchen mehrheitlich bauliche und technische Effizienzverbesserungen, Teil- oder Komplettaustausch von Komponenten, im Weiteren auch die Optimierung von Regelstrategien. Eine Zusammenstellung der Besonderheiten von Gebäudeenergiekonzepten zeigt Bild 125.

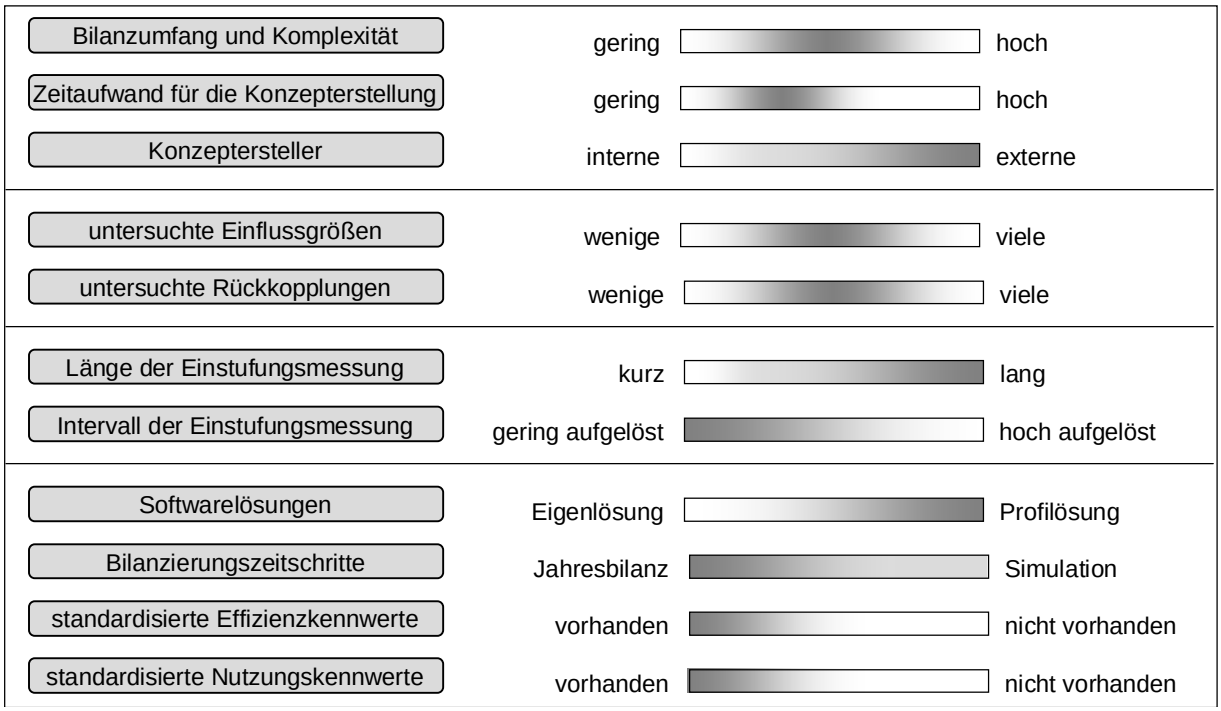


Bild 125 Besonderheiten von Gebäudekonzepten

Messung und Bilanzierung

Die Energiebilanzierung umfasst das Gebäude, seine Nutzung und mindestens die technischen Anlagen, die der Wärme- und Warmwasserversorgung dienen. Darüber hinaus kann die Bilanzierung sich auch über kälte- und raumlufttechnische Anlagen und die Beleuchtung erstrecken. Deutlich seltener werden auch die stromverbrauchenden Geräte der Nutzer in die Bilanz einbezogen. Mit dem Auftraggeber ist der Umfang der Bilanzierung abzustimmen.

Die zu ablaufenden Prozesse sind verkettet und beeinflussen sich gegenseitig, was üblicherweise rechnerisch berücksichtigt wird. Außerdem gibt es neben Zeit- und anderen Regeloptionen einen zu bilanzierenden Witterungseinfluss.

Bei der Erstellung von Gebäudekonzepten wird in der praktischen Anwendung auf vorhandene professionelle Software zurückgegriffen. Kaum ein Konzeptersteller beginnt mit einer leeren Tabellenkalkulation und programmiert die ablaufenden Prozesse anhand physikalischer Grundgleichungen. Jedoch gibt es auch semiprofessionelle Excel-Beratungstools, die sich mit ingenieurmäßigen Kenntnissen an reale Randdaten anpassen lassen. Eine Zusammenstellung üblicher Verfahren ist in Abschnitt 2.6 gegeben.

Für das Gebäudekonzept im Bestand empfehlen sich einstufende Messungen mindestens der aufgewendeten Energiemengen (Gas, Strom, Öl, Fernwärme usw.), besser zusätzlich auch der produzierten Wärmemengen ab Erzeuger. Dies ermöglicht eine separate Einschätzung des Erzeugers und des Gebäudes.

Da eine grundsätzliche Abhängigkeit des Gebäudeverbrauchs von der Witterung vorliegt, sollte die Messung mindestens den Zeitraum eines Jahres umfassen. Eine unterjährige Messung zeigt die Abhängigkeit des Heizungs- und Kühlenergieverbrauchs von der Witterung, den witterungsunabhängigen Verbrauch sowie den Erzeuger unter verschiedenen Belastungen – siehe Abschnitt 4.3. Sinnvoll ist die Erfassung der Jahresverbräuche in Intervallen von 2 … 6 Wochen.

Zusätzlich kann eine Kurzzeitmessung (wenige Tage bis 2 Wochen, Messintervall 1 … 60 Minuten) zur Erfassung von Lastspitzen der Trinkwassererwärmung und des Elektroverbrauchs erfolgen. Diese eher aus der Nutzung hervorgerufenen Lastprofile werden im Jahresgang verallgemeinert (Annahme periodischer Wiederholung).

Im Segment der Gebäudekonzepte kommen gelegentlich Simulationen mit Hilfe professioneller Programme (z. B. mit TRNSYS) zum Einsatz. Der Modellierungsaufwand und die Rechendauer sind dabei sehr hoch. Die Randdaten der Simulation (alle zeitabhängige Größen) müssen entsprechend genau vorliegen, sonst leidet der Erkenntnisgewinn. Der Einsatz der Simulationen von Wohnbauten beschränkt sich auf Forschungsvorhaben. Nichtwohnbauten werden bei prämierten Ausschreibungen simuliert. Für die übliche Energiekonzepterstellung ist die Abbildung einer thermischen Gebäudesimulation meist deutlich zu aufwendig.

Häufig werden Simulationsberechnungen durchgeführt, da spezielle Fachkenntnisse, z. T. aber auch Grundkenntnisse in der Energie- und Gebäudetechnik bei den Konzepterstellern fehlen.

Der Ersteller des Konzeptes sollte grundlegende Zusammenhänge einer Energiebilanzierung verstehen (Abschnitt 4.6), so dass die Grenzen der verwendeten Software eindeutig bekannt sind. Ergebnisse sowie Kennwerte müssen eingeordnet werden können (Abschnitt 3).

Standardwerte

Zur Gebäudebewertung kann – neben den individuellen Messwerten – auf Datenbanken mit Standard- und Vergleichswerten zurückgegriffen werden – siehe Datensammlung in Abschnitt 3. Es lässt sich dabei folgende Verfügbarkeit feststellen:

- sehr gute Datenbasis: Kennwerte für Wärmeerzeuger, Speicher, Verteilnetze, Pumpen, Beleuchtung und zugehörige Regelungstechnik, Gebäudehülle, Nutzungsranddaten im Wohnbau,
- gute Datenbasis: Kennwerte für Kälteanlagen und Raumlufttechnik, Medien- und Bürotechnik, Nutzungsranddaten im Nichtwohnbau mit Dienstleistungsnutzung,
- mittlere Datenbasis: Kennwerte für Haushaltsgeräte,
- eher schlechte Datenbasis: Kennwerte für Technik sowie Nutzungsranddaten in Nichtwohngebäuden der Produktion.

Der Nutzen (Temperaturen, Luftwechsel, Lichtstärken, Gerätelaufzeiten usw.), welcher der Bilanzierung zugrunde gelegt wird, ist in der freien Beratung nicht eindeutig definiert. Er muss festgelegt werden. Bei Energiekonzepten für Bestandsgebäude kann – nicht muss! – er am derzeitigen Zustand orientiert werden.

Allerdings ist mit dem Nutzer zu besprechen, ob aktuelle Nutzungsbedingungen des Gebäudes tatsächlich langfristig gewünscht und realistisch sind. Die praktische Erfahrung zeigt, dass sich das Nutzungsverhalten mit der energetischen Verbesserung ändert – meist intensiviert, da vorher aus Kostengründen (nicht aus Überzeugung!) gespart wurde.

Auftraggeber und Konzeptersteller

Gebäudekonzepte sind für den Wohnbau und Nichtwohnbau mit Dienstleistungsnutzung typisch. In Gebäuden dieser Nutzung entfällt ein großer Teil des Energieverbrauchs auf die Wärme- und Kälteversorgung sowie Trinkwarmwasserversorgung. Die Nutzung selbst und die ablaufenden Prozesse sind vergleichsweise gut standardisierbar und vorhersehbar – anders als in Gebäuden der Produktion. Es gibt seltener große Einzelenergieverbraucher (siehe 5.2.2), kaum zusätzliche energieintensive Prozesse (siehe 5.2.3).

Die Konzepterstellung ist insgesamt sehr strukturierbar. Sie läuft schematisiert ab, auch wenn jeder Fall ein Einzelfall ist. Der Konzeptersteller baut sehr schnell einen Erfahrungsschatz mit Hilfsmitteln zur Gebäudeaufnahme und zur Ergebnisinterpretation auf. Konzeptersteller können daher problemlos externe Bearbeiter sein, die ansonsten keinen Bezug zu der betreffenden Immobilie haben.

Der Personenkreis der Bearbeiter umfasst Architekten, Ingenieure, Schornsteinfeger und weitere nicht akademische Bauschaffende.

Beispiele

In Abschnitt 5.6 werden beispielhaft Konzepte für mehrere Wohn- und Nichtwohngebäude vorgestellt, welche im Rahmen der Beratung einer diakonischen Einrichtung erstellt wurden.

5.2.5 Quartier-, Siedlungs- und kommunales Energiekonzept

Gegenstand des Energiekonzeptes ist eine Vielzahl an Gebäuden mit unterschiedlicher Nutzung. Im Falle der Quartier- und Siedlungskonzepte sind sie räumlich eng verbunden angeordnet. Bei kommunalen Energiekonzepten können alle oder nur Teilmengen aller vorhandenen Gebäude untersucht werden.

Untersucht wird die Gesamtheit aller Gebäude. Bei der Erstellung dieser Art Energiekonzept liegt der Schwerpunkt meist auf der Wärmeenergieversorgung, erst nachrangig auf der Stromversorgung. Häufige Fragestellungen sind neu zu errichtende Wärmenetze sowie die gekoppelte Wärme- und Stromversorgung. Problematisch sind Energiekonzepte für unterschiedliche Nutzungs- (Miet- und Eigentumswohnungen, Gemeinschaften von Wohnungseigentümern) und Eigentümerstrukturen (mehrere Wohnungsunternehmen). Eine Zusammenstellung der Besonderheiten von Quartiers-, Siedlungs- und kommunalen Energiekonzepten zeigt Bild 126.

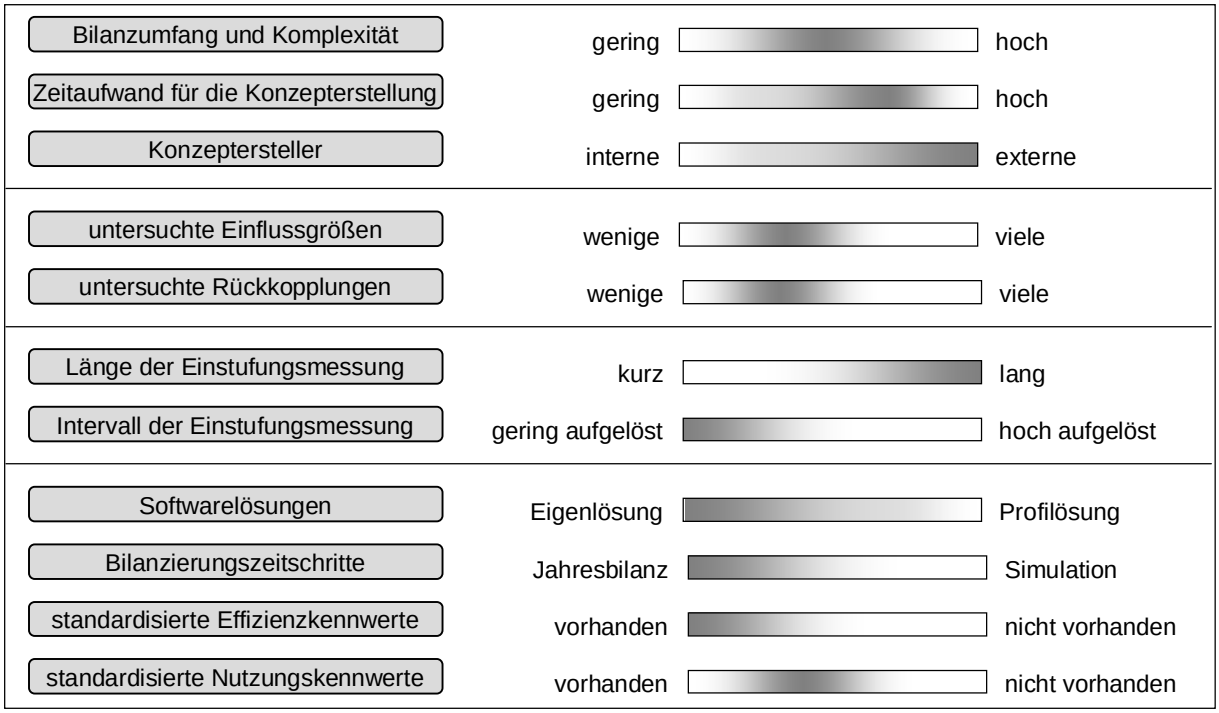


Bild 126 Besonderheiten von Quartiers-, Siedlungs- und kommunalen Energiekonzepten

Individuell ausgearbeitete Konzepte zur Bedarfsminimierung (Gebäudewärmedämmung, Nutzerverhalten, Regelungs- und Anlagentechnik im Gebäude) im einzelnen Objekt spielen nur eine untergeordnete Rolle. Eine Variation der Nutzungsranddaten innerhalb eines Energiekonzeptes ist ebenfalls eher untypisch, da sich eine sehr große Zahl von zu untersuchenden Varianten ergäbe. Die Gebäudeendenergiebedarfe werden als "Nutzen" definiert und meist nicht näher bilanziert.

Aus Erfahrung wird angeraten, zumindest eine künftig vorstellbare Variante einer veränderten Nutzung bzw. eines geänderten Gebäudeenergiebedarfs ("Nutzens") zu untersuchen.

Messung und Bilanzierung

Die Energiebilanzierung umfasst in der Regel sehr detailliert die technischen Anlagen, die der Wärme- und Warmwasserversorgung dienen. Sofern das Untersuchungsgebiet über eine eigene Stromerzeugung (PV, KWK usw.) verfügt, wird auch diese sehr detailliert abgebildet. Auch gebäudeexterne Wärmenetze müssen – sofern sie Teil des Konzeptes sind – anhand konkreter Längen der Nah- und Fernwärmetrassen erfasst werden.

Auf der anderen Seite stehen die Wärmebedarfe der zu versorgenden Gebäude. Sie hängen von der Nutzung der Gebäude, ihrem Wärmedammstandard sowie der gebäudeinternen Netze und Speicher ab. Aufgrund der Vielzahl an Objekten innerhalb des Untersuchungsgebietes wird regulär darauf verzichtet, für jedes Gebäude eine ausführliche Bilanzierung vorzunehmen, anders als beim Gebäudeenergiekonzept (siehe Abschnitt 5.2.4).

Der Bedarf an Wärme für die Heizung und Trinkwassererwärmung (im besten Falle getrennte Angaben) werden als notwendige Nutzwärme vorgegeben. Da Versorgungsvarianten mit verschiedenen (gebäudeinternen und/oder gebäudeexternen) Erzeugern untersucht werden, ist der Wärmebedarf ab Erzeuger relevant. Soll sich das Konzept auch auf Kälte erstrecken, gelten die Aussagen analog.

Es empfiehlt sich ebenfalls der Einbezug des Strombedarfs der Gebäude (per Hausanschluss). Er ist als Eingangsgröße unverzichtbar, sobald Konzepte mit Kraft-Wärme-Kopplung untersucht werden.

Mit dem Auftraggeber ist der Umfang der Bilanzierung abzustimmen.

Die Gebäudeenergiebedarfe unterliegen jeder für sich einem Jahresprofil. Es sollte mindestens berücksichtigt werden, welche witterungsabhängigen und witterungsunabhängigen Anteile je Objekt vorliegen.

Für alle weiteren Betrachtungen – wie Selbstnutzungsquoten von eigenproduziertem Strom oder regenerativer Wärme – müssen Profile mit feinerer Auflösung vorliegen. Alternativ verzichtet man auf solche Untersuchungen und erstellt rein bilanzielle Gegenüberstellungen von produzierten und notwendigen Energiemengen.

Bei der Erstellung von Quartier-, Siedlungs- und kommunalen Energiekonzepten wird in der praktischen Anwendung meist auf selbst programmierte Tabellenkalkulation zurückgegriffen. Die Berechnungen beschränken sich auf die Abbildung von Erzeugern und Netzen – sind also technisch bzw. formelmäßig eher einfach und überschaubar (Ansätze siehe Abschnitt 4.6.2 ff.). Die Bilanzierung ist vor allem eine Frage des Umgangs mit großen Datenmengen. Es gibt kaum professionelle Software für diese Konzeptart.

Für Energiekonzepte im Bestand empfehlen sich einstufende Messungen. Ideal sind Messungen der in den Gebäuden notwendigen thermischen Energien hinter dem Erzeuger sowie des Stromverbrauchs am Hausanschluss. Daten von Heizkostenabrechnungsunternehmen sollten soweit möglich immer genutzt werden. Da dies bei einer großen Zahl von Objekten im Untersuchungsgebiet vielfach nicht umsetzbar ist, sind alternativ die gelieferten Endenergien zu erfassen. Sie enthalten die Effizienz des derzeitigen gebäudeinternen Erzeugers.

Da eine grundsätzliche Abhängigkeit von der Witterung vorliegt, sollte die Messung mindestens den Zeitraum eines Jahres umfassen, so dass alle Jahreszeiten enthalten sind. Eine unterjährige Messung zeigt die Abhängigkeit des Heizungs- und Kühlenergieverbrauchs von der Witterung, den witterungsunabhängigen Verbrauch – siehe Abschnitt 4.3. Sinnvoll ist die Erfassung der Jahresverbräuche in Intervallen von 2 … 6 Wochen, auch akzeptabel ist eine separate Sommermessung. Kann beides nicht umgesetzt werden, wird der Jahresverbrauch verwendet.

Im Segment der Quartier-, Siedlungs- und kommunales Energiekonzepten kommen nur sehr selten Simulationen mit Hilfe professioneller Programme (z. B. mit TRNSYS) zum Einsatz. Die Simulation lebt von der Vorgabe zeitlich sehr detailliert aufgelöster Randdaten, die bei einer Vielzahl von Gebäuden schlichtweg meist nicht vorliegen.

Der Ersteller des Konzeptes sollte in der Lage sein, mit den grundlegende Zusammenhängen einer Energiebilanzierung (Abschnitt 4.6) und Berücksichtigung heutiger Messwerte (Abschnitt 4.2 ff.) einen künftigen Gebäudewärmebedarf bei verändertem Wärmeschutz und veränderter Nutzung abzuschätzen. Außerdem müssen Effizienzen von Erzeugern sowie Netzen realistisch berechnet werden.

Standardwerte

Zur Erzeuger- und Netzbewertung kann – neben den individuellen Messwerten – auf Datenbanken mit Standard- und Vergleichswerten zurückgegriffen werden – siehe Datensammlung in Abschnitt 3.

Der Nutzen (Gebäudeenergiebedarf für Wärme, Strom usw.), welcher der Bilanzierung zugrunde gelegt wird, muss festgelegt werden. Für diesen gibt es keine Standardwerte. Bei Energiekonzepten für Bestandsgebäude wird er am derzeitigen Zustand – d.h. bestenfalls dem Verbrauch – orientiert.

Es ist mit dem Auftraggeber zu besprechen, welche langfristigen Trends mit verändertem Bedarf abgebildet werden sollen. Zu Bedenken sind Auswirkungen der Demographie, veränderte Nutzungsansprüche (derzeit permanente Wohnflächenvergrößerung), Bevölkerungsmigration, Verschiebungen von industrieller Produktion zur Dienstleistungswirtschaft usw. Mit Hilfe typischer Kennwerte nach Abschnitt 3 werden künftig veränderte Randdaten abgeschätzt.

Auftraggeber und Konzeptersteller

Quartier-, Siedlungs- und kommunale Energiekonzepte sind gut strukturierbar und laufen schematisiert ab. Der Konzeptersteller baut sehr schnell einen Erfahrungsschatz mit Hilfsmitteln zur Anlagenbewertung und Datenhaltung auf. Konzeptersteller können daher problemlos externe Bearbeiter sein.

Neben beauftragten, externen Bearbeiter kommt auch der interne Personenkreis mit Planungs- oder Überwachungsaufgaben für den entsprechenden Bestand als Ersteller in Frage. Der Personenkreis der Bearbeiter umfasst in der Mehrzahl Ingenieure (mit technischem Schwerpunkt) sowie Architekten.

Typische Auftraggeber sind Kommunen, die Wohnungswirtschaft, Versorgungsunternehmen.

Beispiele

In Abschnitt 5.6 wird beispielhaft ein Konzept für die Wärme- und Stromversorgung eines Dorfes vorgestellt, welche im Rahmen der Beratung einer diakonischen Einrichtung erstellt wurde. Das vorhandene Wärmenetz wird auf Rückbau untersucht und entsprechende Ersatzerzeuger in den abgekoppelten Gebäuden vorgeschlagen.

5.2.6 Politische Szenarien

Als Sonderfall seien Energiekonzepte im Vorfeld gesetzlicher Entscheidungen genannt. Hierunter fallen beispielsweise Novellierungen der Energieeinsparverordnung, des EEG, des EEWärmeG und des KWK-G (samt Rückwirkungen Subventionen, Fördermittel, Steuern, Netznutzungsentgelte, Abgaben,…), der Energiedesignrichtlinien (ERP - energy related products), des Mietrechts, der Heizkostenverordnung usw. Auch allgemeine politische Richtungsentscheidungen, z. B. im Rahmen der Energiewende, des Atom- und Kohleausstiegs werden von Energiekonzepten begleitet.

Bilanzumfang und Detaillierung

Die erstellten Energiebilanzen für politische Energieszenarien weisen einen der jeweiligen Fragestellung angepassten Umfang auf. Die Novellierung von Produktdesignrichtlinien für Pumpen werden ebendiese betrachtet; für die Energiewendethematik im Gebäudesektor entsprechend Wohn- und Nichtwohnbauten. Generell erfolgen exemplarische Berechnungen unter standardisierten Randdaten sowie Hochrechungen auf den bundesdeutschen Gesamtbestand (an Pumpen, Gebäuden usw.).

Berechnungen enthalten jeweils das Abbild des heutigen Zustandes sowie einen oder mehrere künftige Szenarien – unter veränderten Randdaten.

Die Bewertung des einzelnen Gebäudes, Kraftwerks oder Wärmeerzeugers erfolgt mit eher geringer Detaillierung (typisiert) – bezogen auf das einzelne Objekt oder Produkt. Wichtiger sind die Art der Hochrechnung sowie die Parameteranalyse zur Darstellung der Auswirkungen von veränderlichen Randdaten.

Bedarf und Verbrauch

Ein gutes Konzept orientiert sich für den Status Quo an realen Verbrauchswerten, typischen Effizienzen und Nutzungsprofilen. Diesen Wunsch erfüllen nicht alle Konzepte.

Vielfach werden Bilanzen unter standardisierten Nutzungsannahmen erstellt, die nicht die Realität abbilden. In der Konsequenz werden falsche Energiemengen – bereits in der Bestandsbewertung – berechnet, vgl. auch Abschnitt 4.1.52.3. und 4.1.5. Alle weiteren Aussagen können dann nicht mehr der Realität entsprechen.

Statistische Grundlagen

Wichtige Datengrundlage sind die Erhebungen des Statistischen Bundesamtes sowie der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Sie liefern:

- Personenzahlen und Gebäudeflächen,
- Unternehmenszahlen und Umsätze,
- Energieverbrauchswerte, z. B. nach Energieträgern und Sektoren

In der Rückschau sind Trends erkennbar. Deren Übertragbarkeit auf die Zukunft muss individuell beurteilt werden. In jedem Fall sind die Einflüsse – im Rahmen von Parameteranalysen – zu berücksichtigen:

- Bevölkerungsentwicklung und Migrationsbewegungen,
- Wohn- und Nutzflächenentwicklung,
- Energiepreisentwicklung und Inflation,
- Baupreis- und Baufinanzierungsentwicklung,
- Konjunkturdaten.
- usw.

Diskussionsbeispiel

Die aktuelle Diskussion zur Energiewende nach der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris führt in Deutschland zur realistischen Diskussion und Empfehlung einer fast vollständigen Dekarbonisierung, also des vollständigen Ausstiegs aus fossilen Energieträgern sogar schon bis 2050 [4].

Unabdingbare Voraussetzung für diese Entwicklung sind erhöhte Anforderungen an die Energieeffizienz von Bestandsgebäuden durch energetische Modernisierung bei hohen Dämmstandards und angepasster Anlagentechnik. In der Energieversorgung für Heizzwecke konkurrieren zwei Richtungen:

- sehr starker Ausbau von Nah- und Fernwärmesystemen mit zunächst verstärktem Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), zukünftig mit verstärkter Nutzung von Abwärme, biogenen Brennstoffen, Geothermie und Solarthermie,
- fast ausschließlichem Einsatz von Elektrowärmepumpen und nur noch wenig KWK in vorhandenen Nah- und Fernwärmenetzen und nur bei sehr hohen Wärmeabnahmedichten unter Nutzung neuer Technologien wie Power-To-Gas und evtl. Power-To-Heat aus überschüssigen Strommengen aus Windkraft- und PV-Anlagen.

Verschiedene Zielsetzungen zu den Themen Energieeinsparung, Effizienzsteigerung, Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien und CO_2-Minderung sollten auf eine Zielgröße konzentriert werden. Würde z. B. die vom Bundesrat 2013 beschlossene Zusammenlegung von EnEV und EEWärmeG erfolgen, könnte auch gleichzeitig die Bewertungsgröße "Primärenergie" durch eine "Endenergie- und CO_2-Bewertung" ersetzt werden.

Eine CO_2-Bewertung bietet sich an, weil sowohl EnEV (nahezu klimaneutraler Gebäudebestand) als auch EEWärmeG (Ressourcenschonung) den Klimaschutz zum Ziel haben. So bedeutet "klimaneutral", dass bilanziell keine Treibhausgase mehr emittiert werden. Und da CO_2 ein bedeutendes Treibhausgas ist, bieten sich für eine Bewertung der Gebäude auch die entstehenden CO_2-Emissionen (bzw. entsprechende Äquivalente) an.

Ende der 1990er-Jahre gab es die politische Entscheidung, umweltrelevante Bewertungen in der EnEV über Primärenergie und nicht über Endenergie bzw. CO_2-Emissionen vorzunehmen. Geschuldet war dies der weitgehend CO_2-neutralen Erzeugung von Strom in Kernkraftwerken, aus denen man nach dem Regierungswechsel 1998 bereits aussteigen wollte. Durch den 2011 beschlossenen und nicht mehr umkehrbaren Ausstieg aus der Kernenergie, kann somit eine CO_2-Bewertung eingeführt werden.

Heute führt die Primärenergiebewertung in vielen Fällen zu Fehlentscheidungen und damit auch zu Fehlentwicklungen. So kann unter Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung mit kohlebefeuerte Fernwärme ein sehr geringer Primärenergiefaktor erreicht werden – der errechnete Primärenergiebedarf ist entsprechend gering und Gebäudedämmung sowie Anlagentechnik könnten entsprechend minderwertig ausgeführt werden. Schlussendlich entsteht ein erhöhter Endenergiebedarf des Gebäudes in Verbindung mit hohen CO_2-Emissionen durch Kohlekraftwerke.

Bei einer Novellierung der Gesetzgebung sollten auch die Bilanzgrenzen angepasst werden. Momentan fordert z. B. das EEWärmeG regenerativ zu deckende Anteile am so genannten "Wärmeenergiebedarf" also dem vom Wärmeerzeuger abgegebenen Nutzwärmebedarf – die durch die zusätzlich notwendige Anlagentechnik entstehenden Verluste (z. B. Speicherverluste eines Solarpufferspeichers) werden damit als "Nutzen" einbezogen und in ihrer Wirkung als "zusätzliche Verluste" nicht beachtet.

Auch die Erzeugerverluste werden im EEWärmeG nicht einbezogen. Der ursprünglich für das EEWärmeG und ursprünglich auch für die EnEV 2000 (bis 1998) vorgesehene Endenergiebezug wäre geeigneter. In Feldstudien wurden hinsichtlich dieser Problematik teilweise sogar Mehrverbräuche an Endenergie festgestellt – die zusätzlichen technischen Verluste von Nahwärmenetzen und Speichern haben z. B. den Solarertrag "aufgefressen oder sogar erhöht" [79]. Es ist erkennbar, dass ein Bezug auf die Endenergie bzw. auf die CO_2-Emissionen essenziell ist.

5.3 Vorüberlegungen und Zielsetzungen

Für die Erstellung eines Energiekonzeptes sind geeignete Rechenmethoden zu wählen und Randdaten zu erheben bzw. festzulegen – siehe Kapitel 5.4. Es empfiehlt sich, vor Beginn der Recherche das oder die langfristigen Ziele des Auftraggebers festzustellen. Diese bestimmen die Recherchetiefe und ggf. nicht notwendige Randdaten.

Nachfolgend genannte Motivationen und verfolgte Ziele sind typisch im Zusammenhang mit Energiekonzepten:

- Reduktion der laufenden Kosten für Energie, Wartung und Instandhaltung, Personal (z. B. für Anlagenbedienung), Versicherungen (Gebäude, Anlagen) usw.,
- Erhöhung der Betriebswirtschaftlichkeit bzw. Reduktion der Gesamtkosten, wie zuvor jedoch incl. Kapitalkosten,
- Ausschöpfen von Fördermitteln (besondere Randdaten für die energetische Bewertung der Fördermittelgeber sind zu beachten),
- Komfortverbesserung oder Maßnahmen als Reaktion auf Beschwerden,
- Optimierung von Nutzungs- und Betriebsranddaten ohne oder mit geringen Investitionen,
- Verbesserung der Versorgungs- und Betriebssicherheit,

- Verminderung der Abhängigkeiten von Dritten, z. B. Energieversorgern, Wartungsunternehmen, Prüfinstanzen (TÜV, Arbeitssicherheit etc.),
- Kopplung von Maßnahmen des Energiekonzeptes mit allgemeiner Instandhaltung,
- Maßnahmen in Verbindung mit veränderten Arbeitsabläufen, Umstellung von Produktionsmengen oder -arten,
- Maßnahmen in Verbindung mit geltenden gesetzlichen Auflagen, z. B. Immissionsschutz, EnEV, ERP-Richtlinie, EU Regeln zum Verbot bestimmter Kältemittel usw.,
- Maßnahmen in Verbindung mit Beseitigung von Schadensfällen, z. B. Asbestsanierung, Baufeuchte- und Schimmelschäden, Legionellen usw.,
- lokaler oder globaler Umweltschutz,
- Verbesserung der Außendarstellung sowie Umsetzung von Leitbildern,
- Maßnahmen zur Verbesserung der Volkswirtschaftlichkeit.

Sollten mehrere Ziele relevant sein, die erkennbar zu anderen Handlungsrichtungen führen können oder werden, ist frühzeitig eine Prioritätensetzung der Ziele vorzunehmen. Dies hilft nicht nur bei der Maßnahmenempfehlung gegen Ende der Konzepterstellung, sondern bereits bei der Einschätzung des Rechercheaufwandes im Vorfeld. Es kann eine Wertanalyse zum Einsatz kommen, siehe Kapitel 5.3.

5.4 Energetische, ökologische und wirtschaftliche Auswertung

Liegt die Zielrichtung und Motivation des Energiekonzeptes grob fest, folgen:

- die Festlegung der Bilanzgrenzen und des Bilanzumfangs,
- die Festlegung des Detaillierungsgrades der Bilanz und der Rechenverfahren,
- die Zusammenstellung von Randdaten der Energiebilanzierung incl. Nutzungsranddaten (wenn nicht Standardwerte) und Verbrauchsdaten (wenn verfügbar),
- die Zusammenstellung von Kosten, ggf. Fördermitteln und weiteren Randdaten der wirtschaftlichen Bewertung, falls Teil des Konzeptes,
- die Zusammenstellung von Faktoren zur Umweltbewertung, falls Teil des Konzeptes.

Darüber hinaus werden selbstverständlich Recherchen zu den geplanten Verbesserungsmaßnahmen, z. B. deren rechtliche und technische Machbarkeit, Komfortparameter (Bedienung, Nutzung), Risiken durchgeführt. Anschließend erfolgt die rechnerische Auswertung.

5.4.1 Energetische Auswertung

Die energetische Auswertung eines Ausgangszustandes (Bestand, Minimallösung, Grundvariante o. ä.) und aller Varianten (meist energetisch verbessert gegenüber dem Ausgangszustand) erfolgt rechnerisch. Es ergeben sich zwei Bedarfsbilanzen und ein rechnerischer Unterschied, meist mindestens der Endenergie.

Für Energiekonzepte im Bestand ist es ratsam Verbrauchsdaten (Energie, Leistung) zur Bestandsbewertung heranzuziehen. Je nach verfügbarer Bearbeitungszeit für das Konzept können parallel zur Grunddatenerhebung auch zusätzliche Messungen gemacht werden, sofern keine Messwerte vorliegen. Vorhandene Verbrauchsdaten können den Zeitumfang der theoretischen Bestandserfassung zeitlich stark verkürzen. Sie plausibilisieren auf jeden Fall die Annahmen der Berechnung. Weitere Ausführungen siehe 2.3, 4.2 und 4.3.

Generell ist ein Monitoring des Erfolgs im Anschluss an die Konzeptumsetzung ratsam. Sofern entsprechend notwendige Zähl- und Messeinrichtungen noch nicht vorhanden sind, sollten Zählerpositionen und Messintervalle im Rahmen der Konzepterstellung definiert werden.

Bilanzgrenzen und Bilanzumfang

Die für das Projekt relevanten Bilanzkreise bzw. der Bilanzumfang sind in jedem Fall vor der Bilanzierung festzulegen und entsprechende Bilanzgrenzen eindeutig zu ziehen, siehe auch Kapitel 2.4.

- Bilanzkreise/-umfang: Heizenergie, Kälteenergie, Warmwasserversorgung, Beleuchtung, Belüftung und Klimatisierung, Druckluft, Prozessenergie und Produktion, Haushaltsstrom, Mobilität
- Bilanzgrenzen: Gerät/Maschine, Produktionsstrecke, Raum, Zone, Gebäude, Liegenschaft, Siedlung/Quartier, Stadt/Kommune, usw.

Insbesondere die Variantenauswertung gekoppelter Prozesse (Wärme – Kälte – Strom) erfordert eine nachvollziehbare Festlegung der Bilanzgrenzen. So wird verhindert, dass "Äpfel und Birnen" verglichen werden. Aus der Festlegung resultieren die zu bilanzierenden Energieträger, aus deren Endenergiemengen sich alle weiteren Bewertungen ableiten lassen (Energiekosten, Emissionen, Primärenergie usw.)

Detaillierungsgrad

Es ist zu klären, in welcher zeitlichen Auflösung bilanziert werden soll: Stunden, Tage, Monate ein Jahr. Mit kleinerer Schrittweite müssen veränderliche Nutzungsranddaten entsprechend ebenfalls detailliert erfasst oder festgelegt werden. Bei großer Schrittweite sind sinnvolle repräsentative Mittelwerte für jedes Intervall anzunehmen. Das gilt nicht nur für die bilanzierten Energieflüsse über die Bilanzgrenzen (Beispiel: repräsentative Innentemperatur für Transmissionsberechnung), sondern auch für Prozesse innerhalb der Bilanzgrenzen (Beispiel: Nutzungsanteil von selbst produziertem Strom).

Bilanzierungsart und Verfahren

Weiterhin wird geklärt, ob für die Bilanzierung teilweise feste Randdaten gelten. Dies ist bei allen Nachweisverfahren (EnEV, KfW, Passivhaus usw.) der Fall. Die mit festen Randdaten belegten Einflussgrößen – Klima, ggf. Nutzung – müssen nicht erhoben werden. Die Einschränkung der Bilanzaussage bei teilweise festen Randdaten ist zu beachten. Mögliche und typische Bilanzverfahren und deren Eignung als Nachweis- oder Beratungsverfahren siehe Kapitel 2.6.

Zusammenstellung der Randdaten

Für den vorher festgelegten Umfang und die Bilanzgrenzen sind die relevanten Randdaten der Berechnung in entsprechender zeitlicher Auflösung festzulegen:

- Nutzungsranddaten (Zeiten, Wasser-, Luft- und andere Stoffmengen, Temperaturen und Feuchten, Beleuchtungsstärken usw.), sofern nicht eine Standardnutzung angesetzt werden soll oder muss,
- Klima- und Standortdaten (Temperaturen, Strahlung, Feuchten, Wind usw.), sofern nicht Standardranddaten angesetzt werden sollen oder müssen,
- Kennwerte für den Baukörper (geometrische Daten, Wärmedurchgangskoeffizienten, Energiedurchlassgrade, Absorptionsgrade, Einschätzung der Dichtheit und der Wärmebrücken, Speicherfähigkeit usw.)
- Kennwerte für Erzeuger (Wirkungsgrade bzw. Leistungszahlen, Betriebsbereitschaftsverluste, resultierende Nutzungsgrade und Arbeitszahlen, Stromkennzahlen usw.)
- Kennwerte für Verteilnetze und Speicher (Längen und Volumina, Wärmedurchgangskoeffizienten, Temperaturen, Regelungsoptionen und Zeitschaltprogramme usw.)
- Kennwerte für Maschinen und Geräte, Beleuchtung, Motoren, Pumpen und Ventilatoren (Leistung, Wirkungsgrade, Regelungsoptionen und Zeitschaltprogramme)

Software

Für die Energiekonzepterstellung für Wohngebäude ist eine große Vielfalt an Software am Markt verfügbar. In der Mehrzahl sind dies jedoch Nachweisprogramme (EnEV, KfW), die keine freien Randdaten (Nutzung, Klima) zulassen. Beratungstaugliche Software ist an dieser Stelle offen für freie Eingaben, idealerweise umschaltbar zwischen beiden Modi. Die im Hintergrund verfügbaren Datenbanken mit Kennwerten zur energetischen Bewertung – siehe Kapitel 3 – sowie Kostenkennwerten sollten möglichst umfänglich sein.

Je spezieller das zu bilanzierende Objekt oder der Prozess, desto geringer der Markt geeigneter Softwarelösungen: Nichtwohnbauten (ohne Produktion), Liegenschaften/ Siedlungen/ Quartiere usw., Produktionsstrecken/ Maschinen/ Geräte.

5.4.2 Ökologische Auswertung

Ob eine Umweltbewertung stattfindet und auf welche Art dies erfolgt, hängt vom Energiekonzept, den Wünschen des Auftraggebers sowie äußeren Auflagen ab. Im Zusammenhang mit der EnEV und vielen Förderprogrammen des Bundes (KfW, BAFA) ist eine Primärenergiebewertung obligatorisch. Regionale Förderprogramme enthalten teilweise eine Verpflichtung zur CO_2-Bilanzierung. In diesen Fällen ist die Datenherkunft der Primärenergie- bzw. CO_2-Faktoren meist klar geregelt.

