

Nicolei Beckmann

Energieeffizientes Bauen und wie es sich lohnt

Ein Ratgeber
für Bauherren



SACHBUCH

EBOOK INSIDE



Springer

Energieeffizientes Bauen und wie es sich lohnt

Nicolei Beckmann

Energieeffizientes Bauen und wie es sich lohnt

Ein Ratgeber für Bauherren



Nicolei Beckmann
Kaltenkirchen, Schleswig-Holstein
Deutschland

ISBN 978-3-658-28542-5 ISBN 978-3-658-28543-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-28543-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedient nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: ivanko80/stock.adobe.com

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Kurzfassung

Die Energieeffizienz im Bausektor ist ein komplexes und leider auch nicht ganz einfaches Thema für viele Bauherrinnen und Bauherren. Die Industrie überschüttet den Verbraucher mit Massen an Informationen und schlussendlich resultiert eine vollkommene Verwirrung. In dem vorliegenden Sachbuch nähern wir uns den elementaren Grundlagen der Bauphysik an und entwickeln gemeinsam Bewertungsverfahren, um ökonomische und ökologische Gewinne für den/die Hausbesitzer/in zu generieren. Wir werden feststellen, dass es unter gewissen Randbedingungen lohnenswert ist, effizienter als die Richtlinien es vorschreiben zu bauen. Neben den monetären Vorteilen entstehen ebenfalls positive Effekte für den Umweltschutz.

Am Ende jedes Kapitels haben wir gemeinsam Gleichungen entwickelt, mit denen wir in der Lage sind, individuelle Bauprojekte zu bewerten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlage	1
1.2	Bewertungsablauf	2
2	Energiebedarf Raumwärme und Warmwasser in Deutschland	5
3	Die Behaglichkeit	7
4	Ökologische Betrachtung	9
4.1	Pariser Klimaschutz-Übereinkommen	12
4.2	Die Nachhaltigkeit	13
5	Gesetzliche Rahmenbedingungen	17
5.1	Die Energieeinsparverordnung (EnEV) 2014 und die Verschärfung ab 2016	18
5.2	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG)	19
6	Verfahren zur Energieeffizienzberechnung	23
6.1	Physikalische Grundlagen der Wärmeübertragung	26
6.2	Klimatische Bedingungen	31
6.3	Jahresheizwärmebedarf für Wohngebäude nach der DIN V 4108-6	33
6.3.1	Ablauf der Analyse nach der DIN V 4108-6	34
6.3.2	Die Gebäudegeometrie	35
6.3.3	Transmissionswärmeverluste	37

VIII Inhaltsverzeichnis

6.3.4	Lüftungswärmeverluste	40
6.3.5	Referenzklima	42
6.3.6	Monatliche Wärmeverluste	42
6.3.7	Monatliche solare Wärmegewinne	43
6.3.8	Monatliche interne Wärmegewinne	48
6.3.9	Summation der monatlichen Wärmegewinne	49
6.3.10	Speicherfähigkeit des Gebäudes	49
6.3.11	Kombination der monatlichen Wärmeverluste, der Wärmegewinne und der Speicherfähigkeit des Gebäudes über den monatlichen Ausnutzungsgrad	50
6.3.12	Resultierender monatlicher Heizwärmeverbrauch	51
6.3.13	Jahresheizwärmeverbrauch	51
6.4	Jahresheizenergiebedarf DIN V 4701-10	52
6.5	Anforderung an den Mindestwärmeschutz DIN V 4108-2	53
6.6	Das Referenzhausverfahren	54
6.6.1	Maximaler Jahresprimärenergiebedarf	54
6.6.2	Maximaler spezifischer Transmissionswärmeverlust	55
7	Bewertungsverfahren	57
7.1	Ökonomische Bewertung	58
7.1.1	Statische ökonomische Bewertung	58
7.1.2	Dynamische ökonomische Bewertung	59
7.2	Das Betriebswirtschaftliche Optimum (BwO)	60
7.3	Ökologische Bewertung	60
7.4	Der Carbon Footprint (CF)	61
7.4.1	Das Carbon-Footprint-Optimum (CFO)	63
7.4.2	Der spezifische Carbon-Footprint für Strom	64
7.4.3	Der spezifische Carbon-Footprint für Erdgas	66
7.5	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	68
7.6	Übersicht spezifische Aufwendungen nach Energiequellen	70
7.7	Wechselwirkungsanalyse	70
7.8	Die Technologieanalyse	74

8	Unser Referenzhaus	77
9	Auswirkung Suffizienz	81
9.1	Tag- und Nachtabsenkung	82
9.2	Ökonomischer und ökologischer Effekt Tag- und Nachtabsenkung	86
10	Energiestandards im Bausektor	89
10.1	Der KFW-Standard	89
10.2	Das Passivhaus	92
10.3	Das Nullenergie und das Energieplushaus	92
10.4	Gegenüberstellung der Energiestandards	93
10.4.1	Kostenentwicklung	94
10.4.2	Beispiel Energiehausstandards	102
10.4.3	Fazit Energiestandards	109
11	Die Gebäudehülle	113
11.1	Gebäudeform und Ausrichtung	113
11.2	Fenster und Türen	115
11.2.1	Das Fensterglas	115
11.2.2	Der Fensterrahmen	116
11.2.3	Der Gesamtenergiedurchlassgrad	117
11.2.4	Berechnung Wärmeverlust Fenster	119
11.2.5	Ökonomische Bewertung Fenster	121
11.2.6	Ökologische Bewertung Fenster	125
11.2.7	Aussentüren	126
11.3	Wände, Decke und Böden	128
11.3.1	Wandaufbau	132
11.3.2	Ökologische Bewertung Aussenwandaufbau	135
11.4	Innenwandmaterialien	138
11.4.1	Ökonomische/Ökologische Bewertung Innenwände	141
11.4.2	Technologienanalyse Innenwand	144
11.5	Die Isolierung	147
11.5.1	Organische, natürliche Isoliermaterialien	149
11.5.2	Organische, synthetische Isolierstoffe	153
11.5.3	Anorganische, natürliche Isolierstoffe	154

X Inhaltsverzeichnis

11.5.4	Anorganische, synthetische Isoliermaterialien	155
11.5.5	Ökonomische/Ökologische Bewertung Isoliermaterialien	156
11.5.6	Analyse der optimalen Isolierungsstärke	159
11.6	Fazit Gebäudehülle	167
12	Das Belüftungssystem	169
12.1	Freie Lüftung	170
12.2	Zentrale Belüftungsanlage (ZBA)	174
12.3	Dezentrale Belüftungsanlage (DBA)	179
12.4	Ökologische Bewertung Lüftungsanlagen	182
12.5	Wann lohnt sich ökonomisch eine Belüftungsanlage?	184
12.6	Fazit Belüftungssysteme	186
13	Heizungssysteme	187
13.1	Wärmeübertragung	188
13.1.1	Wandkonvektoren	189
13.1.2	Fussbodenheizungen	189
13.1.3	Wand und Deckenheizungen	190
13.1.4	Betonkernaktivierungen	191
13.2	Ölheizung	191
13.3	Gasheizung	192
13.4	Solarthermie	193
13.4.1	Solarthermieanlage zur Warmwasserunterstützung	197
13.4.2	Solarthermieanlage zur Heizungsunterstützung	207
13.4.3	Saisonspeicher	209
13.4.4	Ökologische Bewertung Solarthermieanlage	211
13.4.5	Fazit Solarthermieanlage	213
13.5	Wärmepumpen	215
13.5.1	Der ideale Wärmepumpenprozess	215
13.5.2	Grundlage der Wärmepumpenberechnung	219
13.5.3	Wärmepumpentypen	222
13.5.4	Fazit Wärmepumpen	224
13.6	Pelletheizung	224

13.7	Fernwärme	227
13.8	Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	227
	13.8.1 Blockheizkraftwerk	230
	13.8.2 Brennstoffzelle	232
13.9	Heizen mit elektrischer Energie	235
13.10	Vergleich der Heizungssysteme	236
	13.10.1 Ökonomische Bewertung Heizungsanlagen	237
	13.10.2 Ökologische Bewertung Heizungsanlagen	241
	13.10.3 Wechselwirkung Heizungssysteme	245
13.11	Fazit Heizungssystem	246
14	Optimierung Referenzhaus	251
14.1	Optimierung der Gebäudeeigenschaften	252
	14.1.1 Gebäudegeometrie	252
	14.1.2 Bauteileoptimierung	253
	14.1.3 Fazit Gebäudeoptimierung	257
14.2	Einfluss der Heizungsanlage	257
15	Fazit	261
	Quellenverzeichnis	263
	Stichwortverzeichnis	267

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1	Das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit nach [3]	14
Abb. 6.1	Plakatives Beispiel Massen- bzw. Energiebilanz	24
Abb. 6.2	Temperaturverlauf in einer mehrschichtigen Wand	29
Abb. 6.3	Horizontale Bilanzgrenzen Gebäude	35
Abb. 6.4	Vertikale Bilanzgrenze Gebäude	36
Abb. 7.1	Zusammenhang zwischen Erst- und Betriebsaufwendungen	58
Abb. 7.2	CO ₂ -Emissionsfaktor Strommix, 2017 Hochrechnung nach [14], 2018 Prognose nach [14]; Anteil erneuerbare Energien nach [15]	65
Abb. 7.3	Qualitatives Lebenszyklusablaufdiagramm	71
Abb. 7.4	Interaktion Effizienzen nach [3]	71
Abb. 7.5	Systemvariablenabhängige Optima für die Wechselwirkungsanalys	72
Abb. 7.6	Einbindung Anlagenfaktor nach [3]	73
Abb. 7.7	Ergebnis der Wechselwirkungsanalyse nach [3]	74
Abb. 7.8	Technologieanalyse Isoliermaterialien nach [3]	76
Abb. 10.1	KfW-Energiestandards	91
Abb. 10.2	Kosten und Energieverbrauch gängiger Energiestandards	96
Abb. 10.3	Spez. Investitionskosten/Energieverbrauch, eigene Darstellung nach [22]	96
Abb. 10.4	Allokationsfaktor Teuerung (TZ-Faktor) nach [3]	101
Abb. 10.5	Allokationsfaktor Verzinsung (Z-Faktor) nach [3]	101
Abb. 10.6	Lebenszykluskosten basierend auf den Berechnungen (Inkludiert sind die KG 300 und KG 400 und die Energiewandlungskosten ohne Reparaturen, Reinvestitionen und Abnahmen)	109

XIV Abbildungsverzeichnis

Abb. 11.1	Einbauposition Fenster mit Verblendrahmen	117
Abb. 11.2	Wärmedurchgangskoeffizienten nach [26] in Anlehnung an die DIN ISO 10077-1 (Erweitert mit Recherchewerten zu neuen PVC-Rahmen)	118
Abb. 11.3	Energie- und Kostenverhältnis Fenster (Der Fensterdurchgangskoeffizient beruht auf ein Fenstermaß von 1,23 x 1,48 m (bxh) mit Rahmenbreiten von 0,118 m in der Breite und oben und 0,144 m unten. Der Randverbund hat einen Wärmeleitwert von 0,07 W/(mK))	120
Abb. 11.4	Vergleich Fensterkonfigurationen mir unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten	124
Abb. 11.5	Differenzkosten und Amortisationszeit warme Kante	125
Abb. 11.6	Ökologische Bilanz der unterschiedlichen Fensterkonfigurationen (Die unterschiedlichen Konfigurationen wurden über eine lineare Interpolation aus den Werten nach Ökobaudat.de berechnet. Sie dienen lediglich als Prognose)	128
Abb. 11.7	Idealisierter Wandaufbau	130
Abb. 11.8	Relative Luftfeuchte	132
Abb. 11.9	Prinzipieller Aufbau Wärmedämmverbundsystem (WDVS)	133
Abb. 11.10	Zweischaliges Mauerwerk mit Fingerspalt	135
Abb. 11.11	Flächenspezifische Werte Außenwandmaterialien	137
Abb. 11.12	Baugenehmigungen Wohngebäude 2018 mit einer Wohneinheit nach [28]	139
Abb. 11.13	Zusammenhang Dichte (Balken) und Wärmeleitwert (Strichlinie) Innenwandmaterialien	140
Abb. 11.14	Isolierkosten und Wärmedurchgangswiderstand	142
Abb. 11.15	Zusammensetzung Innenwand und Isolierung	143
Abb. 11.16	Ökonomische und ökologische Aufwendungen	146
Abb. 11.17	Technologieanalyse Innenwandmaterialien	147
Abb. 11.18	Notwendige Isolierstärke [m]	158
Abb. 11.19	Auswertung Isoliermaterialienm	161
Abb. 11.20	Spezifische Kosten und Isolierwerte in Abhängigkeit der Isolierstärke von Glaswolle (Die Werte entstammen gemittelten Recherchewerten. Die mathematische Funktionsbeschreibung wurde linear für eine Ausgleichsgrade erstellt)	162
Abb. 11.21	Faktorierte ökonomische und ökologische Werte über die Isolierstärke	164
Abb. 13.1	Tägliche Einstrahlleistung auf eine horizontale Fläche	194
Abb. 13.2	Tägliche solare Einstrahlleistung Potsdam	194
Abb. 13.3	Solare Einstrahlungsleistung bei unterschiedlichen Neigungswinkeln	196

Abb. 13.4	Abweichende Einstrahlleistung bei verändertem Azimut-Winkel	196
Abb. 13.5	Beispiel Solarthermieanlage Warmwasser	198
Abb. 13.6	Tagesbedarf Warmwasser nach der VDI 4655	199
Abb. 13.7	Tägliche solare Deckungsrate/Speicherstand	202
Abb. 13.8	Kostenverlauf Solarthermieanlage Warmwasser	206
Abb. 13.9	Rentabilität Solarthermieanlage Warmwasser (WW)	206
Abb. 13.10	Heizgradtage Potsdam	207
Abb. 13.11	Kosten Solarthermieranlage Warmwasser (WW) und Heizwasser (HW)	209
Abb. 13.12	Rentabilität Solarthermie Warmwasser (WW) und Heizwasser (HW)	210
Abb. 13.13	Tägliche solare Deckungsrate/Speicherzustand Warmwasser (WW) und Heizwasser (HW)	210
Abb. 13.14	Verteilung Treibhausgasemissionen Solarthermieanlage mit 9 m ² Fläche	212
Abb. 13.15	Ökologische Amortisationszeit Solarthermieanlage	213
Abb. 13.16	Schemata einer Wärmepumpe	216
Abb. 13.17	Idealisierter Kreisprozess einer Wärmepumpe	217
Abb. 13.18	Verhältnis Investitionskosten und Jahresarbeitszahl (JAZ) bei Wärmepumpen	226
Abb. 13.19	Sankey-Diagramm konventionelle Energieversorgung	229
Abb. 13.20	Sankey-Diagramm Kraftwärmekopplung (KWK)	229
Abb. 13.21	Lastverteilung Blockheizkraftwerk/Brennwerttherme	232
Abb. 13.22	Prinzipbild Brennstoffzelle	233
Abb. 13.23	Investitionskosten Heizungssysteme (Die Preisindikationen entstammen gemittelten Werten mehrerer Rechercheergebnisse. Zugehörige Anlagenkomponenten wurden eingebunden.)	238
Abb. 13.24	Jährliche Betriebskosten Heizungsanlagen	239
Abb. 13.25	Betriebseffizienz der Heizungsanlagen (Die Werte basieren auf den Aufwandszahlen der DIN 4701 sowie Internetrecherchen als Mittelwerte.)	240
Abb. 13.26	Gesamtkosten Heizungssysteme über 20 Jahre (Basierend auf statistischen Mittelwerten ohne zukünftige Preissteigerungen.)	241
Abb. 13.27	Treibhausgasemissionen Heizungssysteme	243
Abb. 13.28	Gesamte Treibhausgasemissionen Heizungssysteme über 20 Jahre	244
Abb. 13.29	Primärenergiebedarf Heizungssysteme	245
Abb. 13.30	Primärenergieaufwendungen über 20 Jahre	246
Abb. 13.31	Ergebnis Technologieanalyse Heizungssysteme	249

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Anforderungen EEWärmeG (Stand 2016)	20
Tab. 6.1	Wärmeübergangswiderstände Luft nach [11]	28
Tab. 6.2	Temperaturen Region 4 nach der DIN 18599-10 und der NASA	32
Tab. 6.3	Temperaturkorrekturfaktoren nach [9] Teil 1	38
Tab. 6.4	Temperaturkorrekturfaktoren nach [9] Teil 2	39
Tab. 6.5	Teilbeschattungswinkel F_0 für horizontale Überhänge nach [9]	44
Tab. 6.6	Teilbeschattungswinkel F_f für seitliche Abschattungen nach [9]	44
Tab. 6.7	Teilbeschattungsfaktor F_h für vertikale Vorbauten nach [9]	45
Tab. 6.8	Abminderungsfaktoren Sonnenschutzvorrichtungen F_c nach [9]	53
Tab. 6.9	Referenzgebäudewerte nach der EnEV	55
Tab. 6.10	Spezifische Höchstwerte Transmissionsverlust nach der EnEV	55
Tab. 7.1	Tabelle Endenergiewerte nach der DIN V 4701–10 und der EnEV 2016	69
Tab. 8.1	Energieeffizienzklassen nach der EnEV 2014	78
Tab. 9.1	Einfluss der temporären Temperaturabsenkungen. Regionen nach [18]; Durchschnittstemperaturen nach [12]	83
Tab. 9.2	Gebäude (A); Effekt NachtabSENKUNG	87
Tab. 9.3	Gebäude(B); Effekt NachtabSENKUNG	88
Tab. 10.1	Amortisationszeiten Energiestandards	98
Tab. 10.2	Berechnungsparameter Standardhaustypen	103
Tab. 10.3	Statischer Kostenvergleich Standardhäuser über eine Betriebslaufzeit von 30 Jahren (Die Ergebnisse basieren auf den Annahmen aus der Tab. 10.2 bezogen auf eine Betriebszeit von 30 Jahren)	105

XVIII Tabellenverzeichnis

Tab. 10.4	Dynamische Kosten Standardhäuser nach 30 Betriebsjahren im Vergleich (Die Ergebnisse basieren auf den Annahmen aus der Tab. 10.2 bezogen auf eine Betriebszeit von 30 Jahren)	107
Tab. 10.5	Sensitivitätsanalyse Zinsen	108
Tab. 10.6	Validierung der Teuerungsrate	110
Tab. 11.1	Typische A/V-Verhältnisse	114
Tab. 11.2	Berechnungswerte Fenster	117
Tab. 11.3	Fensterkonfigurationen und Preise	122
Tab. 11.4	Monatliche Temperaturdifferenz und spez. Heizarbeit	123
Tab. 11.5	Differenzsummen und Amortisationszeit	124
Tab. 11.6	Ökologische Belastungen Fenster	127
Tab. 11.7	Ergebnis ökologische Auswertung Fensterkonfigurationen	129
Tab. 11.8	Spezifische Werte Außenwandmaterialien	136
Tab. 11.9	Flächenspezifische Werte Außenwandmaterialien	136
Tab. 11.10	Spezifische Flächenwerte mit Randbedingungen Außenwand	138
Tab. 11.11	Grundlage Innenwandberechnung	142
Tab. 11.12	Kennwerte Innenwandmaterialien	144
Tab. 11.13	Auswertung Innenwände	145
Tab. 11.14	Faktorierte Eigenschaften Innenwand	146
Tab. 11.15	Berechnungsgrundlagen Isoliermaterialien	157
Tab. 11.16	Ökonomische Bewertung Isoliermaterialien	159
Tab. 11.17	Ökologische Eigenschaften Isoliermaterialien	160
Tab. 11.18	Berechnungsgrundlagen Isolierstärke	163
Tab. 12.1	Spezifische Luftwechselrate nach der DIN V 4701	170
Tab. 12.2	Monatlichen Wärmeverluste freie Lüftung	173
Tab. 12.3	Vergleich monatliche Lüftungswärmeverluste Fensterlüftung und ZBA mit WRG	178
Tab. 12.4	Ergebnis dezentrale Belüftungsanlagen (DBA)	181
Tab. 12.5	Grundlagen CO ₂ -Bewertung Lüftungsanlage	182
Tab. 12.6	Ergebnis LCA äquivalente Treibhausgasemissionen Lüftungssysteme	183
Tab. 12.7	Analyse Primärenergiebedarf ZBA und DBA	183
Tab. 13.1	Berechnungswerte Solarthermie	203
Tab. 13.2	Tabellarische Berechnung solare Deckung Warmwasser	205
Tab. 13.3	Solarthermieanlage Warmwasser (WW) und Heizwasser (HW)	208
Tab. 13.4	Ökologische Aufwendungen Solarthermieanlage	212
Tab. 13.5	Betriebspunkte für Wärmepumpen nach der DIN EN 14511	221
Tab. 13.6	Grundlage Vergleich Wärmepumpentypen	224
Tab. 13.7	Vergleich Wärmepumpentyp	225
Tab. 13.8	Allgemeine Randparameter Heizungsanalyse	237
Tab. 13.9	Ergebnisse Heizungssysteme in der Übersicht	247
Tab. 13.10	Faktorierte Kennwerte Heizungssysteme	248

Tab. 14.1	Gebäudeeigenschaften vor der Optimierung	252
Tab. 14.2	Verschiebung der Fensterflächen	253
Tab. 14.3	Wärmedurchgangskoeffizient Fenster optimiert	254
Tab. 14.4	Wärmedurchgangskoeffizient Eingangstür	254
Tab. 14.5	Austausch Klinker durch WDV-Putz	255
Tab. 14.6	Innenwände als Holzständerwerk	256
Tab. 14.7	Isolierungsanpassung	256
Tab. 14.8	Optimierung Wärmebrückenkorrekturwert und Außenluftwechselrate	257
Tab. 14.9	Zusammengefasste Ergebnisse Gebäudeoptimierung	258
Tab. 14.10	Ergebnisse Heizungsanlage auf den Primärenergiebedarf (Die Anlagenaufwandszahlen wurden über die DIN V 4701 bestimmt.)	259



1

Einleitung

1.1 Grundlage

Die Idee zu diesem Sachbuch entstand durch zahlreiche Rückfragen aus dem Bekanntenkreis, sobald diese sich häuslich niederlassen wollten. Im Bereich der Energieeffizienz gibt es so viele Varianten und Variationen, dass sich eine Abschätzung der Vor- und Nachteile von energieeffizienzsteigernden Maßnahmen für einen Bauherren oder eine Bauherrin als schwierig erweist.¹ Das vorliegende Sachbuch behandelt die bauphysikalischen Eigenschaften des winterlichen bzw. sommerlichen Wärmeschutzes, der Behaglichkeit und des Feuchtigkeitsschutz bei Neubauten und soll auf verständliche Weise dem Häuslebauer helfen, Maßnahmen zu bewerten. Besonderer Fokus wird auf die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Gebäudeausrichtung, Gebäudegeometrie, der Gebäudekomponenten und der Gebäudeanlagentechnik gelegt. Zwar schreibt die Gesetzgebung bereits umfangreiche Effizienzsteigerungsmaßnahmen vor, es stellt sich jedoch die Frage, wie weit diese getrieben werden können, sodass Vorteile für den Hausbesitzer und der Umwelt gewonnen werden. Die erzielten Erkenntnisse können indirekt auch auf Sanierungsmaßnahmen bei Bestandsgebäuden angewendet werden.

Eine Analyse der Fachliteratur, die sich mit dem Einfluss der Energieeffizienzsteigerung auf die Baukosten beschäftigt, bringt unterschiedlichste Aussagen hervor. Diese reichen von „geringer Einfluss der Effizienzmaßnahmen auf die

¹Im Folgenden werden wir von Bauherren sprechen, wo auch immer die Bauherrinnen einbezogen sein sollen.

Baukosten“ bis hin zu „Energieeffizienzmaßnahmen haben das Bauen extrem verteuert“. Zu empfehlen ist eine objektive Betrachtung der jeweiligen Quellen unter Berücksichtigung der Interessen der Autoren. Dass die Baukosten gerade in den letzten 10 Jahren deutlich angestiegen sind, ist dabei unumstritten. Das Energieeffizienzsteigerungsmaßnahmen Einfluss auf die Baukosten nehmen, ist grundsätzlich ebenso unstrittig, nur ist die Höhe der Preissteigerungen nicht bekannt. Es wäre falsch die explosionsartigen Kostensteigerungen des vergangenen Jahrzehnts einzig der Energieeffizienzsteigerung anzulasten. Die wachsende Nachfrage auf dem Wohnungsmarkt und die gestiegenen Rohstoffkosten haben ebenso ihren Anteil an den gestiegenen Kosten.

Die Mehrkosten und die ökologischen Mehraufwendungen durch die Energieeffizienzsteigerungsmaßnahmen müssen durch sinkende Betriebsaufwendungen wieder zu kompensieren sein. Als Schlüsselkompetenz wird dafür die Nachhaltigkeit über die kompletten Lebenszyklusphasen sowohl ökonomisch als auch ökologisch angesetzt. Eine Betrachtung von der Wiege bis zur Bahre (Cradle to Grave) ist erforderlich, damit es nicht zum sogenannten Leakage-Effekt² kommt. Für ein Verständnis der Nachhaltigkeit erfolgt eine kurze Definition des Begriffes im Abschn. 4.2.

Das vorliegende Sachbuch nutzt transparente, flexible Bewertungsverfahren. Neben den Beispielrechnungen und Datenquellen zu jedem Themenblock, liegt ein besonderer Fokus auf den entwickelten Bewertungsgleichungen, die wir individuell nutzen können. Somit können Sie die Werte Ihres Bauanbieters unter Ihren Randbedingungen implementieren und Ihren direkten Vorteil analysieren. Die in diesem Buch aufgeführten Berechnungen, Prognosen und eingesetzten Werte sind beispielhaft und sollten im individuellen Fall noch einmal geprüft werden.

1.2 Bewertungsablauf

Die offiziellen Berechnungen sind sehr aufwendig und erfordern einen großen Zeitaufwand. Obwohl ihre Berechtigung für eine umfassende Effizienzbewertung eines Gebäudes unumstritten ist, wollen wir die ökonomischen und ökologischen Bewertungen für den Bauherren deutlich vereinfacht gestalten. Kein Bauherr soll eine mehrwöchige Schulung benötigen, um die Sinnhaftigkeit von Effizienzmaßen bewerten zu können.

²Leakage-Effekt: Optimierungsmaßnahmen in einer Lebensphase sorgen für nachteilige Effekte in den vorgelagerten und/oder nachgelagerten Produktlebensphasen.

Daher setzen wir nicht auf eine komplette Bewertung des ganzen Gebäudes, sondern betrachten lediglich die zu untersuchenden Bauteile mithilfe der physikalischen Grundlagen. Diese werden im Abschn. 6.1 erläutert.

Nehmen wir als Beispiel die Isolierung der Außenwände: Wie stark sollte die Isolierung sein? Diese Frage sollte ohne eine komplette, mehrstündige Berechnung nach den geltenden Normen beantwortet werden können. Die jeweiligen Komponenten können durch den Bauherren analysiert und optimiert und somit vorausgewählt werden, anschließend sollte eine umfassende Analyse von einem Sachverständigen angesetzt werden.

Daher müssen wir den Berechnungsrahmen festlegen und das Bewertungsverfahren für unsere Komponenten definieren. Es erscheint einleuchtend, dass jeder Energieverlust durch Transmission oder Umwandlungsverluste ökonomisches und ökologisches Potenzial aufweist. Somit müssen die Verlustleistungen über unseren Energieträger mit den (ökonomischen und ökologischen) Erstaufwendungen ins Verhältnis gesetzt werden. Ist die Verlustaufwendung über einen Zeitraum größer als die Erstaufwendung, sollte die Erstaufwendung gesteigert werden.

Schauen wir uns ein kleines Beispiel zur besseren Verständlichkeit an:

Sie verlieren über eine spezifische Oberfläche ihres Hauses im jährlichen Durchschnitt $200 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Betrachten wir einen Zeitraum von 20 Jahren für die Außenisolierung, dann sind es bereits 4 MWh/m^2 , die Sie an Transmission an die Umgebung verlieren. Heizen Sie mit Gas (ca. 8 ct/kWh; Stand 04/2019), so haben Sie ein Kapital von 320 € pro Quadratmeter Oberfläche zur Verbesserung (die Angaben beziehen die jährlichen Preissteigerungen des fossilen Brennstoffes nicht mit ein). Damit Sie das volle ökonomische Potenzial auch wirklich ansetzen können, müsste der Energieverlust jedoch auf null sinken und das ist physikalisch leider nicht möglich. Wir benötigen Gleichungen, die den Schnittpunkt der Einsparung und der Aufwendung definieren.

Da diese in Abhängigkeit zu der Art des Energieverlustes stehen, werden wir für jede Betrachtung die passenden Berechnungsverfahren entwickeln, sodass Sie zum Schluss nur noch Ihre Werte einfügen müssen. Anschließend können Sie dem Bauträger recht schnell darlegen, warum Sie einzelne Verbesserungen vorsehen möchten.



2

Energiebedarf Raumwärme und Warmwasser in Deutschland

Der Gebäudesektor ist für rund 40 % des europäischen Energiebedarfs verantwortlich. Somit muss ein zentraler Aspekt der Energiewende eine deutliche Reduktion der Primärenergie sein. In Deutschland wurden 2016 für die Raumwärme ca. 2.562,3 Petajoule verbraucht. Das entspricht 28 % des gesamten Primärenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland. In privaten Haushalten werden ca. 69 % der Endenergie für die Raumwärme aufgewendet. Zweitgrößter Energieverbraucher ist die Warmwasseraufbereitung mit ca. 16 %. Die restlichen 15 % verteilen sich absteigend nach dem Anteil auf Haushaltsgeräte, Information- & Kommunikationsgeräte und Beleuchtung.

Die Energieeffizienz im Gebäudesektor hat sich seit 1987 zwar deutlich verbessert, dennoch verursachte allein der Energieaufwand für die Warmwasseraufbereitung in 2016 ca. fünf Prozent des Jahresenergieverbrauchs der Bundesrepublik.¹

Energien werden je nach Ihrem Umwandlungsgrad unterschiedlich deklariert. Damit in den folgenden Abschnitten deutlich ist, von welcher Energieform wir sprechen, werden die wichtigen Begrifflichkeiten im Folgenden einmal vorgestellt:

Nutzenergie hierunter wird die tatsächlich benötigte Energie in ihrer finalen Form bezeichnet. Als Beispiel lässt sich die Raumwärme heranziehen. Bei einer gewünschten Innenraumtemperatur entspricht die Nutzenergie der

¹Vgl. [1].

Wärmemenge, die zum Halten der Temperatur dem Raum zugeführt (oder abgeführt) werden muss.

Natürlich nehmen interne Energiequellen (Personen, Geräte etc.), externe Energiequellen (solare Einstrahlung durch transparente Baukörper) sowie Energiesenken (Transmissionsverluste, Lüftungsverluste) Einfluss auf die benötigte Nutzenergiemenge.

Endenergie besteht aus der Nutzenergie plus den Energieverlusten der Anlage bei der Energiewandlung, Speicherung, Verteilung und Übergabe. Beispielhaft kann die chemische Umwandlung durch eine exotherme Oxidation (Verbrennung) des Brennstoffes im Heizwertkessel und die auftretenden Verluste herangezogen werden.

Primärenergie bezeichnet die Energiemenge, die aufgebracht werden muss, um den Energieträger zur Verfügung zu stellen. Somit sind Verluste durch die Förderung, Aufarbeitung und durch die Distribution eingebunden in die Primärenergie. Ein sehr umfangreiches Beispiel ist der Energieträger Heizöl. Am Anfang muss das Erdöl lokalisiert, gefördert, rektifiziert und mehrfach transportiert werden. Diese Prozessschritte benötigen Energien, die der spezifischen Einheit zugerechnet werden müssen.²

²Vgl. [2].



3

Die Behaglichkeit

In unserem Zuhause wollen wir uns sicher und gut aufgehoben fühlen. Die Wissenschaft hat für das körperliche Wohlergehen in einem Gebäude den Begriff der Behaglichkeit eingeführt. Obwohl das Wohlfühlen ein individuelles, subjektives Gefühl ist, gibt es Richtwerte, die für einen Großteil der Bevölkerung angenommen werden können. Aus energietechnischer Sicht wäre ein unbeheiztes Gebäude mit einer freien kontinuierlichen Belüftung anzustreben, jedoch würden diesen Zustand nur sehr wenige Personen als besonders behaglich beschreiben. Somit müssen einige Randbedingungen eingehalten werden, um das Leben in einem Gebäude angenehm zu gestalten.

Zentrale Inhalte der direkten Behaglichkeit sind:

- die Raumtemperatur (diese ist variabel nach der Art der Aktivität und Kleidung der Personen im Raum)
- die Luftfeuchtigkeit (die relative Luftfeuchtigkeit sollte zwischen 30–65 % liegen)
- die Temperaturgradienten im Raum (von Kopf bis Fuß sollten 4 °C nicht überschritten werden)
- die Bodentemperatur
- die Luftströmungsgeschwindigkeit im Raum (max. 0,2 m/s)
- die asymmetrischen Strahlungen (diese entstehen durch unterschiedliche Oberflächentemperaturen)
- die Luftqualität

Grob lässt sich sagen, dass der Mensch sich behaglich fühlt, wenn seine Wärmeabgabe im Gleichgewicht mit seiner produzierten Wärmemenge liegt, ohne das Ausgleichsverfahren vom Körper durchgeführt werden müssen (z. B. Schwitzen oder Frieren). Beim Schwitzen wird die Wärmeabgabe durch die Verdunstungskälte erhöht. Diese entsteht, wenn Wasser aus dem flüssigen in den gasförmigen Zustand wechselt. Beim Frieren werden die Muskelaktivitäten angeregt, die daraus resultierende Wärme wirkt der Kälte entgegen.

Ein Mensch produziert bei gemäßiger Aktivität ungefähr 100 W. Die Wärmeabgabe kann bei sehr schwerer körperlicher Arbeit auch die 300 Watt-Grenze durchbrechen. Sie ist unabhängig von Alter, Jahres- und Tageszeit, Nationalität, selbst vom Geschlecht. Die Wärmeabgabe erfolgt als Konvektions- und Strahlungswärme, die Abgabe von Luftfeuchtigkeit geschieht durchs Schwitzen und Atmen. Der Verteilungsgradient zwischen den Wärmeabgaben variiert mit Höhe der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit.

Die Luftqualität kann neben dem menschlichen Sauerstoffverbrauch ebenfalls durch seine natürlichen Geruchsstoffe, künstliche Belastungen durch menschliche Aktivitäten (Kochen, Rauchen, usw.) sowie der Raumausstattung (Möbel, Teppich, ...) beeinflusst werden.

Eine homogene Temperatur über die Raumschichten durch eine geschickte Anordnung der Heizflächen und der Luftzuführungen zu erreichen, steigert die Behaglichkeit deutlich. Ebenfalls wurde in Studien rausgefunden, dass einzig die Möglichkeit der Einflussnahme auf die Raumkonditionen z. B. durch eine manuelle Fensteröffnung einen positiven Effekt auf das Wohlbefinden hat. Auch wenn das Gebäude eine umfangreiche Raumlufttechnische Anlage (RLT-Anlage) aufweist.

Des Weiteren ist die Behaglichkeit von dem Wärmeindrückoeffizienten b abhängig. Dieser beschreibt die Materialeigenschaften, wenn diese berührt werden, also ein spürbares Phänomen. Je langsamer die Wärme von unserem Körper in das Material abgeführt wird, desto angenehmer empfinden wir diesen Werkstoff (der Effekt dreht sich jedoch in dem Moment um, wenn wir Wärme im Sommer abgeben möchten).

Als Beispiel stellen Sie sich vor, dass Sie auf zwei unterschiedlichen Fußbodenmaterialien mit identischer Temperatur stehen. Auf der einen Seite besteht die Oberfläche aus Stein und auf der anderen Seite aus Holz. Die Wärmeleitfähigkeit von Stein ist deutlich höher und somit ist die wärmebezogene Wahrnehmung bei identischen Temperaturen unterschiedlich.



4

Ökologische Betrachtung

Der ökologische Gedanke hat in den vergangenen Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Der Begriff der Ökologie leitet sich aus dem Altgriechischen her und bedeutet übersetzt die Lehre vom Haushalt. Wir befinden uns in einem empfindlichen Gleichgewicht mit der Natur und dem Kreislauf zwischen Entnahmen und Rückgaben. Natürliche Regenerationszeiten wurden in den vergangenen 150 Jahren durch uns Menschen immer stärker missachtet. Daraus resultieren zahlreiche Umweltprobleme, vor denen wir heute stehen und die auch die nachfolgenden Generationen weiter bewältigen müssen.

„Das Umweltbewusstsein der Weltbevölkerung hat sich in den vergangenen Jahrzehnten deutlich weiterentwickelt. Besonders in den Industrieländern hat die Wertschätzung einer intakten Natur deutlich an Stellenwert gewonnen, obwohl gerade die Industrieländer für einen Großteil der Umweltaufwendungen verantwortlich sind. Die Steigerung des Wertes resultiert aus drastischen Ereignissen, die teilweise katastrophale Auswirkungen angenommen haben. Ressourcenknappheit inkl. Trinkwassermangel, Bodenerosionen durch den Landnutzungswandel, übermäßige Eutrophierung, Versauerung der Weltmeere, Abbau der Biodiversität und der Klimawandel sind nur einige Folgen des direkten oder indirekten anthropogenen Handelns.“[3]

Wir sind auf ein funktionierendes Ökosystem angewiesen, auch wenn einige Personen der Weltpolitik konsequent die ökologischen Folgen ignorieren, ja sogar leugnen. Das sich unser Wetter verändert, die Polkappen schmelzen, Kunststoffe und Dioxine in vielen Spezies bereits nach-

gewiesen sind und Artensterben ein globales Vorkommen ist, kann ohne Zweifel belegt werden.¹

Sobald wir über Ressourcenbedarf sprechen, müssen wir auch immer den Aspekt der Umweltaufwendungen berücksichtigen. Ein Wohngebäude benötigt eine Menge an Ressourcen, die in unterschiedlichster Form eingebunden werden. Der Ressourcenbedarf beginnt bereits in der Planung und endet erst nach einem vollständigen Recycling aller eingebrachten Elemente. Dabei ist es schwierig, die aufgewendeten Ressourcen aufgrund ihrer Vielzahl gemeinsam zu bewerten. Der Ressourcenverbrauch sollte dem Verursacher direkt zugeordnet werden und dieser müsste für einen äquivalenten Ausgleich sorgen. Eine Möglichkeit wäre eine monetäre Ausgleichszahlung, die für Gegenmaßnahmen eingesetzt wird. Jedoch sind einige Ressourcen *kostenfrei* verfügbar und werden daher unbedacht verbraucht. Als Beispiel zu benennen sind Luft, Wasser und Treibhausgase. Wir können Luft und Grundwasser verbrauchen, Treibhausgase erzeugen ohne dafür direkt zu bezahlen. Diese Aufwendungen werden für spätere Generationen jedoch aufwendig zu kompensieren zu sein, um ein Gleichgewicht wieder herzustellen.

„Der Wert der Umwelt ist elementar für das menschliche Handeln und kann nicht so einfach in monetären Einheiten beziffert werden. Der Umgang mit den vorhandenen Ressourcen muss auch aus ökonomischer Weitsicht nachhaltig sein.“ [3]

In den folgenden Abschnitten werden wir zwei Umweltbelastungen in unsere Bewertungen einbinden, um den Gedanken der Nachhaltigkeit aufzugreifen. Das Ziel unserer Bewertungen wird nicht ein Ausgleich der Umweltbelastungen sein, sondern die Ressourcenreduktion über den Lebenszyklus des Wohngebäudes. Denn der beste und sauberste Ressourceneinsatz entsteht durch eine konsequente Vermeidung der jeweiligen Ressourcennutzung.

Der Einsatz von Primärenergie verursacht eine große Bandbreite an Umweltaufwendungen. Darunter fallen etliche toxische Produkte aus dem Rohstoff oder der Energiewandlung, emittierte Treibhausgase bei der Reaktion und die Zerstörung von Ökosystemen für die Bergung der Rohstoffe. Daher werden wir mit dem Kumulierten Energieeinsatz (KEA) den Primärenergieeinsatz bewerten. Als zweite Aufwendung erfolgt die direkte Bewertung der emittierten Treibhausgasemissionen. Aufgrund der aktuellen

¹Vgl. [4]; Vgl. [5]; Vgl. [6].

Prägnanz ist eine Reduktion der Treibhausgasaufwendungen eine der Herausforderungen der heutigen Zeit. Der Klimawandel wird das Leben zukünftiger Generationen stark beeinflussen. Um den Effekt der Treibhausgase auf unser Klima verstehen zu können, begeben wir uns im folgenden Kapitel auf eine kurze Exkursion.

Die Treibhausgase und der Treibhauseffekt

Als Treibhausgase (THG) werden infrarotaktive Spurengase bezeichnet. Sie sind bereits seit Millionen von Jahren auf diesem Planeten vorhanden und mitverantwortlich für die notwendigen Bedingungen für die Entwicklung von Leben auf diesem Planeten. Ebenso waren sie aber auch schon verantwortlich für den Untergang von ganzen Spezies. In der Geschichte der Erde hat sich das Klima immer wieder drastisch verändert: Hitzewellen, Eiszeiten und Zeiten von gemäßigten klimatischen Bedingungen wechselten sich ab. Der serbische Astronom Milutin Milankovic entdeckte mit den annähernd zyklischen Laufbahnen der Sonne und Erde, bzw. die Veränderung der Erdachsenstellung, einen Zusammenhang zwischen den Klimaextremen. Seit ca. 11.700 Jahren erlebt die Erde eine gemäßigte Bedingung mit einem stabilen Klima. Ohne ein Einwirken des Menschen, würde dieses stabile Klima noch lange andauern.

Die Sonne schickt uns kurzwellige solare Strahlungen, welche von der Erdoberfläche teilweise aufgenommen oder reflektiert werden. Die Treibhausgase absorbieren die langwelligen Strahlungen, die von der Erde zurück in den Weltraum reflektiert werden. Die Spurengase erwärmen sich dabei und strahlen ein Teil der Wärmeenergie wieder auf die Erde zurück. Somit erhöht sich die Gesamteinstrahlleistung wie in einem Treibhaus (Gartengewächshaus). Anschließend entstehen mehrere Kettenreaktionen. Die Albedo (Reflexionsleistung) der Erde verschlechtert sich durch die abnehmenden Schnee- und Eismassen. Durch die höheren Temperaturen nimmt der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre zu und Wasserdampf ist ebenfalls ein Klimagas. Die Wasser-oberflächentemperaturen steigen an und warmes Wasser kann weniger Kohlendioxid binden, usw. Die Wechselwirkungen sind sehr komplex und zur Höhe der Auswirkungen besteht weiterer Forschungsbedarf, dass es jedoch einen negativen Effekt haben wird, ist unstrittig.²

Der Mensch produziert seit der Industrialisierung deutlich mehr Treibhausgase als im gleichen Zeitraum auf natürlichen Wegen der Atmosphäre entzogen werden. Dieses anthropogene Handeln basiert zum größten Teil auf die Energieerzeugung durch den Einsatz von fossilen Brennstoffen, in denen der Kohlenstoff gebunden war.

„Hinter dem Begriff der anthropogenen Treibhausgasemissionen bezeichnet man Emissionen, die durch das menschliche Handeln auf dieser Welt hervorgerufen werden. Dabei werden die Treibhausgasemissionen auf den bekanntesten Vertreter, das Kohlendioxid, normiert. Unter dem Begriff „Kohlendioxid-äquivalente Emissionen“ werden die Hauptkomponenten

²Vgl. [7].

Kohlendioxid, Methan, Lachgas und unterschiedlichste Fluor- (Chlor-) Kohlenwasserstoffe zusammengefasst.“[3]

„Dem Verbraucher ist häufig nicht bewusst, dass mit fast jedem Produkt Treibhausgasemissionen direkt oder indirekt in Verbindung stehen. Treibhausgase werden nicht nur beim Betrieb emittiert, sondern auch bei der Rohstoffgewinnung, der Herstellung, der Distribution und dem Recycling. Eine reine Betrachtung der Betriebseffizienz kann also zu deutlichen Fehlinterpretationen bei der Bewertung einer Anlage führen! Dieses Bewusstsein muss dem Verbraucher verdeutlicht werden, um die Akzeptanz von Umweltschutzmaßnahmen weiter auszubauen.“[3]

4.1 Pariser Klimaschutz-Übereinkommen

Im Dezember 2015 haben 194 Staaten den Vertrag zum Klimaschutz (Paris Agreement) unterzeichnet. Die Vertragspartner verpflichteten sich zu Präventionsmaßnahmen damit die globale Klimaerwärmung auf 2 °C begrenzt wird. Dieses ehrgeizige Ziel, die Begrenzung der Klimaerwärmung, soll nach Möglichkeit auf 1,5 °C weiter verschärft werden. Konkrete Maßnahmen der einzelnen Vertragsteilnehmer zum Klimaschutz sind nicht definiert worden.

Das Pariser Klimaschutz-Übereinkommen ist das zweite internationale Abkommen nach dem Kyoto-Protokoll von 1997, welches aber erst acht Jahre nach der Unterzeichnung in Kraft trat. Aus der Geschichte ist ein zögerliches Handeln durch die Politik beim Umweltschutz quer durch alle Länder und Regierungsparteien festzustellen. Bereits 1975 erkannte W.D. Nordhaus, dass eine Klimaerwärmung unausweichlich ist und diese auf 2 °C begrenzt werden muss. Vierzig Jahre nach dieser Aussage gibt es ein Übereinkommen zur Temperaturbegrenzung. Seitdem haben sich einige Nationen schon wieder von ihren Zusagen distanziert, teils weil sie wirtschaftliche Nachteile befürchten.³ Dass die wirtschaftlichen Kosten lediglich externalisiert und zeitlich verschoben werden, wird dabei ignoriert.

Jede Nation darf eigene Konzepte zum Erreichen des 2 °C-Ziels entwickeln und diese den Vereinten Nationen (UN) vorstellen. Die UN hat anschließend die Funktion der Überwachung, ob diese auch konsequent umgesetzt werden und den gewünschten Erfolg erreichen. Letztlich kann ein Ausweg aus der Kohlendioxidkrise nur über eine langfristige

³Vgl. [8].

Dekarbonisierung realisiert werden. Dies bedeutet den kompletten Verzicht auf den Einsatz von fossilen Energieträgern.

Die Europäische Union (EU) setzt auf eine deutliche Senkung des Primärenergiebedarfs in mehreren Stufen. Besonders große Einsparpotenziale liegen laut der EU im Verkehrs- und Gebäudesektor. Durch europäische Gesetze und Richtlinien werden die EU-Mitglieder aufgefordert, die Einsparungsmaßnahmen in nationales Recht zu transferieren.

Deutschland setzt auf die Energiewende, um die europäischen Klimaziele zu erreichen. Auf dem Weg zur Klimaneutralität im Jahr 2050 wurden dafür Meilensteine gesetzt, an denen die Umsetzung gemessen werden soll:

- *Der Primärenergieverbrauch soll bis 2050 auf 50 % gegenüber 2008 gedrosselt werden. Als Zwischenhürde ist eine Drosselung um 20 % bis 2020 angegeben.*
- *Gegenüber 1990 soll die Energieproduktivität bis 2020 verdoppelt werden. Anschließend soll sie bis 2050 jährlich um 2,1 % steigen.*
- *Der Energiebedarf im Verkehrssektor soll gegenüber 2005 um 40 % bis 2050 gesenkt werden. Bis 2020 sollen bereits 10 % erreicht werden.*
- *Die jährliche Gebäudesanierungsrate soll verdoppelt werden.*
- *Eine Senkung des Strombedarfs um 25 % soll bis 2050 erfolgen. Als Zwischenziel wurden 10 % bis 2020 festgelegt.*
- *Der Energiebedarf für Gebäude soll um 80 % bis 2050 abgesenkt werden. Bis 2020 sollen es bereits 20 % sein. [3]*

Ob diese Maßnahmen bereits ausreichen, um den Temperaturanstieg auf 2 °C zu beschränken, ist noch nicht gewiss. Andernfalls sind weitere Handlungen erforderlich. Derzeit verdichten sich die Aussagen, dass sich die Zwischenziele der Bundesregierung für 2020 nicht mehr realisieren lassen. Somit würde die Bundesrepublik Deutschland, die eine zentrale Position in der europäischen Union aufweist, bereits 2020 unter Zugzwang stehen. Bewahrheitet sich diese Befürchtung, dann wäre das ein negatives Signal für die anderen UN-Staaten.

4.2 Die Nachhaltigkeit

Die Dimensionen der Nachhaltigkeit bieten Strategien, um einen übermäßigen Ressourcenverbrauch zu vermeiden und damit die entstandenen Probleme auf der Welt nicht weiter zu vergrößern, evtl. sogar

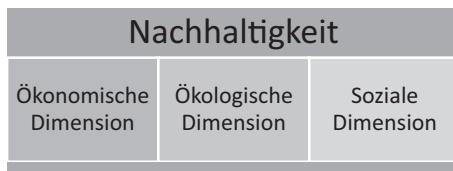


Abb. 4.1 Das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit nach [3]

zu lindern. Unter den Ressourcen sind nicht nur materielle, sondern auch soziale Werte zu verstehen.

Auf den drei Säulen der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimensionen basiert der Gedanke einer umfassenden Nachhaltigkeit (siehe Abb. 4.1). Die Aufmerksamkeit unserer Betrachtungen soll auf den beiden ersten Dimensionen liegen. Eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige Dimensionierung sorgt für niedrige Kosten und möglichst geringe Umweltaufwendungen über den kompletten Lebenszyklus einer Komponente.

Nachhaltigkeit ist durch drei Strategien zu erreichen. Diese lauten Effizienz, Suffizienz und Konsistenz.

Die **Effizienzstrategie** betrachtet ausschließlich die Leistungsfähigkeit während der Betriebsphase: Also die Effizienz bei der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie oder eine Reduktion der Verluste während der Betriebsphase. Durch eine ausschließliche Betrachtung der Betriebsphase können folgende Effekte entstehen:

- **Reboundeffekt:** Verbessert sich die Effizienz einer Komponente und sinkt damit der Betriebskostenpreis, dann kann das zu einem deutlich höheren Einsatz/Verbrauch führen. Als Beispiel können wir die spezifische Wohnfläche pro Person anführen. Sinken die Betriebskosten und evtl. auch noch die Investitionskosten, dann werden die spezifischen Wohnflächen pro Person ansteigen. Das kann die Einspareffekte kompensieren oder gar umkehren.
- **Wachstums-/Mengeneffekt:** Beschreibt, dass die Ressourcenentnahme zwar reduziert wird, sich die Zeitspanne bis zu einer völligen Erschöpfung der Ressourcen jedoch so nur verlängert. Das verschiebt die Problematik auf einen späteren Zeitpunkt und trägt nicht direkt zu einer Lösungsfindung bei. Ein alltägliches Beispiel ist der Einsatz von fossilen Energien. Deren Endlichkeit ist bekannt und trotzdem basieren viele neue Technologien weiterhin auf dem Einsatz dieser Energien.
- **Leakageeffekt:** Beim Leakageeffekt kommt es zu einer Verschiebung der Ressourcenaufwendungen auf nach- oder vorgelagerte Lebensphasen.

So kann ein Gebäude mit meterstarken Isolierungen versehen werden, was den Energiebedarf während der Betriebsphase extrem reduzieren würde. In der Herstellung und dem Recycling wären aber extreme Aufwendungen notwendig. Der Leakageeffekt lässt sich nur durch eine komplette Bewertung über alle Lebensphasen verhindern.

Suffizienzstrategie: Diese setzt beim Verbraucher an und nimmt Einfluss auf das humane Handeln. Nach der Suffizienzstrategie soll sich auf das wirklich notwendige beschränkt werden. Sie beschreibt eine Abkehr von der Konsumgesellschaft hin zu einer bewussten Nutzung von Energien und Gütern. Die Suffizienzstrategie muss dabei nicht als eine Rückkehr zu „alten Zeiten“ verstanden werden, vielmehr liegt es am Verbraucher selbst, wie strickt er diese Strategie einsetzt. Auch kleine bewusste Entscheidungen können in der Summe großen Einfluss haben, hierzu finden Sie im Kap. 9 einige Beispiele.

Konsistenzstrategie: Die Königsdisziplin ist die Konsistenzstrategie, welche lediglich nur die Ressourcennutzung erlaubt, die sich im gleichen Zeitraum regenerieren. Das bedeutet, dass so viel Energie oder Material genutzt werden darf, wie regenerativ nachgebildet wird. Das wäre für die Welt mit endlichen Ressourcen zwar das Optimum, jedoch würde das komplette Weltwirtschaftssystem einstürzen.



5

Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die gesetzlichen Anforderungen an den Bausektor sind vielseitig und haben sich über Jahrzehnte weiterentwickelt. Daher fällt es schwer, einen Überblick über die Verantwortlichkeiten und Zusammenhänge zu behalten. Für ein besseres Verständnis erfolgt ein Blick in die Historie zum gesetzlichen Mindestwärmeschutz im Hochbau. Der Begriff Hochbau beschreibt alle Baukörper, die sich mehrheitlich oberhalb der Erdoberfläche befinden, als Gegenpart zum Tiefbau.

Die erste Wärmeschutzverordnung (WSVO) entstand in Deutschland als Reaktion auf die erste Ölkrise 1973/74. Sie trat 1977 infolge des 1976 beschlossenen Energieeinspargesetzes (EnEG) in Kraft und wurde 1982 sowie 1995 durch überarbeitete Versionen verschärft. Ziel der Wärmeschutzverordnungen war eine Reduzierung der Abhängigkeit von volatilen Energiequellen und die Reduktion der anthropogenen Umweltemissionen.

Im Jahr 2002 löste die Energieeinsparverordnung (EnEV) die WSVO ab. Die EnEV kombiniert die Wärmeschutzverordnung unter Einbezug der Heizungsanlagenverordnung (HeizAnlV) und dient als Planungswerkzeug für eine ganzheitliche Energiebedarfsermittlung. Zeitgleich entstand die europäische Gebäuderichtlinie (EPBD), die anschließend als gesetzliche Grundlage für die überarbeitete EnEV diente. Seitdem ist die EnEV in der fünften Fassung (EnEV 2014) erschienen und 2020 soll bereits die nächste Version erscheinen. Jede Novellierung brachte eine Verschärfung der Anforderung mit sich, was neben einer umfangreichen Gebäudeisolierung auch eine komplexere Anlagentechnik erforderte.

Die EnEV gilt für alle Gebäude, die unter dem Einsatz von Energie wärm 技术isch versorgt werden. Besondere Ausnahmen sind zwar vorhanden, lassen sich aber nicht auf reguläre, dauerhaft bewohnte Gebäude beziehen. Nichtwohngebäude mit einer durchschnittlichen Raumtemperatur unter 19 °C können von den Anforderungen der EnEV ausgenommen werden. Der Nachweis über die Einhaltung der EnEV muss bereits mit dem Bauantrag eingehen. Alle Maßnahmen müssen dazu benannt sein und anschließend auch umgesetzt werden. Eine stichprobenhafte Kontrolle der Umsetzung durch die lokalen Behörden ist seit 2014 möglich.

Zusammengefasst sind aktuell das Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG), das Energieeinspargesetz (EnEG) und die Energieeinsparverordnung (EnEV) auf nationaler Ebene bindend. Das EEWärmeG reguliert die Einbindung von regenerativen Energien in neue Systeme. Das EnEG definiert Effizienzparameter für Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen und die EnEV liefert Mindestisolierwerte für die Gebäudehülle und bestimmt Mindesteffizienzen der Anlagentechnik.