Findet eine Konzepterstellung nach alleinigen Wünschen des Auftraggebers statt, wird häufig auf die Umweltbewertung verzichtet, da kein Interesse an dieser Thematik besteht. Ist der auftraggeberseitige Wunsch nach einer Umweltbewertung jedoch vorhanden, aber ohne weitere Präzisierung, wird zur CO_2-Bewertung geraten. Zum einen ist die Verwechslungsgefahr mit der Endenergie geringer (als bei der Primärenergie), zum anderen bewertet das CO_2-Äquivalent die Energieträger nach Schädlichkeit der Verbrennungsprodukte. Siehe auch Erläuterungen in Kapitel 2.5.

5.4.3 Wirtschaftliche Auswertung

Ob und unter welchen Randdaten es zu einer Gesamtkostenbewertung kommt, ist mit dem Auftraggeber zu klären. Ein EnEV- oder KfW-Nachweis zieht nicht automatisch eine Wirtschaftlichkeitsbewertung nach sich. Ansonsten ist diese in den meisten Energiekonzepten enthalten. Es ist festzulegen, ob sie unter statischen oder dynamischen Randdaten erfolgen soll.

Ziel einer Wirtschaftlichkeitsberechnung ist, eine Aussage über die finanziellen Auswirkungen der Investition zu ermöglichen. Bei der Betrachtung von Energiesparmaßnahmen ist meist die Besonderheit gegeben, dass keine direkten Gewinne erwirtschaftet werden können. Es wird nur ein Vergleich von Kosten und Einsparungen vorgenommen. Die Sparmaßnahme wird im Vergleich zu anderen Alternativmaßnahmen oder dem Zustand ohne Investition bewertet.

Vor allen weiteren Ausführungen ist anzumerken, dass die betriebswirtschaftliche Ergebnisse mehrerer Ausführungsvarianten eines Energiekonzeptes oftmals so nahe beieinander liegen, dass die Abweichungen innerhalb der auf unsichere Daten (insbesondere der Energiepreisentwicklung) zurückgehenden Bandbreite liegen. Das Wirtschaftlichkeitskriterium allein erlaubt dann keine vernünftige Entscheidung, es sind weitere Kriterien einzubeziehen, siehe Kapitel 5.5.

Schätzkosten

Die Kostendaten der Investitionen sind in der Konzeptphase meist Abschätzungen anhand der Literatur, also anhand von Erfahrungswerten. Das Einholen von Angeboten erfolgt eher seltener, um die Konzepterstellung kostengünstig zu halten.

Eine Zusammenstellung von Kostenfunktionen aus der Literatur, Praxisprojekten und Erfahrungswerten für die Modernisierung von Gebäuden und deren Versorgungsanlagen (Gebäudekonzept, Quartierskonzept), zeigen die nachfolgenden Tabellen.

Komponente	Spezifikation	Kostenfunktion*	Einschränkung
Dämmung			
Außenwand	Dämmung von außen	90 €/m² + 2,5 €/m² · [d/cm]	Dämmdicke d = 6...30 cm, λ = 0,035 W/(mK)
Kellerdecke	Dämmung von unten	30 €/m² + 1 €/m² · [d/cm]	Dämmdicke d = 4...20 cm, λ = 0,035 W/(mK)
Oberste Geschossdecke	Dämmung von oben, begehbar	25 €/m² + 2 €/m² · [d/cm]	Dämmdicke d = 6...30 cm, λ = 0,035 W/(mK)
	Dämmung von oben, nicht begehbar	5 €/m² + 1,2 €/m² · [d/cm]	
Sparrendach	Zwischen- und Aufsparrendämmung mit Neueindeckung	170 €/m² + 2,7 €/m² · [d/cm]	Dämmdicke d = 8...24 cm, λ = 0,035 W/(mK)
	Dämmung zwischen, auf und unter den Sparren von unten (ohne Dachausbau) oder von oben (ohne Neueindeckung)	25 €/m² + 2,2 €/m² · [d/cm]	
Flachdach	Dämmung von oben mit neuer Abdichtung	160 €/m² + 1 €/m² · [d/cm]	Dämmdicke d = 8...36 cm, λ = 0,035 W/(mK)
Fenster			
Fenster	2-Scheiben-Wärmeschutzglas	280...350 €/m²	0,8...2,8 m²/Fenster
	3-Scheiben-Wärmeschutzglas	330...390 €/m²	
* Ergebnisse in €/m² Bauteilfläche, jeweils inkl. MWSt., aber ggf. zzgl. Planungskosten von ca. 20 %			

Tabelle 151 Schätzkosten Bausanierung, gerundet nach [37][53]

Die dickenabhängigen Zuwächse der Kosten der Dämmstoffe (ohne Zubehörteile, d.h. Dübel, Fensterbretter usw.) liegen unter 1 €/(m²·cm) [37][53]. Dies lässt ins besondere bei ohnehin anstehenden Instandhaltungsmaßnahmen an Bauteilen das "Feilschen" um 1 cm mehr oder weniger Dämmstoff fragwürdig erscheinen.

Komponente	Spezifikation	Kostenfunktion*	Einschränkung
Kessel			
Ölkessel komplett mit Pumpe & Verrohrung	Heizwert	1500 € · $[\dot{Q}_{K,N}/kW]^{0,5}$	bis ca. 500 kW
	Brennwert	1800 € · $[\dot{Q}_{K,N}/kW]^{0,5}$	
Gaskessel komplett mit Pumpe & Verrohrung	Heizwert	1400 € · $[\dot{Q}_{K,N}/kW]^{0,5}$	
	Brennwert	1500 € · $[\dot{Q}_{K,N}/kW]^{0,5}$	
Holzfeuerung komplett mit Pumpe & Verrohrung & Pufferspeicher	Stückholz	3500 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,5}$	bis ca. 100 kW
	Hackgut	6100 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,5}$	
	Pellets	6600 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,5}$	
BHKWs			
BHKW komplett mit Pumpe & Verrohrung, ohne Pufferspeicher	Gas, Öl	4000 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,65}$ + 5000 €	bis ca. 100 kW
Nah- und Fernwärme			
Übergabestation Fernwärme komplett	mit Warmwasserbereitung	3000 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,2}$	bis ca. 100 kW
Satellitenübergabestation	mit Warmwasserbereitung	50 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,8}$ + 1000 €	bis ca. 50 kW
Wärmepumpen			
Wärmepumpe komplett mit Pumpe & Verrohrung, ohne Pufferspeicher	Sole ohne Kollektor	2500 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,5}$	bis ca. 100 kW
	Außenluft	3500 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,5}$	
Elektroheizung			
Elektroheizung	direkt	200 € · $[\dot{Q}_{th}/kW]$	

Komponente	Spezifikation	Kostenfunktion*	Einschränkung
Trinkwarmwasserbereitung			
Trinkwasserspeicher komplett mit Pumpe & Verrohrung	monovalent, indirekt	150 € · $[V/l]^{0,5}$	bis ca. 1000 l
	bivalent, indirekt	400 € · $[V/l]^{0,3}$	
	Gas direkt beheizt	20 € · [V/l] + 1500 €	bis ca. 250 l
Elektrische Warmwasserbereitung	Kleinspeicher	50 €· $[V/l]^{0,65}$ + 100 €	bis ca. 15 l
	Durchlauferhitzer	30 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,8}$ + 300 €	bis ca. 20 kW
Solarthermie			
Solaranlage komplett mit Pumpe & Verrohrung, ohne Speicher	Flachkollektor	500 € · $[A_C/m^2]$ + 1500 €	bis ca. 50 m²
	Röhrenkollektor	700 € · $[A_C/m^2]$ + 1500 €	
Pufferspeicher			
Pufferspeicher		300 € · $[V/l]^{0,3}$ + 500 €	bis ca. 1500 l
Anschlüsse, Tanks, Lager und Schornsteine			
Fernwärmeanschluss	ohne Übergabestation	7000 € · $[L/m]^{0,2}$	bis ca. 15 m, im bebauten Gelände
Gasanschluss komplett		3000 €	bis ca. 15 m, im bebauten Gelände
Öltankanlage komplett	Kellertank	0,5 € · [V/l] + 1000 €	bis. ca. 2500 l
	Erdtank	0,5 € · [V/l] + 4000 €	
Schornstein komplett	neu gemauert	(40 + 0,3 · [A/cm²]) € · [H/m]	bis 20 m und 600 cm² Querschnittsfläche
	neu Edelstahl	300 € · [H/m]	bis 20 m
	Einzug Edelstahl	120 € · [H/m]	
	Einzug Kunststoff	50 € · [H/m]	
Lagerräume	Umbau von Räumen zu Pellet-/ Hackschnitzellagern	400 € · $[A_{Grund}/m^2]^{0,7}$	10...200 m²
	Neubau eines Heiz/Lagerraumes	2000 € · $[A_{Grund}/m^2]^{0,5}$	10...200 m²
Leitungen und Durchbrüche			
Gasleitung je Meter Trasse	im bebauten Gelände	(350 €) · [L/m]	DN 50...100
Gasleitung im Gebäude		(1 € · [DN/mm] + 6 €) · [L/m]	Kupferrohr, DN 12 bis 64
Nahwärmeleitungen je Meter Trasse	im bebauten Gelände	(3 € · [DN/mm] + 400 €) · [L/m]	Kunststoffmantelrohr, DN 25...DN 80
Heizungs- oder Warmwasserleitung im Gebäude	ohne Dämmung	(0,70 € · [DN/mm] + 5 €) · [L/m]	Kupferrohr, DN 12 bis 64
	50 % Dämmung	(0,75 € · [DN/mm] + 5 €) · [L/m]	
	100 % Dämmung	(0,80 € · [DN/mm] + 5 €) · [L/m]	
Dämmung von Rohrleitungen im Gebäude	ohne bauliche Maßnahmen	(0,1 € · [DN/mm] + 15 €) · [L/m]	DN 12 bis 64
Verlegung von Wärmepumpen-Erdsonden	bis zum Heizraum	900 € + 750 €/kW · $[\dot{Q}_N/kW]$	5...100 kW thermisch
Durchbrüche		50 € · $[d/cm]^{0,3}$	bis ca. 64 cm Wanddicke d
Wohnungslüftung			
Wohnungsweise Lüftung	Abluftanlage	600 € · $[A_{Wohn}/m^2]^{0,5}$ + 1000 €	je Wohnfläche
	Zu- und Abluft mit WRG	300 € · $[A_{Wohn}/m^2]^{0,5}$ + 500 €	
Hydraulischer Abgleich Heizungsanlage			
Abgleich	ohne Komponenten	5 € · $[A_{Wohn}/m^2]^{0,8}$ + 300 €	Kreise bis ca. 100 Heizkörper
	mit Thermostatventilen und Pumpe/DDR	10 € · $[A_{Wohn}/m^2]^{0,8}$ + 500 €	
* Ergebnisse in €, jeweils inkl. Einbau und MWSt., aber ggf. zzgl. Planungskosten von ca. 20 %			

Tabelle 152 Schätzkosten Gebäudetechniksanierung [46]

Soll eine Einsparmaßnahme wirtschaftlich bewertet werden, dann werden den Energieeinsparungen Mehrkosten für Investition gegenübergestellt, welche sonst nicht aufgetreten wären.

Eine Abgrenzung der energiebedingten Mehrkosten zu den "Sowiesokosten" kann einfach, im Einzelfall aber auch schwierig bis unmöglich sein.

- Beispiel für eindeutige Abgrenzung: zusätzliche Installation einer Solarthermieanlage; Mehrkosten 100 %, Sowiesokosten 0 %
- Beispiel für nicht eindeutige Abgrenzung: Ersatz eines 25 Jahre alten Fensters mit U-Wert 2,7 W/(m²K) durch ein neues mit U = 0,9 W/(m²K)
    - Annahme, altes Fenster wäre noch ausreichend gewesen → Mehrkosten 100 %, Sowiesokosten 0 %
    - Annahme, irgendein Fenster wäre ohnehin notwendig gewesen; es gilt DIN 4108-6, der Mindestwärmeschutz ist einzuhalten. Es darf keine Einscheibenverglasung gewählt werden, was auch nicht der Fall ist → Sowiesokosten = Kosten für ein Fenster in der alten Qualität, Mehrkosten alles darüber hinaus gehende
    - Annahme, irgendein Fenster wäre ohnehin notwendig gewesen; bei Tausch von 10 % oder mehr der Fenster im Gebäude gilt die EnEV und es muss eine Mindestqualität eingehalten werden; bei Nachweis nach Anlage 3 der EnEV ergibt sich eine Mindestqualität von 1,3 W/(m²K) → Sowiesokosten = Kosten für ein EnEV-Fenster, Mehrkosten alles darüber hinaus gehende

Es gibt weitere Lösungen. Das Problem verschärft sich, wenn die Fenster des Bestandes noch nicht abgängig sind, sondern vielleicht noch 5 oder 10 Jahre halten. Die allgemeine Empfehlung lautet wie folgt:

- die volle Investitionssumme wird angesetzt, wenn es neben dem Ziel der Energieeinsparung keinen weiteren Investitionsgrund (rechtlich, technisch usw.) gibt, z. B. bei der Anschaffung einer Solarthermieanlage
- die volle Investitionssumme wird angesetzt, wenn die Investition erfolgt, obwohl neue Komponenten vorhanden sind, z. B. Ersatz eines ein oder zwei Jahre alten Kessels durch einen anderen oder Dämmung einer Fassade, deren Putz erst drei Jahre alt ist
- die volle Investitionssumme kann angesetzt werden, wenn es zwar Sowiesokosten gibt, aber die Maßnahme auch bei voller Investitionshöhe wirtschaftlich ist. Es ergeben sich zwar rechnerisch längere Amortisationszeiten, aber der Konzeptersteller spart die Ermittlung der Sowiesokosten und kommentiert "die Maßnahme ist wirtschaftlich, und erwirtschaftet sogar die Instandsetzungskosten, obwohl sie das nicht müsste"
- in allen anderen Fällen sollten Sowiesokosten für den Bestandserhalt mit ausgewiesen werden.

Lebensdauern und Wartungskosten

Unabhängig von der Art der Wirtschaftlichkeitsbewertung müssen die Nutzungsdauer der Investition und der gewünschte Betrachtungszeitraum festgelegt werden. Beispielhafte Nutzungsdauern für Investitionen sind auszugsweise in Tabelle 153 wiedergegeben.

Komponente	Nutzungs-dauern, in [a]	jährliche Wartungs- und Unterhaltskosten in Prozent des Neuwertes der Investition, in [%/a]
zusätzliche Wärmedämmung	25...30	0,0...1,0
Fenster	15...30	0,0...1,5
Wärmeerzeugung (Kessel, Brenner, Kamin etc.) und Kälteerzeugung bis 300 $kW_{thermisch}$	15...25	2,5...3,5
Wärmepumpe Elektromotor bis 300 $kW_{thermisch}$	10...20	3,0...4,0
Solarthermie	15...20	2,0 3,0
Blockheizkraftwerk bis 100 $kW_{elektrisch}$	10...15	5,0...6,0
Lüftungszentralgeräte, Wärmeübertrager	15...25	3,0 ...4,0
Kälteanlagen, RLT-Anlagen	15...20	3,5...4,5
Heizflächen, Speicher, Leitungsnetze	25...30	1,0...2,0
Lüftungskanäle	20...25	2,0...3,0
Regelungen, Thermostatventile	10... 15	1,0...3,0
Beleuchtungsanlagen	10...20	1,0...2,0

Tabelle 153 Wartungsansätze und Lebensdauern

Die Daten entstammen – gekürzt und teilweise nach Erfahrungswerten angepasst – dem LEG-Verfahren [35] bzw. der VDI 2067 [73]. Für viele der genannten Einsparmaßnahmen sind in der Praxis häufig längere Lebensdauern festzustellen als in der Fachliteratur festgehalten.

Kosten für Wartung und Unterhalt sind Bestandteil vieler Energiekonzepte. Häufig, weil die vorgeschlagenen Maßnahmen zu einer Erhöhung der betreffenden Kosten führen (z. B. Neuinstallation eines BHKW). Die entsprechenden Summen können aus Wartungsverträgen entnommen werden oder aufgrund von Herstellerangaben, Erfahrungswerten oder Richtlinien abgeschätzt werden. Es gibt die Möglichkeit, die Wartungskosten als prozentualen Wert auf die Investition abzuschätzen, Ansätze liefert Tabelle 153. Dies gilt primär für Immobilien, für Mobilien (BHKW, PKW) sind laufzeitabhängige Kennwerte wie z. B. €/kWh_{el} bei einem BHKW zu wählen.

Verfahren der Wirtschaftlichkeitsbewertung

In der Praxis werden statische und dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnungen parallel angewendet, wobei folgendes zu beobachten ist:

- statische Verfahren ohne Berücksichtigung von zeitvariablen Einflussgrößen wie Preissteigerungen und Zinsen finden sich eher im Bereich von Geräte- und Anlagenkonzepten sowie Prozesskonzepten wieder, insbesondere bei eher kurzlebigen Investitionsgütern und Betrachtungszeiträumen,
- dynamische Verfahren mit Berücksichtigung von zeitvariablen Einflussgrößen werden häufig eingesetzt für Gebäudeenergiekonzepte, Quartiers-, Siedlungs- und kommunale Konzepte sowie politische Szenarien mit langlebigen Investitionsgütern und Betrachtungszeiträumen.

Ein fließender Übergang zwischen den Verfahren ist gegeben, wenn Preissteigerungen und Zinsen zu null angesetzt werden. Es wird daher nachfolgend der dynamische Ansatz (allgemeingültig) besprochen, und die statische Berechnung als Sonderfall angesehen.

Es gibt verschiedene Rechenverfahren. Besonders etabliert sind der Leitfaden Energiebewusste Gebäudeplanung LEG Hessen [35] und die VDI 2067 [73]. Die dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung beider Verfahren basiert auf dem Ansatz der Bildung eines Kapital- oder Barwertes.

Der Kapitalwert ist die Summe aller Kosten, die während der Nutzungsdauer einer Investition anfallen. Er wird auch als der Betrag bezeichnet, der heute anzulegen wäre, um alle künftigen Investitions- und laufenden Kosten abzudecken. Zeitliche Unterschiede im Anfall der Kosten und der Erlöse werden durch Auf- bzw. Abzinsung berücksichtigt. Alle späteren Kosten werden also nicht mit ihrem Nominalbetrag berücksichtigt, sondern mit dem Betrag, den man zum Investitionszeitpunkt anlegen müsste, um die späteren Kosten zu bezahlen (spätere Energiekosten zum Beispiel). Das heißt, zukünftige Kosten werden zum heutigen Zeitpunkt üblicherweise geringerwertig eingeschätzt als gegenwärtige, da ein heute angelegter Geldbetrag sich zinsbringend vermehrt und damit die künftig höheren Kosten deckt.

Wenn nicht nur Kosten anfallen, sondern auch Einnahmen erzielt werden, so wird der Kapitalwert auch oft Barwert genannt. Der Ansatz der Betrachtung ist identisch, weshalb in verschiedenen Veröffentlichungen Kapitalwert- und Barwert-Methode nicht explizit unterschieden werden.

Der Kapitalwert oder Barwert ist allerdings eine unanschauliche Größe, da er die Summe aller Kosten während der Nutzungsdauer – z. B. der nächsten 30 Jahre – angibt. Übersichtlichere Arten der Ergebnisdarstellung sind daher:

- **mittlere Jahreskosten:** Aufteilung des Kapitalwertes in gleiche Jahresraten (z. B. 30 Raten); bei einem Energiekonzept können beispielsweise die Jahreskosten [in €/a] vor und nach der Maßnahmenumsetzung miteinander verglichen werden; innerhalb des vorher festgelegten Zeitraumes ergibt sich eine Verbesserungsmaßnahme mit den geringsten Jahreskosten bzw. ein Gewinn (oder Verlust) bezogen auf eine Basisvariante; investiert wird in die Lösung mit dem größten Gewinn
- **dynamische Amortisation:** Bestimmung der Anzahl von Jahren, innerhalb der der Kapitalwert für die Basisvariante genauso groß ist wie für die Verbesserungsmaßnahme (Grenzwirtschaftlichkeit); investiert wird in die Lösung mit der geringsten Amortisationszeit
- **interne Rendite:** der Überschuss des Kapitalwertes wird in eine Verzinsung (des eingesetzten Kapitals) umgerechnet; es muss eine Basisvariante geben sowie einen vorher festgelegten Betrachtungszeitraum; investiert wird in die Lösung mit der höchsten internen Rendite (sofern diese über dem Anlagezins für Kapital liegt)
- **äquivalenter Energiepreis:** auch spezifischen Gestehungskosten bzw. die Kosten für die eingesparte Kilowattstunde (der Wert gibt an, wie teuer es ist, eine Kilowattstunde zu sparen); es werden ein Betrachtungszeitraum und eine Basisvariante festgelegt; ins Verhältnis gesetzt werden die jährlichen Mehrkosten aufgrund der Investition (und ggf. Wartung) einer Verbesserungsmaßnahme zu den jährlichen Energieeinsparungen; die Einsparmaßnahme ist wirtschaftlich, wenn der sich ergebende äquivalente Energiepreis geringer ist als der mittlere künftige Energiepreis (die Kilowattstunde sparen ist preiswerter als sie zu verbrauchen); investiert wird in die Lösung mit dem geringsten äquivalenten Energiepreis; siehe auch Ausführungen am Ende des Abschnitts.

Leitfaden Energiebewusste Gebäudeplanung (LEG)

Die Berechnung des Kapitalwertes bzw. der daraus abgeleiteten Jahreskosten K_a [in €/a] wird nachfolgend erläutert.

Bei einer Energiekonzepterstellung ergeben sich die Jahreskosten üblicherweise durch Summation der jährlichen Kapitalkosten K_i, der jährlichen Energiekosten K_e sowie der jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten K_u. Üblich ist die Summation von Mittelwerten (zusätzlicher Index "m") innerhalb eines vorher festgelegten Betrachtungszeitraumes.

$$K_a = K_i + K_{e,m} + K_{u,m}$$
$$= K_i + m_e \cdot K_{e,0} + m_u \cdot K_{u,0}$$

Als Kapitalkosten werden Tilgung und Zinsen zusammengefasst. Die jährlichen Kapitalkosten K_i [in €/a] ergeben sich aus den Investitionen zum heutigen Zeitpunkt I_0 [in €] multipliziert mit einer Annuität $a_{p,n}$ [in 1/a].

$$K_i = I_0 \cdot a_{p,n}$$

Mit der Annuität wird die einmalige Investitionssumme in jährlich gleich große Raten aufgeteilt. Sie hängt vom Zins und dem Betrachtungszeitraum ab, siehe Tabelle 154. Der Kapital- oder Kalkulationszins ist der Zinssatz für Eigenkapital (entgangener Sparzins) oder für Fremdkapital (Kreditzins) bzw. bei einer Mischfinanzierung ein gewichteter Mittelwert aus beiden.

Annuitäten $a_{p,n}$, in [1/a]							
Betrachtungszeitraum	Kalkulationszins p, in [%/a]						
n, in [a]	0	1	2	3	4	5	6
10	0,100	0,106	0,111	0,117	0,123	0,130	0,136
15	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,096	0,103
20	0,050	0,055	0,061	0,067	0,074	0,080	0,087
25	0,040	0,045	0,051	0,057	0,064	0,071	0,078
30	0,033	0,039	0,045	0,051	0,058	0,065	0,073
Ansatz: $a_{p,n} = \frac{p}{1-(1+p)^{-n}}$							

Tabelle 154 Annuitäten

Nachinvestitionen werden berücksichtigt, wenn Maßnahmenpakete miteinander verglichen werden sollen, deren Nutzungsdauer (näherungsweise Komponentenlebensdauer) unterschiedlich lang ist. Das LEG-Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsbewertung schlägt vor, die längste aller Nutzungsdauer als Betrachtungszeitraum zu wählen und die kürzerlebigen Komponenten entsprechend mit mehrfacher Investition zu berücksichtigen. Es wird das Produkt aus der heutigen Investition I_0 [in €] und einem Faktor für die in der Zukunft liegenden Ersatzbeschaffung (Nachinvestition) $f_{p,s,m,n}$ [ohne Einheit] gebildet und anschließend mit der Annuität $a_{p,n}$ [in 1/a] umgerechnet.

$$K_i = I_0 \cdot f_{p,s,m,n} \cdot a_{p,n}$$

Die notwendige Ersatzinvestition für alle kürzerlebigen Komponenten wird anhand ihres Barwertes berücksichtigt. Das ist der Geldbetrag, der zum Investitionszeitpunkt hätte angelegt werden müssen, um die Investition in Zukunft tätigen zu können. Dieser Wert hängt davon ab, wie fern in der Zukunft die Ersatzinvestition stattfindet, wie hoch der Kalkulationszins p [in %/a] ist und welche nominale Preissteigerung s_a [in %/a] für das Investitionsgut erwartet wird.

Das LEG-Verfahren beschreibt den Kalkulationszins als den Zins, mit dem das eigene Kapital bis zur Begleichung der späteren Ausgaben arbeiten kann. Es setzt ihn vereinfachend mit dem Kalkulationszins für die Investition gleich und unterscheidet bei diesem Ansatz weder zwischen Fremd- und Eigenkapitalbeschaffung noch zwischen Privat-, Kommunal- und Industrieinvestor. Der Kalkulationszins soll ausdrücken, dass eine heute kalkulierte nominale Summe Geldes künftig einen anderen Wert haben kann. Es handelt sich um ein vereinfachtes Gedankenmodell zur Berücksichtigung von unterschiedlichen Preisentwicklungen (Schere zwischen künftigen Einnahmen und künftigen Ausgaben).

Für wirtschaftliche Berechnungen im Bereich der Privatinvestitionen ist davon auszugehen, dass das Geld zur Begleichung künftiger Ausgaben sich mit dem Sparzins vermehrt (angelegtes Geld) oder mit der Inflation bzw. dem Lohnindex (spätere Zahlungen). Für ein Industrieunternehmen kann der Renditezins angesetzt werden, mit dem das Geld arbeitet, bis es für Energie, Nachinvestitionen usw. ausgegeben wird.

Tabelle 155 zeigt typische Faktoren für Ersatzbeschaffung. Der Kalkulationszins p beschreibt den Wertzuwachs des Geldes, mit dem die Investition künftig beglichen wird, die Preissteigerung der Anlagegüter s_a beschreibt die Verteuerung der Investitionsgüter selbst. Sind beide gleich (Anlagen verteuern sich genauso schnell wie das Geld an Kaufkraft gewinnt), heben sich die Effekte auf. Kalkulatorisch belastet die künftige Investition das Portemonnaie dann genau stark wie der Kauf heute.

Faktor $f_{p,s,m,n}$ für Ersatzbeschaffung, in [-]									
Kalkulationszins bzw. Zins für Inflationsausgleich p = 0 %/a									
Nutzungsdauer m, in [a]	Betrachtungszeitraum n, in [a]	nominale Preissteigerung der Anlagegüter s_a, in [%/a]							
		0	1	2	3	4	5	6	7
5	10	2,00	2,05	2,10	2,16	2,22	2,28	2,34	2,40
15	30	2,00	2,16	2,35	2,56	2,80	3,08	3,49	3,76
20	30	2,00	1,61	1,74	1,90	2,10	2,33	2,60	2,60
Kalkulationszins bzw. Zins für Inflationsausgleich p = 2 %/a									
Nutzungsdauer m, in [a]	Betrachtungszeitraum n, in [a]	nominale Preissteigerung der Anlagegüter s_a, in [%/a]							
		0	1	2	3	4	5	6	7
5	10	1,91	1,95	2,00	2,05	2,10	2,16	2,21	2,27
15	30	1,74	1,86	2,00	2,16	2,34	2,54	2,78	3,05
20	30	1,37	1,45	1,55	1,67	1,81	1,98	2,19	2,43
Kalkulationszins bzw. Zins für Inflationsausgleich p = 4 %/a									
Nutzungsdauer m, in [a]	Betrachtungszeitraum n, in [a]	nominale Preissteigerung der Anlagegüter s_a, in [%/a]							
		0	1	2	3	4	5	6	7
5	10	1,82	1,86	1,91	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15
15	30	1,56	1,64	1,75	1,87	2,00	2,15	2,33	2,53
20	30	1,27	1,33	1,40	1,49	1,60	1,72	1,87	2,05
Ansatz: $f_{p,s,m,n} = 1 + \left(\frac{1+s_a}{1+p}\right)^m \cdot \frac{1-(1+p)^{-(n-m)}}{1-(1+p)^{-m}}$									

Tabelle 155 Faktoren für Nachinvestition

Die mittleren jährlichen Energiekosten $K_{e,m}$ [in €/a] ergeben sich aus den Endenergiemengen Q [in kWh/a], deren heutigen Energiepreisen $k_{e,0}$ [in €/kWh] und einem Mittelwertfaktor für Energiepreissteigerung m_e [ohne Einheit]. Bei mehr als einem Energieträger sind entsprechende Summen zu bilden.

$$K_{e,m} = Q \cdot k_{e,0} \cdot m_e = K_{e,0} \cdot m_e = Q \cdot k_{e,m}$$

Das Produkt aus Energiemenge Q und heutigem Energiepreis $k_{e,0}$ ergibt die heutigen Energiekosten $K_{e,0}$ [€/a]. Das Produkt aus heutigem Energiepreis $k_{e,0}$ und dem Faktor für Energiepreissteigerung m_e ergibt den künftigen mittleren Energiepreis $k_{e,m}$ [€/kWh].

Mittelwertfaktoren für Preissteigerungen m_e und m_u, in [-]											
Kalkulationszins bzw. Zins für Inflationsausgleich p = 0 %/a											
Betrachtungszeitraum n, in [a]	nominale Preissteigerung s_e oder s_u, in [%/a]										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,48	1,57	1,66	1,75
15	1,00	1,08	1,18	1,28	1,39	1,51	1,65	1,79	1,96	2,13	2,33
20	1,00	1,11	1,24	1,38	1,55	1,74	1,95	2,19	2,47	2,79	3,15
30	1,00	1,17	1,38	1,63	1,94	2,33	2,79	3,37	4,08	4,95	6,03
Kalkulationszins bzw. Zins für Inflationsausgleich p = 2 %/a											
Betrachtungszeitraum n, in [a]	nominale Preissteigerung s_e oder s_u, in [%/a]										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	1,00	1,06	1,11	1,18	1,24	1,31	1,38	1,46	1,55	1,63	1,73
15	1,00	1,08	1,17	1,26	1,37	1,48	1,61	1,75	1,90	2,07	2,25
20	1,00	1,10	1,22	1,36	1,51	1,68	1,88	2,10	2,35	2,64	2,97
30	1,00	1,15	1,34	1,56	1,84	2,17	2,57	3,06	3,66	4,40	5,30
Kalkulationszins bzw. Zins für Inflationsausgleich p = 4 %/a											
Betrachtungszeitraum n, in [a]	nominale Preissteigerung s_e oder s_u, in [%/a]										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	1,00	1,05	1,11	1,17	1,23	1,30	1,37	1,45	1,53	1,61	1,70
15	1,00	1,08	1,16	1,25	1,35	1,46	1,58	1,71	1,85	2,00	2,18
20	1,00	1,10	1,21	1,33	1,47	1,63	1,81	2,01	2,24	2,50	2,79
30	1,00	1,14	1,30	1,50	1,73	2,02	2,36	2,78	3,28	3,90	4,64
Ansatz: $m_e = \frac{1+s_e}{p-s_e} \cdot p \cdot \frac{(1+p)^n - (1+s_e)^n}{(1+p)^n - 1}$ bzw. $m_u = \frac{1+s_u}{p-s_u} \cdot p \cdot \frac{(1+p)^n - (1+s_u)^n}{(1+p)^n - 1}$											

Tabelle 156 Mittelwertfaktoren

Die geltenden Energiepreise (zum Investitionszeitpunkt "0") sind vom Versorger zu erfragen. Es sind Mischwerte für Leistung/Grund- und Arbeits-/Verbrauchspreis anzusetzen oder beide Anteile getrennt, der Bezug auf Heizwert oder Brennwert ist zu beachten, siehe Kapitel 2.5.

Der Mittelwertfaktor gibt an, wie hoch der Energiepreis im Mittel (nicht am Ende!) innerhalb des gewählten Betrachtungszeitraums sein wird. Die progressiv ansteigende Energiepreiskurve wird damit gemittelt und auf eine Zahl verdichtet. Maßgeblich ist die nominale Energiepreissteigerung s_e [in %/a], die Länge des Betrachtungszeitraums n [in a] und ein Kalkulationszins p [in %/a]. Als Kalkulationszins p wird häufig die Inflation eingesetzt, so dass sich aus der nominalen Preissteigerung eine reale Preissteigerung ergibt.

Faktoren für die Preissteigerung zeigt Tabelle 156.

Die mittleren jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten $K_{u,m}$ [in €/a] ergeben sich nach dem gleichen Ansatz wie die Energiekosten. Berücksichtigt werden die heutigen Kosten $K_{u,0}$ [in €/a] und ein Faktor für Preissteigerung m_u [ohne Einheit].

$$K_{u,m} = K_{u,0} \cdot m_u$$

Mittelwertfaktoren zeigt Tabelle 156. Es gelten die Erläuterungen für Energie hier analog. Ansätze für heutige Wartungskosten können mit Hilfe von Tabelle 153 geschätzt werden.

Typische Randdaten einer dynamischen Berechnung

Für Wirtschaftlichkeitsberechnungen, bei denen keine weiteren Randbedingungen bekannt bzw. festgelegt sind, dient Folgendes als Orientierungshilfe:

- Kalkulationszins für das Kapital p: entsprechend der Art der Finanzierung; für reine Eigenkapitalverzinsung gilt ca. 1 … 2 %/a derzeit als sicherer Inflationsausgleich; für reine Fremdkapitalverzinsung über eine Bank kann zurzeit von etwa 1 … 4 %/a ausgegangen werden; für Finanzierung mit KfW-Krediten ist 0,5 … 2 %/a ein sinnvoller Ansatz; der Zeitraum der Zinsbindung ist vielfach geringer als der gewählte Betrachtungszeitraum, so dass sich aus Annahme der geringer Zinsen eine Unsicherheit ergibt; eine Variation des Zinses von ± 2 %/a ist empfehlenswert
- Kalkulationszins für spätere Ausgaben (Energie, Wartung/Instandhaltung, Nachinvestition) p: 1 … 2 %/a (entspricht etwa der Inflation)
- nominale Energiepreissteigerung s_e: bei langfristigen Betrachtungen ist 6 %/a ein üblicher Ansatz; dies entspricht einer realen (inflationsbereinigten) Steigerung von etwa 4 %/a; da der Wert sehr unsicher ist, ist eine Variation von ± 3 %/a empfehlenswert, außerdem auch eine konservative Berechnung ohne Preissteigerung (= heutige Preise)
- nominale Preissteigung für Wartung und Unterhalt s_u sowie nominale Preissteigerung der Anlagegüter s_a: 0,5 … 2 %/a (entspricht etwa der Inflation)

Die Parametervariation bei dem Kalkulationszins p und der nominalen Energiepreissteigerung s_e sind empfehlenswert. Der Konzeptersteller kann so untermauern, dass hier ergebnisrelevante Unsicherheiten bestehen. Werden alle vier dynamischen Parameter mit dem Wert "0 %/a" belegt, ergibt sich eine statische Wirtschaftlichkeitsbewertung.

Äquivalenter Energiepreis

Für den äquivalenten Energiepreis gilt nachfolgender Rechenansatz. Die zusätzlichen Jahreskosten für Kapital, Wartung und Unterhalt werden den Einsparungen an Endenergie gegenübergestellt:

$$k_{äqu} = \frac{\Delta K_i + \Delta K_{u,m}}{\Delta Q}$$

Typische äquivalente Energiepreise für Verbesserungsmaßnahmen an Wohnbauten zeigt Tabelle 157. Vorteil der Größe: eine Sortierung der Maßnahmen ist möglich, ohne über die Energiepreissteigerung zu spekulieren. Bei Umstellungen der Energieträger, z. B. von einer Gasheizung auf eine Wärmepumpe kann der äquivalente Energiepreis nicht ermittelt werden; nur hier bietet sich der Bezug auf eingesparte Primärenergie an (Gewichtung der Energieträger). Das heißt, die Endenergie sind mit den mittelfristig zu erwartenden Primärenergiefaktoren zu multiplizieren.

Maßnahme	Energieeinsparung, in kWh/(m²a)	Investition, in €/m²	äquivalenter Energiepreis, in €/kWh
Dämmung Dach, Außenwand	100...150	100...250	0,08...0,20
Dämmung Kellerdecke, Geschossdecke	50...100	50...150	0,02...0,12
Fenstertausch	20...50	30...150	0,06...0,30
Kesseltausch	20...120	20...80	0,02...0,20
Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung	10...30	20...70	0,08...0,25
solare Trinkwassererwärmung	5...20	35...50	0,10...0,30
solare Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung	10...25	50...80	0,10...0,40
Heizungsoptimierung nach baulicher Modernisierung	15...20	1...6	0,02...0,04
alle Werte bezogen auf die Wohnfläche			

Tabelle 157 Typische äquivalente Energiepreise für Modernisierungen im Wohnbau [Stand 2015]

Dynamische Amortisationszeit

Die dynamische Amortisationszeit n_{DA} unter Berücksichtigung von Zinsen auf das Kapital p lässt sich aus folgendem Ansatz bestimmen:

$$n_{DA} = \frac{-lg\left(1 - p \cdot \frac{\Delta I_0}{\Delta K_{e,0}}\right)}{-lg(1+p)}$$

Die Mehrkosten der Investition ΔI_0 [in €] werden den heutigen Einsparungen für Energie $\Delta K_{e,0}$ [in €/a] gegenüber gestellt. Darüber hinaus wird der Kalkulationszins p [in a^{-1}] eingerechnet. Dieser Ansatz berücksichtigt jedoch nicht die Energiepreissteigerung s_e! Es handelt sich also um eine Näherung.

Umgang mit Mehrwertsteuern

Alle Kosten (Investition und Energiepreise) sind entweder mit oder ohne Mehrwertsteuer einzugeben. Für Endverbraucherberichte eignet sich die Angabe mit Mehrwertsteuer.

Erweiterte Problemanalyse

Weitere Kostenanteile – unabhängig ob Einnahmen oder Ausgaben – können in das Grundsystem der Berechnung einsortiert werden. Kosten, die einmalig anfallen, werden dabei analog den Investitionen behandelt, Kosten, die wiederkehrend anfallen, wie Energie- oder Wartungskosten, mit einer sinnvoll zu wählenden Preissteigerung. Es handelt sich z. B. um Versicherungsausgaben, Steuern, Personalkosten für Anlagenbedienung, Verwaltungskosten, Gebäudewertsteigerung, einmalige Geldförderungen und Subventionen, Tilgungszuschüsse.

Soll ein Projekt bewertet werden, in dem Energiekosten und Investitionskosten nicht aus einer Tasche bezahlt werden (Vermieter-Mieter, Verpächter-Pächter usw.), kann eine Kaltmieterhöhung als Zusatzgröße eingeführt werden. Die Wirtschaftlichkeitsbewertung wird dann 2 Mal durchgeführt:

- aus Sicht des Investitionskostenträgers werden bilanziert: Kapitalkosten, Unterhaltskosten (beides Ausgaben) und Kaltmieterhöhung bzw. Pachterhöhung (Einnahmen),
- aus Sicht des Nutzers werden bilanziert: Energiekosten (Minderungen) sowie Kaltmiet- bzw. Pachterhöhungen (Erhöhungen) sowie die Wartung.

Die Kaltmiet- oder Pachterhöhung ist also ein Ausgleichsposten zwischen den Beteiligten. Es kann ermittelt werden, wie hoch diese sein muss oder maximal sein darf, damit für beide Parteien langfristig Gesamtkostenminderungen zu verzeichnen sind.

5.4.4 Systematischer Variantenvergleich

Folgende Empfehlungen gelten unabhängig von der Art des Projektes hinsichtlich einer Parametervariation bzw. Sensitivitätsanalyse von allgemeinen Einflussgrößen:

- Variation der ökologischen Parameter (CO_2-Äquivalenten, ggf. Primärenergiefaktoren) in zwei Abstufungen, d.h. heutige Werte und mittlere künftig erwartete Werte
- Variation der ökonomischen Parameter (Energiepreissteigerung, Kapitalzins) in zwei bis drei Abstufungen, d.h. 0 %/a sowie ein bis zwei weitere Wertepaare (typischer Wert, ungünstiger Wert)
- Variation der Nutzungsranddaten, falls diese absehbar veränderlich sind in zwei oder drei Konstellationen (z. B. geringste, wahrscheinliche und höchste erwartete Intensität)

Darüber hinaus gibt es für die eigentlich untersuchten Maßnahmen (Investitionen in Gebäude, Anlagen, Maschinen) jeweils mehrere Alternativen. Die Anzahl von Varianten erhöht sich damit exponentiell, wie Bild 127 beispielhaft zeigt.

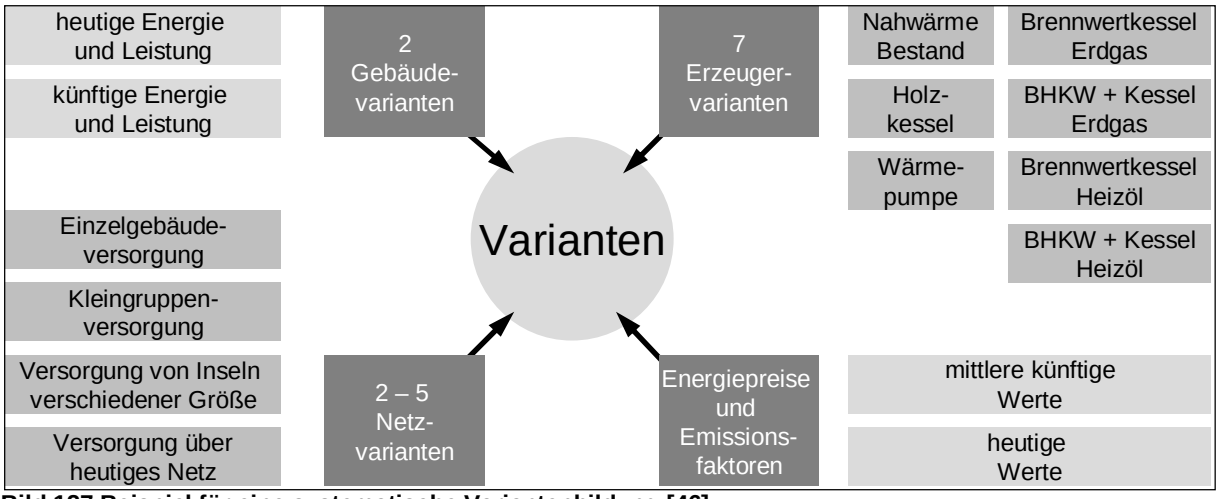


Bild 127 Beispiel für eine systematische Variantenbildung [46]

Für eine Beispielliegenschaft ergeben sich ca. 112 (2 x 4 x 7 x 2) mögliche Ergebnisse. Hier kommt es auf eine gute Datenhaltung bei der Berechnung an sowie auf eine geeignete Auswertung in tabellarischer oder grafischer Form.

Trotz diverser Varianten bei der Berechnung wird dem Auftraggeber des Konzeptes nur ein kleiner Ausschnitt präsentiert: ca. 4 Fälle. Eine Datenaufbereitung erfolgte vielfach grafisch mit Hilfe von Liegenschaftsplänen, siehe Bild 140 und Bild 141 in Kapitel 5.6.2. Auch (nicht maßstäbliche) Zeitverläufe wurden gewählt, siehe Bild 128.

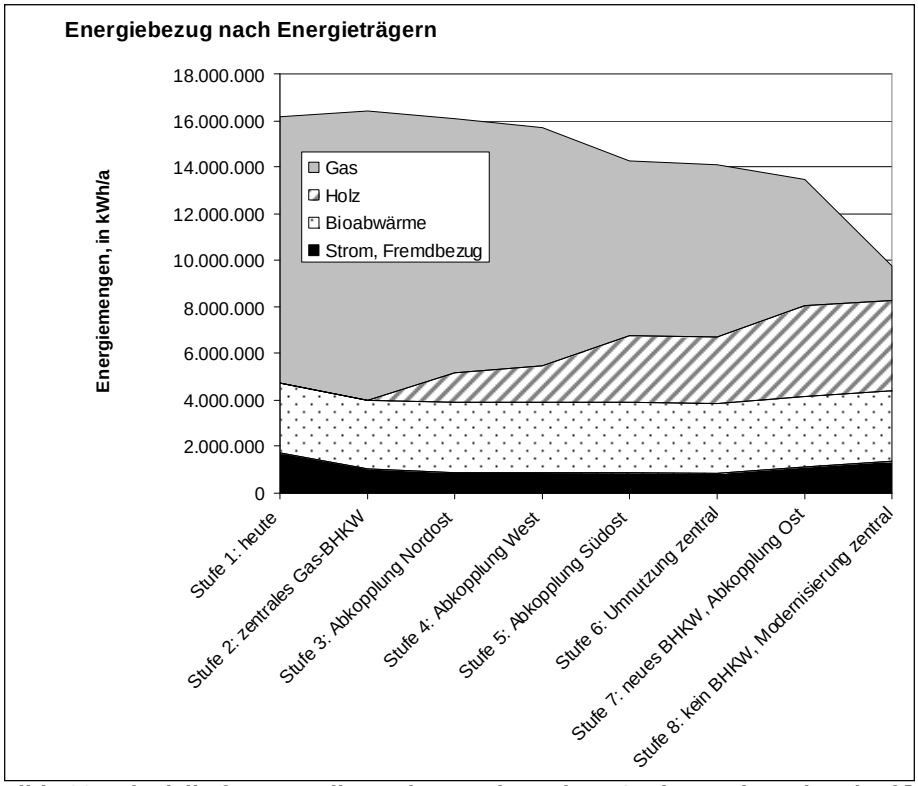


Bild 128 Beispielhafte Darstellung einer stufenweisen Sanierung im Zeitverlauf [46]

5.5 Entscheidungsfindung

Die Erstellung eines Energiekonzeptes ist von diversen Fakten beeinflusst. Oft müssen gewerkeübergreifende Entscheidungen getroffen werden. Neben dem dazu notwendigen detaillierten Fachplanerwissen sollte beim Entscheider oder den Entscheidern der Blick für das Übergeordnete nicht fehlen. Es muss meist ein Gesamtoptimum gefunden werden. Die Interessen vieler Beteiligter werden dabei in Grenzen aneinander angeglichen. Der Energiekonzeptersteller fungiert dann auch als Vermittler zwischen den beteiligten Parteien.

Einfache Punktsysteme

Zur Entscheidung zwischen mehreren grundsätzlich denkbaren Energiekonzepten helfen im einfachsten Fall Punktesysteme. Für definierte Vor- und Nachteile werden Plus- und/oder Minuspunkte vergeben, addiert und ein Sieger ermittelt. Es handelt sich dabei um eine gleichmäßige Wichtung aller Einflüsse.

Wertanalyse

Etwas aufwändiger ist die Erstellung einer Wertanalyse. Sie gewichtet den Einfluss der Eigenschaften zusätzlich. Außerdem werden im optimalen Fall Vor- und Nachteile aus verschiedenen Blickwinkeln erörtert und bewertet. Die reine Betrachtung der Energieeinsparung oder Wirtschaftlichkeit genügt meistens nicht. Das Optimum ist die im Mittel beste Lösung für alle Beteiligten, auch wenn der einzelne nicht immer mit allen Punkten übereinstimmen muss.

Das Verfahren der Wertanalyse ist in DIN 69910 beschreiben. Vorgehensweise und wichtige Begriffe sind in Bild 129 zusammengestellt. Die Produktbewertung der Stiftung Warentest folgt einem Wertanalysemodell.

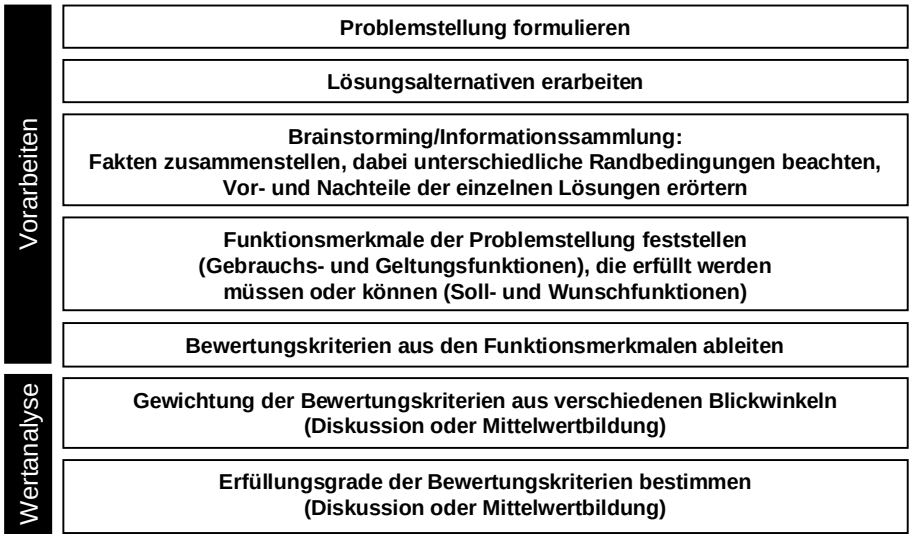


Bild 129 Ablauf und Begriffe der Wertanalyse

Zunächst werden die Problemstellung und mehrere Lösungsalternativen definiert. Die Entscheidung, welche der Lösungen optimal ist, ist das spätere Ergebnis der Wertanalyse.

Um die Vor- und Nachteile einzelner Lösungsalternativen beurteilen zu können, beginnt das Wertanalysevorhaben mit einem Brainstorming bzw. einer Informationssammlung. Alle an der Diskussion Beteiligten stellen Fakten, Ideen, Vor- und Nachteile, die sich mit dem Problem und den Lösungsalternativen verbinden, zusammen. Dabei wird das Problem aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Es ist also erforderlich, dass die beteiligten Akteure gleichberechtigte Diskussionspartner sind, aus verschiedenen Tätigkeitsfeldern kommen (z. B. Nutzer, Marketing, Handwerk, Energieberatung, Architektur, Fachplanung) und unbedingt offen ihre Ideen und Meinung äußern können. Die Vorgesetzten- und Führungsebene des Unternehmens sollte deshalb nur in Ausnahmefällen am Wertanalyseprozess teilnehmen.

Anschließend wird eine Liste mit Funktionsmerkmalen (Anforderungen) erstellt. Es sollen Geltungs- und Gebrauchsfunktionen, Soll- und Wunschfunktionen berücksichtigt werden:

- Gebrauchsfunktionen beschreiben die sachliche Nutzung (technischer und/oder organisatorischer Art) der betrachteten Lösung; sie sind in der Regel aufgrund physikalischer und/oder wirtschaftlicher Daten bzw. Qualitäts- und Verhaltensstandards quantifizierbar,
- Geltungsfunktionen sind ausschließlich subjektiv wahrnehmbare, personenbezogene Wirkungen (Aussehen, Komfort, Sozialmaßnahmen, Prestige) und allenfalls mit Methoden der Meinungsforschung bewertbar,
- Sollfunktionen müssen erfüllt werden,
- Wunschfunktionen können erfüllt werden.

Liegt die Liste der Funktionen vor, werden daraus Bewertungskriterien abgeleitet. Sie dienen dem Vergleich der Lösungsalternativen untereinander. Bei der Erstellung von Energiekonzepten kommen "geringer Energieverbrauch", "geringe Energiekosten", "überschaubare Investitionskosten", "geringe Wartungskosten", "geringe Emissionen" usw. regelmäßig als Kriterien vor.

Nicht jedes Bewertungskriterium wird gleich stark zur Entscheidungsfindung beitragen. Die Gewichtung hängt von der Sichtweise des einzelnen Beteiligten ab. Sie kann anhand einer Bewertungstabelle mathematisch ermittelt werden. Bei einer Wertanalyse sollten sich alle Beteiligten auf eine einheitliche Gewichtung verständigen. Dies kann in einer offenen Diskussion erfolgen oder durch eine mathematische Mittelwertbildung der Gewichtungen jedes einzelnen. Nach Einigung über die Gewichtung ("wie wichtig ist ein Bewertungskriterium") ist noch keine der Lösungsalternativen konkret beurteilt, dies erfolgt im Anschluss.

Für die verschiedenen Lösungsalternativen müssen die Erfüllungsgrade bestimmt werden. Die Frage, die sich hierbei jeder der Beteiligten stellt, lautet: wie gut (0 … 1 oder 0 % … 100 %) erfüllt die Alternative x jedes der Bewertungskriterien. Die Bewertungen werden tabellarisch festgehalten. Anschließend erfolgt ein Abgleich der Ergebnisse der Beteiligten in Form einer Diskussion oder mathematisch. Um Manipulationen von vornherein zu minimieren, kann die Bewertungsskala auf die drei %-Werte: 25, 50 und 75% beschränkt werden.

Das Ergebnis ist die Entscheidung für eine Alternative. Diese Art der Entscheidungsfindung ist immer eine Kompromisslösung und unter Beachtung aller Randumstände die Lösung, die den Vorstellungen der Beteiligten an ehesten gerecht wird. Eine optimale Lösung, die allen Wunschvorstellungen entspricht, wird mit diesem Verfahren i. d. R. nicht gefunden. Gäbe es diese Lösung, hätte das Wertanalyseverfahren nicht durchgeführt werden müssen.

5.5.1 Beispielwertanalyse "Etagen/Zentralheizung"

Ziel der Wertanalyse ist die Beantwortung der Frage, ob in einem MFH mit sechs Wohneinheiten mit sanierungsbedürftigen Etagenheizungen im Rahmen der Instandsetzung sukzessiv wieder Etagenheizkessel eingesetzt werden oder ob eine zentrale Heizung und Trinkwarmwasserbereitung installiert wird. Eine detaillierte Problembeschreibung sowie die Erläuterung der Lösungsalternativen sind in Tabelle 158 zusammengestellt.

Alternative	**Ein Mehrfamilienwohnhaus (6 Wohneinheiten) mit Gasetagenheizung im Zweirohrsystem und mit wohnungszentraler Trinkwarmwasserbereitung ohne Speicher und Zirkulation wurde bereits baulich saniert. Es soll nach 25 Jahren die alte Anlagentechnik ersetzt werden.**	
1	Zentralisierung	Es wird eine zentrale Anlage zur Heizung und Trinkwarmwasserbereitung mit Gasbrennwertkessel installiert. Anstelle der Gaszuleitung in die Wohnungen werden eine zentrale Heizungsverteilung sowie eine zentrale Trinkwarmwasserverteilung mit Zirkulation verlegt. Im Keller wird ein Trinkwarmwasserspeicher vorgesehen.
2	Stufenweise Instandsetzung	Bei Bedarf werden im Verlauf der nächsten maximal 5 Jahre die 6 Etagenheizkessel durch etagenweise Gasbrennwertthermen ersetzt. Die Trinkwarmwasserbereitung im Durchlaufsystem ohne Zirkulation bleibt erhalten.

Tabelle 158 Beispielwertanalyse Heizung – Problemstellung und zwei mögliche Lösungsalternativen

Als Interessensgruppen sind beteiligt die Mietervertretung, die Wohnbaugesellschaft als Investor, ein unabhängiger Energieberater und Vertreter des Fachhandwerks (alternativ Fachplaner oder Architekt).

Funktion	**Gebrauchsfunktion (1) oder Geltungsfunktion (2)**	**Sollfunktion (1) oder Wunschfunktion (2)**
Gewährleistung einer gerechten und einfachen Heizkostenabrechnung	1	1...2
Komfort bei Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung	2	2
Sparsames Heizen ermöglichen	1...2	1...2
Sicheren Betrieb ermöglichen (keine Gefährdung von Personen)	1	1
Flexible Regelung bzw. dynamische Leistungsanpassung	1	2
Geringer Wartungsaufwand	1	2
Geringes Verschwendungspotential für Energie bieten	1	2
Umweltfreundlichen Betrieb ermöglichen, d.h. positive Primär- und CO_2-Bilanz	1...2	2
Leichte und übersichtliche Bedienung	1	2
Einbindung von regenerativen Energien ermöglichen	1...2	1...2
Flexibilität hinsichtlich der Austauschbarkeit des Energieträgers	1	2
Geringer Raumbedarf	1...2	2
Geringe Investitionskosten	1	1...2
Ermöglichung einer einfachen Planung und Umsetzung	1	1...2
Flexibilität bei der Instandsetzung bzw. Umsetzung der Maßnahme (zeitlich und hinsichtlich des Kapitalaufwandes)	1	2

Tabelle 159 Beispielwertanalyse Heizung – Funktionen, die alle Lösungen erfüllen sollen

Die Informationssammlung umfasst Überlegungen zum Energieverbrauch, den verschiedenen Kostengruppen, der zeitlichen Abwicklung der Instandsetzung, zur Umweltwirksamkeit, dem Wohn- und Bedienkomfort der Nutzer, der Umsetzung durch Fachplaner, der späteren Folgekosten durch Wartung u. v. m. Aus den Vorüberlegungen werden Funktionsmerkmale abgeleitet, die beide Lösungsalternativen erfüllen sollen (Sollfunktionen) bzw. können (Wunschfunktionen).

Die in Tabelle 159 zusammengestellten Funktionen werden anschließend so aufgearbeitet, dass sich eindeutige Bewertungskriterien ergeben. Einzelne Anforderungen können zusammengefasst werden, damit die Anzahl der Kriterien überschaubar bleibt. Im vorliegenden Fall ergeben sich 8 Kriterien, vgl. Tabelle 160. Die Beschreibung der Kriterien sollte dabei ein Substantiv und ein Verb umfassen, z. B. "Investitionskosten minimieren". Dies beugt Missverständnissen im weiteren Verlauf der Bewertung vor.

Kriterium (Kürzel)	Detaillierte Beschreibung
1: Investitionskosten	Investitionskosten minimieren
2: Energiekosten	Energieverbrauch und damit -kosten minimieren
3: Wartungskosten	Wartungsaufwand und somit Wartungskosten minimieren
4: Flexibilität der Umrüstung	Zeitliche Flexibilität der Umrüstung maximieren (Nutzerbelästigung gering halten); Anfall von Investitionskosten zeitlich verteilen
5: Heizkostenverteilung	Gerechte und einfache Heizkostenverteilung sicherstellen
6: Energieeffizienz	Energieeffizienz der Anlage maximieren; nachträgliche Änderung des Energieträgers und ggf. Einbindung regenerativer Energien ermöglichen
7: Komfort	Komfort für den Nutzer maximieren; gleichzeitig sicheren Anlagenbetrieb ermöglichen
8: Bedarfsanpassung	Bedarfsanpassung des Nutzers durch Eingriff in die Technik ermöglichen

Tabelle 160 Beispielwertanalyse Heizung – Zusammenstellung der Kriterien für die Bewertung

Die beteiligten Personenkreise entscheiden in diesem Beispiel zunächst einzeln, welches der acht Bewertungskriterien bei der Bestimmung des Endergebnisses wie stark ins Gewicht fällt. Dies erfolgt mit einer Matrix analog Tabelle 161.

Kriterium	1: Investitionskosten	2: Energiekosten	3: Wartungskosten	4: Flexibilität der Umrüstung	5: Heizkostenverteilung	6: Energieeffizienz	7: Komfort	8: Bedarfsanpassung	Summe	Gewichtung g in [%]
1: Investitionskosten		0	0	1	2	1	0	0	4	7
2: Energiekosten	2		2	2	1	1	1	1	10	18
3: Wartungskosten	2	0		1	1	2	0	1	7	13
4: Flexibilität der Umrüstung	1	0	1		0	1	0	1	4	7
5: Heizkostenverteilung	0	1	1	2		2	1	2	9	16
6: Energieeffizienz	1	1	0	1	0		0	0	3	6
7: Komfort	2	1	2	2	1	2		2	12	21
8: Bedarfsanpassung	2	1	1	1	0	2	0		7	13
									56	100

Tabelle 161 Beispielwertanalyse Heizung – Bestimmung der Gewichtung aus der Sicht des Nutzers

Zum Ausfüllen der Tabelle: die in der ersten Spalte und der oberste Zeile eingetragenen Bewertungskriterien werden jeweils miteinander verglichen. Dabei wird eine "2" als Ergebnis in die entsprechende Zelle eingetragen, wenn das Kriterium in der Zeile links als höherwertig angesehen wird als das Kriterium in der Spalte oben. Im umgekehrten Fall wird eine "0" eingetragen. Der Wert ist "1", wenn beide Kriterien als gleichwertig angesehen werden.

Es ist zu beachten, dass die Zahlen im oberen und im unteren Dreieck jeweils komplementär sind. Beispiel: da der Nutzer die Gerechtigkeit der Heizkostenverteilung (links, Merkmal 5) als wichtiger empfindet als die Energieeffizienz (oben, Merkmal 6), trägt er im oberen Dreieck eine "2" ein. In der komplementären Zelle des unteren Dreiecks (links, Merkmal 6 ⇔ oben, Merkmal 5) steht entsprechend eine "0".

Für jede Zeile sind die Zahlenwerte zu summieren und anschließend die prozentuale Gewichtung der Bewertungskriterien bezogen auf die Gesamtsumme zu bestimmen. Die Summe aller Punkte in der letzten Zeile, vorletzte Spalte ergibt sich aus der allgemeinen Formel $n \cdot (n-1)$ mit n als Anzahl der Bewertungskriterien. Tabelle 161 zeigt die Ergebnisse, die sich beispielsweise ergeben, wenn der Nutzer die Entscheidung über die Gewichtung trifft. Tabelle 162 gibt die Endergebnisse der Gewichtungen auch für die anderen Beteiligten wieder.

Es ist deutlich sichtbar, dass jeder Interessensvertreter andere Schwerpunkte setzt. Während der Nutzer den geringen Energiekosten, der gerechten Heizkostenverteilung und dem Komfort eine große Bedeutung zumisst, sieht der Investor vor allem geringe Investitionskosten, geringen Wartungsaufwand und die flexible Umrüstung als wichtig an. Der Investor misst Energiekosten und -effizienz praktisch keine Bedeutung zu, weil er von den Folgekosten zunächst kaum betroffen ist.

Kriterium	Gewichtung, in [%]				
	Nutzer	Investor	Energieberater	Handwerk	Mittelwert
1: Investitionskosten	6	16	9	7	10
2: Energiekosten	18	2	20	9	12
3: Wartungskosten	13	18	4	11	12
4: Flexibilität der Umrüstung	7	23	9	19	15
5: Heizkostenverteilung	16	20	14	11	15
6: Energieeffizienz	6	3	21	16	12
7: Komfort	21	9	16	11	14
8: Bedarfsanpassung	13	9	5	16	10

Tabelle 162 Beispielwertanalyse Heizung – mittlere Gewichtung verschiedener Interessensgruppen

Für den Energieberater sind Komfort, Energieeffizienz und geringer Energieverbrauch bedeutsam. Er macht dafür entsprechende Abstriche bei der Flexibilität der Umsetzung der Maßnahme im laufenden Wohnbetrieb. Das Handwerk misst beispielsweise der Bedarfsanpassung durch den Nutzer große Bedeutung zu. Auf geringe Investitions- und Wartungskosten besteht er nicht, weil hier seine Haupteinnahmequellen liegen. Ein Mittelwert wird in diesem Fall einfach arithmetisch gebildet. Alternativ käme auch eine Diskussion mit Annäherung der unterschiedlichen Gruppen in Frage.

Mit der Gewichtung der Bewertungskriterien entscheidet nun wiederum jeder der Beteiligten anhand der objektiven Fakten, aber auch zu einem gewissen Teil subjektiv, wie gut die beiden Alternativen den Anforderungen gerecht werden. Die Erfüllungsgrade bzw. Werte w werden in Teilen von "0,25" (schlecht erfüllt) bis "0,75" (gut erfüllt) vergeben. Die Werte "0" (nicht erfüllt) und "1" (voll erfüllt) werden in dieser Wertanalyse nicht verwendet.

Die Produkte "$w \cdot g$" werden gebildet und für jede Alternative spaltenweise addiert. Es ergibt sich beispielsweise in Tabelle 163, die aus Sicht des Nutzers ausgefüllt ist, eine Gesamterfüllung von "0,67" für die Zentralisierung und "0,60" für die stufenweise Instandsetzung der Etagenheizungen. Damit würde nach Nutzersicht, wenn auch nur mit geringer Präferenz, die erste Alternative realisiert.

Kriterium	Gewichtung g, in [-]	Alternative 1 Zentralisierung		Alternative 2 Stufenweise Instandsetzung	
		Wert w, in [-]	w · g	Wert w, in [-]	w · g
1: Investitionskosten gering	0,10	0,75	0,08	0,50	0,05
2: Energiekosten gering	0,12	0,75	0,09	0,75	0,09
3: Wartungskosten gering	0,12	0,75	0,09	0,25	0,03
4: Flexibilität der Umrüstung	0,15	0,50	0,08	0,75	0,11
5: Heizkostenverteilung	0,15	0,50	0,08	0,75	0,11
6: Energieeffizienz hoch	0,12	0,75	0,09	0,50	0,06
7: Komfort hoch	0,14	0,75	0,11	0,50	0,07
8: Bedarfsanpassung	0,10	0,50	0,05	0,75	0,08
Summe	1,00	-	0,67	-	0,60

Tabelle 163 Beispielwertanalyse Heizung – Bestimmung der Erfüllungsgrade aus Nutzersicht

Folgende Hintergründe liegen den einzelnen Entscheidungen zugrunde:

- Geringe Investitionskosten: Die zentrale Anlage führt trotz der Installation einer zentralen Zirkulation (bis zur früheren Anbindung der Etagenkessel) und eines Trinkwarmwasserspeichers zu geringeren Investitionskosten, da nur ein Kessel (z. B. Nennleistung 32 kW) anstelle von 5 Thermen (je 18 kW wegen der Trinkwarmwasserbereitung) benötigt wird.
- Geringer Energieverbrauch und geringe Energiekosten: Die zentrale Anlage weist höhere Wärmeverluste der Verteilung und Speicherung auf. Dafür ist die Effizienz der Wärmeerzeugung besser, weil sich der zentrale Kessel deutlich weniger Zeit in Bereitschaft befindet. Die Etagenheizung ist mit einem deutlich höheren Hilfsenergieaufwand (6 Heizungsumwälzpumpen anstelle einer Umwälzpumpe + Zirkulationspumpe + Speicherladepumpe) verbunden, weil die Umwälzpumpen einen großen Teil der Heizzeit durchlaufen. Außerdem entfallen die Leistungspreise für die 6 Einzelgasanschlüsse zugunsten des weit preiswerteren Sammelanschlusses. Dagegen spricht das sparsamere Wärmeverbrauchsverhalten von Nutzern mit Etagenheizung. Das uneinheitliche Bild führt zu einer Gleichbewertung beider Alternativen.
- Geringer Wartungsaufwand und geringe Wartungskosten: Da alle 6 Wärmeerzeuger in der zentralen Anlage der Überwachung und somit der Kosten des Schornsteinfegers unterliegen, schneidet die zentrale Lösung hier besser ab. Zudem ist ein Betreten der Wohnung zur Wartung nicht notwendig.
- Hohe Flexibilität bei der Umrüstung bzw. Instandsetzung: Da die Kosten für die Sanierung hier nicht gebündelt, sondern gestaffelt anfallen, liegt die dezentrale Instandsetzung der Thermen deutlich vorn. Auch die Vereinbarkeit der Instandsetzung mit einer gleichzeitigen Bewohnung des Gebäudes kann elegant gelöst werden, indem hier notwendige Arbeiten entweder erfolgen, wenn ein Mieterwechsel ansteht oder separate Termine mit den Mietern vereinbart werden. Die zentrale Lösung erfordert auf jeden Fall größere Umbauten.
- Gerechte und einfache Heizkostenabrechnung: Wegen der Einzelabrechnung jedes einzelnen Mieters mit dem Versorger ist die Abrechnung in der Lösung mit der Etagenheizung überschaubarer. Die zentrale Variante weist anstelle der oben eingesparten Kosten für den Gasanschluss hier die Kosten für den Abrechnungsdienst auf. Ingesamt spricht dies für die Etagenheizung.
- Hohe Energieeffizienz, gute Nachrüstbarkeit von alternativen (auch regenerativen) Energieträgern: Die Einbindung von regenerativen Energien ist praktisch nur bei der zentralen Alternative machbar. Wegen der oben bereits genannten verminderten Bereitschaftsverluste eines zentralen Kessels ergibt sich eine verbesserte Energieeffizienz.
- Hoher Komfort und hohe Sicherheit der Anlage: Sowohl der Komfort in den Bereichen Heizung und Trinkwarmwasserbereitung als auch die (subjektiv) höhere Sicherheit (nur ein Gasanschluss im Keller) sprechen für die zentrale Alternative.

- Möglicher Nutzereingriff zur Bedarfsanpassung der Anlage: Die zentrale Anlage kann vom Nutzer praktisch nur über eine Veränderung der Thermostatventile beeinflusst werden. Alle weiteren Regelfunktionen: Sommer-/Winterumschaltung, Vorlauftemperatur, Trinkwarmwassertemperatur sind nicht beeinflussbar. Es muss von einer verlängerten Heizzeit ausgegangen werden, da sich die Anlagenabschaltung nach dem Wärmeempfinden des sensibelsten Nutzers richtet. Hier erweist sich die Etagenheizung als flexibler.

Auch die Bewertung der Alternativen mit den Erfüllungsgraden nimmt jede der involvierten Personengruppen in diesem Beispiel individuell, anschließend erfolgt eine Mittelwertbildung aller Endergebnisse in Tabelle 164. Insgesamt ist festzustellen, dass sich die Einzelbewertungen der Kriterien nicht wesentlich unterscheiden, da die Merkmale zu einem großen Teil Gebrauchsfunktionen sind und verhältnismäßig objektiv bewertet werden können.

Alternative	w · g				
	Nutzer	Investor	Energieberater	Handwerk	Mittelwert
1: Zentralisierung	0,67	0,64	0,69	0,63	0,66
2: Stufenweise Instandsetzung	0,60	0,68	0,59	0,68	0,64

Tabelle 164 Beispielwertanalyse Heizung – mittlere Erfüllungsgrade verschiedener Interessensgruppen

Es ergibt sich bei dieser beispielhaften Wertanalyse die "Alternative 1 – Zentralisierung" als geeignete Problemlösung. Die Entscheidung ist, wie zu erwarten war, sehr knapp ausgefallen. Ein eindeutiges Ergebnis kann allerdings bei den sehr unterschiedlichen Interessensvertretern auch nicht erwartet werden.

5.5.2 Beispielwertanalyse "Lüftungsvarianten"

Im zweiten Wertanalysebeispiel entscheiden mehrere Interessengruppen (Wohnungsbauunternehmen, Nutzer, Energieberater, Fachplaner TGA, Versorgungsunternehmen, Hausmeister, Architekt) gemeinsam über ein Konzept für die Belüftung von Gebäuden nach der Modernisierung. Eine detaillierte Problembeschreibung sowie die Erläuterung der Lösungsalternativen sind in Tabelle 165 zusammengestellt.

Alternative	Ein wärmetechnisch modernisiertes Mehrfamilienwohnhaus (6 Wohneinheiten) mit Zentralheizung soll hinsichtlich unterschiedlicher Lüftungskonzepte analysiert werden.	
1	Fensterlüftung	Nach einer vollständigen Sanierung der Außenfassade, Fensteraustausch und Zentralisierung der Heizungsanlage wird nur eine Fensterlüftung vorgesehen.
2	Zentrale Abluftanlage	Es wird der Einbau von Außenluftdurchlasselementen und zentraler Abluft in Küche, Bädern und WCs vorgesehen
3	Wohnungsweise Zu- und Abluftanlage mit WRG	Je Wohneinheit wird ein Lüftungsgerät mit Zu- und Abluftventilatoren und Wärmerückgewinnung eingebaut

Tabelle 165 Beispielwertanalyse Lüftung – Problemstellung und drei mögliche Lösungsalternativen

Die Informationssammlung umfasst Überlegungen zum Energieverbrauch, den verschiedenen Kostengruppen für die Investitionen, der Hygiene (Schimmelpilzvermeidung) der Erhöhung des Wohnkomforts, der Bedienung, der Instandsetzung, der Umsetzung durch Fachplaner, der späteren Folgekosten durch Wartung u. v. m. Aus den Vorüberlegungen werden Funktionsmerkmale abgeleitet, die beide Lösungsalternativen erfüllen sollen (Sollfunktionen) bzw. können (Wunschfunktionen). Es ergeben sich die in Tabelle 166 zusammengestellten Kriterien für die spätere Bewertung.

Kriterium (Kürzel)		Detaillierte Beschreibung
1	Investitionskosten	Investitionskosten minimieren
2	Wartung, Betrieb	Wartungs- und Instandhaltungsaufwand gering halten
3	Energiekosten, Effizienz	Energieverbrauch und damit -kosten minimieren
4	Schutz der Bausubstanz	Bausubstanz schützen(Schimmelpilzvermeidung)
5	Wohnkomfort, Raumhygiene	Wohn- und Raumhygiene (Feuchte- und Schall) erhöhen
6	Vermietbarkeit, Wohnstandard	Wohnstandard und Vermietbarkeit verbessern

Tabelle 166 Beispielwertanalyse Lüftung – Zusammenstellung der Kriterien für die Bewertung

Die beteiligten Personenkreise entscheiden in diesem Beispiel gemeinsam in einer Diskussion, welches der sechs Bewertungskriterien bei der Bestimmung des Endergebnisses wie stark ins Gewicht fällt. Dies erfolgt mit der Matrix in Tabelle 167 (Erläuterungen zum Ausfüllen der Tabelle finden sich im Kapitel 5.5.1).

Kriterium	1: Investitionskosten	2: Wartung, Betrieb	3: Energiekosten, Effizienz	4: Schutz der Bausubstanz	5: Wohnkomfort, Raumhygiene	6: Vermietbarkeit, Wohnstandard	Summe	Gewichtung g in [%]
1: Investitionskosten		2	1	1	0	1	5	17 %
2: Wartung, Betrieb	0		2	1	1	1	5	17 %
3: Energiekosten, Effizienz	1	0		0	1	1	3	10 %
4: Schutz der Bausubstanz	1	1	2		2	0	6	20 %
5: Wohnkomfort, Raumhygiene	2	1	1	0		0	4	13 %
6: Vermietbarkeit, Wohnstandard	1	1	1	2	2		7	23 %
							30	100 %

Tabelle 167 Beispielwertanalyse Lüftung – Bestimmung der Gewichtung nach gemeinsamer Diskussion

Mit der Gewichtung der Bewertungskriterien entscheiden in diesem Beispiel wiederum alle Beteiligten in einer Diskussion, wie gut die drei Alternativen den Anforderungen gerecht werden. Die Erfüllungsgrade bzw. Werte w werden in Teilen von "0" (nicht erfüllt) bis "1" (voll erfüllt) vergeben. Es ergibt sich Tabelle 168.

Kriterium	Gewichtung g, [%]	Fensterlüftung		Zentrale Abluftanlage		wohnungsweise Zu- und Abluftanlage mit WRG	
		Wert w, [-]	w · g	Wert w, [-]	w · g	Wert w, [-]	w · g
1: Investitionskosten	17	1,00	0,17	0,50	0,09	0,00	0,00
2: Wartung, Betrieb	17	1,00	0,17	0,50	0,09	0,00	0,00
3: Energiekosten, Effizienz	10	0,50	0,05	0,00	0,00	1,00	0,10
4: Schutz der Bausubstanz	20	0,25	0,05	1,00	0,20	0,75	0,15
5: Wohnkomfort, Raumhygiene	13	0,50	0,07	0,75	0,10	1,00	0,10
6: Vermietbarkeit, Wohnstandard	23	0,25	0,06	0,50	0,12	0,75	0,17
Summe	100 %	-	0,57	-	0,60	-	0,52

Tabelle 168 Beispielwertanalyse Lüftung – Bestimmung der Erfüllungsgrade der Alternativen

Es ergibt sich bei dieser beispielhaften Wertanalyse die "Alternative 2 – zentrale Abluftanlage" als geeignete Problemlösung und knapper Kompromiss. Zukünftig könnte die Lösung "Fensterlüftung" ergänzt werden durch eine zusätzliche Messeinrichtung für den CO_2-Gehalt, für die Raumtemperatur und für die relative Feuchte. Jedem Mieter könnte ein solches, am Markt preisgünstig angebotenes Gerät zur Verfügung gestellt werden, um eine bedarfsabhängige freie Lüftung zu optimieren.

5.6 Beispielkonzepte

Der nachfolgende Abschnitt stellt Beispielenergiekonzepte verschiedener Detaillierung für das Dorf "Neuerkerode", eine große Liegenschaft der Diakonie vor.

Die Konzepte sind zwischen 2007 und 2013 im Rahmen eines Förderprojektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt entstanden. Projektantragsteller war die Evangelische Stiftung Neuerkerode. In der ersten Projektphase bestand eine Kooperation mit der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, in der zweiten Projektphase zusätzlich zu einem regional ansässigen Ingenieurbüro.

Bei den Beispielkonzepten wird jeweils auf wichtige Ergebnisse, Herangehensweisen, Problempunkte, verwendete Software, Zeitaufwand usw. hingewiesen. Auch die gewählte Ergebnisaufbereitung sowie wichtige Grunddaten werden benannt. Eine Vertiefung ist durch den Projektabschlussbericht und alle Anlagen (frei im Internet verfügbar) gegeben [46].

Förderung der DBU für Modellprojekte

Das Grundlagenprojekt wurde seitens der Evangelischen Stiftung Neuerkerode vor allem aus der Motivation initiiert, steigenden Energie-, Wartungs- und Instandhaltungskosten durch wirtschaftlich und ökologisch optimierte Modernisierungslösungen zu begegnen. Ziel des ersten Projektabschnittes war die Beschreibung und Ist-Zustandsaufnahme der Gebäudesubstanz und der Energieversorgung. Dazu wurden vorhandene Zähler ergänzt, so dass Wasser, Strom und Wärme gebäudeweise erfasst werden können. Für jedes Gebäude wurden eine detaillierte Verbrauchsanalyse und ein Gebäudebericht (mit Bestandsbewertung, Maßnahmenkatalog, Kostenschätzung, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung) angefertigt. Die Nahwärmeversorgung und das Dampfnetz wurden hinsichtlich ihrer Energieeffizienz und ihrer Kostenkennwerte untersucht.

Das Umsetzungsprojekt diente der Erarbeitung von kurz-, mittel- und langfristigen Handlungsanweisungen und von Prioritätenlisten für die Modernisierung des Immobilienbestandes und der Energieversorgung. Ein Nutzungs-, Gebäudeentwicklungs- und Energiekonzept für die Liegenschaft wurden erarbeitet. Neben den Entwicklungskonzepten für die Immobilien und Energieversorgung widmete sich die zweite Projektphase auch dem Nutzerverhalten.

Das Dorf und seine Bewohner

Das Dorf Neuerkerode gehört zur Gemeinde Sickte und liegt am Elm, zwischen Braunschweig, Schöppenstedt und Helmstedt im Landkreis Wolfenbüttel.

Neuerkerode bietet 740 Menschen ein zu Hause. Überwiegend Menschen mit geistiger Behinderung sowie mit Lern- und Mehrfachbehinderungen haben dort einen Wohnort gefunden.
Die Bewohner des Dorfes leben ihren Fähigkeiten entsprechend in Wohngruppen oder in einer eigenen Wohnung. Durch die gegebene Infrastruktur mit Läden, Gasthaus, Gärtnerei und Friseur sind die Bewohner in der Lage, soweit wie möglich selbstständig zu leben. Auch Besucher von außen nutzen Trödel-, Blumen- und Bücherladen.