Die unterschiedlichen Gesetze und Verordnungen sollen ab 2020 in einem Gesetz, dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) zusammengeführt werden.

5.1 Die Energieeinsparverordnung (EnEV) 2014 und die Verschärfung ab 2016

Grundlage der EnEV 2014 ist die novellierte Europäische Richtlinie zur Gebäudeenergieeffizienz von 2010 und die beschlossenen Inhalte zur Energiewende von der Bundesregierung aus dem Jahr 2011. Bereits die EnEV 2009 hatte den maximal zulässigen Energiebedarf über ein Referenzhaus für die Bewertung des Bauprojektes sowie maximale Wärmedurchgangskoeffizienten (siehe Abschn. 6.1) für Komponenten in der Außenhülle vorgeschrieben. Dies ist auch in der EnEV 2014 erhalten geblieben. Seit der EnEV 2009 dient zur Berechnung des Primärenergieverfahrens die DIN V 4108-6 [9] und die DIN V 4701-10. Ebenfalls wurde der sommerliche Wärmeschutz nach der DIN V 4108-2 und die DIN V 18599 zur energetischen Bewertung in der EnEV 2014 inkludiert.

Wird erneuerbare elektrische Energie unmittelbar im Zusammenhang mit dem Gebäude produziert, so kann diese ab der EnEV 2014 über die DIN V 18599 bilanziert und eingerechnet werden (Details Abschn. 13.8).

Die EnEV 2014 wurde zum 01.01.2016 deutlich in Bezug auf die Energieeffizienzansprüche an neue Gebäude verschärft. Die Berechnungen

des Primärenergiebedarfs über das Referenzhausverfahren aus der EnEV 2009 bleibt dabei unverändert, es erfolgt lediglich eine Reduzierung des zulässigen Primärenergiebedarfs um 25 %. Die Anforderung an den maximalen spezifischen Transmissionswärmeverlust des Gebäudes resultiert aus der baulichen Qualität. Somit ist eine indirekte Begrenzung von Fensterflächen eliminiert. Eine weitere Anpassung erfolgte beim Primärenergiefaktor für den netzbezogenen Strom. Dieser wurde von 2,4 auf 1,8 abgesenkt. Die Absenkung resultiert vor allem aus dem gestiegenen Anteil an erneuerbaren Energien im Strommix.

Vereinfacht wollen wir die EnEV 2014 mit der Verschärfung 2016 als EnEV 2016 deklarieren. Die Verordnung schreibt den Bauherren den maximalen Primärenergiefaktor vor und gibt Mindeststandards aus. Wie dieser maximale Primärenergiewert jedoch erreicht wird, unterliegt den Bauherren. Ob das Haus deutlich besser isoliert wird als die EnEV 2016 es fordert und eine durchschnittliche Heizungsanlage eingesetzt wird oder aber ob das Haus nur nach den Mindestanforderungen gedämmt wird, jedoch eine hocheffiziente Heizungsanlage eingesetzt wird, entscheidet der Bauherr.

5.2 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG)

Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) fordert einen vorgegebenen Anteil an der Wärmeenergiebereitstellung über erneuerbare Energien und ist seit der EnEV 2009 bei Neubauten zu berücksichtigen. Eine anteilige Wärmebereitstellung über Umweltwärme (Wärmepumpen), Geothermie, Wärme aus Biomasse, Solarthermie, aber auch eine Kraftwärmekupplungsanlage stellen verschiedene Möglichkeiten dar. Welchen Mindestanteil die regenerativ erzeugte Energie am Gesamtenergiebedarf haben muss, unterscheidet sich nach der regenerativen Energiewandlungsanlage (siehe Tab. 5.1).

Gelingt es durch eine besonders hochwertige Gebäudedämmung mindestens 15 % unter dem Jahresprimärbedarf des Referenzhauses zu bleiben, so ist eine weitere Einbindung von erneuerbaren Energien in die Wärmebereitstellung nicht notwendig. Die Anforderungen des EEWärmeG werden erfüllt.

Eine Pauschalisierung für Solarthermieanlagen unterstützt die einfachere Planung. Für Mehrfamilienhäuser werden nur noch 3 m^2 pro 100 m^2 beheizter Nutzfläche angesetzt. Die unterschiedlichen Energiewandlungssysteme können

Tab. 5.1 Anforderungen EEWärmeG (Stand 2016)

Regenerative Energiewandlung	Anforderung
Umweltwärme (Wärmepumpen)	<ul style="list-style-type: none"> – Wärmebedarfsdeckung mindestens 50 % des Gesamtwärmebedarfs – Mindest Jahresarbeitszahl
Geothermie (Erd- Gesteinswärme)	<ul style="list-style-type: none"> – Wärmebedarfsdeckung mindestens 50 % des Gesamtwärmebedarfs
Feste Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> – Wärmebedarfsdeckung mindestens 50 % des Gesamtwärmebedarfs – Mindest Jahresarbeitszahl
Gasförmige Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> – Wärmebedarfsdeckung mindestens 30 % des Gesamtwärmebedarfs
Solarthermie	<ul style="list-style-type: none"> – Wärmebedarfsdeckung mindestens 15 % des Gesamtwärmebedarfs Pauschalisierung möglich: <ul style="list-style-type: none"> – 4 m² Kollektorfläche pro 100 m² beheizter Fläche bei Ein- und Zweifamilienhäusern
Kraftwärmekopplung (KWK)	<ul style="list-style-type: none"> – Wärmebedarfsdeckung mindestens 50 % des Gesamtwärmebedarfs

ebenfalls kombiniert werden, jedoch sollte die Wirtschaftlichkeit nicht außer Acht gelassen werden.

Bei Härtefällen ist die zuständige Landesbehörde berechtigt, auf den erneuerbaren Anteil an der Energieerzeugung zu verzichten.

Im folgenden Kapitel wollen wir den Energieeffizienzbewertungen im Gebäudesektor auf dem Grund gehen.

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Das europäische Parlament verpflichtete am 19. Mai 2010 mit der Richtlinie 2010/31/EU die Mitgliedsstaaten dazu, dass ab 2019 alle Nichtwohngebäude der öffentlichen Hand und ab 2021 alle Neubauten als Niedrigstenergiegebäude auszuführen sind. Obwohl der Begriff Niedrigstenergiegebäude nominell nicht exakt definiert worden ist, hat die Umsetzung der Richtlinie viel Zeit beansprucht und ist nach aktuellem Stand auch noch nicht abgeschlossen.¹ Ziel der Richtlinie ist eine deutliche Senkung des Ressourcenverbrauchs mit dem finalen Ziel 2050 einen europaweiten klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Die angestrebten Energieeffizienzmaßnahmen sollen dafür in einem wirtschaftlich machbaren Rahmen umgesetzt werden.

¹Der Referentenentwurf vom 23.01.2017 der BMWi und BMUB wurde aus wirtschaftlichen Befürchtungen abgelehnt.

Deutschland möchte die Richtlinie mit dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) umsetzen. Der Gesetzentwurf zum Gebäudeenergiegesetz befindet sich in der Ressortabstimmung (Stand 27.08.2019) wodurch sich noch Änderungen ergeben können. Der Grundgedanke ist eine Zusammenführung und Vereinheitlichung der Energieeinsparverordnung (EnEV), des Energieeinspargesetzes (EnEG) und des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG). Das Bundesministerium hat hierzu am 29.Mai 2019 die Länder- und Verbände-anhörung eingeleitet.²

Die Erwartungen im Bereich des Umweltschutzes einerseits und die Befürchtungen seitens der Wirtschaft andererseits führen zu einem teils emotionsgeladenen Diskurs, der Raum für Spekulationen lässt. Aktuell scheint es als würden die Anforderungen von 2016 einfach konstant gehalten werden. Die Bundesregierung postuliert, dass die aktuell geltenden Anforderungen durch die EnEV, dem EnEG und dem EEWärmeG den Anforderungen der EU-Gebäuderichtlinie eines Niedrigstenergiehauses bereits gerecht würden. Gibt es weitere Verschärfung würde sich das auf die Kostenoptimalität negativ auswirken.³ Damit wäre der größte Gewinn des Gesetzes eine Zusammen-führung der unterschiedlichen Verordnungen und Gesetze.

Bei einer Verabschiedung des GEG in der aktuellen Form wird die Energie-wende im Gebäudesektor nicht weiter vorangebracht. Im Originaltext der EU-Richtlinie werden die Gebäude als „Nearly zero energy buildings“ betitelt. Gebäude, die nach dem GEG in der aktuellen Form gebaut werden, sind keines-falls als Gebäude zu bezeichnen, die nahezu energieautark wären. Die nicht eindeutige Beschreibung der EU-Richtlinie 2010/31/EU und die direkte Ver-knüpfung mit der vorangestellten Wirtschaftlichkeit haben eine Hintertür für ein Gesetz geschaffen, dass keine energetische Weiterentwicklung mit sich bringt.

²Das GEG wurde 23.10.2019 vom Bundeskabinett beschlossen.

³Vgl. [10].



6

Verfahren zur Energieeffizienzberechnung

Aktuell sind zwei Methoden zur Berechnung der Energieeffizienz zulässig. Sowohl die DIN V 4108-6 in Kombination mit der DIN V 4701-10, als auch die DIN V 18599 sind für das Nachweisverfahren zugelassen. Beide Verfahren arbeiten mit einer monatlichen Betrachtung. Im Detail gibt es aber Unterschiede die zu verschiedenen Ergebnissen führen können. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass das Verfahren nach der DIN V 18599 detaillierter und somit auch aufwendiger ist. Aus diesem Grund werden die Berechnungen im Folgenden durch die einfachere DIN 4108-6/DIN 4701-10 ausgeführt. Sind tiefergehende Analysen notwendig oder ist im Berechnungsverfahren eine aktive Kühlungsanlage inkludiert, so erfolgt eine Betrachtung der DIN V 18599. Als Klimareferenzregion ist abweichend zur DIN V 4108-6 die Klimazone 4 Potsdam für ganz Deutschland anzuwenden.

Grundlage der beiden Betrachtungen ist eine Energiebilanz über die Gebäudehülle. Für eine eindeutige Bilanzierung müssen die Bilanzgrenze, die Energieströme über die Bilanzgrenze sowie die internen Energiequellen und -senken definiert werden. Hierbei unterstützt die DIN V 4108.

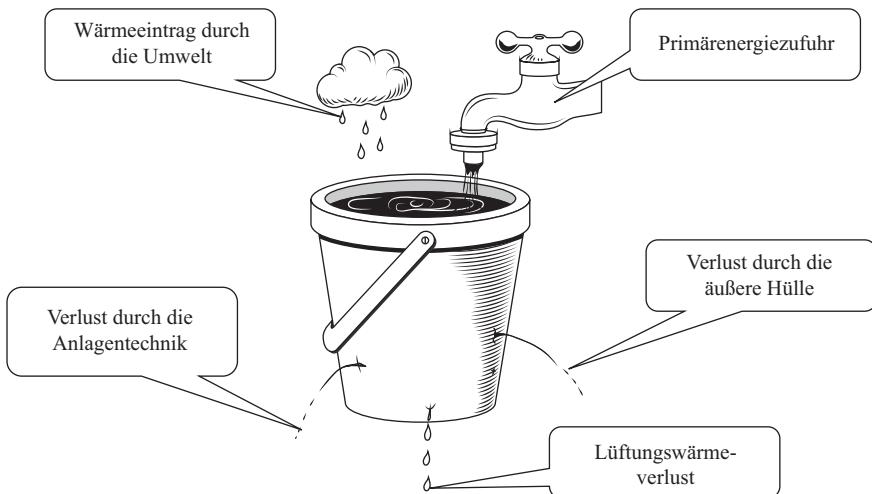
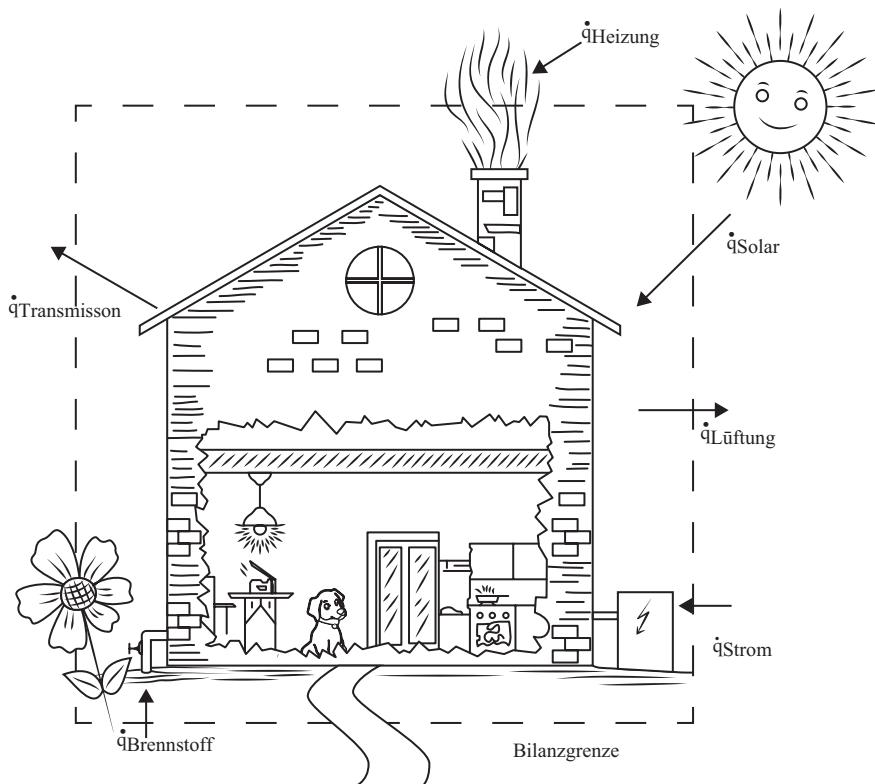


Abb. 6.1 Plakatives Beispiel Massen- bzw. Energiebilanz

Stellen Sie sich das Gebäude vereinfacht wie einen löchrigen Eimer vor. Nun fassen wir die jeweiligen Anlagenkomponenten zusammen und zeichnen das dazugehörige Leck ein (Abb. 6.1). So gibt es eine undichte Stelle für die Fenster, die Außenwände, das Dach usw. Damit der Stand im Eimer (als Metapher für die Innenraumtemperatur) konstant bleibt, muss Wasser nachgefüllt werden.

In den Ingenieurwissenschaften gilt, vor jeder Analyse immer zuerst die Bilanzgrenze¹ zu ziehen, anschließend sind die Energie- oder Massenströme einzutragen.

¹Die Bilanzgrenze beschränkt den betrachteten Berechnungsrahmen. Alle Energie- und Stoffströme die über die Bilanzgrenze fließen werden bilanziert.



Beispiel Bilanzgrenze (Für den Inhalt in einer Bilanzgrenze kann auch einfach ein Kasten als Blackbox eingesetzt werden. Der künstlerische Versuch sollte nur die internen Gewinne (z. B. den Herd, Fluffi, usw.) darstellen.)

Die Energieverluste (Energiesenken) über die Gebäudehülle, bestehend durch Transmissionsverluste durch das Dach, die Fenster, die Außenwände, der Bodenplatte und durch Verluste an unbeheizte angrenzende Räume, sorgen für eine Verringerung der Innenraumtemperatur. Weitere Energiesenken entstehen z. B. durch Lüftungswärmeverluste und Ineffizienzen der Heizungsanlage bei der Energiewandlung.

Thermische Energie wird eingetragen durch die Solarstrahlung, innere Wärmequellen (Personen und technische Geräte) und die Heizungsanlage. Die temperaturerhöhenden Wärmequellen werden in der Bilanz positiv angesetzt, die Energiesenken negativ.

6.1 Physikalische Grundlagen der Wärmeübertragung

Damit wir die Energieeffizienz bewerten können, müssen wir uns mit den Grundlagen der thermischen Physik vertraut machen. Basis der Betrachtung ist der erste Hauptsatz der Thermodynamik. Er wird auch als Energieerhaltungssatz definiert und besagt, dass Energie nicht vernichtet, sondern nur in andere Energieformen umgewandelt werden kann – z. B. die Umwandlung von chemischer Energie in Wärmeenergie, durch eine exotherme Oxidation eines Brennstoffes.

Um die grafische Aufstellung der Bilanzgrenze mathematisch zu beschreiben, werden die Energiesenken und -quellen über eine Gewinn- und Verlust-Rechnung ins Verhältnis gesetzt (Gl. 6.1). Damit die Innenraumtemperatur auf einem konstanten behaglichen Niveau verbleibt, sind eventuell weitere Aufwendungen erforderlich – Heizenergie oder Kühlenergie. Zur Analyse des Wärmebedarfs wird die Innenraumtemperatur konstant gehalten, somit bleibt die innere Energie u des Innenraums unverändert. Eine absolute Betrachtung mit kinetischen und potenziellen Energien ist aufgrund der konstanten Höhen und Geschwindigkeiten nicht notwendig.

Energieerhaltungssatz:

$$\dot{q}_{\text{Quelle}} - \dot{q}_{\text{Senke}} + \dot{q}_{\text{Bedarf}} = \Delta w_t + \Delta u \quad (6.1)$$

Wird die Veränderung der inneren Energie und die Änderung der technischen Energie konstant gehalten, dann vereinfacht sich der Energieerhaltungssatz zu einer reinen Betrachtung der Wärmeströme.

$$\Delta u = 0 = c_p \cdot \Delta T$$

$$\Delta w_t = 0$$

$$\dot{q}_{\text{Bedarf}} = \dot{q}_{\text{Senke}} - \dot{q}_{\text{Quelle}} \quad (6.2)$$

\dot{q}_{Quelle} = Spezifische natürliche Energiequelle/Wärmequelle [W/m^2]

\dot{q}_{Senke} = Spezifische natürliche Energiesenke/Wärmesenke [W/m^2]

\dot{q}_{Bedarf} = Spezifischer Wärme- Kühlbedarf [W/m^2]

Δw_t = Änderung der technischen Arbeit [$\text{J}/(\text{kg})$]

Δu = Änderung der inneren Energie des Mediums [$\text{J}/(\text{kg})$]

c_p = Isobarer Wärmekapazitätswert [$\text{J}/(\text{kgK})$]

ΔT = Temperaturänderung des Mediums [K]

Der natürliche spezifische Wärmetransport (\dot{q}) kann auf drei unterschiedliche Arten erfolgen: der Wärmeleitung, der Wärmestrahlung und der freien bzw. erzwungenen Konvektion. Während im Raum die Wärmestrahlung und Konvektion dominieren, ist die Wärmeleitung in festen Körpern ausschlaggebend. Daraus erklärt sich auch, warum es sich lohnt ein Verständnis von den Wärmetransportmechanismen aufzubauen. Während der Wärmetransport zwischen den Wärmeübertragern und den Räumen gewünscht ist, ist er über die Gebäudehülle unerwünscht. Mit den physikalischen Grundlagen können wir die Gebäude effizienter gestalten.

Grundlage für einen Wärmetransport ist immer eine treibende Kraft, im Fall von Wärmeströmen eine Temperaturdifferenz, die sogenannte Grädigkeit. Die spezifische Wärmeleitung der Wand (\dot{q}_{Wand}) ist neben der Temperaturdifferenz (ΔT) vom Wärmeleitwert des durchströmten Mediums abhängig.

$$\dot{q}_{Wand} = \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta T \quad (6.3)$$

\dot{q}_{Wand} = Spezifische Wärmeleitung Wand [W/m²]

s = Materialstärke [m]

λ = Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]

Für die Wärmeaufnahme an der abgebenden Seite (warm) und der aufnehmenden Seite (kalt) ist die Eigenschaft des jeweiligen Mediums und die Strömungsrichtung entscheidend. In unserem Fall haben wir sowohl an der Innen- als auch an der Außenseite das Medium Luft. Aus diesem Grund wird der Term mit den Eigenschaften der Medien erweitert zum Wärmedurchgangskoeffizienten.

$$\dot{q}_{WL} = k \cdot \Delta T \quad (6.4)$$

$$\frac{1}{k} = R_T = R_{si} + R_{Wand} + R_{se} \quad (6.5)$$

$$R_{Wand} = \frac{s}{\lambda} \quad (6.6)$$

\dot{q}_{WL} = Spezifische Wärmeleitung [W/m²]

k = Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²K)]

R_T = Wärmeübergangswiderstand gesamt [(m²K)/W]

Tab. 6.1 Wärmeübergangswiderstände Luft nach [11]

Bezeichnung	Einheit	Wärmestrom aufwärts	Wärmestrom horizontal	Wärmestrom abwärts
R_{si}	$[(m^2K)/W]$	0,10	0,13	0,17
R_{se}	$[(m^2K)/W]$	0,04	0,04	0,04

R_{si} = Wärmeübergangswiderstand innen $[(m^2K)/W]$

R_{se} = Wärmeübergangswiderstand außen $[(m^2K)/W]$

R_{Wand} = Wärmedurchlasswiderstand Wand $[(m^2K)/W]$

Die Wärmeübergangswiderstände der Luftsichten sind in der DIN EN ISO 6946 definiert und in der Tab. 6.1 hinterlegt.

Werden unterschiedliche Materialien in Reihe hintereinander verbaut, dann erhöht sich der Wärmewiderstandswert um die Einzelwerte der Materialien.

$$R_{Wand} = R_{Mat.1} + R_{Mat.2} + R_{Mat.3} + \dots + R_{Mat.n} \quad (6.7)$$

Somit verändert sich die Gleichung (Gl. 6.3) zu der Gleichung:

$$\dot{q}_{WL} = \frac{1}{R_T} \cdot \Delta T \quad (6.8)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient repräsentiert den zeitabhängigen Wärmestrom über einen festen Körper.² Hinter dem Wärmedurchgangskoeffizienten steckt der Kehrwert der Wärmeübergangswiderstandswerte.

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R_{Wand} + R_{se}} \quad (6.9)$$

U = Wärmedurchgangskoeffizient $[W/(m^2K)]$

Hinweis

In manchen Herstellerunterlagen findet sich noch das k , das im Rahmen der europäischen Vereinheitlichung auf U angepasst wurde.

Wird die gesamte Wärmestrommenge über die betrachtete Fläche – z. B. Gebäudehülle – berechnet, dann muss die Gebäudefläche noch Einzug in die

²Im Rahmen der europäischen Vereinheitlichung wurde das Formelzeichen von k auf U angepasst.

Gleichung erhalten. Handelt es sich um verschiedene Flächeneigenschaften – z. B. durch Fensterflächen – müssen diese einzeln betrachtet werden:

$$\dot{Q}_{ges} = \sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i \cdot \Delta T_i \quad (6.10)$$

Betrachtet man den Temperaturverlauf über eine Wand (Abb. 6.2) mit unterschiedlichen Materialien, die aufeinandergeschichtet sind, dann entspricht ein großer Temperaturunterschied zwischen der Eintritts- und Ausgangsfläche einem schlechten Wärmeleitwert. Ein schlechter Wärmeleitwert steht für eine gute Isolierung. Somit verwundert es nicht, dass die Isolierung (Schicht 2) die größte Temperaturspreizung aufweist. Der Wärmestrom fließt in der Abbildung von innen nach außen. Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche der Außenwand und der Umgebung ist, desto niedriger sind die Transmissionswärmeverluste.

Der Transport von Wärme auf ein bewegtes Medium wird als Konvektion betitelt. Die Wärmekonvektion spielt eine zentrale Bedeutung in der Gebäudetechnik. Sowohl die Wärmeabgabe der Heizung an das Heizungswasser als auch der Wärmetransport vom Heizkörper an die Raumluft

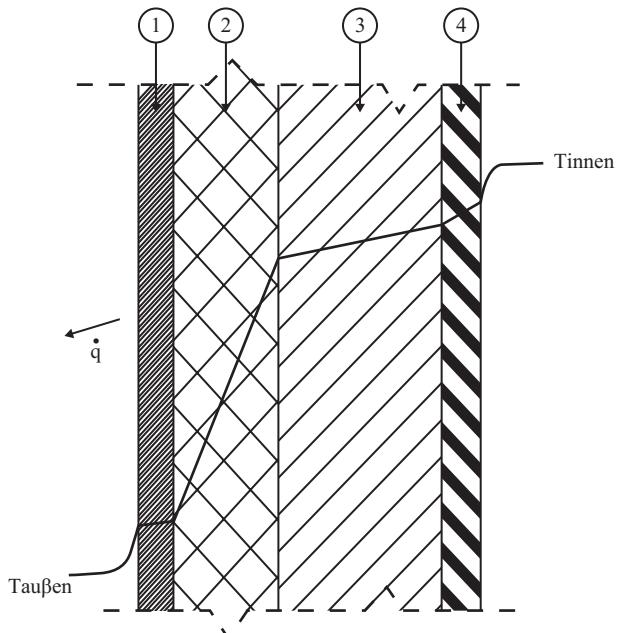


Abb. 6.2 Temperaturverlauf in einer mehrschichtigen Wand

erfolgt über die Konvektion. Neben der freien Konvektion, die vor allem über Dichteunterschiede eines Mediums funktioniert, gibt es erzwungene Konvektion. Bei dieser wird mit technischen Hilfsmitteln, z. B. mit einem Ventilator, das Medium gezielt bewegt, um somit eine höhere Konvektionsrate zu generieren.

Die spezifische Konvektionswärmemenge berechnet sich aus der Gleichung:

$$\dot{q}_{\text{Medium}} = c_p \cdot \Delta T \quad (6.11)$$

Die Gesamtsumme der übertragenen Energie ergibt sich aus dem Massenstrom und der spezifischen Konvektionswärmemenge:

$$\dot{Q}_{\text{Medium}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (6.12)$$

Die dritte Art der Wärmeübertragung ist die Wärmestrahlung. Jeder Körper steht mit anderen Körpern in Wechselwirkung. Er emittiert und absorbiert Strahlungen mit unterschiedlichen Wellenlängen.

Mit der nach *Stefan-Boltzmann* benannten Proportionalitätskonstante zur Strahlungsleistung besteht die Möglichkeit zur Berechnung der spezifischen Strahlungswärme unabhängig von der Wellenlänge. Der enorme Einfluss der Temperatur ist deutlich an der vierten Potenz in der Gleichung zu erkennen (Gl. 6.13).

$$\dot{q}_{\text{ST}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (6.13)$$

\dot{q}_{ST} = Spezifische Wärmestrahlung [W/m^2]

ε = Emissionsgrad [-]

σ = Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,670 \cdot 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$

Strahlungsenergetransport

Aus dem Physikunterricht ist vielleicht noch der „schwarze Körper“ von Max Planck als Körper mit höchstmöglicher Strahlungsemision/-absorption bekannt. Die Wellenlänge der Strahlung steht dabei in einem direkten Verhältnis mit der Temperatur des Körpers. Je höher die Temperatur ist, desto kleiner wird die Wellenlänge (*Wiensche Verschiebungsgesetz*). Der „schwarze Körper“ hat Absorptions- und Emissionsgrade von eins und der „weiße Körper“ von null.

Der Absorptionsgrad eines Körpers beschreibt, wie viel Strahlungsenergie von dem bestrahlten Körper aufgenommen wird. Die restliche Strahlungsenergie wird entweder durchgelassen oder reflektiert. Da der Absorptionsgrad abhängig von der Körpereigenschaft ist und die Körpereigenschaft auch für

den Emissionsgrad grundlegend ist, sind die beiden Werte identisch nach dem kirchhoffschen Strahlungsgesetz.

$$a = \varepsilon \quad (6.14)$$

$$a = \text{Absorptionsgrad [-]}$$

Nun haben wir schon die physikalischen Grundlagen für die Transmissionswärmeverluste kennengelernt und können mithilfe der Materialkennwerte und der Grädigkeit die Wärmeströme berechnen. Eine Grundlage der Grädigkeit ist die Außenlufttemperatur, die wir im kommenden Abschnitt definieren werden.

6.2 Klimatische Bedingungen

Die klimatischen Bedingungen am Aufstellungsort des geplanten Gebäudes bilden die Randbedingungen für die bauphysikalischen Betrachtungen. So werden andere Eigenschaften gefordert zwischen einem Haus in Flensburg und einem auf Mallorca. Doch auch innerhalb von Deutschland unterscheiden sich die Ansprüche, obwohl Deutschland insgesamt in einer gemäßigten Klimazone liegt. Im Norden und Westen ist der Einfluss des Atlantiks deutlicher zu verzeichnen als im restlichen Deutschland. Der Atlantik sorgt über das ganze Jahr für eine höhere Feuchtigkeit und gemäßigtere Temperaturen, während der Osten und Süden Deutschlands trockener und mit einer größeren Temperaturspreizung über das Kalenderjahr beaufschlagt ist.³

Die Windrichtung hängt stark von der örtlichen Topografie ab, kommt aber zum größten Teil aus westlicher bis östlicher Richtung.

Für die Berechnung der Wärmetransmissionen über die Gebäudehülle und der solaren Einstrahlleistung werden langzeitausgewertete meteorologische Klimadaten als Testreferenzjahre (TRY) des Deutschenwetterdienstes genutzt. Die DIN V 4108-6 stellt für die Energieberechnung 15 Klimaregionen verteilt über den deutschen Raum zur Verfügung. Die solaren Einstrahlwerte werden für eine horizontale Fläche und einige geneigte Flächen aufgegeben.

³Vgl. [6].

Tab. 6.2 Temperaturen Region 4 nach der DIN 18599-10 und der NASA

Nach der DIN 18599-10 ist eine generelle Nutzung der Klimaregion 4 Potsdam aus dem Anhang E der Norm für eine bundesweite Heizenergiebedarfsberechnung zulässig. Diese verallgemeinerte Annahme kann für eine Analyse ausreichend sein, jedoch gibt es detaillierte Datenquellen, die für eine höhere Aussagekraft dienen können.

Es gibt zahlreiche Anbieter von klimatischen Datensätzen, jedoch sind diese meistens kostenpflichtig zu erwerben. Eine kostenfreie und umfangreiche Datenquelle stellt das NASA Langley Research Center (LaRC)⁴ zur Verfügung. Die NASA bietet eine umfangreiche Wetterdatenbank mit Satelliten ermittelten Daten. Temperaturen über den Boden, Luftfeuchtigkeiten, Windgeschwindigkeiten, solare Einstrahlleistungen sind neben vielen weiteren Daten als gemittelte Monatswerte, Tageswerte und teilweise sogar als Stundenwerte für viele Jahre verfügbar. Aufgrund der globalen Wetteränderung in den letzten Jahren werden wir in den kommenden Analysen die aktuelleren Wetterdaten der NASA in unsere Betrachtungen einbinden.

In der Tab. 6.2 sind die Temperaturen nach der DIN 18599-10 Region 4 Potsdam und die Wetterdaten der NASA Höhengrad 52,13° und Breitengrad 13,02° eingetragen. Die Wetterdaten der NASA wurden als Mittelwerte vom Zeitraum 1981 bis 2018 ausgegeben. Der Messpunkt für die Wetterdaten wurde um ca. 20 km aus dem Stadt kern nach Süden verlegt, damit wird die „wärmende“ Eigenschaft der Stadt abgemildert einbeziehen. Die wenigsten Einfamilienhäuser werden in einem Stadt kern entstehen, sondern eher im Umland. Die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland beträgt ca. 0,4 °C.

6.3 Jahresheizwärmebedarf für Wohngebäude nach der DIN V 4108-6

Die DIN V 4108 beschäftigt sich mit dem Wärmeschutz und den Energieeinsparungen in Gebäuden. Sie besteht aus unterschiedlichen Teilen. Für unsere Analysen von besonderer Bedeutung sind in der Effizienzbewertung die Teile 2 „Anforderung an den Mindestwärmeschutz“ und 6 „Jahresheizwärmebedarf für Wohngebäude“.

⁴“These data were obtained from the NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program.”[12]

Die bereitgestellten physikalischen Grundlagen aus dem vorherigen Abschnitt reichen für unsere Untersuchungen hinsichtlich der ökonomischen und ökologischen Effizienz aus. Obwohl ein Hintergrundwissen zu den Berechnungsgrundlagen aus der DIN V 4108 somit nicht notwendig ist, empfiehlt sich eine Betrachtung für ein tiefer gehendes Verständnis.

Die Berechnungen basieren auf unüberwindbaren physikalischen Gesetzen. Hieraus ergibt sich die Gewissheit, dass Wärmeverluste nicht gänzlich verhindert werden können. Zwar können die Transmissionsverluste minimiert, bei einer vorhandenen Temperaturdifferenz aber nicht eliminiert werden. Warum Nullenergiehäuser dennoch möglich sind, werden wir uns im Abschn. 10.3 ansehen.

Im Folgenden wollen wir auf die Grundlagenberechnungen nach der DIN V 4108 zum Jahresheizwärmeverbrauch eingehen. Da wir nur partiell auf einige Eckpunkte der Norm eingehen, sind die folgenden Berechnungen keinesfalls als Ersatz der Norm für umfassende Effizienzanalysen zu verstehen.

6.3.1 Ablauf der Analyse nach der DIN V 4108-6

Der Ablauf der DIN V 4108-6 verläuft nach vorgegebenen Schritten, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden:

- Gebäudegeometrie definieren; Hüllflächen und Bruttovolumen des beheizten Raumes festlegen – *Wie ist unser Gebäude aufgebaut?*
- Analyse der Wärmedurchgangskoeffizienten für die Hüllflächen – *Welche isolierenden Eigenschaften hat unsere Gebäudehülle?*
- Analyse der temperaturabhängigen Transmissionsverluste (H_T) – *Aus der Gebäudegeometrie und den Wärmedurchgangskoeffizienten ergeben sich die spezifischen Wärmeverluste.*
- Referenzklimadefinition – *Welches Referenzklima herrscht an dem Bauort?*
- Analyse der monatlichen Wärmeverluste ($Q_{l,M}$) – *Aus den gewonnenen Informationen lassen sich nun schon die monatlichen Wärmeverluste bestimmen.*
- Analyse der monatlichen solaren Wärmegewinne ($Q_{s,M}$) – *Neben den Verlusten kommen auch Wärmegewinne durch die solaren Einstrahlungen und*
- Analyse der monatlichen internen Wärmegewinne ($Q_{i,M}$) *internen Wärmequellen hinzu. Jede Person heizt ebenso wie technische Geräte das Gebäude mit auf.*

- Summation der Wärmegewinne ($Q_{g,M}$) – Welche monatlichen Wärmegewinne reduzieren unsere Heizlast?
- Analyse der Speicherfähigkeit des Gebäudes (C_{wirk}) – Ein Gebäude kann thermische Schwankungen abmildern und Energie speichern.
- Kombination der monatlichen Wärmeverluste, der Wärmegewinne und der Speicherfähigkeit des Gebäudes über den monatlichen Ausnutzungsgrad (η_M) – Welchen Anteil der Wärmegewinne können wir nutzen?
- Resultierenden monatlichen Heizwärmeverbrauch bestimmen ($Q_{h,M}$) – Was muss unsere Heizungsanlage im Monat für ein behagliches Wohnklima noch beisteuern?
- Monatliche Werte zu einem Jahresheizwärmeverbrauch zusammenfügen – Abschließend ergibt sich der jährliche Heizwärmeverbrauch. Was muss unser Heizungssystem an Heizwärme zusätzlich im Jahr aufbringen?

6.3.2 Die Gebäudegeometrie

In der Norm DIN EN ISO 13789 wird die Außenfläche als die wärmeübertragende Hüllfläche einschließlich außenliegenden Putzes angesetzt. Bei innenliegenden Wänden zwischen zwei beheizten Räumen wird die Zwischenwand mittig als Bilanzgrenze einbezogen. Zu nicht temperierten Gebäudeteilen gilt wiederum das Außenmaß. Sind unterschiedliche Temperaturen an angrenzenden Räumen vorhanden, dann müssen diese einzeln betrachtet werden (Abb. 6.3).

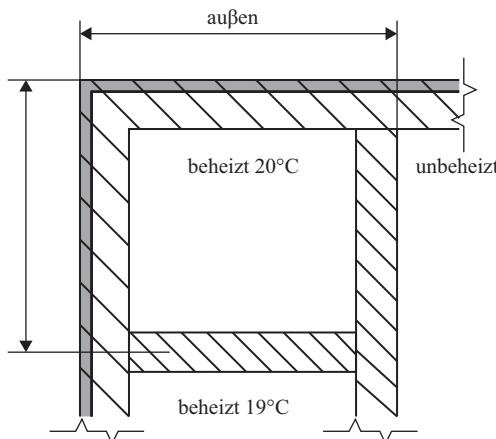


Abb. 6.3 Horizontale Bilanzgrenzen Gebäude

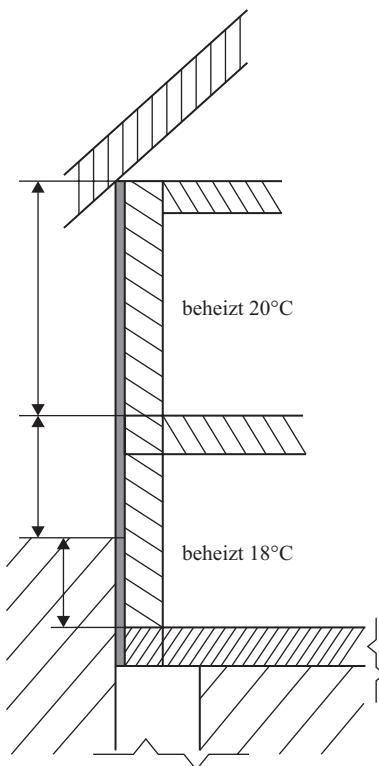


Abb. 6.4 Vertikale Bilanzgrenze Gebäude

Hinweis

Die EnEV 2014 verweist für die Ermittlung der wärmeabgebenden Gebäudeaußenfläche auf die DIN V 18599-1, welche sich wieder auf die DIN EN ISO 13789 beruft.

Übereinanderliegende Räume (Abb. 6.4) sind an der Zwischendeckenoberfläche zu trennen.⁵ Bei der erdberührenden Grundfläche wird die Oberkante der Bodenplattenoberfläche einbezogen (nach der DIN EN ISO 13789). Ist das Dachgeschoss ebenfalls beheizt, dann muss die Dachfläche Berücksichtigung als oberes Abschlussmaß finden.

Alle Flächen mit unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten sind separat aufzustellen und zu bewerten. Bei Fenster- und Türflächen ist das entsprechende Rohbaumaß anzusetzen, also die Flächen inklusive des Rahmens.

⁵(Vgl. [2, S. 72]).

Etwas komplizierter wird es bei der Verwendung von Rollläden. Die Rollladenkästen stellen eine erhebliche Verletzung der isolierten Hüllfläche dar. Die DIN 4108-2 stellt zwei unterschiedliche Möglichkeiten für die Implementierung der innenliegenden Rollladenkästen zur Verfügung. In der ersten Berechnungsvariante werden die Flächen der Rollladenkästen mit dem tatsächlichen Wärmedurchgangskoeffizienten als separate Elemente in die Berechnung mit einbezogen. In der zweiten Variante werden die Flächen der Rollladenkästen einfach übermessen und der umliegenden Außenwand zugerechnet. Anschließend wird ein erhöhter Wärmebrückenzuschlag auf das Ergebnis hinzuaddiert. Für eine aussagekräftigere Analyse empfiehlt es sich das erste Berechnungsverfahren anzuwenden.

Das Bruttovolumen des Gebäudes V_e wird aus der bestehenden Hüllfläche des Gebäudes berechnet und ist somit inklusive der äußeren Wände und Decken. Das erdberührende Fundament bildet eine Ausnahme und ist kein Bestandteil des Bruttovolumens.

Hinwies

Aufgesetzte Rollladenkästen sind auf die äußere Hülle zwar weniger ästhetisch aber energetisch sinnvoller.

6.3.3 Transmissionswärmeverluste

Die Transmissionswärmeverluste beschreiben die temperaturabhängigen Wärmeverluste, die durch Wärmeleitung aus dem Gebäude an die Umgebung abgegeben werden (siehe auch Abschn. 6.1).

$$H_T = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot U_i) + H_U + L_S + H_{WB} + \Delta H_{T,FH} \quad (6.15)$$

- | | |
|---------------------|--|
| $H_T =$ | temperaturabhängiger Transmissionsverlust total [W/K] |
| $H_U =$ | temperaturabhängiger Transmissionsverlust an un-/niedrigbeheizte Räume [W/K] |
| $L_S =$ | temperaturabhängiger Wärmeverlust ans Erdreich [W/K] |
| $H_{WB} =$ | temperaturabhängiger Transmissionsverlust Wärmebrücken [W/K] |
| $\Delta H_{T,FH} =$ | temperaturabhängiger Transmissionsverlust beheizter Flächen [W/K] |

Neben den spezifischen Transmissionswärmeverlusten – berücksichtigt in der Summenfunktion – werden auch die Transmissionsverluste gegen unbeheizte/niedrigbeheizte Räume, die Wärmeverluste ans Erdreich, die Transmissionsverluste durch Wärmebrücken und die Verluste durch beheizte Wandflächen bilanziert.

Die Berechnung der Transmissionsverluste gegen unbeheizte bzw. niedrigbeheizte Räume ist bis auf den hinzugefügten Temperaturkorrekturfaktor für die jeweilige Fläche identisch.

$$H_U = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot U_i \cdot F_{x,i}) \quad (6.16)$$

F_x = Temperaturkorrekturfaktor (siehe Tab. 6.3)

Ebenfalls findet der Wärmeverlust an das Erdreich Berücksichtigung. Hierbei ist zu beachten, dass es sich nicht um einen Transmissionswärmeverlust handelt, sondern um eine reine Wärmeleitung in einen oder mehrere Festkörper.

$$L_s = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot U_i \cdot F_{G,i}) \quad (6.17)$$

F_G = Temperaturkorrekturfaktor (siehe Tab. 6.4)

Die spezifischen Transmissionsverluste über bauseitige Wärmebrücken können über eine pauschale Einbindung nach der DIN 4108 oder über eine detaillierte Analyse der Wärmebrücken nach der DIN EN ISO 13770 bzw. 13789 und DIN EN ISO 10211-2 erfolgen. Die undifferenzierte Ein-

Tab. 6.3 Temperaturkorrekturfaktoren nach [9] Teil 1

Position	Wärmestrom nach außen über:	Index	Wert
1	Außenwand, Fenster, Decke über die Außenluft	F_e	1
2	Dach (als Systemgrenze)	F_D	1
3	Dachgeschossdecke (Dachraum nicht ausgebaut)		0,8
4	Wände und Decken zu Abseiten (Drempe)	F_e	0,8
5	Wände und Decken zu unbeheizten Räumen	F_U	0,5
6	Wände und Decken zu niedrigbeheizten Räumen	F_{nb}	0,35
	Wände und Fenster zu unbeheizten Glasvorbauten bei einer Verglasung mit:		
7	- Einfachverglasung	F_U	0,8
8	- Zweifachverglasung		0,7
9	- Wärmeschutzverglasung		0,5

Tab. 6.4 Temperaturkorrekturfaktoren nach [9] Teil 2

Position	Bezeichnung	Index	Werte					
			B' in m*					
	Wärmestrom nach außen in Abhängigkeit des exponierten Umfangs der Bodenfläche		< 5		5 bis 10		> 10	
			R_{br} bzw. R_{pw}	R_{br} bzw. R_{bw}				
≤ 1	> 1	≤ 1	> 1	≤ 1	> 1	≤ 1	> 1	≤ 1
10	Fußboden des beheizten Kellers	F_{bf}	0,30	0,45	0,25	0,40	0,20	0,35
11	Wand des beheizten Kellers	F_{bw}	0,40	0,60	0,40	0,60	0,40	0,60
12	Fußboden** auf dem Erdreich: ohne Randdämmung*** mit Randdämmung (5m breit, waagerecht) mit Randdämmung (2m tief, senkrecht)	F_{bf}						
			0,45	0,60	0,40	0,50	0,25	0,35
			0,30	0,30	0,25	0,25	0,20	0,20
			0,25	0,25	0,20	0,20	0,15	0,15
13	Kellerdecke und Kellerinnenwand zum unbeheizten Keller: mit Perimeterdämmung ohne Perimeterdämmung	F_G						
			0,55		0,50		0,45	
			0,70		0,65		0,55	
14	Aufgeständerter Fußboden	F_G			0,90			
15	Bodenplatte von niedrig beheizten Räumen	F_G	0,20	0,55	0,15	0,50	0,10	0,35

* $B' = A_G / (0,5^*P)$; P= exponentierter Umfang der Bodenfläche

** Bei fließendem Grundwasser erhöhen sich die Temperatur-Korrekturfaktoren um 15%

*** Bei einem Wärmedurchlasswiderstand der Randdämmung $R > 2 \text{ m}^2 \text{K/W}$; Bodenplatte ungedämmt

bindung erfolgt über eine Multiplikation mit der gesamten Hüllfläche. Berücksichtigt in diesem Wert sind typische Wärmebrücken wie Gebäudekanten, Fensterlaibungen, Wand- und Deckeneinbindungen, DeckenaufLAGern und wärmetechnisch entkoppelte Balkone. Bei einer bauseitigen Vermeidung von Wärmebrücken nach der DIN V 4108 Beiblatt 2 darf der spezifische Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} von $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ halbiert werden.

$$H_{WB} = \Delta U_{WB} \cdot A \quad (6.18)$$

Ebenfalls ist eine detaillierte Betrachtung der Wärmebrücken gemäß der DIN EN ISO 10211-2 über die Gleichung zulässig:

$$H_{WB} = \sum_{i=1}^n (\psi_i \cdot l_i) \quad (6.19)$$

ψ_i = Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W}/(\text{mK})$]

l = Einflusslänge [m]

Werden beheizte Außenflächen eingesetzt, dann erhöht sich nicht nur die Behaglichkeit im Raum (siehe Kap. 3), sondern auch die Wärmeverluste

an die Umgebung. Damit der Raum Wärme aufnehmen kann, muss die Flächenheizung eine Grädigkeit zum Raum aufweisen, leider steigt damit der Wärmestrom über die jeweilige Außenfläche. Dabei muss nach der Art der Außenwärmesesenke unterschieden werden.

Beheizte Flächen die an die Außenluft die Wärme abgeben:

$$\Delta H_{T,FH} = \frac{R_{si}}{R_{se}} \cdot H_0 \xi = \frac{R_{si}}{\frac{1}{U_0} - R_{si}} \cdot H_0 \xi \quad (6.20)$$

Beheizte Flächen an das Erdreich:

$$\Delta H_{T,FH} = \frac{R_{si}}{\frac{A_h}{L_S} - R_{si}} \cdot H_0 \xi \quad (6.21)$$

Beheizte Flächen an unbeheizte Räume:

$$\Delta H_{T,FH} = \frac{R_{si}}{\frac{1}{\frac{H_{ue}}{H_{iu}+H_{ue}} \cdot U_0} - R_{si}} \cdot H_0 \xi \quad (6.22)$$

- R_{si} = Wärmeübergangswiderstand innen [$(m^2K)/W$]
- R_{se} = Wärmeübergangswiderstand außen [$(m^2K)/W$]
- U_0 = Wärmedurchgangskoeffizient des betrachteten Bauteils ohne das Heizelement [$W/(m^2K)$]
- H_0 = Spezifischer Wärmeverlust des angrenzenden beheizten Raumes ohne das Heizelement [$W/(m^2K)$]
- ξ = Anteil Raumwärmeverlust der durchschnittlich durch die Raumwärme gedeckt wird [$W/(m^2K)$]
- L_S = Transmissionswärmeverlust ans Erdreich nach der DIN EN ISO 13770 [$W/(m^2K)$]
- H_{ue} = Spezifischer Wärmeverlust des angrenzenden beheizten Raumes zur Außenluft [$W/(m^2K)$]
- H_{iu} = Spezifischer Wärmeverlust des angrenzenden beheizten Raumes in den unbeheizten Raum [$W/(m^2K)$]

6.3.4 Lüftungswärmeverluste

Die Bedeutung von einem regelmäßigen Luftwechsel für die Behaglichkeit sowie für die Feuchtigkeitsregulierung wurde bereits im Kap. 3 dargestellt. Ein Luftwechsel verursacht einen unvermeidlichen Energiebedarf,

denn die „frische“ Luft muss durch Konvektion wieder auf das gewünschte Temperaturniveau gebracht werden. In der DIN V 4108–6 werden die Lüftungswärmeverluste durch Gleichung (Gl. 6.23) berechnet.

$$H_V = n \cdot V \cdot \rho_L \cdot c_{p,L} \quad (6.23)$$

H_V = Temperaturabhängige Luftwärmeverluste [W/K]

n = Luftwechselrate [1/h]

V = Netto Luftvolumen der beheizten Räume [m^3]

ρ_L = Dichte Luft [kg/m^3]

$c_{p,L}$ = Isobarer Wärmekapazitätswert Luft [J/kgK]

Eine pauschale Luftwechselrate für eine freie Lüftung wird mit einem Wert von 0,7 1/h angesetzt. Das bedeutet, dass in einer Stunde 70 % des Luftvolumens im Raum ausgetauscht wird.

Wird ein Blower-Door-Test mit einer maximalen Luftwechselrate von 3,0 1/h bei einem Überdruck von 50 Pa durchgeführt, dann kann die pauschale Luftwechselrate auf 0,6 1/h bzw. 0,55 1/h bei einer zusätzlichen Wärmerückgewinnungsabluftanlage reduziert werden. Wird die Förderung der KfW mit einer mechanischen Lüftungsanlage kombiniert, dann darf der Luftwechsel beim Blower-Door-Test nur 1,5 1/h betragen, somit ist eine hohe Güte der luftdichten Gebäudehülle unumgänglich.

Beim Blower-Door-Test wird Luft ins Gebäude gepresst und die Dichtheit der Gebäudehülle bewertet. Ein erfolgreicher Nachweis einer dichten Gebäudehülle über den Blower-Door-Test ist die Voraussetzung für eine Förderung der KfW-Bank (siehe Kap. 12).

Setzt man die Dichte von der Luft grob mit $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ und den isobaren Wärmekapazitätswert auf $1,004 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ an, dann kann die wirksame spezifische Wärmespeicherung der Luft vereinfacht werden.

$$\rho_L \cdot c_{p,L} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1,004 \text{ kJ}}{\text{kgK}} = 1,2048 \text{ kJ}/\left(\text{Km}^3\right)$$

Auf Wattstunden bezogen:

$$\rho_L \cdot c_{p,L} = 1204,8 \frac{\text{Ws}}{\text{Km}^3} \cdot \frac{1\text{h}}{3600 \text{ s}} = 0,335 \frac{\text{Wh}}{\text{Km}^3} \approx 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{Km}^3}$$

Eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung wird durch einen weiter reduzierten Luftwechsel in die Berechnung einbezogen.

$$n = n_A \cdot (1 - \eta_V) + n_x \quad (6.24)$$

n_A = Anlagenwechselrate = 0,4 [1/h]

η_V = Nutzungsfaktor; für Lüftungsanlagen mit einem Wärmerückgewinnungsgrad größer als 80 % = 0,8; für Anlagen mit einem Wärmerückgewinnungsgrad größer 60 % = 0,6 [-]

n_x = Luftwechselrate Fensterlüftung und Infiltration für Abluftanlagen = 0,15 und für Zu- und Abluftanlagen = 0,2 [1/h]

Obwohl die tatsächliche Luftwechselrate immer noch den gleichen Wert aufweist, wird durch die Anlagentechnik der aufzuheizende Anteil der Frischluft reduziert. Welchen Einspareffekt wir dadurch erreichen, betrachten wir im Kap. 12.

6.3.5 Referenzklima

Nach dem Auszug aus der EnEV 2014 muss die DIN V 18599-10 mit der Referenzzone 4 Potsdam eingesetzt werden. Die Norm stellt die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten und die Einstrahlleistungen in Abhängigkeit zu den Winkeln der Empfangsflächen zur Verfügung. Weitere Informationen zu den Referenzwetterdaten befinden sich im Abschn. 6.2.

6.3.6 Monatliche Wärmeverluste

Die monatlichen Wärmeverluste werden aus den durchschnittlichen monatlichen Umgebungstemperaturen, den Innenraumtemperaturen und den ermittelten Verlustwerten berechnet. Dafür werden die stündlichen Werte in Tageswerte konvertiert, dies ist in Gleichung (Gl. 6.25) bereits durch den Zahlenwert eingebunden, und anschließend mit den Monatstagen multipliziert.

$$Q_{l,M} = 0,024 \cdot H_M \cdot (\theta_i - \theta_{e,M}) \cdot t_M \quad (6.25)$$

$Q_{l,M}$ = Monatlicher Wärmeverlust [kWh/mth]

H_M = Spezifischer monatlicher Verlust [H/K]

$(\theta_i - \theta_{e,M})$ = Temperaturdifferenz zwischen der Innenraumtemp. und der Außentemp. [K]

t_M = Monatstage [d]

Der spezifische monatliche Wärmeverlust besteht aus den monatlichen Transmissionsverlusten und den Lüftungswärmeverlusten.

$$H_M = H_{T,M} + H_V \quad (6.26)$$

H_V = Temperaturabhängige Luftwärmeverluste [W/K]

H_T = temperaturabhängiger Transmissionsverlust total [W/K]

6.3.7 Monatliche solare Wärmegewinne

Obwohl monatliche Strahlungsintensitäten über die Referenzklimadaten für die Orientierung und der Neigung bereits vorhanden sind, erfordern die Berechnungen der monatlichen solaren Wärmegewinne noch einiges an Anpassungen.

Das Prinzip, das hinter der Wärmeübertragung steht, fundiert auf dem Strahlungswärmetransport. Wie bei den monatlichen Wärmeverlusten ist ein Umrechnungsfaktor für die Tageswerte bereits in Gleichung (Gl. 6.27) inkludiert.

$$Q_{s,M} = 0,024 \cdot (\Phi_{s,M} + \Phi_{s,op,M} + \Phi_{s,Gvb,m} + \Phi_{s,TWD,M}) \cdot t_M \quad (6.27)$$

$Q_{s,M}$ = Monatliche solare Wärmegewinne [kWh/mth]

$\Phi_{s,M}$ = Solarer monatlicher Wärmestrom durch transparente Bauteile [Wh/mth]

$\Phi_{s,op,M}$ = Solarer monatlicher Wärmestrom durch opake Bauteile [Wh/mth]

$\Phi_{s,Gvb,m}$ = Solarer monatlicher Wärmestrom durch unbeheizte Glasvorbauten [Wh/mth]

$\Phi_{s,TWD,M}$ = Solarer monatlicher Wärmestrom durch transparente Wärmedämmung [Wh/mth]

t_M = Monatstage [d]

Der monatliche Wärmestrom über transparente Bauteile⁶ wird über die mittleren monatlichen Strahlungswerte des Referenzwertes gebildet. Die Strahlungsintensität kann nach Orientierung und Neigung der strahlungsempfangenden Fläche aus der Tabelle DIN V 18599-10 entnommen werden. Zusätzlich werden einige Abminderungsfaktoren als durchschnittliche Abschwächung eingebunden (Tab. 6.5, 6.6, 6.7).

⁶Transparente Bauteile sind durchsichtig (normale Verglasung). Transluzente Bauteile hingegen sind blickdicht jedoch lichtdurchlässig (z. B. Milchglas).

$$\Phi_{s,M} = \sum_{j=1}^m \left(I_{s,M,j} \cdot \sum_{i=1}^n F_S \cdot F_C \cdot F_F \cdot F_W \cdot g_{\perp,i} \cdot A_{i,j} \right) \quad (6.28)$$

- $\Phi_{s,M}$ = Solarer monatlicher Wärmestrom durch transparente Bauteile [Wh/mth]
- $I_{s,M,j}$ = Mittlere Strahlungsintensität [W/m^2]
- F_S = Abminderungsfaktor Verschattung, wird bei einer pauschalisierten Betrachtung auf 0,9 gesetzt [-]
- F_C = Abminderungsfaktor bei kontinuierlicher Sonnenschutzvorrichtung [-]
- F_F = Abminderungsfaktor für die Rahmenanteile, wird bei einer pauschalisierten Betrachtung auf 0,7 gesetzt [-]
- F_W = Abminderungsfaktor durch Reflexion bei nicht senkrechter Wellenkontraktion, wird bei einer pauschalisierten Betrachtung auf 0,9 gesetzt [-]
- $g_{\perp,i}$ = Gesamtenergiedurchlassgrad bei senkrechter Wellenkontraktion [-]
- $A_{i,j}$ = Fensterflächen inklusive der Rahmen [m^2]

Tab. 6.5 Teilbeschattungswinkel F_0 für horizontale Überhänge nach [9]

Position	1	2		3		4		5		6		7	
		45° nördlicher Breite				55° nördlicher Breite							
	Winkel	Süd	Ost/West	Nord	Süd	Ost/West	Nord	Süd	Ost/West	Nord	Süd	Ost/West	Nord
1	0° (kein Überhang)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	30°	0,90	0,89	0,91	0,93	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
3	45°	0,74	0,76	0,80	0,80	0,79	0,80	0,79	0,79	0,80	0,80	0,80	0,80
4	90°	0,50	0,58	0,66	0,60	0,61	0,66	0,61	0,61	0,65	0,65	0,65	0,65

Tab. 6.6 Teilbeschattungswinkel F_f für seitliche Abschattungen nach [9]

Position	1	2		3		4		5		6		7	
		45° nördlicher Breite				55° nördlicher Breite							
	Winkel	Süd	Ost/West	Nord	Süd	Ost/West	Nord	Süd	Ost/West	Nord	Süd	Ost/West	Nord
1	0° (keine Verschattung)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	30°	0,94	0,92	1,00	0,94	0,91	1,00	0,94	0,91	1,00	0,94	0,91	0,99
3	45°	0,84	0,84	1,00	0,86	0,83	1,00	0,86	0,83	1,00	0,86	0,83	0,99
4	90°	0,72	0,75	1,00	0,74	0,75	1,00	0,74	0,75	1,00	0,74	0,75	0,99

Tab. 6.7 Teilbeschattungsfaktor F_h für vertikale Vorbauten nach [9]

Position	1	Winkel	2	3	4	5	6	7
			45° nördlicher Breite			55° nördlicher Breite		
			Süd	Ost/West	Nord	Süd	Ost/West	Nord
1	0° (keine Verbauung)		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	10°		0,97	0,95	1,00	0,94	0,92	0,99
3	20°		0,85	0,82	0,98	0,68	0,75	0,95
4	30°		0,62	0,70	0,94	0,49	0,62	0,92
5	40°		0,46	0,61	0,90	0,40	0,56	0,89

Der Abminderungsfaktor F_S für Verschattungen kann bei Bedarf berechnet werden über Gleichung:

$$F_S = F_0 \cdot F_f \cdot F_h \quad (6.29)$$

F_0 = Beschattungsfaktor für horizontale Überhänge [-]

F_f = Beschattungsfaktor für seitliche Abschattungen [-]

F_h = Beschattungsfaktor für Vorbauten [-]

Der mittlere Wärmestrom über opake Bauteile⁷ ($\Phi_{s,op,M}$) ist im Gegensatz zu den durchsichtigen Bauteilen deutlich kleiner und kann sogar negative Auswirkungen aufweisen. Zu diesem Effekt kommt es, wenn die nächtliche, langwellige Abstrahlung der opaken Oberflächen an die Umgebung größer ist, als die kurzwellige Strahlungsabsorption am Tage. Aufgrund vom geringen Einfluss darf der Wärmestrom über opake Bauteile in der Analyse nach der EnEV vernachlässigt werden.

$$\Phi_{s,op,M} = \sum_{k=1}^n (U \cdot A_k \cdot R_{se} \cdot (\alpha \cdot I_{sk,M} - F_f \cdot h_r \cdot \Delta\theta_{er})) \quad (6.30)$$

k = Orientierung [-]

U = Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

A_k = Fläche des opaken Bauteils

R_{se} = Äußerer Wärmeübergangswiderstand [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

α = Absorptionskoeffizient des bestrahlten Bauteils [-]

$I_{sk,M}$ = mittler monatliche Strahlungsintensität auf die Oberfläche des Bauteils [W/m^2]

F_f = Formfaktor für die Bauteilausrichtung, horizontal=0,5 und vertikal bis 45°=1

⁷Opake Bauteile sind undurchsichtig, z. B. eine gemauerte Wand.

h_r = Abstrahlungskoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

$\Delta\theta_{er}$ = Temperaturdifferenz Außenluft und des Himmels $\approx 10K$

Der Abstrahlungskoeffizient wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (\theta_{ss} + 273K)^3 \quad (6.31)$$

ε = Emissionsgrad [-]

σ = Stefan-Boltzmann-Konstante $= 5,670 \cdot 10^{-8}$ [$(\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4))$]

θ_{ss} = Temperaturdifferenz der Oberfläche und des Himmels als arithmetisches Mittel

Der Absorptionskoeffizient α kann nach der EnEV zu 0,5 gesetzt und der Emissionsgrad zu 0,8 werden.

Die mittleren monatlichen Wärmegewinne über unbeheizte Glasvorbauten setzen sich aus den direkten Wärmegewinnen durch die solare Erwärmung der Trennwand und den indirekten Wärmegewinnen durch den erwärmten Glasvorbauraum zusammen.

$$\Phi_{s,Gvb,m} = \Phi_{sd} + \Phi_{si} \quad (6.32)$$

$\Phi_{s,Gvb,m}$ = Solarer monatlicher Wärmestrom durch unbeheizte Glasvorbauten [Wh/mth]

Φ_{sd} = Direkte Wärmegewinne [Wh/mth]

Φ_{si} = Indirekte Wärmegewinne [Wh/mth]

Die Berechnungen der indirekten und direkten Wärmeströme sind relativ umfangreich und erfordern einige Annahmen. Es wird z. B. eine einheitliche Bestrahlung der absorbierenden Oberfläche angenommen.

Die direkten solaren Wärmegewinne ergeben sich durch den solaren Eintrag über transparente (p) und opake Bauteile (w).

$$\Phi_{sd} = I_p \cdot F_s \cdot F_{Ce} \cdot F_{Fe} \cdot g_{\perp,e} \cdot \left(F_{CW} \cdot F_{FW} \cdot g_W \cdot A_W + \alpha_{sp} \cdot A_p \cdot \frac{U_p}{U_{pe}} \right) \quad (6.33)$$

Φ_{sd} = Direkter solarer Wärmegewinn [Wh]

I_p = Solare mittlere Strahlungsintensität auf die Trennwand [W]

F_s = Abminderungsfaktor Verschattung [-]

F_C = Abminderungsfaktor bei kontinuierlicher Sonnenschutzvorrichtung [-]

- $F_F =$ Abminderungsfaktor für die Rahmenanteile [-]
 $F_W =$ Abminderungsfaktor durch Reflexion bei nicht senkrechter Wellenkontraktion [-]
 $g_{\perp} =$ Gesamtenergiendurchlassgrad [-]
 $A =$ Fläche [m^2]
 $U =$ Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
 $\alpha_{sp} =$ Solarer Absorptionsgrad der strahlungsaufnehmenden Oberfläche [-]
 $t_M =$ Monatstage [d]

Die indirekten solaren Wärmegewinne resultieren aus der Wärmeleitung von dem Vorbau in den beheizten Raum durch eine solare Erwärmung. Bei unterschiedlichen Flächeneigenschaften erfolgt eine einzelne Betrachtung der jeweiligen Flächen. Ebenfalls muss der direkte solare Strahlungsanteil abgezogen werden.

$$\Phi_{si} = (1 - F_u) \cdot F_s \cdot F_{Ce} \cdot F_{Fe} \cdot g_e \cdot \left(\sum_{i=1}^n I_{si} \cdot \alpha_{si} \cdot A_i - I_{si} \cdot \alpha_{sp} \cdot A_p \cdot \frac{U_p}{U_{pe}} \right) \quad (6.34)$$

- $F_u =$ Temperatur-Korrekturfaktor für unbeheizte Nebenräume

Bei der Analyse über transparente Wärmdämmssysteme wird die folgende Gleichung (Gl. 6.35) eingesetzt.

$$\Phi_{s,TWD,M} = \sum_{j=1}^m U \cdot A_j \cdot \left(\frac{\alpha \cdot g_{Ti}}{U_e} \cdot F_s \cdot F_F \cdot I_{sj,M} - F_f \cdot R_{se} \cdot h_r \cdot \Delta\theta_{er} \right) \quad (6.35)$$

- $j =$ Orientierung [-]
 $U =$ Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
 $A_j =$ Fläche des opaken Bauteils
 $\alpha =$ Solarer Absorptionsgrad der strahlungsaufnehmenden Oberfläche [-]
 $g_{Ti} =$ Gesamtenergiendurchlassgrad der transparenten Wärmedämmung [-]
 $F_s =$ Abminderungsfaktor Verschattung [-]
 $F_F =$ Abminderungsfaktor für die Rahmenanteile [-]

- R_{se} = Äußerer Wärmeübergangswiderstand [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
 α = Absorptionskoeffizient des bestrahlten Bauteils [-]
 $I_{sj,M}$ = mittler monatliche Strahlungsintensität auf die Oberfläche des Bauteils [W/m^2]
 F_f = Formfaktor für die Bauteilausrichtung, horizontal = 0,5 und vertikal bis 45° = 1
 h_r = Abstrahlungskoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
 $\Delta\theta_{er}$ = Temperaturdifferenz Außenluft und des Himmels $\approx 10K$

6.3.8 Monatliche interne Wärmegewinne

Die internen Wärmegewinne ($Q_{i,M}$) können bei sehr hochgedämmten Gebäuden einen großen Anteil am Raumwärmeverbrauch abdecken. Sie setzen sich aus menschlichen, tierischen und technischen Abwärmen zusammen.

$$Q_{i,M} = 0,024 \cdot \Phi_{i,M} \cdot t_M \quad (6.36)$$

- $Q_{i,M}$ = Innere Wärmegewinne [kWh/mth]
 $\Phi_{i,M}$ = Interner Wärmestrom [kWh/mth]
 t_M = Monatstage [d]

Da eine exakte Bilanzierung aller wärmeabgebenden Komponenten, die ebenfalls nur zeitweise anwesend bzw. aktiv sein können, zu komplex ist, sind flächenbezogene Richtwerte (DIN V 4108-6 Tab. 6.2) verfügbar.

$$\Phi_{i,M} = q_{i,M} \cdot A_N \quad (6.37)$$

- $q_{i,M}$ = Flächenbezogener Richtwert für Wohngebäude 5 und für Bürogebäude 6 [W/m^2]
 A_N = Gesamtnutzfläche = $0,32 \cdot V_e$

Hinweis

Die internen Wärmegewinne können uns aber nicht nur helfen. In Bürogebäuden sorgen die internen Wärmegewinne durch die Belegsschaft und Technik schnell für eine Überhitzung der Räume. Abhilfe schafft dann eine Klimaanlage die ebenfalls wieder Energie benötigt.

6.3.9 Summation der monatlichen Wärmegewinne

Die Summe der monatlichen solaren und internen Wärmegewinne ($Q_{g,M}$) ergibt den Gesamtwärmeenergiegewinn. Jedoch muss die Ausnutzbarkeit der Wärmegewinne noch bestimmt werden.

$$Q_{g,M} = Q_{s,M} + Q_{i,M} \quad (6.38)$$

$Q_{g,M}$ = Wärmegewinne gesamt [kWh/mth]

$Q_{i,M}$ = Innere Wärmegewinne [kWh/mth]

$Q_{s,M}$ = Monatliche solare Wärmegewinne [kWh/mth]

6.3.10 Speicherfähigkeit des Gebäudes

Ein zentrales Element für die Ausnutzbarkeit der Wärmegewinne ist die Wärmespeicherfähigkeit (C_{wirk}) des Gebäudes. Ein schweres Gebäude hat eine höhere Speicherfähigkeit und somit eine höhere Trägheit bei Temperaturänderungen, als ein leichtes Gebäude.

Nach der DIN V4108-6 können folgende Wärmespeicherfähigkeiten pauschalisiert angesetzt werden:

- Leichtes Gebäude $C_{wirk} = 15 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot V_e$ (Gebäude mit Trockenbauwänden, abgehängter Decke, Holztafelbau und besonders hohe Räume)
- Schweres Gebäude $C_{wirk} = 50 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot V_e$ (massive Innen- und Außenwände, keine abgehängten Decken)

Oder es kann eine detaillierte Analyse durchgeführt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass lediglich Schichttiefen von bis zu 100 mm und eine Wärmeleitfähigkeit größer $\lambda_i = 0,1 \text{ W}/(\text{mK})$ einen wirksamen Effekt aufweisen. Ebenfalls können nur Flächen mit direktem Luftkontakt die Wärme an die Raumluft abführen bzw. aufnehmen. Innenwände mit zweiseitigem Luftkontakt sind bis maximal 200 mm auf die einzelnen Räume aufzuteilen.

$$C_{wirk} = \sum_{i=1}^n (c_i \cdot \rho_i \cdot d_i \cdot A_i) \quad (6.39)$$

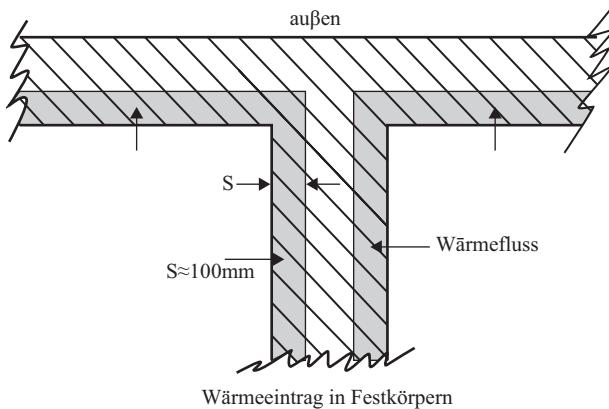
C_{wirk} = Wärmespeicherfähigkeit Gebäude [Wh/K]

V_e = Brutto Raumvolumen [m^3]

c_i = Spezifische Wärmekapazität [Wh/(kgK)]

ρ_i = Rohdichte [kg/m^3]

- d_i = Materialstärke [m]
 A_i = Bauteilfläche [m^2]



6.3.11 Kombination der monatlichen Wärmeverluste, der Wärmegewinne und der Speicherfähigkeit des Gebäudes über den monatlichen Ausnutzungsgrad

Der monatliche Ausnutzungsgrad (η_M) kann nun über das Verhältnis der jährlichen Wärmegewinne zu den jährlichen Wärmeverlusten berechnet werden:

$$\gamma = \frac{Q_s + Q_i}{Q_h + Q_L}$$

- γ = Energiegewinn-Verlust-Verhältnis [-]
 Q_i = Innere Wärmegewinne [kWh]
 Q_s = Monatliche solare Wärmegewinne [kWh]
 Q_l = Monatlicher Wärmeverlust [kWh]
 $Q_{h,M}$ = Monatliche Heizungswärmebedarf [kWh/mth]

Das spezifische Verhältnis der Verluste zu der Speicherfähigkeit ergibt aus der folgenden Gleichung den Parameter a :

$$a = 1 + \frac{C_{Wirk}}{16 \cdot H} = 1 + \frac{C_{Wirk}}{16 \cdot (H_T + H_V)}$$

- $a =$ Spezifisches Verhältnis [-]
 $H_V =$ Temperaturabhängige Luftwärmeverluste [W/K]
 $H_T =$ Temperaturabhängiger Transmissionsverlust total [W/K]
 $C_{Wirk} =$ Wärmespeicherfähigkeit Gebäude [Wh/K]

Wenn das monatliche Gewinn-Verlust-Verhältnis identisch ist wird $\gamma = 1$. Dann erfolgt die Berechnung des monatlichen Ausnutzungsgrad durch Gleichung:

$$\eta_m = \frac{a}{a + 1} \quad (6.40)$$

η_m = Monatlicher Ausnutzungsgrad

In allen anderen Fällen wird mit der folgenden Gleichung gerechnet:

$$\eta_m = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad (6.41)$$

6.3.12 Resultierender monatlicher Heizwärmebedarf

Der monatliche Heizwärmebedarf ($Q_{h,M}$) resultiert aus den berechneten Verlusten, abzüglich den nutzbaren Gewinnen aus den vorherigen Abschnitten.

$$Q_{h,M} = Q_{l,M} - \eta_m \cdot (Q_{S,M} + Q_{i,M}) \quad (6.42)$$

6.3.13 Jahresheizwärmebedarf

Die Summe aller Monatswerte ergibt den Jahresheizwärmebedarf. Zu beachten ist, dass es sich um einen theoretischen Wert handelt. Das konkrete Nutzungsverhalten und damit verbundene Abweichungen von den zuvor getätigten Annahmen, können zu veränderten Werten im realen Betrieb führen.

$$Q_h = \sum_{i=1}^n Q_{h,M} \quad (6.43)$$

Als Bauherr ist das Ergebnis aus der Berechnung ein wichtiger Hinweis zur Effizienz unseres Wohngebäudes. Je geringer der Heizwärmebedarf desto weniger Heizkosten erwarten uns im Jahr.

6.4 Jahresheizenergiebedarf DIN V 4701-10

Der Jahresheizenergiebedarf wird nach der DIN V 4701-10 berechnet. Grundlage ist der Jahresheizwärmeverlust, der Wärmeverlust der Anlagentechnik und der flächenbezogene Warmwasserbedarf aus der DIN V 4108-6. Dieser wird nach der DIN mit $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für Wohngebäude angesetzt.

Über die DIN V 4701-10 werden die Anlagenverluste und die Wärme-
gewinne aus der Umwelt in die Berechnung der Wärmebedürfnisse
implementiert. Anschließend wird die Anlagenaufwandszahl (e_p) gebildet.
Sie beschreibt die Effizienz der gewählten Anlage.

$$e_p = \frac{Q_p}{(Q_h + Q_W)} = \frac{\text{Aufwand}}{\text{Nutzen}} \quad (6.44)$$

e_p = Anlagenaufwandszahl

Q_p = Primärenergiebedarf [kWh]

Q_h = Jahresheizwärmeverlust [kWh]

Q_W = Jahreswarmwasserenergiebedarf [kWh]

In der Berechnung ist zu erkennen, dass die Anlagenaufwandszahl der Kehrwert des im Anlagenbau gängigen Nutzungsgrades ist. Umgeformt nach dem Primärenergiebedarf ergibt sich folgende Gleichung:

$$Q_p = (Q_h + Q_W) \cdot e_p \quad (6.45)$$

Die Anlagenaufwandszahl kann nach dem Verfahren der DIN V 4701-10 detailliert berechnet und somit an die tatsächlichen Anlagenparameter angepasst werden. Jedoch ist der Aufwand relativ hoch und bietet in der Praxis nur geringe Vorteile. Zusätzlich kompensieren die Herstellerangaben über die Komponenteneffizienz den tatsächlichen Vorteil einer berechneten Anlagenaufwandszahl. Üblicherweise werden die Wirkungsgrade für den perfekten Betriebspunkt angegeben. Die optimalen Betriebsbedingungen, welche auf den Testfeldern der Anlagenhersteller vorliegen, sind im Realbetrieb nur selten zu generieren.

Ebenfalls bietet die DIN V 4701-10 in den Beiblättern Referenzwerte und Diagramme von unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen, um eine schnelle Analyse der Anlagenaufwandszahl zu ermöglichen.

6.5 Anforderung an den Mindestwärmeschutz DIN V 4108-2

Der Mindestwärmeschutz nach der DIN V 4108-2 soll die Eintragung von Strahlungsenergie in die Gebäudehülle durch die Glasflächen reduzieren bzw. verhindern. Der sommerliche Wärmeschutz wurde erstmals in der EnEV 2014 § 3 Abs. 4 eingeführt. Ziel dieser Maßnahme ist eine Reduktion oder eine gänzliche Vermeidung des Einsatzes von Kühlenergie während der Sommermonate. Die Berechnung erfolgt über den raumbezogenen Sonnen-eintragskennwert durch die DIN V 4108-2.

Eine elementare Größe für den Sonneneintragskennwert stellt der Gesamtenergiedurchlassgrad (g) dar. Er dient der Berechnung in Kombination mit Abminderungsfaktoren. Diese können der Tab. 6.8 entnommen werden.

$$S_{vorh} = \sum_{j=1}^n \frac{A_{W,j} \cdot g_{total,j}}{A_G} \quad (6.46)$$

A_W Fensterfläche in m^2

g_{total} Gesamtenergiedurchlassgrad

A_G Netto Raumfläche in m^2

$$g_{total} = g \cdot F_C \quad (6.47)$$

Tab. 6.8 Abminderungsfaktoren Sonnenschutzworrichtungen F_c nach [9]

Position	Beschreibung	Zweifach Sonnen- schutzglas	Dreifach Wärme- schutzglas	Zweifach Wärmedämmglas
1	Ohne Sonnenschutzworrichtung	1	1	1
2	Hochreflektierende Oberfläche zwischen den Scheiben oder innenliegend	0,65	0,7	0,65
3	Außenliegende Fensterrollläden zu 75 % geschlossen	0,35	0,3	0,3
4	Außenliegende Jalousien oder Raffstoffe mit 45° Lamellenstellung	0,3	0,25	0,25
5	Außenmarkise, parallel zur Verglasung	0,3	0,25	0,25

- g Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases
 F_C Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen

Anschließend muss der vorhandenen Sonneneintragskennwert kleiner als der zulässige Wert sein.

$$S_{\text{vorh}} \leq S_{\text{zul}} \quad (6.48)$$

Positiv auf den zulässigen Sonneneintragskennwert wirkt eine schwere Bauart, in der die hohe Masse die aufkommende Strahlungsenergie aufnehmen und verzögert wieder abgeben kann. Des Weiteren kann sich eine erhöhte Nachtlüftung positiv auswirken.

Verzichtet werden darf auf die Berechnung, wenn die Fensterfläche in Ost-, über Süd- bis hin zur Westausrichtung kleiner als 35 % der Grundfläche des betroffenen Raumes beträgt und ein außenliegender Sonnenschutz mit einer Abminderungsfaktor $F_C \leq 0,30$ bei Wärmedämmglas mit $g > 0,40$ vorhanden ist. Wird ein Sonnenschutzglas $g \leq 0,40$ eingesetzt, dann muss der außenliegende Sonnenschutz einen Abminderungsfaktor von $F_C \leq 0,35$ aufweisen (vgl. DIN 4108-2).

Sind Klimaanlagen vorhanden, dann müssen die Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes durch die Einsparung der Kühlenergie wirtschaftlich sein.

6.6 Das Referenzhausverfahren

6.6.1 Maximaler Jahresprimärenergiebedarf

Der maximal zulässige Jahresprimärenergiebedarf wird über ein Referenzgebäude ermittelt. Die Gebäudegeometrie inkl. geplanter Fensterflächen und die geografische Ausrichtung werden für die Berechnung nach der DIN V 4108-6 dem tatsächlichen Bauplan angepasst. Anschließend werden die Eigenschaften der Bauteile mit der Referenzausführung belegt (siehe Tab. 6.9). Aus der Berechnung ergibt sich der maximale Jahresprimärenergiebedarf. Dieser muss seitdem 01.01.2016 noch um 25 % reduziert werden, um den zulässigen Höchstbedarfswert zu erhalten.

Tab. 6.9 Referenzgebäudewerte nach der EnEV

Position	Beschreibung	Index	Wert	Einheit
1	Außenwand und Geschossdecke gegen Außenluft	U	0,28	W/(m ² K)
2	Außenwand gegen Erdreich, Bodenplatte, Wände und Decken zu unbeheizten Räumen	U	0,35	W/(m ² K)
3	Dach, oberste Geschossdecke, Wände zu Abseiten	U	0,2	W/(m ² K)
4	Fenster und Fenstertüren	U	1,3	W/(m ² K)
5	Fenster und Fenstertüren	g	0,6	
6	Dachflächenfenster	U	1,4	W/(m ² K)
7	Dachflächenfenster	g	0,6	
8	Lichtkuppeln	U	2,7	W/(m ² K)
9	Lichtkuppeln	g	0,64	
10	Außentüren	U	1,8	W/(m ² K)
11	Wärmebrückenzuschlag	ΔU	0,05	W/(m ² K)
12	Luftdichtheit der Gebäudehülle	n	0,6	h ⁻¹

Tab. 6.10 Spezifische Höchstwerte Transmissionsverlust nach der EnEV

Position	Beschreibung	Index	Wert	Einheit
1 a	Freistehendes Wohngebäude mit AN ≤ 350m ²	H' _T	0,40	W/(m ² K)
1 b	Freistehendes Wohngebäude mit AN > 350m ²	H' _T	0,50	W/(m ² K)
2	Einseitig angebautes Wohngebäude (z. B. Doppelhaus, Endreihenhaus)	H' _T	0,45	W/(m ² K)
3	Alle anderen Wohngebäude (z. B. Mittelreihenhaus)	H' _T	0,65	W/(m ² K)
4	Erweiterung und Ausbau von Wohngebäuden nach § 9 Abs. 5	H' _T	0,65	W/(m ² K)

6.6.2 Maximaler spezifischer Transmissionswärmeverlust

Neben den Gesamtprimärenergiebedarf des Referenzhauses sind maximale Transmissionswärmeverluste festgelegt worden. Somit soll erreicht werden, dass alle Komponenten in der Kombination eine gewisse energetische Qualität erfüllen. Die maximalen spezifischen Transmissionswärmeverluste sind in der Tab. 6.10 aufgelistet.



7

Bewertungsverfahren

Wir wollen die ökonomischen und ökologischen Eigenschaften des geplanten Bauobjekts für eine nachhaltige Entscheidung analysieren und Optimierungspotenziale aufdecken. Dafür werden wir in einem ersten Schritt die Ökonomie betrachten und Gleichungssysteme für eine individuelle Bewertung entwickeln. Anschließend erfolgt eine ökologische Bewertung.

Der Zusammenhang zwischen Erstaufwendungen und einer energetischen Effizienz während der Betriebsphase ist in vielen Fällen nicht von der Hand zu weisen, doch müssen die Einsparungen die erhöhten Aufwendungen in der Herstellung und eventuell in der Entsorgung kompensieren, um einen ökonomischen und ökologischen Vorteil über den kompletten Lebenszyklus zu generieren.

LCC =Lebenszykluskosten (life cycle costs)

Die Abb. 7.1 zeigt den Zusammenhang zwischen den Erstaufwendungen, der Betriebseffizienz und somit den Betriebsaufwendungen. Aus der Kombination der beiden Aufwendungen ergibt sich eine Funktion mit einem Aufwendungsoptimum, bezogen auf die geringsten Aufwendungen. In diesem Punkt sollte eine ökonomische und ökologische Auslegung stattfinden. Dieser Punkt wird in den aktuellen Bewertungen nach der EnEV nicht bewusst gesucht.

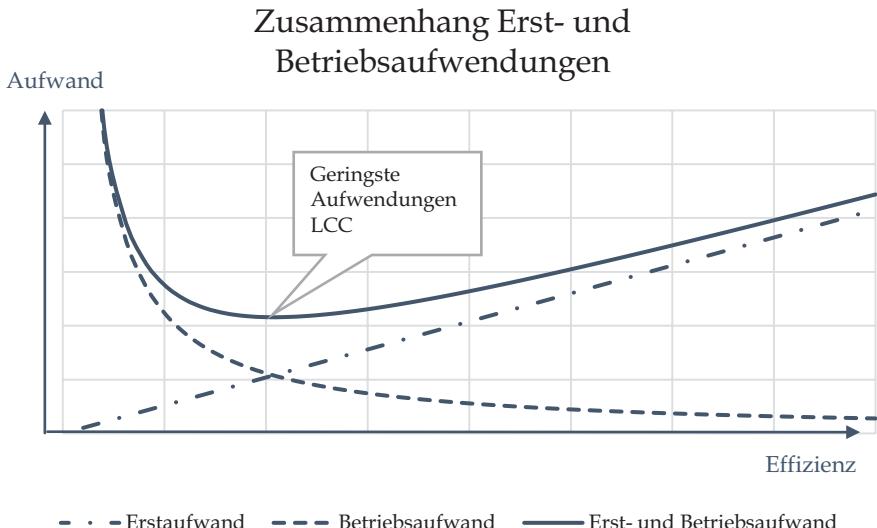


Abb. 7.1 Zusammenhang zwischen Erst- und Betriebsaufwendungen

7.1 Ökonomische Bewertung

7.1.1 Statische ökonomische Bewertung

Auf der ökonomischen Seite betrachten wir die Lebenszykluskosten. Diese bestehen mindestens aus den Investitionskosten und den Betriebskosten über den Betrachtungszeitraum. Sollte am Ende der Lebensphase ein Recycling anstehen, dann empfiehlt sich eine Erweiterung der Betrachtung um die Recyclingkosten. Durch die Bewertung der Lebenszykluskosten können wir eine ökonomisch nachhaltige Bilanzierung gewährleisten und Effekte wie den Leakageeffekt vorbeugen. Wir werden uns einer statischen ökonomischen Betrachtung bedienen. Diese hat den Vorteil, dass sie einfach aufzustellen und zu bewerten ist.

$$K_{LCC} = K_i + \sum_{j=1}^n (K_{V,j}) + K_{Rec} \quad (7.1)$$

K_{LCC} = Lebenszykluskosten [€]

K_i = Investitionskosten [€]

$K_{V,j}$ = Jährliche Betriebskosten [€/a]

K_{Rec} = Recyclingkosten [€]

n = Betriebsjahre [a]

7.1.2 Dynamische ökonomische Bewertung

Weiterhin können die Kostenanalysen ebenfalls dynamisch erweitert werden, indem jährliche Kostensteigerungen und die Barwertmethode mit einbezogen werden. Dafür bietet sich eine Analyse über die Kapitalwertmethode an. Die Kapitalwertmethode bildet die Grundlage aller dynamischen Kostenvergleichsrechnungen und ermittelt die Bedingungen, um eine Investition als vorteilhaft bewerten zu können. Die Fachbegriffe zeigen, dass wir mit der Kapitalwertmethode im Bereich der betrieblichen Buchhaltung angekommen sind.

$$C_0 = -A_0 + (e_1 - a_1) \cdot (1+i)^{-1} + (e_2 - a_2) \cdot (1+i)^{-2} + \dots + (e_n - a_n) \cdot (1+i)^{-n} + L_n \cdot (1+i)^{-n} \quad (7.2)$$

C_0 = Kapitalwert [€]

A_0 = Erstaufwendungen vergleichbar mit den Investitionskosten [€]

e = Jährliche Einnahmen [€]

a = Jährliche Ausgaben [€]

n = Betriebsjahre [a]

i = Barwert [a]

L_n = Restwert oder Recyclingkosten [€]

Die jährlichen Teuerungen sind direkt in den jährlichen Einnahmen und Ausgaben eingebunden und somit nicht separat in der Kapitalwertgleichung erwähnt.

Zusammengefasst für eine bessere Übersichtlichkeit ergibt sich die Gleichung:

$$C_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{e_t - a_t}{(1+i)^t} \right] + L_n \cdot (1+i)^{-n} \quad (7.3)$$

Da wir keine Einnahmen erwarten (außer bei einer KWK-Anlage), können wir Gl. 7.3) nach [3] zu einer reinen Kostengleichung vereinfachen.

$$C_0 C = A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{a_t}{(1+i)^t} \right] \quad (7.4)$$

$C_0 C$ = Kostenbezogener Kapitalwert [€]

Mit der dynamischen Kostenrechnung erreichen wir eine höhere Güte der Bewertungen gegenüber der einfacheren statischen Kostenrechnung, solange die angesetzten Faktoren stimmen. Der Mehrwert der Ergebnisse hält sich für Privatpersonen jedoch in Grenzen. Daher empfiehlt sich die statische Kostenrechnung als Bewertungswerkzeug.

7.2 Das Betriebswirtschaftliche Optimum (BwO)

Ob die Kosten über die einfachere statische oder über die umfangreichere dynamische Kostenrechnung durchgeführt werden, entscheidet der Nutzer. Ziel beider Analysen ist es, das Kostenoptimum aufzudecken. Der Punkt mit den geringsten lokalen Lebenszykluskostenaufwendungen wurde von Volta 2014 als das Betriebswirtschaftliche Optimum (BwO) definiert.¹

Nach [3] kann der Punkt für das BwO über eine Kurvendiskussion definiert werden, anschließend können alle Konfigurationen über Gl. 7.5) mit der ökonomisch effektivsten Variante faktorisiert werden.

$$F_{\text{BwO}} = \frac{C_0 C}{C_0 C_{\text{BwO}}} = \frac{K_{\text{LCC}}}{K_{\text{LCC, BwO}}} \quad (7.5)$$

Daraus ergibt sich eine dimensionslose Kennzahl bezogen auf ein lokales Minimum. Läuft der Faktor in Richtung eins, dann nähert sich die Konfiguration dem Optimum an.

Eine Beschreibung des Verfahrens erfolgt gemeinsam mit den anderen Einflussfaktoren im Abschn. 7.7.

7.3 Ökologische Bewertung

Ein weitverbreiteter Gedanke ist, dass der ökonomischen Betrachtung die ökologische gegenüber steht und die beiden Ansätze konträr zueinander wirken. Dies trifft jedoch nur bei einer kurzfristigen Bewertung zu.² Über die Betriebsphase korrelieren die Betrachtungen. Ein erhöhter Ressourcen-

¹Vgl. [13].

²Vgl. [3, S. 32].

verbrauch, gerade im Energiesektor, geht auch mit hohen Betriebskosten einher. Somit kann eine effiziente Anlagengestaltung nicht nur die Umwelt schützen, sondern sich auch positiv auf den Geldbeutel auswirken.

Eine Anlagenbewertung nach der Effizienz während der Betriebsphase kann nach dem Verfahren des Physikalischen Optimums (PhO) nach der VDI-Richtlinie 4663 stattfinden. Energie- und Stoffeffizienzen werden auf das physikalisch Notwendige bezogen und erhalten somit eine unüberwindbare Grenze.

Ein physikalisch optimales System würde nur so viel Energie verbrauchen, wie es zur Bedarfsdeckung benötigt. Damit ist die Wirkarbeit gleich dem physikalisch notwendigen Aufwand.

$$V_{\text{PhO}} = V_{\text{Wirkarbeit}} \quad (7.6)$$

In der Realität haben technische Systeme leider immer eine Ineffizienz durch Verluste, die sich nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik auch nicht vollständig verhindern lässt.³

$$V_{\text{sys}} = V_{\text{PhO}} + V_{\text{verl}} \quad (7.7)$$

Eine faktorierte Bewertung gibt eine dimensionslose Bewertungszahl des Verfahrens an.

$$F_{\text{PhO}_{\text{sys}}} = \frac{V_{\text{PhO}} + V_{\text{verl}_{\text{sys}}}}{V_{\text{PhO}}} = 1 + \frac{V_{\text{verl}_{\text{sys}}}}{V_{\text{PhO}}} \quad (7.8)$$

Für die ökologischen Effekte wollen wir uns auf zwei Betrachtungen beschränken, gleichzeitig aber auch auf die weiteren Umweltbelastungen hinweisen. Wir werden in den Betrachtungen die Treibhausemissionen und den Primärenergieaufwand bewerten. Weitere Umweltaufwendungen wie z. B. das Versauerungspotenzial, toxische Belastungen, Eutrophierung usw. bleiben unberücksichtigt.

7.4 Der Carbon Footprint (CF)

Mit dem Carbon Footprint wollen wir die treibhausäquivalenten Emissionen über eine Lebenszyklusanalyse einbinden. Treibhausgasaufwendungen können durch Produkte oder Dienstleistungen entstehen und

³Bei jeder Energiewandlung entsteht Entropie, welche aus dem System abgeführt werden muss und die Energiewandlung irreversibel macht.

sorgen für eines der größten Umweltprobleme, vor dem unsere Generation aktuell steht (siehe Abschn. 4.1).

Zu den häufigsten Treibhausgasen zählen Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) sowie diverse Fluor-(chlor-)kohlenwasserstoffe. Sie werden zusammengefasst über Gewichtungsfaktoren zu CO_2 -äquivalenten Emissionen.

Die treibhausgasrelevanten Verfahren werden nach dem Verfahren des Carbon Footprints bilanziert. Dabei unterscheidet die Analyse nicht zwischen biogenen und fossilen Treibhausgasemissionen. Dieser Punkt führt immer wieder zu Diskussionen.

„Biogene Treibhausgase resultieren aus der Verbrennung natürlicher Energieträger wie Holz. Das ausgestoßene CO_2 wird während der Lebensphase des Baumes aus der Atmosphäre gebunden. Dies kann für eine Klimaneutralität beim Recycling sorgen. Auch die Verwendung von Biogas – das größtenteils aus Methan besteht – ist klimaneutral, sofern das biogene Methan verbrannt wird. Entweicht das Methan in die Umwelt, ist die Wirkung des Methans deutlich treibhaussteigernder als die Bindung während der Lebens- und Wachstumsphase. Dies liegt am hohen Treibhauspotenzial von Methan.“ [3]

Der Carbon Footprint besteht aus den emittierten Treibhausgasemissionen aus der Herstellung, der Distribution, dem Betrieb und dem Recycling.

$$CF = CF_{\text{Herst}} + CF_{\text{Distr}} + CF_{\text{Betr}} + CF_{\text{Recyc}} \quad (7.9)$$

CF = Carbon Footprint [kg CO_2 äq.]

Eine mögliche Quelle für die Bewertung von Baumaterialien ist die Internetdatenbank Ökobaudat.de. Im Gegensatz zu vielen kostenpflichtigen Datenbanken ist Ökobaudat.de eine kostenfreie Quelle. Das Informationsportal für nachhaltiges Bauen wird vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat herausgegeben. Es ermöglicht den Vergleich der ökologischen Eigenschaften von Bauprodukten. Das Verfahren hinter den ausgegebenen Aufwendungen basiert auf den Ökobilanzen der Produkte nach der ISO 14040 und 14044, welche zeitweise spezifisch angegeben werden. Die Aufwendungen werden in vier verschiedenen Lebensphasen gruppiert (A-D). In der Herstellung werden die Kategorien A1 bis A3 ausgewertet. In der Kategorie A1 sind die Aufwendungen für die Rohstoffgewinnung einzubezogen, die Kategorie A2 befasst sich mit den Transportaufwendungen der Rohstoffe zur Fertigungsstätte und schließlich sind in der Kategorie A3 die Aufwendungen in der Herstellung betitelt. Keine Berücksichtigung finden

in unseren Analysen die Aufwendungen A4 und A5, welche den Transport zum Aufstellungsplatz und den Aufwand für den Einbau beschreiben. Diese Aufwendungen sind durch die hohe Individualität der Anwendung und des Anwendungsortes nur sehr schwer pauschal zu bewerten. In unseren Betrachtungen können die Aufwendung in diesem Bereich annähernd gleichgesetzt werden, wodurch sie vereinfacht vernachlässigbar sind.

Mit der Nutzungsphase wird sich in der Übergruppe B befasst. Wir wollen hier die Betriebsemissionen und den Betriebsenergieaufwand betrachten, das entspricht der Kategorie B6. Die Gruppe C befasst sich mit dem Rückbau und der Entsorgung. C2 steht für den Abtransport und C4 für die Deponierung von nicht wiederverwendbaren Ressourcen. In der Gruppe D erfolgt eine Gutschrift für das Recyclingpotential. Kann z. B. Stahl wiederverwendet werden, dann spart das in der Summe Emissionen gegenüber einer Neuproduktion ein.

7.4.1 Das Carbon-Footprint-Optimum (CFO)

Analog zu der Berechnung vom Betriebswirtschaftlichen Optimum (BwO) erfolgt die Berechnung des Carbon-Footprint-Optimums (CFO) nach [3]. Aus allen Anlagenkonfigurationen wird das lokale Optimum bestimmt und die anderen Konfigurationen werden damit faktorisiert. Der CFO-Faktor ist das dimensionslose Verhältnis zum minimalen CO₂-äquivalenten Zustand, der mit der Anlage unter den getroffenen Randbedingungen möglich ist:

$$CFO = CF_{\min} \quad (7.10)$$

$$F_{CFO} = \frac{CF_{\text{sys}}}{CFO} \quad (7.11)$$

CFO = Carbon-Foot-Optimum [kg CO₂ äq.]

F_{CFO} = Faktor Carbon-Foot-Optimum

Die optimale Anlagenkonfiguration nach dem Carbon Footprint kann für eine in Abhängigkeit stehende Systemvariable über die Kurvendiskussion nach [3] bestimmt werden. Dafür wird Gl. 7.9) zur Gleichung (7.12) umgeformt. Nun stehen alle Aufwendungen in Abhängigkeit zur Systemvariable, nach der abgeleitet wird.

$$CF_{\text{sys}}(x) = CF_{\text{Herst}}(x) + CF_{\text{Distr}}(x) + CF_{\text{Betr}}(x) + CF_{\text{Recyc}}(x) \quad (7.12)$$

Nachdem die Gleichung abgeleitet wurde, erfolgt eine Gleichsetzung zu null und eine Auflösung nach der gesuchten Variablen. Somit kann der Punkt des Graphen ermittelt werden, an dem die Steigung gleich null ist. Ob es sich wirklich um ein lokales Minimum handelt oder um ein Maximum kann über die Monotonietabelle analysiert werden.

7.4.2 Der spezifische Carbon-Footprint für Strom

Das deutsche Stromnetz ist ein Teil des europäischen Verbundnetzes. Das Verbundnetz ist in den vergangenen Jahrzehnten gewachsen, sodass die Bezeichnung „europäisch“ eigentlich irreführend ist. Es reicht von Marokko über Zentraleuropa bis in die Türkei hinein. Durch den Zusammenschluss der internationalen Strom-Verbraucher und -Produzenten wird eine hohe Frequenzstabilität erreicht.

Ein Teil der deutschen Energiewende basiert auf dem Ausbau von regenerativen Energien, um somit den Strommix CO₂-neutraler zu gestalten. In den vergangenen Jahren ist der Anteil an nachhaltigen Energien im Strommix kontinuierlich gesteigert worden, was sich in den spezifischen Treibhausemissionen pro elektrische Energieeinheit widerspiegelt. Die spezifischen Treibhausemissionen resultieren aus der Summe der Aufwendungen, basierend auf allen Energiequellen (fossile und regenerative) und der produzierten Menge an Energie. Somit sinken die spezifischen Emissionen, umso mehr regenerative Energien im Netz verteilt werden. Nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) haben die erneuerbaren Energien einen Einspeisevorrang an der Strombörsen vor den konventionell erzeugten elektrischen Energien.

In der öffentlichen Meinung ist immer wieder zu vernehmen, dass die erneuerbaren Energien den Strom deutlich verteuert haben. Doch das ist bei einer genauen Betrachtung nicht richtig. Durch das EEG werden die erneuerbaren Energien an der Strombörsen (EEX) nicht nur vorrangig, sondern vor allem kostenfrei vor allen anderen eingebunden. Die Strombörsen funktioniert nach dem Merit-Order-Prinzip. Dabei werden die günstigsten Kraftwerke, bei entsprechendem Bedarf, zuerst hinzugefügt. Reicht die produzierte Strommenge nicht zur Deckung aus, folgen die nächst teureren Kraftwerke. Dies wird so lange fortgeführt, bis der Bedarf und die Einspeiseleistung ausgeglichen sind. Das letzte hinzugefügte Kraftwerk bestimmt den Verkaufserlös an der Strombörsen und diesen erhalten alle einspeisenden Kraftwerke. Durch die kostenfreien regenerativen Energien sind die Grenzkosten regelmäßig bei einer niedrigeren Summe

erreicht. Somit ist der Strompreis durch die erneuerbaren Energien eigentlich günstiger geworden und gerade dieser Effekt macht den Strompreis für den allgemeinen Kunden teurer. Das Paradoxon entsteht zum einen durch die Förderungen der erneuerbaren Energien, die als Aufschlag zu den erwirtschafteten Erlösen von der Strombörse als Investitionsanreiz zugesprochen werden und zum anderen aus den EEG-befreiten Großindustrien. Die Großindustrien sind knapp für ein Drittel des nationalen Stromverbrauchs verantwortlich. Verfügen die Industrien über ein Umweltmanagementsystem nach der DIN EN ISO 14001 und ein Ressourcenmanagementsystem nach der DIN EN ISO 50001, dann können diese sich von der Stromsteuer und der EEG-Umlage befreien lassen. Die fehlenden Einnahmen werden anschließend auf den allgemeinen Verbraucher umgelegt. Es bleibt festzuhalten, für die Großindustrie ist elektrische Energie sehr günstig zu bekommen. Wir privaten Verbraucher hingegen würden von einem steigenden Strompreis an der Strombörse profitieren, dann müsste die Industrie mehr zahlen und die Umlage würde für uns sinken.

Die Entwicklung des CO₂-Emissionfaktors und der Anteil an erneuerbaren Energien im deutschen Strommix ist in der Abb. 7.2 dargestellt.

Deutschland exportierte in den vergangenen Jahren deutlich mehr Energie über das Verbundnetz zu den europäischen Partnerländern, als es importierte. Dadurch profitieren auch die Verbundnetzpartner von nachhaltiger, treibhausgasreduzierter elektrischer Energie.

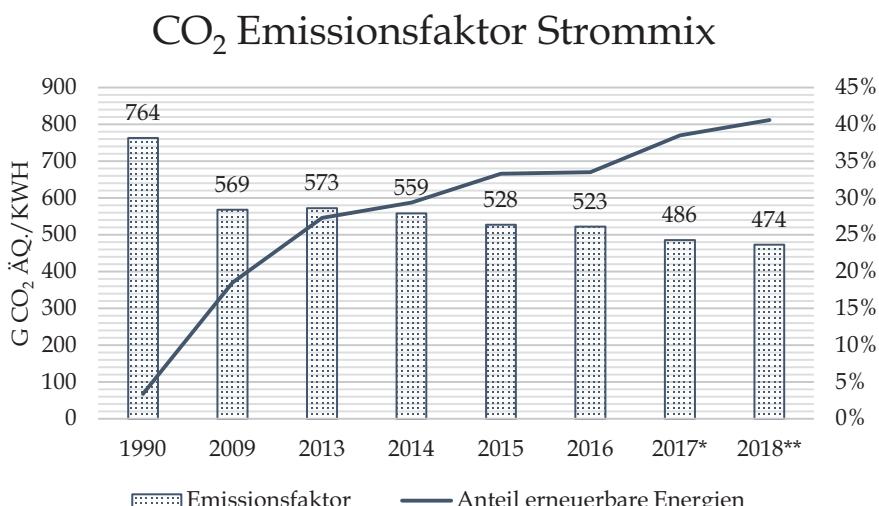


Abb. 7.2 CO₂-Emissionsfaktor Strommix, 2017 Hochrechnung nach [14], 2018 Prognose nach [14]; Anteil erneuerbare Energien nach [15]

7.4.3 Der spezifische Carbon-Footprint für Erdgas

Erdgas gehört zu den fossilen Energieträgern und kommt in Zusammenhang mit Erdöl in unterirdischen Lagerstätten vor. Obwohl sich die Zusammensetzungen des Erdgases je nach Bergungsstätten unterscheiden, hat Erdgas in der Regel einen höheren Wasserstoffanteil als Erdöl, selbst wenn an der gleichen Bergungsstätte gewonnen wird. Ebenfalls sind die Nebenbestandteile beim Erdgas, die unvollständig verbrannte Kohlenwasserstoffkombinationen verursachen, geringer als bei der Verbrennung von Erdöl. Aus diesem Grund kann man behaupten, dass Erdgas eine sauberere fossile Energie in der thermischen Energiewandlung ist als Produkte aus Erdöl (z. B. Heizöl, Diesel, Benzin).

Das in Deutschland zur Verfügung stehende Erdgas kommt zum größten Teil aus Russland, Norwegen und den Niederlanden. Das in den Niederlanden geförderte Erdgas ist ebenso wie das in Deutschland auf der Nordsee geborgene Erdgas von der Erdgasqualität L.⁴ Die Versorgungsgebiete mit L-Gas liegen im Nordwesten und Westen von Deutschland, während die restlichen Bereiche die Erdgasqualität H erhalten.⁵ Da die Fördermengen vom L-Gas stark rückläufig sind, wird seit 2015 eine sukzessive Umstellung aller Gebiete in Deutschland auf das H-Gas durchgeführt.⁶

Der nationale Verbrauch an Erdgas ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich angestiegen, somit müssen die übrigen importierenden Länder die Ausgleichsarbeit übernehmen. Um den zukünftigen Bedarf zuverlässig abzudecken, werden weitere Pipelines zwischen Großbritannien bzw. Russland und Deutschland installiert.

Der Einsatz und vor allem der Ausbau von Erdgasnetzen steht dem langfristigen Ziel der Bundesregierung der Dekarbonisierung entgegen. Der Treibhauseffekt und seine verheerenden Folgen sind im Kap. 4 bereits erläutert worden. Ebenfalls könnten die entstehenden politischen Verflechtungen mit den erdgasliefernden Nationen für Bedenken sorgen.

Bei einem angesetzten Brennwert von $H_O = 11,88 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ ergibt sich ein Kohlendioxidausstoß pro Kilowattstunde von $0,235 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$.⁷ Mit Berücksichtigung des Primärenergiefaktors von 1,1 ergeben sich $0,2585 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$.

⁴Die Erdgasqualität L hat einen durchschnittlichen Heizwert von $8,2\text{--}8,9 \text{ kWh/m}^3$.

⁵Die Erdgasqualität H hat einen durchschnittlichen Heizwert von $10\text{--}11,1 \text{ kWh/m}^3$.

⁶Vgl. [16].

⁷Vgl. [17].

Berechnung Kohlendioxidausstoß Erdgas

Für eine Analyse der Treibhausgasemissionen erfolgt eine Analyse mit der Hilfe einer vollständigen, stöchiometrischen Verbrennung von Erdgas nach der H-Qualität. Im Gegensatz zu der L-Qualität sind deutlich weniger Inertgase und ein höherer Methananteil vorhanden. Für die Berechnung werden die Inertgase mit ca. zwei Volumenprozent ausgenommen, somit verbleiben Methan (CH_4) und als Repräsentant für weitere Kohlenwasserstoffverbindungen Propan (C_3H_8).

$$\psi_{\text{CH}_4} = 90 \text{ Vol.\%}$$

$$\psi_{\text{C}_3\text{H}_8} = 8 \text{ Vol.\%}$$

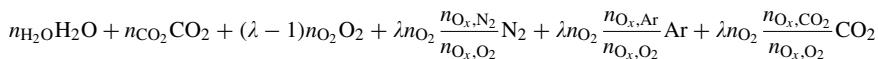
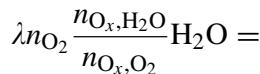
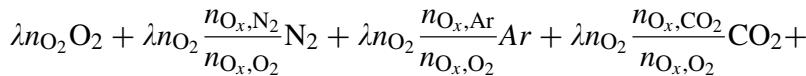
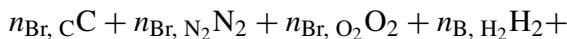
ψ = Volumenprozent

Chemische Reaktionsgleichung:

$$\sum_{\text{Edukte}} n_l \text{Edukte}_l = \sum_{\text{Produkte}} n_k \text{Produkte}_k \quad (7.13)$$

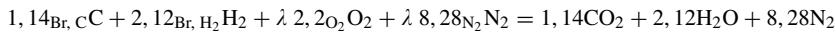
$$\sum_{\text{Brennstoff}} n_i \text{Brennstoff}_i + \sum_{\text{Oxidator}} n_j \text{Oxidator}_j = \sum_{\text{Produkte}} n_k \text{Produkte}_k \quad (7.14)$$

Die aufgestellte Reaktionsgleichung für den Brennstoff Erdgas nach H-Qualität:



$$+\lambda n_{O_2} \frac{n_{O_x, H_2O}}{n_{O_x, O_2}} H_2O$$

Die Oxidationsluft wird vereinfacht als eine reine Mischung von Stickstoff und Sauerstoff angesetzt. Das Volumenverhältnis beträgt 79/21 (N_2/O_2). Molbeziehungen mit Lambda = 1:



Die Gleichung wird mit folgenden Molmassen zur Massenbeziehung umgeformt:

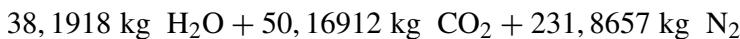
Molmasse Kohlenstoff $C=12,010 \text{ kg/kmol}$

Molmasse Wasserstoff $H_2=2,016 \text{ kg/kmol}$

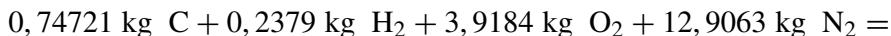
Molmasse Sauerstoff $O_2=31,998 \text{ kg/kmol}$

Molmasse Stickstoff $N_2=28,016 \text{ kg/kmol}$

Massenbeziehungen mit Lambda = 1:



Bezogen auf einen Kilogramm Kraftstoff (inkl. 2 % Inertgase im Brennstoff):



7.5 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Vielleicht haben Sie im Bezug mit dem Bausektor auch schon von dem Begriff der Grauen-Energie gehört. Wenn ja, haben Sie verstanden was sich dahinter verbirgt?

Dabei ist der Gedanke nicht nur logisch, sondern auch zwingend erforderlich auf dem Weg zum klimaneutralen Wohnen. Dieses aktuelle Thema greift ein generelles Problem von den eingesetzten Energiebewertungsverfahren auf. In herkömmlichen Bewertungssystemen wird dem Ansatz strikt Folge geleistet, dass bei Investitionsgütern die Emissionen und der Energieaufwand während der Betriebsphase deutlich über den vor- und nachgelagerten Produktlebensphasen liegen. Als Rückschluss dieser Annahme werden die vor- und nachgelagerten Prozesse und ihre Energieaufwendungen einfach vernachlässigt. Doch gerade der Bausektor setzt überwiegend auf ressourcenintensive Baustoffe und durch eine immer weiter ansteigende Energieeffizienz

in der Betriebsphase wächst der Einfluss der vor- und nachgelagerten Phasen stark an. Aus diesem Grund muss ein modernes aussagekräftiges Analyseverfahren den kompletten Lebenszyklus beachten!

Der Kumulierte Energieaufwand (KEA) nach der VDI 4600 ermöglicht eine Analyse des Primärenergiebedarfs über den gesamten Lebenszyklus von Produkten oder Dienstleistungen. Wir wollen das Verfahren als zweiten ökologischen Bewertungsaspekt einsetzen, ergänzend zu der Analyse der Treibhausgasemissionen. Im KEA werden die direkten und die indirekten Energieaufwendungen über die Herstellung (H), der Nutzungsphase (N) und der Entsorgungsphase (E) berücksichtigt. Als indirekte Energieaufwendungen können z. B. die Energieaufwendungen für den Transport der Materialien angesetzt werden.