Es herrscht ein normales Dorfleben, mit Freizeitangeboten wie einer Kegelbahn, einem Dorfgemeinschaftshaus, Turn- und Schwimmhalle. Einige Gruppen betreiben im kleinen Rahmen Tierhaltung: Schweine, Schafe, Vögel, Hühner und Enten. Etwa 400 der behinderten Bewohner arbeiten im Dorf oder in ausgelagerten Arbeitsstätten, z. B. den nahe gelegenen Werkstätten Braunschweig/Rautheim. Es stehen Arbeitsplätze in Werkstätten und Wirtschaftsbetrieben zur Verfügung. Des Weiteren arbeiten die Bürger in den Bereichen Kunst, Handwerk, Landwirtschaft und Gartenbau.

Die Bewohner werden durch Fachpersonal unterstützt. Es gibt etwa 600 Arbeitsplätze für Pflege- und anderes Personal. Zu diesen gehören Ärzte, Physiotherapeuten, Heilerziehungspfleger, Handwerker und andere mehr.

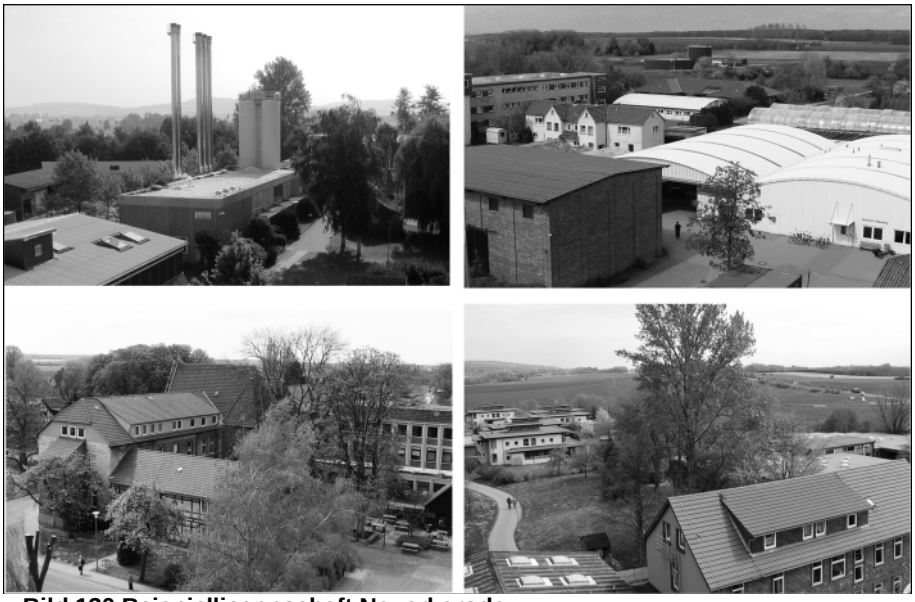


Bild 130 Beispielliegenschaft Neuerkerode

Bausubstanz und Versorgung

In der knapp 150-jährigen Geschichte wurde fortwährend gebaut, umgebaut und modernisiert. Derzeit weisen 55 Gebäude knapp 48.000 m² beheizte Fläche auf. Etwa 20 % der beheizten Gebäudeflächen sind der Nichtwohnnutzung zuzuordnen. Knapp 40 % sind reine Wohngebäude. Die restlichen 40 % sind Gebäude mit Mischnutzung.

Der Dorf- und Stiftungsaufbau spiegelt den jeweiligen historischen baulichen und planerischen Entwicklungsstand wieder. Die Liegenschaft ist seit 1868 gewachsen. So ist ein Ensemble entstanden, das nicht an allen Orten zusammen passt.

Knapp 12 % der heutigen Liegenschaftsfläche ist bis 1900 entstanden. Bis zum zweiten Weltkrieg kamen weitere knapp 30 % der Fläche hinzu. Bis Ende der 1960er Jahre entstanden weitere 20 % der Fläche. Etwa ein Drittel der Bausubstanz ist in den 1970er Jahren bis Mitte der 1990er entstanden. Der geringe Rest danach.

Die Gebäude werden fast ausschließlich über Nahwärme aus einer Heizwerkzentrale versorgt, welche aus Gaskesseln und seit 2004 zusätzlich aus Abwärme einer Biogasanlage stammt. Weiterhin wird eine zentrale Dampfversorgung für Küche und Wäscherei betrieben. Die Stromversorgung erfolgt aus dem öffentlichen Netz und seit 2010 mit geringen Anteilen aus selbst erzeugtem Photovoltaikstrom.

5.6.1 Ausgangslage und Randdaten

Die Überlegungen zur Liegenschaftsentwicklung sowie das Energiekonzept basieren auf der strukturierten Auswertung von Verbrauchsdaten für Wärme, Strom und Wasser.

Messkonzept

Neben den Hauptabrechnungszählern der Energielieferung für Strom, Gas, Wasser werden die zentral in das Netz eingespeiste Wärmemenge aus dem Kesselhaus sowie die Biowärmelieferung erfasst.

Pro Gebäude ist mindestens ein Wärmemengenzähler in der Hausübergabestation vorhanden. Bei großen Gebäuden werden Heizung und Trinkwarmwasserbereitung getrennt erfasst. Darüber hinaus haben die Gebäude jeweils mindestens einen zentralen Wasser- und einen Stromzähler. Insgesamt gibt es in der Liegenschaft ca. 75 Wärmemengenzähler, 90 Wasserzähler und 80 Stromzähler.

Die Datenerfassung erfolgt manuell. Jeweils zum Monatsbeginn begehen Mitarbeiter die einzelnen Zählpunkte und notieren Zählerstände auf Papier bzw. in einer Exceltabelle. Die Rundgänge in die Gebäude bzw. Technikzentralen werden auch für die allgemeine Wartung genutzt.

- Zeitaufwand: für Zählererfassung und Übertragung in Excel werden ca. 9 Arbeitswochen pro Jahr veranschlagt. Dieser Aufwand spricht für eine baldige Investition in ein professionelles Energiemanagementsystem.
- Die Jahresendauswertung mit Hilfe von Exceltabellen und Erläuterungsbericht nimmt eine weitere Woche in Anspruch (Ingenieur).
- Es folgen jährlich ca. 3 halbtägige Gespräche der Beteiligten zur Analyse von Problemfällen.

Gebäudeweise Ergebnisse

Für jedes Gebäude ergibt die Auswertung der installierten Zähler Medienverbrauchskennwerte sowie Medienkosten. Die Zusammenstellung für das Jahr 2013 zeigt Bild 131.

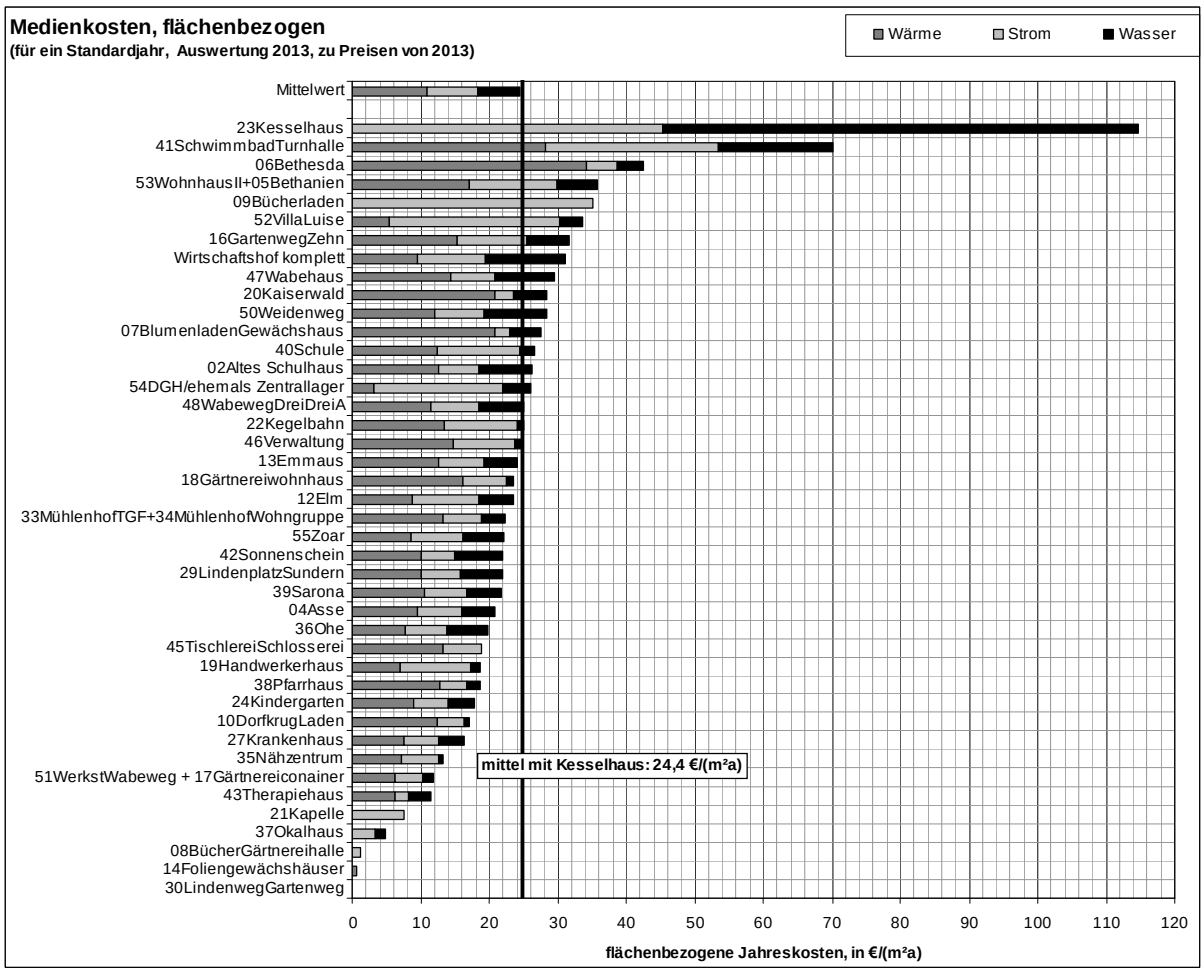


Bild 131 gebäudeweise Medienkosten

Die Auswertung gibt es ebenfalls für Einzelgebäue bzw. einzelne Medien im Zeitverlauf sowie kumuliert für die gesamte Liegenschaft.

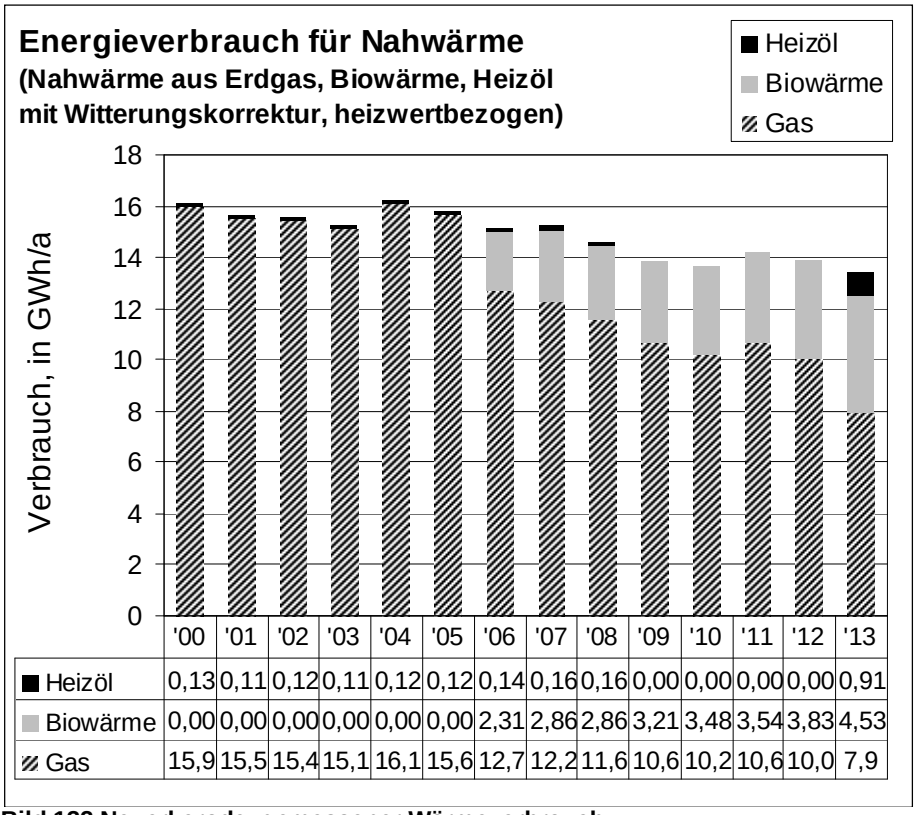
Verbrauchsentwicklung

Um die Jahrtausendwende wurde für Neuerkerode das Ziel formuliert, dass mittel- oder langfristig (bis 2050) der Verbrauch wie folgt reduziert wird:

- 60 … 75 % weniger Wärme,
- 30 … 50 % weniger Strom,
- 20 … 40 % weniger Wasser.

Nachfolgende Grafiken stellen die Entwicklung seit 2007 dar und geben einen Ausblick auf die Entwicklung.

Der Wärmeverbrauch ist seit der Jahrtausendwende um 3000 MWh/a zurückgegangen. Es zeigt sich, dass die Biowärmeeinspeisung und Modernisierungsmaßnahmen den Erdgasverbrauch von vorher 16 auf 8 GWh/a fast halbiert haben. Die mittlere Einsparung 2007 (Beginn der Energiekonzepterstellung) liegt bei etwa 3 %/a und damit doppelt so hoch wie der deutsche Durchschnitt. Wenn die Entwicklung des Wärmeverbrauchs so weiter geht, ist das 2050-Ziel gut erreichbar.



	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	'13
Heizöl	0,13	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,14	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91
Biowärme	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,31	2,86	2,86	3,21	3,48	3,54	3,83	4,53
Gas	15,9	15,5	15,4	15,1	16,1	15,6	12,7	12,2	11,6	10,6	10,2	10,6	10,0	7,9

Bild 132 Neuerkerode: gemessener Wärmeverbrauch

Der Stromverbrauch ist insgesamt am wenigsten gesunken. Hier sind künftig die größten Anstrengungen zu unternehmen, um das 2050-Ziel zu erreichen, z. B. durch verändertes Nutzerverhalten. Seit 2005 ist die Verbrauchstendenz für Strom konstant bis leicht fallend. Die mittlere Einsparung seit 2007 (Beginn der Energiekonzepterstellung) liegt bei etwa 1 %/a. Sollte zukünftig die Beheizung auf mit Strom betriebene Wärmepumpen umgestellt werden, ist das Stromeinsparziel neu zu überprüfen.

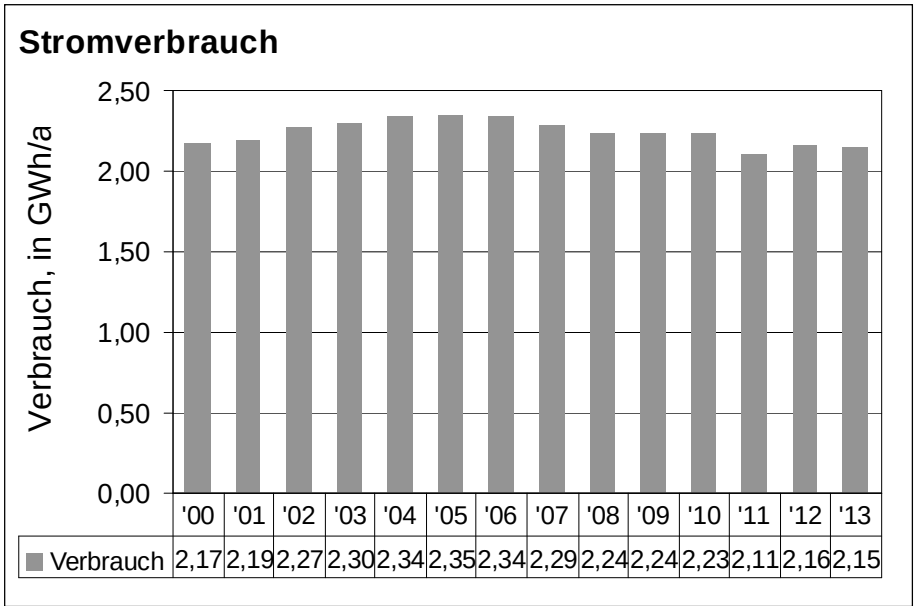


Bild 133 Neuerkerode: gemessener Stromverbrauch

Der Wasserverbrauch und damit die anfallende Abwassermenge nehmen seit 2000 stetig ab. Hier ist bereits heute das langfristige Ziel für 2050 erreicht und muss nun gehalten werden. Die mittlere Einsparung seit 2007 (Beginn der Energiekonzepterstellung) liegt bei etwa 2 %/a. Es ist davon auszugehen, dass sich weitere Einsparungen nicht aufgrund technischer Änderungen, sondern durch verändertes Nutzerverhalten ergeben.

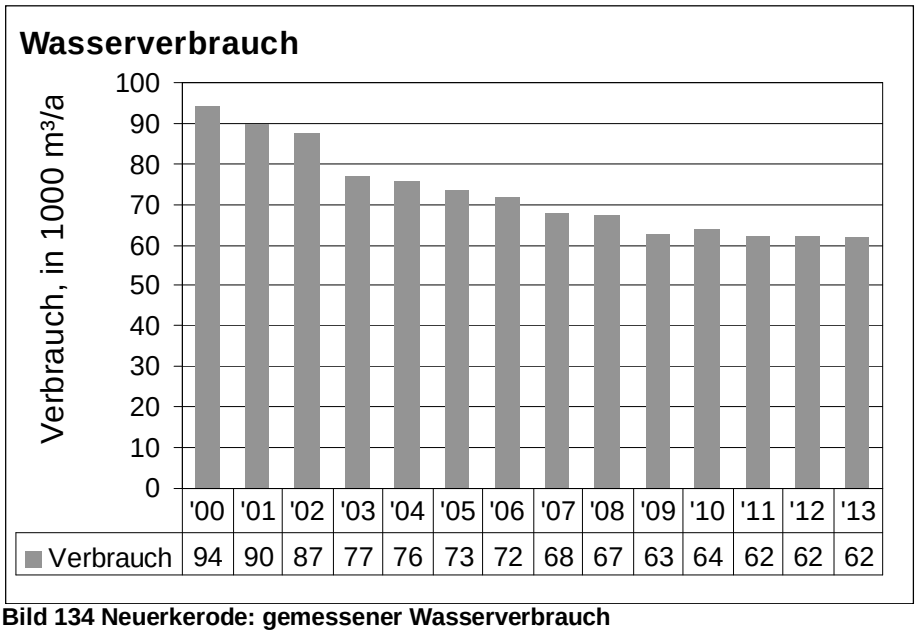


Bild 134 Neuerkerode: gemessener Wasserverbrauch

Energiekosten und -preise

Die mittlere Kosteneinsparung innerhalb der Projektlaufzeit (2007 - 2013) liegt bei etwa 1,3 %/a. Im Bereich Wärme ergibt sich dieser Trend auch, weil der kostengünstigere Biowärmeanteil gesteigert werden konnte.

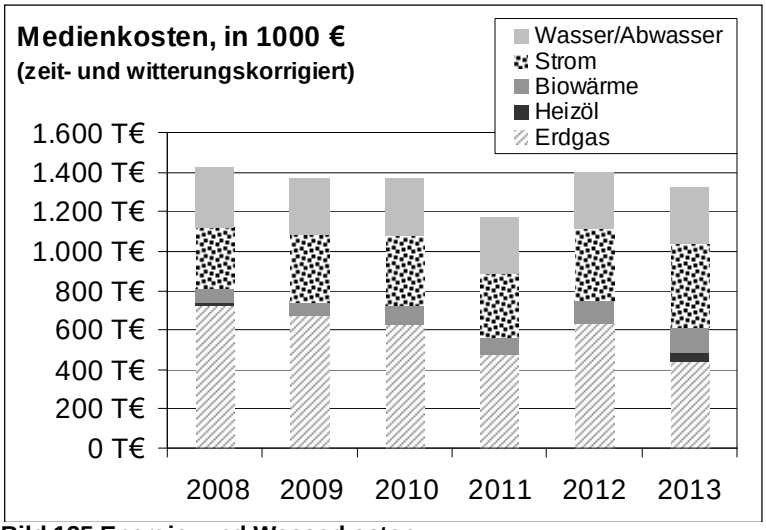


Bild 135 Energie- und Wasserkosten

Folgende Energiepreise wurden allen Untersuchungen der Liegenschaft zugrunde gelegt (angegebene Werte gelten für 2007 und 2013, Endkundenpreis incl. Leistungspreis, Grundgebühr usw.):

- Strom: 0,12 … 0,19 €/kWh
- Erdgas: 0,05 … 0,05 €/kWh (brennwertbezogen)
- Biowärme: 0,024 … 0,031 €/kWh
- Nahwärmepreis am Verbraucher: 0,056 … 0,050 €/kWh
- Dampfpreis am Verbraucher: 0,061 … 0,076 €/kWh

Emissionen

Der Wärme- und Stromverbrauch soll nach Wunsch der Stiftung langfristig (Ziel 2050) zu 80 … 100 % aus regenerativen Quellen stammen.

Die Emissionen aus dem Wärmeverbrauch haben sich im Projektzeitraum um 3,6 %/a vermindert. Dies ergibt sich einerseits aus der erreichten Einsparung im Bereich Wärme sowie andererseits aufgrund der Erhöhung des Biowärmeanteils.

Die Entwicklung der CO_2-Emissionen für Strom hängt extrem von dessen Herkunft ab – was die Aussagen zur Einsparungen wenig objektiv macht. Wird bei Strom immer die Gesamtemission berücksichtigt (unabhängig von der zertifizierten Herkunft) ergibt sich seit 2007 0,7 %/a Emissionsminderung. In Bild 136 sind die fiktiven Emissionsminderungen (durch Zertifikateinkauf) als (karierte) Balken informativ mit eingetragen. Die Emissionen der Biowärmeeinspeisung wurden vernachlässigt.

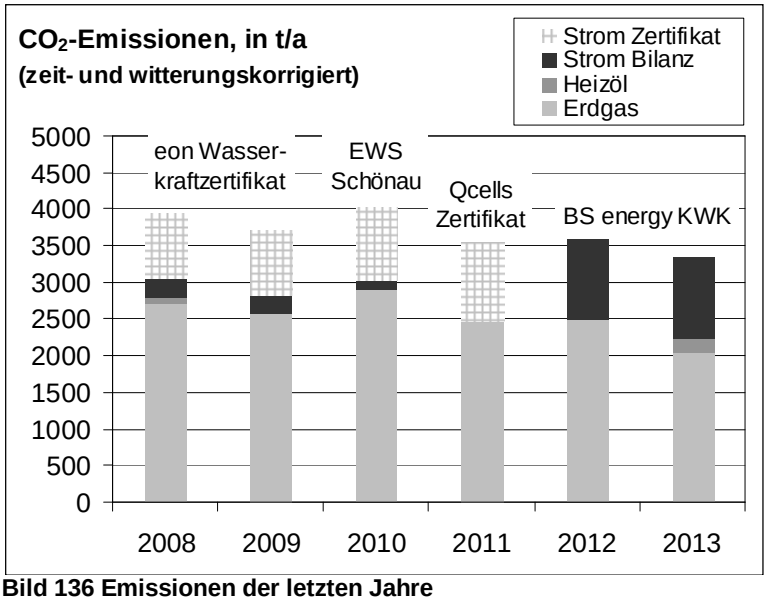


Bild 136 Emissionen der letzten Jahre

Alles in allem sind die Emissionen seit 2000 um etwa 2,7 %/a gesunken. Das ist eine Minderung von 3950 auf 3350 t/a. Der erreiche Ist-Wert liegt derzeit gut im Trend der 2050-Zielwerte. Aber: die Biowärmeumstellung ist erfolgt. Der künftige Fokus muss in der Wärmeeinsparung sowie in der emissionsärmeren (Eigen-) Produktion von Strom liegen.

Energieanalyse (EAV)

Aus den Messwerten für den Wärme-, Biowärme- und Gasverbrauch wird eine jährliche Energieanalyse aus dem Verbrauch (EAV) erstellt. Diese Auswertung zeigt die Verbrauchswerte als mittlere Leistungen abhängig von der Außentemperatur, siehe auch Kapitel 4.3.

Die EAV der gesamten Liegenschaft für das Jahr 2013 – siehe Bild 137 – wird nachfolgend erläutert. Sie liegt in Neuerkerode auch für jedes Gebäude separat vor.

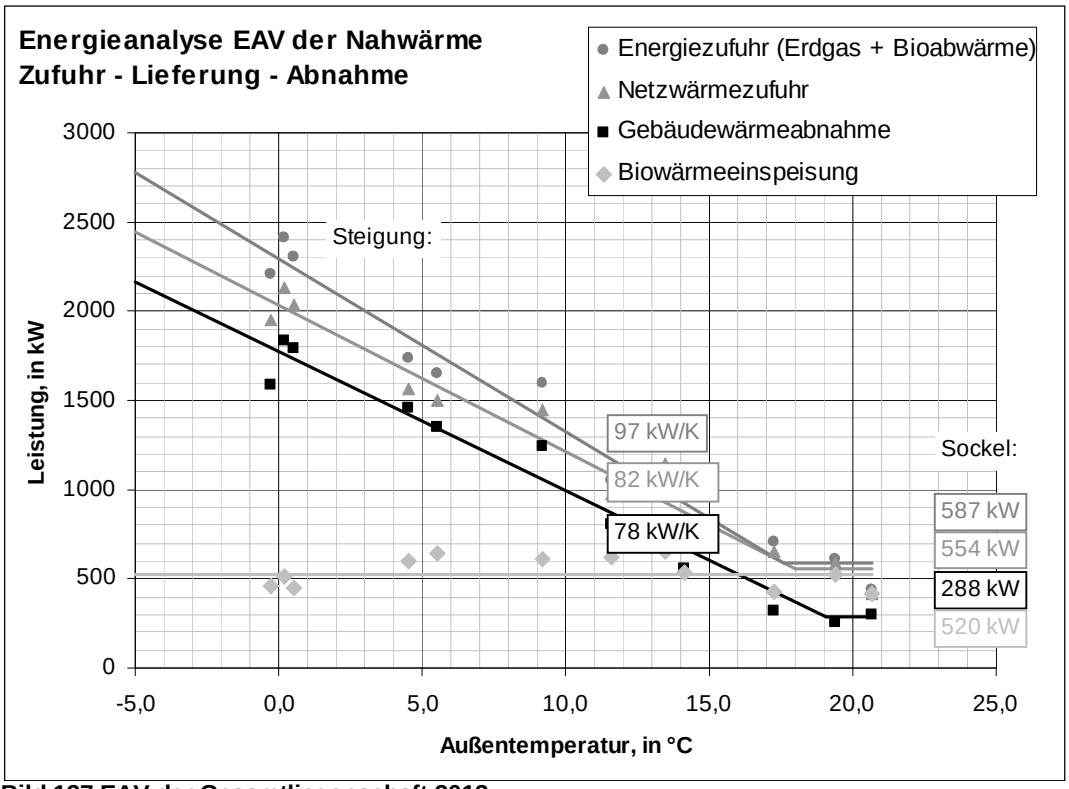


Bild 137 EAV der Gesamtliegenschaft 2013

Die Wärmeabnahme der Gebäude (schwarze Linie) ist witterungsabhängig. Die Steigung der winterlichen Geraden führt zu einem Kennwert von 1,67 W/(m²K) bezogen auf die beheizte Fläche. Einschätzung: mittlerer Wert etwa entsprechend dem deutschen Durchschnitt aller Wohngebäude, ein typischer Neubauwert liegt bei ≈ 0,5 …1,0 W/(m²K).

Erst unter ca. 18°C Außentemperatur (Heizgrenztemperatur) ist ein sommerlicher Sockel für die Gebäudewärmeabnahme für die Trinkwarmwasserbereitung eindeutig erkennbar. Es ergeben sich 60 kWh/(m²a) Wärmeabnahme bzw. 124 kWh/(m²a) Endenergieeinsatz für 41440 m² Flächen mit zentraler Warmwasserbereitung. Einschätzung: sehr hoher Wert, der durchschnittliche Wohnbau liegt bei 32 kWh/(m²a).

Die Verteilverluste des Netzes (Abstand Netzwärmezufuhr und Gebäudewärmeabnahme) liegen bei 200 kW Dauerleistung. Das sind 230 kWh/(m·a) pro Trassenmeter bzw. ein längenbezogener Wärmeverlust 15 % über Neubaustandard. Der flächenbezogene Verteilverlust für die angeschlossenen Gebäude ist mit 38 kWh/(m²a) sehr hoch einzustufen. Zielwerte liegen zwischen 10 … 15 kWh/(m²a).

Für den Kessel ergibt sich aus den unterschiedlichen Steigungen der beiden oberen Geraden ein (näherungsweiser) Nutzungsgrad von 84,5 %. Der Wert ist brennwertbezogen. Einschätzung: altanlagentypisch – Werte für Neuanlagen liegen bei 90 … 95 %.

Die waagerechte Linie zeigt die Biowärmelieferung. Der Kennwert liegt bei 11 W/m² bzw. 98 kWh/(m²a). Einschätzung: guter Wert. Aus Biowärmeeinspeisung können in etwa der Netzverlust und der Sockel für Trinkwarmwasser gedeckt werden.

Energieflussbild

Die Messwerte des Medienverbrauchs lassen sich auch in ein Sankeydiagramm bzw. Energieflussbild überführen, siehe Bild 138. Alle relevanten Teilenergiemengen und daraus ableitbare Verhältnis- oder Anteilswerte sind vermerkt.

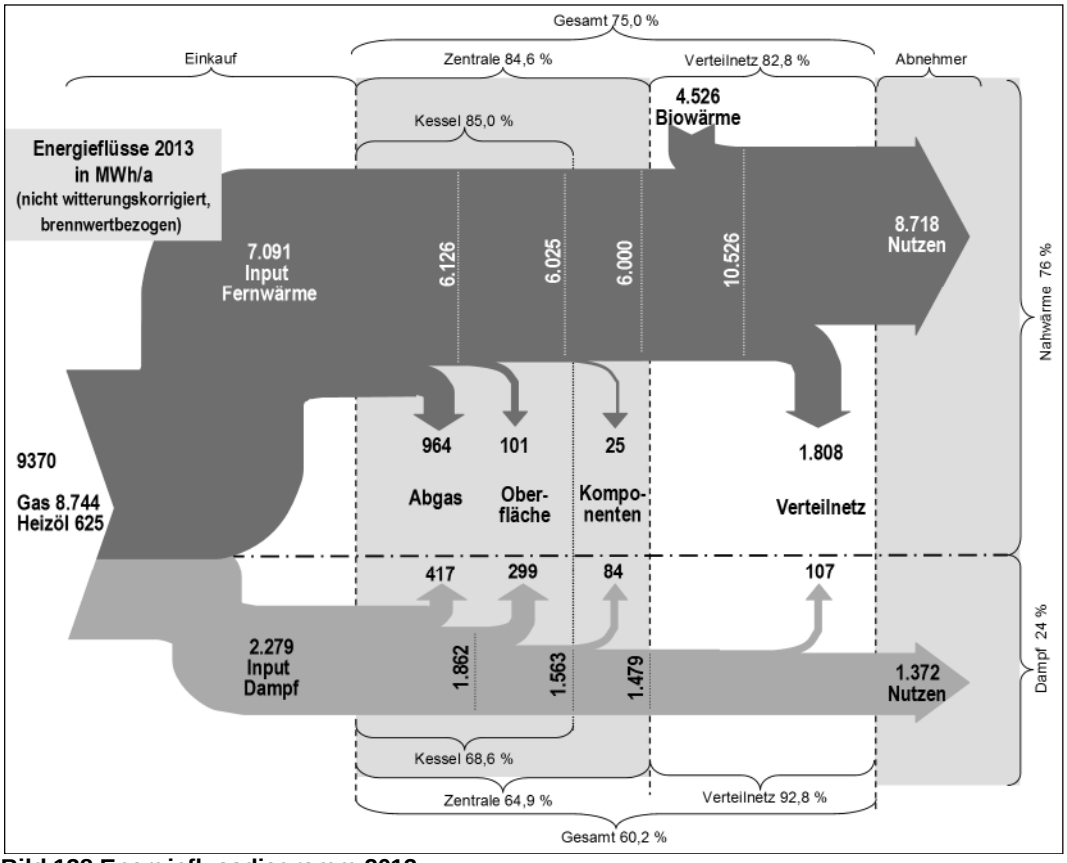


Bild 138 Energieflussdiagramm 2013

Diese Darstellung enthält neben der Nahwärmeversorgung auch die Energieflüsse der Dampferzeugung (Küche und Wäscherei). Erwähnenswert ist der mit 24 % an den Gas- und Öleinkäufen hohe Anteil der Dampferzeugung.

5.6.2 Quartierskonzept: Energieversorgung

Für die Wärmeversorgung der Liegenschaft Neuerkerode wurde ein Energiekonzept erstellt. Dieses Quartierskonzept (siehe Kapitel 5.2.5) muss berücksichtigen, dass der Zustand der Gebäude sich sukzessive verbessern wird.

Energie- und Leistungskennwerte

Für das Energiekonzept wurde der heutige Energieverbrauch für Wärme und Strom je Gebäude erfasst und tabellarisch sowie grafisch aufbereitet. Basis sind die Verbrauchswerte. Zusätzlich werden für jedes Gebäude auch die prognostizierten künftigen Energiemengen für Wärme und Strom aus dem Gebäudekonzept (siehe Kapitel 5.6.4) berücksichtigt.

Neben den heutigen und künftigen Jahresenergiemengen wird für die Konzeption der Energieversorgung eine Leistungsangabe benötigt. Im Falle der Heizung ist dies die Gebäudeheizlast bei minimaler Außentemperatur, die näherungsweise für den Bestand und die sanierten Gebäude aus den Gebäudekonzepten (siehe Kapitel 5.6.4) bekannt ist.

Schwieriger ist die Abschätzung der Leistung für die Trinkwassererwärmung. Innerhalb des DBU-Projektes wurden Formelansätze aus Messwerten abgeleitet, siehe unten.

Als weitere Grunddaten wurden die wichtigsten Gebäudedaten übernommen: Nutzung, Baujahr, beheizte Fläche, Hüllfläche, Volumen. Für jedes Gebäude wurde außerdem notiert, ob ein Heizraum mit Platz für einen alternativen Erzeuger, ein Schornstein und ein geeigneter Lagerraum für Pellets oder Öl zur Verfügung steht.

Netzkarten

Als wichtigstes Arbeitswerkzeug sind vorab Nahwärmenetzkarten des Dorfes erstellt worden, siehe Bild 139. Sie enthalten alle wichtigen Grunddaten auf einen Blick: Gebäudenamen und Flächen, angeschlossene Energiemengen und maximale Leistungen (getrennt nach Heizung und Warmwasser), Leitungslängen und Netzwärmeverluste.

Mit diesen grafischen Übersichten lassen sich beliebige Insellösungen konzipieren und überblicken (Addition der Energiemengen der Gebäude und Netzverluste).

Die eigentliche rechnerische Untersuchung greift auf die in den Netzkarten grafisch dargestellten Grunddaten in Form einer Exceltabelle zurück.

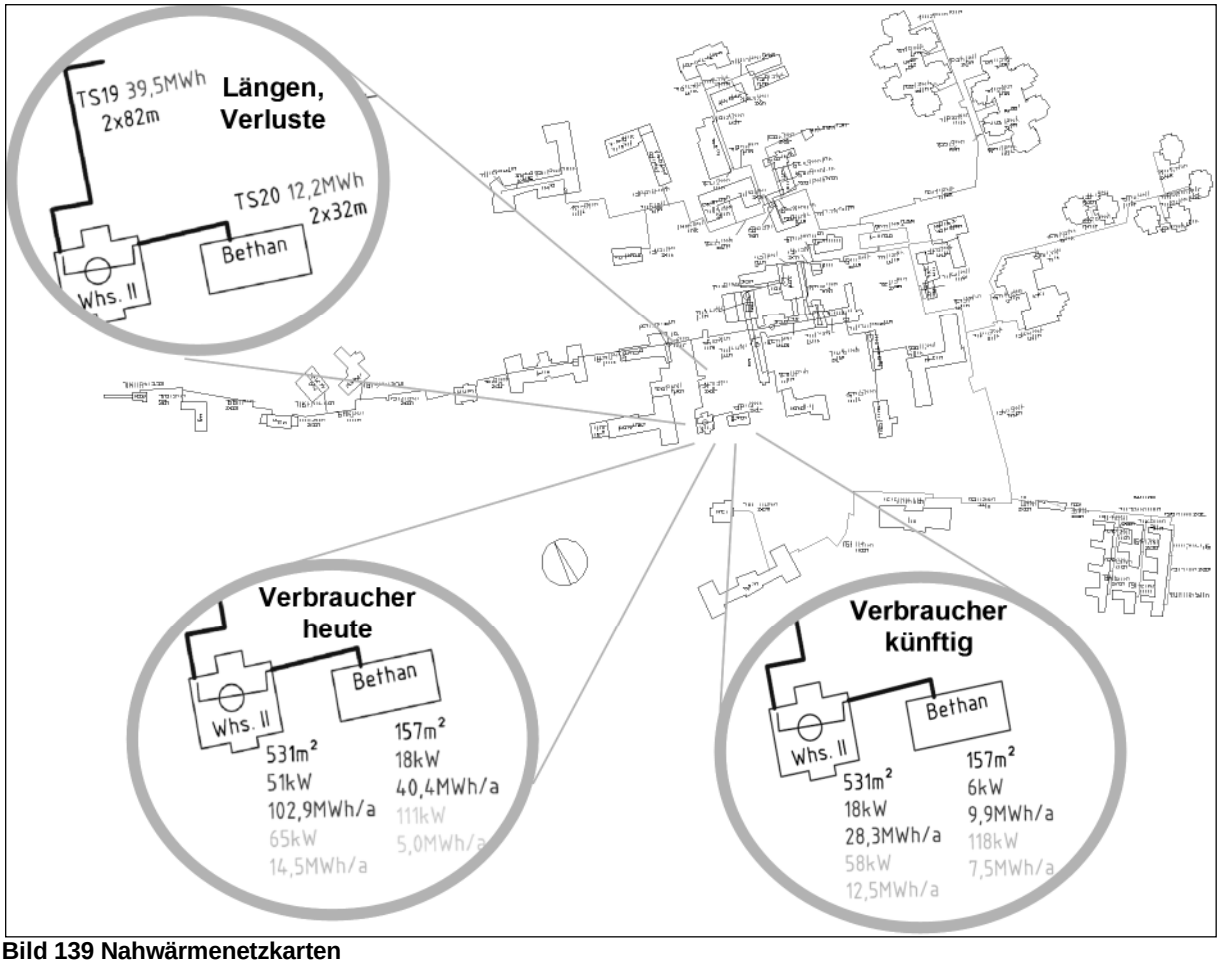


Bild 139 Nahwärmenetzkarten

Herangehensweise und Untersuchungsvarianten

Ausgehend von den Rändern der Liegenschaft zum Ortskern wurden zunächst potentielle Insellösungen für Gebäude untersucht, die langfristig von der Nahwärme getrennt werden könnten. In erster Linie wird also untersucht, ob die Nahwärmeleitungen an den bzw. zu den Rändern des Dorfes hin langfristig Bestand haben.

Grundlage für diese Untersuchung sind die baulich modernisierten Gebäude, denn spätestens dann wird eine Nahwärmeversorgung ggf. unwirtschaftlich bzw. unökologisch, weil der Nutzenergiebedarf sehr gering ist.

Die Untersuchung der Abkopplung von Gebäuden umfasst im gleichen Schritt die Frage, wie die Objekte künftig versorgt werden, falls eine Abkopplung sinnvoll ist: mit Holz, Wärmepumpen, Gas- oder Ölkessel sowie unter Einbindung von Blockheizkraftwerken. Verglichen werden somit jeweils alle möglichen Versorgungsalternativen miteinander, zentrale Nahwärmeversorgung oder dezentrale Versorgung untereinander sowie ggf. Insellösungen an der Peripherie.