In Formeln ausgedrückt ergibt sich die Gleichung:

$$\text{KEA} = \text{KEA}_H + \text{KEA}_N + \text{KEA}_E \quad (7.15.)$$

Als Datengrundlage für die Kumulierten Energieaufwendungen werden wir wieder auf die Onlinedatenbank Ökobaudat.de zurückgreifen. Die Datenbank stellt den Wert der totalen nicht erneuerbaren Primärenergie (PENRT) für eine große Anzahl von Baumaterialien und Anlagentechniken zur Verfügung. Die Werte wurden analysiert nach dem Verfahren der Ökobilanz DIN EN 14040/14044. Die Primärenergieaufwendungen während der Betriebsphase setzen sich zusammen aus dem Endenergiebedarf und dem energiequellspezifischen Primärenergiefaktor (Tab. 7.1).

Tab. 7.1 Tabelle Endenergiwerte nach der DIN V 4701–10 und der EnEV 2016

Nummer	Bezeichnung	Strommix	Erdgas	Heizöl	Pallets	Fernwärme (KWK)
1	Primärenergiefaktor	1,8	1,1	1,1	1,16	0,7
2	Spezifische Kosten Endenergie [€/kWh] ^a	0,299	0,08	0,065	0,052	0,098
3	Treibhausgasemissionen Endenergie [kgCO ₂ äq/kWh]	0,474	0,253	0,329	0,022	0,287

^aSollte eine CO₂-Steuer kommen, dann müssen die Kosten spezifisch aufaddiert werden

7.6 Übersicht spezifische Aufwendungen nach Energiequellen

Für eine bessere Übersichtlichkeit wollen wir die spezifischen Treibhausgasemissionen, die Endenergiepreise und die Primärenergiefaktoren der jeweiligen Energiequellen pro Kilowattstunde in Tab. 7.1 gegenüberstellen.

7.7 Wechselwirkungsanalyse

Für das kommende Verfahren müssen wir ein wenig in die Mathematik eintauchen, was vielleicht auf den ersten Blick zu erschrecken vermag. Das ist jedoch unbegründet, alle Gleichungen werden wir gemeinsam entwickeln und sie müssen anschließend nur noch ihre individuellen Werte eingeben.

Für eine aussagekräftige Bewertung der Nachhaltigkeit müssen wir Verfahren anwenden, die eine Interaktion zwischen den ökonomischen und ökologischen Betrachtungen aufzeigen. Die Betriebseffizienz bietet diese Brücke somit können wir das Verfahren der Wechselwirkungsanalyse nach [3] nutzen. Bei einer Untersuchung der Effektivität wird auf die Technologieanalyse von [3] im Abschn. 7.8 zurückgegriffen.

Hinweis

Der Unterschied zwischen der Effizienz und der Effektivität lässt sich am einfachsten an einem kleinen Beispiel erklären. Bei der **Effizienz** beschäftigen wir uns mit dem „*Wie wir es machen*“. Beziehen wir das z. B. auf die Gebäudeisolierung, dann steht bei der Effizienzanalyse das Isoliermaterial bereits fest und es geht um die Isolierstärke – Wie stark wird isoliert?

Untersuchen wir die **Effektivität**, dann geht es um die Verfahren an sich und wir stellen uns die Frage „*Machen wir das, was wir machen richtig?*“. Bezogen auf unser Beispiel der Gebäudeisolierung, nutzen wir überhaupt das richtige Isolierungsmaterial? Oder kann ein anderes Verfahren zur Wärmestromunterbindung genutzt werden?

Obwohl sich die ökonomische und die ökologische Betrachtung im ersten Blickwinkel gegenläufig präsentieren, nähern sich die Betrachtungen bei einer langfristigen Betrachtung der Lebenszyklusphasen an. Bei Wohngebäuden handelt es sich um Investitionsgüter und die Lebens- bzw. die Betriebsphase sollte mit Abstand die längste Phase im Lebenszyklus auf-

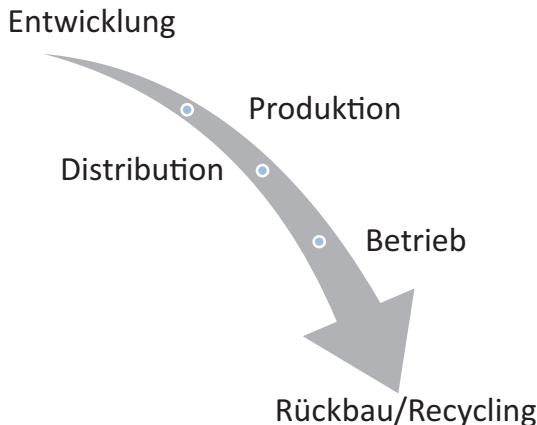


Abb. 7.3 Qualitatives Lebenszyklusablaufdiagramm

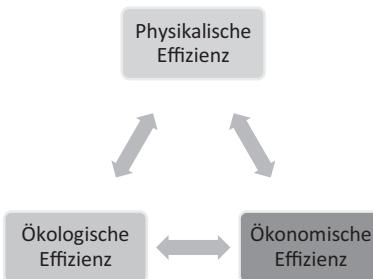


Abb. 7.4 Interaktion Effizienzen nach [3]

weisen. Somit können die beiden konträren Aspekte in der Betriebsphase über die Energieeffizienz kombiniert werden (Abb. 7.3 und 7.4).

Das Verfahren der Wechselwirkungsanalyse analysiert die jeweiligen Anlagenoptima über eine Systemvariable (SV), die im direkten Zusammenhang mit der Effizienz während der Betriebsphase steht. Die Effizienz in der Betriebsphase wird über das Verfahren des Physikalischen Optimums bewertet.

Zur Verdeutlichung wollen wir wieder auf das einfache Beispiel für die Erläuterung der Effizienz bzw. der Effektivität aus diesem Abschnitt zurückgreifen.

Mit steigender Isolierungsstärke nehmen die Verluste über die Außenhülle des Gebäudes ab. Somit steigen die ökonomische und die ökologische Effizienz über die Betriebsphase – Sie müssen weniger Energie kaufen und produzieren weniger Emissionen. Jedoch steigen die ökonomischen und

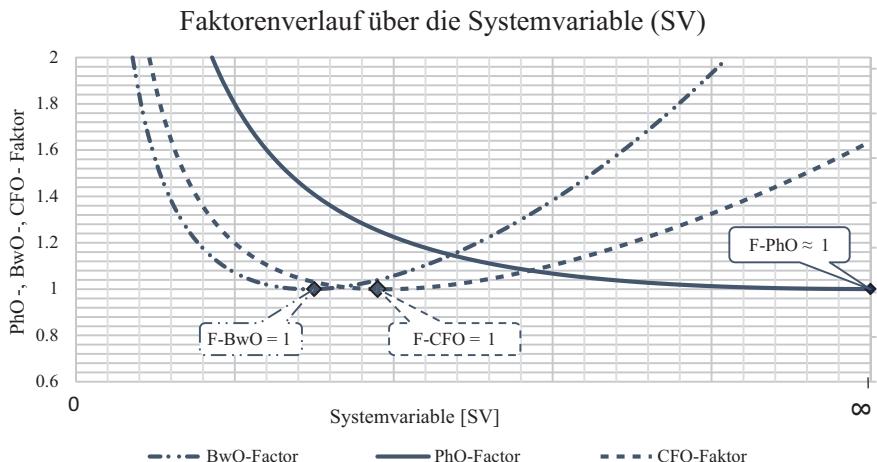


Abb. 7.5 Systemvariablenabhängige Optima für die Wechselwirkungsanalyse

ökologischen Aufwendungen in der Produktion, Distribution und dem Recycling mit wachsender Isolierstärke immer weiter an. Betrachten wir nun alle Lebenszyklusphasen, dann hat jede Betrachtung ihre jeweiligen Optima mit den geringsten Emissionen, den geringsten Kosten und der höchsten Effizienz. Die beste Effizienz während der Betriebsphase entsteht bei einer immensen Isolierungsstärke. In der Abb. 7.5 sind die jeweiligen Optima qualitativ aufgezeigt.

Die Faktoren $F\text{-BwO}$, $F\text{-PhO}$ und $F\text{-CFO}$ stehen für die ökonomische, physikalische und ökologische Effizienz des Systems.

Sind die jeweiligen optimalen Konfigurationen bekannt, erfolgt eine Verschiebung zwischen der ökonomischen und der energieeffizientesten Anlagenkonfiguration in dem Kompromisspunkt, in dem der Anlagenfaktor den Wert 1 erreicht (7.16). Somit sind beide Faktoren gleich weit von ihrem Optimum entfernt und haben den gleichen Kompromiss hingenommen (Abb. 7.6).⁸

$$F_{AN_{BwO - PhO_{SV}}} = \frac{F_{BwO_{SV}}}{F_{PhO_{SV}}} = 1 \quad (7.16)$$

⁸Das exakte Berechnungsverfahren und zu beachtende Begrenzungen in der Anwendung sind in dem Buch „Wechselwirkungsanalyse zwischen dem Physikalischen Optimum, Betriebswirtschaftlichen Optimum und dem Carbon-Footprint-Optimum“ nachzulesen.[3].

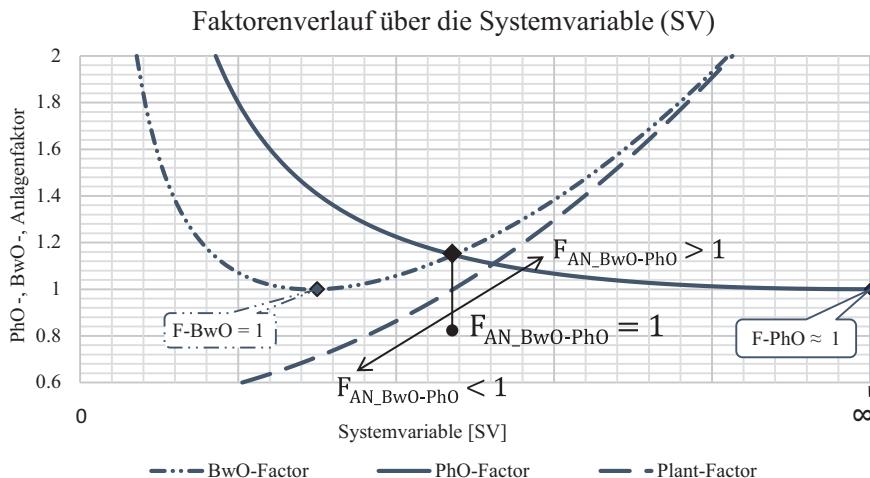


Abb. 7.6 Einbindung Anlagenfaktor nach [3]

$F_{AN_{BwO - PhO_{SV}}}$ = Anlagenfaktor in Abhängigkeit der Systemvariable [-]

$F_{BwO_{SV}}$ = Ökonomischer Faktor in Abhängigkeit der Systemvariable [-]

$F_{PhO_{SV}}$ = Physikalischer Faktor in Abhängigkeit der Systemvariable [-]

Aus dem *BwO-Faktor* (betriebliche Effizienz) und dem *PhO-Faktor* (physikalische Effizienz) ergibt sich der Anlagenfaktor ($F_{AN_{BwO-PhO}}$). Er beschreibt das Gesamtverhalten des Systems [3].

Bis jetzt besteht eine direkte Verknüpfung zwischen der Effizienz in der Betriebsphase und der Ökonomie. Die Ökologie ist aktuell nur indirekt über die Betriebseffizienz eingebunden. Denn nun erfolgt der finale Schritt, eine Mittelwertbildung des ermittelten Kompromisspunktes mit der optimalen Anlagenkonfiguration nach dem Carbon-Footprint-Optimum (SV_{CFO}).

$$SV_{BwO - PhO - CFO} = \frac{SV_{BwO - PhO} + SV_{CFO}}{2}$$

$SV_{BwO-PhO-CFO}$ = Systemvariable als Kompromisspunkt aus der betriebswirtschaftlichen, ökologischen und physikalischen Effizienz [-]

$SV_{BwO-PhO}$ = Systemvariable als Kompromisspunkt aus der betriebswirtschaftlichen und physikalischen Effizienz [-]

SV_{CFO} = Systemvariable nach der ökologischen Effizienz [-].

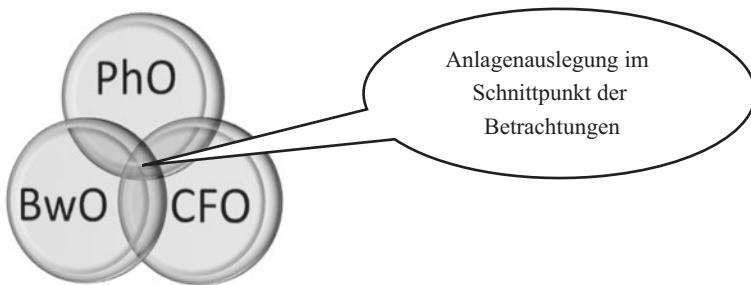


Abb. 7.7 Ergebnis der Wechselwirkungsanalyse nach [3]

Mit dem Verfahren lassen sich die optimalen Kompromisspunkte für Systemvariablen aufzeigen. Es entsteht eine nachhaltige Anlagen-dimensionierung im Schnittpunkt der eingebundenen Bewertungsmethoden (Abb. 7.7).

Vereinfachte Zusammenfassung:

Bei einem Investitionsgut ist die Betriebsphase deutlich länger als die übrigen Lebenszyklusphasen (Entwicklung, Produktion, Distribution, Rückbau und Recycling). Dieser Effekt lässt eine Kombination der ökonomischen und ökologischen Effizienz über die Energieeffizienz in der Betriebsphase zu. Kurz: Verbrauchen Sie mit einer effizienten Anlage wenig Energie, dann hilft Ihnen das Geld zu sparen und Umweltaufwendungen zu vermindern.

Die Wechselwirkungsanalyse ermöglicht eine Auslegung in einem gemeinsamen Kompromisspunkt zwischen den unterschiedlichen Betrachtungen.

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht eine Dimensionierung z. B. der Gebäudeisolierung in einem optimalen Kompromisspunkt unterschiedlicher Einflussparameter. Im nächsten Schritt werden wir die jeweiligen Gleichungen gemeinsam definieren und Sie können anschließend Ihre individuellen Werte einsetzen.

7.8 Die Technologieanalyse

Als zweite Bewertungsmethode wird die Technologieanalyse nach [3] eingesetzt. Sie ermöglicht eine kennzahlbasierte Bewertung unterschiedlicher Technologien, Verfahren und Materialien. Während die Wechselwirkungs-

analyse über die Effizienzbewertung geht, kann die Technologieanalyse eine Aussage über die Effektivität liefern.

Mithilfe der Technologieanalyse ist eine gemeinsame Bewertung von unbegrenzten Einflussparametern möglich. Dafür müssen die einfließenden Parameter lediglich nach der optimalen Konfiguration faktorisiert werden.

$$F_{AN_{Tech}} = \frac{\sum_{i=1}^j \text{Abs}(F_i - 1)}{j} + 1 \quad (7.17)$$

$F_{AN_{Tech}}$ = Anlagenfaktor Technologieanalyse

F = Einfließende Faktoren

j = Anzahl der Einflussfaktoren

In unserem Fall wollen wir die ökonomische, die ökologische sowie die physikalische Effizienz bewerten. Bezogen werden die jeweiligen Konfigurationen auf den lokalen Bestwert.

$$F_{BwO_{Tech}} = \frac{C_O C_{Tech}}{C_O C_{BwO_{Tech}}}$$

$$F_{CFO_{Tech}} = \frac{CF_{sys}}{CF_{min_{Tech}}}$$

$$F_{KEA_{Tech}} = \frac{KEA_{sys}}{KEA_{min_{Tech}}}$$

Eingesetzt in die Technologieanalyse:

$$F_{AN_{Tech,sys1}} = \frac{\text{Abs}\{F_{BwO_{sys1}} - 1\}}{3} + \frac{\text{Abs}\{F_{CFO_{sys1}} - 1\}}{3} + \frac{\text{Abs}\{F_{KEA_{sys1}} - 1\}}{3} + 1$$

Als Ergebnis erhält man von jeder Anlagenkonfiguration einen Anlagenfaktor. Die Anlagenkonfiguration dessen Anlagenfaktor am dichtesten an den Wert eins reicht, stellt die effektivste Lösung da.

Aus [3] ist die Abb. 7.8 übernommen, hier sind die jeweiligen faktorisierten Einflussparameter und der resultierende Anlagenfaktor aufgeführt. In der Grafik werden alle Isolationsmaterialien mit dem identischen Wärmedurchgangskoeffizienten ausgestattet, wodurch sich die Schichtstärken je nach Wärmewiderstandswert verändern. Durch den identischen

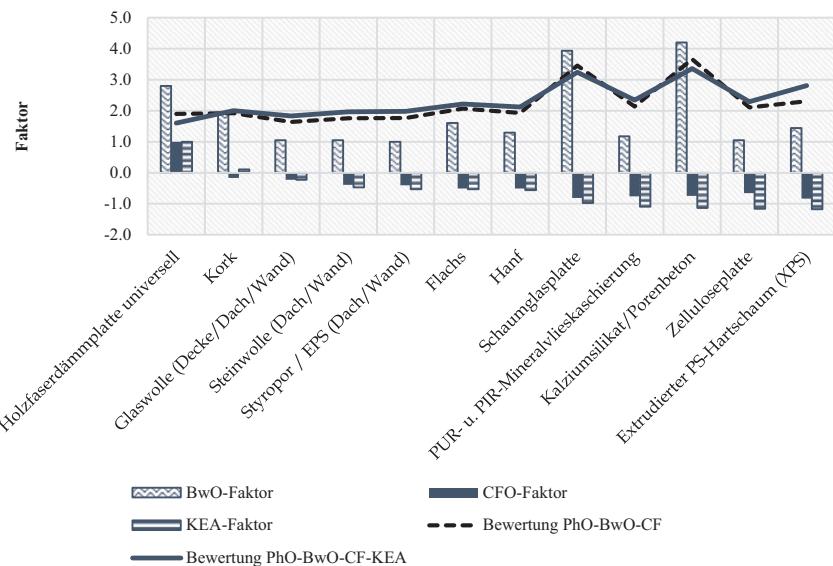


Abb. 7.8 Technologieanalyse Isoliermaterialien nach [3]

Wärmedurchgangskoeffizienten sind alle Isoliermaterialien gleich effizient, was z. B. durch das physikalische Optimum belegt werden kann. Anschließend wurden die ökonomischen und ökologischen Effizienzen bewertet. In der ersten Bewertung (durchgehende schwarze Linie) wurde nur das BwO und das CFO berücksichtigt. Effektivste Lösung ist dann die Glaswolle. Bei einer Erweiterung mit dem KEA gewinnt die Holzfaserdämmplatte den Effektivitätsvergleich. Das Ergebnis ist also abhängig von den jeweiligen Einflussparametern.

Die faktorisierten Einflusparameter Betriebswirtschaft (BwO), Treibhausgasemissionen (CFO) und kumulierter Energieaufwand (KEA), dargestellt als Balken, nehmen Einfluss auf die Bewertungsergebnisse.

Auf die Gebäudeisolierung werden wir noch detailliert im Abschn. 11.5 eingehen.



8

Unser Referenzhaus

In den kommenden Abschnitten geht es nun um die Vergleichsrechnungen zu den jeweiligen Baumaterialien oder Anlagenkomponenten. Um nicht nur mit spezifischen Größen zu arbeiten, konstruieren wir uns ein Referenzhaus nach unseren Wünschen. Wir werden dann unsere Berechnungen auf unser Referenzhaus beziehen und ökonomische und ökologische Potenziale zur Verbesserung unseres Referenzhauses erarbeiten.

Unser Referenzhaus ist ein Winkelbungalow und hat eine Nutzfläche von 150 m². Das Gebäude weist einen flächenbezogenen Jahresheizwärmebedarf (Q_h) von 77,5 kWh/(m²a) auf und der jährliche Energiebedarf für den Warmwasserbedarf beläuft sich nach der DIN V 4701 auf 12,5 kWh/(m²a). Im berechneten Heiz- und Brauchenergiebedarf ist der Primärenergiefaktor noch nicht enthalten, da dieser im direkten Zusammenhang mit dem genutzten Energieträger steht. Die angesetzten Materialeigenschaften erfüllen den geforderten Mindeststandard nach der EnEV 2014 bzw. 2016 (Tab. 6.9). Obwohl alle Materialien den Mindeststandard nach dem Referenzhausverfahren der EnEV standhalten, kann eine Zulassung unseres Referenzhauses noch nicht gewährleistet werden. Ebenso ist die Energieeffizienzklasse nach der Tab. 8.1 noch nicht zu bestimmen. Der Primärenergiefaktor und der Anlagenfaktor der Heizungsanlage müssen in die Bilanzierung eingebunden werden. Verbessernde Maßnahmen und effizientere Heizungsanlagen werden in den kommenden Kapiteln auf die getroffenen Angaben bezogen.

Tab. 8.1 Energieeffizienzklassen nach der EnEV 2014

Endenergieverbrauch [kWh/(m ² a)]	Energieeffizienzklasse
<30	A+
<50	A
<75	B
<100	C
<130	D
<160	E
<200	F
<250	G
>=250	H

Hintergrundinformationen

Obwohl der Heizwärme- und der Warmwasserwärmebedarf bereits feststehen, kann unser Referenzhaus in die Energieeffizienzklassen A+ bis C eingeordnet werden. Dies liegt an dem großen Einfluss der Heizungsanlage und der damit verbundene Primärenergiefaktor.

Um den großen Einfluss der Heizungsanlage darzustellen wollen wir zwei unterschiedliche Systeme gegenüberstellen. Die erste Heizungsanlage basiert auf einer Gasbrennwerttherme mit einem Nutzungsgrad von 90 Prozent. Der Kehrwert des Nutzungsgrades kann zur Bildung der Anlagenaufwandszahl, allerdings ohne eine Berücksichtigung des Primärenergiefaktors, genutzt werden.

$$e'_p = \frac{1}{\eta_{NG}}$$

$$e'_p = \frac{1}{90 \%} = 1, \bar{1}$$

Es folgt eine spezifische Betrachtung:

$$Q_p = (Q_h + Q_{WW}) \cdot e'_p$$

$$Q_p = \left(77,5 \text{ kWh} / (m^2 a) + 12,5 \text{ kWh} / (m^2 a) \right) \cdot 1, \bar{1}$$

$$Q_p = 99,99 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{a} \rightarrow \text{Energieeffizienzklasse C}$$

Wird eine Sole-Wasserwärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3,5 angesetzt, dann bekommen wir einen spezifischen Endenergiebedarf von:

$$e_p = \frac{1}{350 \%} = 0,286$$

$$Q_p = (Q_h + Q_{WW}) \cdot e_p$$

$$Q_p = \left(77,5 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{a} + 12,5 \text{ kWh} / (m^2 a) \right) \cdot 0,286$$

$$Q_p = \left(25,74 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{a} \rightarrow \text{Energieeffizienzklasse A+} \right)$$

In den Berechnungen wurden die jährlichen Hilfsenergien für die Nebenkomponenten vernachlässigt.



9

Auswirkung Suffizienz

Basis der Energiewende ist eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs durch eine höhere Effizienz bei der Isolierung und den Heizungsanlagen. Dies führt uns wieder zum Punkt der Nachhaltigkeit und der ersten Strategie der Effizienzsteigerung. Neben den bautechnischen Herausforderungen, die wir in den kommenden Kapiteln ausführlich betrachten werden, muss auch unser Verhalten überdacht werden. Aus diesem Grund werden wir zusätzlich auf die zweite Strategie, die Suffizienz, eingehen. Welche Auswirkungen unsere Entscheidungen auf die Energieeffizienz haben, wird über eine einfache Berechnung im Folgenden dargestellt.

Häufig sind es die kleinen Dinge, die in der Summe einen großen Effekt erzeugen. So ist das Thema Standby-Verbrauch von elektrischen Geräten so gut wie jedem bekannt. Die monetären Einsparungen im Jahr sind überschaubar. Doch die Energieverbrauchsrücknahme ist in der Summe enorm.

Hierzu ein kleines Beispiel: In Deutschland gibt es grob 40,4 Mio. Haushalte. Nehmen wir an, dass die Hälfte der Haushalte über einen W-Lan-Router verfügt, mit einem durchschnittlich angesetzten Leistungsbedarf von 15 W, dann ergibt das eine Gesamtleistung von 303 MW. Das entspricht der Nennleistung des Gemeinschaftskraftwerks Hannover. Das Kraftwerk versorgt ungefähr die Hälfte der Stadt Hannover und das VW-Werk Hannover mit Strom.

Wenn man sich beispielsweise angewöhnt, den W-Lan-Router konsequent vom Stromnetz zu trennen, wenn er nicht benötigt wird. Das würde bedeuten, abends den Router auszuschalten und erst am nächsten Tag wieder zu starten, sobald die ersten Familienmitglieder von dessen Arbeit

bzw. Schule wieder nach Hause kommen. Dadurch würde ein Endenergieverbrauch von ca. 87,6 kWh (Primärenergieeinsatz 157,68 kWh) pro Jahr vermieden werden, was den Carbon Footprint des Haushalts um ca. 46 kg pro Jahr verringern könnte.

9.1 Tag- und Nachabsenkung

Die Tag- und Nachabsenkung fällt ebenfalls unter die Suffizienzstrategie, kann aber über eine bautechnische Steuerung automatisiert werden. Zuerst wollen wir dafür den Einfluss von Temperaturabsenkungen im Wohnraum untersuchen. Hier geht es nicht um eine kontinuierliche Absenkung – obwohl diese natürlich einen deutlichen Einfluss aufweisen würde – sondern um eine temporäre Absenkung. Wenn diese Absenkung während der Nacht oder in Abwesenheit der Bewohner stattfindet, dann hat Sie auch keine Auswirkung auf die Behaglichkeit der Bewohner (siehe Kap. 3).

In der Tab. 9.1 sind die Kerndaten für die folgenden Berechnungen vermerkt. Deutschland wurde für die Bewertung in 15 Regionen unterteilt. Die Unterteilung orientiert sich an der Aufgliederung der Klimaregionen des Deutschen Wetterdienstes (DWD)[18]. Diese Daten bilden auch die Grundlage bei der Transmissionsverlustanalyse nach der DIN 4108-6. Die eingebundenen monatlichen Durchschnittstemperaturen entstammen jedoch der NASA-Datenbank [12]. Die NASA bietet weltweite detaillierte Wetterdaten für umfangreiche Power-Analysen an. Die Wetterdaten wurden als monatliche Mittelwerte aus den Messjahren 1981 bis 2017 gebildet. Die monatlichen Durchschnittstemperaturen im Heizzeitraum, kombiniert mit den jeweiligen Monatstagen, ergeben die Jahresdurchschnittstemperatur. Das bedeutet, dass die Monate Juni bis August aus der Berechnung der Durchschnittstemperatur ausgenommen worden. In diesen Monaten ist die Heizung gewöhnlicherweise im Sommerbetrieb und liefert keine Heizwärme.

Die durchschnittliche Raumtemperatur für den Referenzwert, ohne eine Temperaturabsenkung, liegt bei 21 °C. Das Verhältnis V_{2-1} bilanziert sich aus dem spezifischen Transmissionsverlust (\dot{q}) nach der Gleichung (Gl.: 9.1):

$$V_{2-1} = \frac{\dot{q}_1}{\dot{q}_2} - 1 \quad (9.1)$$

V = Verhältnis der Transmissionsverluste [%]

\dot{q} = Spezifischer Transmissionsverlust [W/m^2]

Tab. 9.1 Einfluss der temporären Temperaturabsenkungen. Regionen nach [18]; Durchschnittstemperaturen nach [12]

Klimaregion	Bezeichnung Klimaregion	Geografischer Standort der Messung	Höhe über NN [m]	Durchschnittliche Jahrestemperatur [°C]	Verhältnis Transmissionsverluste V _{2-1 (%)}	Verhältnis Transmissionsverluste V _{3-1 (%)}
1	Nordseeküste	53° 32' N 08° 34' E	7	6,49	11,17	16,76
2	Ostseeküste	54° 11' N 12° 05' E	4	5,97	10,75	16,09
3	Northwestdeutsches Tiefland	53° 38' N 09° 59' E	13	6,05	10,81	16,20
4	Nordostdeutsches Tiefland	52° 23' N 13° 04' E	81	5,87	10,66	15,97
5	Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland	51° 24' N 06° 58' E	150	6,89	11,53	17,32
6	Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete	50° 40' N 07° 58' E	547	5,73	10,56	15,80
7	Nördliche und westliche Mittelgebirge, zentrale Bereiche	51° 18' N 09° 27' E	231	5,18	10,16	15,17
8	Oberharz und Schwarzwald (mittlere Lagen)	51° 44' N 10° 36' E	607	4,93	9,98	14,89
9	Thüringer Becken und Sachsisches Hügelland	50° 48' N 12° 52' E	418	3,90	9,32	13,88
10	Südöstliche Mittelgebirge bis 1000 m	50° 19' N 11° 53' E	565	4,17	9,49	14,13
11	Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald über 1000 m	50° 26' N 12° 57' E	1213	3,90	9,32	13,88

(Fortsetzung)

Tab. 9.1 (Fortsetzung)

Klimaregion	Bezeichnung Klimaregion	Geografischer Standort der Messung	Höhe über NN [m]	Durchschnittliche Jahrestemperatur [°C]	Verhältnis Transmissionsverluste $V_{2,1}(\%)$	Verhältnis Transmissionsverluste $V_{3,1}(\%)$
12	Oberrheingraben und unteres Neckartal	49° 31' N 08° 33' E	96	6,61	11,27	16,92
13	Schwäbisch-fränkisches Stufenland/Alpenvorland	48° 17' N 12° 30' E	405	5,09	10,09	15,06
14	Schwäbische Alp/Baar	48° 40' N 09° 52' E	734	5,01	10,04	14,98
15	Alpenrand-täler	47° 29' N 11° 04' E	719	0,14	7,52	11,10

Durch den spezifischen Einsatz der Werte hat die wärmeübertragende Fläche sowie der Wärmedurchgangskoeffizient der Hüllfläche keinen direkten Einfluss auf das prozentuale Ergebnis.

Hintergrundinformationen

Mathematische Herleitung der Gleichung:

$$k = U$$

$$\dot{Q}_{\text{Trans.1}} = k \cdot A \cdot \Delta T_1$$

$$\dot{Q}_{\text{Trans.2}} = k \cdot A \cdot \Delta T_2$$

Betrachten wir nun eine spezifische Fläche, über die der Transmissionsverlust strömt, dann können wir die Gleichung vereinfachen zu:

$$\dot{q}_{\text{Trans.1}} = k \cdot \Delta T_1$$

$$\dot{q}_{\text{Trans.2}} = k \cdot \Delta T_2$$

$$V_{2-1} = \frac{\dot{q}_1}{\dot{q}_2} - 1 = \frac{k \cdot \Delta T_1}{k \cdot \Delta T_2} - 1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} - 1 = \frac{21^\circ\text{C} - 6,49^\circ\text{C}}{19,54^\circ\text{C} - 6,49^\circ\text{C}} - 1$$

$$V_{2-1} = 0,1119 = 11,19\%$$

Somit besteht nur noch eine reine Abhängigkeit von den aufkommenden Temperaturdifferenzen.

Die bewertete Nachtabsenkung im spezifischen Transmissionsverlust q_2 findet in der Berechnung zwischen 22 Uhr und 5 Uhr statt. In dieser Zeit erfolgt eine Raumtemperaturabsenkung auf 16 °C, daraus ergibt sich eine mittlere Tagesraumtemperatur von 19,54 °C. Standortabhängige Transmissionsverlusteinsparungen zwischen 7,5 und 11,5 Prozent, allein durch die Nachtabsenkung, sprechen für sich.

Wird nun zusätzlich eine Wochentagabsenkung der Wohnraumtemperatur auf 18 °C zwischen 8 Uhr und 15 Uhr angesetzt, dann steigen die Verlustreduktionen auf bis zu 17,3 Prozent an (siehe Tab. 9.1; Verhältnis V_{3-1}). Die mittlere Tagesraumtemperatur ergibt 18,92 °C, als Mittelwert über eine komplette Woche.

Die Zeiträume für die Temperaturabsenkungen sind durch den Bewohner individuell zu bestimmen. In jedem Fall sollte die Trägheit des Raumes durch wärmeaufnehmende und wärmeabgebende Komponenten berücksichtigt werden. Hier kann es bei einer hohen Masse zu deutlichen Verzögerungen kommen. Ebenfalls sind die Aufwendungen für die Temperaturregelungen zu betrachten. Moderne Heizungsanlagen haben bereits eine Temperaturabsenkungssteuerung in der Systemsteuerung integriert, diese muss lediglich aktiviert und eingestellt werden. Werden sogenannten Smart-Home-Komponenten eingesetzt, dann können die Investitionskosten und die Betriebskosten lediglich für eine Verschiebung der Kosten und der Emissionen führen. Dazu mehr im folgenden Abschnitt.

9.2 Ökonomischer und ökologischer Effekt Tag- und Nachtabsenkung

Basierend auf dem Ergebnis für die potentielle Einsparung an Transmissionsverlusten durch eine Nachtabsenkung der Wohnraumtemperatur in der Klimaregion 1 (Tab. 9.1), wird in diesem Abschnitt das ökonomische und ökologische Einsparpotenzial untersucht. Grundlage der Betrachtungen sind die spezifischen Kohlendioxidemissionen und die durchschnittlichen Kosten aus dem Abschn. 7.6.

Die Berechnungen erfolgen nach unserem Referenzhaus allerdings mit zwei unterschiedlichen Isolierstandards. Alle Randbedingungen bleiben identisch, lediglich der Transmissionswärmeverlust unterscheidet sich bei den beiden Vergleichsgebäuden. Das erste Gebäude(A) hat einen durchschnittlichen Transmissionswärmeverlust von $H'_T = 0,4 \frac{W}{m^2 K}$, dieser Wert entspricht dem zulässigen Maximalwert zur Qualitätssicherung nach der EnEV 2016. Das zweite Gebäude(B) ist ein Bestandsgebäude mit einem Transmissionswärmeverlust von $H'_T = 1 \frac{W}{m^2 K}$.

Die Grundflächen der berechneten Gebäude betragen 150 m^2 und die Hüllflächen 364 m^2 . In den Berechnungen werden wir die internen Gewinne, die solaren Gewinne und die Umwandlungsverluste des Heizungssystems/Wärmeverteilung vernachlässigen.

Bilanz Gebäude (A).

Ohne eine Nachtabsenkung entstehen Jahresenergiekosten für das Gebäude A von ca. 1107 €/a und ein Kohlendioxidausstoß von $3502 \text{ kg CO}_2 \text{ äq}$. Durch die Absenkung nach Abschn. 1.1 entstehen Ein-

sparungen von ca. 123,69 €/a und ca. 391,18 kg CO₂ äq. (Details siehe Tab. 9.2).

Unter der Position 11 und 12 ist eine Umrechnung der ökonomischen Einsparungen durch die Nachtabsenkung bezogen auf den Energieträger Strom aufgeführt. Grundlage der Umrechnung ist die Indifferenz der monetären Parameter. Würde ein Smart-Home-System einen durchschnittlichen Leistungsbedarf von ca. 47,22 W aufweisen, dann wären die ökonomischen Vorteile durch den Energiebedarf des Smart-Home-Systems wieder aufgebraucht.

Besser sieht es bei der ökologischen Bewertung aus (Position 17–18; Tab. 9.2). Eine ökonomische Indifferenz wäre erst bei ca. 118 W erreicht. Hier ist ein energetisches Potenzial vorhanden, dass sich ökologisch vorteilhaft auswirken kann und somit einen Mehrwert aufwirft. Für eine ganzheitliche

Tab. 9.2 Gebäude (A); Effekt Nachtabsenkung

Position	Beschreibung	Index	Wert	Einheit
1	Höchstwert des spezifischen Transmissionswärmeverlust EnEV ab 2016	H' _T	0,4	W/(m ² K)
2	Heiztage im Jahr	T	273	Tage/a
3	Einsparung Bereich 1/Verhältnis V ₂₋₁	V ₂₋₁	11,17	%
4	Spez. Energieverlust ohne Einsparung im Jahr	q ₁	38027,808	Wh/(m ² a)
5	Spezifische Energiekosten Strom	k _{el}	0,299	€/kWh
6	Spezifische Energiekosten Gas	k _{gas}	0,08	€/kWh
7	Angesetzte Gebäudehüllfläche	A _{Hüll}	364	m ²
8	Spezifischer Transmissionsverlust	H _T	145,6	W/K
9	Gaskosten Gebäudeheizbetrieb*	K _{gas}	1107,37	€/a
10	Einsparung durch die Absenkung*	K _{Einsp}	123,69	€/a
11	Entsprechende Strommenge gesamt*	E _{Strom}	413,69	kWh/a
12	Maximale Leistung Smart-Home Kosten*	P _{Regelung}	47,22	W
13	Energiebedarf Haus*		13842,12	kWh/a
14	Spezifischer Transmissionsverbrauch*		92,28	kWh/a
15	CO ₂ Emissionen ohne Einsparung*		3502,06	kgCO ₂
16	Einsparung an CO ₂ Emissionen*		391,18	kgCO ₂
17	Entsprechende Strommenge gesamt*	E _{CO2}	825,27	kWh/a
18	Maximale Leistung Smart-Home CO ₂ *	P _{CO2}	94,21	W

*Solare Gewinne, interne Gewinne sowie Heizungswandlungsverluste sind in den Werten nicht berücksichtigt

Tab. 9.3 Gebäude(B); Effekt Nachtabsehung

Position	Beschreibung	Index	Wert	Einheit
1	Höchstwert des spezifischen Transmissionswärmeverlust (Bestand)	H'_T	1	W/(m ² K)
2	Heiztage im Jahr	T	273	Tage/a
3	Einsparung Bereich 1/Verhältnis V_{2-1}	V_{2-1}	11,17	%
4	Spez. Energieverlust ohne Einsparung im Jahr	q_1	95069,52	Wh/(m ² a)
5	Spezifische Energiekosten Strom	k_{el}	0,299	€/kWh
6	Spezifische Energiekosten Gas	k_{gas}	0,08	€/kWh
7	Angesetzte Gebäudehüllfläche	$A_{Hüll}$	364	m ²
8	Spezifischer Transmissionsverlust	H_T	364	W/K
9	Gaskosten Gebäudeheizbetrieb*	K_{gas}	2768,42	€/a
10	Einsparung durch die Absenkung*	K_{Einsp}	309,23	€/a
11	Entsprechende Strommenge gesamt*	E_{Strom}	1034,22	kWh/a
12	Maximale Leistung Smart-Home Kosten*	$P_{Regelung}$	118,06	W
13	Energiebedarf Haus *		34605,31	kWh/a
14	Spezifischer Transmissionsverbrauch*		173,03	kWh/a
15	CO ₂ Emissionen ohne Einsparung*		8755,14	kgCO ₂
16	Einsparung an CO ₂ Emissionen*		977,95	kgCO ₂
17	Entsprechende Strommenge gesamt*	E_{CO2}	2063,18	kWh/a
18	Maximale Leistung Smart-Home CO ₂ *	P_{CO2}	235,52	W

* Solare Gewinne, interne Gewinne sowie Heizungswandlungsverluste sind in den Werten nicht berücksichtigt

Betrachtung sollten die vorliegenden internen Wärmegewinne, der Einfluss der solaren Wärmegewinne und die Heizungsverluste auf dem Weg zur Nutzenergie ebenso berücksichtigt werden, wie die Aufwendungen für die Komponentenherstellung.

Bilanz Gebäude(B).

Die Bilanzierung für das Bestandsgebäude (B) präsentiert den deutlich ansteigenden Vorteil einer Nachtabsehung (Tab 9.3). Dieser entsteht aus dem höheren Transmissionsverlust und den einhergehenden höheren Aufwendungen. Nun rentiert sich eine Nachtabsehung über die Betriebskostenabsenkung, auch mit einem Smart-Home System. In beiden Betrachtungen sind die Aufwendungen für den Erwerb und die Systemintegration sowie einer eventuell notwendigen dauerhaften Internetverbindung nicht eingerechnet.



10

Energiestandards im Bausektor

Der energetische Mindeststandard für Neubauten wurde im Kap. 5 ausführlich erläutert, dennoch steht es dem Bauherren offen, höhere Standards für sich zu wählen. Am Markt ist eine große Bandbreite an Bezeichnungen für die Energieeffizienzhäuser zu finden. Einige der Bezeichnung haben qualitativen, einige quantitativen Charakter und manche sind einfach nur Marketingbegriffe. Im Folgenden wollen wir uns einigen gängigen Bezeichnungen widmen.

10.1 Der KfW-Standard

Die Bundesregierung fördert höhere Energiestandards über das Kreditinstitut für Wiederaufbau (KfW) mit zinsgünstigen Krediten und Tilgungszuschüssen (Kredit Produktnummer 153). Je höher die Energieeffizienz der Immobilie ist, umso höher fallen die Tilgungszuschüsse der KfW aus. Die Intension der Bundesregierung ist das Erreichen der ausgeschriebenen Klimaziele über höhere Energieeffizienzstandards im Gebäudesektor. Da der Neubauanteil eher gering gegenüber den Bestandsbauten ist, bietet die KfW auch Förderungsangebote für Sanierungen (Kredit Produktnummer 151) von Bestandsbauten an.

Die erhöhten Kosten durch einen effizienteren Neubau oder einer Sanierung sollen durch die Förderungen der KfW abgemildert werden.

Die Bedingungen der KfW für eine Förderung von Neubauten mit einem höheren Energiestandard als es die EnEV 2016 vorschreibt, sind in dem Merkblatt zum Kredit 153 vermerkt.

Förderfähig sind komplette Gebäude oder einzelne Eigentumswohnungen. Dafür muss der Träger der Investitionsmaßnahme einen Antrag stellen. Für die Antragstellung ist ein Energieeffizienz-Experte aus der Energieeffizienz-Expertenliste für Förderprogramme des Bundes einzubinden. Die Kosten für den Energieeffizienzexperten fallen zunächst dem Antragsteller alleinig zur Last. Nach Abschluss der Maßnahmen können bis zu 50 % der Kosten durch die KfW erstattet werden (Zuschuss Baubegleitung; Produktnummer 431). Daher sollte man sich vorher über die Kosten eines Effizienzexperten informieren, da die Vorteilhaftigkeit der Förderung durch die Mehrkosten vom Energieexperten geschmälert werden. Der Energieeffizienzexperte beantragt und begleitet die Umsetzung während der Bauphase. Abschließend bescheinigt er die planungsgemäße Umsetzung der aufgegebenen Maßnahmen. Zusätzlich muss bei der Förderung der KfW darauf geachtet werden, dass die KfW ein Nachweis über die Dichtheit des Gebäudes mit dem Blower-Door-Test fordert. Auch für diesen entstehen zusätzliche Kosten.

Gefördert wird die Errichtung oder der Ersterwerb von Wohngebäuden, die nach § 2 EnEV überwiegend zum Wohnen dienen. Ebenfalls sind Erweiterungen bzw. Anbauten und Ausbauten von vormals unbeheizten Räumen förderungsfähig. Wird die Immobilie über die KfW gefördert, dann dürfen keine selektiven Förderungen der Anlagentechnik bei einer weiteren Förderungsmaßnahme angemeldet werden. Hier ist eine rechtzeitige Absprache zwischen dem Förderungsnehmer und den Gebern wichtig, damit auch die Förderung mit dem höchsten Potenzial genutzt werden kann.

Gefördert werden Energiestandards mit der Bezeichnung KfW-Effizienzhaus 55, KfW-Effizienzhaus 40 und KfW-Effizienzhaus 40+. Die Zahl beschreibt den prozentualen Jahresprimärenergieverbrauch im Verhältnis zum Referenzhaus der EnEV mit dem Energiestand 2014 (Abb. 10.1). Der prozentuale Jahresprimärenergiewert ist zwischen dem KfW-Effizienzhaus 40 und dem KfW-Effizienzhaus 40+ identisch. Jedoch muss das KfW-Effizienzhaus 40+ eine erweiterte Anlagentechnik in Form einer Photovoltaik-Anlage zur Stromerzeugung, einen Batteriespeicher für die elektrische Energiespeicherung, eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und eine elektrische Steuerung für einen möglichst großen Eigenanteil am Stromverbrauch aufweisen. Bei einer guten Planung und einer gut aufeinander abgestimmten Anlagentechnik können sich so weitere Einsparpotenziale auftun. Die PV-Anlage muss nach der EnEV so ausgelegt

Energiestandards im Vergleich

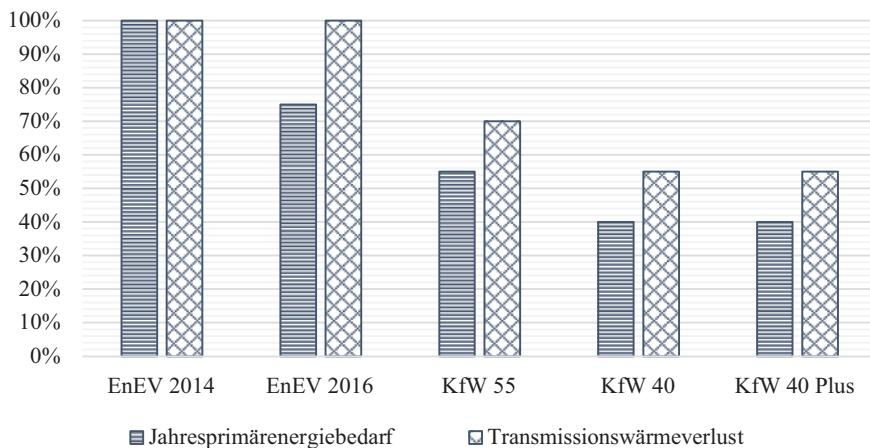


Abb. 10.1 KfW-Energiestandards

werden, dass ein elektrischer Energieertrag von mindestens 500 kWh/a je Wohneinheit und 10 kWh/(m²a) pro Gebäudenutzfläche produziert wird.

Bei einem Bauvorhaben ist der Antrag auf Förderung vor Baubeginn einzureichen. Wird eine Immobilie gekauft und soll gefördert werden, dann darf die Bauabnahme nicht älter als 12 Monate sein und der Antrag ist vor Abschluss des Kaufvertrages zu stellen. Weitere detaillierte Kreditvertragsbedingungen sind bei der KfW-Bank einzusehen.¹

Als Förderung wird ein zinsgünstiger Kredit in Höhe von 100.000 € mit festgeschrieben Zinsen über 10 Jahre angeboten. Nach Abschluss des Vorhabens erfolgt ein Tilgungszuschuss von 5 % bei einem KfW-Effizienzhaus 55, 10 % beim KfW-Effizienzhaus 40 und 15 % beim KfW-Effizienzhaus 40+ der dem Kreditvertrag gutgeschrieben wird.

Hinweis

Gute Nachrichten für alle Bauherren, die Bundesregierung hat im September 2019 die neuen Klimaziele aufgegeben. Als Anreiz für energieeffiziente Gebäude werden zum Jahreswechsel deutlich höhere Förderungen von der KfW-Bank gewährt. Die maximale Kreditsumme steigt auf 120.000 € an und der Tilgungszuschuss kann bis zu 25 % der Kreditsumme erreichen. Mehr Informationen auf der Internetseite der Kreditanstalt für Wiederaufbau.²

¹<https://www.kfw.de/kfw.de.html>

²<https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/EBS-2020/>

10.2 Das Passivhaus

Ein Passivhaus zeichnet sich durch einen sehr hohen Dämmstandard, eine konsequente Vermeidung von Wärmebrücken und einer geschlossenen Gebäudehülle aus, sodass möglichst viel Wärme im Haus gehalten wird. Definiert wird ein Passivhaus mit einem maximalen Heizenergiebedarf von 15 kWh pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr. Der gesamte Primärenergiebedarf des Gebäudes darf 120 kWh pro Quadratmeter und Jahr nicht überschreiten. In dem Primärenergiebedarf sind neben den Aufwendungen für die Heizenergie, der Warmwasseraufbereitung, dem kontrollierten Luftwechsel auch der elektrische Energiebedarf des Nutz- und Haushaltsstroms inbegriffen. Der Heizenergiebedarf eines Passivhauses liegt bei ca. 10 W/m². Bei diesem geringen Energiebedarf kann auf eine konventionelle Heizungsanlage verzichtet werden. Eine energieeffiziente Bereitstellung der Wärmeleistung kann über eine Solaranlage oder eine Wärmepumpe erfolgen. Ebenfalls sind direkte elektrische Heizungssysteme denkbar. Durch den stetig verbesserten Primärenergiefaktor gewinnt diese Möglichkeit an Attraktivität.³ Ein elektrisches Heizungssystem, z. B. als Wandflächenheizung besticht durch seine schnelle Regelbarkeit (siehe Abschn. 13.9).

Der Luftwechsel erfolgt bei Passivhäusern über eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, um den Energiebedarf möglichst gering zu halten. Eine Lüftung über die bauseitigen Fenster kann natürlich auch vorgenommen werden, jedoch können hierdurch bei großen Temperaturdifferenzen zwischen der Innenraumtemperatur und der Umluft Ineffizienzen entstehen (siehe Kap. 12).

10.3 Das Nullenergie und das Energieplushaus

Grundlage der beiden Gebäudetypen ist ein Haus mit einem sehr hohen energetischen Standard, wie z. B. das Passivhaus. Der geringe Energiebedarf über das Jahr wird bei einem Nullenergiehaus durch eine Energieerzeugungsanlage (z. B. einer Photovoltaik-Anlage) bilanziell ausgeglichen. Das bedeutet nicht, dass keine Energieversorgungsanschlüsse am Wohngebäude vorliegen

³Resultiert aus dem steigenden Anteil der erneuerbaren Energien im Strommix.

dürfen, sondern dass die Energiesumme über ein Jahr ungefähr ausgeglichen ist. Somit ist der häufig verwendete Begriff eines energieautarken Gebäudes streng genommen nicht korrekt. Die PV-Anlage versorgt über den Sonnenertrag am Tage den Energiebedarf des Hauses und speist überschüssige Energie ins Verbundnetz ein. In den sonnenschwachen Zeiten bedienen sich die Energiewandlungsanlagen wiederum aus dem Verbundnetz. Somit kann das Haus als Nullenergiehaus und miteinhergehend als klimaneutral bezeichnet werden.

Damit die Energie aus der Stromerzeugungsanlage nach dem § 5 der EnEV 2014 vom berechneten Energiebedarf abgezogen werden darf, muss die Quelle der Stromerzeugungsanlage eine regenerative sein. Ebenfalls muss die Stromerzeugung im unmittelbaren Zusammenhang mit dem Gebäude stehen. Die Berechnung der Erträge erfolgt über die DIN V 18955-10 für die Referenzklimazone Potsdam. Ziel ist ein möglichst großer Anteil am Eigenverbrauch entweder direkt oder indirekt über ein Speichersystem.

Neben einer PV-Anlage als regenerative Stromerzeugungsanlage kann auch eine Windkraftanlage Berücksichtigung finden.

Zu beachten ist, dass durch die Stromerzeugungsanlage maximal der elektrische Energiebedarf des Gebäudes ausgeglichen werden kann. Somit entsteht eine indirekte Vorschrift, welche Energiewandlungsanlage für die thermische Energiebereitstellung zum Einsatz kommen sollte, nämlich eine elektrisch angetriebene.

Beim Plusenergiehaus wird tendenziell mehr Energie im Jahr produziert, als verbraucht wird. Es ergibt sich ein negativer jährlicher Energiebedarf über die Summation aller ein- und austretenden Energieströme.

10.4 Gegenüberstellung der Energiestandards

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass bei allen unterschiedlichen Hausdefinitionen nur die Aufwendungen über die Betriebszeit deklariert werden. Ein sinnvoller und umfassender Rückschluss auf die ökologische Effizienz des Gebäudes ist damit noch nicht gegeben. Aufwendungen in den vor- und nachgelagerten Lebenszyklusphasen können die Betriebsergebnisse eliminieren.

Die verschiedenen Gebäudekonfigurationen unterscheiden sich enorm in ihrem jährlichen Primärenergiebedarf. Doch welche Konfiguration bietet ökonomische und ökologische Vorteile für den Bauherren und das in einem verträglichen Rahmen? In diesem Abschnitt werden wir versuchen, die

unterschiedlichen Haustypen gegenüberzustellen und Vorteile herauszuarbeiten.

Die EnEV lässt eine prozentuale Gegenüberstellung der einzelnen Energiestandards zu. Dabei erfolgt ein Bezug auf das Referenzhaus der EnEV (siehe Abb. 10.1).

Aus energieeffizienter Bewertung der Betriebsphase ist die KfW 40 Variante deutlich am vorteilhaftesten. Die Transmissionswärmeverluste und der spezifische Primärenergiebedarf sind in diesem Gebäudemodell deutlich unter den Anforderungen nach der EnEV. Das KfW-Effizienzhaus 40+ hat nach dem prozentualen Primärenergiebedarf und den Transmissionswärmeverlusten keine Vorteile gegenüber der KfW 40 Variante.

Über den Einfluss der jeweiligen Energiestandards auf die Investitionskosten gibt es zahlreiche Studien, die eine Kostenerhöhung in der Herstellung durch die höheren Energiestandards bestätigen. Jedoch reichen die Aussagen von „geringen Einfluss auf die Investitionskosten“⁴ bis zu „(sehr) hohen Einfluss auf die Höhe der Baukosten“⁵.

Aus diesem Grund werden wir neben einer generellen Übersicht individuelle Gleichungen entwickeln. Somit können Sie direkt Ihre Energiekennwerte eintragen und eine projektspezifische Vorteilhaftigkeit bewerten.

10.4.1 Kostenentwicklung

Die Kostenstruktur im Bausektor kann über die DIN 276 als Grundlage herangezogen werden. Die Richtlinie splittet die Gestehungskosten in sieben Kostengruppen (KG) auf.

Gestehungskostengruppen:

- 100 Grundstück
- 200 Herrichtung und Erschließung
- 300 Bauwerk/Baukonstruktion
- 400 Bauwerk/Technische Anlagen
- 500 Außenanlagen
- 600 Ausstattung und Kunstwerke
- 700 Baunebenkosten

⁴Vgl. [19, S. 2–3].

⁵Vgl. [20].

Uns interessieren lediglich die Kostenpositionen, die in Zusammenhang mit der Energieeffizienz stehen. Auf den ersten Blick sind dies die Bauwerkskosten aus den Kostengruppen KG 300 und KG 400, jedoch hat die Energieeffizienz auch Einfluss auf die Kostengruppe KG 700. Die höheren Anforderungen erfordern mehr Planungsarbeit von den Architekten und Ingenieuren, ebenfalls nimmt der Zertifizierungsaufwand zu, was sich in dieser Kostengruppe niederschlägt.

Zu erwarten ist, dass sich die Kosten in der Kostengruppe KG 300 erhöhen, da sich hier die Kosten für die Gebäudehülle widerspiegeln. Die Kostengruppe KG 400, in der die Anlagentechnik eingebunden ist, kann sich bei einer geschickten Ausführung reduzieren. Steigt die Qualität der Gebäudehülle, dann sinkt der Heizbedarf und die Heizungsanlage kann unter Umständen kleiner dimensioniert werden. Jedoch sind die Heizanlagengrößen nicht beliebig verfügbar und somit muss ein Größensprung sorgfältig geplant werden.