Für die Wärmeerzeuger wurden feste Nutzungsgrade bzw. Arbeitszahlen festgelegt. Die nach einer Modernisierung möglichen geringeren Netztemperaturen wurden jedoch berücksichtigt. Zusätzlich für die Varianten mit BHKW müssen Leistungs- und Deckungsanteile bestimmt werden. Die BHKW-Wärmeleistung ergibt sich aus der Grundlast, die zu decken ist (Warmwassernutzen plus Wärmeverluste des Warmwassernetzes plus Nahwärmenetzverluste) und einem Zuschlag für die Heizung (10 % der maximalen Heizlast). Je nach Erzeugerleistung werden Pufferspeichergrößen bei den Holzkesseln, Wärmepumpen und BHKW abgeschätzt.

Der Betrachtungszeitraum für alle Energiekonzepte beträgt 30 Jahre. Aus einem mittleren Zins für die Investition von 4,5 %/a ergibt sich eine Annuität von 6,1 %/a. Der Zins wurde zum Zeitpunkt der Erstellung des Energiekonzeptes (2009/10) festgesetzt. Bei der Bewertung der Gebäude im Entwicklungskonzept (2013/14) lag er deutlich niedriger. Es wurde jedoch darauf verzichtet, alle älteren Wirtschaftlichkeitsberechnungen neu durchzuführen.

Darüber hinaus wurden die Annahmen zu Energiepreisen (0 %/a bzw. 2,6 %/a und 5,1 %/a Realverteuerung) und Emissionen (heutige und künftige Werte) variiert.

Zieldefinition bei der Auswertung

Für beides, das Gebäude- und das Energiekonzept muss seitens des Auftraggebers definiert werden, welche Prioritäten gesetzt werden. Da kaum ein Konzept es schafft, mit einer Lösung alle Ideen gleichermaßen zu befriedigen, sind mindestens die unten stehenden drei Aspekte in eine Prioritätenreihenfolge zu bringen:

- Ökonomie und Gesamtkosten
- Ökologie und Gesamtemissionen
- Diversität der Energieträger und Risikostreuung

Für Neuerkerode ist rückblickend festzuhalten, dass die Zieldefinition lange Zeit nicht klar war. Dies führte zu einer unnötigen Vervielfachung von Untersuchungsvarianten. Letztlich wurden alle drei Gesichtspunkte berücksichtigt. Ökologische Varianten wurden bevorzugt, aber nur solange eine Wirtschaftlichkeit gegeben war. Eine Energieträgerdiversität wurde in Grenzen beachtet.

Ergebnisse für Peripherie und Kerndorf

Die Besonderheit bei der Konzepterstellung für Neuerkerode ist das bereits vorhandene Nahwärmenetz. Vorab wurde festgelegt, dass die vorhandene Bioabwärmenutzung im Liegenschaftskern erhalten bleibt. Das setzt eine Mindestgröße des Netzverbundes voraus.

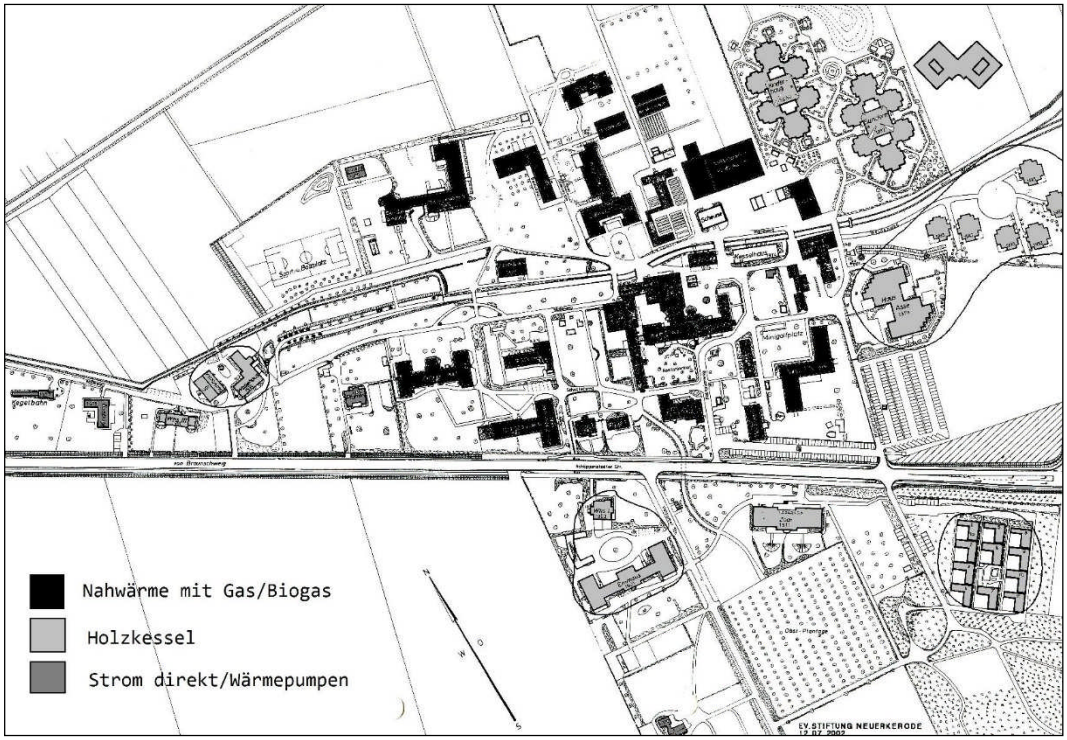


Bild 140 Ursprüngliches Energiekonzept

Für die Peripherie ergibt sich kein zwangsläufiger Netzerhalt. Die Aufgabe bestand daher in der Untersuchung möglicher Abkopplungen einzelner Gebäude oder Versorgungsinseln. Für alle Abkopplungen stellt sich die Frage des neuen Wärmeerzeugers. Eine Netzabtrennung wird nur empfohlen, wenn selbst bei Umstellung der Versorgung in der Zentrale (auf Holz statt Gas, d.h. einen sehr preiswerten Brennstoff) die dezentrale Lösung wirtschaftlicher ist.

Bild 140 zeigt die Ergebnisse des ursprünglichen Konzeptes von 2010. Das Kerndorf wird von Nahwärme versorgt. An der Peripherie werden Einzelgebäude und Inseln überwiegend mit Holz, teilweise mit Strom (Wärmepumpen) versorgt. Die an das Nahwärmenetz angeschlossene Fläche vermindert sich um ca. 30 … 40 %, das Leitungsnetz selbst um 40 … 50 %. Hinweis: im Original ist das Bild farbig und zeigt dem Auftraggeber schnell und übersichtlich, welcher Energieträger wo eingesetzt werden soll.

Im Verlaufe der Projektbearbeitung wurde ebenfalls eine zentrale Biomassefeuerung mit verschiedenen Standorten untersucht. Die umfangreichen Prüfungen und Überlegungen, den Einsatz von regenerativer Energie über Hackschnitzelanlagen zu erhöhen, zeigten, dass dieser Weg für die Stiftung aus technischer Sicht nur aufwändig umsetzbar und aus wirtschaftlicher Sicht nicht zielführend ist. Ebenso wie die Lieferung von Biogas (fiktive, eingekaufte Kontingente) wurde diese Idee letztlich verworfen.

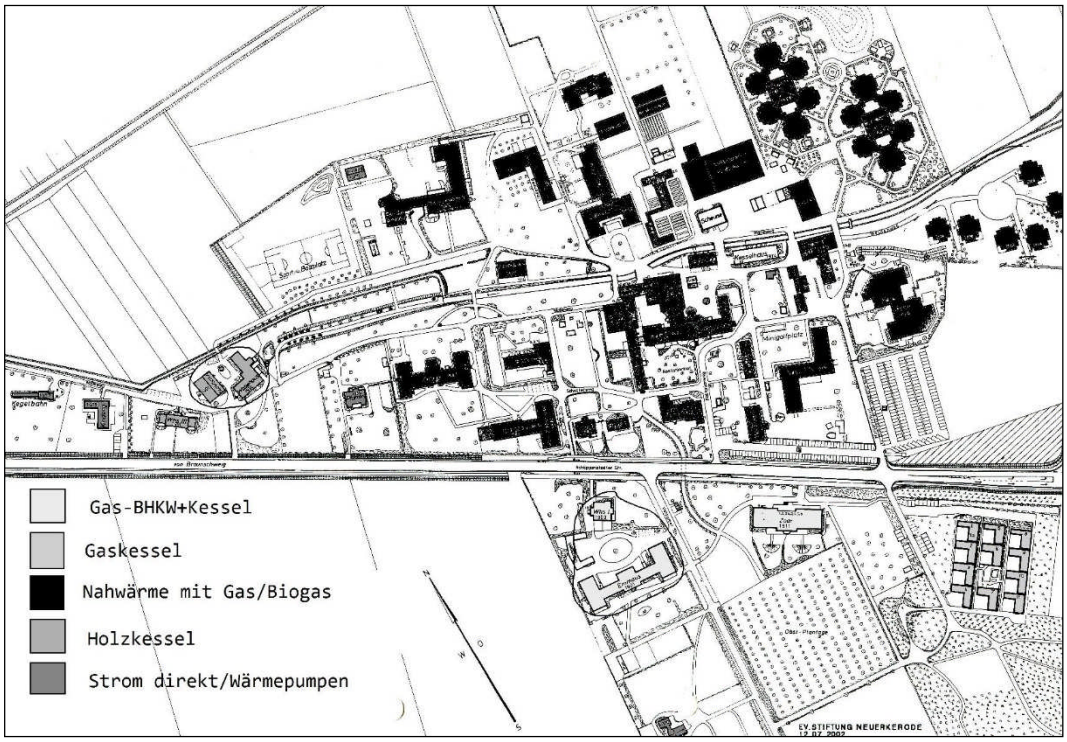


Bild 141 Wahrscheinliches Energiekonzept

Die Verfeinerung der Planung führte im Verlaufe des Projektes zu Modifikationen des Konzeptes, siehe Bild 141. Die Ausdehnung der Kernliegenschaft ist nach einer Optimierung der Biowärmeeinspeisung (siehe Kapitel 5.6.3) doch größer als früher gedacht. Die Realisierung von Holzkesseln im südlichen Liegenschaftsbereich wurde verworfen. Stattdessen wird nun ein Gas-BHKW geplant.

Verallgemeinert: die Überlegungen des Konzepts wurden weiterentwickelt. Die Grundlogik aber bleibt:

- eine Abkopplung ist umso sinnvoller, je kleiner der Bedarf des Gebäudes im Verhältnis zu den Verteilnetzverlusten seiner Anschlussleitung an das Erdreich ist, daher ist die Abkopplung wirtschaftlicher, wenn die Gebäude modernisiert sind
- eine Abkopplung ist umso sinnvoller, je höher der Energiepreis ist, da die vermiedenen Kosten für Verteilnetzverluste mehr Spielraum für Ersatzinvestitionen bieten.

Die Option, den in der Biogasanlage produzierten Strom in die Stiftung (per Leitung) einzuspeisen und direkt zu verbrauchen und nur den Überschuss in das öffentliche Netz einzuspeisen, ist noch offen. Wahrscheinlich könnte fast der gesamte Strombedarf der Stiftung aus der Biogas-BHKW-Anlage gedeckt werden. Diese Möglichkeit ist für beide Seiten interessant. Dem Bauern sichert dies Einnahmen nach Ablauf der garantierten gesetzlichen Förderung. Für die Stiftung ergibt sich regenerativer Strom mit bekannter Herkunftsquelle.

Kostenfunktionen

Die Variantenberechnung zum Energiekonzept mit Excel greift auf Kostenfunktionen zurück, die aus konkreten Teilprojekten resultieren und ausschnittsweise in Tabelle 169 gezeigt werden.

Komponente	Kostenfunktion	Einschränkung
Ölbrennwertkessel	2500 € · $[\dot{Q}_{K,N}/kW]^{0,3}$	bis ca. 500 kW
Gasbrennwertkessel	700 € · $[\dot{Q}_{K,N}/kW]^{0,6}$	
Pelletkessel	6600 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,5}$	bis ca. 100 kW
Erdgas-BHKW	3100 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,65}$	
Übergabestation	5300 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,1}$	
Sole-Wärmepumpe	2300 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,5}$	
Außenluft-Wärmepumpe	3200 € · $[\dot{Q}_N/kW]^{0,5}$	
Pufferspeicher	700 € · $[V/l]^{0,26}$	bis ca. 1500 l
Fernwärmeanschluss	6800 € · $[L/m]^{0,2}$	bebautes Gelände
Heiz-/Lagerraum	400 € · $[A_{Grund}/m^2]^{-0,23}$	10...200 m²
Erdwärmesonden	900 € + 750 €/kW · $[\dot{Q}_N/kW]$	5...100 kW
Nahwärmeleitungen	(3 € · [DN/mm] + 400 €) · [L/m]	DN 25...80
Gasleitung	(330 €) · [L/m]	DN 50...100

Tabelle 169 Auszüge der Kostenschätzung

Leistungsbedarf für Trinkwarmwasser

Bei den Gebäuden mit Pflegenutzung ist in der Phase der Intensivpflege vormittags zu erkennen, dass ca. 40 … 50 % des Tagesbedarfs an Warmwasser innerhalb von 45 Minuten fließen. Bei anderen Nutzungsarten ergeben sich deutlich homogenere Verteilungen. Da die Fachliteratur diese Nutzungsart nicht gesondert behandelt, jedoch hier ausgeprägte Spitzenzapfungen vorhanden sind, wurde für Neuerkerode auf Basis von Messwerten folgendes abgeleitet:

- Leistung für Speichersysteme: $\dot{Q}_{TWW} = 0{,}625\ kW \cdot [n_P] + 5{,}3\ kW$
- Leistung für Durchlaufsysteme: $\dot{Q}_{TWW} = 35{,}8\ kW \cdot [n_P]^{0,52}$

Basis ist die Personenzahl n_P, die ohne Einheit in die Gleichung eingesetzt wird.

Die Leistungswerte sind wegen der hohen Gleichzeitigkeit der Zapfung bei kleinen Gebäuden überproportional groß. Für Insellösungen und Netzverbünde, d.h. Zusammenschlüsse mehrerer Gebäude an einen Erzeuger wurde nach demselben Schema die Leistung berechnet. Sie ist i. d. R. kleiner als die Summe der Ausgangswerte, weil eine geringere Gleichzeitigkeit gegeben ist.

Umsetzung der Abkopplung des Südgebietes

Ein seit 2012 aktuelles Thema und Projekt ist die Abkopplung eines größeren Teils der Liegenschaft von der Nahwärme, siehe Bild 142. Diese finanziert sich alleine aus den zukünftig vermiedenen Netzverlusten.

Die gesamte Siedlung jenseits der Landstraße L625 ist über eine Nahwärmeleitung an das restliche Dorf angeschlossen. Die Idee der Abkopplung resultiert aus den Wärmeverlusten der Trasse. Bleibt der Anschluss für die Villa Luise vorerst erhalten, haben die restlichen Leitungswege einen Wärmeverlust von über 415 MWh/a (ca. 1/5 der gesamten Netzverluste in Neuerkerode). Das entspricht jährlich ca. 20.000 € vermeidbare Betriebskosten.

Die Alternativversorgung soll wie folgt aussehen: die Einfamilienhäuser am Kaiserwald erhalten je eine Gastherme.

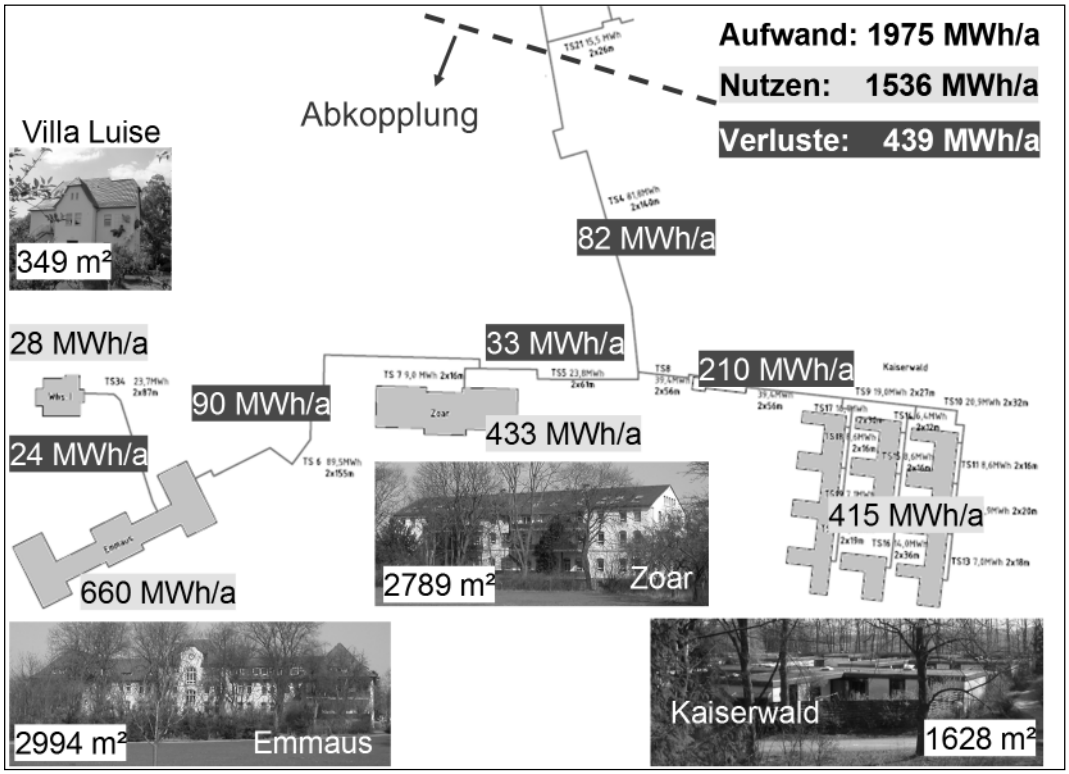


Bild 142 Abkopplung Südgebiet

Die beiden großen Pflegeheime Emmaus und Zoar werden mit je einer Gas-BHKW/Kesselzentrale versorgt (Umbaukosten ca. 300.000 €). Der Gasbedarf der beiden neuen Heizzentralen ist künftig geringer als der anteilige Gasbedarf des Kesselhauses und das bei gleichzeitiger Produktion von Strom (195 MWh/a, das ist rechnerisch 90 % des Strombedarfs der betroffenen Gebäude).

Durch die Abkopplung steigt der Biowärmeanteil im Kerndorf. Die Maßnahme wird kurzfristig empfohlen und steht zum Zeitpunkt Anfang 2016 immer noch zu Entscheidung für die Umsetzung an.

Zeitaufwand und Software

Der Zeitaufwand für das Konzept in Neuerkerode wird wie folgt geschätzt: Grunddatenaufbereitung 1,5 Wochen, Erstellung von Kostenfunktionen und Festlegung anderer Randdaten 1,5 Wochen, Variantenrechnung mit Excel und Auswertung 4 Wochen, textliche und grafische Aufbereitung 3 Wochen. Es ist anzumerken, dass die Berechnung von Modernisierungsvarianten für die mehr als 50 Einzelgebäude hierin nicht enthalten ist.

Die Auswertung erfolgte mit einer selbst programmierten Tabellenkalkulationssoftware.

5.6.3 Anlagenkonzept: Biowärmeoptimierung

Ein Anlagenkonzept (siehe Kapitel 5.2.2) ergibt sich aus der Optimierung der Biowärmeeinspeisung.

Problemlage

Die Gebäude der Evangelischen Stiftung in Neuerkerode werden von zwei verschiedenen Heizzentralen versorgt. Zum einen aus dem zentral in der Liegenschaft angeordneten Kesselhaus, welches mit herkömmlichen Gaskesselanlagen (2 x 4,6 MW) ausgestattet ist, zum anderen aus einer etwas außerhalb des Dorfes platzierten Biogasanlage (400 m Trassenlänge). Die Biogasanlage wird vorrangig zur Stromerzeugung betrieben. Die dabei anfallende Abwärme wird in das Nahwärmenetz der Evangelischen Stiftung eingekoppelt – am Ende einer der drei Versorgungstrassen.

Es steht eine Leistung von mindestens 550 kW grundsätzlich zur Verfügung, jedoch kann sie nicht genutzt werden. Die mittlere Wärmeleistung aus der Biowärme lag z.B. im Jahr 2012 bei 440 kW. Da die Biowärme sowohl kostengünstiger als auch ohnehin vorhanden ist (bei Nichtnutzung erfolgt Rückkühlung über Notkühler bzw. Abgabe an Abgas), besteht ohne Einschränkung der Wunsch der Abnahmeerhöhung.

Als wichtiger Teilaspekt des Energiekonzeptes wurde das in Neuerkerode vorhandene Nahwärmenetz aus hydraulischer Sicht untersucht. Auf Basis einer Netzberechnung wurden Optimierungsvorschläge, insbesondere für die Biowärmeeinspeisung, unterbreitet.

Die Untersuchung aller Abnehmerkreise ergibt, dass die vorhandenen Pumpen (2 parallele Doppelpumpen) zusammen ca. 50 % hinsichtlich des Volumenstroms und um den Faktor 2,8 hinsichtlich der Druckerhöhung überdimensioniert sind. Ein großes Einsparpotential resultiert aus der Anpassung der Volumenströme und Druckerhöhungen der Pumpen an das Netz. Dies ließe sich auch mit den vorhandenen Pumpen erreichen, wird jedoch nicht empfohlen. Die Biowärmeeinspeisung muss gleichzeitig mit optimiert werden, weil die Einspeisung sonst gänzlich gefährdet ist.

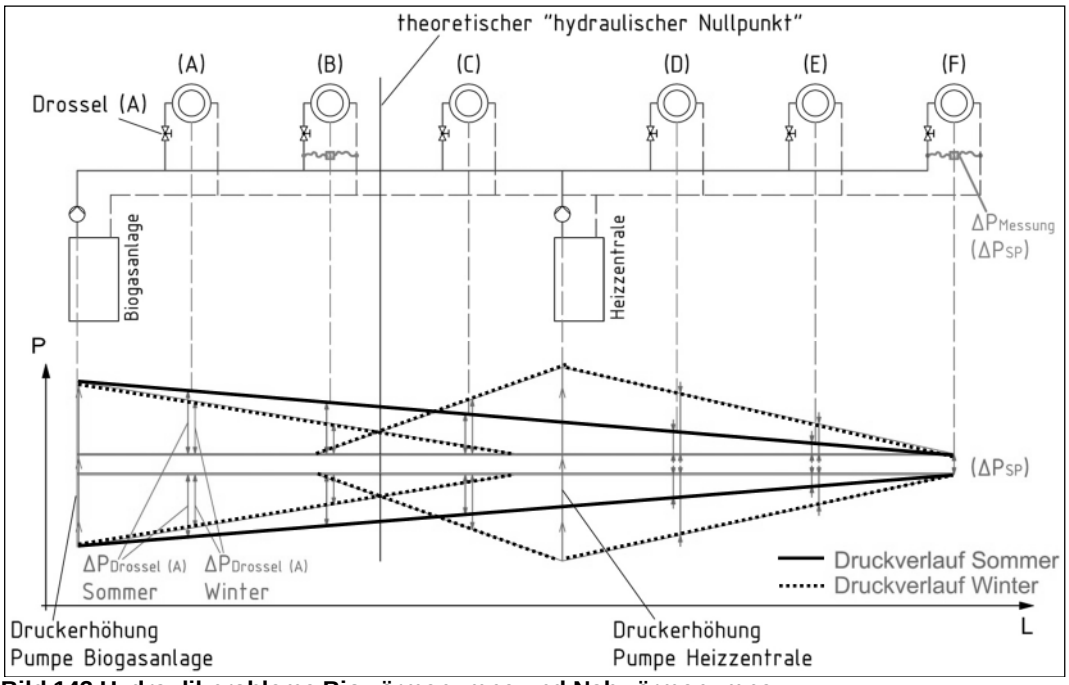


Bild 143 Hydraulikprobleme Biowärmepumpe und Nahwärmepumpe

Die Biowärmeeinspeisung ist geprägt von einer je nach Belastung "wandernden" Rückwärtsdurchströmung des Stranges "Nördlich der Wabe", d.h. genauer gesagt der Hauptversorgungsachse zwischen dem Biowärmeeinspeisepunkt am Ende der Trasse und der Nahwärmezentrale am Anfang der Trasse. Je nach Lastfall können mehr oder weniger Abnehmer rückwärtig versorgt werden, siehe beispielhafte Darstellung in Bild 143.

Die Pumpe im Biowärmekreis weist ebenfalls eine größere Druckerhöhung auf als der zu versorgende Einspeisekreis dies rechnerisch erfordert (4 statt 1 bar). Die Pumpen in der Nahwärmezentrale und der Biowärmeeinspeisung arbeiten mit etwa gleicher Druckförderhöhe gegeneinander.

Die Biowärmeeinspeisung würde zurückgehen, wenn die Biowärmepumpe schwächer als die Nahwärmepumpe ist, da die Netzteile, die derzeit verkehrt herum durchströmt werden, zwangläufig räumlich kleiner werden. Im umgekehrten Fall ist die Versorgungssicherheit des ganzen Strangs in Frage gestellt, wenn die Biowärmepumpe stärker ist als die Nahwärmepumpe. Dann steigt zwar ihr Versorgungsgebiet in räumlichen Ausmaßen, nicht aber die eingespeiste Wärmeleistung.

Konzept

Für die Liegenschaft in Neuerkerode und die dort gegebenen Energiepreise gilt: aufgrund des wesentlich günstigeren Wärmepreises für Wärmeenergie aus der Biogasanlage sollte die Biogasanlage immer die erste Priorität bei der Einspeisung besitzen und erst wenn die Leistung der Biogasanlage nicht mehr ausreicht, sollten die Gaskessel im Kesselhaus zusätzlich Wärme bereitstellen.

Im Zuge der Modernisierung der Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen (Umstellung auf 72 h-Betrieb) und der Regelungsanlagen im Kesselhaus wurde eine Doppelpumpe zurückgebaut und durch eine elektronisch geregelte Umwälzpumpe ersetzt. Die neue Pumpe wurde im optimalen Betriebspunkt deutlich kleiner bemessen. Anstelle der vorhandenen Regelung der Nahwärmepumpen (keine Kommunikation zwischen Nahwärme- und Biowärmepumpe) wurde eine neue Regelung mit Schlechtpunktregelung an mehreren möglichen Schlechtpunkten aufgebaut.

Für die vorhandenen Gas-Heizkessel ist zum Schutz vor Rauchgaskorrosion notwendig, dass die Rücklauftemperatur konstant über einem vom Hersteller festgelegten Wert gehalten wird. Im Bestand wurde die Rücklaufanhebung über ein Regelventil realisiert. Ziel der Verschaltung war, dass ein Teil des von der Nahwärmepumpe geförderten Volumenstroms direkt vom Vorlauf in den Rücklauf umgeleitet wird. Die Alternative zur im Bestand installierten Rücklaufanhebung mit einem Regelventil bietet die Rücklaufanhebung mit einer Pumpe. Vorteil dieser Schaltung ist, dass die Hauptpumpen nach Anforderung der Verbraucher geregelt werden können und die Kesselbypasspumpen nach den Anforderungen des Kessels und das System somit regelungstechnisch entflochten werden.

Ergebnisse

Die Optimierung erfolgte im Jahr 2013.

Das Gesamtpaket (Schlechtpunktregelung, Rücklauftemperaturanhebung im Kessel, neue Pumpe) führte zu Kosten von ca. 114.000 €. Der Biogasanlagenbetreiber beteiligte sich mit ca. 22.600 € an dieser Maßnahme, da er vom erhöhten Wärmeverkauf profitiert. Der Planer und der Biogasanlagenbetreiber vereinbaren mit der ESN eine Risikovereinbarung über 16.000 € im Falle des Nichterfolgs (je 50 % Risikozuschlag).

Eine separate Messung der Stromeinsparung aufgrund des Pumpentauschs gibt es nicht. Allerdings erfolgte eine rechnerische Abschätzung im Zuge der Hydraulikuntersuchungen. Es wird bei der Abschätzung davon ausgegangen, dass die Pumpenstromeinsparung insgesamt ca. 50 % beträgt.

Die Biowärmeoptimierung lässt sich messtechnisch belegen. Es ergibt sich eine Steigerung von im Mittel knapp 450 kW auf ca. 570 kW Biowärmedauerleistung, siehe Bild 144. Mit der Preisdifferenz (2013) der beiden Energieträger Biowärme vs. Erdgas gerechnet, entlastet dies die Stiftung um ca. 30.000 €/a.

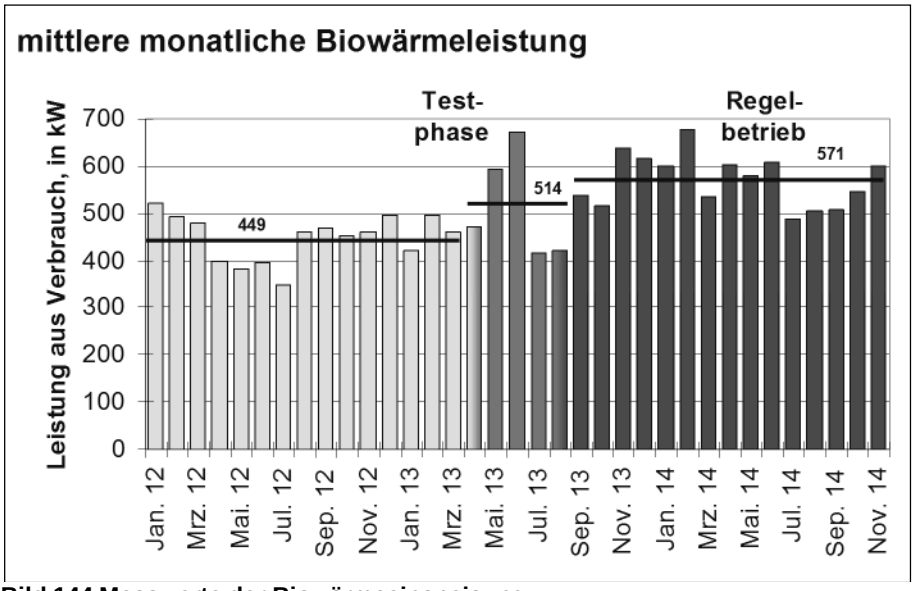


Bild 144 Messwerte der Biowärmeeinspeisung

Rein technisch war dieses Projekt sehr anspruchsvoll – weshalb es zunächst als nicht realisierbar eingestuft wurde. Es hat letztlich deutlich mehr Betreuungsaufwand bedeutet als üblich und vorher vermutet.

5.6.4 Quartiers- und Gebäudeenergiekonzept: Gebäudeentwicklung

Das Quartierskonzept widmet sich übergeordneten Belangen, z.B. der Energieversorgung (siehe Kapitel 5.2.5), während das Gebäudeenergiekonzept sich detailliert mit einer Immobilie auseinandersetzt (siehe Kapitel 5.2.4). In Neuerkerode wurde mit dem Konzept für die künftige Gebäudeentwicklung ein fließender Übergang zwischen beiden Detaillierungsgraden geschaffen.

Gewählte und notwendige Detaillierungsgrade

Gebäudeenergie- und Quartierskonzepten basieren auf einer Einschätzung und Bewertung des heutigen Energiekennwertes sowie der Bestimmung oder Festlegung künftiger Werte.

Der künftige Zustand eines Gebäudes kann nur berechnet werden (Bedarfswert). Zur Ermittlung des derzeitigen Zustands ergeben sich verschiedene Detaillierungsgrade – sortiert nach aufsteigendem Arbeitsaufwand:

1. es wird ein Jahresverbrauch zugrunde gelegt, der nicht näher aufgeschlüsselt ist; dies erfordert nur einen geringen Arbeitsaufwand, liefert aber auch kaum Erkenntnis über Schwachstellen,
2. es wird ein Verbrauchswert zugrunde gelegt, der mit Hilfe einer Energieanalyse (EAV, siehe Kapitel 4.3) aufgeschlüsselt wurde; hierbei wird auf die detaillierte Erfassung von Hüllflächen und Einzel-U-Werten verzichtet, dennoch ist eine Einzeleinschätzung über die Qualität von Gebäudehülle und Nutzung, Trinkwassererwärmung und Erzeugung gegeben,
3. es wird eine Bedarfsbilanz zugrunde gelegt (siehe Kapitel 4.6), die jedoch keinen Bezug zum realen Verbrauch aufweist; hier wird sehr viel Arbeit investiert (Aufmaß, U-Werte), wobei die Richtigkeit des Ergebnisses fragwürdig ist, insbesondere bei Rückgriff auf viele Standardwerte in der Berechnung,

4. es wird eine Bedarfsbilanz nach 3 erstellt, die anhand der Verbrauchswerte nach 1. oder 2. validiert ist (Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich), so dass eine gute Übereinstimmung zwischen rechnerischem Abbild und Realität vorliegt; hierbei ergibt sich der größte Aufwand.

Für Neuerkerode wurde der letztgenannte Weg gewählt: alle Gebäude wurden einer detaillierten Bestandserfassung (mit Hüllflächenaufmaß und U-Wert-Bestimmung) unterzogen sowie zusätzlich eine Verbrauchsauswertung und EAV erstellt und beides miteinander abgeglichen (Prinzip 4). Insbesondere, da es sich um ein gefördertes Projekt mit entsprechendem Schwerpunkt handelte wurde zunächst der höchste Detaillierungsgrad gewählt, um daraus später Erkenntnisse zur Vereinfachung zu gewinnen.

Für andere Projekte kann wie folgt empfohlen werden:

- in Quartieren ist der unter 2. beschriebene Weg ausreichend, wenn es sich um die Erstellung eines Liegenschaftskonzept mit Entscheidung über die Energieerzeugung handelt,
- für ein einzelnes Gebäude ist der unter 2. beschriebene Weg zielführend, wenn geprüft werden soll, ob überhaupt ein detailliertes Konzept erstellt werden soll bzw. noch unklar ist, ob eine Modernisierung folgen wird,
- für ein einzelnes Gebäude ist der unter 4. beschriebene Weg zielführend, wenn die Entscheidung über eine Modernisierung gefallen ist und ohnehin eine detailliertes Flächenaufmaß und Untersuchung der Bausubstanz erforderlich wird.

Einzelanalyse des Verbrauchs

Für das Gebäudekonzept sind der heutige Verbrauch und die Verbrauchskosten eine wichtige Säule. Die Zählerausstattung erlaubt in Neuerkerode eine Aussage zu Verbrauchstrends für Wasser, Strom und Wärme jedes einzelnen Gebäudes. Daraus lässt sich ein Kostentrend ableiten. Zusammengefasst sind die Daten in einem Steckbrief analog zu Bild 145.

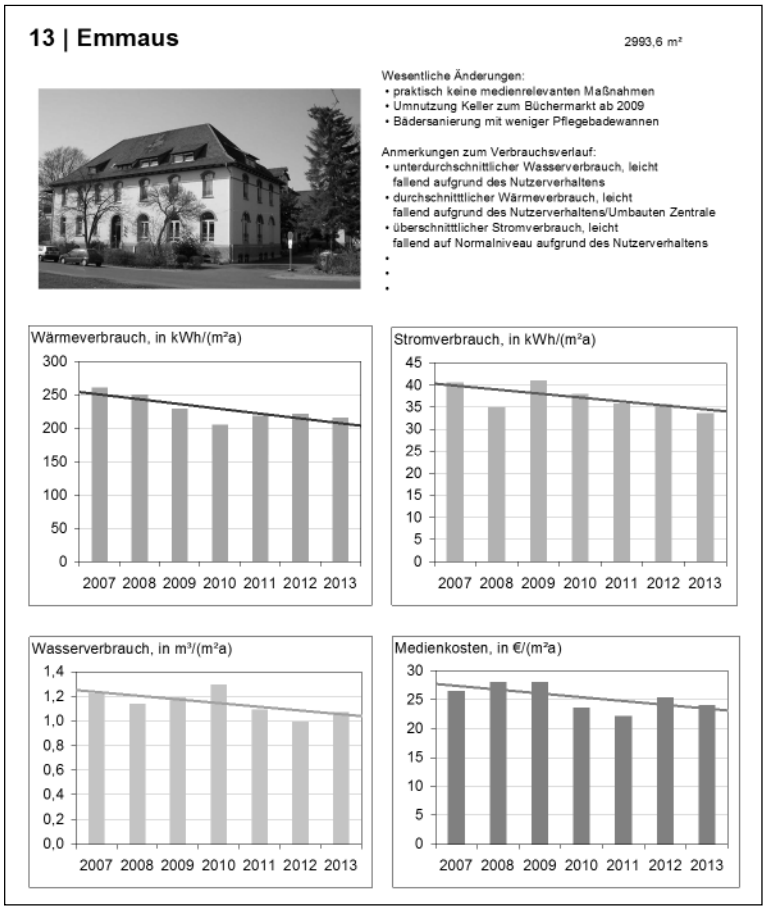


Bild 145 Verbrauchssteckbrief 2013 für das Gebäude "Emmaus"

Einzelanalyse des Bedarfs

Die Bestandsgebäude wurden im Grundlagenprojekt parallel zur Verbrauchsmessung auch rechnerisch bewertet. Detaillierte theoretische Bedarfsrechnungen schlüsseln die Energie- und Wassermengen feiner auf, wie in Bild 146 bis Bild 148 gezeigt. Dargestellt sind typische Mittelwerte der Zusammensetzung von Wärme, Strom und Wasser für Pflegegebäude.

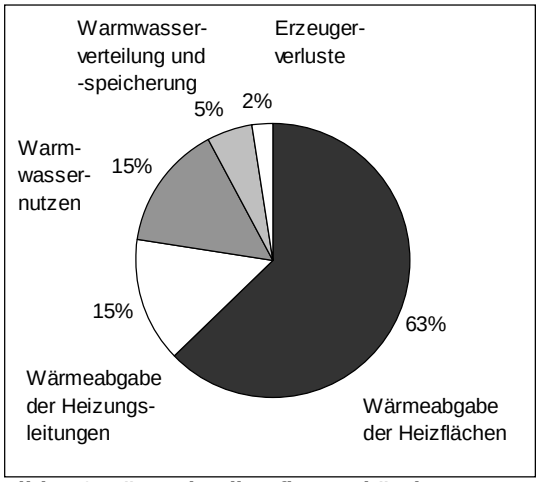


Bild 146 Wärmedetails Pflegegebäude

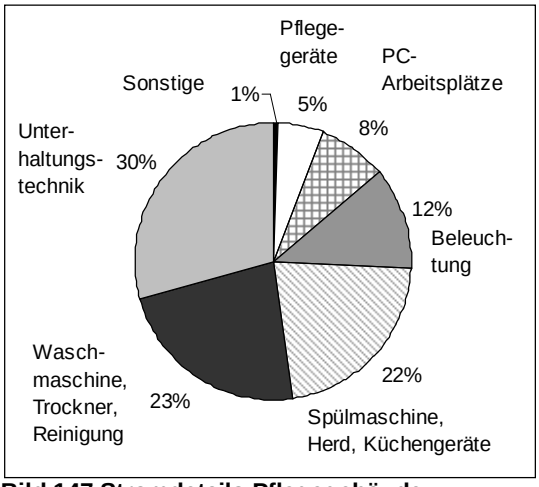


Bild 147 Stromdetails Pflegegebäude

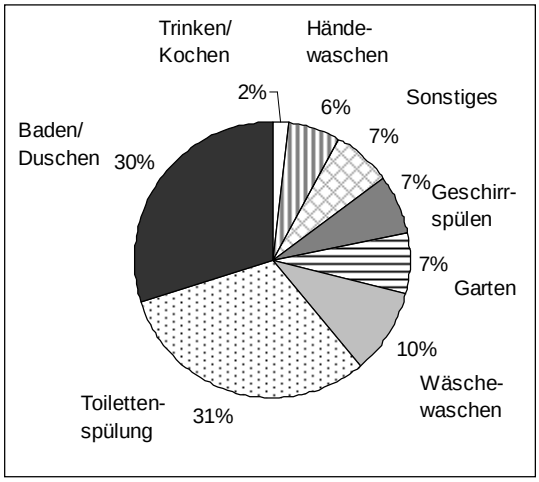


Bild 148 Wasserdetails Pflegegebäude

Generell stand das Ziel, einen hochwertigen Zustand zu erreichen, für die Stiftung im Vordergrund. Auf Basis des Energiebedarfs des Bestandes wurden daher drei Maßnahmenpakete für Gebäude erarbeitet:

- eine Verbesserung etwa auf das Niveau der EnEV 2007,
- eine Modernisierung mit Passivhauskomponenten,
- eine hochwertige Verbesserung als Standard dazwischen, meist ohne Bodenplattendämmung und ohne mechanische Lüftung.