Die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE eV) hat zahlreiche Veröffentlichungen sowie Studien über den Einfluss der Energieeffizienzstandards auf die Kostenseite veröffentlicht. So postuliert die ARGE, dass seit der EnEV 2014 keine Effizienzsteigerungen mehr ökonomische Vorteile generieren würden.^{6, 7}

In der Abb. 10.2 sind die spezifischen Investitionskosten pro Quadratmeter Wohnfläche aus den Kostengruppen KG 300 und KG 400 eingetragen. Ebenfalls befindet sich der spezifische Energiebedarf pro Quadratmeter Nutzfläche nach [22] in der Abbildung. Als Referenzwert ist der aktuelle Standard nach der EnEV 2016 festgelegt. Zwar handelt es sich bei den Ergebnissen um ein Mehrfamilientypgebäude, jedoch sind die Verhältnismäßigkeiten qualitativ mit Einfamilienhäusern gleich zu setzen.

Während sich die spezifischen Baukosten sich auf einen Quadratmeter Wohnfläche beziehen, ist der spezifische Energieverbrauch auf die Nutzfläche bezogen.

Während die spezifischen Baukosten vom Stand der Wärmeschutzverordnung (WSchV 1995) zum Energieeffizienzstandard der EnEV 2014 um ca. sechs Prozent angestiegen sind, konnten die durchschnittlichen Energieverbräuche um 87 % gesenkt werden (bezogen auf den Energiebedarf

⁶Vgl. [20, S. 33–34].

⁷Vgl. [21, S. 42–44].

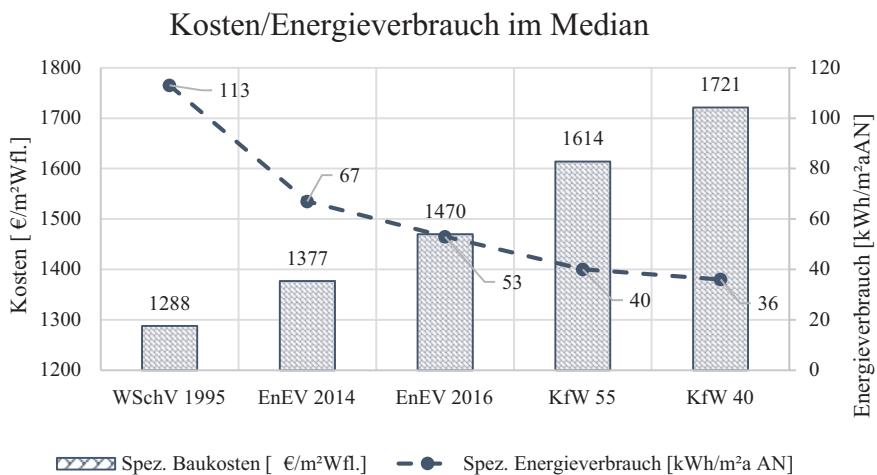


Abb. 10.2 Kosten und Energieverbrauch gängiger Energiestandards

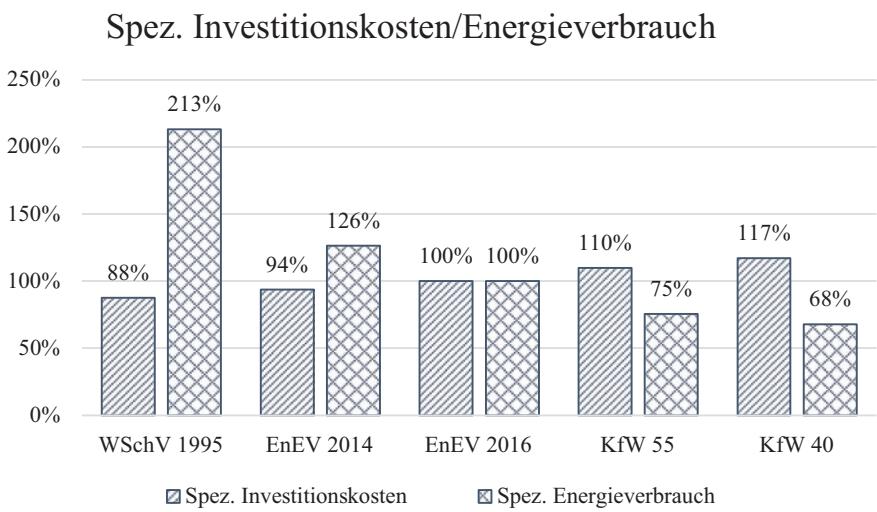


Abb. 10.3 Spez. Investitionskosten/Energieverbrauch, eigene Darstellung nach [22]

EnEV 2016, Abb. 10.3). Eine beachtliche und rentable Einsparung. Der durchschnittliche Kostensprung von der EnEV 2014 auf die Verschärfung 2016 hat sich wiederum mit sechs Prozent niedergeschlagen, die Energieeffizienzeinsparungen kommen an die großen Einspareffekte der vorherigen Effizienzsteigerungen aber nicht mehr ran. Umsso weiter wir an die

physikalische Effizienzgrenze herankommen, umso mehr Aufwand müssen wir für jeden weiteren Effizienzpunkt aufbringen.

Bereits zwischen der EnEV 2014 und der EnEV 2016 sind mit 6 % Investitionskostenzuwachs⁸ nur noch 26 % Effizienzsteigerung erreicht worden. Zu den KfW Standards nimmt die Spreizung weiter ab. Das KfW-Effizienzhaus 55 benötigt bereits 10 % höhere Investitionen und reduziert den Primärenergiebedarf um 25 % zum EnEV 2016 Standard. Beim KfW-Energieeffizienzhaus 40 und 55 liegen die ökonomischen Aufwendungen und die Energieeffizienzsteigerungen mit 7 % gleichauf.

Zu beachten ist, dass es sich hier um gemittelte Werte aus mehreren Referenzprojekten handelt, somit nicht um ein bestimmtes Projekt. Ebenfalls sind die Kosten aus der Kostenposition KG 700 noch nicht eingerechnet.

Auch hierzu sollten wir ein kleines Rechenbeispiel ansetzen. Wenn wir den Energiestandard zwischen der EnEV 2014 und der EnEV 2016 gegenüberstellen und die Energieeinsparungen als Zielparameter deklarieren, dann können wir die Betriebslaufzeit für eine monetäre Gleichwertigkeit (in der Betriebswirtschaft auch gerne als indifferent deklariert) der Systeme bestimmen. Kurz ausgedrückt können wir so die Frage beantworten, nach wie viel Betriebsjahren die Mehrkosten der erhöhten Erstinvestitionen durch die jährlichen Einsparungen ausgeglichen sind. Damit wir die Energiekosten bewerten können, setzen wir die Energiekosten nach der Gaspreisanalyse aus dem Abschn. 7.6 an.

$$n_{\text{Betr.}} = \left| \frac{k_{I\text{EnEV}2014} - k_{I\text{EnEV}2016}}{[e_{\text{EnEV}2014} - e_{\text{EnEV}2016}] \cdot k_{\text{Gas}}} \right| \quad (10.1)$$

$$n_{\text{Betr.}} = \left| \frac{(1377 - 1470) \text{ €/(m}^2\text{Wfl)}}{[67 - 53] \text{ €/(kWh a m}^2\text{AN)} \cdot 0,08 \text{ €/kWh}} \right|$$

$$n_{\text{Betr.}} = 83,04a$$

$$n_{\text{Betr.}} = \text{Betriebsjahre}[a]$$

$$k_{I\dots} = \text{Spez. Investitionskosten} \left[\text{€/(m}^2\text{Wfl)} \right]$$

⁸Die Baukostensenkungskommission analysierte 6 bis 7 %. Vgl. [23, S. 5].

Tab. 10.1 Amortisationszeiten Energiestandards

	WSchV 1995	EnEV 2014	EnEV 2016	KfW 55	KfW 40
WSchV 1995	–	24,18	37,92	55,82	70,29
EnEV 2014	–	–	83,04	109,72	138,71
EnEV 2016	–	–	–	138,46	184,56
KfW 55	–	–	–	–	334,38
KfW 40	–	–	–	–	–

$$e_{\dots} = \text{Spez. Energiebedarf} \left[\frac{\text{€}}{\left(\text{kWh} \cdot \text{a} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{AN} \right)} \right]$$

$$k_{\text{Gas}} = \text{Spez. Energiekosten Gas} [\text{€}/\text{kWh}]$$

Obwohl es sich hier um Medianwerte aus Mehrfamilienhäusern handelt und wir Wohnfläche mit Nutzfläche mischen, zeigt das Ergebnis schon die lange Amortisationszeit von ca. 83 Jahren. In der Tab. 10.1 sind alle Amortisationszeiten zwischen den Energiestandards eingetragen.

Diese sehr langen und damit eigentlich nicht rentablen Amortisationszeit sind für Investoren nicht attraktiv und so wundert es nicht, dass häufig nur das Nötigste getan wird, um den gesetzlichen Rahmenbedingungen gerecht zu werden.

Doch wie sieht es im privaten Sektor aus? Hier müssen wir tiefer gehende Betrachtungen anstreben, um eine individuelle Vorteilhaftigkeit analysieren zu können. Die Bundesregierung versucht die unverhältnismäßigen Kosten, für eine höhere Energieeffizienz durch Fördermaßnahmen zu kompensieren. So verteilt die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) vergünstigte Kredite und Tilgungszuschüsse für einen Neubau mit höheren Energiestandards als die aktuelle EnEV es vorschreibt.⁹ Diesen Aspekt sollten wir beachten.

Jetzt können wir jeden einzelnen Kredit mit seinen jährlichen Belastungen ausrechnen, z. B. über die Annuitätsgleichung:

$$\text{Annuitätskosten} = \text{KS} = \sum_j^n \text{KS}_j \cdot \left((1 + i_j)^t \cdot \left(\frac{i_j}{(1 + i_j)^t - 1} \right) \right) \quad (10.2)$$

n = Laufvariable Kredite ohne KfW – Kredit

i_{\dots} = Zinsen ... [%]

⁹Vgl. [24].

KS_{\dots} = Kreditsumme . . . [€]

t = Laufzeit[a]

Die Gleichung kann vereinfacht werden, indem ein gemittelter Zinssatz aus allen Einzelzinssätzen gebildet wird. Jedoch ist zu beachten, dass mit steigender Anzahl der Kredite auch eine höhere Abweichung einhergehen kann. Somit ist die folgende Gl. 10.3) als Näherung zu betrachten.

$$i_m = \frac{\sum_{j=1}^t (i_j \cdot KS_j) + (i_{KfW} \cdot KS_{KfW})}{\sum KS} \quad (10.3)$$

Zur Verdeutlichung folgt ein kurzes Beispiel, jedoch unter Vernachlässigung der Kreditlaufzeiten. Zur Finanzierung ihrer Immobilie wollen Sie eine Gesamtkreditsumme von 500.000 € aufnehmen. Bei der Bank Freundslich (BF) nehmen Sie eine Kreditsumme von 250.000 € auf, mit einem effektiven Zinssatz von 1,8 %.¹⁰ Bei der Bank Kredithai (KH) einen Kredit von 150.000 mit 8 % und die Restsumme kommt von der KfW-Bank (KfW) für 0,75 %. Der gemittelte Zinssatz ist für die Zeit der festen Zinsbindung berechenbar.

Eingesetzt in (Gl. 10.3) ergibt sich folgende Berechnung:

$$i_{mKfW} = \frac{KS_{BF} \cdot i_{BF} + KS_{KH} \cdot i_{KH} + KS_{KfW} \cdot i_{KfW}}{KS_{BF} + KS_{KH} + KS_{KfW}}$$

$$i_{mKfW} = \frac{250.000 \text{ €} \cdot 1,8\% + 150.000 \text{ €} \cdot 8\% + 100.000 \text{ €} \cdot 0,75\%}{500.000 \text{ €}}$$

$$i_{mKfW} = 3,45\%$$

Als Gegenpart wird eine gleichmäßige Verteilung der Kreditsumme von der KfW auf die anderen Kreditgeber angesetzt:

$$i_m = \frac{KS_{BF} \cdot i_{BF} + KS_{KH} \cdot i_{KH}}{KS_{BF} + KS_{KH} + KS_{KfW}}$$

$$i_m = \frac{300.000 \text{ €} \cdot 1,5\% + 200.000 \text{ €} \cdot 8\%}{500.000 \text{ €}}$$

¹⁰Bei den Banken handelt es sich um fiktive Kreditinstitute.

$$i_m = 4,28\%$$

Über die dynamische Kostenrechnung der Kapitalwertmethode aus dem Abschn. 7.1 wollen wir die Betriebszeit bis zur Indifferenz ermitteln. Dafür werden wir die Kapitalwertgleichung ein wenig auf unsere Bedürfnisse anpassen. Die folgenden Gleichungen sowie das gesamte Berechnungsverfahren können ebenfalls für eine spezifische Betrachtung durchgeführt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Bezug auf alle Berechnungsgrößen identisch sein muss (z. B. auf die Wohnfläche).

$$C_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{(e_t - a_t)}{(1+i)^t} \right] + L_n \cdot (1+i)^{-n}$$

Da die zu erwartenden jährlichen Erträge bei einer selbst genutzten Immobilie irrelevant sind, werden wir diesen Term aus der Gleichung nehmen:

$$C_0 = -A_0 + \sum_{t=1}^n \left[\frac{(-a_t)}{(1+i)^t} \right] + L_n \cdot (1+i)^{-n}$$

Die jährlichen Aufwendungen für die Energiekosten, Wartungskosten und die Kredittilgungskosten sind in den Operationskosten eingebunden.

$$a_t = KS + KOK \cdot (1 + TZ_{OK})^t$$

$$KOK = KPEK + KRSK + KBSK + KRK + KWK$$

Ebenfalls gehen wir von der Annahme aus, dass die jährlichen Betriebskosten, Verzinsungen, Teuerungszuschläge und Barwertabsenkungen konstant sind. In diesem Fall können wir die Gleichung weiter vereinfachen mit der Hilfe der Faktoren nach [3] (Siehe Abb. 10.4 und 10.5).

Dabei ist zu beachten, dass die Faktoren zeitabhängig sind und somit eine Iteration durchgeführt werden muss. Reicht eine Näherung (statische Betrachtung) für eine erste Analyse aus, dann können die Faktoren auf eins gesetzt werden. In diesem Fall würden wir von einer dynamischen zu einer statischen Kostenrechnung wechseln, was in vielen Fällen als erster Indikator ausreicht.

$$C_0 = -A_0 + \{-KS - KOK \cdot TZ_{Faktor}\} \cdot n \cdot Z_{Faktor} + L_n \cdot Z_{Faktor}$$

Gleichung für die Indifferenz von Gebäude A und Gebäude B:

$$C_{0A} = C_{0B}$$

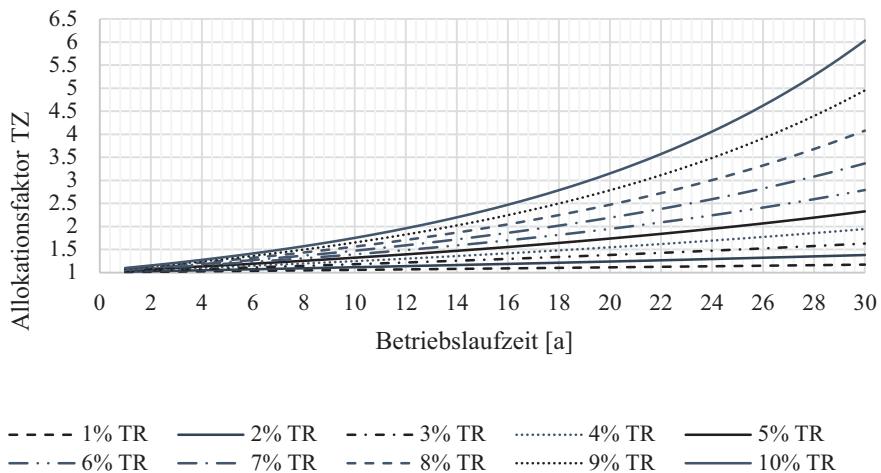


Abb. 10.4 Allokationsfaktor Teuerung (TZ-Faktor) nach [3]

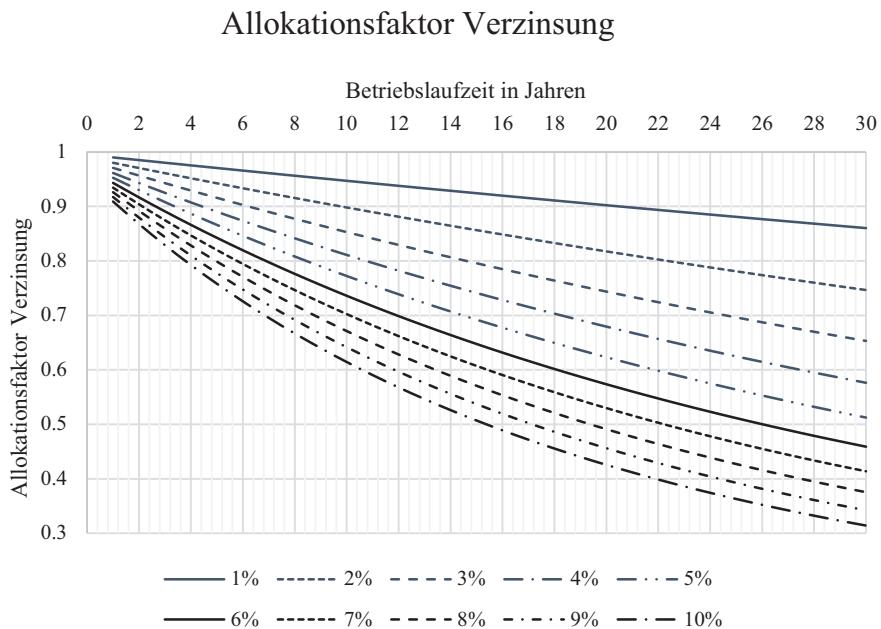


Abb. 10.5 Allokationsfaktor Verzinsung (Z-Faktor) nach [3]

$$\begin{aligned} -A_{0A} + \{-KS_A - KOK_A \cdot TZ_{\text{Faktor}}\} \cdot n \cdot Z_{\text{Faktor}} + L_{nA} \cdot Z_{\text{Faktor}} &= -A_{0B} \\ + \{-KS_B - KOK_B \cdot TZ_{\text{Faktor}}\} \cdot n \cdot Z_{\text{Faktor}} + L_{nB} \cdot Z_{\text{Faktor}} \end{aligned}$$

Aufgelöst nach der Betriebslaufzeit bekommen wir die gesuchte Gleichung für die Indifferenz der beiden Gebäudetypen:

$$n = \frac{\frac{A_{0A} - A_{0B}}{Z_{\text{Faktor}}} + L_{nB} - L_{nA}}{[(KS_B - KS_A) + (KOK_B - KOK_A) \cdot TZ]} \quad (10.4)$$

Damit sich die zusätzlichen Kosten für eine höhere Energieeffizienz finanziell lohnen, muss die Betriebslaufzeit bis zu einer Indifferenz angemessen sein. Ebenfalls ist zu beachten, dass die aufgestellte Gleichung ihre Gültigkeit verliert, sobald das Kreditvolumen getilgt ist. Entsteht ein negatives Ergebnis, dann wird sich eine Investition nach den eingefügten Parametern nicht rentieren.

10.4.2 Beispiel Energiehausstandards

Als Erstes wollen wir mit einer statischen Betrachtung der einfließenden Berechnungsgrößen die gängigsten Energiehausstandards auf dem deutschen Markt bezüglich ihrer Ökonomie gegenüberstellen. Ziel der Analyse ist es den Zeitpunkt für eine Indifferenz der Systeme aufzudecken.

In der Tab. 10.2 sind die Berechnungsgrundlagen aufgeführt. Die Investitionskosten aus der Zeile 1 setzen sich aus den Kostengruppen KG 300 und KG 400 zusammen. Somit sind in der Kostengruppe KG 700 weitere Aufwendungen zu erwarten. In der Zeile 6 sind die geltenden KfW-Zuschüsse ab dem Januar 2020 von der Kreditsumme abgezogen, sodass die reinen Aufwendungen nach der Fertigstellung des Projektes in die Berechnung einfließen. Details zu den Zuschüssen der Kreditanstalt für Wiederaufbau finden Sie in Abschn. 10.1.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist die Kreditsumme lediglich auf die Bank Freundlich und die KfW-Bank verteilt (Achtung: Aktuell ist die Zinsbindung bei der KfW zeitlich beschränkt).¹¹ Die durchschnittlichen jährlichen Annuitätsaufwendungen sind in der Zeile 9 über den Mittelinssatz berechnet und der direkten Berechnung in Zeile 10

¹¹<https://www.kfw.de/kfw.de.html>

Tab. 10.2 Berechnungsparameter Standardhaustypen

Nr.	Bezeichnung	Formel-zeichen	EnEV 2016	KfW 55	KfW 40	Einheit
1	Investitionskosten	A0...	300.000,00	330.000,00	351.000,00	€
2	Kredit 1 Summe	KS _{1...}	300.000,00	210.000,00	231.000,00	€
3	Zinsen Kredit 1	$i_{K1...}$	1,80	1,80	1,80	%
4	Kredit 2 Summe	KS _{2...}	-	-	-	€
5	Zinsen Kredit 2	$i_{K2...}$	-	-	-	%
6	Kredit KfW Summe ^a	KS _{kfw...}	-	102.000,00	96.000,00	€
7	Zinsen Kredit KfW	$i_{KfW...}$	0,00	0,75	0,75	%
8	Gemittelte Zinsen	$i_{m...}$	1,80	1,46	1,49	%
9	Annuitätskosten über Mittelzins	KS _m	13.029,43	12.911,88	13.600,08	€/a
10	Annuitätskosten direkt	KS	13.029,43	12.930,11	13.618,08	€/a
11	Abweichungen Annuitätskosten	ΔKS	0,00	-0,14	-0,13	%
12	Energiebedarf EnEV 2016	E...	8250	6050	4400	kWh/a
13	Spezifische Energiekosten	k_{gas}	0,08	0,08	0,08	€/kWh
14	Jährliche Energiekosten	BSK...	660,00	484,00	352,00	€/a
15	Jährliche Wartungskosten	WK...	300,00	360,00	390,00	€/a
16	Teuerung Operationskosten	TR _{OK...}	0	0	0	%
17	Restwert des Gebäudes nach Betriebszeit t	Ln...	250.000,00	260.000,00	270.000,00	€

^aDie Kreditsumme der KfW-Förderung ist bereits durch die Bezuschussungssumme der KfW-Bank bereinigt

gegenübergestellt. Die prozentuale Abweichung zwischen den Ergebnissen liegt unter einem Prozent, was wiederum in Zeile 11 festgehalten ist.

Die Investitionskosten basieren auf der idealisierten Annahme das 1 m²/Wfl. für 2000 € erhältlich ist. Die Mehrkosten für die KfW-Häuser richten sich nach den Angaben von [20], aufgelistet in der Abb. 10.3. Die Veränderung des Primärenergiebedarfs erfolgt nach den Anforderungen der EnEV 2016 und einem spezifischen Energiepreis für Erdgas von 8 ct/kWh. Ebenfalls wurde berücksichtigt, dass die Wartungskosten mit der Komplexität der Anlagentechnik ansteigen.

Grundbedingung ist, dass die Vorteilhaftigkeit einer höheren Effizienz innerhalb einer Zeitspanne von 30 Jahren realisiert wird.

a) Statische Bewertung der Energiestandards

In der ersten Berechnung wollen wir eine statische Kalkulation ansetzen. Somit werden der Teuerungsfaktor und der Zinsfaktor zu eins gesetzt. (Gl. 10.4) vereinfacht sich zu folgender Berechnung:

$$n = \frac{A_{0\text{EnEV2016}} - A_{0\text{KfW55}} + L_{n\text{KfW55}} - L_{n\text{EnEV2016}}}{[(KS_{\text{KfW55}} - KS_{\text{EnEV2016}}) + (KOK_{\text{KfW55}} - KOK_{\text{EnEV2016}})]}$$

Mit den Werten aus der Tab. 10.2 vergleichen wir den EnEV 2016-Standard mit den ökonomischen Aufwendungen eines KfW-Effizienzhauses 55. Daraus ergibt sich die folgende hypothetische Konstellation:

$$n = \frac{300.000 \text{ €} - 330.000 \text{ €} + 260.000 \text{ €} - 250.000 \text{ €}}{[(12.930,11 \text{ €}/a - 13.029,43 \text{ €}/a) + ((484 \text{ €}/a + 360 \text{ €}/a) - (660 \text{ €}/a + 300 \text{ €}/a))]}$$

$$n = \frac{-20.000 \text{ €}}{-99,32 \text{ €}/a - 116 \text{ €}/a} = 92,89 \text{ a}$$

Die Investitionsmehrkosten von 30.000 € können durch die Betriebskosteneinsparungen von 116 € pro Jahr nicht wirtschaftlich gerechtfertigt werden. Durch die gestiegenen KfW-Tilgungszuschüsse vom Januar 2020 ergibt sich zusätzlich ein geringer Abtrag für die Verbindlichkeiten. Jedoch können beide Kosteneinsparungen während der Betriebszeit die höheren Investitionskosten innerhalb von 30 Jahren nicht kompensieren. Hier müsste aus rein betriebswirtschaftlicher Sicht von einer Investition in ein KfW-Effizienzhaus 55 Abstand genommen werden.

Betrachten wir nun das ökonomische Potenzial eines KfW-Effizienzhauses 40 gegenüber dem aktuellen Energiestandard.

$$n = \frac{A_{0\text{EnEV2016}} - A_{0\text{KfW40}} + L_{n\text{KfW40}} - L_{n\text{EnEV2016}}}{[(KS_{\text{KfW40}} - KS_{\text{EnEV2016}}) + (KOK_{\text{KfW40}} - KOK_{\text{EnEV2016}})]}$$

$$n = \frac{300.000 \text{ €} - 351.000 \text{ €} + 270.000 \text{ €} - 250.000 \text{ €}}{[(13.618,08 \text{ €}/a - 13.029,43 \text{ €}/a) + ((352 \text{ €}/a + 390 \text{ €}/a) - (660 \text{ €}/a + 300 \text{ €}/a))]}$$

$$n = \frac{-31.000 \text{ €}}{588,65 \text{ €}/a - 218 \text{ €}/a} = -83,64 \text{ a}$$

Werden nur die Mehrinvestitionen und die Kosteneinsparungen – abzüglich der jährlichen Wartungsaufwendungen – in der Betriebsphase in den Blick genommen, dann würde sich die Anlage in ca. 142 Jahren

Tab. 10.3 Statischer Kostenvergleich Standardhäuser über eine Betriebslaufzeit von 30 Jahren (Die Ergebnisse basieren auf den Annahmen aus der Tab. 10.2 bezogen auf eine Betriebszeit von 30 Jahren)

Lebenszykluskosten [€]			Verhältnis bezogen auf den EnEV 2016-Standard		Benötigte Betriebslaufzeit	
Haus EnEV 2016	Haus KfW 55 2016	Haus KfW 40 2016	KfW 55/ EnEV 2016	KfW 40/ EnEV 2016	KfW 55/ EnEV 2016	KfW 40/ EnEV 2016
–469.682,88 €	–483.223,39 €	–511.802,52 €	2,88 %	8,97 %	92,89	–83,64

amortisieren. Das ist natürlich kein akzeptabler Wert und er würde sich weiter verschlechtern, wenn die zu erwartenden Reinvestitionskosten ebenfalls mit in die Berechnung einfließen. Mit Berücksichtigung der höheren jährlichen Kreditbelastung wird sich während der Laufzeit des betrachteten Gebäudes kein ökonomisch akzeptables Gleichgewicht einstellen.

Fazit der statischen Betrachtung ist, dass keine ökonomische Vorteilhaftigkeit der KfW-Effizienzhäuser gegenüber der EnEV 2016-Variante unter den angenommenen Randbedingungen gerechtfertigt werden kann. Das negative Ergebnis darf nur qualitativ als eine Unwirtschaftlichkeit angesehen werden und stellt keine quantitative Aussage dar.

Vergleichen wir die Lebenszykluskosten für eine Betriebslaufzeit von 30 Jahren, dann können wir die prognostizierten Kosten aus den Kostengruppen KG 300, KG 400 sowie die Betriebskosten für die Energiewandlung¹² direkt miteinander vergleichen. Die Ergebnisse sind in der Tab. 10.3 aufgeführt.

b) Dynamische Bewertung der Energiestandards

In der dynamischen Bewertung werden die Zeit und Ihr Einfluss auf die Kosten mit in die Bewertung eingebunden. Über den Z_{Faktor} erfolgt ein Bezug auf den Barwert und mit dem TZ_{Faktor} kann eine Teuerung der Betriebskosten berücksichtigt werden.

$$n = \frac{\frac{A_0_{\text{EnEV}2016} - A_0_{\text{KfW}55}}{Z_{\text{Faktor}}} + L_{n_{\text{KfW}55}} - L_{n_{\text{EnEV}2016}}}{[(\text{KS}_{\text{KfW}55} - \text{KS}_{\text{EnEV}2016}) + (K_{\text{OK}_{\text{KfW}55}} - K_{\text{OK}_{\text{EnEV}2016}}) \cdot TZ_{\text{Faktor}}]}$$

¹²Reparaturkosten, Reinvestitionskosten sowie Prüfkosten sind nicht einbezogen.

Die Faktoren können nach [3] aus den Abbildungen vom Abschn. 10.4.1 abgelesen oder aus den folgenden Gleichungen berechnet werden. Es wird wieder eine 30-jährige Betriebslaufzeit angesetzt.

Der Barwert wird mit drei Prozent festgelegt.

$$Z_{\text{Faktor}} = \frac{((i + 1)^n - 1) \cdot (i + 1)^{-n}}{i \cdot n} \quad (10.5)$$

$$Z_{\text{Faktor}} = \frac{((0,03 + 1)^{30} - 1) \cdot (0,03 + 1)^{-30}}{0,03 \cdot 30}$$

$$Z_{\text{Faktor}} = 0,6533$$

Die Teuerung fließt mit fünf Prozent in die Bewertung mit ein.

$$TZ_{\text{Faktor}} = \frac{((TR + 1)^n - 1) \cdot (TR + 1)}{(n \cdot TR)} \quad (10.6)$$

$$TZ_{\text{Faktor}} = \frac{((0,05 + 1)^{30} - 1) \cdot (0,05 + 1)}{(30 \cdot 0,05)}$$

$$TZ_{\text{Faktor}} = 2,325$$

Es folgt die Vergleichsberechnung zwischen dem EnEV 2016 und dem KfW-Effizienzhaus 55 für eine dynamische Bewertung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit:

$$n = \frac{\frac{300.000 \text{ €} - 330.000 \text{ €}}{0,653} + 260.000 \text{ €} - 250.000 \text{ €}}{[(12.930,11 \text{ €}/a - 13.029,43 \text{ €}/a) + ((484 \text{ €}/a + 360 \text{ €}/a) - (660 \text{ €}/a + 300 \text{ €}/a)) \cdot 2,325]}$$

$$n = 97,4a$$

Auch hier kann unter den gegebenen Randbedingungen keine gerechtfertigte Vorteilhaftigkeit erreicht werden.

Das Ergebnis für den Vergleich zwischen einem EnEV-Standardhaus und einem KfW-Effizienzhaus 40 kann ebenfalls keinen betriebswirtschaftlichen Vorteil in einer adäquaten Betriebszeit generieren.

$$n = \frac{\frac{300.000 \text{ €} - 351.000 \text{ €}}{0,653} + 270.000 \text{ €} - 250.000 \text{ €}}{[(13.618,08 \text{ €}/a - 13.029,43 \text{ €}/a) + ((352 \text{ €}/a + 390 \text{ €}/a) - (660 \text{ €}/a + 300 \text{ €}/a)) \cdot 2,325]}$$

$$n = -710,41a$$

Tab. 10.4 Dynamische Kosten Standardhäuser nach 30 Betriebsjahren im Vergleich
(Die Ergebnisse basieren auf den Annahmen aus der Tab. 10.2 bezogen auf eine
Betriebszeit von 30 Jahren)

Lebenszykluskosten [€]			Mehrkosten bezogen auf den EnEV 2016-Standard		Benötigte Betriebslaufzeit	
Haus EnEV 2016	Haus KfW 55	Haus KfW 40	KfW 55/ EnEV 2016	KfW 40/ EnEV 2016	KfW 55/ EnEV 2016	KfW 40/ EnEV 2016
–435.800,51 €	–452.033,32 €	–475.335,42 €	3,72 %	9,07 %	97,32	–710,41

Berechnen wir die jeweiligen dynamischen Kosten der unterschiedlichen Häuserstandards für eine Betriebszeit von 30 Jahren, dann können wir die Kostenverhältnisse gegenüberstellen und somit verdeutlichen.¹³ Die Ergebnisse aus unserer Berechnung sind in der Tab. 10.4 benannt.

Nun stellt sich die Frage, unter welchen Bedingungen eine ökonomische Sinnhaftigkeit überhaupt erreicht werden kann, bezogen auf die Randparameter aus der Tab. 10.2.

Bei der statischen Betrachtung müssten sich die Zinsverhältnisse zwischen dem Förderkredit und den marktüblichen Kreditverhältnissen verbessern. Wenn sich die Differenz zwischen dem Hausbankzinssatz und dem geförderten Zinssatz von der KfW-Förderbank vergrößert, dann bekommt die KfW-Förderung eine höhere Bedeutung für die Lebenszykluskosten.

In der Tab. 10.5 sind die berechneten Ergebnisse aus einer Sensitivitätsanalyse der vorherigen statischen Betrachtungen eingetragen. Eine Vorteilhaftigkeit des KfW-Effizienzhauses 55 gegenüber dem Standard ergibt sich ab einem Zinssatz des Hausbankkredites von ca. 2,7 %. Beim KfW-Effizienzhaus 40 gegenüber dem EnEV-Standard entsteht eine Vorteilhaftigkeit bei einem Zinssatz von über 4,8 %. In der Abb. 10.6 ist der Verlauf noch einmal grafisch dargestellt, dadurch sind die Schnittpunkte deutlicher zu erkennen.

Bei der dynamischen Betrachtung spielt die Teuerung des Energieträgers neben den Kreditkosten eine entscheidende Einflussgröße. Hierbei handelt es sich um Prognosen, die generell mit einer Unsicherheit belegt sind. In der Tab. 10.6 wurde die jährliche Teuerung bis auf zehn Prozent gesteigert.

Bei einer Teuerungsrate von knapp 8–9 % würden die KfW-Effizienzhäuser 55 und 40 die erhöhten Investitionskosten innerhalb von

¹³Reparaturkosten, Reinvestitionskosten sowie Prüfkosten sind nicht einbezogen.

Tab. 10.5 Sensitivitätsanalyse Zinsen

Kredit 1 [%]	Kredit KfW [%]	Effektiver Zinssatz		Jährliche Annuitätskosten		Lebenszykluskosten über 30 Jahre			Verhältnis bezogen auf den EnEV 2016-Standard		
		KfW40 [€/a]	EnEV 2016 [€/a]	KfW55 [€/a]	EnEV 2016 [€]	KfW55 [€]	KfW40 [€]	KfW 40/ EnEV 2016	KfW 55/ EnEV 2016	KfW 40/ EnEV 2016	[%]
1,80	0,75	13029,43	12930,11	13618,08	-469682,88	-483223,39	-511802,52	0,03	0,09		
2,10	0,75	13579,86	13315,41	14041,92	-486195,80	-494782,43	-524517,47	0,02	0,08		
2,40	0,75	14142,86	13709,52	14475,43	-503085,93	-506605,52	-537522,87	0,01	0,07		
2,70	0,75	14718,24	14112,28	14918,47	-520347,25	-518688,45	-550814,09	0,00	0,06		
3,00	0,75	15305,78	14523,56	15370,87	-537973,33	-531026,71	-564386,17	-0,01	0,05		
3,30	0,75	15905,24	14943,18	15832,46	-555957,34	-543615,51	-578233,86	-0,02	0,04		
3,60	0,75	16516,40	15370,99	16303,05	-574292,07	-556449,82	-592351,60	-0,03	0,03		
3,90	0,75	17139,00	15806,81	16782,45	-592970,00	-569524,37	-606733,60	-0,04	0,02		
4,20	0,75	17772,78	16250,46	17270,46	-611983,29	-582833,68	-621373,84	-0,05	0,02		
4,50	0,75	18417,46	16701,74	17766,87	-631323,89	-596372,09	-636266,10	-0,06	0,01		
4,80	0,75	19072,78	17160,46	18271,47	-650983,48	-610133,81	-651403,98	-0,06	0,00		
5,10	0,75	19738,45	17626,43	18784,03	-670953,59	-624112,89	-666780,97	-0,07	-0,01		
5,40	0,75	20414,19	18099,44	19304,35	-691225,60	-638303,29	-682390,41	-0,08	-0,01		
5,70	0,75	21099,69	18579,30	19832,19	-711790,74	-652698,89	-698225,57	-0,08	-0,02		
6,00	0,75	21794,67	19065,78	20367,32	-732640,20	-667293,51	-714279,66	-0,09	-0,03		

Lebenszykluskosten über 30 Jahre

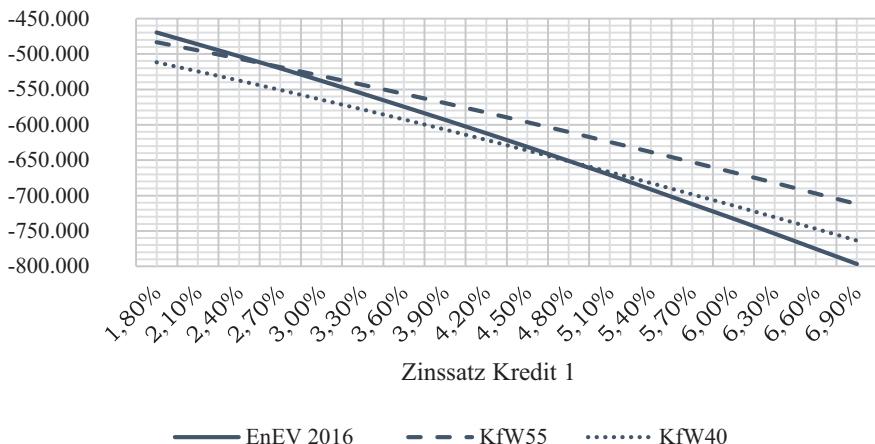


Abb. 10.6 Lebenszykluskosten basierend auf den Berechnungen (Inkludiert sind die KG 300 und KG 400 und die Energiewandlungskosten ohne Reparaturen, Reinvestitionen und Abnahmen)

30 Jahren kompensieren. Dafür wäre jedoch eine kontinuierliche jährliche Kostensteigerung beim Energieträger und der Wartungskosten notwendig. Zusätzlich sei zu bemerken, dass Preissteigerungen auch häufig durch Inflationen angetrieben sind. Daher würden sich die zukünftigen Aufwendungen durch den Zinsfaktor in ihrer Wertigkeit absenken.

10.4.3 Fazit Energiestandards

Für eine schnelle Analyse der Vorteilhaftigkeiten von Komplettpaketen nach dem Standardhausprinzip eignet sich die statische Berechnungsmethode am besten, auch wenn Sie die dynamischen Effekte der Zeit vernachlässigt. Sollte dennoch eine dynamische Investitionskostenrechnung eingesetzt werden, dann müssen die Faktoren für die Teuerung und Verzinsung iterativ berücksichtigt werden.

Eine wirtschaftliche Sinnhaftigkeit von höheren Energieeffizienzmaßnahmen lässt sich auch nach den Anpassungen der Bundesregierung in den Förderungen vom Januar 2020 nicht generell vorhersagen. Erst eine projektspezifische Betrachtung ermöglicht eine Aussage, auf die sich ein Bauherr verlassen kann. So unterschiedlich die erwähnten Studien aus dem vorherigen Abschnitt in ihrem Fazit auch sind, in einem sind sich alle einig: Eine geschickte Auswahl der Komponenten aus den Kostengruppen KG 300 und

Tab. 10.6 Validierung der Teuerungsrate

Teuerung [%]	TZ-Faktor	Jährliche Annuitätskosten		Lebenszykluskosten über 30 Jahre				Verhältnis bezogen auf den EnEV 2016-Standard
		EnEV 2016 [€/a]	KfW55 [€/a]	KfW40 [€/a]	EnEV 2016 [€]	KfW55 [€]	KfW40 [€]	2016 [%]
0	1	13.029	12.930	13.618	-469.683	-483.223	-511.803	2,88 %
1	1,177	13.029	12.930	13.618	-474.780	-487.705	-515.743	2,72 %
2	1,41	13.029	12.930	13.618	-481.491	-493.605	-520.929	2,52 %
3	1,719	13.029	12.930	13.618	-490.390	-501.428	-527.807	2,25 %
4	2,137	13.029	12.930	13.618	-502.428	-512.012	-537.112	1,91 %
5	2,71	13.029	12.930	13.618	-518.931	-526.521	-549.867	1,46 %
6	3,507	13.029	12.930	13.618	-541.884	-546.701	-567.608	0,89 %
7	4,637	13.029	12.930	13.618	-574.428	-575.312	-592.762	0,15 %
8	6,262	13.029	12.930	13.618	-621.228	-616.457	-628.935	-0,77 %
9	8,638	13.029	12.930	13.618	-689.657	-676.618	-681.824	-1,89 %
10	12,171	13.029	12.930	13.618	-791.408	-766.073	-760.469	-3,20 %

KG 400 kann helfen die Investitionskosten zu reduzieren und den Energiestandard des Gebäudes anzuheben.¹⁴ Einige Studien postulieren sogar, dass es möglich ist, eine Energiestandardanhebung kostenneutral zu erreichen.

In unseren Analysen aus dem vorherigen Abschnitt haben wir ermittelt, dass ein KfW-Effizienzhaus nach den getroffenen Bedingungen keine oder nur geringe wirtschaftliche Vorteile nach extrem langen Betrachtungszeiten erreichen kann. Jedoch ist bei einer sehr langen Betrachtungszeit auf die Reinvestitionskosten für die Anlagentechnik zu achten. Ebenfalls sind die Zinsbindungszeiten zu berücksichtigen. Lange Zinsbindungen können zu einer langfristigen Sicherheit beitragen. Gerade die Zinsbindung der KfW ist aktuell auf 10 Jahre begrenzt, was im Kreditwesen nicht besonders lang ist. Anschließende Effekte sind schwerlich vorherzusagen. Weiter negativ wirken sich die zusätzlichen Investitionskosten für die Zertifizierung aus, auch wenn diese teilweise bezuschusst werden.

Damit die Förderungen der Bundesregierung an Attraktivität weiter zunehmen, sind unterschiedliche Wege möglich. Die erste Möglichkeit liegt in einer steigenden Förderung durch eine größere Zinsspreizung zwischen dem geförderten KfW-Kredit und dem Kredit der Hausbank. Da sich das aktuelle Zinsniveau auf einem sehr geringen Level befindet, ist die größere Spreizung aktuell nicht möglich. Somit wäre eine noch höhere Tilgungsbezuschussung das Instrument, um die staatliche Förderung interessanter zu gestalten.

Hinweis

Eine weitere Möglichkeit, um eine höhere Energieeffizienz unter wirtschaftlich akzeptablen Aspekten zu generieren, liegt in der geschickten Auswahl der Hausbaukomponenten. Wir dürfen nicht das ganze Haus als Top-Down-Betrachtung bewerten, sondern wir müssen tiefer in die Materie eindringen. Welche Komponenten können höhere Investitionskosten durch adäquate Einsparungen in der Betriebszeit kompensieren? Mit dieser Frage werden wir uns in kommenden Kapiteln ausgiebig beschäftigen.

¹⁴Vgl. [19, S. 8].



11

Die Gebäudehülle

11.1 Gebäudeform und Ausrichtung

Aus energetischer Sicht sollte die Gebäudeform so einfach bzw. schlicht wie nur möglich gehalten werden, um den Transmissionsverlust über die Gebäudehülle gering zu halten. Jeder Körper steht in Wechselwirkung mit seiner Umgebung und bestrebt ein thermodynamisches Gleichgewicht an. Je größer die in Wechselwirkung stehende Oberfläche, umso mehr Wärmetransport kann stattfinden. Diesem Effekt muss anschließend wieder über eine erhöhte Isolierung der Gebäudehülle entgegengewirkt werden.

Ein beschreibender Schlüsselparameter ist hier das Oberflächen-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis). Dieses beschreibt die Hüllfläche zum beheizten Raumvolumen und sollte einen möglichst geringen Wert aufweisen.

Dazu ein kurzes Beispiel wie sich das A/V-Verhältnis auf die jährliche Energieeffizienz auswirkt:

Die Berechnung erfolgt vereinfacht ohne unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der in Wechselwirkung stehenden Außenkomponenten und ohne Berücksichtigung der Materialstärken. Sie verdeutlicht aber den enormen energetischen Effekt.

Verglichen werden zwei Gebäude mit identischer Grundfläche von 150 m², verteilt auf einem Stockwerk im Winkelbungalow und zwei Stockwerken in der quadratischen Grundflächenform. Die Gebäude haben ein Flachdach, die Außenwandstärke beträgt 0,4 m und die Geschoss Höhe 2,8 m. Das erste Gebäude hat eine L-Form mit einer Außenkantenlänge

von 14,8 m (die netto Innenkantenlänge des Gebäudeausschnitts ergibt sich somit zu 6,8 m). Das zweite Gebäude hat eine quadratische Bauform mit einer Kantenlänge von 9,46 m.

$$\text{Gebäude}_A = \frac{A}{V} = \frac{488,9 \text{ m}^2}{420 \text{ m}^3} = 1,164 \frac{1}{\text{m}}$$

$$\text{Gebäude}_B = \frac{A}{V} = \frac{390,9 \text{ m}^2}{420 \text{ m}^3} = 0,931 \frac{1}{\text{m}}$$

Damit weist das Gebäude A einen höheren Transmissionswärmeverlust von ca. 25,08 % auf, nur durch die Geometrie. Dieser Verlust muss durch eine verbesserte Isolierung wieder kostspielig kompensiert werden.

In der Tab. 11.1 sind typische A/V-Verhältnisse als Richtwerte eingetragen. Das A/V-Verhältnis wird auch als das Maß der Kompaktheit eines Gebäudes bezeichnet.

Betrachten wir die typischen A/V-Verhältnisse aus der Tab. 11.1, dann wird deutlich, dass die Wärmeschutzmaßnahmen bei einem Einfamilienhaus deutlich mehr Aufwand erfordern als bei einem Mehrfamilienhaus, bezogen auf eine spezifische Außenwandfläche.

Bei der Ausrichtung des Gebäudes sind die geografischen Randbedingungen am Aufstellort zu berücksichtigen. Solare Gewinne können durch große Fensterflächen in östlicher, über südlicher, bis westlicher Richtung gewonnen werden. Somit können gerade in der Übergangszeit Teile des Wärmebedarfs allein durch die Kraft der Sonne abgedeckt werden. Damit die Fensterflächen in den Sommermonaten das Gebäude jedoch nicht überheizen, ist bei großen Fensterflächen ein sommerlicher Wärmeschutz erforderlich (siehe Abschn. 6.5). Gegenläufig sollten Gebäudeöffnungen Richtung Norden möglichst verringert werden. Räume mit einer geringeren Raumtemperatur eignen sich besonders für eine nördliche Positionierung (z. B. Schlafzimmer, Küche, usw.). Durch diese Maßnahme sinkt die

Tab. 11.1 Typische A/V-Verhältnisse

Haustyp	A/V-Verhältnis
Eingeschossiger Winkelbungalow	≈1–1,3
Freistehendes Einfamilienhaus Satteldach	≈0,7–1,1
Doppelhaushälfte mit Satteldach	≈0,6–0,85
Reihenmittelhaus mit Satteldach	≈0,4–0,65
Mehrfamilienhäuser	≈0,3–0,5

energietreibende Temperaturdifferenz zwischen dem Innenraum und der Außenfläche und der Wärmestrom über die Außenwand verringert sich.

11.2 Fenster und Türen

Fenster erfüllen in modernen Häusern mehrere wichtige Aufgaben. Neben der Zufuhr von Tageslicht ist eine Hauptaufgabe der Fenster der Luftaus tausch. Unter dem Einsatz Raumlufttechnischen-Anlagen (RLT) könnte auf Fenster ohne Weiteres in Bezug auf den Luftwechsel komplett verzichtet werden, wenn die RLT den erforderlichen Luftwechsel für eine feuchtigkeits- und sauerstoffbasierte Versorgung sicherstellt. Trotzdem haben Räume ohne Fenster auf viele Personen eine negative psychologische Wirkung.¹ Es entsteht schnell der Eindruck von Enge und die geregelte Luft der RLT wird als stickig empfunden.

Fenster sollten eine mechanische Art der Lüftung bereitstellen können, auch wenn ein ausreichender Luftwechsel über eine Zwangslüftungsanlage sichergestellt ist und somit eine händische Lüftung eigentlich unnötig ist. So hat bereits die Möglichkeit händisch auf den Luftwechsel Einfluss nehmen zu können einen psychologisch positiven Effekt auf die Bewohner.²

Fenster sorgen neben der Möglichkeit zum Luftwechsel für einen natürlichen Lichteintrag, über den wir instinktiv ein Zeitgefühl durch die Umgebungshelligkeit erzeugen können. Die moderne Architektur setzt gezielt auf ausgeglichene natürliche Lichtverhältnisse, um das subjektive Größenempfinden eines Raumes zu beeinflussen.

11.2.1 Das Fensterglas

Die energetische Qualität hat sich gerade bei dem isolierenden Verhalten von Fenstern enorm verbessert. Während Ende der 60 Jahre Einscheibenverglasungen das gängige Maß aller Dinge waren, ist die Fensterentwicklung über zwei Scheiben mit isolierender Zwischenkammer aktuell bei drei Scheiben und mehr angekommen.³

¹Vgl. [25].

²ebd.

³Ein aktuelles Forschungsprojekt des Fraunhofer Instituts versucht dem hohen Gewicht und Material einsatz der Dreischeibenverglasung entgegen zu wirken, indem eine Zweischeibenvariante mit einer Vakuumisolierung eingesetzt wird. Ein spannender Ansatz.

Moderne Fenster im Neubausektor bestehen zum größten Teil aus zwei Kammern und drei Scheiben. Die Kammern sind in der Regel mit Argon gefüllt. Argon ist das dritthäufigste Gas in der Atmosphäre nach Stickstoff und Sauerstoff. Es zählt zu den Edelgasen. Seine Wärmeleitfähigkeit liegt ca. 46 % unter der von Luft.⁴

Die Wärmeleitung der Fensterscheibe wird über den Wärmedurchgangskoeffizienten (U_g) beschrieben. Der Index g steht für den englischen Begriff der Verglasung (glazing). Natürlich sollte der U_g -Wert des Fensterglases möglichst gering sein, jedoch hat dies auch direkten Einfluss auf den gewollten Wärmeeintrag durch die solare Strahlungswärme. Das ideale Fenster sollte eine transluzente Wärmedämmung sein. Das bedeutet, dass die Wärmeleitung von innen nach außen unterbunden wird, ohne den Strahlungswärmeeintrag von außen nach innen zu behindern.

Neben dem Fensterglas hat der Rahmen einen entscheidenden Einfluss auf die energetische Qualität des gesamten Fensters. Ein gut isoliertes Glas mit einem schlechten Rahmen wirkt umso verehrender, je kleiner das Fenster ist. Der gesamte Wärmedurchgangskoeffizient vom Fenster wird mit U_w betitelt, das W steht ganz einfach für den englischen Begriff Fenster (window).

Der Energiedurchlasswert g beschreibt die Eigenschaft des Fensters in Bezug auf den solaren Energieeintrag. Damit die Wärmeleitung von innen nach außen möglichst gering und der solare Eintrag möglichst groß ist, werden die Scheiben mit Spiegelfolien versehen (mehr Informationen im Abschn. 11.2.3).

Zusätzlich können Fenster mit einer sogenannten warmen Kante den Wärmeübertrag am Rande der Scheibe verringern. Bei der warmen Kante werden die Abstandshalter zwischen den Fensterscheiben nicht aus Aluminium, sondern aus schlecht leitendem Kunststoff gefertigt. Somit verringert sich der Wärmeverlust am Glaseinstand.

11.2.2 Der Fensterrahmen

Der Fensterrahmen sollte aus einem schlechtleitenden Material mit möglichst vielen Kammern bestehen, damit eine Wärmeübertragung erschwert wird.

Ebenso wie die gute Isolierung des Fensterrahmens ist der korrekte Einbauort der Fenster von entscheidender Bedeutung für eine gute Isolierung.

⁴Werte beziehen sich auf eine Temperatur von ca. 27 °C.

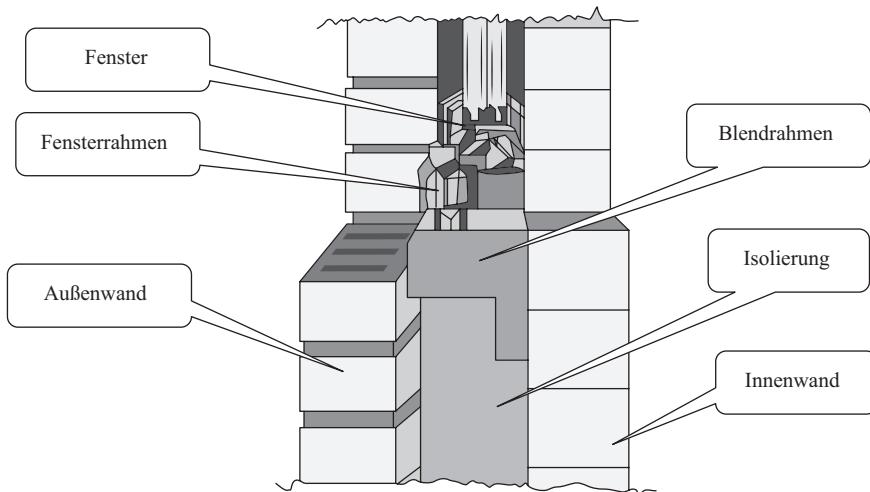


Abb. 11.1 Einbauposition Fenster mit Verblendrahmen

Tab. 11.2 Berechnungswerte Fenster

Bezeichnung	Wert	Einheit
Randverbund Aluminium	0,07	W/mK
Randverbund thermisch isoliert	0,04	W/mK
Durchschnittliche Temperatur mit Nachabsenkung	19,54	°C
Fensterfläche	1,82	m ²
Fensterhöhe	1,48	m
Fensterbreite	1,23	m
Energiekosten Primärenergie	0,08	€/kWh

Eine gute Isolierung erfordert eine geschlossene und durchgängige Hülle, das verhindert Wärmebrücken. Der Einsatz eines Blendrahmens ermöglicht das Fenster außen in der isolierenden Hülle zu positionieren. Eine Montage in der tragenden Innenhülle (der Innenwand) hätte energetisch deutliche Nachteile (Abb. 11.1).

In der Tab. 11.2 sind Richtwerte für die Wärmedurchgangskoeffizienten der gängigen Rahmentypen aufgeführt (Siehe Abb. 11.2).