Für jedes Gebäude ergibt sich einer der drei Standards (oder der Bestandszustand) als künftige Prognose.

Pro Gebäude sind die Ergebnisse der Vor-Ort-Bestandserfassung, Energiebilanzierung, Verbrauchsauswertung, Investitionskostenschätzung energierelevanter Investitionen und Wirtschaftlichkeitsbewertung in Gebäudeeinzelberichten (ca. 30 Seiten) und einem Gebäudesteckbrief (ca. 2 Seiten) zusammengefasst (beispielhafter Steckbrief siehe Kapitel 4.1.4).

Energetischer Gebäudezustand im Überblick

Die Daten der Einzelgebäudeuntersuchung wurden systematisiert, Summen- und Mittelwerte gebildet. Die Erkenntnisse wurden zur Weiterverwendung in Excel-Tabellen archiviert und zur Visualisierung für den Auftraggeber in Liegenschaftskarten eingetragen, siehe Bild 149 (wobei das Original farbig gestaffelt ist).

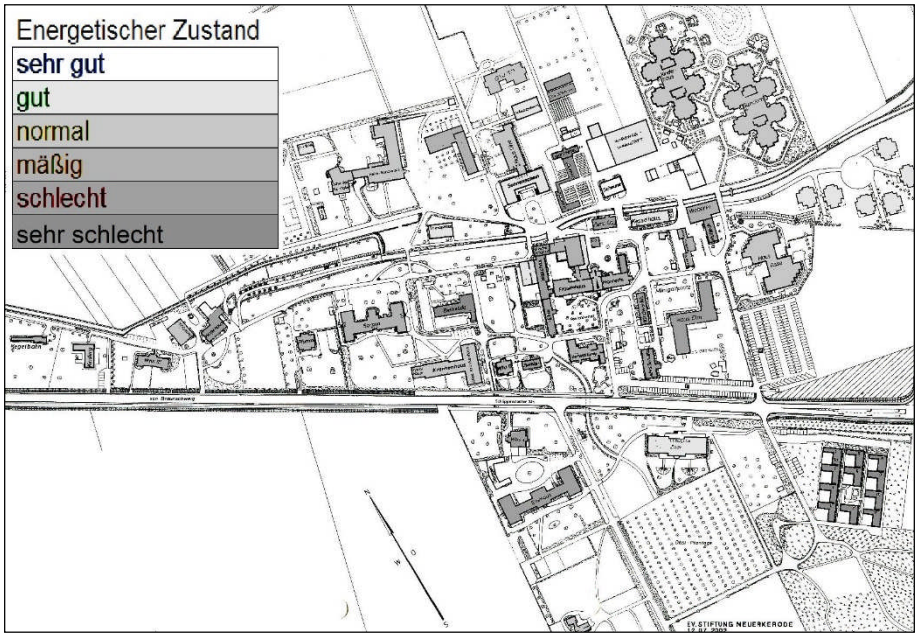


Bild 149 Energetischer Zustand der Liegenschaft 2008

Die Einstufung des energetischen Gebäudezustandes ergab im Mittel für alle Gebäude die Schulnote 3,6 (Stand 2008).

Allgemeiner Gebäudezustand im Überblick

Der Zustand der Gebäude und Anlagen war vor der Bestandsaufnahme nur unzureichend schriftlich dokumentiert, obwohl das vorhandene Wissen personengebunden v. a. bei den Handwerkern sehr hoch war und ist. Investitionsmittel und Instandhaltungsbedarf lassen sich auf dieser Basis nur ungenügend abschätzen.

Antrieb für alle Bemühungen der Systematisierung war somit die Kostenschätzung für die mögliche Gebäudeverbesserung bzw. den langfristigen Erhalt der Immobilien als Anlagegüter.

2012/13 wurde der Instandhaltungs- und Modernisierungsbedarf jenseits energetisch relevanter Fragestellungen noch einmal detaillierter untersucht. In Themengruppen wurden ca. 80 Einzelfragen besprochen und anschließend ausgewertet:

- Außenanlagen,
- Wände, Decken und Böden,
- Bäder und Küchen,
- Sanitärtechnik,
- Heizflächen, Netze, Lüftung,
- Elektroinstallation, Beleuchtung,
- TV- und Telefonanlagen,
- Gesetzliche Anforderungen.

Zu jedem Termin wurde eine Anzahl von Mitarbeitern der Stiftung themenspezifisch ausgesucht. Die beteiligen Handwerker haben das notwendige fachliche Wissen, sind ständig vor Ort und haben deshalb eine sehr gute Kenntnis über die Ausstattung und die Nutzerzufriedenheit.

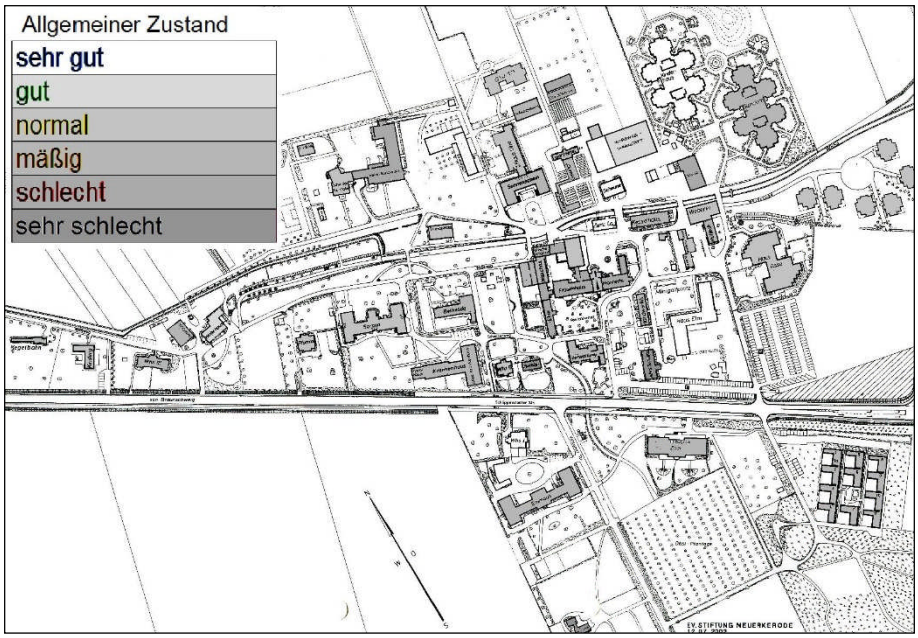


Bild 150 Allgemeiner Zustand der Liegenschaft 2013

Die Einstufung des allgemeinen Gebäudezustandes ergibt im Mittel für alle Gebäude die Schulnote 2,7. Siehe Bild 150.

Investitionskosten

Die Bewertung des Gebäudezustandes mündet in einer Investitionskostenschätzung für Instandhaltung und Modernisierung. Je schlechter ein Gebäude abschneidet, desto mehr Geld muss aufgewendet werden, um einen neuwertigen Zustand wieder herzustellen. Die grafische Aufbereitung der Ergebnisse zeigt Bild 151.

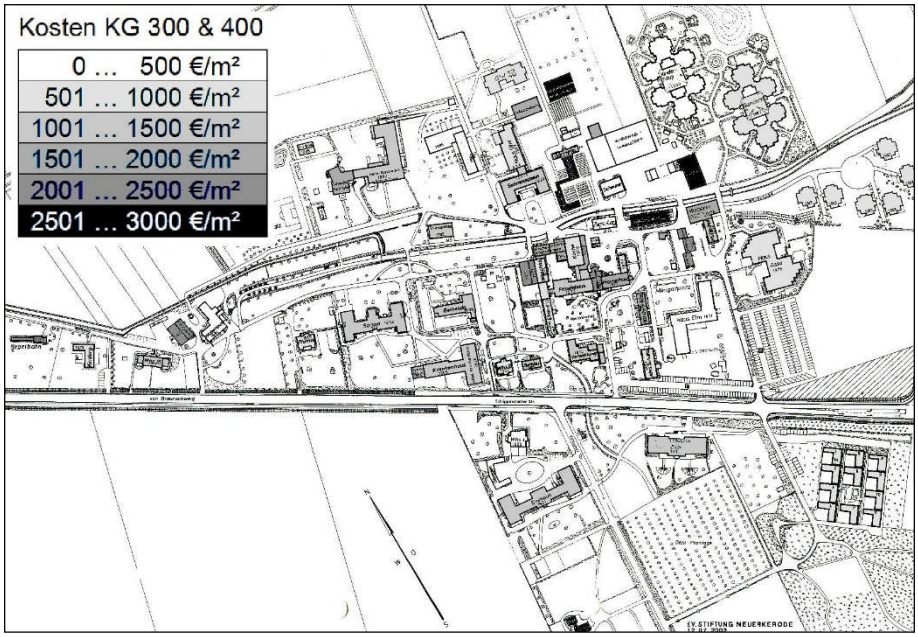


Bild 151 Investitionskostenprognose

Für die Modernisierung wurden (Stand 2013) ca. 52 Mio. € Gesamtbedarf abgeschätzt, d.h. ca. 1100 €/m² - bezogen auf die Bestandsgebäude. Diese Summe ergibt sich für die Kostengruppen 300 und 400. Der energetisch bedingte Anteil beträgt ca. 30 … 40%.

Die Übersetzung von Gebäudezustand in Investitionskosten basiert auf der Logik: je schlechter der Ausgangszustand, desto höher die Kosten. Es kommt die Kostendatenbank für Modernisierungen des BKI (Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern) zum Einsatz, siehe Tabelle 170. Aufgrund der Mischnutzung der meisten Gebäude erfolgte eine Flächengewichtung der Kennwerte.

Werte in €/m² BGF	KG	von	bis
Apartment/Miete/Betreuen			
Abwasser, Wasser, Gas	410	36	69
Wärmeversorgung	420	34	77
Lufttechnische Anlagen	430	4	49
Starkstromanlagen	440	27	77
Fernmelde- und Informationstechnische Anlagen	450	4	9
Bauwerk/-konstruktion	300	395	624
Büro			
Abwasser, Wasser, Gas	410	16	41
Wärmeversorgung	420	28	151
Lufttechnische Anlagen	430	2	17
Starkstromanlagen	440	41	210
Fernmelde- und Informationstechnische Anlagen	450	8	62
Bauwerk/-konstruktion	300	329	923
Produktion/Lager			
Abwasser, Wasser, Gas	410	26	119
Wärmeversorgung	420	31	102
Lufttechnische Anlagen	430	49	318
Starkstromanlagen	440	111	228
Fernmelde- und Informationstechnische Anlagen	450	10	71
Bauwerk/-konstruktion	300	809	1800
Schulen/Kindergärten			
Abwasser, Wasser, Gas	410	31	79
Wärmeversorgung	420	37	60
Lufttechnische Anlagen	430	4	55
Starkstromanlagen	440	49	96
Fernmelde- und Informationstechnische Anlagen	450	8	37
Bauwerk/-konstruktion	300	366	809

Tabelle 170 Kostenkennwerte BKI

Zur Auswahl eines Wertes innerhalb der angegebenen Preisspanne werden die zuvor ermittelten Schulnoten aus der Handwerkerbefragung verwendet. Die Note der Kategorie Heizung/Lüftung der Gebäudebewertung beeinflusst dadurch beispielsweise die Kosten für Wärmeversorgungsanlagen. Hat ein Gebäude in dieser Rubrik die Schulnote 6 erhalten, wird der maximale Satz angesetzt, bei einer 2 der geringste.

Instandhaltungskosten

Auf Basis realer Abrechnungen der Bauunterhaltungskosten (5 Jahre) in Neuerkerode wurden Instandhaltungskosten ermittelt, siehe Tabelle 171.

Werte in €/(m²a) NGF	Baujahr bis 1950	1950...Ende 70er	ab 1980er	modernisiert
Pflege, Förderung	25	25...30	15	10
Wohnen	20	20	-	-
Büro und ähnliche	20	15...20	15	10
Werkstätten	15	20	10...15	-
Verkauf, Gärtnerei	-	20	20	-
Wäscherei, Küche, Kesselhaus	-	20	-	-
Kirche, Kapelle	25	25	-	-

Tabelle 171 Instandhaltungskostenansätze

Erkennbare Tendenz: der Kostenaufwand ist erhöht für die Gebäude mit Pflegenutzung (im Vergleich zu anderen Nutzungen) sowie für Bauten der 1970er Jahre (im Vergleich zu anderen Jahrzehnten).

Nutzungskostenbewertung, Nutzwertanalyse und Prioritätenliste

Mit den Nutzungskosten können Gebäude bewertet werden. Es wird die Differenz der Einnahmen und Ausgaben gebildet:

- Einnahmen für die Bereitstellung von Pflege- und Tagesförderungsplätzen,
- Ausgaben für den Medienverbrauch und für Wartung und Instandhaltung,
- Ausgaben für Kapitalkosten künftig erwarteter Modernisierung aufgrund der Zustandsbewertung,
- Ausgaben für kalkulatorische Abschreibung der Buchwerte zurückliegender Investitionen.

Die Gebäude mit den geringsten Überschüssen sind prädestiniert für die nähere Untersuchung, z.B. hinsichtlich einer Modernisierung oder eines Abrisses.

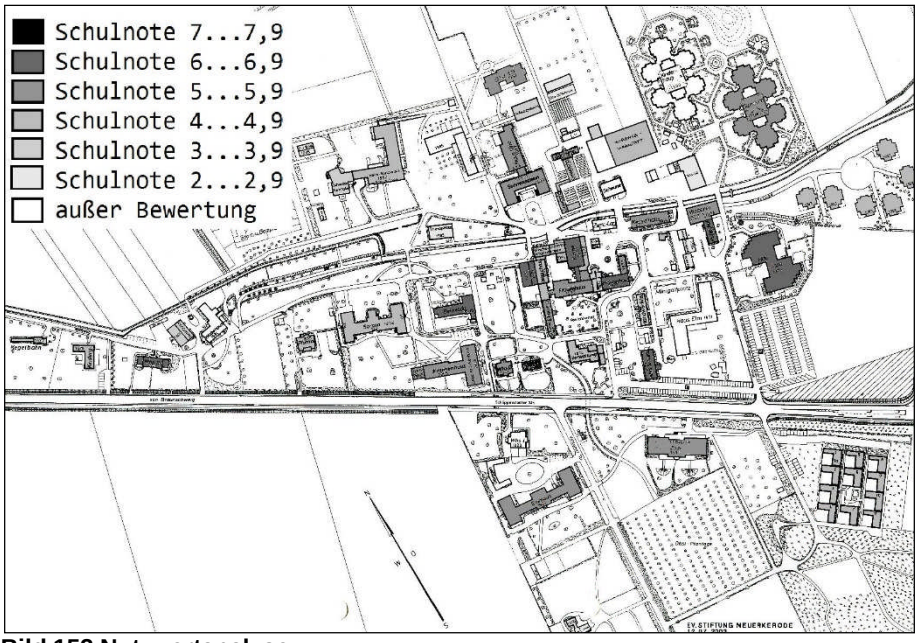


Bild 152 Nutzwertanalyse

Auf Basis der je Gebäude vorhandenen Grunddaten wurde zusätzlich eine Nutzwertanalyse erstellt (siehe Kapitel 5.5). Anhand einer Punktbewertung lassen sich Gebäude identifizieren, bei denen eine Detailanalyse in Vorbereitung auf Modernisierung, Umnutzung oder Abriss sinnvoll erscheint. Das Ergebnis zeigt Bild 152.

Eine große Zahl (maximal 10) spricht für, eine kleine (minimal 0) gegen eine Modernisierung bzw. Abriss. Für die Auswertung wurden die gleichen Grunddaten verwendet wie bei der Nutzungskostenbewertung, sie wurden jedoch anders gewichtet.

Den größten Einfluss mit 30 % haben die Medienkosten, gefolgt von 25 % Einfluss für Investitionskosten. Die Restnutzungsdauer wird durchschnittlich bewertet (20%), Einnahmen (15 %) und Instandhaltungskosten (10 %) unterdurchschnittlich.

Die Prioritätenliste ist ein Planungs- und Arbeitsinstrument, das fortgeschrieben wird. Ihr Ziel ist, Gebäude zu identifizieren, die in Hinblick auf Modernisierung oder Abriss in den nächsten 5 Jahren näher untersucht werden. Derzeit stehen 9 Gebäude für Neuerkerode auf dieser Liste, weil sie geringe Überschüsse bei den Nutzugskosten aufweisen bzw. weil sie eine schlechte Schulnote in der Nutzwertanalyse erhalten haben.

Zeitaufwand und Software

Der Zeitaufwand für die Gebäudeanalyse muss zweigeteilt angegeben werden. Zum einen sind die Modernisierungskonzepte der Einzelgebäude zu erstellen, zum anderen die Prioritätenliste.

Die Erstellung der Einzelgebäudekonzepte erforderte einen Aufwand von durchschnittlich ca. 5 … 10 Tagen je Objekt. Dieser Zeitaufwand umfasst:

- Gebäudebegehung, Fotodokumentation,
- Gespräche zur Einschätzung der Nutzung,
- Aufmaß geometrischer Daten aus Plänen,
- detaillierte Analyse der Verbrauchswerte jedes Gebäudes (EAV),
- Bedarfsenergiebilanzierung für Wärme und Strom für das Bestandsgebäude unter Verwendung freier Randdaten mit Excel-Programmen des Instituts Wohnen und Umwelt, d.h. dem IWU-Energieberatungstool für die Wärme, dem LEE für Strom und dem LEG zur Wirtschaftlichkeitsbewertung (siehe Kapitel 2.6),
- Untersuchung von Modernisierungsmaßnahmen an der Hülle und den technischen Anlagen im Gebäude (unter grundsätzlicher Beibehaltung der vorhandenen Energieversorgung) mit Neuberechnung des Wärmebedarfs,
- Untersuchungen von Modernisierungsmaßnahmen für die Stromverbraucher (unter grundsätzlicher Beibehaltung der vorhandenen Ausstattung) mit Neuberechnung des Strombedarfs.

Durch Einsatz ausschließlich der EAV anstelle der Bedarfsenergiebilanzierung wird etwa eine Halbierung des Zeitaufwandes für jedes Objekt abgeschätzt.

Die Erstellung der Prioritätenliste ist eine systematische Zusammenfügung von vorhandenen Daten (Verbräuche, Erträge, Instandhaltungs- und Modernisierungsbedarf, Kosten). Der Arbeitsaufwand kann für eine Liegenschaft in der Größe von Neuerkerode auf ca. 6 Arbeitswochen beziffert werden – vorausgesetzt die Rohdaten sind vorhanden und die Auswertesystematik ist in etwa bekannt.

Die Arbeiten umfassen:

- systematische Aufbereitung der vorhandenen Medienverbräuche der Gebäude,
- systematische Aufbereitung der Kosten für Instandhaltung und Modernisierung,
- systematische Aufbereitung von Restnutzungsdauern und Buchwerten,
- systematische Aufbereitung von Erträgen,
- Erstellung einer geschlossenen Excelprogrammierung mit Filter- und Sortierfunktionen sowie Nutzwertanalyse und Nutzungskostenberechnung,
- textliche Auswertung,
- grafische Auswertung.

Die zusammenfassende Auswertung aller Gebäude der Liegenschaft erfolgte mit einer selbst programmierten Tabellenkalkulationssoftware.

5.6.5 Gebäudekonzept: Pflegeheim mit Passivhauskomponenten

Das Pflegeheim Elm wurde 1971 errichtet und hatte bis zu seiner Modernisierung mit Anbau im Jahr 2008 keine wesentlichen Änderungen erfahren. Vor der Ausführung der Maßnahmen wurde ein Gebäudeenergiekonzept erstellt (siehe Kapitel 5.2.4).

Die Zahl betreuter Personen mit schweren körperlichen und/oder geistigen Behinderungen stieg durch den Anbau und die Umgruppierung der Räume von 24 auf 29. Die beheizte Fläche lag vorher bei 963 m², nach der Umsetzung der Maßnahme bei 1181 m².

Die Windfangsituation der Eingänge wurde behindertengerecht umgestaltet und eingeschossig aus dem Baukörper herausgezogen; die vorgelagerte Wegesituation durch rollstuhlgerechte Rampen verbessert. Der Teilkeller ist durch einen Kleingüteraufzug erschlossen. Es sind Apartments südlich an das Gebäude angebaut worden. Im Gebäudeinneren wurden Zimmergrößen geändert und Sanitärräume verlegt bzw. umgebaut. Insgesamt ist die Situation der sanitären Ausstattung wesentlich verbessert worden.

Die Modernisierung erfolgte ambitioniert mit Passivhauskomponenten. Die Außenwände wurden gedämmt und neue Fenster bzw. Fenstertüren eingesetzt. Es sind außenliegende verschiebbare Verschattungselemente vorgesetzt (nicht nach Norden). Die Räumlichkeiten im Dach werden für die Rohrführung der Lüftung, Heizung und Trinkwasserleitungen teilweise genutzt. Die oberste Geschossdecke wurde gedämmt. Der Dachboden wird bis auf eine kleine Fläche, die als Kofferboden dient, nicht mehr als Abstellfläche genutzt (Brandschutz, Statik). Die Gebäudehülle erreichte insgesamt einen sehr guten Standard – mit Ausnahme der Bodenplatte. Die Verbesserung war sehr kostenintensiv und verfehlte deutlich die anvisierten Qualitäten. Sie wird künftig für vergleichbare Gebäude nur in Ausnahmefällen ungesetzt. Ebenfalls schwierig im Zusammenhang mit der Nutzung ist die Ausbildung eines Windfangs mit automatischen Türschleusen, von welchen künftig abgesehen wird.

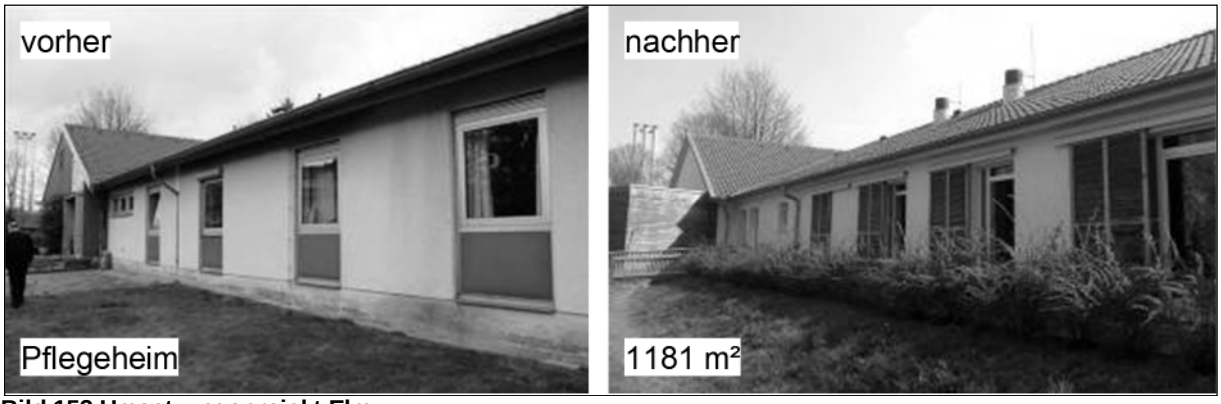


Bild 153 Umsetzungsprojekt Elm

Die prinzipielle Wärmeversorgung ist erhalten geblieben: mit Heizkörpern und Nahwärmeanschluss. Die Heizkreise sind mit einer witterungsgeführten Regelung ausgestattet. Die einzelnen Räume weisen eine Einzelraumregelung mit Fensterkontakten auf. Neu ist eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Ebenfalls wurde in allen gemeinschaftlich genutzten Räumen sowie den Fluren die Beleuchtung geändert. Die erreichte Beleuchtungsstärke ist höher, die Beleuchtungstechnik effizienter. Es wurden zwei Lüftungsgeräte aufgestellt. Die Lüftungsanlage wurde nach anfänglichen Schwierigkeiten mit der Technik gut akzeptiert. Bei Intensivpflegenutzung sollte über Lüftung nachgedacht werden, aber nur mit Mitarbeiterschulung!

Ergebnisse

Die begleitenden Verbrauchsanalysen zeigten, dass der Energiekennwert für Wärme sich mehr als halbiert hat, jedoch der Stromkennwert 14 % höher als vorher liegt.

- Wärme: 350 → 150 kWh/(m²a)
- Strom: 43 → 49 kWh/(m²a)

Die Mitarbeiter räumen aber auch 2 … 3 Jahre nach Inbetriebnahme ein, dass wenige Kenntnisse über die Anforderungen und Nutzung von Passivhäusern vorliegen. Eine groß angelegte Nutzerschulung fand bei der Übergabe des Hauses nicht statt, so dass z.B. die Mitarbeiter auf Fehlermeldungen nicht angemessen reagieren können oder etwaiges Fehlverhalten nicht wahrgenommen wird.

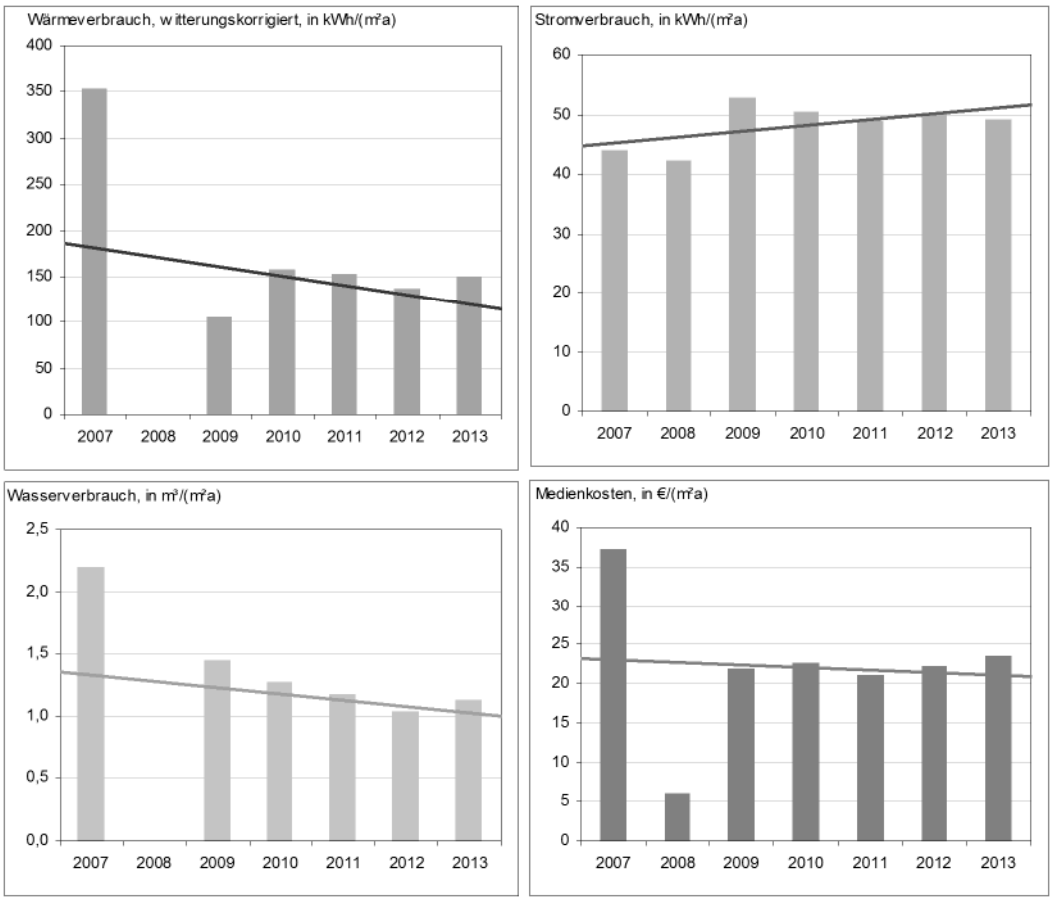


Bild 154 Verbrauchstrends Elm

Das Instrument der Energieanalyse aus dem Verbrauch liefert wichtige Erkenntnisse zum Betriebsverhalten. Bild siehe Kapitel 4.3.4. Insbesondere die höheren Raumtemperaturen (ca. 23 … 24°C) waren vorher nicht absehbar. Es muss also nicht nur eine baubegleitende Qualitätssicherung geben, sondern auch eine Begleitung der Inbetriebnahme und der ersten Monate oder Jahre der Nutzung.

Das Gesamtprojekt incl. Anbau weist Kosten von 2.160.215 € auf. Das sind 1830 €/m² bezogen auf die Gesamtfläche nach Modernisierung. Der energetische Anteil an den Kosten fiel mit nur knapp 41 % geringer aus als vorher vermutet. Eine Gesamtwirtschaftlichkeit mit Refinanzierung der Gesamtkosten aus den vermiedenen Energie- und Wartungs- sowie Unterhaltskosten für den Bestandsteil des Gebäudes ist nicht gegeben. Die Modernisierungs- und Umbaumaßnahme ist nur wirtschaftlich, wenn allein die energetisch bedingten Investitionskosten in Ansatz gebracht werden. Die Maßnahme ist bei steigenden Energiepreisen (ca. 7 %/a) wirtschaftlich.

Die Kosten des Bauvorhabens entsprechen in weiten Teilen Literaturwerten – sofern man von zwei Punkten absieht: der Sonderausstattung, welche die Nutzung als Behindertenpflegeheim mit sich bringt und der Kosten für Architekten, Planer, Projektsteuerer und externe Qualitätssicherung. Die Kostengruppe 700 (Planer) belief sich auf ca. 20 % der Gesamtkosten. Die Stiftung gewann die Erkenntnis, dass künftig das eigene Planungsteam verstärkt wird.

5.6.6 Gebäudekonzept: Künstlervilla

Ein Gebäudekonzept (siehe Kapitel 5.2.4) mit Berücksichtigung von Umnutzung und Veränderung der Nutzflächen erfolgte für eine Villa.

Die Sanierung der "Villa Luise", vormals "Wohnhaus I", ist eine Erneuerung des fast 100 Jahre alten Baukörpers auf Niedrigenergiehausniveau. Die Sanierung wurde notwendig, da sowohl die Bausubstanz, als auch die technischen Anlagen des Gebäudes baufällig waren.

Im Zuge der Modernisierungsmaßnahmen wurde das Wohnhaus in eine Kunstwerkstätte mit Galerie umgebaut. Sie gibt täglich ca. 20 Bewohnern Neuerkerodes die Möglichkeit, sich künstlerisch zu betätigen. Die Nutzfläche wurde deutlich verringert. Anstatt drei Geschossen werden nur noch zwei Geschosse beheizt. Die beheizte Fläche beträgt 349 m².

Bild 155 Umsetzungsprojekt Wohnhaus I bzw. Villa Luise

Die im Jahr 2009 durchgeführte Modernisierung beinhaltet eine Wärmedämmung aller wärmeübertragenden Umfassungsflächen (oberste Geschossdecke, Außenwände, Kellerdecke) und den Einbau neuer hochwertiger Fenster mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung. Die wärmetechnische Modernisierung der Hülle ist in ihrer Gesamtheit gut gelungen. Hervorzuheben sind die oberste Geschossdecke und die Fenster mit sehr guten Qualitäten.

Bei Außenwänden und Kellerdecke hätte die Dämmung jedoch besser sein können, ohne dass hohe Mehrkosten entstanden wären.

Problemfall: Umnutzung

Die wichtigste Erkenntnis des Monitorings betrifft den ca. 60 m langen neuen Nahwärmeanschluss an das Nachbargebäude.

Zum Zeitpunkt der Gebäudekonzepterstellung wurde von einer Wohnnutzung mit Trinkwarmwasserbereitung auf 3 Etagen ausgegangen (gleiche Nutzung wie vorher). Ein Anschluss an die vorhandene Nahwärme war unter diesen Randdaten wahrscheinlich sinnvoll.

Aufgrund von brandschutztechnischen Auflagen ergab sich schließlich eine tatsächlich realisierte Nichtwohnnutzung auf nur 2 Etagen. Zwei elektrische Durchlaufwasserheizer erzeugen Trinkwarmwasser in den einzelnen Etagen. Dennoch wird das Gebäude über einen neu verlegten Nahwärmeanschluss vom Nachbargebäude aus versorgt (59 m Anschlusstrasse) – seine Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit ist mit der derzeitigen Nutzung nicht mehr gegeben.

Unter den veränderten Randdaten – deutlich geringerer Wärmeabnahme – wäre ein dezentraler Erzeuger deutlich wirtschaftlicher gewesen. Es ergeben sich ein Verteilungsnutzungsgrad (für die Anschlussstrecke) von knapp unter 60 % und die Erkenntnis, dass Nutzungs- und Versorgungskonzept untrennbar aneinander gekoppelt sind.

Ergebnisse

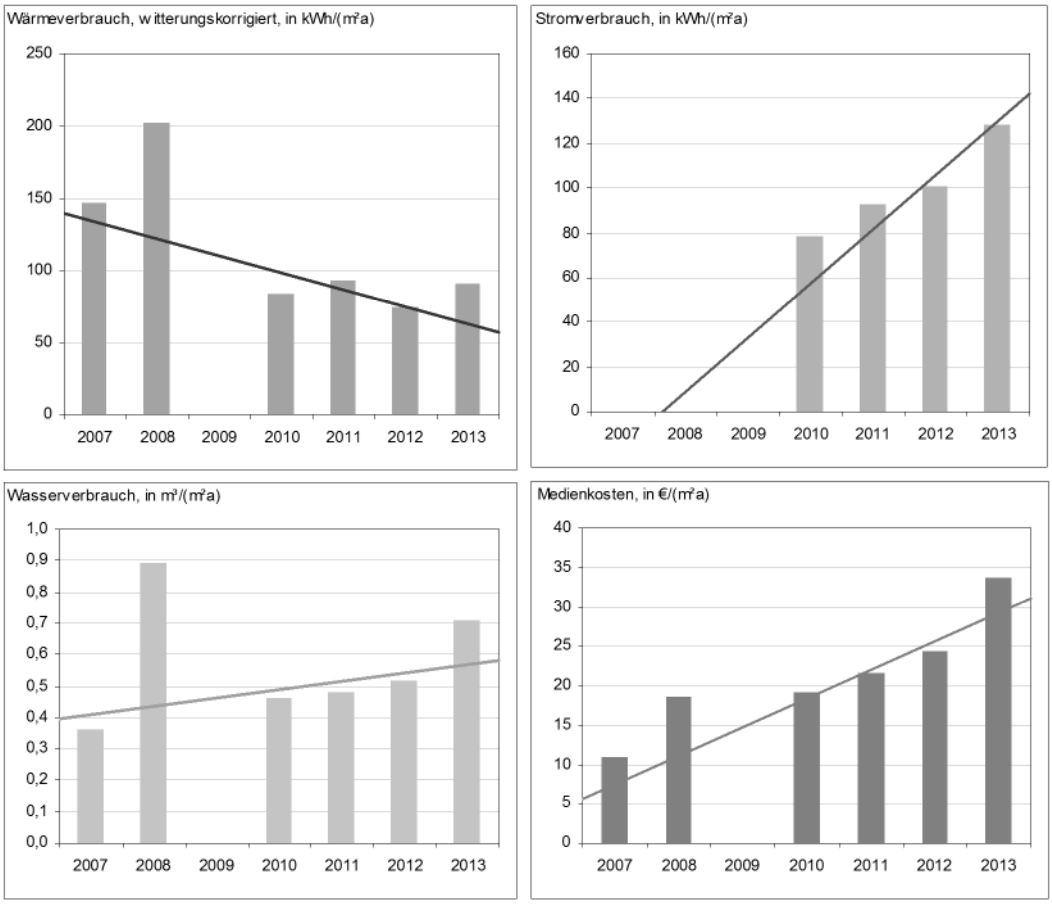


Bild 156 Verbrauchstrends Wohnhaus I bzw. Villa Luise

Es wurde aus Wärmeverbrauchssicht ein Niedrigenergiehausstandard erreicht. Der absolute Wärmeverbrauch des Gebäudes hat sich auf etwa 30 % des früheren Wertes vermindert, der flächenbezogene auf 48 %. Jedoch ist zu beachten: zu dem Wärmeverbrauch nach Bild 156 kommen weitere ca. 65 kWh/(m²a) nur für die Anschlussleitung außerhalb des Gebäudes!

Der Stromverbrauch ist sehr hoch, u. a. wegen einer elektrisch mitbeheizen Garage. Aber auch die mit Zeitschaltung versehenen Beleuchtungen weisen sehr lange Laufzeiten auf. Hier sind noch Einsparbemühungen und Änderungen des Nutzerverhaltens in Zukunft angebracht. Eine Verminderung auf 40 … 50 kWh/(m²a) wäre wünschenswert.

Das Gesamtprojekt weist Kosten von 823.006 € auf. Das entspricht 2.357 €/m². Die Kosten des Bauvorhabens entsprechen in weiten Teilen Literaturwerten. Der Anteil von 22 % für Planungs- und Projektleitungskosten marginal darunter. Über die Wirtschaftlichkeit der Gesamtmaßnahme kann keine Aussage getroffen werden. Das Gebäude wurde vorher praktisch nicht mehr genutzt und hat eine komplette Nutzungsänderung erfahren.

5.6.7 Gebäudekonzept: Wohnheim mit Solarthermie

Das Pflegeheim "Wabehaus" mit 746 m² beheizter Fläche wurde in den Jahren 2010/11 auf ein dem Neubau entsprechendes energetisches Niveau gebracht. Die Anzahl der Wohnplätze wurde von 26 auf 20 reduziert. Ein Gebäudeenergiekonzept (siehe Kapitel 5.2.4) lag vor Beginn der Maßnahmen vor.

Die Verbesserung betraf vor allem die äußere Gebäudehülle des um 1900 errichteten Fachwerkhauses. Es wurde eine Außenwandbekleidung mit Holz vorgenommen, welche im Rahmen des Dorferneuerungsprogramms teilfinanziert wurde. Die Außenwände und Fenster wurden energetisch hochwertig ausgeführt.

Ein an das Hauptgebäude angeschlossener Wirtschaftstrakt wurde abgerissen. Es erfolgt der Anbau einer Stahltreppe als zweiter Flucht- und Rettungsweg sowie einer Brandmeldeanlage. Auch die Blitzschutz-, Telefon- und Datenleitungen wurden erneuert.

Das Heizungs- und Trinkwarmwassernetz wurde – bis auf wenige Änderungen – unverändert erhalten. Der Nahwärmeanschluss wurde erneuert. Eine solarthermische Anlage zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung wurde zusätzlich eingebaut.

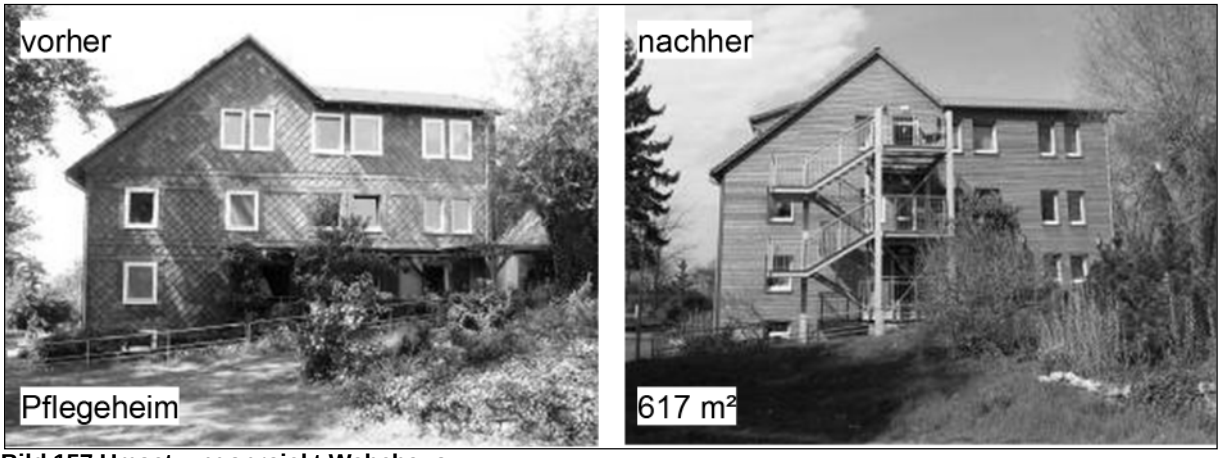


Bild 157 Umsetzungsprojekt Wabehaus

Ergebnisse

Hinsichtlich der Wärmekennwerte und der Wärmekosten hat sich die Modernisierung des Gebäudes deutlich bemerkbar gemacht. Während das Gebäude 2010 noch ca. 30 % über dem Durchschnittskennwert der Liegenschaft lag, ist der Wärmeverbrauch 2012 etwa 30 % geringer als der Durchschnitt. Die Umsetzung der Maßnahmen erfolgte weitgehend nach der Leitlinie "Modernisierung auf heutiges Neubauniveau" – welches auch in etwa erreicht wurde.

Bei den Stromkennwerten wirkt neben der Modernisierung des Gebäudes vor allem die geringere Personenbelegung. Während das Gebäude 2010 etwa 5 % unter dem Durchschnittskennwert der Liegenschaft lag, ist der Stromverbrauch 2012 etwa 25 % geringer als der Durchschnitt.

Das Gesamtprojekt weist Kosten von 937.003 € auf, das sind 1.256 €/m². Die Kosten des Bauvorhabens entsprechen in weiten Teilen Literaturwerten. Die Herstellung der Holzfassade (mit 267 €/m^2_{Wand}) nach Auflagen des Dorferneuerungsprogramms sticht aber weit heraus. Die energetischen Kosten von 368 €/m² (30 % der Gesamtkosten) sind knapp aus den Energieeinsparungen refinanzierbar.

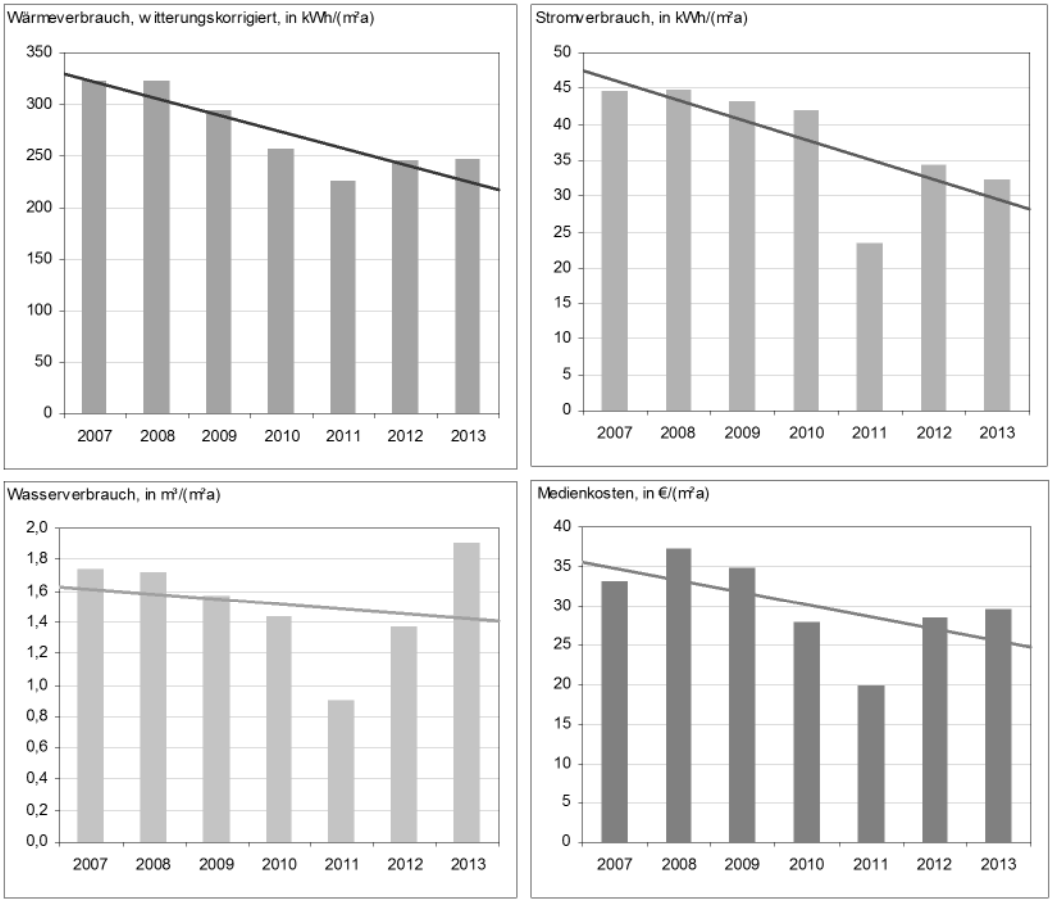


Bild 158 Verbrauchstrends Wabehaus

Problemfall Teilsanierung

Der Teilerhalt der Anlagentechnik war einerseits kostengünstiger, andererseits ergaben sich daraus auch negative Konsequenzen. Es ist keine "wartungs- oder instandsetzungsarme Phase" feststellbar. Kurz nach Wiederaufnahme der Nutzung setzt bereits die reguläre Instandhaltung mit z.B. Heizkörpertausch etc. wieder ein.

Die Komplett- ist der Teilmodernisierung vorzuziehen und grundsätzlich zu prüfen, weil der nächste Sanierungszyklus dann planbarer ist. Außerdem sind Streitigkeiten über die Abgrenzung von Planungsleistungen – hier der hydraulische Abgleich der Heizungsanlage – so vermeidbar.

Solarthermie im Pflegeheim

In dem Gebäude wurde im Zuge der Gebäudemodernisierung eine Solarthermieanlage (Kollektorfläche 20,6 m²) installiert. Der Pufferspeicheranschluss ermöglicht Heizungsunterstützung, die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt über eine Frischwasserstation. Die Anlage wird mit einer übergeordneten Regelung betrieben.

Die Entscheidung eine Solarthermieanlage zu installieren, kann wie folgt begründet werden: das Gebäude liegt an der Peripherie der Liegenschaft und ist damit potentieller Kandidat für eine Abkopplung von der Nahwärme (siehe Kapitel 5.6.2). Allerdings wurde von den Erstellern des Energiekonzeptes in diesem Zusammenhang die Installation eines Holzkessels empfohlen. Eine explizite Empfehlung pro oder contra Solarthermie wurde nicht ausgesprochen. Die überschlägige Bemessung einer Solarthermieanlage für die Trinkwasserbereitung erfolgte im Rahmen von Voruntersuchungen. Ermittelt wurden 31 m² anstelle der 20,6 m² tatsächlich eingebauten Kollektorfläche.

Aufgrund nicht ausreichender Grunddatenermittlung seitens des beauftragten Fachplaners (und der Herstellerfirma der Solaranlage) ist die installierte Anlage deutlich zu klein bemessen. Die Anlage liefert etwa 360 kWh/(m²a) kollektorflächenbezogenen Ertrag. Das entspricht einem Deckungsanteil von nur knapp 7 %.

Die Detailauswertung im Monitoring zeigte, dass die Randdaten der Pflegenutzung (hohe Temperaturen, hohe Lastspitzen, hoher Anteil von Zirkulationslast durch ausgedehnte Netze) insgesamt ungünstig für Solarthermie ist.

Die Systemkosten liegen bei knapp 1700 €/m² Kollektor. Den darin enthaltenen Planungs- und Projektsteuerungskosten standen keine adäquaten Leistungen gegenüber. Die Planung wurde überwiegend vom Systemhersteller durchgeführt. Die Anlage ist wegen der hohen Investitionen, der geringen erzeugten Energiemengen und der geringen vermiedenen Kosten der Nahwärme unwirtschaftlich.

5.6.8 Prozesskonzept: Wäscherei

In der evangelischen Stiftung gibt es neben den verschiedenen Wohnhäusern und Werkstätten eine Wäscherei und eine zentrale Küche zur Versorgung der Bewohner. Die Wäscherei und die Küche werden für den Betrieb verschiedener Maschinen und Geräte von einer zentralen Dampfanlage mit Dampf versorgt. Für die heutige Wäscherei und entsprechende Alternativen wurde ein Prozesskonzept (siehe Kapitel 5.2.3) erstellt.

Motivation

Etwa 20 … 25 % des Gaseinkaufs in Neuerkerode (2200 … 2700 MWh/a) entfallen auf den Betrieb der Dampfkessel. Die Zweikesselanlage ist Baujahr 1973. Jeder Kessel kann 1,6 t/h Dampf mit maximal 13 bar erzeugen. Die ca. 150 m lange Trasse liegt teilweise im Erdreich, teilweise in Kellerräumen und verzeichnet im Betrieb Temperaturen von 130 … 180°C.

Damit ist aus Sicht der Energiekosten und Emissionen hier Handlungsbedarf gegeben. Insbesondere die Kessel sind aufgrund ihres Alters vergleichsweise ineffizient.

Zudem sind vor allem mit dem Wäschereibetrieb (ca. 90 % des erzeugten Dampfes wird hier abgenommen, der Rest in der Küche) Personalkosten verbunden, aber auch Arbeitsplätze für Menschen mit Behinderung.

Variantenuntersuchung 2009/2010

Es wurden 12 Alternativen des künftigen Wäschereibetriebes miteinander verglichen, auszugsweise grafische Aufbereitung siehe Bild 159:

- die weitere Verwendung von Dampf (6 x) oder direktbeheizten Geräten (6 x),
- die Weiterverwendung von Gas (8 x) oder Strom (4 x) als Hauptenergieträger,
- die Weiterverwendung der zentralen Wäschereitechnik mit Waschstraße, Trockner, Mangel (10 x) oder alternativ Kleingeräten (2 x),
- die Beibehaltung des Wäschereikonzeptes als Zentralwäscherei (8 x) oder alternativ der Aufbau von lokal angeordneten Waschsalons (4 x).

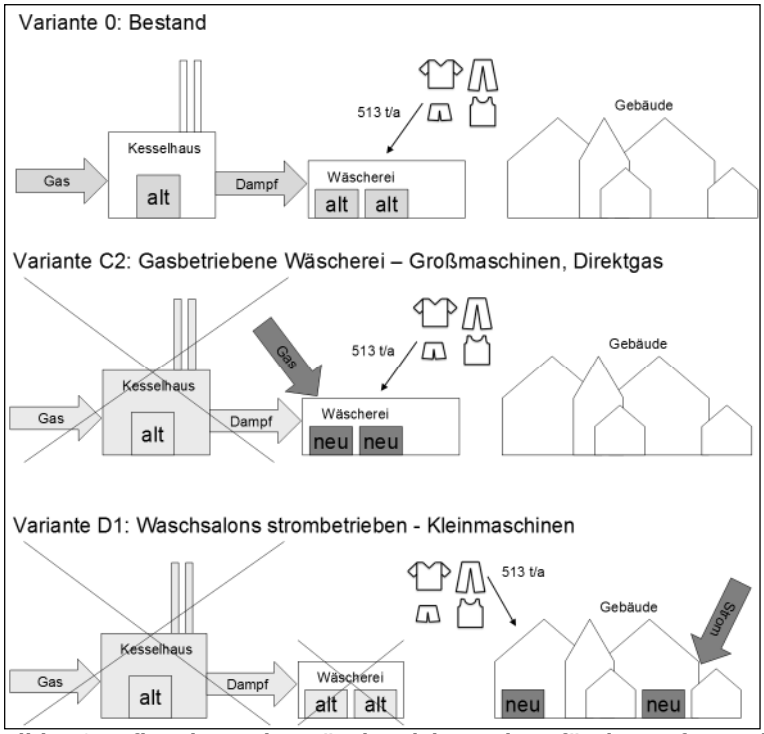


Bild 159 Aufbereitung der Wäschereialternativen für den Auftraggeber

Für jede Variante wurden Energiebilanzen erstellt und Investitionskosten ermittelt. Basis der Energiebilanzen sind die ermittelten Grunddaten für das Wäsche- und Mangelwäscheaufkommen:

- Wäscheaufkommen: 513 t/a (Waschen und Trocknen)
- Mangelwäsche: 62 t/a

Der Energie-, Wasser- und Waschmitteleinsatz wurde mit Hilfe von Herstellerunternehmen entsprechender Maschinen bestimmt, weil Literaturkennwerte nicht in ausreichender Menge verfügbar waren.

Alle Varianten haben Vor- und Nachteile. In einer Wertanalyse (siehe Kapitel 5.5) wurden die Varianten verglichen hinsichtlich: Energiekosten, Investitionskosten, Energieausnutzung der Wäschereigeräte, Waschmittelverbrauch, Wasser-/Abwasserverbrauch, hygienischer Reinigung, Verzicht auf Kesselwärter, Arbeitsplätze für Bewohner und Betreuer, Wartungsintensität, Service und Ersatzteilbeschaffung. Ohne detaillierte Betrachtung der Personalentwicklung und -kosten schneiden zwei Lösungen gut ab:

- direktgasbetriebene zentrale Wäscherei mit Großmaschinen ohne Dampf,
- Kleinwäschereien mit Gas/Strom/Fernwärmebetrieb ohne Dampf.

Die erste Lösung wird in der Stiftung aus damaliger Sicht favorisiert. Sie erfüllt die Wertanalysekriterien am besten. Gas schneidet besser als Strom ab, vor allem bei einer Zentrallösung, weil das Netz dort einfacher zu installieren ist. Die Varianten mit zentraler Wäscherei schneiden besser ab als die lokalen Waschsalons, weil die Beschäftigungssituation – Beschäftigung behinderter Menschen – besser aufrechterhalten werden kann. Eine neue Waschstraße erscheint sinnvoller als die Beibehaltung der alten, deren Wartung zunehmend unsicherer wird, u. a. weil die Herstellerfirma inzwischen insolvent ist. Ein Zentralgerät schneidet insgesamt besser ab als Kleinmaschinen, weil der Personalbedarf von nicht behinderten Menschen zur Beschickung geringer sein kann, auch wenn die Energiekosten höher sind. Außerdem kann nur mit einer Zentralanlage ein sehr hoher Hygienestandard der Wäsche erreicht werden.

336.600 €/a Gesamtkosten (ohne Personal) der Bestandsanlage könnten vermindert werden auf 235.700 €/a Gesamtkosten (ohne Personal). Allerdings sind ca. 850.000 € Investitionskosten erforderlich.

Projektweiterentwicklung

In der weiteren Planung (2011/12) wurde die zentrale Lösung mit einem Lokaldampferzeuger ohne erdverlegte Leitungen in einem neuen Wäschereigebäude verfolgt. Dampf als Energieträger favorisiert, weil dampfbetriebene Maschinen besser regelbar sind und sich dem schwankenden Bedarf in Neuerkerode besser anpassen lassen als gasbetriebene.

Später (2013/14) wird auch die Ausgliederung der Wäscherei in Erwägung gezogen. Hauptgrund: Entwicklung potentieller Arbeitskräfte. Eine Analyse der zu betreuenden Personen in 5 … 10 Jahren deutet darauf hin, dass das Arbeitsangebot der Wäscherei nicht zum Arbeitsvermögen des künftigen Klientels (älter werdende Behinderte und Menschen mit schwereren Behinderungen) passen wird.

Eine Umsetzung des Projektes steht noch aus. Vor einer endgültigen Entscheidung soll eine detaillierte Analyse und Optimierung der Arbeitsabläufe in der heutigen Wäscherei erfolgen.

5.6.9 Gerätekonzept: Pumpen

Ein spezielles Gerätekonzept (siehe Kapitel 5.2.2) wurde für die in der Liegenschaft vorhandenen Heizungs- und Zirkulationspumpen erstellt. Es beinhaltet:

- die Aufnahme aller Pumpen vor Ort,
- die Überprüfung der Bestandsdimensionierung,
- ggf. Empfehlung einer veränderten Einstellung der Förderhöhe oder Stufe, falls die Pumpe dies im anzustrebenden Betriebsbereich ermöglicht,
- ggf. die Empfehlung neuer Hocheffizienzpumpen, sofern dies wirtschaftlich ist.

Motivation ist die Verbindung von üblicher Instandhaltung mit einer Stromeinsparung (Gleichstrommotorprinzip und Kleinerdimensionierung). Der Empfehlung liegt eine überschlägige Neuauslegung auf Basis von Messwerten, Energiekosten- und Investitionskostenschätzung zugrunde. Es gilt:

- Amortisationszeiten über 10 Jahren führen unabhängig vom Pumpenalter zur Empfehlung, die alte Pumpe zu belassen – wenn möglich wird die Optimierung der Bestandspumpe empfohlen,
- Amortisationszeiten von 5 oder weniger Jahren führen unanhängig vom Pumpenalter zur Empfehlung, die Pumpe zu tauschen,
- Amortisationszeiten von 6 – 10 Jahren führen zur Empfehlung eines Pumpentauschs, wenn die vorhandene Pumpe 10 Jahre und älter ist, sonst wird die alte Pumpe belassen und ggf. nur optimiert eingestellt.

Heizungspumpen

Vorgefunden wurden 49 Einzelpumpen, 48 Doppelpumpen, 10 Einzelpumpen in Parallelschaltung. Die Mehrzahl der Pumpen (46 Stück) ist einstufig ungeregelt ausgeführt. 37 Pumpen sind drei- und vierstufig, davon 26 auf höchster Stufe. Es sind 23 Regelpumpen vorhanden.

Die notwendigen Betriebspunkte der Heizungspumpen wurden bestimmt u. a. aus der Größe der angeschlossenen beheizten Flächen (Pläne), der maximalen Heizlast (aus Messwerten, siehe Kapitel 4.3.2), Annahmen zu längenbezogenen Druckverlusten der Netze, Auslegungsspreizungen und Ventilautoritäten.

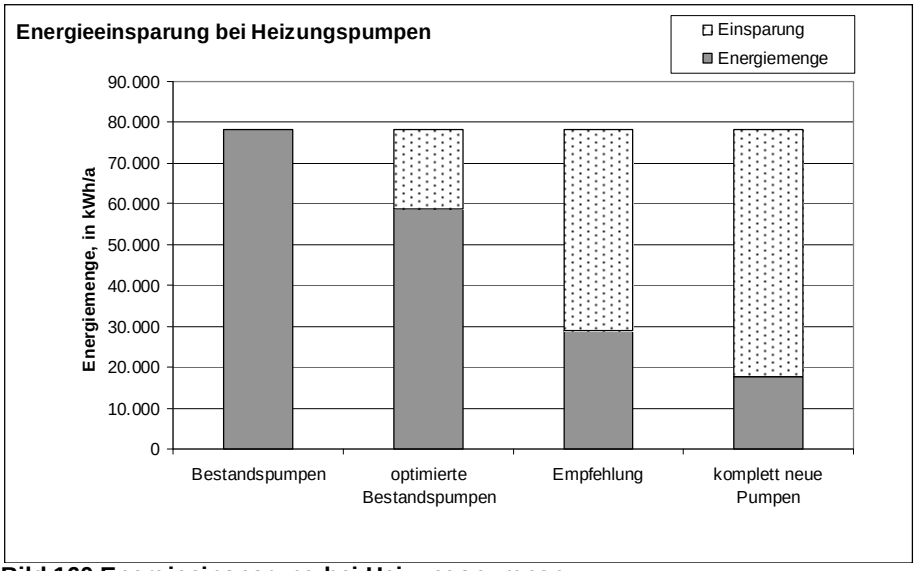


Bild 160 Energieeinsparung bei Heizungspumpen

Die Erneuerung von 42 Heizungspumpen (als Ersatz für 49 Einzel- und 29 Doppelpumpen im Bestand) erfolgte im April 2010. Sie folgt in etwa der "Empfehlung" aus Bild 160 und führt zu knapp 60 % rechnerischer Stromersparnis.

Dabei wurde angenommen, dass anteilig 6 % Volllast, 15 % Dreiviertellast, 35 % Halblast und 44 % Viertellast (basierend auf dem Volumenstrom) vorherrscht. Die resultierenden Leistungen wurden den Pumpendiagrammen entnommen und zeitanteilig gewichtet.

Zirkulationspumpen

Vorgefunden wurden 23 einstufige und 14 dreistufige (davon 12 auf maximaler Stufe) ungeregelte Pumpen. Die notwendigen Betriebspunkte der Pumpen wurden bestimmt u. a. aus der Höhe der Verteilverluste je nach verlegter Netzlänge, einer angenommenen Auskühlung im System sowie Annahmen zu längenbezogenen Druckverlusten der Netze.

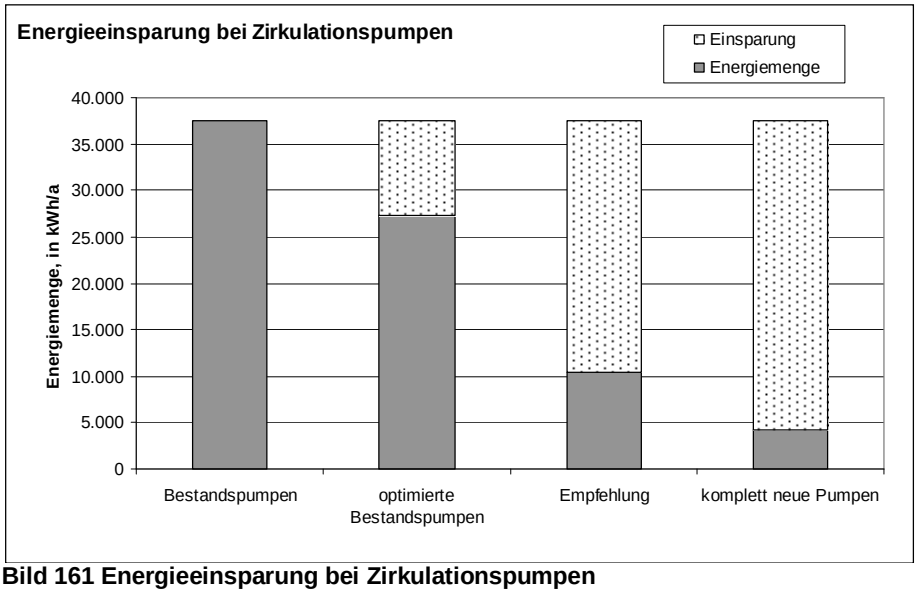


Bild 161 Energieeinsparung bei Zirkulationspumpen

Für 15 Pumpen erwies sich eine verbesserte Einstellung des Betriebspunktes als ausreichend. Weitere 12 Pumpen wurden von Juli bis September 2010 getauscht. Die rechnerische Einsparung beträgt knapp 70 %.

Fazit

Die Energieeinsparungen können nur rechnerisch beziffert werden, da keine Einzelmesswerte verfügbar sind. Da jeweils nicht alle vorhandenen Pumpen getauscht wurden (Berücksichtigung des Baualters und der Einstellbarkeit der Bestandspumpen), liegt die rechnerische Einsparung bei ca. ⅔ der früheren Energiemenge.

Die Investitionskosten (einschl. Einbau) für die Zirkulationspumpen betragen 5.700 €. Der Einbau erfolgte durch Handwerker in Neuerkerode. Die Heizungspumpen wurden von einer externen Firma eingebaut, was zu Investitionskosten von 32.500 € führte. Auf ein zwischenzeitlich vorgesehenes teilweises Sponsoring der Pumpen durch die Hersteller wurde verzichtet.

Vor Umsetzung der Maßnahme wurde von einem Hersteller ein Pumpenaustauschkonzept für die Heizungspumpen vorgelegt. Basis waren die vorhandenen Pumpen sowie die Leistungsplandaten für das Fernwärmenetz aus den 1970er Jahren. Ergebnis war eine Liste mit Neupumpen, jedoch nicht in passender Dimensionierung – im Schnitt ca. 2,3 Mal so viel Leistung wie letztlich gewählt. Auch mit den kleiner gewählten Pumpen kam es zu keinerlei Betriebsproblemen!

5.6.10 Gerätekonzept: elektrische Großverbraucher

Es wurden Voruntersuchungen, insbesondere exemplarische Langzeitleistungsmessungen (1 Tag bis 1 Woche) durchgeführt. Als elektrische Großverbraucher wurden in Neuerkerode alle Sonderausstattungen über die übliche Wohn- und Büroausstattung hinaus betrachtet.

Konkrete Gerätekonzepte (siehe Kapitel 5.2.2) liegen nur in Ansätzen vor. Insbesondere Kostenschätzungen für Ersatzbeschaffungen sollten erst erfolgen, wenn konkrete Ambitionen zur Sanierung gegeben sind. Allerdings ist dennoch bereits ein Erkenntnisgewinn festzustellen.

Es ist festzustellen dass die Werkstattausstattung mit Sägen, Fräsen, Absaugungen usw., die zentrale EDV und Server, die Telefonanlage, Müllpresse, kleinere Waschmaschinen und Trockner, Medizingeräte, zentrale Abwasser- und Regenwasserhebeanlagen insgesamt kaum Optimierungspotential aufweisen. Entweder wegen geringer Laufzeiten oder aufgrund geringer Dauerleistung.

Unter den Geräten und Systemen, die aus Sicht ihres Energieverbrauchs zur Optimierung empfohlen werden, sind:

- Tonbrennöfen (Kunstwerkstätten),
- Aufzüge (hier vor allem Standby durch Beleuchtung und Türmagnete),
- diverse Druckluftkompressoren für Werkstätten, Schwimmbad und Wäscherei,
- Ozon- und Pumpenanlagen im Schwimmbad,
- Kühlräume der Küche und offene Kühltheke im Lebensmittelladen.

Aus Sicht der Leistungsoptimierung, d.h. Vermeidung von Lastspitzen und Leistungspreisen sind interessant:

- Schwallpumpen für Gegenstromanlage usw. im Schwimmbad,
- Konvektomaten, Kippbratpfannen, Friteusen, Diätküchenblock in der Küche,
- Zentrifuge, Waschstraße, Waschmaschine, Trockner, Mangel.

Die elektrisch versorgten Geräte der Küche haben sehr hohe Aufheizleistungen und hohe Dauerleistungen. Hier kann eine Umstellung auf Gas oder Dampf sinnvoll sein.

Die Auswertung erfolgte mit Excel. Der Gesamtaufwand der Datenauswertung lag bei ca. 1Tag/Gerät.

5.6.11 Anlagenkonzept: Außenbeleuchtung

Ein weiteres Anlagenkonzept (siehe Kapitel 5.2.2) wurde für die Außenbeleuchtung der Liegenschaft erstellt. Zunächst erfolgt eine mehrstündige Begehung mit einem Liegenschaftsplan, in den die Bestandbeleuchtung eingezeichnet wurde, siehe Bild 162.

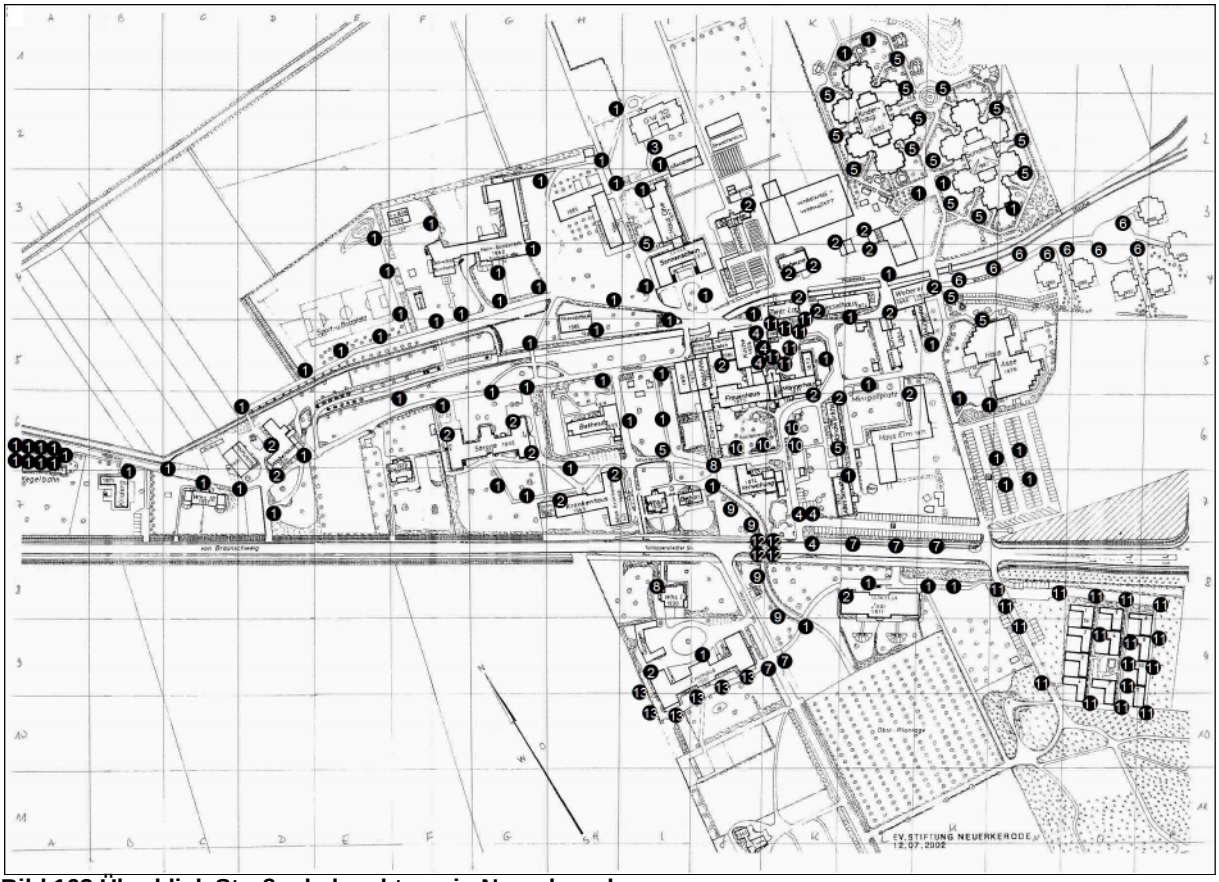


Bild 162 Überblick Straßenbeleuchtung in Neuerkerode

Insgesamt wurden 176 Straßenlampen ausgeführt in 13 verschiedenen Typen vorgefunden. Die gesamte installierte Außenbeleuchtung betrug inklusive der Vorschaltgeräte etwas mehr als 21 kW.

Betriebszeiten

Es sind 30 bis 40 Dämmerungsschalter installiert, die teilweise ganze Straßenzüge, teilweise auch nur einzelne Lampen schalten. Die flächendeckend eingestellten Sollwerte für die Schaltung sind 2 Lux. Wegen der unterschiedlichen Lage der Schalter mit mehr oder weniger Verschattung sowie wegen alterungsbedingter Abweichungen der Bauteile kann von Schaltungen zwischen 1 und 3 Lux ausgegangen werden. Damit wird nicht die gesamte Außenbeleuchtung der Liegenschaft auf einmal geschaltet, sondern es ergibt sich eine Abfolge, die positiv für die Vermeidung von Spitzenströmen ist. Innerhalb von geschätzt 30 Minuten sind alle Lampen geschaltet.

Die Lampen sind nachts durchgehend im Betrieb, um dem Nachtdienst eine sichere Arbeit zu gewährleisten. Folgende Schaltzeiten werden von der örtlichen Handwerkerschaft als Mittelwert für alle Lampen und alle Wetterlagen (Nebel, Wolken, klarer Himmel usw.) angegeben:

- Frühjahr (März) 18:30 – 6:30 Uhr 12 Stunden
- Sommer (Juni) 20:30 – 5:30 Uhr 9 Stunden
- Herbst (September) 18:30 – 6:30 Uhr 12 Stunden
- Winter (Dezember) 16:30 – 7:30 Uhr 15 Stunden

Damit ergibt sich ein halbes Jahr Betriebszeit, d.h. 4380 Stunden. Aus den Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeiten für den Standort Hannover ergibt sich für einen typischen Tag eines jeden Quartals:

- Frühjahr (5.5.) 20:53 – 5:43 Uhr 8,83 Stunden
- Sommer (5.8.) 20:30 – 5:30 Uhr 8,67 Stunden
- Herbst (5.11.) 18:30 – 6:30 Uhr 14,63 Stunden
- Winter (4.2.) 16:30 – 7:30 Uhr 14,82 Stunden

Damit ergibt sich ebenfalls ca. ein halbes Jahr Betriebszeit, d.h. genauer 4284 Stunden. Der Rechenwert für die Bilanzen wird auf 4300 Stunden festgelegt.

Energiebilanz und Verbesserungsvorschläge

Die Energiebilanz der Außenbeleuchtung ergibt durch Multiplikation von Leistung mal Betriebszeit eine Jahresenergiemenge von knapp 92 MWh elektrische Energie. Bei einem Energiepreis von 0,14 €/kWh (im Jahr der Konzepterstellung) entspricht dies ca. 13 Tausend Euro pro Jahr, welche für Beleuchtung anfallen.

Folgende individuell auf das jeweils vorgefundene Bauteilalter zugeschnittene Maßnahmen ergeben sich:

- HQL-Lampen werden komplett incl. der Leuchte (aber meist ohne Mast) ersetzt, wobei die neueren Modelle wegen der besseren Vorschaltgeräte erst langfristig erneuert werden,
- Halogenlampen werden komplett ersetzt, jedoch erst langfristig, wenn die Lampen ein gewisses Alter erreicht haben,
- stabförmige und U-förmige Leuchtstofflampen werden incl. Leuchte sofort ersetzt,
- Kompaktleuchtstofflampen bleiben erhalten.

Aus den Sofortmaßnahmen (136 Leuchten) ergibt sich eine Einsparung von etwa 55 %. Langfristig (weitere 20 Leuchten) können etwa 63 % gespart werden, so dass eine Jahresenergiemenge von etwa 35 MWh resultiert.

Ein Angebot lag zum Zeitpunkt der Konzepterstellung nicht vor. Darum wurden Grenz-Investitionskosten bestimmt. Damit sich die Sanierung allein aus ihren Einsparungen refinanziert, dürfen die Kosten nicht höher als ca. 520 €/Leuchte liegen (10 Jahre Lebensdauer). Bei einer Lebensdauer von 20 Jahren liegt die Grenzinvestitionssumme bei ca. 1050 €.

Umsetzung

Zwischen 2009 und 2013 wurden ca. 75 Straßenlampen ersetzt, 40 % des Gesamtbestandes. Die neu installierten Modelle sind in der Mehrzahl Kompaktleuchtstofflampen (PL-T 4 pins), aber auch LED-Lampen wurden eingesetzt. Die Kosten einer Kompaktleuchtstofflampe liegen bei etwa 300 € (900 € inkl. Mast.). Die LED-Lampen wiesen 550 € Mehrkosten auf.

Die Einsparungen sind nicht direkt messbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass jede sanierte Lampe zu 170 … 200 kWh/a Stromersparnis führt. Die Realkosten liegen etwa in der Mitte zwischen den beiden Grenzwerten der Wirtschaftlichkeitsbewertung. Der Leuchtenaustausch ist somit innerhalb von etwa 15 Jahren wirtschaftlich und refinanziert durch Energieeinsparung die Investition. Mit der LED-Technologie wurden positive Betriebserfahrungen gemacht.

6 Literatur und Verzeichnisse

Literatur

[1] Beier, C.; Analyse des Energieverbrauchs und exemplarische Best-practice-Lösungen für relevante Verbrauchssektoren in Krankenhäusern; DBU-Projekt; Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik; Oberhausen; 2009.

[2] Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Berlin; 2009.

[3] Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte im Wohngebäudebestand; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Berlin; 2009.

[4] Benndorf, R. et al; Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050; UBA; Dessau-Roßlau; 2014.

[5] Bigalke, U. et al; Der dena Gebäudereport 2012; Deutsche Energieagentur; Berlin; 2012.

[6] Bund der Energieverbraucher; Preisentwicklung Holzpellets, Heizöl, Erdgas; URL: http://www.energieverbraucher.de/de/site__285/; zuletzt abgerufen 10.02.2015.

[7] Deidert, J. et al; Integration von Heizkesseln in Wärmeverbundsysteme mit großen Solaranlagen; Auswertung von Feldanlagen; BMU-Projekt; Abschlussbericht; Wolfenbüttel/Hannover/Düsseldorf; 2012.

[8] Deutscher, P. und Rouvel, L.; Energetische Bewertung haustechnischer Anlagen; 2 Teile; HLH; Nr. 7 und 8/2003; VDI; Düsseldorf; 2003.

[9] Diefenbach, N. et al; Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand; IWU und Bremer Energieinstitut; Darmstadt; 2010.

[10] Diefenbach, N. et. al; Wärmeversorgung für Niedrigenergiehäuser; Darmstadt; 2005.

[11] DIN 4108; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Beiblatt 2: Wärmebrücken Planungs- und Ausführungsbeispiele; Beuth; Berlin; 2004.

[12] DIN 4710; Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland; Beuth; Berlin; 2003.

[13] DIN V 18599; Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teile 1 bis 11; Beuth; Berlin; 2016.

[14] DIN V 4108 Teil 6; Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden; Vornorm - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfes; Beuth; Berlin; 2003.

[15] DIN V 4701 Teil 10; Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen; Vornorm - Teil 10: Heizung, Trinkwarmwasser, Lüftung; Beuth, Berlin, 2003.

[16] DIN V 4701 Teil 12; Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen im Bestand; Vornorm - Teil 12: Wärmeerzeuger und Trinkwassererwärmung; Beuth; Berlin; 2004.

[17] diverse Autoren; Branchen-Energieeffizienz-Konzept der Textilreiniger, Wäscher und Färber in Österreich; Österreichische Energieagentur; Wien; ohne Ausgabejahr.

[18] diverse Autoren; Energieeffiziente Lüftungsanlagen in Betrieben; Landesgewerbeamt Baden-Württemberg; Informationszentrum Energie; Stuttgart; 2002.

[19] diverse Autoren; Energieeffizienzverbesserung in der Landwirtschaft; Verband der Landwirtschaftskammern; Berlin; 2009.

[20] diverse Autoren; Energiesparende Beleuchtungsanlagen in Gewerbe, Handel und mittelständischen Unternehmen; Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg; Stuttgart; 2004.

[21] diverse Autoren; Klima schützen – Kosten senken; Energie sparen bei Kälteanlagen im Lebensmittelhandel; Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz; München; 2006.

[22] diverse Autoren; Klima schützen – Kosten senken; Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe; Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz; München; 2006.
[23] diverse Autoren; Leitfaden Energiekonzepte für kleine und mittlere Unternehmen; Landesgewerbeamt Baden-Württemberg; Informationszentrum Energie; Stuttgart; 2004.
[24] diverse Autoren; Leitfaden: Energetische Gebäudebilanzierung nach DIN V 18599; Deutsche Energieagentur; Berlin; 2011.
[25] Eikenloff, G. et al; Einfluss der Verteilungsverluste bei der energetischen Modernisierung von Mehrfamilienhäusern. Analyse und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen; Projekt im Auftrag des proKlima enercity-Fonds; Hannover/Braunschweig/Wolfenbüttel, 2012.
[26] Energieagentur Nordrhein-Westfalen; Energiepreise in Deutschland – verschiedene Grafiken; URL: http://www.energieagentur.nrw.de/infografik/; zuletzt abgerufen 10.02.2015.
[27] Erhorn-Kluttig, H., Erhorn, H., Gruber, E.; Evaluierung des dena Feldversuchs Energieausweis für Nichtwohngebäude; Stuttgart; 2005.
[28] EnEV 2007; Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV); 2001.
[29] EnEV 2009; Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV); 2009.
[30] EnEV 2014; Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV); 2003.
[31] Feist, W. et al; Altbausanierung mit Passivhauskomponenten; Passivhaus-Institut; Darmstadt; 2009.
[32] Fraunhofer-Institut; Umsicht Fernwärme-Leitfaden; Duisburg; 2008.
[33] Großklos, M. und Knissel, J. (Hrsg.); Stromverbrauch in Bürogebäuden – Energiekontrolling und Optimierung; Tagungsband; Darmstadt; 2004.
[34] Händel, C.; Chancen der Energetischen Inspektion; Vortrag; Fachverband Gebäude-Klima e.V.; Bietigheim-Bissingen; 2016.
[35] Heizenergie im Hochbau – Leitfaden energiebewusste Gebäudeplanung; Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit; Druck: Elektra/Niedernhausen; 1999.
[36] Hennings, D. et al; LEE – Leitfaden elektrische Energie im Hochbau; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt; 2000.
[37] Hinz, E.; Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Wohngebäude mit der EnEV 2012 – Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten; Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt; 2010.
[38] Hörner, M. und Knissel, J.; Teilenergiekennwerte von Nicht-Wohngebäuden TEK; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt; 2014.
[39] Hörner, M. Wagner, A., Herkel, S. et al; Teilenergiekennwerte – Neue Wege in der Energieanalyse von Nichtwohngebäuden im Bestand; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt; 2014.
[40] Jagnow, K.; Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik; Dissertation an der Universität Dortmund; 2015.
[41] Jagnow, K et al; Reale Nutzung bedingt angepasste Heizkurve; TGA Fachplaner; Gentner; Stuttgart; 09/2014.
[42] Jagnow, K. et al; Vereinfachung des Berechnungsverfahrens von Rohrleitungslängen für eine Fortschreibung der DIN V 18599 Teil 5 und 8; BMVBS/BBR-Studie; Braunschweig/Dresden/Wolfenbüttel; 2010.
[43] Jagnow, K. und Wolff, D.; Auswertung von Verbrauchsdaten; 3 Teile; Gebäudeenergieberater; Nr. 04, 05 und 06/2006; Gentner; Stuttgart; 2006.
[44] Jagnow, K., Horschler, S. und Wolff, D.; Die neue Energieeinsparverordnung 2002; Deutscher Wirtschaftsdienst; Köln; 2002.