11.2.3 Der Gesamtenergiedurchlassgrad

Der Gesamtenergiedurchlassgrad wird kurz als g-Wert deklariert, er erfasst die Durchlässigkeit von transparenten Bauteilen. Einbezogen sind die Strahlungsenergien, die direkt durch das Bauteil treten und den indirekten

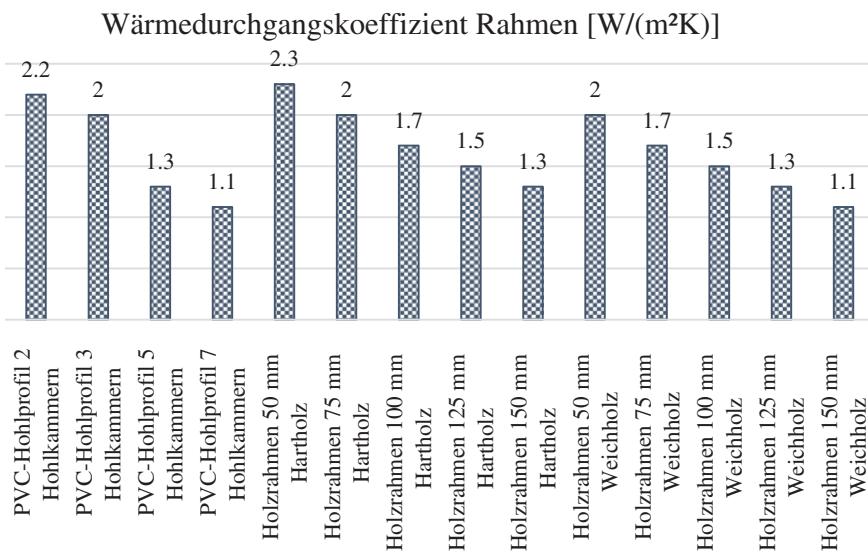


Abb. 11.2 Wärmedurchgangskoeffizienten nach [26] in Anlehnung an die DIN ISO 10077-1 (Erweitert mit Recherchewerten zu neuen PVC-Rahmen)

thermischen Energien, die durch Konvektion und Abstrahlung an den Innenraum abgegeben werden. Als Beispiel betrachten wir zuerst ein absolut durchlässiges Glas (g -Wert = 1), hier ist die direkte Strahlung durch das Fenster sehr groß. Beschichten wir das Glas auf der Innenseite mit einer dunklen Folie, so nimmt die direkte Strahlung ab. Jedoch erhöht sich die Temperatur der Scheibe durch die Energieabsorption deutlich, was zu höheren Strahlungsleistungen der Scheibe und zu Konvektion führt.

Ein klares Glas weist ungefähr einen g -Wert von 0,85 auf. An einem Frühlingsmorgen mit herrlichem Sonnenschein können so angenehme Innenraumtemperaturen allein durch die solare Einstrahlung generiert werden. An einem heißen Sommertag kann ein hoher g -Wert aber auch für eine übermäßige Erwärmung des Innenraums sorgen. Die eintreffenden Sonnenstrahlen sind eher kurzwellig und somit stehen sie in einem direkteren Zusammenhang mit der Absorber-Farbe. Glas ist für kurzwellige Strahlen größtenteils durchlässig.

Ebenfalls ist zu beachten, dass bei klarem Glas auch Wärmestrahlungen von innen nach außen stattfinden. Das bedeutet, dass Sie Wärme an einem kalten bedeckten Tag durch die Fenster an die Umgebung verlieren. Jedoch sind die Strahlungen von innen nach außen in der Regel langwellig, womit sie teilweise an der Scheibe reflektiert werden. Der kurzwellige Anteil

hingegen würde nahezu ungehindert durch das Fensterglas den Raum verlassen. Damit dies nicht passiert werden gezielt Scheiben mit beschichteten Folien eingesetzt. Diese sollen die Wärmestrahlung von innen nach außen verringern.

Moderne Dreifachverglasungen weisen g-Werte von ca. 0,55 auf. Der verringerte Strahlungswert resultiert aus einer Beschichtung aus Edelmetallen auf der Innenseite der Außenscheibe. Diese reduziert den Energieeintrag und sorgt somit für eine Verringerung der Kühllast im Sommer, jedoch geht in den Übergangszeiten solare Heizenergie durch Reflexion verloren.

Die EnEV 2014 schreibt zwar einen Mindest- U_W -Wert für die Fenster vor, sie gibt aber für den g-Wert nur die Bedingung für das Referenzhaus aus.

11.2.4 Berechnung Wärmeverlust Fenster

Während in der alten Norm DIN 4108-3 bzw. DIN 4108-4 die Berechnung zum Wärmeverlust ausschließlich aus dem Rahmen und der Glasscheibe über eine anteilige Verteilung erfolgte, fügt die aktuell geltende Norm EN ISO 10077-1 den Wärmebrückenverlust über den Abstandshalter zwischen den Glasscheiben hinzu. Dadurch und durch eine exaktere Bewertung der Flächenanteile erreicht der heutige Berechnungsansatz eine höhere Güte.

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \Psi_g}{A_g \cdot A_f} \quad (11.1)$$

U_W = Wärmedurchgangskoeffizient Fenster (window) [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

U_g = Wärmedurchgangskoeffizient Glasscheibe (glazing) [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

U_f = Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen (frame) [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

A_w = Fläche Fenster (window) [m^2]

A_g = Fläche Glasscheibe (glazing) [m^2]

A_f = Fläche Rahmen (frame) [m^2]

l_g = Länge Abstandshalter (Außenkantenlänge der Scheibe) [m]

Ψ_g = Wärmebrückenverlust [$\text{W}/(\text{mK})$]

Ein höherer Dämmwert eines Fensters entspricht einem möglichst kleinen Wärmedurchgangskoeffizient. Dabei kann an der Gleichung (Gl. 11.1) direkt gesehen werden, dass die Größenverhältnisse zwischen dem Rahmen- und der Glasfläche eine individuelle Bestimmung des jeweiligen Dämmwertes erfordern.

Für einen Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Konfigurationen müssen die Mehrkosten den jährlichen Energieeinsparungen gegenübergestellt werden. Die Lebenszeit moderner Kunststofffenster kann über dreißig Jahre erreichen und so muss die Amortisationsgrenze vorher überschritten werden.

Gleichung zur Berechnung der ökonomischen Amortisationszeit:

$$a = \frac{K_{i,w1} - K_{i,w2}}{\sum_{j=\text{Jan}}^{\text{Dez}} (U_{w1} - U_{w2}) \cdot A_w \cdot \Delta \bar{T}_j \cdot h_j \cdot k_{\text{Prim}}} \quad (11.2)$$

Hinweis

Einige Fensteranbieter machen es sich einfach und geben nur den Wärmedurchgangskoeffizienten für das Glas an, dieser ist in der Regel auch besser als der Koeffizient für den Rahmen (siehe Abb. 11.3). Doch nur die Kombination von Glas, Rahmen und Wärmebrückenverlust stellt ein aussagekräftiges Ergebnis zur Verfügung.

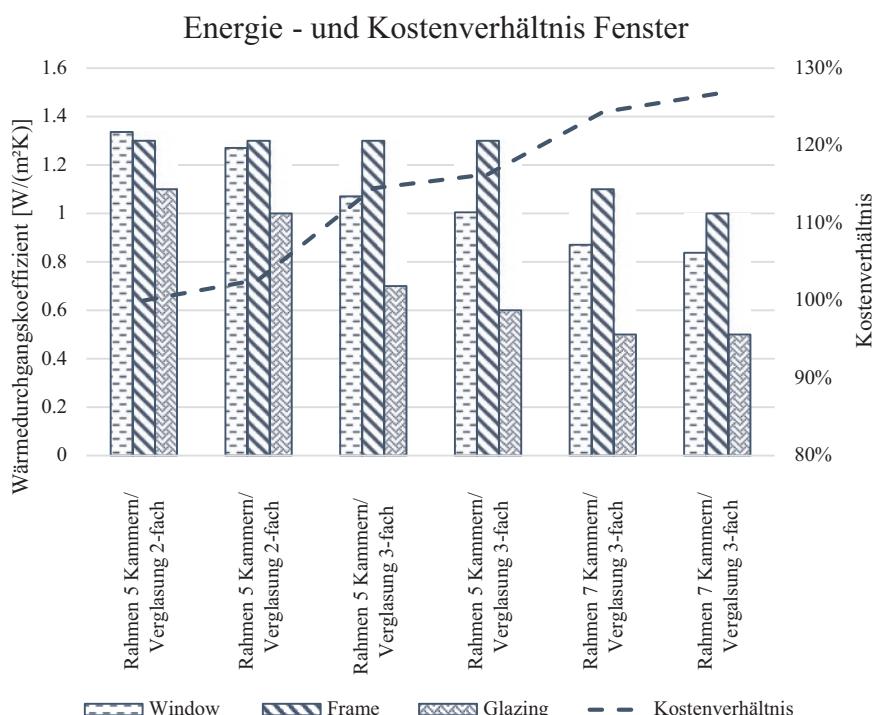


Abb. 11.3 Energie- und Kostenverhältnis Fenster (Der Fensterdurchgangskoeffizient beruht auf ein Fenstermaß von 1,23 x 1,48 m (bxh) mit Rahmenbreiten von 0,118 m in der Breite und oben und 0,144 m unten. Der Randverbund hat einen Wärmeleitwert von 0,07 W/(mK))

Es sei darauf hingewiesen, dass bei einer umfassenden Berechnung ebenfalls der solare Ertrag in die Gleichung (Gl. 11.2) einzubinden ist. Dafür wäre der Gesamtenergiedurchlassgrad g zu implementieren. Jedoch müssten dann ebenfalls die Ausrichtung, Verschattung, Sonnenstände und Sonnenschutz eingebunden werden. Diese Berechnung wäre nicht universell einsetzbar und deutlich komplexer.

11.2.5 Ökonomische Bewertung Fenster

Zu den kompletten Fenstern (bestehend aus Rahmen und Verglasung) wollen wir wieder eine Vergleichsrechnung durchführen. Dabei werden wir unsere Berechnung auf Kunststofffenster basieren. Diese haben mit Abstand den größten Marktanteil bei Neubauten, auch wegen der vergleichsweisen guten Wärmeisolierung.⁵ Da der Wärmedurchgangskoeffizient des gesamten Fensters nach der Berechnung der EN ISO 10077-1 aus den Flächenverhältnissen und des Wärmebrückenverlustes des Abstandshalters basiert, müssen wir vorher eine Konfiguration als Vergleichskörper definieren. Anschließend werden wir die ermittelten Parameter auf spezifische Werte beziehen.

Unser Vergleichsfenster hat eine Gesamthöhe von 1,48 m und eine Breite 1,23 m. Der Rahmen hat an den Seiten und oben eine Breite von 118 mm, unten beträgt die Rahmenbreite 144 mm. Der Wärmebrückenverlust über den Abstandshalter der Glasfassung beträgt 0,07 W/(mK). Die exakten Werte sind auch noch einmal in der Tab. 11.2 zusammengefasst.

Verglichen werden sechs verschiedene Fensterkonfigurationen mit unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten (Tab. 11.3). Die technischen Details und die Investitionskosten ohne Montage und Transport entstammen mehreren Internetrecherchen als Mittelwerte. Hierbei handelt es sich um ein Beispiel, welches auf Ihre individuellen Werte angepasst werden sollte. Trotzdem ist eine Tendenz auszumachen.

Der Wärmeverlust resultiert aus dem Wärmedurchgangskoeffizienten des Fensters in Abhängigkeit der Fläche, wir setzen hier eine spezifische Fläche an, und der monatlich gemittelten treibenden Temperaturdifferenz. Die mittlere Wohnraumtemperatur wird nach dem Abschn. 9.1 mit 19,54 °C festgelegt, das entspricht der mittleren Wohnraumtemperatur bei einer Nachtabsehung. Mit den Heizstunden des jeweiligen Monats werden die

⁵Vgl. [27].

Tab. 11.3 Fensterkonfigurationen und Preise

Fensterkonfiguration	U_g [W/(m ² K)]	U_f [W/(m ² K)]	U_w [W/(m ² K)]	Rahmen-tiefe [mm]	Kosten [€]	Spez. Kosten [€/m ²]
Rahmen 5 Kammern/ Verglasung 2-fach	1,1	1,3	1,337	70	229,33	154,95
Rahmen 5 Kammern/ Verglasung 2-fach	1	1,3	1,271	70	235,57	159,17
Rahmen 5 Kammern/ Verglasung 3-fach	0,7	1,3	1,071	70	262,61	177,44
Rahmen 5 Kammern/ Verglasung 3-fach	0,6	1,3	1,005	70	266,77	180,25
Rahmen 7 Kammern/ Verglasung 3-fach	0,5	1,1	0,871	82	285,16	192,68
Rahmen 7 Kammern/ Verglasung 3-fach	0,5	1	0,838	82	290,59	196,34

Wärmeverluste multipliziert. In den Monaten Juni, Juli und August sind die Heizstunden aufgrund der ausbleibenden Heizgradtage (siehe Abb. 13.10: Heizgradtage Potsdam) auf null gesetzt. Die durchschnittlichen monatlichen Außentemperaturen entstammen der NASA-Datenbank für den Standort Potsdam.⁶

Die monatlichen Heizarbeiten in der Tab. 11.4 beziehen sich auf eine spezifische Fensterfläche von einem Quadratmeter. Anschließend erfolgt die Gegenüberstellung der einzelnen Fensterkonfigurationen mit der energetisch schlechtesten Variante indem die spezifischen Differenzwerte ausgegeben werden. Die Energiekostendifferenz wird mit den Primärenergiekosten für Erdgas (0,08 €/kWh) bewertet. Eine grafische Gegenüberstellung bietet die Abb. 11.4.

Die Amortisationszeiten der energetisch „besseren“ Fensterkonfigurationen liegen allesamt unter den zu erwartenden Lebenserwartungen der Fenster und somit kann aus ökonomischer Sicht eine bessere Isoliereigenschaft der Fenster befürwortet werden (Tab. 11.5).

Zusätzlich wollen wir die „Warne Kante“ ökonomisch untersuchen. Die Mehrkosten bei der Investition hängen von der Fassung, der Anzahl an eingesetzten Glasscheiben und der Rahmenbreite mit den Isolierkammern ab. Der spezifische Wärmebrückenverlustwert sinkt in unserer Berechnung von 0,07 auf 0,04 W/(mK). Da die Rahmengrößen und somit die Längen der Wärmebrücken in den jeweiligen Konfigurationen identisch sind,

⁶ „These data were obtained from the NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program.“

Tab. 11.4 Monatliche Temperaturdifferenz und spez. Heizarbeit

Bezeichnung	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Temperaturdifferenz [°C]	20,69	19,63	15,87	11,14	5,71	2,31	-0,32	0,21	4,77	10,22	15,83	19,47
Heizstunden [h/mlt]	744	672	744	720	744	0	0	0	720	744	720	744
Spez. Wärmeverlust [W] $U_w = 1,337$	27,67	26,25	21,22	14,89	7,63	3,09	-0,42	0,27	6,37	13,67	21,17	26,03
Heizarbeit $U_w = 1,337$ [kWh/m ² mlt]	20,58	17,64	15,79	10,72	5,68	0,00	0,00	0,00	4,59	10,17	15,24	19,37
Heizarbeit $U_w = 1,271$ [kWh/m ² mlt]	19,57	16,77	15,01	10,19	5,40	0,00	0,00	0,00	4,36	9,67	14,49	18,41
Heizarbeit $U_w = 1,071$ [kWh/m ² mlt]	16,49	14,13	12,65	8,59	4,55	0,00	0,00	0,00	3,68	8,14	12,21	15,51
Heizarbeit $U_w = 1,005$ [kWh/m ² mlt]	15,47	13,26	11,87	8,06	4,27	0,00	0,00	0,00	3,45	7,64	11,46	14,56
Heizarbeit $U_w = 0,871$ [kWh/m ² mlt]	13,41	11,49	10,28	6,98	3,70	0,00	0,00	0,00	2,99	6,62	9,93	12,62
Heizarbeit $U_w = 0,838$ [kWh/m ² mlt]	12,90	11,06	9,90	6,72	3,56	0,00	0,00	0,00	2,88	6,37	9,55	12,14

Vergleich Fenster

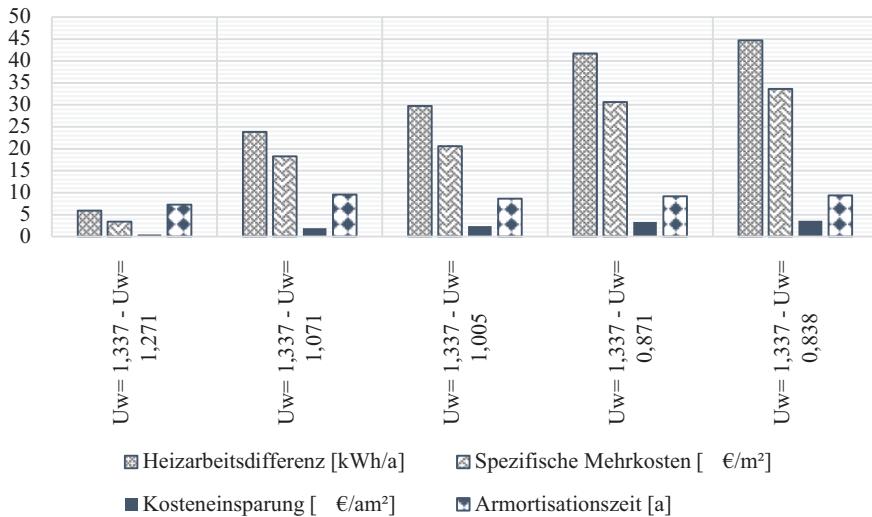


Abb. 11.4 Vergleich Fensterkonfigurationen mir unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten

Tab. 11.5 Differenzsummen und Amortisationszeit

Spezifische Differenz	Heizarbeitsdifferenz [kWh/a]	Spezifische Mehrkosten [€/m²]	Kosteneinsparung [€/am²]	Amortisationszeit [a]
$U_w = 1,337 - U_w = 1,271$	5,912	3,43 €	0,47 €	7,25
$U_w = 1,337 - U_w = 1,071$	23,829	18,28 €	1,91 €	9,59
$U_w = 1,337 - U_w = 1,005$	29,741	20,57 €	2,38 €	8,64
$U_w = 1,337 - U_w = 0,871$	41,745	30,67 €	3,34 €	9,18
$U_w = 1,337 - U_w = 0,838$	44,702	33,65 €	3,58 €	9,41

reicht auch eine einzige Betrachtung aus, bei der sich die unterschiedlichen Investitionskosten niederschlagen.

$$\Delta U_{wWK} = \frac{l_g \cdot (\Psi_g - \Psi_{gWK})}{A_g \cdot A_f} \quad (11.3)$$

Ψ_g = Wärmebrückenverlustwert Glas [W/(mK)].

Ψ_{gWK} = Wärmebrückenverlustwert Glas mit Warmer Kante [W/(mK)].

A_f = Fläche Fenster [m²]

$$\Delta U_{W_{WK}} = \frac{4,424 \text{ m} \cdot (0,07 - 0,04) \text{ W/(mK)}}{1,8204 \text{ m}^2}$$

$$\Delta U_{W_{WK}} = 0,073 \text{ W/K}$$

Der energetische Differenzwert definiert die möglichen Einsparungen und wird den Mehrkosten in der Investition gegenübergestellt (Abb. 11.5). Als Ergebnis ergibt sich, dass eine „Warne Kante“ bei sehr gut isolierten Fenstern zwar das gleiche Einsparpotenzial bietet wie bei schlecht isolierten Fenstern, jedoch steigen die Mehrkosten in der Investition deutlich an. Dies schlägt sich negativ in der Amortisationszeit nieder.

11.2.6 Ökologische Bewertung Fenster

Unsere ökologischen Betrachtungen stützen sich wieder auf das globale Treibhausgaspotenzial bzw. globales Erwärmungspotenzial (GWP) und den kumulierten Energieaufwand in Form von der totalen nichterneuerbaren Primärenergie (PENRT) für das eingesetzte Fenstermaß aus dem vorherigen Abschnitt. Aufgrund der schwachen Datenlage mussten Annahmen für die Belastungen der einzelnen Konfigurationen angesetzt werden.

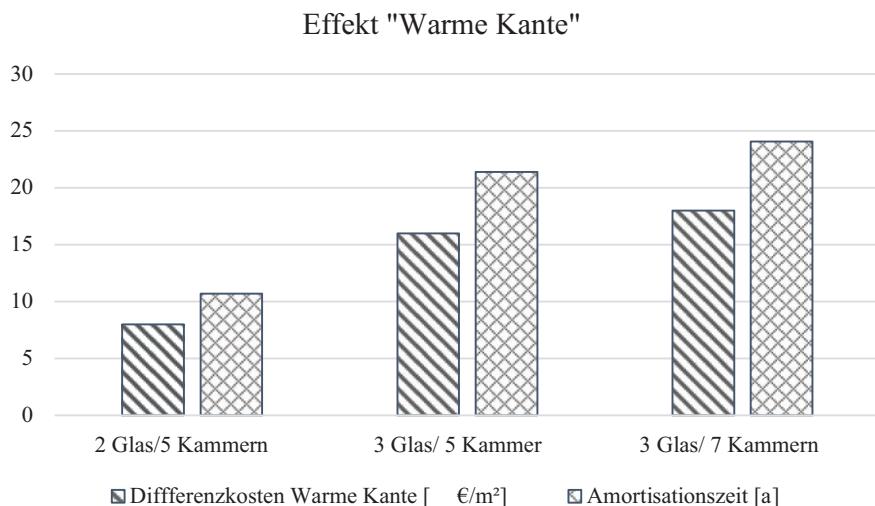


Abb. 11.5 Differenzkosten und Amortisationszeit warne Kante

Grundlagen bildeten die Ökobilanzen der Onlinedatenbank Ökobaudat.de für Kunststoffflügelrahmen aus PVC, Mehrscheibenisolierglas 2-fach und Mehrscheibenisolierglas 3-fach. Die Umweltbelastungen wurden über die unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten für eine wertigere Isolierung hochskaliert. Basierend auf spezifischen Größen wollen wir die energetischen Einsparungen dem Mehraufwand in der Produktion gegenüberstellen (Tab. 11.6). Als Basis des Vergleichs wird wieder die Wärmewandlung über eine idealisierte Gasheizung angesetzt, mit dem Primärennergiefaktor Gas 1,1 und Treibhausgaspotenzial 0,2585 kg CO₂ äq/KWh.

Gleichung zur Berechnung des Treibhausgaspotenzials:

$$a = \frac{CF_{w1} - CF_{w2}}{\sum_{j=Jan}^{Dez} (U_{w1} - U_{w2}) \cdot A_w \cdot \Delta \bar{T}_j \cdot h_j \cdot cf_{\text{Prim.}}} \quad (11.4)$$

Mit sinkendem Wärmedurchlasskoeffizienten steigt der Aufwand in der Herstellung durch einen größeren Materialeinsatz an (siehe Abb. 13.7). Mit einer linearen Interpolation wurden die Aufwendungen über den Wärmedurchlasskoeffizienten des jeweiligen Bauteils prognostiziert, somit weist z. B. ein Rahmen mit 7 Kammern und einem U_f-Wert von 1,1 höhere Umweltaufwendungen auf, als ein 5 Kammerrahmen mit einem U_f-Wert von 1,3 (Siehe Abb. 11.6).

Werden die Mehraufwendungen den Einsparungen im Betrieb gegenübergestellt, dann ergeben sich die notwendigen Zeiträume für eine ökologische Amortisation (Tab. 11.7). Es ist deutlich zu erkennen, dass eine effizientere Isolierung deutliche Vorteile unter ökologischen Gesichtspunkten mit sich bringt und somit zu empfehlen ist.

11.2.7 Aussentüren

In den vorherigen Abschnitten konnten die ökonomischen und ökologischen Vorteile von energetisch hochwertigeren Fenstern festgestellt werden. Dieses verhält sich analog zu den Türen, obwohl der Kunststoffanteil in einer konventionellen Tür dem Glasanteil deutlich überwiegt. In überschlägigen Analysen sind korrelierende Berechnungsergebnisse entstanden, daher wird hier auf eine detaillierte Ausführung verzichtet. Für eine individuelle Berechnung können die Gleichungen mit angepassten Verhältnissen aus den Fensteranalysen übernommen.

Tab. 11.6 Ökologische Belastungen Fenster

Bezeichnung	PVC-U Flügelrahmen	Mehrscheibenisolierglas 2-fach	Mehrscheibenisolierglas 3-fach	Mehrscheibenisolierglas 3-fach	Einheit
Gewicht					
Total nichterneuerbare Primärenergie (PENRT) A1-A3	3,1	21,13	30,15	kg/m ²	
Total nichterneuerbare Primärenergie (PENRT) A1-A3	159,1	508,1	765	MJ/m ²	
Globales Erwärmungspotenzial (GWP) A1-A3	44,19	141,14	212,5	kWh/m ²	
	9,136	26,7	40,36	kg CO ₂ äq/m ²	

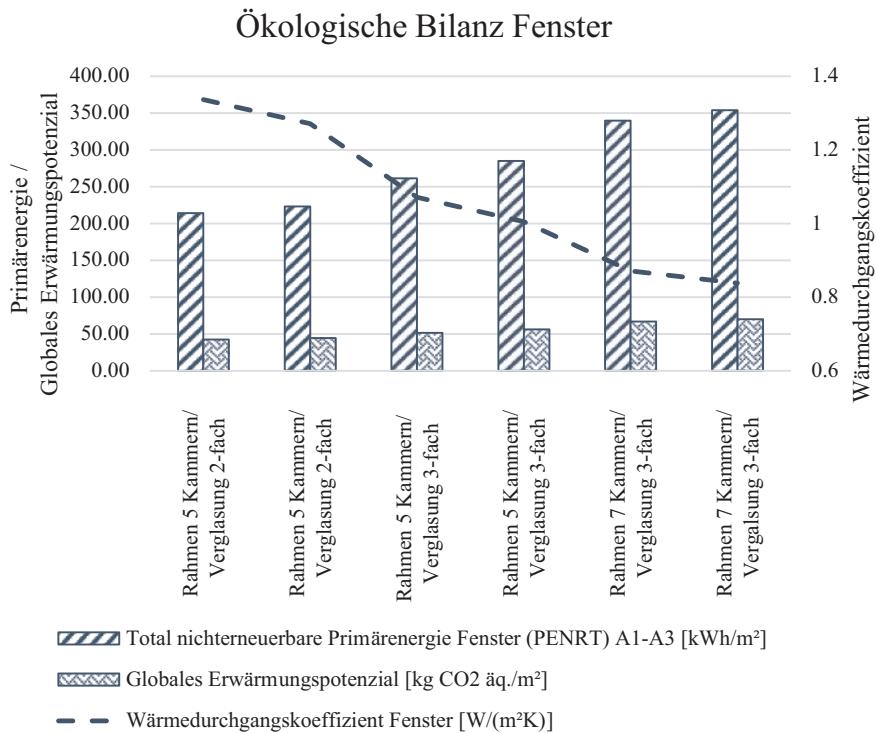


Abb. 11.6 Ökologische Bilanz der unterschiedlichen Fensterkonfigurationen (Die unterschiedlichen Konfigurationen wurden über eine lineare Interpolation aus den Werten nach Ökobaudat.de berechnet. Sie dienen lediglich als Prognose)

11.3 Wände, Decke und Böden

Eine moderne Gebäudehülle sollte möglichst dicht und ohne Wärmebrücken konzipiert werden. Dadurch verringern sich die Transmissionssverluste an die Umgebung. Ebenfalls werden kalte Zonen am Inneren der Außenwände vermieden. Kalte Zonen sorgen für eine erhöhte Kondensationsgefahr und langfristig erhöhen sie das Potenzial für Schimmelbildungen. Eine erhöhte Aufwendung in der Planung der Gebäudehülle wirkt sich positiv auf die komplette Betriebsphase und den Werterhalt des Gebäudes aus.

Die äußere Gebäudehülle wird in Schichten aufgebaut, ähnlich wie eine gute Bekleidung beim Skifahren. Die äußerste Schicht sollte Schutz vor Wind und Wassereintrag von außen gewähren. Eine beschädigte Außenfläche, z. B. durch einen Riss in der Außenhülle, sollte immer umgehend behandelt werden. Bei unserem plakativen Beispiel würde ein

Tab. 11.7 Ergebnis ökologische Auswertung Fensterkonfigurationen

Fenster- konfiguration	Wärmedurchgangs- koeffizient Fenster [W/(m ² K)]	Total nichterneuerbare Primärenergie Fenster (PENRT) A1-A3 [kWh/m ²]	Globales Erwärmungs- potenzial (GWP) [kg CO ₂ äq./m ²]	Amortisationszeit PENRT [a]	Amortisationszeit GWP [a]
Rahmen 5 Kammern/ Verglasung 2-fach	1,337	213,99	42,59	0,00	0,00
Rahmen 5 Kammern/ Verglasung 2-fach	1,271	223,38	44,37	1,44	1,06
Rahmen 5 Kammern/ Verglasung 3-fach	1,071	261,45	51,67	1,81	1,34
Rahmen 5 Kammern/ Verglasung 3-fach	1,005	285,01	56,15	2,17	1,60
Rahmen 7 Kammern/ Verglasung 3-fach	0,871	339,82	66,93	2,74	2,05
Rahmen 7 Kammern/ Verglasung 3-fach	0,838	354,02	69,86	2,85	2,15

Riss in der Skihose ebenfalls ein schnelles Handeln erfordern. Kommt Feuchtigkeit von außen langfristig in die inneren Schichten ist mit großen bautechnischen Schäden zu rechnen. Dabei sollte auch immer der aufsteigende Feuchtigkeitsschutz durch die Kapillarität der eingesetzten Baumaterialien Berücksichtigung finden. Verantwortlich für den Schutz vor aufsteigender Feuchtigkeit ist eine gute Sockelabdichtung, auf die gerade bei feuchtespeicherndem Untergrund nicht verzichtet werden sollte. Wird eine Unterkellerung geplant, so bekommt der Keller eine sogenannte „schwarze Wanne“. Diese umschließt den Keller mit einer wasserundurchlässigen Schicht – meist aus Bitumen.

Da Feuchtigkeit schnell zu großen teilweise unwiderruflichen Bauschäden führen kann, muss der Feuchtigkeitsschutz von Fachleuten geplant und ausgeführt werden.

Nach der wasser- und winddichten Außenschicht kommt die Isolierung. Sie ist hauptverantwortlich für das Erreichen der Energieeffizienz-Anforderungen. Die Isolierung sollte möglichst unterbrechungsfrei um die kompletten Innenraumwände gezogen werden. Das bedeutet, in jeder Schnittansicht des Gebäudes, egal ob der Schnitt vertikal oder horizontal durchgeführt wird, sollte die Isolierschicht konstant vorhanden sein (siehe Abb. 11.7). Andernfalls entstehen die bereits erwähnten Wärmebrücken. An diesen kann die Wärme aus dem Innenraum an der Isolierung vorbeifließen. Je nach Eigenschaft der Wärmebrücke sind deutliche Verluste zu erwarten. So hat ein Stahlträger (Wärmeleitfähigkeit ca. $46,5 \text{ W}/(\text{mK})$), der durch die

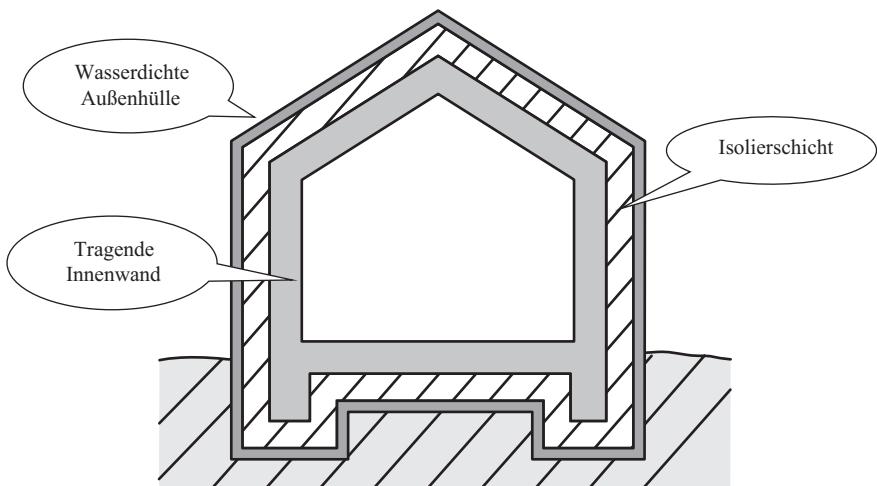


Abb. 11.7 Idealisierter Wandaufbau

Isolierung ragt (z. B. für einen Balkon) durch seine sehr gute Wärmeleitfähigkeit schlimmere Auswirkungen als ein Holzträger (Wärmeleitfähigkeit ca. 0,13 W/(mK)).

Innenliegend sind Massivwände oder Streben-Konstruktionen verantwortlich für den tragenden Aufbau. Zum Einsatz kommen unter anderem Klinkersteine, Porenbetonsteine, massive Stahlbetonbauteile sowie Holzstrukturelemente. Die innenliegenden Wände sollten mit einer diffusionsoffenen Beschichtung versehen werden, z. B. Gipsputz, Lehm oder Kalkputz. Dieser lässt Feuchtigkeit aus dem Mauerwerk in den Raum diffundieren, was gerade in einem Neubau sehr wichtig ist. In einem Neubau werden etliche Tonnen Wasser je nach Herstellungsverfahren eingebunden, die in der Trocknungsphase aus dem Gebäude rausgeführt werden müssen. Aus diesem Grund, sollten in den ersten Monaten nach Abschluss der Bauphase noch keine Wände großflächig verdeckt werden. Aber auch nach der Trocknungsphase haben die diffusionsoffenen Flächen eine wichtige Funktion für das Raumklima.

Die Diffusionsfähigkeit eines Stoffes wird über die dimensionslose Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ dargestellt. Sie repräsentiert den Widerstand gegenüber dem Wasserdampf im Verhältnis zur reinen Luft. Der nominelle Widerstandswert der Luft liegt bei eins. Ein hoher Wert bedeutet, dass der Werkstoff den Wasserdampftransport erschwert. In den Datenblättern werden meistens zwei Werte angegeben, da der Widerstand nach Inhaltsstoffen und Herstellungsverfahren schwanken kann. Für die Berechnungen hinsichtlich des Feuchtigkeitsschutzes nach der DIN V 4108-3 muss immer der schlechtere Wert eingesetzt werden.

Verändert sich die Raumtemperatur, dann hat dies unmittelbaren Einfluss auf die relative Luftfeuchtigkeit im Raum. In neuen, gut isolierten Gebäuden sollte der Temperaturgradient zwischen den Oberflächen und der Raumlufttemperatur möglichst gering sein. Das hat Vorteile für die Behaglichkeit (siehe Kap. 3) und der Kondensationsrate von Tauwasser an den Raumoberflächen.

In der Abb. 11.8 ist ein Beispiel zur Verdeutlichung des Zusammenhangs von Temperatur und relativer Luftfeuchte aufgezeigt. Beispielhaft sind an einem warmen Sommertag im Gebäude 25 °C und die Luft hat eine relative Feuchtigkeit von 60 %, was für einen Sommertag nichts Ungewöhnliches ist. Anschließend wird der Raum luftdicht verschlossen und zusätzlich kommt es zu einer deutlichen Umgebungstemperaturabsenkung, z. B. in der Nacht. Im Gebäude sinkt die Temperatur ohne den Einsatz von Heizenergie zeitverzögert auf 20 °C ab. Die relative Luftfeuchtigkeit erreicht knapp die 80 %-Marke. Sinken lokale Temperaturen weiter ab auf 15 °C, z. B. durch

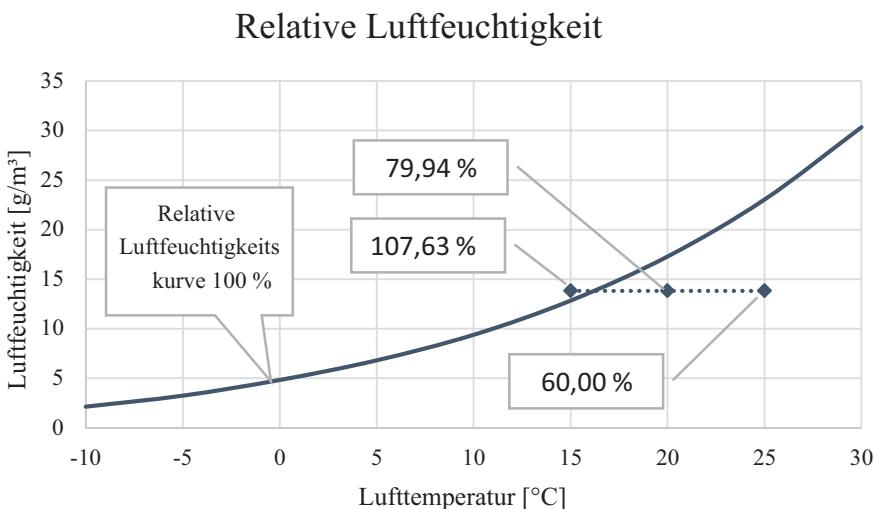


Abb. 11.8 Relative Luftfeuchte

Wärmebrücken, dann müsste die relative Luftfeuchtigkeit auf über 107 % ansteigen, damit es zu keiner direkten Kondensation/bzw. zu keinem Niederschlag führt. Da die physikalischen Gesetze nicht ausgehebelt werden können, kommt es zur Kondensation – in dem vorliegenden Beispiel wären es ca. 1 g pro Kubikmeter Raumluft.

Die Älteren von uns können sich noch an die vom Kondensat nassen Scheiben im Winter erinnern, auch hier war die niedrige Oberflächentemperatur schuld an dem Niederschlag der Feuchtigkeit. Diffusionsoffene Baustoffe nehmen die Feuchtigkeit auf und haben das Potenzial die Raumluft bedingt zu regeln, jedoch müssen sie auch immer wieder entfeuchtet werden. Wenn man eine genaue Betrachtung durchführt, dann haben sorptive Baustoffe immer eine gewisse Feuchtigkeit und das Verlangen mit der Umgebung ins Gleichgewicht zu kommen. So kommt es bereits bei einer relativen Luftfeuchte von größer als 60 % zur Absorption durch die diffusionsoffenen Bauteile. Sinkt die Raumluftfeuchte unter 50 %, dann beginnen die Bauteile die Feuchtigkeit wieder abzugeben. Diese Desorption ist sehr wichtig, um den mittleren Feuchtegehalt im Werkstoff niedrig zu halten.

11.3.1 Wandaufbau

Egal ob Sie sich für ein Wärmedämmverbundsystem oder eine Verkleinerung entscheiden, den Mindestwärmevergangswiderstand nach der

EnEV 2014 für die Außenwände mit $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sollten Sie nicht überschreiten.

Ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) besteht aus mehreren Schichten (Abb. 11.9). Als tragendes Element dient die Innenwand, die aufgrund der hohen Anforderung an die Luftdichte sowie der Ästhetik noch mit einer Putzschicht auf der Innenseite versehen wird. Die außenliegende Isolierung besteht in der Regel aus drei Schichten, die wie eine dicke, wetterfeste Jacke fungieren. Auf der inneren Schicht wird Klebemörtel aufgetragen, der für die kraftschlüssige Verbindung zwischen dem tragenden Mauerwerk und der Isolierung sorgt. Die Isolierung ist somit die nächste und thermisch wichtigste Schicht, sie erzeugt den Großteil des Wärmeübergangswiderstandes. Bei der Montage ist auf eine saubere Verlegung zu achten. Spätere Wärmebrücken können enorme Schäden verursachen. Die äußerste Schicht besteht aus einem Putz, wobei der Putz zweiteilig zu betrachten ist. Die innere Schicht besteht aus einer Armierungsschicht, auf der ein Oberputz aufgetragen wird. Die Armierungsschicht besteht aus einem grobmaschigen Netz, welches direkt auf die Isolierung aufgebracht wird. Das Netz verhindert Risse, indem es Zugspannungen aufnimmt, wenn der Untergrund

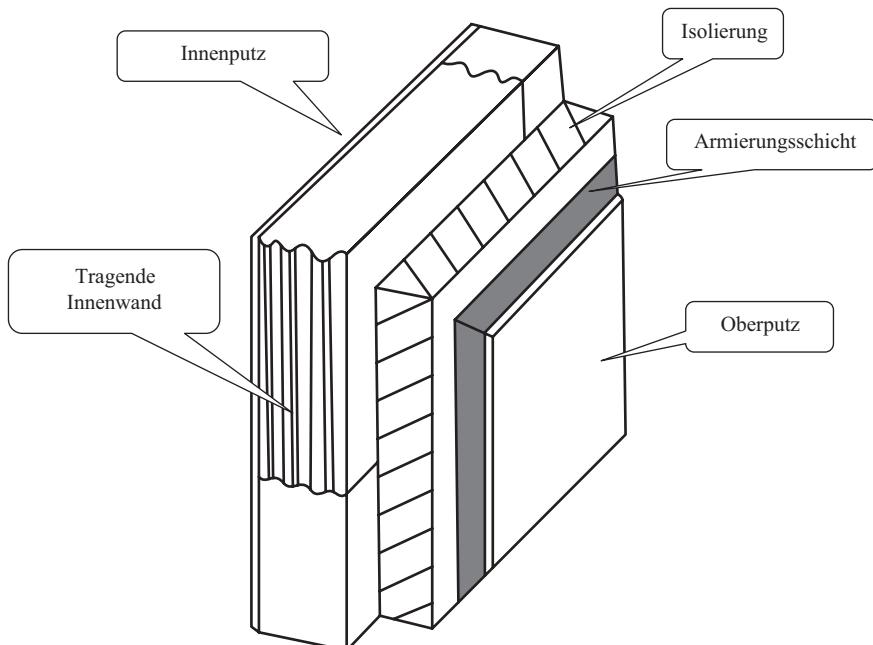


Abb. 11.9 Prinzipieller Aufbau Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

aufgrund von thermischen oder Alterungs-Prozessen arbeitet. Durch die kraftschlüssige Verbindung der einzelnen Schichten miteinander kann das WDVS auch als eine Einheit angesehen werden. Tragendes Element für das gesamte WDVS ist die Innenwand. Somit erklärt sich auch, dass die Dichte der eingesetzten Materialien von innen nach außen abnehmen sollte.

Bei einem zweischaligen Mauerwerk bleibt der tragende Innenteil bestehen, jedoch werden Anker als Verbindungselemente in die tragende Innenwand eingesetzt. Diese fixieren zum einen die Isolierung, zum anderen halten sie die zweite Schale, die Außenwand in Position. Im Gegensatz zum WDVS muss die äußere Schicht nicht direkt auf der Isolierung aufliegen und kann als separate Wand deklariert werden. Obwohl die Außenwand in der Regel nicht tragend ist, sie trägt sich in der Regel nur selbst, dürfte sie nach dem Eurocode 6 als tragende Hülle statisch berücksichtigt werden.

Ein Zwischenraum, der sogenannte Fingerspalt, sorgt für eine Hinterlüftung der außenliegenden, frostbeständigen Wand. Der Fingerspalt hat eine Schichtstärke von ca. 40 mm und trägt nach der DIN 4108 als Isolierkörper zum Wärmeschutz bei. Die außenliegende Wand, auch Vormauerschale genannt, besteht meistens aus Verblendern oder Klinkern. Obwohl die äußere Schicht wasserdicht sein sollte, sorgt die Hinterlüftung dafür, dass eintretendes Wasser bis zu einem gewissen Maße abtrocknen kann. Innen ablaufendes Wasser muss am Fußpunkt kontrolliert abgeführt werden. Wird auf die Hinterlüftung verzichtet, dann bezeichnet man den Aufbau als Kerndämmung. Ohne Fingerspalt muss auf eine hohe Wasserdichtheit der Vormauerverschalung geachtet werden.

In der Abb. 11.10 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt. Auf dem Verbindungsanker ist eine Art von Scheibe aus Kunststoff zur Isolierung hin zu erkennen. Diese hat nicht nur die Aufgabe die Isolierung in der gewünschten Position zu fixieren, sie soll auch eindringende Feuchtigkeit vor der Isolierung zum Abtropfen bringen und somit die Isolierung vor Feuchtigkeit schützen.

Als dritte Variante soll die klassische Holzfassade Erwähnung finden. Der Aufbau kann als tragende Profilfassade oder hinterlüftete Holzfassade mit unterschiedlichsten Aufbaumerkmalen erfolgen. Da es sich bei Holz um einen regenerativen Werkstoff handelt sind seine Emissionsbelastungen deutlich geringer als bei den vorherigen Außenwandvarianten. Bei der Holzauswahl sollte eine Holzart mit geringer Quell- und Schwindbewegung gewählt werden. Hier eignen sich vor allem Nadelholzer wie die Lärche, Tanne, Fichte und Douglasie. Die Holzfassade wird gewöhnlich in der Baustoffklasse B2 für normal entflammbarer Baustoffe kategorisiert.

Nachteilig wird der regelmäßige Pflegeaufwand empfunden. Das muss aber nicht zwingend erforderlich sein. Eine geschickte Auswahl an

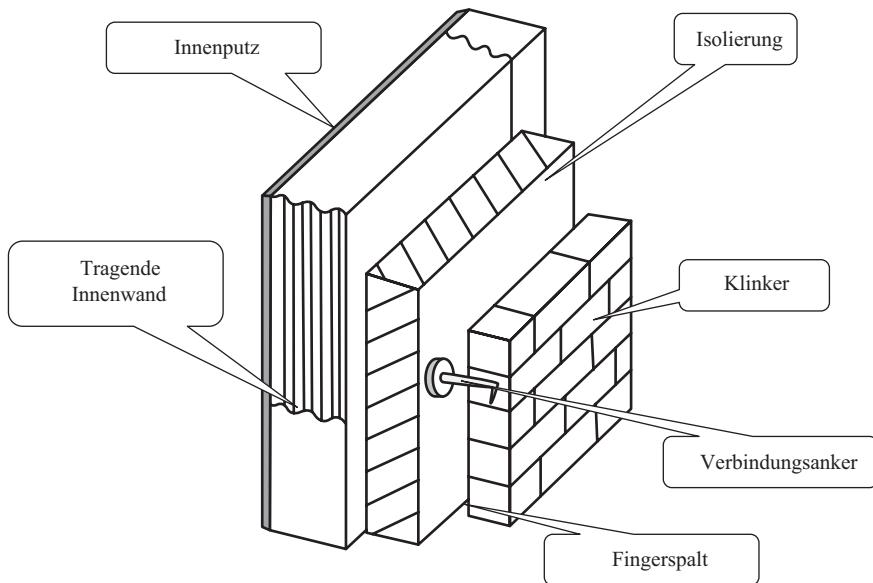


Abb. 11.10 Zweischaliges Mauerwerk mit Fingerspalt

eingesetzten Materialien kann den Pflegeaufwand drastisch reduzieren. Dennoch kann eine Holzfassade bei einer regelmäßigen Pflege viele Jahrzehnte treue Dienste leisten – je nach verwendetem Material.

11.3.2 Ökologische Bewertung Außenwandaufbau

In der Berechnung für die Außenwände wollen wir die drei Außenwandtypen aus dem vorherigen Abschnitt ökologisch bewerten. In dieser Analyse werden nur die außenliegenden Oberflächen berücksichtigt, auf die Isolierung und die Innenwände werden wir in den folgenden Abschnitten separat eingehen.

Eine ökonomische Bewertung erfolgt bei der Außenwand nicht. Gerade im Bereich der Verklinkerung können die individuellen, ästhetischen Wünsche für große Preisschwankungen sorgen. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass eine Verklinkerung höhere Kosten aufwirft als ein verputztes Haus. Die Kosten für eine Holzfassade sind ebenfalls stark abhängig von der Art der Ausführung und dem eingesetzten Holz (Material und Qualität). Sie liegt meistens zwischen den Kosten für eine WDVS und einer Verklinkerung.

Grundlage der ökologischen Bewertung bilden die spezifischen Referenzwerte der Onlinedatenbank Ökobaudat.de, die Wärmeleitwerte aus der DIN EN ISO 10456 und die Wärmedurchlasswiderstände aus der DIN EN ISO 6946 für ruhende Luftschichten.

In der Tab. 11.8 sind die durchschnittlichen spezifischen Umweltaufwendungen und die Dichten für Klinker, Dispersionsputz, Nadelholz und Normalmauermörtel aufgeführt. Die Aufwendungen für den Dispersionsputz stechen bei den Energieaufwendungen und dem globalen Erwärmungspotenzial deutlich heraus.

Anschließend wollen wir die jeweiligen Schichtstärken in die Tab. 11.9 einbinden, wodurch sich die Ergebnisse verschieben. Die Schichtstärke vom Dispersionsputz ist mit ca. 15 mm am geringsten. Die Verklinkerung und die Holzfassade haben in unserem Beispiel noch eine Luftschicht (Fingerspalt), welcher bei beiden mit 40 mm aufträgt. Die Wärmeübergangswiderstände wurden nach der Gleichung Gl. 6.6 berechnet.

Die geringe Wandstärke vom Dispersionsputz wirkt zwar positiv auf die flächenspezifischen ökologischen Aufwendungen, jedoch sinkt die Isolierungseigenschaft des Putzes deutlich ab (Abb. 11.11). Der Putz hat mit Abstand

Tab. 11.8 Spezifische Werte Außenwandmaterialien

Nr.	Bezeichnung	Dichte [kg/m ³]	Wärme- leitwert [W/ (mK)]	Total nicht erneuerbar Primärenergie (PENRT) [MJ/m ³]	Globales Erwärmungs- potenzial (GWP) [kg CO ₂ äq./m ³]
1	Klinker	2000	1	8224	542
2	Dispersionsputz (WDVS)	1575	1	32280	1921,5
3	Nadelholz	515,2	0,13	3505	-591,1
4	Normalmauermörtel	1500	1,2	1074	1315,5

Tab. 11.9 Flächenspezifische Werte Außenwandmaterialien

Nr.	Bezeichnung	Stärke [mm]	Masse [kg/m ²]	Wärme- übergangs- widerstand R [m ² K/W]	Total nicht erneuerbar Primärenergie (PENRT) [MJ/ m ³]	Globales Erwärmungs- potenzial (GWP) [kg CO ₂ äq./m ³]
1	Klinker	115	230	0,115	945,76	62,33
2	Dispersionsputz (WDVS)	15	23,625	0,015	484,2	28,8225
3	Nadelholz	20	10,304	0,154	70,1	-11,822
4	Normalmauer- mörtel	115	172,5	0,096	123,51	151,2825
5	Fingerspalt	40	1,2	0,18	0	0

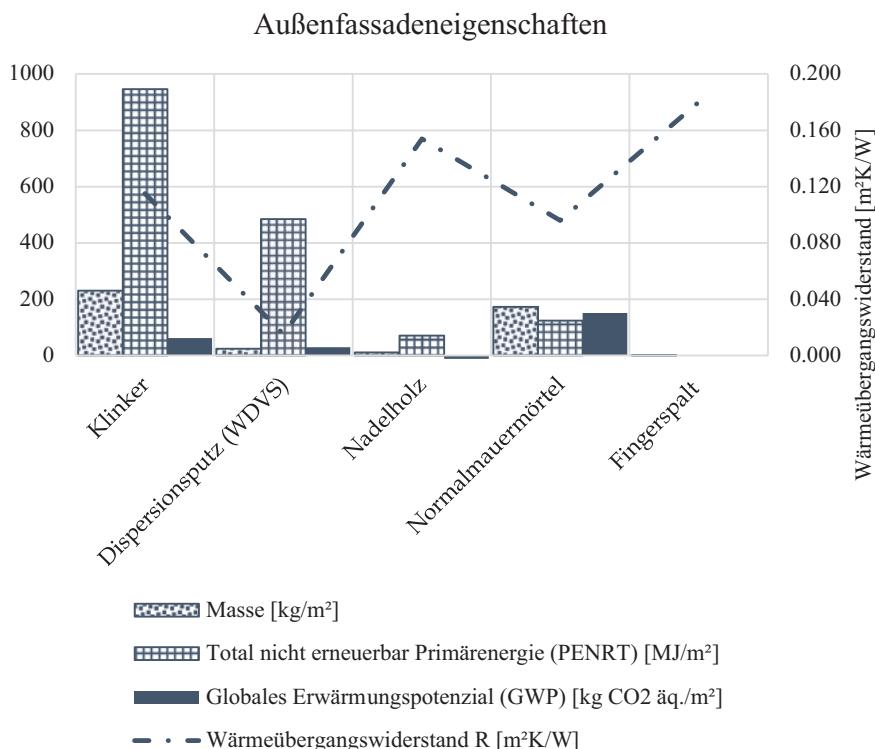


Abb. 11.11 Flächenspezifische Werte Außenwandmaterialien

den schlechtesten Wärmeübergangswiderstand. Fügen wir nun auch noch den Fingerspalt zur Verklinkerung und der Holzfassade hinzu, dann steigt sich die Differenz noch weiter.

Für eine aussagekräftigere Analyse wollen wir die Fertigungseigenschaften noch einbinden. Dafür nehmen wir an, dass der Fassadenklinker aus einem Flächenanteil von 90 % Klinker und zu 10 % aus Normalmauermortel besteht.

Die Außenwand aus Dispersionsputz bekommt noch einen Dispersionsanstrich und einen Unterputz, was mit 15 % ökologischen Mehraufwand bewertet wird. Weil die Wandstärke mit zusätzlichen Schichten ebenfalls ansteigt, werden die 15 % auch im Wärmeübergangswiderstand berücksichtigt.

Die Holzfassade erhält eine Unterkonstruktion, was 10 % Mehraufwand ausmacht. Ebenfalls werden bei der Holzfassade und beim Klinker der Fingerspalt im Wärmedurchgangswiderstand berücksichtigt.

Die Gesamtergebnisse für die Außenwände sind in der Tab. 11.10 aufgeführt. Die Holzfassade schneidet bei der ökologischen Bewertung am

Tab. 11.10 Spezifische Flächenwerte mit Randbedingungen Außenwand

Nr	Bezeichnung	Stärke [mm]	Masse [kg/m ²]	Wärme- übergangs- widerstand R [m ² K/W]	Total nicht erneuerbar Primärenergie (PENRT) [MJ/ m ²]	Globales Erwärmungs- potenzial (GWP) [kg CO ₂ äq./m ²]
1	Klinker/Normal- mauermörtel/ Luftspalt	155	224,250	0,293	863,54	71,23
2	Dispersions- putz/Dis- persionsfarbe/ Armierung	17,25	27,169	0,017	556,83	33,15
3	Nadelholz/ Konstruktions- holz/Luftspalt	60	11,334	0,349	77,11	-13,00

besten ab. Zwar wurden die Lebenszeiten der Außenfassaden und die Emissionen bei der Montage, bzw. beim Recycling nicht mitbewertet, jedoch erreicht die Holzfassade einen so deutlichen Vorsprung, dass mehrfache Erneuerungen ohne Weiteres möglich wären. Zusätzlich generiert die Holzfassade den höchsten Wärmeübergangswiderstand und würde somit bei einer identischen Isolierschicht weitere Einsparungen während der Betriebsphase generieren.

11.4 Innenwandmaterialien

Die Innenwand ist in den meisten Fällen für den statischen Lastabtrag auf das Fundament verantwortlich. Je nach Höhe des Gebäudes und den aufliegenden Lasten, ebenso nach den bautechnischen Anforderungen werden die Innenwände dimensioniert. Das Statistische Bundesamt veröffentlichte 2018 die Zahlen für die Häufigkeit der eingesetzten Baustoffe im Neubau. Die Auswertung des Bundesamtes unterscheidet nach Art der Bebauung. Wir wollen einen Blick auf die Statistik für Baugenehmigung von Wohngebäuden mit einer Wohneinheit in Deutschland werfen.

Während Stahl als statische Struktur keinen oder nur einen sehr geringen Anteil im Neubau von Wohngebäuden für Einfamilienhäuser hat, ist der Anteil bei Nichtwohngebäuden deutlich größer, z. B. für Hallen. Am häufigsten wurden Baugenehmigungen für Wohngebäude mit Ziegeln ausgestellt, noch vor den Porenbetonsteinen (siehe Abb. 11.12).

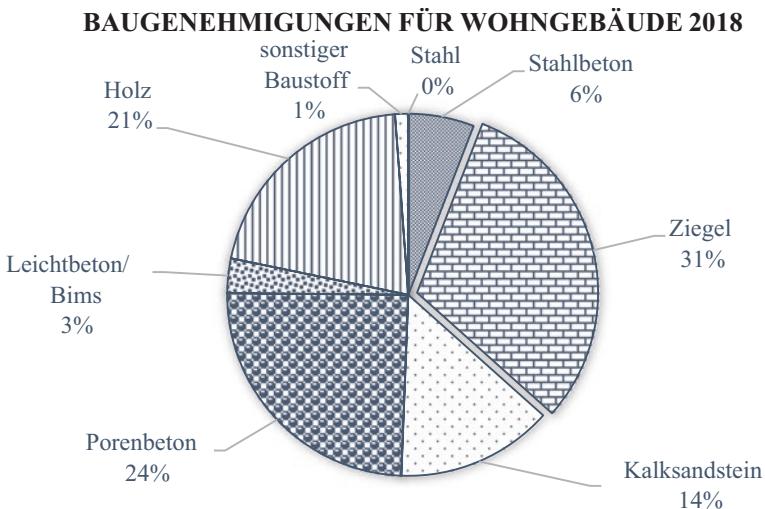


Abb. 11.12 Baugenehmigungen Wohngebäude 2018 mit einer Wohneinheit nach [28]

Moderne Ziegelsteine sind als Profilsteine mit isolierenden Luftkammern ausgestattet und kombinieren eine gute Druckfestigkeit mit einer relativ guten Isoliereigenschaft. Zusätzlich sind Varianten mit einer Füllung der Luftkammern durch Isoliermaterialien am Markt verfügbar.

Porenbetonsteine hingegen haben eingeschlossene Luftkammern, die nicht mit Isoliermaterialien ausgefüllt werden können. Jedoch sind durch das Einblasen von Luft in den Fertigungsprozess sehr viele kleine Bläschen eingebunden, woraus eine hohe Isoliereigenschaft resultiert. Porenbetonsteine haben eine geringere Dichte als Ziegel, was der Verarbeitung auf der Baustelle zu Gute kommt.

Kalksandsteine und Fertigstahlbetonplatten haben ein hohes Gewicht und eine sehr gute statische Eigenschaft, jedoch ist die isolierende Eigenschaft durch die hohe Dichte schlechter als bei einem leichteren Werkstoff.

Leichtbeton mit Bims ist eine Mischung aus Zement und dem sehr leichten Bimsstein. Dieses poröse Vulkangestein ist durchsetzt mit eingeschlossenen Luftbläschen, die sich im Trocknungsprozess zu Poren gebildet haben. Aufgrund des geringen spezifischen Gewichts schwimmt reiner Bimsstein auf Wasser. Während bei der herkömmlichen Variante die Zementeinbindung den dominierenden Anteil an den Umweltbelastungen verursacht, kann ein Leichtbetonstein aus 100 % Naturbims deutlich geringere ökologische Aufwendungen verursachen und somit einer bessere

Ökobilanz generieren. Der Begriff „100 % Naturbims“ bedeutet jedoch nicht, dass kein Zement zum Binden eingesetzt wird.

Leichtbeton wird in der Industrie auch als Wärmedämmbeton bezeichnet. Aufgrund der vielen Poren nehmen die Dichte und die Wärmeleitfähigkeit ab.

Im Gegensatz zu den mineralischen Werkstoffen kann ein ökologischer Innenwandaufbau aus Holz, z. B. als Ständerwerk, die ökologischen Belastungen deutlich reduzieren (Siehe Abb. 11.13).

Jedoch sollte bei allen Werkstoffen nicht nur auf die energetische Effizienz geachtet werden, sondern ebenfalls auf die Wechselwirkung zwischen den bautechnischen Eigenschaften und dem Bauort. Ein Baustoff mit einer hohen Dichte, also ein schwerer Baustoff, ist zwar schwerer zu verarbeiten und hat höhere Wärmeverluste, aber er bietet auch deutlich bessere Schallabsorptionswerte. Bauen Sie in der Nähe einer Lärmquelle und sind lärmempfindlich, dann sollten Sie die innere Hülle schwerer gestalten und mit einer stärkeren Isolierung planen.

Neben dem klassischen Innenwandaufbau erfreuen sich Fertighäuser einer großen Beliebtheit. Fertigbauteile können als industriell hergestellte Elemente die Investitionskosten senken. Ebenfalls nimmt die Bauzeit enorm ab, wodurch sich weitere Kosten einsparen lassen. Hier sind zwei

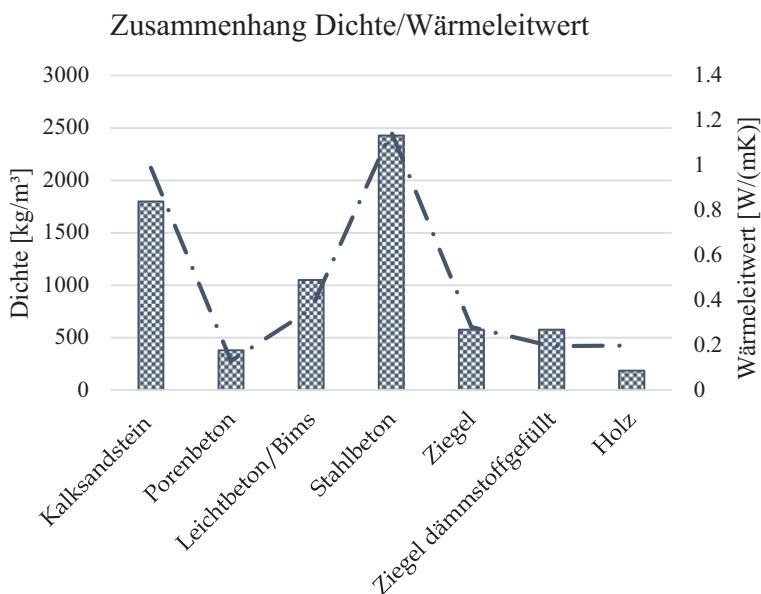


Abb. 11.13 Zusammenhang Dichte (Balken) und Wärmeleitwert (Strichlinie) Innenwandmaterialien

unterschiedliche Varianten am Markt verfügbar. Die Erste basiert auf Fertigplatten aus Stahlbeton. Diese weisen eine hohe Festigkeit auf, jedoch ist der ökologische Fußabdruck einer Stahlbetonwand deutlich schlechter als der der zweiten Variante. Hierbei handelt es sich um Leichtbauwände basierend auf einer Holzkonstruktion. Sie bieten eine interessante ökologische Alternative.

11.4.1 Ökonomische/Ökologische Bewertung Innenwände

Bei der Berechnung der Innenwände wollen wir das Verfahren der Technologieanalyse aus dem Abschn. 7.8 anwenden. Hierfür setzen wir den Wärmedurchgangskoeffizienten für die Außenwand auf den Referenzhauswert nach der EnEV 2014 mit $U_{\text{Wand}} = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ fest. Alle Wandaufbauten müssen diesen Wert anschließend erfüllen. Die folgenden Gleichungen stammen aus dem Abschn. 6.1.

$$U_{\text{Wand}} = \frac{1}{R_{\text{Wand}}}$$

$$R_{\text{Wand}} = \frac{1}{U_{\text{Wand}}} = \frac{1}{0,28 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}} = 3,401 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Betrachtet wird ein Wärmedämmverbundsystem. Hier fungiert die Isolierschicht als wärmedämmendes Ausgleichselement unterhalb des Außenputzes, um den gesamten Wärmedurchgangskoeffizienten nach der EnEV zu erreichen.

$$R_{\text{Iso}} = \frac{s_{\text{iso}}}{\lambda_{\text{iso}}}$$

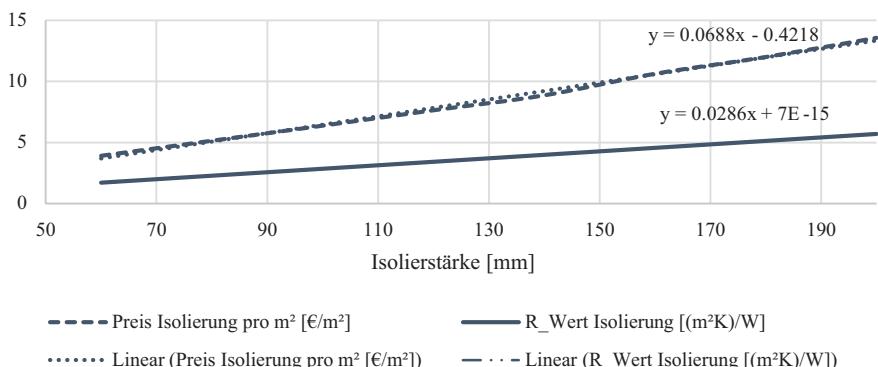
$$R_{\text{Wand}} = R_{\text{si}} + R_{\text{Innenputz}} + R_{\text{Innenwand}} + \frac{s_{\text{iso}}}{\lambda_{\text{iso}}} + R_{\text{Außenputz}}$$

Die Widerstandswerte der Luft auf den Innen- und Außenseiten, für einen horizontalen Wärmedurchgang, sind in der Tab. 11.11 aufgeführt, ebenso wie die restlichen Berechnungsgrundlagen.

Es erfolgt eine Rückwärtsrechnung von den Lambdawerten auf die notwendigen Wärmewiderstandswerte R der Wand. Schlussendlich resultiert die Isolierstärke s als Bedingung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach der EnEV.

Tab. 11.11 Grundlage Innenwandberechnung

Position	Bezeichnung	Wert	Einheit
1	Wärmedurchgangskoeffizient Außenwand U_{Wand}	0,28	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
2	Referenzfläche	1	m^2
3	Wärmeübergangswiderstand R_{si} Wärmestrom horizontal	0,13	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
4	Wärmeübergangswiderstand R_{se} Wärmestrom horizontal	0,04	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
5	Notwendiger Wert Wand R_{Wand}	3,401	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
6	Lambdawert Wand	0,035	$\text{W}/(\text{mK})$
7	Notwendige Isolierstärke für R_{Wand}	0,119	m
8	Putzmörtel aus Kalk	1	$\text{W}/(\text{mK})$
9	Stärke Putzmörtel	15	mm
10	R-Wert Putzmörtel	0,015	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
11	Außenputz als Wärmedämmputz nach der DIN 18550	0,08	$\text{W}/(\text{mK})$
12	Stärke Außenputz	20	mm
13	R-Wert Außenputz	0,25	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$

Spezifische Kosten und Wärmedurchgangswiderstand
Isolierung**Abb. 11.14** Isolierkosten und Wärmedurchgangswiderstand

Als Isoliermaterial wird Steinwolle mit einer mittleren Dichte und einem Wärmeleitwert λ von $0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ eingeplant. Obwohl die Isolierstärken dieses Massenproduktes in Stufen verfügbar sind, wollen wir individuelle Maße ansetzen. Die Kosten- und Wärmeübergangswerte für die individuellen Maße entstammen einer Internetrecherche und sind als Richtwerte anzusehen (Abb. 11.14).⁷

⁷Im Zeitalter der Informationstechnik sind zahlreiche Baustoffanbieter im Internet vertreten. Ein Preisvergleich kann auch hier helfen die Investitionskosten zu verringern.

Anschließend lösen wir die Gleichung nach der notwendigen Isolierstärke auf:

$$s_{\text{iso}} = \lambda_{\text{iso}} \cdot (R_{\text{Wand}} - R_{\text{si}} - R_{\text{se}} - R_{\text{Innenputz}} - R_{\text{Innenwand}} - R_{\text{Außenputz}}) \quad (11.5)$$

Die Innen- und Außenbeschichtungsstärken der Putze sind für alle Konfigurationen konstant. In Abhängigkeit der jeweiligen Innenwandeigenschaft wird die Isolierstärke dem Wärmeisolierbedarf angepasst. Daraus ergeben sich die Konstellationen in der Abb. 11.15. Zu beachten ist, dass die Isolierstärke beim Holz nur zu 50 % aufgetragen wurde. Bei der Holzkonstruktion handelt es sich um ein Strukturauteil, welches partiell unterschiedlich aufgebaut ist.

Anschließend werden die Gesamtaufwendungen ausgewertet und gegenübergestellt.

Nun wollen wir die Innenwandmaterialien aus Tab. 11.12 ökonomisch und ökologisch vergleichen. Die ökologischen Kennwerte stammen aus der Onlinedatenbank Ökobaudat.de. Berücksichtigt wurden die Aufwendungen in den Gruppen A1–A3 (Herstellung). Lediglich beim ökologischen Baustoffe Holz ist die Recyclinggutschrift aus der Gruppe D mit eingeflossen. Der ökologische Vorteil von nachwachsenden Rohstoffen soll hier nicht unbeachtet bleiben. Das Holz nimmt in seiner Wachstumsphase CO₂ auf und erreicht damit eine negative Bilanz über den Lebenszyklus. Ebenfalls wird bei der thermischen Verwertung am Ende der Lebenszeit von

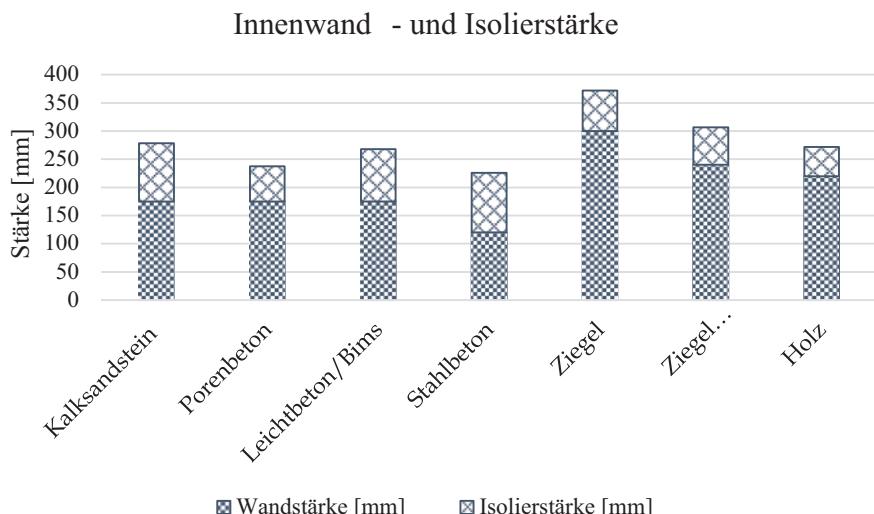


Abb. 11.15 Zusammensetzung Innenwand und Isolierung

Tab. 11.12 Kennwerte Innenwandmaterialien

Nr	Material	Rohdichte [kg/m ³]	Bewertungs- masse [kg]	Totaler nicht erneuerbare Primär- energie [MJ]	Globales Erwärmungs- potenzial [kg CO ₂ äq.]	Lambda [W/(mK)]
1	Kalksandstein	1800	1000	997	136	0,99
2	Porenbeton	380	380	1137	181,9	0,13
3	Leichtbeton/Bims	1050	1050	463	61,4	0,36
4	Stahlbeton	2427,5	291,3	199,5	39	1,15
5	Ziegel	575	575	261,4	138,3	0,28
6	Ziegel dämm- stoffgefüllt	575	575	287,1	177	0,195
7	Holz	154,23	40,87	-19,045	-56,4795	0,1984

nachwachsenden Rohstoffen der Einsatz von nicht erneuerbaren Energien vermieden, was wiederum zu einer Gutschrift führt.

Bezogen auf die Innenwandstärke ergeben sich folgende Werte:

Siehe Tab. 11.13

In der Abb. 11.16 werden nun alle Gesamtergebnisse aus der Analyse grafisch gegenübergestellt. Die aufgezeigten Ergebnisse bestehen aus den Aufwendungen für die Innenwand und der Isolierung, die notwendig ist, um den Referenzhausstandard zu erreichen.

GWP = Globales Erwärmungspotenzial

PENRT = Total nichterneuerbare Primärenergie

11.4.2 Technologienanalyse Innenwand

Abschließend wollen wir eine Gesamtbewertung über das Verfahren nach [3] aus dem Abschn. 7.8 durchführen. Einbezogen werden neben den ökologischen und ökonomischen Aufwendungen ebenfalls bautechnische Eigenschaften wie die spezifische Masse der Innenwand, welche einen direkten Einfluss auf die Verarbeitungsbelastungen hat. Ebenfalls werden die Schallabsorptionseigenschaften und die Gesamtwandstärke bewertet.

Die betrachteten Eigenschaften sind natürlich subjektiv und jeder Bauherr hat andere Prämisse. Daher muss eine Analyse individuell auf die jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden. In unserer Auswertung (Tab. 11.14) würde der Wandaufbau mit Leichtbeton/Bims in der Summe am ehesten an unsere Gesamtanforderungen aufschließen (Zeile 3). Eine grafische Auswertung über die Technologienanalyse befindet sich in der Abb. 11.17.

Tab. 11.13 Auswertung Innenwände

Nummer	Material	Wand- stärke [mm]	Spez. Masse [kg/ m ²]	Preis [€/m ²]	Total nichterneuerbare Primärenergie (PENRT) [MJ/m ²]	Globales Erwärmungs- potenzial (GWP) [kg CO ₂ äq/m ²]	Wärme- durchlass- widerstand Innenwand [m ² K/W]	R Wärme- durchlass- widerstand Innenwand [m ² K/W]	Isolier- stärke [m]	Isolierung [€/m ²]	Preis [€/m ²]	Gesamt- kosten [MJ/m ²]	PENRT Isolierung [MJ/m ²]	Globales Erwärmungs- potenzial Isolierung [kg CO ₂ äq/ m ²]	PENRT Globales Erwärmungs- potenzial gesamt [kg CO ₂ äq/m ²]
1	Kalksand-stein	175	315,0	39,68	314,1	42,84	0,18	2,96	0,10	6,71	46,39	117,8	431,8	12,6	55,5
2	Porenbeton	175	66,5	32,43	199,0	31,83	1,35	1,79	0,06	3,89	36,32	71,2	270,2	7,6	39,5
3	Leichtbeton/ Bims	175	183,8	21,68	81,0	10,75	0,49	2,65	0,09	5,96	27,64	105,5	186,5	11,3	22,0
4	Stahlbeton	120	291,3	23,40	199,5	39,00	0,10	3,03	0,11	6,88	30,28	120,7	320,2	12,9	51,9
5	Ziegel	300	172,5	58,40	78,4	41,49	1,07	2,07	0,07	4,55	62,95	82,2	160,6	8,8	50,3
6	Ziegel dämm- stoffgefüllt	240	138,0	62,08	68,9	42,48	1,23	1,91	0,07	4,17	66,25	75,8	144,7	8,1	50,6
7	Holz	220	40,9	31,32	-19,0	-56,48	0,18	2,96	0,10	6,71	38,03	117,8	98,7	12,6	-43,9

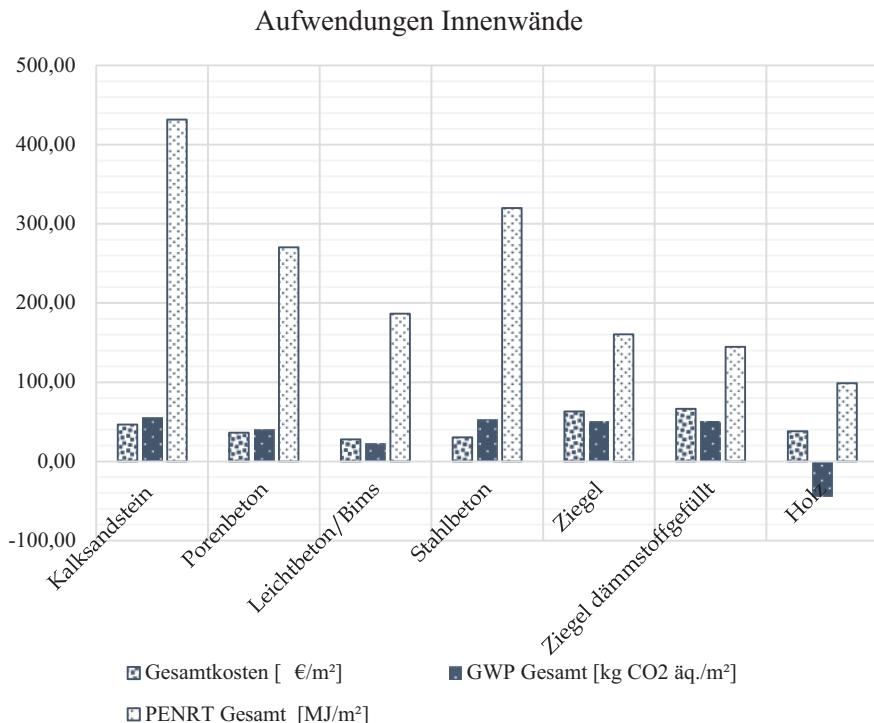


Abb. 11.16 Ökonomische und ökologische Aufwendungen

Tab. 11.14 Faktorisierte Eigenschaften Innenwand

Nr.	Innenbauwandtyp	KEA-Faktor	BwO-Faktor	CFO-Faktor	Massenfaktor	Schall-absorptions-Faktor	Gesamt-wandstärken-Faktor	Anlagen-faktor
1	Kalksandstein	4,37	1,68	-1,26	7,71	1,00	1,20	2,87
2	Porenbeton	2,74	1,31	-0,90	1,63	4,74	1,04	2,06
3	Leichtbeton/Bims	1,89	1,00	-0,50	4,50	1,71	1,16	1,79
4	Stahlbeton	3,24	1,10	-1,18	7,13	1,08	1,00	2,46
5	Ziegel	1,63	2,28	-1,15	4,22	1,83	1,56	2,11
6	Ziegel dämmstoffgefüllt	1,47	2,40	-1,15	3,38	2,28	1,31	2,00
7	Holz	1,00	1,38	1,00	1,00	7,71	1,17	2,21

Natürlich können auch noch weitere Betrachtungen wie z. B. die Wasserdampfdiffusion oder die Kapillarität hinzugefügt werden.

Technologieanalyse Innenwandmaterialien

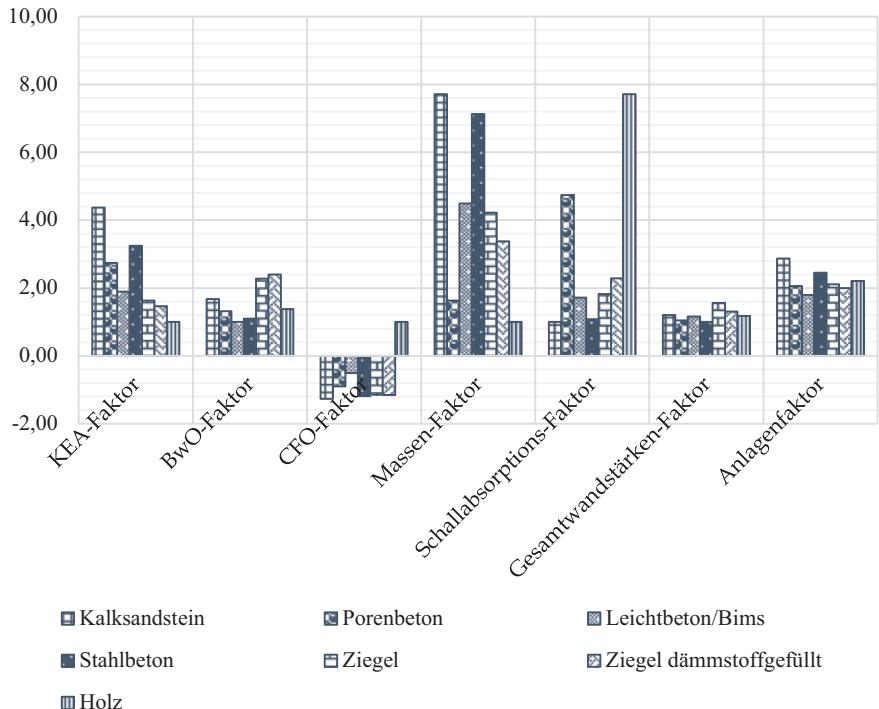


Abb. 11.17 Technologieanalyse Innenwandmaterialien

11.5 Die Isolierung

Kaum eine andere Komponente ist im effizienten Hochbau so präsent wie die Isolierung. Wie ein warmer Winterpullover sorgt sie für einen Widerstand gegen den Wärmeverlust von innen nach außen an kalten Tagen. Im Sommer erschwert sie den Wärmeeintrag von außen nach innen und trägt somit zum sommerlichen Wärmeschutz bei. Sie verhindert damit nicht nur unnötigen Primärenergieverbrauch für den Wärmeverlust, sondern sie sorgt auch für eine Vermeidung eines unnötigen Primärenergieeinsatzes für Kühlzwecke.

Eine Isolierung sollte immer ohne Unterbrechung um die gesamte äußere Fläche verlegt sein (siehe Abschn. 11.3).

Die am Markt erhältlichen Isolierungen werden in zwei Hauptgruppen unterschieden. Die erste Gruppe besteht aus den organischen

Dämmmaterialien, die auf Kohlenstoffverbindungen basieren. Anorganische Dämmmaterialien bestehen hingegen aus mineralischer Isolierung. Des Weiteren wird nach synthetischen und natürlich nachwachsenden Grundstoffen unterschieden.

An die Isolierung werden je nach Anwendungsfall unterschiedliche Anforderungen gestellt. So muss eine Isolierung im Wärmedämmverbundsystem durch die äußeren Verputzungsschichten Schubspannungen aufnehmen können. Eine Isolierung hinter einer Verklinkerung, oder zwischen den Dachsparen hingegen muss sich lediglich selbst in Form halten. Wird ein horizontaler Dachstuhl nachträglich isoliert, dann können lose Isolierungselemente z. B. als Schüttung eingesetzt werden. Isolierungen unterhalb des Fußbodens oder unter der Fundamentplatte müssen hohen Druckbelastbarkeiten standhalten, während eine Isolierung zwischen den Dachsparen eine bessere Verformbarkeit und Flexibilität haben sollte.

Aus den unterschiedlichen Anforderungen und den Materialeigenschaften resultieren auch die verfügbaren Ausführungsvarianten am Markt. So gibt es Isolierungen als Schäume, Schüttung, Platten, Matten oder lose Einblasprodukte.

Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Isoliermaterialien, von denen wir nur einen kleinen Teil betrachten werden. Eine ausführlichere Analyse ist z. B. beim VDI Zentrum Ressourceneffizienz erhältlich.⁸

Wir wollen in diesem Abschnitt neben den herkömmlichen Isolierstoffen einige nachhaltige Isolierungsmöglichkeiten einbinden. Diese sind teilweise seit Jahrtausenden bekannt.

Mit mehrschaligem Wandaufbau bestehend aus Lehm verputzten Flechtwänden, wurde bereits in der Bronzezeit die Wärmeleitung über die Wände reduziert. Der Isoliereffekt der „leichten Wände“ basierte auf den Einschluss von ruhenden Luftsichten. Anscheinend war schon sehr früh bekannt, dass eine ruhende Luftsicht die Wärmeleitung unterbricht. Den gleichen Effekt weißt auch ein mit Reet bedecktes Dach auf. Ein Reetdach hält nicht nur den Regen ab, es reduziert auch den Wärmeverlust aufgrund der vielen Luftpolster.

Die Isoliereigenschaft der monolithischen Bauweise, z. B. zu erleben in alten Burgen und Kirchen, profitiert von einer hohen Wandstärke. Die massiven, schweren Vollwände boten somit eine lange Strecke für die Wärmeleitung und einer großen speichernden Masse. Heutzutage werden die Wandstärken statisch optimierter eingesetzt. Trotzdem dient die

⁸VDI Zentrum Ressourceneffizienz unter www.ressource-deutschland.de.

monolithische Bauweise noch immer als Anregung für moderne Bauten. Moderne Steine werden mit großen Luftkammern oder mit ausgefüllten Isolierkammern auf eine höhere Wandstärke bei geringerer mittlerer Dichte gebracht.

Denkt man an die klassische Isoliermatte aus Mineralfaser, dann verbirgt sich dahinter meistens der Werkstoff Glas- oder Steinwolle. Mineralfasern werden in Matten- und Plattenform eingesetzt und zeichnen sich durch ihre gute Isoliereigenschaft und der Nichtbrennbarkeit aus. Sie sind ein Massenprodukt und somit relativ preiswert am Markt erhältlich. Der Einsatzort dieser Isolierstoffe ist innerhalb der vor Feuchtigkeit schützenden Gebäudehülle. Der diffusionsoffene Werkstoff muss vor dem direkten Kontakt mit Wasser geschützt werden. Die beiden Isolierformen sind aber auch in ökologischer Form verfügbar, etwas aus Rohstoffen wie Hanf, Flachs, Kork, Schafswolle, Baumwolle oder Holz. Für die Wärmeleitfähigkeit und die akustische Isolierung ist wieder die Dichte von Bedeutung.

Nahezu vollständig geschlossenzellige Schaumstoffe sind für den Kontakt mit Wasser geeignet und fäulnisresistent. Sie werden für den Kontakt mit dem Erdreich ausgewählt und in Fachkreisen Perimeterdämmung genannt. Fossile Isolierungen aus Kunststoff zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit bei geringem spezifischem Gewicht aus. Als bekanntester Vertreter ist wahrscheinlich jedem der Werkstoff Styropor geläufig. Als Fachbegriffe sind hier die Polystyrol-Hartschäume XPS und EPS zu nennen. Die unterschiedlichen Bezeichnungen resultieren aus dem jeweiligen Herstellungsverfahren.

Aus mineralischen Rohstoffen werden Platten aus Schaumglas sowie Mineraldämmplatten erzeugt. Durch eine Einblasung im Herstellungsprozess werden Bläschen mit einer eingeschlossenen ruhenden Luftsicht erzeugt die isolierend wirken. Schaumglasplatten können mit einem hohen Anteil an Recyclingglas erstellt werden, wodurch sich die Umweltbelastungen verringern lassen.

Schüttungen und Einblasdämmstoffe können als Granulat oder Fasern so gut wie aus jedem Grundmaterial hergestellt werden. Interessant sind hier vor allem die nachhaltigen, nachwachsenden Rohstoffe oder der Einsatz von Recyclingmaterialien.

11.5.1 Organische, natürliche Isoliermaterialien

Die nachwachsenden Rohstoffe werden getrocknet und als Faserdämmstoffe in Matten, Platten oder Filze gebracht. Die gute Isoliereigenschaft resultiert aus dem Lufteinchluss zwischen den Fasern.

Flachs

Flachs ist resistent gegen Schimmelpilzbefall und Fäulnis. Da es überwiegend aus Zellulose besteht, wird es nicht von Motten angegriffen. Für ein besseres brandhemmendes Verhalten werden dem Flachs Brandschutzmittel beigegeben. Eingesetzt werden die Kurzfasern der Flachspflanze. Diese werden entweder über ein Bindemittel miteinander verklebt oder über Polyesterfasern verbunden.

Eigenschaften Flachs

Rohdichte $\rho = 20 - 80 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,04 - 0,045 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 1 - 2$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B2 normal entflammbar*

Hanf

Die Hanfpflanze kann fast vollständig zu Isolierstoffen verarbeitet werden. Die Fasern werden getrocknet bzw. geröstet und zu Dämmmatte verarbeitet. Eine Behandlung der Fasern mit Brandschutzmitteln ist für eine akzeptable Feuerwiderstandskraft notwendig. Für die Bindung der Dämmmatte werden die Hanffasern mit Kunststofffasern gemischt und anschließend stark erhitzt. Die Kunststofffasern verkleben und binden somit die Hanffasern mit ein. Die Kernrohre werden als Schäben, das sind relativ gleichmäßig gebrochene Teile der Kernrohre, zu Schüttmaterialien oder zu Platten verarbeitet.

Eigenschaften Hanf

Rohdichte $\rho = 24 - 90 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,04 - 0,048 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 1 - 2$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B2 normal entflammbar*

Stroh

Stroh wird schon seit Jahrtausenden als Isoliermaterial eingesetzt. Das Stroh muss einen gewissen Trocknungsgrad aufweisen, ehe es in gepresster Form als Isoliermaterial zum Einsatz kommt. Es muss durch bautechnische Maßnahmen vor Feuer, Feuchte und Schädlingen geschützt werden.

Eigenschaften Stroh

Rohdichte $\rho = 85 - 115 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = \text{ca. } 0,048 \text{ W/(mK)}$
Wasserdampfdiffusionswiderstand -
Baustoffklasse – keine Angabe

Schafwolle

Die einzelnen Fasern der Schafwolle werden zu einem dünnen Vlies verarbeitet. Mehrere übereinanderliegende Vliesteile bilden die gewünschte Isolierstärke. Die jeweiligen Schichten können entweder verklebt oder über Kunststoffe miteinander verklebt werden. Die Schafwolle ist resistent gegen Schimmelpilze, jedoch muss das Dämmmaterial mit einem Mottenschutz bearbeitet werden. Die Schafwolle ist diffusionsoffen und kann regulierend auf die Raumluftfeuchtigkeit wirken.

Eigenschaften Schafwolle

Rohdichte $\rho = 18 - 30 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,035 - 0,045 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 1 - 2$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B2 normal entflammbar*

Baumwolle

Die auf Zellulose basierende Baumwolle kommt in Flies- oder Mattenform zum Einsatz. Die Baumwolle wirkt feuchtigkeitsregulierend auf das Raumklima und hat aufgrund der hohen ruhenden, eingeschlossenen Luft eine sehr gute Isolierwirkung. Zum Schutz vor Schädlingen und Feuer wird die Wolle mit Borsalz imprägniert.

Mit dem Einsatz von Recyclingrohstoffen in Isolierschüttungen steigt die ökologische Wertigkeit weiter an.

Eigenschaften Baumwolle

Rohdichte $\rho = 20 - 60 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,04 - 0,05 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 1 - 2$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B2 normal entflammbar*

Kork

Die Rinde der Korkeiche liefert den Grundstoff für die Isolierung aus Kork. Dabei wird die Eiche abgeerntet indem die Rinde vom Stamm abgeschält wird. Die Korkeiche liefert im Laufe ihres Lebens ca. 100 bis 200 kg Kork.

Nach dem Ernten erfolgt eine lange Trocknungsphase, die in der Regel sechs Monate beträgt, bevor eine Weiterverarbeitung zu Granulat und evtl. zu Platten stattfindet.

Eigenschaften Kork

Rohdichte $\rho = 100 - 120 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,036 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 5 - 10$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B2 normal entflammbar*

Holz

Holz kann in Form von Holzfasern, Holzwolle, Holzweichfaserplatten oder in Holzspanform zur Isolierung eingesetzt werden. Eine Aufbereitung mit Brandschutzmitteln empfiehlt sich, ebenso wie eine Präventionsmaßnahme vor Pilzbefall, je nach Einsatzart und Form des Holzes.

Eigenschaften Holzfaserdämmplatten

Rohdichte $\rho = 120 - 450 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,04 - 0,07 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 5 - 10$

Brandschutzklasse nach DIN 4102: *B2 normal entflammbar*

Eigenschaften lose Holzfasern

Rohdichte $\rho = 23 - 60 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,04 - 0,045 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 5 - 10$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B2 normal entflammbar*

Technische Daten Holzspäne

Rohdichte $\rho = 90 - 100 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,045 - 0,055 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 2 - 5$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B2 normal entflammbar*

Eigenschaften Holzwolleplatten (gebunden über mineralische Bindemittel)

Rohdichte $\rho = 360 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,093 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 2 - 5$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B1 schwer entflammbar*

11.5.2 Organische, synthetische Isolierstoffe

Kohlenwasserstoffverbindungen werden durch das Verfahren der Polymerisation zu Polystyrol. Polystyrol ist ein amorpher oder teilkristalliner Thermoplast, er ist einer der weltweit am meisten eingesetzten Kunststoffe. Die Entsorgung nach der Betriebsphase stellt sich bei den langlebigen Kunststoffen immer noch als problematisch heraus.

Expandiertes Polystyrol (EPS)

Der Grundstoff Polystyrol, in Form von Granulat, wird unter Wasserdampf aufgeschäumt. Die Schaumstoffperlen werden anschließend zu Platten gepresst. Es entsteht ein leichter, dennoch stabiler Isolierkörper, der leicht zu verarbeiten ist. Die Resistenz gegen Feuchte und Schädlinge ist sehr groß. Bekannt ist expandiertes Polystyrol als Verpackungsmaterial unter dem Markennamen Styropor.

Eigenschaften EPS

Rohdichte $\rho = 15 - 30 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,02 - 0,04 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 20 - 100$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B1 schwer entflammbar*

Extrudiertes Polystyrol (XPS)

Der Grundstoff Polystyrol, in Form von Granulat, wird mit Hilfe von Treibmitteln aufgeschäumt. Als Treibmittel wird häufig Kohlendioxid eingesetzt. Die entstehenden Platten oder Blöcke weisen eine hohe Festigkeit und eine sehr gute Resistenz gegen Feuchtigkeit und Schädlinge auf. Daher wird dieses Material gerne bei der Sockeldämmung eingesetzt.

Eigenschaften XPS

Rohdichte $\rho = 25 - 45 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,035 - 0,04 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 80 - 200$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B1 schwer entflammbar*

Polyurethan (PUR)

Durch die chemische Polyadditionsreaktion von Polyisocyanaten mit Polyolen entsteht Polyurethan. Der auf Erdöl basierende Kunststoff kann je nach Beimischung und Kettenlänge unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Es sind sowohl hohe Festigkeiten aber auch gute Verformungseigenschaften möglich.

Das Einsatzgebiet von Polyurethan reicht von Matratzen, über Schuhsohlen, bis zum Kondom. Im Bausektor kommen vor allem Hartschaumplatten sowie der bekannte Bauschaum zum Einsatz. PUR ist chemisch sehr beständig gegenüber vieler beim Bau auftretender Stoffe.

Eigenschaften PUR

Rohdichte $\rho = 30 - 300 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,024 - 0,029 \text{ W/(mK)}$

Wasser dampfdiffusionswiderstand $\mu = 40 - 250$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *B1 schwer entflammbar; B1 normal entflammbar*

11.5.3 Anorganische, natürliche Isolierstoffe

Zu den anorganischen, natürlichen Rohstoffen gehören Mineralien, Quarz und Ton. Das Ausgangsmaterial wird aufgebläht zu Blähton, Blähperlit oder Naturbims.

Blähton

Blähton besteht aus aufgeblähtem und gebranntem Ton. In reiner Form handelt es sich um ein Granulat, welches somit nur für eine Isolierschüttung infrage kommt. Durch die Vermischung mit Zement und Kalk entstehen tragfähige Leichtbetonteile. Diese haben eine gute wärmeisolierende Eigenschaft, bei einer guten Festigkeit. Somit ist der Isolierstoff auch gleichzeitig für statische Lasten einzusetzen.

Eigenschaften Blähton

Rohdichte $\rho = 500 - 1600 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,1 - 0,18 \text{ W/(mK)}$

Wasser dampfdiffusionswiderstand $\mu = 2 - 8$

Baustoffklasse nach DIN 4102: *A1 nicht brennbar*

Blähperlit

Hinter dem Begriff Perlit versteckt sich vulkanisches Gestein, welches fein gemahlen wird. Anschließend erfolgt ein schockartiges Erhitzen und Expandieren, wodurch aufgeblähte Perlitkörner entstehen. Diese eignen sich für Schüttungen oder Einblasungen in Hohlräume.

Eigenschaften Blähperlit

Rohdichte $\rho = 70 - 100 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,045 - 0,065 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 3$

Baustoffklasse nach DIN 4102: A1 *nicht brennbar*

11.5.4 Anorganische, synthetische Isoliermaterialien

Steinwolle und Glaswolle

Gemeinsam unter der Bezeichnung Mineralwolle fallen die Stein- und Glaswolle. Mineralwolle hat einen sehr großen Marktanteil bei den eingesetzten Isolierstoffen. Sie kann in unkomprimierten Zustand als flexible Matte oder hochverdichtet in Plattenform als fester Isolierkörper hergestellt werden. Mineralwolle ist resistent gegen Schimmel, Fäulnis und Schädlinge.

Steinwolle wird aus den Gesteinsarten Basalt, Diabas oder Dolomit hergestellt. Glaswolle weist einen hohen Anteil an Altglas auf und bringt somit einen gewissen Recyclingeffekt mit sich. Weitere Bestandteile sind Sand, Soda und Kalksandstein.

Die Rohstoffe werden bei hohen Temperaturen aufgeschmolzen. Anschließend werden künstlich mineralische Fasern hergestellt. Dafür eignen sich drei Herstellungsverfahren, das Ziehverfahren, das Blasverfahren und das Schleuderverfahren.

Während ältere Mineralwolle im Verdacht der Krebsverregung durch feinstes Faserstäube steht, gelten Mineralwollen seit 1998 aufgrund weniger lungengängiger Fasern als unbedenklich.

Eigenschaften Stein- und Glaswolle

Rohdichte $\rho = 8 - 500 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,035 - 0,05 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 1 - 2$

Baustoffklasse nach DIN 4102: A1 *nichtbrennbar*; A2 *nichtbrennbar*

Kalziumsilikat

Platten aus Kalziumsilikat kommen aufgrund ihrer hohen Kapillarität im Innenbereich als Dämmmaterialien zum Einsatz. Sie wirken feuchtigkeitsregulierend und schimmelhemmend aufgrund ihres hohen pH-Wertes. Hauptbestandteile sind Kalk, Quarzsand und Porenbilder. Aufgrund ihrer

Eigenschaften werden Platten aus Kalziumsilikat häufig in der Sanierung bei Feuchteschäden eingesetzt.

Eigenschaften Kalziumsilikat-Platten

Rohdichte $\rho = 200 - 800 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,05 - 0,07 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 5 - 20$

Baustoffklasse nach DIN 4102: A1 *nichtbrennbar*

Mineraldämmplatten

Mineraldämmplatten bestehen aus Kalk, Sand, Zement und Wasser. Porenbilder sorgen für einen hohen Lufteinschluss, woraus ein geringeres Gewicht und eine gute isolierende Eigenschaft entsteht.

Eigenschaften Mineraldämmplatten

Rohdichte $\rho = 90 - 130 \text{ kg/m}^3$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,045 \text{ W/(mK)}$

Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu = 3 - 5$

Baustoffklasse nach DIN 4102: A1 *nichtbrennbar*

11.5.5 Ökonomische/Ökologische Bewertung Isoliermaterialien

In einer Analyse der unterschiedlichen Isoliermaterialien wollen wir einige der gängigen Dämmstoffe gegenüberstellen und über das Verfahren der Technologieanalyse bewerten. Damit eine gute Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Materialien möglich ist, werden wir die physikalische Effizienz der Isolierstoffe mit einem einheitlichen Wärmedurchgangskoeffizienten festsetzen. Als Referenzwert dient der Wärmedurchgangskoeffizient der EnEV für die Außenwände mit $U_{\text{Wand}} = 0,28 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Betrachtet werden neben der Isolierung ebenfalls die Wärmeübergangswiderstände der Luft. Die Widerstände der übrigen Wandkomponenten bleiben unberücksichtigt. Ausgangspunkt für die Berechnung ist eine spezifische Wandfläche von einem Quadratmeter. Alle eingebundenen Werte befinden sich in der Tab. 11.15.

In den ökonomischen und ökologischen Bewertungen werden nur die Aufwendungen außerhalb der Betriebsphase bewertet. Dies ist möglich

Tab. 11.15 Berechnungsgrundlagen Isoliermaterialien

Position	Bezeichnung	Wert	Einheit
1	Wärmedurchgangskoeffizient Außenwand	0,28	W/(m ² K)
2	Referenzfläche	1	m ²
3	Wärmeübergangswiderstand R _{si} Wärmestrom horizontal	0,13	m ² K/W
4	Wärmeübergangswiderstand R _{se} Wärmestrom horizontal	0,04	m ² K/W
5	Notwendiger Wärmedurchlasswiderstand Wand R _{Wand}	3,401	m ² K/W

durch die identische Effizienz der Isolierstoffe und der einhergehenden ökonomischen und ökologischen Äquivalenz während der Betriebsphase.

Die Isolierstärke der betrachteten Materialien werden über den Lambdawert auf den festgelegten Wärmeübergangswiderstand angepasst (siehe auch Abschn. 6.1).

$$R_{\text{Iso}} = \frac{s_{\text{iso}}}{\lambda_{\text{iso}}}$$

s = Materialstärke [m]

λ = Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]

R = Wärmeübergangswiderstand [(m²K)/W]

Die resultierenden Isolierschichtstärken sind in der Abb. 11.18 aufgeführt. Die spezifischen Kosten und die Wärmeleitwerte wurden als Mittelwerte aus erzeugt. Die ökologischen Aufwendungen in der Herstellung A1–A3 entstammen der Onlinedatenbank Ökobaudat.de. Das Recyclingpotenzial und die Vermeidung des Einsatzes fossiler Energien, bei einer thermischen Verwertung, basiert auf den Analysen von [29]. Bei Materialien für die keine Recyclinggutschrift für eine thermische Verwertung ermittelt werden konnte, wurde der entsprechende Wert auf null gesetzt.

In der ökonomischen Analyse profitieren die Mineralfaserisolierungen von ihrem hohen Marktanteil und den damit einhergehenden Massenproduktionen (Tab. 11.16). Die spezifischen Investitionskosten für Glaswolle zur Isolierung betragen knapp fünf Prozent der Kosten einer Kalziumsilikatplatte. Die sehr gute feuchtigkeitsregulierende Eigenschaft von Kalziumsilikat bleibt in dieser Bewertung hingegen unberücksichtigt.

Die ökologischen Eigenschaften sind in der Tab. 11.17 aufgeführt. Die negativen Werte in der äquivalenten Kohlendioxidbilanz resultieren aus der Bindung von Kohlendioxid während der Wachstumsphase bei nachwachsenden Rohstoffen. In der Recyclingphase ist die Vermeidung von fossilen Energiewandlungen positiv in die Bilanzierung eingeflossen.

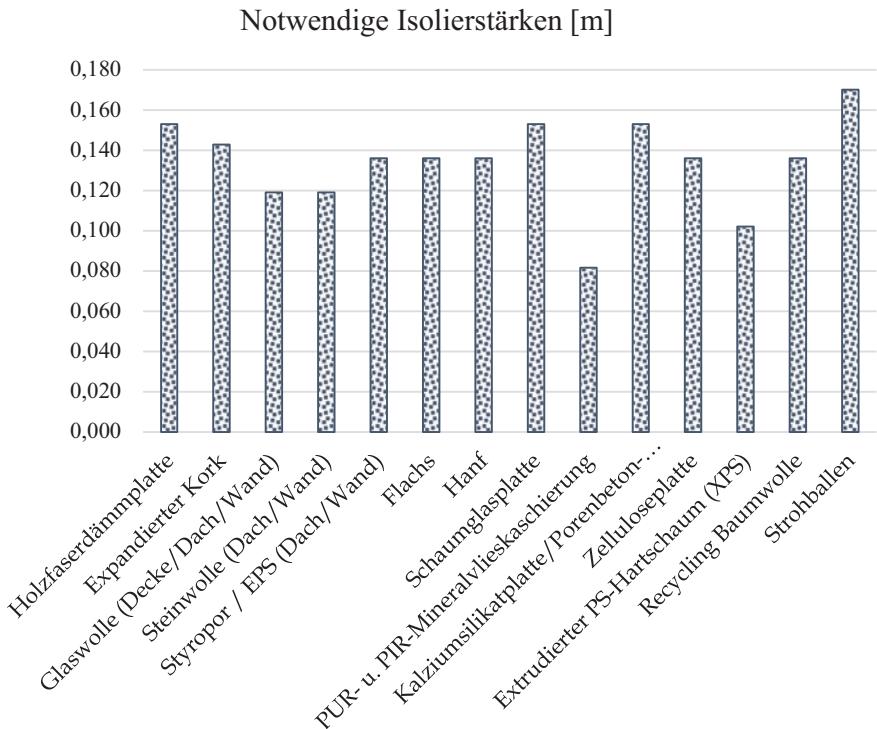


Abb. 11.18 Notwendige Isolierstärke [m]

Das Ergebnis der Technologieanalyse basiert auf den Gleichungen aus dem Abschn. 7.8. Die Verteilung der Einflussfaktoren fand ohne eine Gewichtung statt.

Die grafische Auswertung der Faktorenverläufe ist in der Abb. 11.19 dargestellt, dabei ist die logarithmische Darstellungsart zu beachten. In der ökonomischen und ökologischen Kombination schneidet die jahrtausendalte Isolierungstechnik mit Stroh am besten ab. Sie ist in puncto Kosten und Ökologie eine sinnvolle Alternative zu den herkömmlichen Isolierungsmaterialien. Daher verwundert es auch nicht, dass sich im ökologischen Hausbau Stroh als Isolator ansteigender Beliebtheit erfreut.⁹

⁹Vgl. [30].

Tab. 11.16 Ökonomische Bewertung Isoliermaterialien

Dämmmaterialien	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Dichte [kg/m ³]	Spezifische Kosten [€/m ³]	Notwendige Isolationsstärke um den PhO-Faktor zu erreichen [m]	Islationskosten [€/m ²]	Faktor BwO
Holzfaserdämmplatte	0,045	360	404,00 €	0,153	61,84 €	9,91
Expandierter Kork	0,042	80	595,00 €	0,143	85,00 €	13,63
Glaswolle (Decke/Dach/ Wand)	0,035	46,25	52,40 €	0,119	6,24 €	1,00
Steinwolle (Dach/Wand)	0,035	96	107,14 €	0,119	12,76 €	2,04
Styropor/EPS (Dach/Wand)	0,04	18	89,29 €	0,136	12,15 €	1,95
Flachs	0,04	38	101,55 €	0,136	13,82 €	2,21
Hanf	0,04	38	115,63 €	0,136	15,73 €	2,52
Schaumglasplatte	0,045	130	611,00 €	0,153	93,52 €	14,99
PUR- u. PIR- Mineralvlieskaschierung	0,024	250	298,30 €	0,082	24,35 €	3,90
Kalziumsilikatplatte/ Porenbeton-Granulat	0,045	400	846,46 €	0,153	129,56 €	20,77
Zelluloseplatte	0,04	80	93,75 €	0,136	12,76 €	2,04
Extrudierter PS- Hartschaum (XPS)	0,03	32	181,70 €	0,102	18,54 €	2,97
Recycling Baumwolle	0,04	45	141,50 €	0,136	19,25 €	3,09
Strohballen	0,05	100	40,00 €	0,170	6,80 €	1,09
Minimum	0,02	18,00	40,00	0,08	6,24	1,00
Maximum	0,05	400,00	846,46	0,17	129,56	20,77
Mittelwert	0,04	122,38	262,69	0,13	36,59	5,87

11.5.6 Analyse der optimalen Isolierungsstärke

Nachdem die optimale Isolierung nach den individuellen Ansprüchen des Bauherrn gefunden wurde, stellt sich die Frage nach der Isolierschichtdicke. Unabhängig von der Haustechnik sollte in einem ersten Schritt die Isolierung definiert werden. Für die Berechnung wollen wir das Verfahren der Wechselwirkungsanalyse nach [3] ansetzen. Vorteilhaft wirkt sich dabei aus, dass wir die Berechnung auf eine spezifische Fläche beschränken können, was unsere Berechnungen enorm vereinfacht.

Die Bewertung nach dem Physikalischen Optimum nach der VDI 4336 können wir ebenfalls getrost vernachlässigen. Bei einer spezifischen Fläche von einem Meter unter Vernachlässigung der Randeffekte, wäre eine optimale Isolierung nach dem Physikalischen Optimum bei einer Isolierstärke von unendlich ($s_{PhO} = \infty m$) erreicht. Nicht nur, dass das technisch schwierig wird (wenn wir es kleinlich sehen, dann ist es sogar unmöglich), auch ökonomisch und ökologisch macht es keinen Sinn. Daher wollen wir uns auf die ökonomischen und ökologischen Optima beziehen.