[45] Jagnow, K., Wolff, D. et al; Grundlagenprojekt im Rahmen der energetischen und ökologischen Modernisierung der Evangelischen Stiftung Neuerkerode: Bestandsaufnahme des Gebäude- und Anlagenbestandes"; DBU-Projekt; Abschlussbericht in mehreren Teilen; Wolfenbüttel; November 2008.
[46] Jagnow, K., Wolff, D. et al; Umsetzungsprojekt: Integrale Planung und Steuerung der nachhaltigen Modernisierung des Gebäudebestandes und der Energieversorgung der Evangelischen Stiftung Neuerkerode"; DBU-Projekt; Abschlussbericht in mehreren Teilen; Wolfenbüttel; Juni 2014.
[47] Jakobiak; R.; Tageslichtnutzung in Gebäuden; BINE Informationsdienst; Bonn; 2005.
[48] Löffler, T.; Energiekennzahlen für Betriebsvergleiche; Technische Universität Chemnitz; 2011.
[49] Loga, T. et al; Deutsche Wohngebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt; 2015.
[50] Loga, T. et al; Energiebilanz-Toolbox, Arbeitshilfe und Ergänzungen zum Energiepass Heizung/Warmwasser; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt; 2001.
[51] Loga, T. et al; Energiepass Heizung/Warmwasser; Institut Wohnen und Umwelt, IM-PLUS Programm Hessen; Darmstadt; 1997.
[52] Loga, T. et al; Kurzverfahren Energieprofil; Untersuchung im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung; IWU; Darmstadt; 2004.
[53] Manteuffel, A. et al; Preisentwicklung Gebäudeenergieeffizienz – Initialstudie; Schulze Darup & Partner Architekten, Ecofys; Berlin, 2014.
[54] Mertz; G.; Ecofys-Studie zeigt Potenziale zur Effizienzsteigerung bei der Gebäudekühlung; FGK; Bietigheim-Bissingen; 2011.
[55] Miehe, M.; Dämmstandards von Fernwärmeleitungen; IKZ Haustechnik; Strobel; Arnsberg; Heft 8; 2014.
[56] Milles, U. (Red.); Solar unterstützte Nahwärme; BINE Informationsdienst; Bonn; 2000.
[57] Nitsch, J. et al; Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – Leitstudie 2010; Stuttgart, Kassel, Teltow; 2010.
[58] Obermeyer, H.; Stromverbrauch in Haushalten; Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz; Stadt Mainz; 1999.
[59] ohne Autor; AGFW – Hauptbericht 2015; AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.; Frankfurt; 2016.
[60] ohne Autor; Das Wissensportal für die saisonale Wärmespeicherung; gefördert vom BMU/PTJ; online unter http://www.saisonalspeicher.de; abgerufen: 17.10.2017.
[61] ohne Autor; Effiziente Energienutzung in der Papierindustrie; EnergieAgentur.NRW; Düsseldorf; 2010.
[62] ohne Autor; Elektrische Antriebe - Potenziale zur Energieeinsparung; EnergieAgentur.NRW; Düsseldorf; 2010.
[63] ohne Autor; Energiekennwerte 2014 - Hilfen für den Wohnungswirt; Techem; Eschborn; 2015.
[64] ohne Autor; Energiezufuhr und Sonnenscheindauer in Deutschland; Bayrisches Staatsministerium des Inneren; 2010.
[65] ohne Autor; Institut Wohnen und Umwelt; CO_2–Äquivalente nach GEMIS/IINAS; veröffentlicht in mehreren Schriftstücken verschiedenen Veröffentlichungsdatum (1997 – 2014); URL: http://www.iwu.de/downloads/fachinfos/energiebilanzen/; zuletzt abgerufen 15.02.2015.
[66] ohne Autor; Manual zur Anwendung der Testreferenzjahre; Deutscher Wetterdienst; www.dwd.de; abgerufen: 13.09.2016.
[67] ohne Autor; Planungsleitfaden SMA SMART HOME; SMA Solar Technology AG; Niestetal; 2014.
[68] ohne Autor; Stromverbrauch im Haushalt; BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.; Berlin; 2014.
[69] PAS 1027; Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen im Bestand, Ergänzung zur DIN 4701-12; Beuth; Berlin; 2004.

[70] Recknagel, H. et al; Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik; Oldenbourg; München; Ausgaben 2004 und 2016.
[71] Schmid, C. et al; Heizung, Lüftung, Elektrizität; vdf Verlag; Zürich; 2003.
[72] Techem, Energiekennwerte 2014 – Hilfen für den Wohnungswirt; Eschborn; 2014.
[73] VDI 2067; Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Blätter 1, 10, 12, 20, 21, 22, 30, 40; Beuth; Berlin; 2000 bis 2013.
[74] VDI 2067; Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; zurückgezogene Ausgabe; Blätter 1 bis 7; Beuth; Berlin; 1982 bis 1993.
[75] VDI 2078; Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume; Beuth; Berlin; 1996.
[76] VDI 3807; Verbrauchskennwerte für Gebäude; Blätter 1 bis 5; Beuth; Berlin; 2008 bis 2015.
[77] VDI 4710; Meteorologische Daten in der technischen Gebäudeausrüstung; Blätter 1 bis 4; Beuth; Berlin; 2007 – 2015.
[78] Wolff, D. et al; Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Brennwertkesseln; Abschlussbericht zum DBU Projekt; Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel; Wolfenbüttel; 2003.
[79] Wolff, D. et al; Integration von Heizkesseln in Wärmeverbundsysteme mit großen Solaranlagen; Forschungsprojekt BMU; Endbericht; verfügbar unter www.delta-q.de; Wolfenbüttel; 2012.
[80] Wolff, D. et al; Felduntersuchungen zur Begrenzung des Lüftungswärmeverbrauchs bei mechanischer Wohnungslüftung und Fensterlüftung durch Nutzerinformation sowie durch heiz- und regelungstechnische Maßnahmen; BBR Forschungsvorhaben; Endbericht; Institut für Heizungs- und Klimatechnik an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel; 2002.
[81] Wolff, D. und Jagnow, K.; Optimus; Abschlussbericht zum DBU Projekt – Technischer Teil; Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel; Wolfenbüttel; 2005.
[82] Wolff, D. und Jagnow, K.; Wolff; Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung; Wolfenbüttel/Braunschweig; 2011.
[83] Zeine, C. et al; Verbrauchskennwerte 1999, ages, Münster, 2000.
[84] Zeine, C.; Verbrauchskennwerte; ages GmbH; Münster; 2005.

Bilder

Bild 2 Beispielhaftes Energieflussbild: Ventilator einer Lüftungsanlage 6
Bild 3 Beispielhaftes Energieflussbild: Heizwärmebedarf 7
Bild 4 Beispielhaftes Energieflussbild: Kühlbedarf 8
Bild 5 Beispielhaftes Energieflussbild: Primär- bis Nutzenergie 9
Bild 6 Endenergiebedarf und -verbrauch Wärme für eine Stichprobe von ca. 60 Wohnbauten [81] 14
Bild 7 Endenergiebedarf und -verbrauch Wärme für eine Stichprobe von ca. 30 Nichtwohnbauten [27] 15
Bild 8 Endenergiebedarf und -verbrauch Strom für eine Stichprobe von ca. 30 Nichtwohnbauten [27] 16
Bild 9 Beispielhafte Endenergien je nach Bilanzraum und Anordnung des Erzeugers 18
Bild 10 Beispielhafte Nutzenergien je nach Definition 19
Bild 11 Varianten des Bilanzumfangs für gekoppelte Prozesse 20
Bild 12 Beispielhafter Energiemischpreis für Strom bei einem Kleinverbraucher 24
Bild 13 Energiepreisentwicklung für Endverbraucher [6][26] 25
Bild 14 Mittelwert- und Intervallbildung für Leistungen 37
Bild 15 Beispielhafter Wirkungsgrad und Betriebsbereitschaftsverlust eines Kessels 39
Bild 16 Gesamt-, Betriebs- und Vollbenutzungszeit 41
Bild 17 Behaglichkeitsfeld 45
Bild 18 Häufigkeitsverteilung von Temperaturen im Wohnbau [63] 46
Bild 19 Einfluss von Teilbeheizung auf die Innentemperatur in der Heizperiode im Wohnbau [50] 47
Bild 20 typische mittlere Rauminnentemperatur bei Teilbeheizung [24][eigene] 48
Bild 21 Typische Luftwechsel im Wohnbau [24][eigene] 50
Bild 22 Mischungsrechnung für das nutzbare Trinkwarmwasser 53
Bild 23 Typische Wasserverbrauchsanteile im Wohnbau [76] 54
Bild 24 Warmwasserverbrauchskennwert für Wohnbauten [24][eigene] 55
Bild 25 Beispielbüro mit Bereich der Sehaufgabe, Umgebungsbereich und Rand 57
Bild 26 Stromverbrauch im Haushalt ohne Elektroheizung/Warmwasserbereitung [58] 59
Bild 27 Typische Stromverbrauchsanteile im Wohnbau ohne Elektroheizung/Warmwasserbereitung [68] 59

Bild 28 Übersicht der DWD-Wetterstationen mit kostenlosen Tages- und Monats-, ggf. Stundendaten 64
Bild 29 Skizze der TRY Regionen für Deutschland [13] 65
Bild 30 Tagesverlauf der Außentemperaturen für Potsdam 67
Bild 31 Typische Anzahl von Heiztagen und mittlere Außentemperaturen in der Heizzeit [70] 69
Bild 32 Typische Gradtagszahlen für verschiedene Innen- und Heizgrenztemperaturen [70] 69
Bild 33 Typische Heizgradtage für verschiedene Heizgrenztemperaturen [70] 70
Bild 34 Häufigkeit der Luftzustände in Zehntelstunden für Potsdam [50] 71
Bild 35 Typischer Jahresverlauf der relativen Außenluftfeuchtigkeit in Potsdam 72
Bild 36 Anzahl von heiteren, bewölkten und deckten Tagen in Potsdam [12] 73
Bild 37 Typische Strahlungsenergiemengen und Sonnenscheindauern [64] 74
Bild 38 Typische Temperatur im Erdreich 75
Bild 39 Einfluss der Lage innerhalb einer Stadt auf den Energiebedarf – hier am Beispiel von Berlin [41] 76
Bild 40 Nomogramm U-Werte für Innen- und Außenwände 84
Bild 41 Nomogramm U-Werte für Decken und Bodenplatten 85
Bild 42 Nomogramm U-Werte für Dächer 85
Bild 43 Veränderung der U-Werte durch Dämmung 89
Bild 44 Nomogramm U-Werte für Fenster- und Fenstertüren 90
Bild 45 Bewertungsprinzip für Wärmebrücken abhängig vom Maßbezug 96
Bild 46 Einfluss des Tageslichtquotienten auf die Betriebszeit mit Tageslicht [20] 102
Bild 47 Effektive Betriebsstunden der Beleuchtung für Bürogebäude [33] 103
Bild 48 Einsparpotential der Tageslichtnutzung – Teilkennwert ein Tageslichtkontrollsystem [13] 104
Bild 49 Darstellung der Erzeugerbewertung 110
Bild 50 Typische Volllastwirkungsgrade η_{100} für Kessel, bezogen auf den Brennwert [13][15][16] 112
Bild 51 Typische Teillastwirkungsgrade η_{30} für Kessel, bezogen auf den Brennwert [13][15][16] 112
Bild 52 Typische Betriebsbereitschaftsgrade q_B für Kessel, bezogen auf den Brennwert [13][15][16] 113
Bild 53 Verlegedichten von Heizwasserleitungen im Wohnungsbau 123
Bild 54 Typische längenbezogene Wärmeverluste für Heizungsnetze 125
Bild 55 Wirtschaftlichkeit der Optimierung [81] 130
Bild 56 Nennkälteleistungszahlen für R134a [13] 133
Bild 57 Zu- und Abschläge auf die Nennkälteleistungszahlen für andere Kältemittel [13] 134
Bild 58 Teillastverhalten von Kältemaschinen [36][70] 134
Bild 59 Nennkälteleistungszahlen für dezentrale Kälteanlagen 138
Bild 60 Zusammenhang von Speichervolumen und Ladeleistung für die Wohnnutzung 147
Bild 61 Typische Volllastwirkungsgrade η_{100} für Kessel, bezogen auf den Heizwert [15] 149
Bild 62 Typische Betriebsbereitschaftsverluste q_B für Kessel, bezogen auf den Heizwert [15] 149
Bild 63 Temperaturbezogene Verlustleistung für indirekt beheizte Speicher [51][70] 155
Bild 64 Installierte Speichervolumina für Trinkwarmwasser [15] 156
Bild 65 Verlegedichten von Trinkwarmwasserleitungen im Wohnungsbau 160
Bild 66 U-Werte von Rohrleitungen [69] 161
Bild 67 Typische längenbezogene Wärmeverluste für Trinkwarmwassernetze 162
Bild 68 Heizenergiemengenanteile abhängig von der BHKW-Dimensionierung 167
Bild 69 Jahresdauerlinie für ein Mehrfamilienhaus 168
Bild 70 Verteilungsnutzungsgrad von Nahwärmenetzen nach Wärmeleistungsliniendichte [82] 172
Bild 71 Anteil des PV-Stroms am Gesamtverbrauch für den Wohnungsbau [67] 176
Bild 72 Eigenverbrauchsquote des produzierten PV-Stroms für den Wohnungsbau [67] 176
Bild 73 Erträge von gebäudenaher Mikro- und Mini-Windkraft [13] 178
Bild 74 Einfluss der Regelungsarten auf die Ventilatorleistung [33][70] 182
Bild 75 Jährlicher volumenstrombezogener Wärmeenergieaufwand für die RLT [13] 187
Bild 76 Jährlicher volumenstrombezogener Kälteenergieaufwand für die RLT [13] 187
Bild 77 Wirkungsgrade für Antriebsmotoren [62] 192
Bild 78 Einordnung der Energieeffizienz nach Arten der Kennzahl und Vergleichsmaßstab 196
Bild 79 Beispiel für eine Stichprobenauswertung [45] 197
Bild 80 Zeitreihenauswertung für Energiemengen einer diakonischen Einrichtung [46] 198
Bild 81 Zeitreihenauswertung für das Leitszenario 2010 der Bundesregierung [57] 199
Bild 82 Indexreihenauswertung Medienverbrauch Diakonie, Bezugsjahr 2000 [46] 200
Bild 83 Indexreihenauswertung Medienverbrauch Diakonie, Bezugsjahr 2010 [46] 200
Bild 84 Typologisierung des Wohnbaubestandes nach IWU [49] 204
Bild 85 Bedarf und Verbrauch nach dena [5] 205
Bild 86 Beispielhafter Kennwertesteckbrief [45] 209
Bild 87 Beispielhafter Verbrauchssteckbrief 210
Bild 88 Einordnung eines Energiekennwertes für ein Wohngebäude nach EnEV [28][29][30] 212
Bild 89 Einordnung eines Energiekennwertes für eine Weiterbildungseinrichtung nach EnEV [28][29] 213
Bild 90 Kumulierter Ölverbrauch für ein Wohnhaus 215

Bild 91 Positionierung von Zählern am Beispiel eines Wohngebäudes ... 216
Bild 92 Schematische Darstellung von Gradtagszahlen und Heizgradtagen ... 217
Bild 93 Heizperiodenkennwerte für die Klimastation Magdeburg ... 219
Bild 94 Typische Heizgrenztemperaturen ... 220
Bild 95 Schematische Ergebnisse einer Witterungskorrektur ... 221
Bild 96 Schematische Ergebnisse einer Zeitkorrektur ... 222
Bild 97 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Wärmemengenzählerwerten ... 225
Bild 98 Übergang EAV zur Bedarfsberechnung des Gebäudes ... 227
Bild 99 Qualitätssicherung mit EAV ... 228
Bild 100 Energieanalyse eines Gebäudes auf Basis von Gaszählerwerten ... 229
Bild 101 Energieanalyse eines Kessels auf Basis von Wärmemengen- und Gaszählerwerten ... 230
Bild 102 Übergang EAV zur Bedarfsberechnung des Erzeugers ... 231
Bild 103 Beispielhafte Erzeugeranalysen – Einfluss von Überströmventilen auf Brennwertkessel [78] ... 232
Bild 104 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Nachverfolgung Modernisierung [46] ... 233
Bild 105 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Sommerheizung [45] ... 233
Bild 106 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Zwangswärmekonsum [81] ... 234
Bild 107 Beispielhafte Gebäudeanalysen – Nahwärme [46] ... 234
Bild 108 Lastganganalyse Strom für ein Halbjahr [45] ... 235
Bild 109 Beispielhafte Analyse einer Wochen-Lastganganalyse für Gas [45] ... 236
Bild 110 Stromlastgangmessung eines Tages mit Detailanalyse [45] ... 237
Bild 111 Lastganganalyse Dampf für einen Tag [45] ... 237
Bild 112 Übergang von der Lastgangerfassung zur sortierten Leistung ... 238
Bild 113 Zeit- und Energieanteile in der Dauerlinie ... 239
Bild 114 Häufigkeitsverteilung von Außentemperaturen für den Standort Magdeburg ... 240
Bild 115 Jahresdauerlinie für ein Mehrfamilienhaus ... 241
Bild 116 Überführung einer Monatsbilanz in eine Jahresdauerlinie ... 242
Bild 117 Energiefluss und Bilanzrichtung, wichtige Bilanzgrößen ... 243
Bild 118 Einflussgrößen auf die Energiebilanz eines Gebäudes ... 246
Bild 119 Teilenergiekennwerte mit ähnlicher Bedarfsbewertung ... 247
Bild 120 Unterschied zwischen EnEV-Nutzfläche und beheizter Wohnfläche [49] ... 262
Bild 121 Bauherrentypen (nach [71] mit eigenen Ergänzungen) ... 264
Bild 122 Abgrenzung von individuellem und globalem Konzept ... 267
Bild 123 Besonderheiten von Geräte- und Anlagenkonzepten ... 269
Bild 124 Besonderheiten von Prozesskonzepten ... 271
Bild 125 Besonderheiten von Gebäudekonzepten ... 273
Bild 126 Besonderheiten von Quartiers-, Siedlungs- und kommunalen Energiekonzepten ... 276
Bild 127 Beispiel für eine systematische Variantenbildung [46] ... 293
Bild 128 Beispielhafte Darstellung einer stufenweisen Sanierung im Zeitverlauf [46] ... 294
Bild 129 Ablauf und Begriffe der Wertanalyse ... 295
Bild 130 Beispielliegenschaft Neuerkerode ... 303
Bild 131 gebäudeweise Medienkosten ... 304
Bild 132 Neuerkerode: gemessener Wärmeverbrauch ... 305
Bild 133 Neuerkerode: gemessener Stromverbrauch ... 306
Bild 134 Neuerkerode: gemessener Wasserverbrauch ... 306
Bild 135 Energie- und Wasserkosten ... 307
Bild 136 Emissionen der letzten Jahre ... 308
Bild 137 EAV der Gesamtliegenschaft 2013 ... 308
Bild 138 Energieflussdiagramm 2013 ... 309
Bild 139 Nahwärmenetzkarten ... 311
Bild 140 Ursprüngliches Energiekonzept ... 312
Bild 141 Wahrscheinliches Energiekonzept ... 313
Bild 142 Abkopplung Südgebiet ... 315
Bild 143 Hydraulikprobleme Biowärmepumpe und Nahwärmepumpe ... 316
Bild 144 Messwerte der Biowärmeeinspeisung ... 318
Bild 145 Verbrauchssteckbrief 2013 für das Gebäude "Emmaus" ... 319
Bild 146 Wärmedetails Pflegegebäude ... 320
Bild 147 Stromdetails Pflegegebäude ... 320
Bild 148 Wasserdetails Pflegegebäude ... 320
Bild 149 Energetischer Zustand der Liegenschaft 2008 ... 321
Bild 150 Allgemeiner Zustand der Liegenschaft 2013 ... 322
Bild 151 Investitionskostenprognose ... 323
Bild 152 Nutzwertanalyse ... 324
Bild 153 Umsetzungsprojekt Elm ... 326

Bild 154 Verbrauchstrends Elm ... 327
Bild 155 Umsetzungsprojekt Wohnhaus I bzw. Villa Luise ... 328
Bild 156 Verbrauchstrends Wohnhaus I bzw. Villa Luise ... 329
Bild 157 Umsetzungsprojekt Wabehaus ... 330
Bild 158 Verbrauchstrends Wabehaus ... 331
Bild 159 Aufbereitung der Wäschereialternativen für den Auftraggeber ... 333
Bild 160 Energieeinsparung bei Heizungspumpen ... 335
Bild 161 Energieeinsparung bei Zirkulationspumpen ... 335
Bild 162 Überblick Straßenbeleuchtung in Neuerkerode ... 337

Tabellen

Tabelle 1 Übliche (thermische) Bilanzgrößen und deren Bezeichnungen ... 11
Tabelle 2 dimensionsbehaftete Bewertungskennzahlen ... 12
Tabelle 3 dimensionslose Bewertungskennzahlen ... 13
Tabelle 4 Typische Heiz- und Brennwerte zur Umrechnung in Energiemengen ... 22
Tabelle 5 Anwendungsfälle für heiz- und brennwertbezogene Größen ... 23
Tabelle 6 Beispielhafte heiz- und brennwertbezogene Preise ... 24
Tabelle 7 CO_2-Äquivalente nach GEMIS/IINAS 4.2 bis 4.9 (heizwertbezogen) [65] ... 26
Tabelle 8 Primärenergiefaktoren nach DIN V 18599 (heizwertbezogen) [13] ... 27
Tabelle 9 Energiebilanzverfahren – Bilanzzweck und Endenergiebewertung ... 30
Tabelle 10 Energiebilanzverfahren – Anwendungsbereiche nach Gebäudenutzung und -alter ... 30
Tabelle 11 Energiebilanzverfahren – Bilanzierte Energieanwendungen ... 31
Tabelle 12 Energiebilanzverfahren – Zeitschritte der Bilanzierung und Art der Kennwerte ... 31
Tabelle 13 Energiebilanzverfahren – Berücksichtigung von Wechselwirkungen ... 32
Tabelle 14 Energiebilanzverfahren – Berücksichtigung von räumlicher und zeitlicher Teilnutzung ... 33
Tabelle 15 Energiebilanzverfahren – Umgang mit gekoppelten Prozessen ... 33
Tabelle 16 Energiebilanzverfahren – Definition von Nutzenergie, Abgrenzung der Gewinne ... 33
Tabelle 17 Energiebilanzverfahren – Standard-, Projektkennwerte, Aufwand und Detaillierung ... 34
Tabelle 18 Tägliche und jährliche Nutzungszeiten [8][13][39][50] ... 41
Tabelle 19 Heizungs- und Kühl- sowie Lüftungszeiten [13][eigene] ... 42
Tabelle 20 Beleuchtungszeitanteile [13][eigene] ... 43
Tabelle 21 Mittlere Innentemperaturen im thermisch konditionierten Bereich [13][50][eigene] ... 46
Tabelle 22 Einsparpotentiale durch Nachabsenkung je nach Bauschwere [50][eigene] ... 48
Tabelle 23 Mindestaußenluftvolumenströme [13] ... 51
Tabelle 24 Natürlicher, Anlagen- und Restluftwechsel im Nichtwohnbau [39][50][eigene] ... 52
Tabelle 25 Typische wohnflächenbezogenen Wasserverbrauchskennwerte [76] ... 54
Tabelle 26 Typische flächenbezogene Gesamtwasserverbrauchskennwerte [76][84] ... 55
Tabelle 27 Typische personenbezogene Gesamtwasserverbrauchskennwerte [44][50] ... 55
Tabelle 28 Typische Energiekennwerte für Warmwassernutzung [13] ... 55
Tabelle 29 Mittlere Innentemperaturen im thermisch konditionierten Bereich [13][eigene] ... 57
Tabelle 30 Typische flächenbezogene Gesamtstromverbrauchskennwerte [36][50][76][84] ... 60
Tabelle 31 Typische flächenbezogene Teilstromverbrauchskennwerte [38][39] ... 60
Tabelle 32 Typischer Stromverbrauch sowie Leistung von Bürogeräten [76] ... 61
Tabelle 33 Typischer Stromverbrauch sowie Leistung von Haushaltsgeräten [36][eigene] ... 61
Tabelle 34 Typische innere Fremdwärmeleistung für Wohnbauten [70] ... 62
Tabelle 35 Typische innere Fremdwärmeleistung für Nichtwohnbauten [13][eigene] ... 62
Tabelle 36 Bezugsquellen für Klimadaten ... 64
Tabelle 37 Erläuterungen zu den Regionen des Testreferenzjahres [66] ... 66
Tabelle 38 mittlere monatliche Außentemperaturen für 15 Regionen in Deutschland [13] ... 68
Tabelle 39 Typische Heizzeiten und mittlere Außentemperaturen je nach Heizgrenztemperatur [14][50] ... 68
Tabelle 40 Typische monatliche Strahlungsleistung [14] ... 74
Tabelle 41 Typische Globalstrahlung in der Heizperiode [50] ... 75
Tabelle 42 mittlere monatliche Windgeschwindigkeiten für 15 Regionen in Deutschland [13] ... 76
Tabelle 43 Energiebezugsflächen je nach Gebäudenutzungstyp [50][70][eigene] ... 79
Tabelle 44 Kompaktheitsgrad von Gebäuden [38][44][52][70][81] ... 80
Tabelle 45 Fensterflächenanteil von Gebäuden [38][44][52] ... 80
Tabelle 46 Schätzansätze zur Hüllflächenermittlung im Wohnbau [52] ... 81
Tabelle 47 Schätzansätze zur Hüllflächenermittlung im Nichtwohnbau [38] ... 81
Tabelle 48 Typische Bauweisen für Gebäude [24][44][50] ... 83
Tabelle 49 Mindestanforderungen an den baulichen Wärmeschutz bis zur EnEV [31][eigene] ... 83
Tabelle 50 Typische U-Werte für die Gebäudehülle [24][44][50] ... 86

Tabelle 51 Typische Temperaturkorrekturfaktoren [13][14][51] ... 87
Tabelle 52 Mindestanforderungen an den baulichen Wärmeschutz bis zur EnEV [31][eigene] ... 90
Tabelle 53 Typische Wärmedurchgangskoeffizienten für Fenster [13][44][50][51][52] ... 91
Tabelle 54 Typische Gesamtenergiedurchlassgrade für Fenster [13][44][50][51][52] ... 92
Tabelle 55 Typische wohnflächenbezogene Solarstrahlungsgewinne in der Heizperiode ... 92
Tabelle 56 Typische Gesamtenergiedurchlassgrade für Fenster mit Sonnenschutzmaßnahmen [13] ... 93
Tabelle 57 Pauschale Wärmebrückenzuschläge [13] ... 95
Tabelle 58 Typische Infiltrationsluftwechsel für die energetische Bewertung [13] ... 98
Tabelle 59 Typische Lichttransmissionsgrade für Gläser ohne Sonnenschutz [13] ... 101
Tabelle 60 Tag- und Nachtanteil an der Nutzungszeit [13][39][eigene] ... 102
Tabelle 61 Einsparpotential der Tageslichtnutzung – Teilkennwert für Sonnen- und Blendschutz [13] ... 103
Tabelle 62 Leistung verschiedener Beleuchtungssysteme [13] ... 105
Tabelle 63 Typische installierte Beleuchtungsleistungen nach Nutzung [20][39][47][76] ... 106
Tabelle 64 Einsparpotential durch eine Präsenzmeldung [13] ... 107
Tabelle 65 Typische effektive Betriebszeiten der Beleuchtung [20][39][47][76] ... 107
Tabelle 66 Typische installierte Beleuchtungsleistungen nach Nutzung [20][39][47][76] ... 108
Tabelle 67 Typische brennwertbezogene Nutzungsgrade für Heizkessel [15][16][50][51][76] ... 111
Tabelle 68 Typische Wirkungsgradverbesserungen durch Temperaturänderung [13] ... 113
Tabelle 69 Typische Arbeitszahlen für Wärmepumpen im Heizbetrieb [15][52][74][76] [eigene] ... 115
Tabelle 70 Typische exergetische Gütegrade für Wärmepumpen nach [13] ... 115
Tabelle 71 Typische Deckungsanteile für Wärmepumpen im Heizbetrieb [74] ... 116
Tabelle 72 Jahresnutzungsgrade für dezentrale Geräte zur Heizung [13][51][52][76] ... 116
Tabelle 73 Typische Hilfsenergien bei der Erzeugung der Heizwärme ... 117
Tabelle 74 Typische Verlustleistung für Heizwasserspeicher [15][70] ... 118
Tabelle 75 Typische Hilfsenergien bei der Speicherung des Heizwassers ... 119
Tabelle 76 Typische Speicherverluste im Wohnungsbau [15][52][70][eigene] ... 119
Tabelle 77 Standardleitungslängen für Heizwassernetze im Wohnungsbau nach IWU [50] ... 122
Tabelle 78 Standardleitungslängen für Heizwassernetze im Wohnungsbau nach DIN 4701 [15] ... 123
Tabelle 79 Standardleitungslängen für Heizwassernetze im Wohnungsbau nach BBSR Projekt [42] ... 123
Tabelle 80 Formeln für Gesamtleitungslängen Heizung, zentrale Netze [13] ... 124
Tabelle 81 Typische Verteilverluste für die Heizungsverteilung im unbeheizten Bereich [70] ... 126
Tabelle 82 Typische Hilfsenergien für Heizungspumpen ... 127
Tabelle 83 Auswirkungen der Übergabe und Raumregelung auf die Innentemperatur [13] ... 129
Tabelle 84 Teillastfaktoren für wassergekühlte Kompressionskältemaschinen [13] ... 135
Tabelle 85 Teillastfaktoren für luftgekühlte Kompressionskältemaschinen [13] ... 136
Tabelle 86 Nennwärmeverhältnis für Sorptionskältemaschinen [13][eigene] ... 137
Tabelle 87 Teillastfaktoren für luftgekühlte dezentrale Kältemaschinen [13] ... 138
Tabelle 88 Nennkälteleistungszahlen und Teillastfaktoren für Wärmepumpen im Kältebetrieb [13] ... 139
Tabelle 89 Korrektorfaktoren für die Jahresarbeitszahl aufgrund der Freikühlung [13] ... 139
Tabelle 90 Nennkälteleistungszahlen für die Grundwasserkühlung [13] ... 140
Tabelle 91 Teillastfaktoren für die Grundwasserkühlung [13] ... 140
Tabelle 92 Hilfsenergien für wassergekühlte Kompressionskältemaschinen [13] ... 140
Tabelle 93 Hilfsenergien für Sorptionskältemaschinen [13] ... 140
Tabelle 94 Typische Nutzungsgrade für Kältespeicher [13] ... 142
Tabelle 95 Speichereinfluss auf die Kältemaschineneffizienz [13] ... 142
Tabelle 96 Verteilungsnutzungsgrade für Kältenetze [13] ... 143
Tabelle 97 Typische Hilfsenergien für die Kalt- und Kühlwasserverteilung [13] ... 144
Tabelle 98 Übergabenutzungsgrade für Kälteanwendungen [13] ... 145
Tabelle 99 Hilfsenergieaufwand für die Übergabe von Kälte an den Raum [13] ... 145
Tabelle 100 Vor- und Nachteile der Systemvarianten für die Trinkwassererwärmung ... 147
Tabelle 101 Typische brennwertbez. Nutzungsgrade für Kessel zur Trinkwassererwärmung [44][51][70] ... 148
Tabelle 102 Typische Arbeitszahlen für Wärmepumpen im Trinkwarmwasserbetrieb [13][15][52][eigene] ... 151
Tabelle 103 Typische Deckungsanteile für Trinkwassererwärmung [13][15][70][eigene] ... 151
Tabelle 104 Jahresnutzungsgrade für dezentrale Geräte zur Warmwasserbereitung [15][51][70][76] ... 151
Tabelle 105 Jahresnutzungsgrade für Übergabestationen [51] ... 152
Tabelle 106 Abschätzung der Erträge von Solarthermieanlagen [7][76][eigene] ... 152
Tabelle 107 Typische Deckungsanteile für die solare Trinkwassererwärmung [13][15][eigene] ... 153
Tabelle 108 Typische Hilfsenergien bei der Erzeugung des Trinkwassers ... 153
Tabelle 109 Jährliche Wärmeverluste von Trinkwasserspeichern bei 45 K Temperaturdifferenz [15][16][69] ... 155
Tabelle 110 Typische Hilfsenergien bei der Speicherung des Trinkwassers ... 156
Tabelle 111 Typische Speicherverluste im Wohnungsbau [15][52][70] ... 157
Tabelle 112 Standardleitungslängen für Trinkwarmwassernetze im Wohnungsbau nach IWU [50] ... 159
Tabelle 113 Standardleitungslängen für Trinkwarmwassernetze im Wohnungsbau nach DIN 4701 [15] ... 159

Tabelle 114 Standardleitungslängen für Trinkwarmwassernetze im Wohnungsbau nach BBSR Projekt [42] 159
Tabelle 115 Formeln für Gesamtleitungslängen Trinkwarmwasser, zentrale Netze [13] 160
Tabelle 116 Formeln für Gesamtleitungslängen Trinkwarmwasser, dezentrale Netze [45] 161
Tabelle 117 Typische Verteilverluste und interne Wärmegewinne für die Trinkwarmwasserverteilung [70] 163
Tabelle 118 Typische Hilfsenergien für Zirkulationspumpen 163
Tabelle 119 Kennwerte für Blockheizkraftwerke [13][51][70][74][76][eigene] 166
Tabelle 120 Dämmung von Fernwärmeleitungen nach AGFW [55] 170
Tabelle 121 Längenbezogene Wärmenetzverluste [76][82] 171
Tabelle 122 Netzlänge nach Siedlungsstruktur [10][eigene] 172
Tabelle 123 Systemwirkungsgrade (incl. Einbausituation) für Photovoltaik [13] 175
Tabelle 124 Typische Kennwerte für Batterien [13][eigene] 175
Tabelle 125 Typische Gesamtdruckerhöhungen in Lüftungs- und Klimaanlagen [36] 180
Tabelle 126 spezifische Leistungsaufnahme von Ventilatoren [13][15][69] 181
Tabelle 127 Typische Energiekennwerte für die Luftförderung im Wohnbau [15][70] 182
Tabelle 128 Typische Energiekennwerte für die Luftförderung im Nichtwohnbau [38][39][eigene] 182
Tabelle 129 Standardlängen für Lüftungskanäle im Wohnungsbau nach DIN V 4701-10 [15] 183
Tabelle 130 Kennwerte für die Wärme- und Feuchterückgewinnung [13] 185
Tabelle 131 Deckungsanteile für Wohngebäude mit Luftheizung [44][eigene] 189
Tabelle 132 Zuordnung von Regelungsoptionen zu Automatisierungsgraden [13] 190
Tabelle 133 Typischer Stromaufwand der Automation im Automatisierungsgrad A [13] 191
Tabelle 134 Typische Kompressorleistung zur Kompensation von Druckluftleckagen [22] 192
Tabelle 135 Typischer Energieverbrauch (Kälte) für Kühl- und Tiefkühlgeräte [21] 192
Tabelle 136 Typischer Energieverbrauch für das Kochen [23] 193
Tabelle 137 Dampfverbrauch für Wäschereien [74] 193
Tabelle 138 Energieverbrauch bei der Altpapieraufbereitung je Altpapiergewicht [61] 194
Tabelle 139 Energiekennwerte für die Landwirtschaft [19] 194
Tabelle 140 Trendbeobachtung – Fehler und Ausreißer [46] 201
Tabelle 141 Trendbeobachtung – Nutzungsänderungen [46] 202
Tabelle 142 Geschichtlich und verordnungsrechtlich bedingte Änderungen des Baustandards 203
Tabelle 143 Geschichtlich und verordnungsrechtlich bedingte Änderungen des Technikstandards 203
Tabelle 144 Energieverbrauch MFH nach Energieträger und Art der Warmwasserbereitung [72] 204
Tabelle 145 Heizenergieverbrauch MFH nach Gebäudegröße, Energieträger und Baustandard [72] 204
Tabelle 146 Energieverbrauchskennwerte im Nichtwohnungsbau [2] 206
Tabelle 147 Teilenergiekennwerte nach VDI 3807-5 [76] 207
Tabelle 148 Empfehlungen für die Messwerterfassung [76][eigene] 216
Tabelle 149 Umrechnung für Flächen im Wohnbau [13][76][83][eigene] 261
Tabelle 150 Umrechnung für Flächen im Nichtwohnbau [2][76][83] 262
Tabelle 151 Schätzkosten Bausanierung, gerundet nach [37][53] 284
Tabelle 152 Schätzkosten Gebäudetechniksanierung [46] 285
Tabelle 153 Wartungsansätze und Lebensdauern 286
Tabelle 154 Annuitäten 289
Tabelle 155 Faktoren für Nachinvestition 290
Tabelle 156 Mittelwertfaktoren 290
Tabelle 157 Typische äquivalente Energiepreise für Modernisierungen im Wohnbau [Stand 2015] 292
Tabelle 158 Beispielwertanalyse Heizung – Problemstellung und zwei mögliche Lösungsalternativen 296
Tabelle 159 Beispielwertanalyse Heizung – Funktionen, die alle Lösungen erfüllen sollen 296
Tabelle 160 Beispielwertanalyse Heizung – Zusammenstellung der Kriterien für die Bewertung 297
Tabelle 161 Beispielwertanalyse Heizung – Bestimmung der Gewichtung aus der Sicht des Nutzers 297
Tabelle 162 Beispielwertanalyse Heizung – mittlere Gewichtung verschiedener Interessensgruppen 298
Tabelle 163 Beispielwertanalyse Heizung – Bestimmung der Erfüllungsgrade aus Nutzersicht 299
Tabelle 164 Beispielwertanalyse Heizung – mittlere Erfüllungsgrade verschiedener Interessensgruppen 300
Tabelle 165 Beispielwertanalyse Lüftung – Problemstellung und drei mögliche Lösungsalternativen 300
Tabelle 166 Beispielwertanalyse Lüftung – Zusammenstellung der Kriterien für die Bewertung 300
Tabelle 167 Beispielwertanalyse Lüftung – Bestimmung der Gewichtung nach gemeinsamer Diskussion 301
Tabelle 168 Beispielwertanalyse Lüftung – Bestimmung der Erfüllungsgrade der Alternativen 301
Tabelle 169 Auszüge der Kostenschätzung 314
Tabelle 170 Kostenkennwerte BKI 323
Tabelle 171 Instandhaltungskostenansätze 324