Tab. 11.17 Ökologische Eigenschaften Isoliermaterialien

Dämmmaterialien	Totaler nicht nach- haltiger Energie- bedarf (A1-A3) [MJ/m ³]	Spezifische CO ₂ -äq.- Emissionen Herstellung (A1-A3) [CO ₂ äq. kg/ m ³]	Nicht nach- haltiger Energie- bedarf (A1-A3) [MJ/m ³]	CO ₂ -äq.- Emissionen Herstellung/Ent- sorgung [CO ₂ äq. kg/m ²]	Nicht nach- haltige Energie- rückgewinnung durch thermische Ver- wertung (RePo) [MJ/m ²]	Faktor RePo	Faktor KEA	Faktor CFO	Faktor Techno- logieana- lyse F _{TAL}
Holzfaserdämmplatte	2075,00	-30,17	317,61	-4,62	-489,61	1,00	33,42	0,21	11,53
Expandierter Kork	479,30	-99,79	68,47	-14,26	-85,72	0,18	7,20	0,65	6,00
Glaswolle	809,60	69,96	96,38	8,33	0,00	0,00	10,14	-0,38	3,88
(Decke/Dach/Wand)									
Steinwolle (Dach/Wand)	1137,00	119,96	135,36	14,28	0,00	0,00	14,24	-0,66	5,24
Styropor/EPS (Dach/Wand)	1530,00	52,20	208,17	7,10	-65,82	0,13	21,90	0,33	7,01
Flachs	1506,00	16,67	204,90	2,27	-43,37	0,09	21,56	-0,10	6,95
Hanf	1499,00	19,90	203,95	2,71	-43,37	0,09	21,46	-0,12	7,00
Schaumglasplatte	2800,72	179,80	428,69	27,52	0,00	0,00	45,11	-1,26	16,3
PUR- u. PIR- Mineralvlieskaschierung	1823,00	785,30	148,82	64,11	-38,92	0,08	15,66	-2,94	6,61
Kalziumsilikatplatte/ Porenbeton-Granulat	7035,00	0,66	1076,8	0,10	0,00	0,00	113,3	0,00	34,5
Zelluloseplatte	1925,00	148,48	261,91	20,20	-90,82	0,19	27,56	-0,93	8,59
Extrudierter PS-Hart- schaum (XPS)	2835,00	92,61	289,29	9,45	-97,96	0,20	30,44	-0,43	9,41
Recycling Baumwolle	531,00	-35,11	72,25	-4,78	0,00	0,00	7,60	0,22	3,62
Strohballen	55,88	-128,20	9,50	-21,80	-289,00	0,59	1,00	1,00	1,13
Minimum	55,88	-128,20	9,50	-21,80	-489,61	0,00	1,00	-2,94	1,13
Maximum	7035,00	785,30	1076,8	64,11	0,00	1,00	113,31	1,00	34,52
Mittelwert	1860,11	85,16	251,58	7,90	-88,90	0,18	26,47	-0,36	9,13

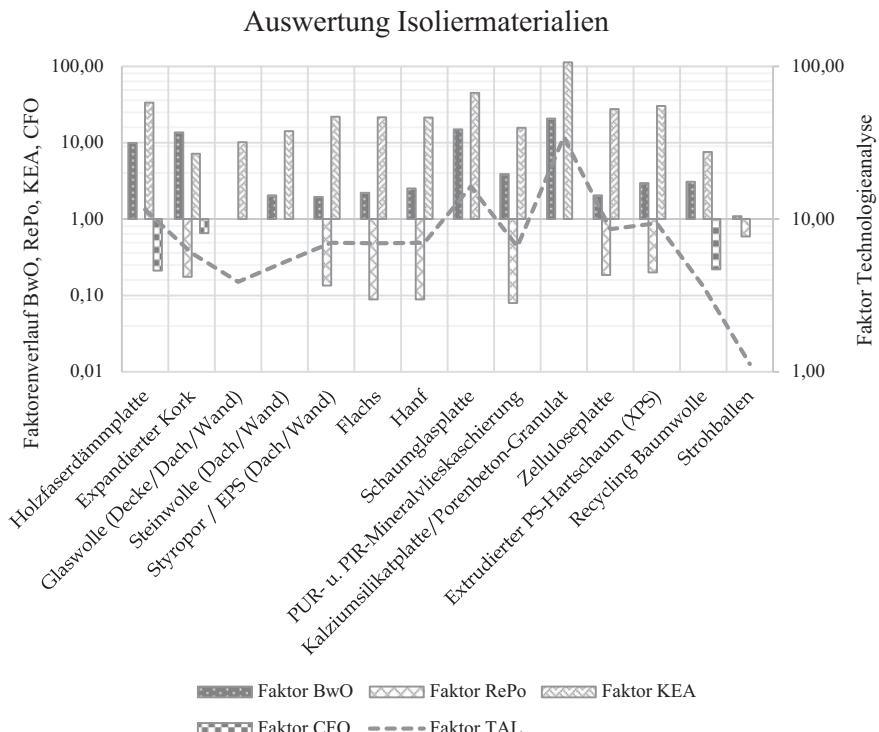


Abb. 11.19 Auswertung Isoliermaterialien

BwO = Betriebswirtschaftliches Optimum

CFO = Carbon-Footprint-Optimum

RePo = Nicht nachhaltige Energierückgewinnung durch thermische Verwertung

KEA = Kumulierter Energieeinsatz

TAL = Technologieanalyse

Als Isolierung wollen wir die Glaswolle aufgrund ihres hohen Marktanteils ansetzen. Die betriebswirtschaftlichen, statischen Aufwendungen bestehen vereinfacht aus den Investitionskosten und den Betriebskosten:

$$K_{\text{ges}}(s) = k_i \cdot s + q_{\text{Verb}} \cdot k_{\text{gas}} \quad (11.6)$$

K_{ges} = Gesamtkosten [€]

k_i = Spezifische Investitionskosten [€/m³]

Spezifische Kosten/ Wärmeübergangswiderstand
Isolierung

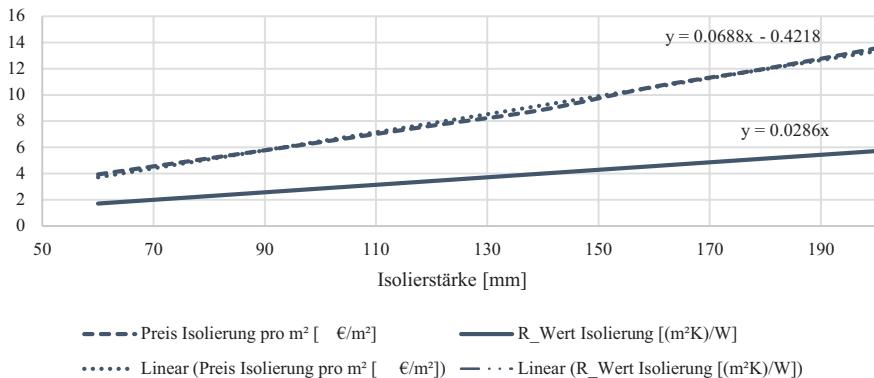


Abb. 11.20 Spezifische Kosten und Isolierwerte in Abhängigkeit der Isolierstärke von Glaswolle (Die Werte entstammen gemittelten Recherchewerten. Die mathematische Funktionsbeschreibung wurde linear für eine Ausgleichsgrade erstellt)

s = Materialstärke [m]

q_{Verb} = Wärmebedarf Lebenszyklus [kWh]

k_{gas} = spezifische Gaskosten [€/kWh]

Die Investitionskosten können wir über die lineare Kostengleichung aus der Abb. 11.20 über die Isolierstärke berechnen. Der Wärmeverlust präsentiert sich ebenfalls in Abhängigkeit zu der Isolierstärke.

Ermittelte Kostenfunktion für Glaswolle in Abhängigkeit der Isolierstärke s:

$$K_i = 0,0688 \text{ €/m}^3 \cdot s - 0,4218 \text{ €/m}^2 \quad (11.7)$$

K_i = Investitionskosten [€/m²]

Ermittelte Isoliereigenschaft in Abhängigkeit der Isolierstärke s:

$$R_{\text{Iso}} = 0,0268 \text{ mK/W} \times s \quad (11.8)$$

Die Temperaturdifferenz und die Heizgradtage entnehmen wir der Tab. 11.4 als Summe der monatlichen Werte über ein Jahr.

$$K_{\text{ges}}(s) = k_i \cdot s + \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot k_{\text{gas}} \quad (11.9)$$

h = Betriebsstunden [h/a]

a = Betriebsjahre

Tab. 11.18 Berechnungsgrundlagen Isolierstärke

Bezeichnung	Index	Wert	Einheit
Lambdawert Isolierung	λ	0,035	W/(mK)
Spezifische Investitionskosten Isolierung	k_i	68,39	€/m³
Summe Heizgradtage und Temperaturdifferenz	$\Delta T \cdot h$	89582,41	hK/a
Bewertungszeitraum	a	20	a
Totale nicht erneuerbare Primärenergie A1-A3 Isolierung	kea_i	1137	MJ/m³
Globales Erwärmungspotenzial Isolierung [kg CO₂ äq.]	cf_i	121,8	kg CO₂ äq./m³
Primärenergiefaktor Gas	kea_{gas}	1,1	
CO₂ äq. Emissionen Gas	cf_{gas}	0,259	kg CO₂ äq./kWh
Spezifische Gaskosten	k_{gas}	0,08	€/kWh

Betrachten wollen wir das Verhältnis über einen Zeitraum von zwanzig Jahren. Als Primärenergiequelle dient wieder eine konventionelle Erdgasheizungsanlage.

Die ökologische Betrachtung besteht wieder aus dem Carbon Footprint und dem kumulierten Energieaufwand an totaler nicht nachhaltiger Primärenergie während der Herstellung A1-A3 und der Betriebsphase C.

$$CFO_{ges}(s) = cf_i \cdot s + \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot cf_{gas} \quad (11.10)$$

$$KEA_{ges}(s) = kea_i \cdot s + \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot kea_{gas} \quad (11.11)$$

In der Tab. 11.18 sind die eingesetzten Berechnungswerte festgehalten:

Lassen wir nun die Isolierungsstärke von null bis zu einem gesetzten Grenzwert, spezifisch für einen Quadratmeter Fläche, laufen und alle anderen Werte bleiben stabil (Sensitivitätsanalyse), dann bekommen wir einen Eindruck vom Verhalten der ökonomischen und ökologischen Einflussgrößen.

Die Werte in der Tab. 11.18 wurden direkt faktorisiert auf das jeweilige Optimum bezogen. Es ist zu erkennen, dass das ökonomische Optimum (ausgedrückt über das BwO), bereits bei einer Isolierungsstärke von ca. 240 bis 280 mm erreicht wird. Anschließend können die Investitionskosten nicht mehr in der betrachteten Zeitperiode ausgeglichen werden.

Die optimale Isolierungsstärke nach dem globalen Erwärmungspotenzial liegt bereits bei ca. 380 mm und nach dem kumulierten Energieaufwand bei über 400 mm.

BwO-, CFO-, KEA-Faktor Isolierstärke

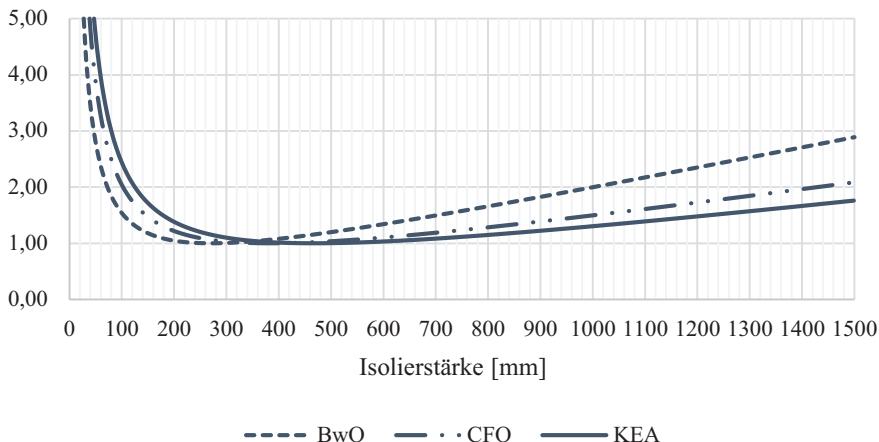


Abb. 11.21 Faktorisierte ökonomische und ökologische Werte über die Isolierstärke

BwO = Betriebswirtschaftliches Optimum

CFO = Carbon-Footprint-Optimum

KEA = Kumulierter Energieeinsatz

Wie wir an der Abb. 11.21 sehen können, ist eine Grafik eher schwer auszulesen, sie müsste in den jeweiligen Bereichen der Optima verfeinert werden. Eine tabellarische Auswertung ist bereits aussagekräftiger, erfordert aber auch nicht viel weniger Aufwand als die grafische Darstellung.

Als Lösung können wir hier die Kurvendiskussion nach [3] ansetzen. Das wird sich jetzt für die meisten Leser wenig erfreulich anhören, aber so schlimm ist es nicht. Wie äußerte sich bereits der geniale Albert Einstein:

„Mach‘ dir keine Sorgen mit der Mathematik. Ich kann dir versichern, dass meine noch größer sind“ Albert Einstein.

Das sollte doch ein wenig beruhigen.

Fangen wir mit der leichtesten Ableitung an, die gleichzeitig die einzige ist, die wir hier benötigen.

$$f(x) = x^n \quad (11.12)$$

Wenn wir die Funktion der Variable x ableiten, dann müssen wir auf der linken Seite der Gleichung lediglich vermerken, dass die Funktion abgeleitet wurde und das passiert durch einen Strich als Index.

$$f(x) \rightarrow f'(x)$$

Nun müssen wir noch die Funktion ableiten und die steht auf der rechten Seite der Gleichung. Dafür reduzieren wir den Potenzwert der abzuleitenden Variable um eine Potenz und schreiben den ursprünglichen Potenzwert als Multiplikationsfaktor vor die Variable.

$$x^n \rightarrow n \cdot x^{n-1}$$

Sollte der Potenzwert vor der Ableitung bereits bei eins liegen, dann verschwindet die Variable einfach. Hat ein Term keine betroffene Variable, nach der abgeleitet wird, dann verschwindet der gesamte Term und die Gleichung vereinfacht sich.

Nun können wir auch schon unsere Gleichungen nach der Isolierstärke s ableiten. Fangen wir mit der ökonomischen Berechnung an:

$$K_{\text{ges}}(s) = k_i \cdot s + \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot k_{\text{gas}}$$

Die Ableitung sieht folgendermaßen aus:

$$K'_{\text{ges}}(s) = k_i - \frac{\lambda}{s^2} \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot k_{\text{gas}}$$

Die erste Variable wird zu einer Eins und kann somit bei der Multiplikation weggelassen werden. Die zweite Variable befindet sich im Bruch und könnte auch so dargestellt und abgeleitet werden:

$$\frac{1}{s} = s^{-1} \rightarrow -1 \cdot s^{-2} = -\frac{1}{s^2}$$

Anschließend setzen wir die Gleichung zu null und lösen sie nach der gesuchten Variable s (die Isolierungsstärke in m) auf.

$$K'_{\text{ges}}(s) = 0 = k_i - \frac{\lambda}{s^2} \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot k_{\text{gas}}$$

$$0 = k_i - \frac{\lambda}{s^2} \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot k_{\text{gas}}$$

Nach ein wenig mathematischer Umformung erhalten wir die gesuchte Gleichung (Gl. 11.13) für die optimale Isolierstärke nach dem betriebswirtschaftlichen Optimum:

$$s_{\text{BwO}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot k_{\text{gas}}}{k_i}} \quad (11.13)$$

$$s_{\text{BwO}} = \sqrt{\frac{0,035 \text{ W} \cdot \frac{89582,41 \text{ Kh}}{a} \cdot 20a \cdot \frac{0,08 \text{ €}}{\text{kWh}} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{1000 \text{ Wh}}}{68,39 \text{ €/m}^3}}$$

$$s = 0,2708 \text{ m} \approx 270 \text{ mm}$$

Hinweis

Wenn man sich bei der Herleitung der Funktion unsicher ist, dann kann eine Einheitenanalyse schnell die Gewissheit geben, ob man sich auf dem richtigen Weg befindet.

$$m = \sqrt{\frac{\frac{W}{mk} \cdot \frac{Kh}{a} \cdot \epsilon \cdot \frac{kWh}{kWh} \cdot \frac{kWh}{Wh}}{\epsilon/m^3}} = \sqrt{\frac{m^3}{m}} = \sqrt{m^2} = m$$

Die optimale Isolierung nach der Ökonomie liegt unter den getroffenen Randbedingungen bei ca. 270 mm. Dies ist nun auch die Dimensionierung mit den geringsten lokalen ökonomischen Aufwendungen – das betriebswirtschaftliche Optimum.

Die ökologischen Optima lassen sich nun sehr einfach bestimmen. Wie wir bereits bei der Aufstellung der Gleichung bemerkt haben, sind die ökologischen Gleichungen identisch mit der ökonomischen aufgebaut. Somit sind die gelösten Gleichungen auch identisch aufgebaut.

Die optimale Isolierstärke nach dem Carbon Footprint berechnet sich aus der Gleichung:

$$s_{\text{CFO}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot cf_{\text{gas}}}{cf_i}} \quad (11.14)$$

$$s_{\text{CFO}} = 0,365 \text{ m} \approx 370 \text{ mm}$$

Für den kumulierten Energieaufwand:

$$s_{\text{KEA}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta T \cdot h \cdot a \cdot \text{kea}_{\text{gas}}}{\text{kea}_i}} \quad (11.15)$$

$$s_{\text{KEA}} = 0,467 \text{ m} \approx 470 \text{ mm}$$

Die Wechselwirkungsanalyse zwischen der betriebswirtschaftlichen Effizienz und der physikalischen Effizienz entfällt aufgrund der Äquivalenz der physikalischen Effizienz aller Konfigurationen zueinander. Somit reicht eine Mittelwertbildung zwischen den einzelnen Einflussparametern. Wollen wir also die Isolierung im Kompromisspunkt festlegen, ergibt sich:

$$s_{\text{AF}} = \frac{s_{\text{BwO}} + s_{\text{CfO}} + s_{\text{KEA}}}{n} \quad (11.16)$$

$$s_{\text{AF}} = \frac{0,2708 \text{ m} + 0,365 \text{ m} + 0,467 \text{ m}}{3}$$

$$s_{\text{AF}} = 0,368 \text{ m} \approx 370 \text{ mm}$$

In dieser Konstellation wäre ein ökonomisch und ökologisch nachhaltiges System mit einer Isolierstärke von ca. 370 mm auszustatten. Natürlich können die unterschiedlichen Faktoren auch nach subjektiven Interessen bewertet werden. Trotzdem bleibt festzuhalten, dass eine höhere Isolierungsstärke als der heutige Standard zu empfehlen sein kann.

11.6 Fazit Gebäudehülle

In dem Kapitel Gebäudehülle haben wir uns ausgiebig mit der Ausrichtung, der Form und den Materialeigenschaften der beteiligten Komponenten beschäftigt. Während eine kompakte Bauweise die wärmeübertragende Außenfläche reduziert, sorgt eine gute Isolierung für weniger Transmissionsverluste von innen nach außen. Gegenläufig verhindert eine gute Isolierung ein Überhitzen des Gebäudes in den Sommermonaten. Nach den von uns festgelegten Parametern konnten höhere Dämmwerte, als es die EnEV als Mindestanforderungen aufgibt, bei den Fenstern, Türen, Wänden, Böden und Decken sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile erzeugen.

Die Ausnutzung solarer Strahlungsenergie zur Gebäudewärmung, gerade in den Übergangsjahreszeiten, bietet ein zusätzliches Potenzial für ein energieeffizientes Gebäude.

Weitere ökologische Verbesserungspotenziale entstehen, wenn mehr nachwachsende Rohstoffe im Bereich der Gebäudekomponenten eingesetzt werden. Gebäudeaußenfassaden aus Holz und Isolierungen aus Stroh sind schon seit Jahrtausenden im Einsatz und haben auch weiterhin ihre Berechtigung. Sie weisen gegenüber der schwereren mineralischen Bauweise deutlich geringere Umweltbelastungen bei der Herstellung auf und haben am Ende ihres Lebenszyklus ein deutlich besseres Recyclingpotenzial. Werden die nachhaltigen Rohstoffe fachgerecht eingesetzt, verbaut und regelmäßig gepflegt, dann stellen nachwachsende Rohstoffe eine sinnvolle Alternative zu den Einsatzmaterialien aus dem konventionellen Hochbau dar.



12

Das Belüftungssystem

Für eine hohe Energieeffizienz von Wohngebäuden sind nicht nur hohe Dämmwerte und effiziente Heizungssysteme verantwortlich, sondern auch effizientere Wohnraumlüftungen. Ziel einer Wohnraumbelüftung ist es, die Randbedingungen für ein hohes Maß an Behaglichkeit der Bewohner sicherzustellen. Dafür müssen Schadstoffe und Feuchtigkeit aus der Gebäudehülle kontrolliert abgeführt werden. Ältere Gebäude weisen häufig eine undichte Gebäudehülle auf, wodurch ein ständiger, teils ungewollter Austausch mit der Umgebung stattfindet (Ex- und Infiltration).

Eine der Grundlagen eines energieeffizienten Gebäudes ist die Luftdichtheit der Gebäudehülle. Vor 2016 mussten lediglich Gebäude mit mechanischen Lüftungsanlagen Luftpichtigkeitstest durchführen, den sogenannten Blower-Door-Test. Obwohl manche Hersteller mit dieser „Extraleistung“ werben, sind seit dem 01.01.2016 alle KfW-Effizienzhäuser verpflichtet einen Blower-Door-Test durchzuführen und die Dichtheit ist durch einen externen Sachkundigen zu bestätigen. Beim Test werden alle Öffnungen im Gebäude verschlossen und das Gebäude wird auf einen Überdruck von 50 mbar aufgeblasen.¹ Der Volumenstrom zur Aufrechterhaltung der Druckdifferenz wird gemessen und bilanziert. Dieser darf bei Gebäuden ohne raumlufttechnische Anlagen $n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$ und bei Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ nicht überschreiten.

Ein Blower-Door-Test dient jedoch nicht nur dem Nachweis für die KfW-Förderung, sondern er hilft auch dem Bauherrn Sicherheit über

¹Vgl. [31].

Tab. 12.1 Spezifische Luftwechselrate nach der DIN V 4701

Spezifische Luftwechselrate	n	Einheit
Ohne Dichtheitsprüfung	0,7	1/h
Mit Dichtheitsprüfung – Fensterlüftung	0,6	1/h
Mit Dichtheitsprüfung – Zu-/Abluftanlage	0,6	1/h
Mit Dichtheitsprüfung zu Abluftanlage	0,55	1/h
Mit Dichtheitsprüfung – Abluftanlage bedarfsgeführt	0,5	1/h

eine gut abgeschlossene Hülle zu erhalten. Denn eine geschlossene Hülle wirkt sich positiv auf den jährlichen Primärenergiebedarf aus.

Der spezifische Lüftungswärmeverlust berechnet sich aus der Gleichung (Gl. 6.23) aus dem Abschn. 6.3.4.

$$H_{V,M} = n \cdot V \cdot \rho_L \cdot c_{p,L}$$

$$H_{V,M} = n \cdot V \cdot 0,34 \text{ Wh} / \left(\text{m}^3 \text{K} \right)$$

H_V = Temperaturabhängige Luftwärmeverluste [W/K]

n = Luftwechselrate [1/h]

V = Netto Luftvolumen der beheizten Räume [m^3]

ρ_L = Dichte Luft [kg/m^3]

$c_{p,L}$ = Isobarer Wärmekapazitätswert Luft [J/kgK]

Die angesetzten Luftwechselraten können vereinfacht der Tab. 12.1 entnommen werden.

Als die Abdichtungen der Gebäudehüllen immer höhere Qualitäten angenommen haben, kam es vermehrt zu den Aussagen, dass eine abgeschlossene Gebäudehülle zu unzureichender Luftqualität bis hin zu Schimmel führen kann. Ein Zusammenhang zwischen einer geschlossenen Gebäudehülle und Luftqualitätsproblemen lässt sich nur über eine mangelnde Belüftung herstellen. Haben sich die Bewohner an eine „undichte“ Gebäudehülle gewöhnt, dann müssen sie ihr Verhalten an eine „dichtere“ Hülle anpassen. Eine ausreichende Stoßlüftung in gut abgedichteten Hüllen ist unerlässlich.

12.1 Freie Lüftung

Als freie Lüftung wird die ganz normale Lüftung über die Fenster bezeichnet. Es ist die einfachste Lüftungsvariante, erfordert aber passende Rahmenbedingungen. Zum Ersten muss der Bewohner die Pflichtaufgabe

der regelmäßigen, ausreichenden, täglichen Lüftung annehmen. Eine Stoßlüftung mit komplett geöffneten Fenstern sorgt für eine hohe Luftwechselrate ohne die temperaturträgen, wärmespeichernden Elemente im Raum allzu stark abzukühlen. Lüften Sie über ein angekipptes Fenster über Stunden, dann kühlen die Wände merklich um die in der Luftströmung liegenden Flächen aus. Wenn Sie bei der Stoßlüftung die physikalischen Gesetze ausnutzen, z. B. das warme Luft aufsteigt und eine höhere Feuchtigkeit aufnimmt oder Druckunterschiede durch Windlasten auf die Gebäudehülle für einen erzwungenen Luftstrom sorgen, dann können Sie in kurzer Zeit hohe Luftwechselraten erreichen und zeitnah die Gebäudehülle wieder schließen.

Allerdings müssen die lokalen Randbedingungen eine komplette Fensteröffnung auch zulassen, so sind z. B. der Einbruchschutz, die Qualität der Außenluft und mögliche Schallemissionen zu berücksichtigen. Ebenfalls besteht die Gefahr der Über- oder Unterlüftung der Wohnräume. Es gibt hier keine absolut gültige Formel, da der notwendige Luftwechsel von sehr vielen Faktoren abhängt und die DIN V 4701 ebenfalls nur eine Näherung darstellt.

Setzen wir eine geforderte Luftwechselrate $n = 0,5$ pro Stunde an, dann bedeutet das, dass jede Stunde die Hälfte des Luftvolumens im betrachteten Raum ausgetauscht werden sollte. Somit müssten Sie alle zwei Stunden das komplette Raumluftvolumen austauschen, um den Anforderungen gerecht zu werden. Durch den traditionellen Wertewandel sowie der Emanzipation sind solche Anforderungen für ein arbeitendes Paar nicht mehr zu erfüllen. Wenn Sie es schaffen am Tag drei bis vier Mal für einige Minuten Stoßzulüften, dann sollten Sie eigentlich auf einem sehr guten Weg sein. Ebenfalls empfiehlt es sich, in der Lüftungsphase die Thermostatventile der Wandkonvektoren abzudrehen. Zahlreiche Studien belegen, dass eine bedachte Stoßlüftung den Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes stark reduzieren kann.

Einfluss auf die Energieeffizienzberechnung nach der EnEV hat eine bedachte Fensterlüftung nicht direkt, da das Verhalten der Bewohner individuell ist und nicht vorhergesagt werden kann.

Nach der DIN V 4701 lässt sich die spezifische Luftwechselrate pro Stunde allein durch eine besser abgedichtete Gebäudehülle von 0,7 auf 0,6 reduzieren. Nehmen wir wieder unser Referenzhaus mit der Wohnfläche von 150 m² an, dann können wir die Differenz des spezifischen Lüftungswärmeverlustes bestimmen.

Die Berechnung des eingeschlossenen Luftvolumens darf nach der DIN V 4108-6 vereinfacht erfolgen über den Faktor 0,76 für Gebäude mit bis

zu drei Vollgeschossen und mit 0,8 für Gebäude mit mehr als drei Vollgeschossen.

$$V = 0,76 \cdot V_e$$

$$V = 0,76 \cdot 495,92 \text{ m}^3$$

$$V = 376,9 \text{ m}^3$$

Anschließend kann der spezifische Lüftungswärmeverlust aus der Gleichung (Gl. 6.23) berechnet werden:

$$H_V = (n_{\text{ohne } D.} - n_{\text{mit } D.}) \cdot V \cdot 0,34 \text{ Wh/(m}^3\text{K)}$$

$$H_V = (0,7 - 0,6) \frac{1}{h} \cdot 376,9 \text{ m}^3 \cdot 0,34 \text{ Wh/(m}^3\text{K)}$$

$$H_V = 12,815 \text{ W/K}$$

Der berechnete spezifische Lüftungswärmeverlust ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der Innenraumtemperatur (siehe Abschn. 6.3.5).

Die monatlichen Ergebnisse der Lüftungswärmeverluste sind in der Tab. 12.2 aufgeführt.

Die Summe der monatlichen Lüftungswärmeverluste ergibt den jährlichen Lüftungswärmeverlust.

$$\Delta Q_V = \sum Q_{V,M}$$

$$\Delta Q_V = 1061,36 \text{ kWh/a}$$

Setzen wir wieder einen spezifischen Gaspreis von 0,08 €/kWh an, dann können wir die jährlichen Einsparungen durch eine höhere Gebäudehüllenzahl, bestätigt über einen Nachweis in Form vom Blower-Door-Test, berechnen.

$$\Delta K_{V_{\text{Gas}}} = 84,91 \text{ €/a}$$

Somit sind durch eine verbesserte Dichtheit der Gebäudehülle rechnerisch knapp 85 EUR im Jahr einzusparen. Stellen wir die Kosten für den

Tab. 12.2 Monatlichen Wärmeverluste freie Lüftung

Bezeichnung	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Außenlufttemperatur [°C]	1	1,9	4,7	9,2	14,1	16,7	19	18,6	14,3	9,5	4,1	0,9
Tage pro Monat [d/mth]	31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	31
Monatliche Lüftungs- wärmeverluste $n = 0,7 \text{ [kWh/mth]}$	1201	1031	954	633	327	149	0	27	304	634	962	1208
Monatliche Lüftungs- wärmeverluste $n = 0,6 \text{ [kWh/mth]}$	1030	884	818	543	280	127	0	23	260	543	825	1035
Monatliche Lüftungs- wärmeverluste $n = 0,1 \text{ [kWh/mth]}$	172	147	136	90	47	21	0	4	43	91	137	173

Blower-Door-Test und den Mehraufwand für die Herstellung einer geschlossenen Hülle den Einsparungen gegenüber, dann lässt sich eine Vorteilhaftigkeit leicht berechnen.²

Setzen wir beispielhalber die Mehrkosten (MK-BDT) mit großzügigen 1000 € an, dann wird eine Vorteilhaftigkeit bereits nach 11,78 Jahren erreicht. Sollten die Mehrkosten sich verringern, dann gelangen Sie früher zum Break-Even-Point.

$$n = \frac{MK_{BDT}}{\Delta K_{V_{Gas}}} \quad (12.1)$$

$$n = \frac{1000 \text{ €}}{84,91 \text{ €/a}} = 11,78 \text{ a}$$

Da Gebäude eine deutlich höhere Betriebslaufzeit aufweisen und die Energiekosten voraussichtlich weiter ansteigen werden, ist eine Investition in eine luftdichte Gebäudehülle durchaus positiv zu bewerten.

12.2 Zentrale Belüftungsanlage (ZBA)

In den kommenden Abschnitten werden wir die ökonomischen und ökologischen Potenziale von mechanischen Belüftungsanlagen untersuchen. Wir werden ausschließlich Anlagen mit Wärmerückgewinnung betrachten. Diese weisen eine deutlichere Reduzierung des Heizenergiebedarfs als Anlagen ohne Wärmerückgewinnung auf.³

Eine zentrale Belüftungsanlage übernimmt die Grundlüftung des Wohngebäudes. Sie ersetzt aber nur bedingt die notwendige freie Lüftung aus dem vorherigen Abschnitt. Der Charme einer solchen zentralen Belüftungsanlage liegt in der Möglichkeit der Wärmerückgewinnung, über den sogenannten Wärmerekuperator. Aus besonders warmen und belasteten Räumen (z. B. dem Badezimmer, der Küche) wird die Luft abgesaugt und über den Rekuperator aus dem Gebäude gefördert. Die aufgenommene Wärme im Rekuperator wird an angesaugte Frischluft wieder abgegeben, die in die Räumlichkeiten gefördert wird.

²Manchmal reicht schon die frühzeitige Ankündigung eines Blower-Door-Test bei der Baufirma für eine höhere Sorgfältigkeit in der Herstellungsphase aus.

³Vgl. DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10.

Das Herzstück der zentralen Belüftungsanlage (ZBA), das zentrale Lüftungsgerät (ZG), wird in der Regel im Technikraum verbaut. Die Schallbelästigung durch das ZG ist somit zu vernachlässigen. Im privaten Haussektor werden als Rekuperatoren meistens Kreuzwärmeübertrager eingesetzt. Diese haben den Vorteil, dass Sie keine Verbindung zwischen der Abluft und der Zuluft zulassen. Jedoch kann die Trennung der beiden Stoffströme im Winter zu einer trockenen Raumluft führen, die wiederum negativ auf die Behaglichkeit der Bewohner Einfluss nimmt. Zusätzlich kann es auf der wärmeabgebenden Seite bei besonders geringen Außentemperaturen durch Auskondensation zu Vereisungen kommen. Diesem Effekt wird durch eine elektrische Vorwärmung des eintretenden Mediums entgegengewirkt.

Abhilfe gegen die zu starke Entfeuchtung kann ein rotierender Rekuperator (Sorptionsräder) leisten. Dieser erlaubt eine gewisse Vermischung mit der Abluft, was zu einer höheren Luftfeuchte führt und Vereisungen vermeidet. Jedoch gelangen auch Abluftrückstände zurück ins Gebäude und der rotierende Rekuperator erfordert einen höheren Energie- und Wartungsbedarf.

Viele Anbieter verweisen auf die sinkenden Heizenergiekosten durch den Einsatz von mechanischen Belüftungsanlagen. Die steigenden elektrischen Betriebskosten, die hohen Anschaffungskosten und die zusätzlichen Wartungskosten werden hingegen außer Acht gelassen. Dies wollen wir in der kommenden Analyse beispielhaft mit einbeziehen.

Als Referenzwert für die folgenden Berechnungen nehmen wir eine zentrale Belüftungsanlage für die Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung an. Für die Wärmerückgewinnung ist ein Kreuzwärmeübertrager verantwortlich. In den folgenden Berechnungen wird der Einsatz einer elektronischen Vorwärmung bewusst ignoriert (häufig setzen die Hersteller Heizelemente mit Heizleistungen von 1000 W und mehr an). Eine elektrische Vorwärmung der angesaugten Außenluft würde die Effizienz der ZBA reduzieren.

Die Lüftungswärmeverluste können nach der DIN V 4108-6 für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung berechnet werden (Abschn. 6.3.4). Dabei beziehen wir uns auf unser Referenzhaus und ermitteln als erstes die erforderliche Lüftungsrate über die Gleichung (Gl. 6.24), die trotz der Wärmerückgewinnung noch aufgeheizt werden muss.

$$n_{\text{ZBA}} = n_A \cdot (1 - \eta_V) + n_x$$

$n_A = \text{Anlagenwechselrate} = 0,4 \text{ [1/h]}$

$\eta_V = \text{Nutzungsfaktor; für Lüftungsanlagen mit einem Wärmerückgewinnungsgrad größer als } 80\% = 0,8; \text{ für Anlagen mit einem Wärmerückgewinnungsgrad größer } 60\% = 0,6 [-]$

$n_x = \text{Luftwechselrate Fensterlüftung und Infiltration für Abluftanlagen} = 0,15 \text{ und für Zu- und Abluftanlagen} = 0,2 \text{ [1/h]}$

Als Lüftungsanlage wollen wir eine Zu- und Abluftanlage mit einem Wärmerückgewinnungswirkungsgrad von 88 % ansetzen. Manche Hersteller betiteln den Wärmerückgewinnungsgrad auch als Wärmebereitstellungswirkungsgrad. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme der Lüftung wurde aus mehreren Datenblättern über eine arithmetische Mittelwertbildung auf 56 W festgelegt. Jedoch sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den Leistungsangaben um idealisierte Herstellerangaben handelt. Die Leistungsaufnahme der Lüftung ist stark vom individuellen Druckverlust über das jeweilige Gesamtsystem abhängig. Verdrecken z. B. die Filter oder die Leitungen im Gebäude, dann muss der Lüfter deutlich stärker angetrieben werden, um den gewünschten Volumenstrom aufrecht zu erhalten.

$$n_{ZBA} = 0,4 \text{ h}^{-1} \cdot (1 - 0,8) + 0,2 \text{ h}^{-1}$$

$$n_{ZBA} = 0,28 \text{ h}^{-1}$$

Die berechnete Luftwechselrate wird ins Verhältnis mit der Luftwechselrate der freien Lüftung gesetzt. Als Referenzwert wird sich auf die Fensterlüftung mit Dichtheitstest bezogen.

$$\Delta H_V = (n_{\text{mit D.}} - n_{ZBA}) \cdot V \cdot 0,34 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \text{K}}$$

$$\Delta H_V = (0,6 - 0,28) \frac{1}{\text{h}} \cdot 376,9 \text{ m}^3 \cdot 0,34 \text{ Wh/}\left(\text{m}^3 \text{K}\right)$$

$$\Delta H_V = 41,01 \text{ W/K}$$

Das Ergebnis ist eine deutliche Differenz auf seitens der Wärmebereitstellung mit 41,01 W/K. Auf dem Markt übliche Aussagen, dass zentrale Belüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung hohe Energieeinspar-

potenzielle auf seitens der Wärmebereitstellung aufweisen, können eindeutig bestätigt werden.

Die Summe der monatlichen vermiedenen Verluste ergibt das jährliche Einsparpotenzial der zentralen Belüftungsanlage gegenüber der freien Fensterlüftung mit Dichtheitstest (Tab. 12.3).

$$\Delta Q_V = \sum Q_{V,M}$$

$$\Delta Q_V = 3396,34 \text{ kWh/a}$$

Mit dem spezifischen Gaspreis von 0,08 €/kWh können wir die möglichen jährlichen Einsparungen im Gasverbrauch ökonomisch bewerten:

$$\Delta K_{V_{\text{Gas}}} = 271,71 \text{ €/a}$$

Dieser beachtlichen jährlichen Einsparung stehen die Investitionskosten für die ZBA, die Energiekosten für die elektrische Energieversorgung der Anlage und die Wartungskosten der ZBA gegenüber. Gerade die Wartungskosten stellen einen nicht zu vernachlässigen Faktor dar. Die Filter müssen regelmäßig ausgetauscht werden, der Wärmeübertrager gereinigt und alle 10 Jahre sollen die luftführenden Kanäle gewartet werden. Hier können hohe Kosten entstehen. In der Analyse werden bescheidene jährliche Wartungskosten von 80 € angesetzt, ein Wert, der durch Eigenleistungen des Hausbesitzers realisiert werden könnte, je nach Anlagentechnik und Fertigkeit des Betreibers. Die folgende Gleichung (Gl. 12.2) stellt die Einsparungen den Mehrkosten einer ZBA in einer statischen Analyse gegenüber:

$$n = \frac{MK_{\text{ZBA}}}{\Delta K_{V_{\text{Gas}}} - K_{\text{Strom}} - WK} \quad (12.2)$$

$$n = \frac{5000 \text{ €}}{271,71 \frac{\text{€}}{\text{a}} - 0,056 \text{ kW} \cdot \frac{8760 \text{ h}}{\text{a}} \cdot \frac{0,29 \text{ €}}{\text{kWh}} - 80 \text{ €/a}}$$

$$n = 101,12 \text{ a}$$

Die Mehrkosten in der Investition setzen sich zusammen aus dem zentralen Lüftungsgerät mit Kreuzwärmeübertrager, der Steuerung und der Luftleittechnik (Leitungen in die Räume und Ab- und Zuluftkanal nach außen).

Die Einsparungen durch die Vermeidung der Heizenergie werden zu einem großen Teil durch den notwendigen Energieaufwand für den

Tab. 12.3 Vergleich monatliche Lüftungswärmeverluste Fensterlüftung und ZBA mit WRG

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Monatliche Lüftungs- wärmeverluste												
Außenlufttemperatur	1	1,9	4,7	9,2	14,1	16,7	19	18,6	14,3	9,5	4,1	0,9
Tage pro Monat	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Monatliche Lüftungs- wärmeverluste n = 0,6	1030	884	818	543	280	127	0	23	260	543	825	1035
Monatliche Lüftungs- wärmeverluste n _{ZBA} = 0,6	481	412	382	253	131	59	0	11	121	254	385	483
Monatliche Differenz Lüftungswärmever- luste n = 0,32	549	471	436	289	149	68	0	12	139	290	440	552

erzwungenen Volumenstrom aufgebraucht. Die jährlichen Wartungen sorgen anschließend dafür, dass ökonomische Einsparungen von weniger als 50 EUR im Jahr übrig bleiben.

Werden die Wartungskosten komplett ignoriert, dann verringert sich die notwendige Betriebslaufzeit auf ca. 40 Jahre. Die Wartung darf aber nicht einfach ignoriert werden, werden die Filter und die Leitungen nicht sauber gehalten, steigt der Gegendruck für den Lüfter. Daraus resultiert ein ansteigender elektrischer Energiebedarf, der die eingesparten Wartungskosten wieder aufbrauchen wird. Nicht beachtet sind Reinvestitionskosten in die Anlagentechnik, somit sollte man auch hier den Einsatz einer zentralen Lüftungsanlage genau analysieren. Bei einer durchschnittlichen Lebenserwartung von 20 Jahren und kleinen Instandhaltungsmaßnahmen wird eine ökonomische Rentabilität schwer erreicht werden.

12.3 Dezentrale Belüftungsanlage (DBA)

Die dezentrale Belüftungsanlage benötigt pro Raum eine eigene Einheit. Die Lüfterleistungen können bei einigen Systemen über eine zentrale Steuerseinheit geregelt werden oder sie erfolgen in den jeweiligen Räumen sensor-geregelt. Bei der sensorgesteuerten Variante können Einflussgrößen wie z. B. die relative Luftfeuchte oder die Sauerstoffkonzentration Berücksichtigung finden. Neuere Systeme erlauben auch eine Web-gesteuerte Einzelregelung.

Die dezentrale Anlage hat deutliche Vorteile gegenüber der zentralen Belüftungsanlage hinsichtlich des zu überwindenden Druckverlustes für den erzwungenen Luftaustausch, da keine langen Leitungswege überwunden werden müssen. Dadurch sinkt der elektrische Energiebedarf der Lüftungsanlage ab. Leicht kompensiert wird dieser Effekt durch den schlechteren elektrischen Wirkungsgrad der vielen kleineren Lüftungsmotoren gegenüber einem großen Lüftungsmotor.

Die Investitionskosten sinken ebenfalls leicht ab, da eine aufwendige Luftleitungsinstallation entfällt. Lediglich elektrische Versorgungs- und Steuerleitungen müssen für die DBA in jedem zu belüftendem Raum installiert und Kernlochbohrungen gesetzt werden.

Die Wärmerückgewinnung erfolgt über einen wärmeaufnehmenden und -abgebenden Wabenkörper, der als Wärmespeicher fungiert. Die warme Innenluft wird durch den elektrisch angetriebenen Lüfter aus dem Gebäude geführt. Dabei wird die Wärme aus der Abluft auf den Wärmespeicher übertragen. Anschließend stoppt der Lüftermotor und dreht seine Laufrichtung um. Die frische Luft von außen wird über den Wärmespeicher in den Innenraum gefördert. Dabei nimmt die Frischluft die Wärme vom Wabenkörper

teilweise wieder auf. Vorteil dieser Technik ist die Feuchterückgewinnung über den Wärmeübertrager. Nachteilig ist der sehr unkontrollierte Stofftransport. Bei stehender Außenluft am Gebäude kann es zum Pumpen kommen, wobei die Luft anteilig immer nur hin und her gepumpt wird. Ebenfalls sind erhöhte äußere Windgeschwindigkeiten mit Druckunterschieden auf den Gebäudeoberflächen verbunden, gerade in der Umkehrphase der Lüfterdrehrichtung kommt es zu unkontrollierten Luftströmungen, die den Energieeinspareffekt eines gut abgedichteten Gebäudes eliminieren können.

Auf eine detaillierte Beschreibung der folgenden Berechnung zur dezentralen Lüftungsanlage wird verzichtet. Der Berechnungsablauf ist analog zur Berechnung der zentralen Lüftungsanlage (Abschn. 12.2). Betrachtet werden 10 dezentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Der Wärmerückgewinnungsgrad liegt bei 70 % und die Leistungsaufnahme über die zentrale Steuereinheit beträgt summiert 42 W.

$$n_{DZG} = 0,4 \text{ h}^{-1} \cdot (1 - 0,7) + 0,2 \text{ h}^{-1}$$

$$n_{DZG} = 0,32 \text{ h}^{-1}$$

$$\Delta H_V = (0,6 - 0,32) \frac{1}{h} \cdot 376,9 \text{ m}^3 \cdot 0,34 \text{ Wh/(m}^3\text{K})$$

$$\Delta H_V = 35,88 \text{ W/K}$$

Die Ergebnisse der monatlichen Aufwendungen sind in der Tab. 12.4 aufgeführt. In der Summe ergibt sich die jährliche Differenzenergie als direktes Einsparpotenzial.

$$\Delta Q_V = 2971,8 \text{ kWh/a}$$

Mit dem spezifischen Gaspreis von 0,08 €/kWh können wir wieder die jährlichen Einsparungen im Gasverbrauch berechnen:

$$\Delta K_{V_{\text{Gas}}} = 237,74 \text{ €/a}$$

$$n = \frac{MK_{DZG}}{\Delta K_{V_{\text{Gas}}} - K_{\text{Strom}} - WK}$$

$$n = \frac{3000 \text{ €}}{237,74 \frac{\text{€}}{a} - 0,042 \text{ kW} \cdot \frac{8760 \text{ h}}{a} \cdot \frac{0,29 \text{ €}}{\text{kWh}} - 50 \text{ €/a}}$$

$$n = 37,02 \text{ a}$$

Tab. 12.4 Ergebnis dezentrale Belüftungsanlagen (DBA)

Monatliche Lüftungswärmeverluste	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Außenlufttemperatur	1	1,9	4,7	9,2	14,1	16,7	19	18,6	14,3	9,5	4,1	0,9
Tage pro Monat	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Monatliche Lüftungswärmeverluste n = 0,6	1030	884	818	543	280	127	0	23	260	543	825	1035
Monatliche Lüftungswärmeverluste n_{mech}	549	471	436	289	149	68	0	12	139	290	440	552
Monatliche Lüftungswärmeverluste n = 0,28	481	412	382	253	131	59	0	11	121	254	385	483

Tab. 12.5 Grundlagen CO₂-Bewertung Lüftungsanlage

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Kohlendioxidemissionen H-Erdgas	CO ₂ Gas	0,259	kgCO ₂ /kWh
Kohlendioxidemissionen Strommix	CO ₂ Strom	0,489	kgCO ₂ /kWh
Energiebedarf Gas Fensterlüftung n=0,7	Q _n = 0,7	7429,50	kWh/a
Energiebedarf Gas Fensterlüftung n=0,6	Q _n = 0,6	6368,14	kWh/a
Energiebedarf Gas ZBA	Q _n = 0,28	2971,80	kWh/a
Energiebedarf Strom ZBA	E _{ZBA}	490,56	kWh/a
Energiebedarf Gas DBA	Q _n = 0,32	3396,34	kWh/a
Energiebedarf Strom DBA	E _{DBA}	367,92	kWh/a

Der deutlich geringere Investitionsaufwand sorgt für eine frühere Rentabilität der Anlage. Die Wartungskosten basieren wieder auf einem großen Do-it-yourself-Anteil. Zu beachten ist, dass Leckageverluste durch ungewollte Strömungen und Reinvestitionskosten keine Berücksichtigung gefunden haben.

12.4 Ökologische Bewertung Lüftungsanlagen

Ziel der Lüftungsanlagen muss es sein, die äquivalenten Kohlendioxidemissionen und den Primärenergieeinsatz über die Lebensphase zu reduzieren. Dafür müssen die Aufwendungen für die Lüftungsanlage von den Energieeinsparungen im Betrieb kompensiert werden.

Die berechneten Energieverbräuche aus der Tab. 12.5 kommen aus dem Abschn. 7.4.1 und dem Kap. 12.

Die äquivalenten Treibhausgase aus der Herstellung, dem Transport und dem Recycling der Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung entstammen der Onlinedatenbank Ökobaudat.de. Als Referenzwert für die zentrale Lüftungsanlage wurde der „Lüfter zentral mit WRG 1000 m³/h“ unter Punkt „8.2.01 Lüftungsanlagen“ angesetzt. Zwar ist das eingesetzte Gerät größer als ein notwendiges, dafür wurden jedoch die zusätzlichen Komponenten (Leitungen, Aus- und Einlasskanäle) vernachlässigt.⁴

Die dezentrale Anlage besteht aus 10 Lüftereinheiten mit dem Datenblatt „Lüfter Dezentral (Wand & Decke) 60 m³/h“, ausgewählt unter Punkt „8.2.01 Lüftungsanlagen“. Auch hier sind die Einheiten wieder ein wenig überdimensioniert.⁵

⁴Vgl. [32].

⁵Vgl. [33].

Tab. 12.6 Ergebnis LCA äquivalente Treibhausgasemissionen Lüftungssysteme

Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	Fensterlüftung	Fensterlüftung mit Dichtheits-test	Zentrale Lüftungsanlage	Dezentrale Lüftungsanlage	Einheit
Herstellung A1-A3	0,00	0,00	373,40	253,20	kg CO ₂ äq
Transport C2	0,00	0,00	0,92	0,28	kg CO ₂ äq
Beseitigen C4	0,00	0,00	0,72	45,37	kg CO ₂ äq
Recycling D	0,00	0,00	-201,60	-106,90	kg CO ₂ äq
Gasverbrauch	1924,24	1649,35	769,70	879,65	kg CO ₂ äq
Elektrischer Energiebedarf	0,00	0,00	239,88	179,91	kg CO ₂ äq
Summe 20 a	38484,80	32986,97	20365,03	21383,26	kg CO ₂ äq
Vorteilhaftigkeit nach	-	0,00	0,27	0,33	a

Die Ergebnisse aus der Tab. 12.6 zeigen einen deutlich positiven Effekt beim Einsatz einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Das globale Erwärmungspotenzial wird deutlich abgesenkt.

Die Analyse zum Primärenergieeinsatz basiert auf denselben Randbedingungen wie für die Analyse des globalen Erwärmungspotenzials (Tab. 12.7). Das Ergebnis ist ähnlich vorteilhaft wie das Ergebnis zu den Treibhausgasemissionen.

Tab. 12.7 Analyse Primärenergiebedarf ZBA und DBA

Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	Fensterlüftung	Fensterlüftung mit Dichtheits-test	Zentrale Lüftungsanlage	Dezentrale Lüftungsanlage	Einheit
Herstellung A1-A3	0,00	0,00	4069,00	726,60	kg CO ₂ äq
Transport C2	0,00	0,00	12,09	0,76	kg CO ₂ äq
Beseitigen C4	0,00	0,00	4,33	4,86	kg CO ₂ äq
Recycling D	0,00	0,00	-2033,00	-148,60	kg CO ₂ äq
Gasverbrauch	0,00	7004,95	3268,98	3735,98	kg CO ₂ äq
Elektrischer Energiebedarf	0,00	0,00	883,01	662,26	kg CO ₂ äq
Summe 20 a	0,00	140099,09	85092,15	88548,26	kg CO ₂ äq
Vorteilhaftigkeit nach	-	0,00	0,72	0,22	a

12.5 Wann lohnt sich ökonomisch eine Lüftungsanlage?

Die ökonomische Rentabilität einer mechanischen Lüftungsanlage konnte in den vorherigen Abschnitten nicht oder nur bedingt bestätigt werden. Häufig sind Lüftungssysteme jedoch fest eingebunden in Häuserkonfigurationen und die Baufirmen setzen aufgrund von Garantiebedingungen auf eine Zwangsbelüftung des Gebäudes. Da ist es doch interessant zu wissen, unter welchen Randbedingungen der Betrieb der Lüftungsanlage nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch rentabel ist. Hierzu wollen wir eine Vergleichsrechnung erstellen. In einem ersten Schritt müssen wir das wärmeübertragende Medium einmal genauer anschauen. Bei einem Umgebungsdruck von einem Bar und einer Durchschnittstemperatur von 10 °C weißt die Luft eine spezifische isobare Wärmekapazität von 1,0061 kJ/kgK und eine Dichte von 1,2306 kg/m³ auf. Die Multiplikation der beiden Stoffwerte ergibt die Wärmekapazität pro Kubikmeter Luft.

$$C_p = c_p \cdot \rho \quad (12.3)$$

$$C_p = 1,0061 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 1,2306 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C_p = 1,2381 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3\text{K}} = 0,344 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}}$$

Mit der Umrechnung auf Wattstunden können wir einen direkten Vergleich mit der elektrischen Lüftungsarbeit ermöglichen. Eine effiziente Lüftungsanlage sollte einen elektrischen Bedarf von kleiner 0,4 Wh/m³ aufweisen. Die spezifischen Energiekosten werden wieder nach den Werten aus dem Abschn. 7.6 angesetzt.

$$\Delta T = \frac{P_{\text{Lüfter}} \cdot k_{\text{Strom}}}{C_p \cdot k_{\text{gas}}} \quad (12.4)$$

$$\Delta T = 4,22 \text{ K} = 4,22 \text{ °C}$$

Somit würde sich der Einsatz der Lüftungsanlage ab einer Temperaturdifferenz von ca. 4,3 °C rentieren. Werden jetzt noch die Wartungskosten

mit einbezogen, dann muss das tatsächlich transportierte Luftvolumen, sowie die Betriebszeit für eine ökonomische Effizienz berücksichtigt werden.

$$\Delta T = \frac{P_{\text{Lüfter}} \cdot k_{\text{Strom}} + \frac{Wk}{t \cdot V_n = 0,5}}{C_p \cdot k_{\text{gas}}} \quad (12.5)$$

$$\Delta T = 8,07 \text{ K} = 8,07 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Als Betriebslaufzeit wurden 4000 h angesetzt und der notwendige Volumenstrom pro Betriebsstunde richtet sich nach dem Modellhaus, mit einer Luftwechselrate von $n = 0,5$ pro Stunde.

Zu beachten ist, dass der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnungsanlage vernachlässigt worden ist. Kombiniert man die Berechnung noch mit den Investitionskosten und einer Lebenszeit von 20 Jahren, so wäre für einen rentablen Betrieb eine Temperaturdifferenz von größer 20 °C notwendig.

Die aufgeführten Berechnungen können natürlich auch für den ökologischen Ansatz getätigt werden. Hier lässt sich der Primärenergieverbrauch und das globale Erwärmungspotenzial über die ausgestoßenen Treibhausgasemissionen bilanzieren.

Die eingesetzten Werte in der Berechnung für den Primärenergieaufwand stammen aus den Abschn. 7.4.1 und 7.6.

$$\Delta T = \frac{P_{\text{Lüfter}} \cdot PEF_{\text{Strom}}}{C_p \cdot PEF_{\text{Gas}}}$$

$$\Delta T = \frac{0,4 \text{ Wh/m}^3 \cdot 1,8}{0,344 \text{ Wh/m}^3 \text{K} \cdot 1,1}$$

$$\Delta T = 1,9 \text{ K} = 1,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Kohlenstoffdioxid äquivalente Emissionen:

$$\Delta T = \frac{P_{\text{Lüfter}} \cdot cf_{\text{Strom}}}{C_p \cdot cf_{\text{Gas}}}$$

$$\Delta T = \frac{0,4 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3} \cdot 0,489 \text{ kg CO}_2 \text{ aq./kWh}}{0,344 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \text{K}} \cdot 0,259 \text{ kg CO}_2 \text{ aq./kW}}$$

$$\Delta T = 2,2 \text{ K} = 2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Werden die ökologischen Aufwendungen nur auf den Betrieb bezogen, dann kann bereits bei einer Temperaturdifferenz von etwas über $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ein ökologischer Vorteil generiert werden, ohne Berücksichtigung der Effizienz der Wärmerückgewinnung.

12.6 Fazit Belüftungssysteme

Bei modernen hochabgedichteten Gebäuden spielt der Luftwechsel eine entscheidende Bedeutung. Schadstoffe und Luftfeuchtigkeit müssen kontrolliert aus dem Gebäude abgeführt werden. Dabei kann eine mechanische Lüftungsanlage einen wichtigen Beitrag leisten und den Wohnkomfort langfristig steigern. Aus ökonomischer Sicht ist eine Rentabilität einer solchen Anlage schwer zu begründen, obwohl die Heizkosten deutlich gesenkt werden. Zwangslüftungsanlagen weisen hohe Betriebs- und Wartungskosten auf und erwirtschaften somit häufig keinen Vorteil gegenüber einer Fensterlüftung. Kommt noch ein falsches Lüftungsverhalten der Bewohner hinzu, durch mechanisches Lüften über die Fenster und Türen, dann fungieren die Lüftungsanlagen lediglich als Energievernichtungsmaschinen.^{6, 7}

Bei dezentralen Belüftungsanlagen sind die zahlreichen Durchbrüche kontrovers zu den betriebenen Aufwänden für eine möglichst dichte Gebäudehülle zu betrachten. Unkontrollierte Luftströme können Einsparungen schnell aufbrauchen und sogar für einen erhöhten Energieaufwand sorgen.

Aus ökologischer Sicht sind die Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sowohl beim Primärenergiebedarf sowie in den Treibhausgasemissionen vorteilhaft zu bewerten. Eine weitere ökonomische und ökologische Steigerung ließe sich durch eine Vorwärmung der angesaugten Luft durch eine kostenfreie Wärmequelle generieren, z. B. über ein Erdwärmeübertrager. Hier müssen die Aufwendungen der vor- und nachgelagerten Lebenszyklusphasen den Einsparungen in der Betriebsphase gegenübergestellt werden.

⁶Vgl. [34, S. 18].

⁷Umso kritischer müssen Vertragsbestandteile in Mietverträgen über eine mechanische Lüftungspflicht betrachtet werden, wenn das Gebäude über eine Lüftungsanlage verfügt.



13

Heizungssysteme

Das Heizungs- und Warmwasseraufbereitungssystem ist in der Regel das Herzstück des häuslichen Energiekonzeptes. Weitere Hauptbestandteile im Heizungssystem sind die Wärmespeicherung, die Verteilung und die Wärmeübertragung. Die Wärmeübertragung ist verantwortlich für den thermischen Energieübergang vom Heizungssystem an die Wohnfläche. Alle Systemkomponenten müssen auf die thermische Energiewandlungsanlage (oder einfach die Heizung) abgestimmt sein, damit eine vorteilhafte Interaktion zwischen den einzelnen Hauptbestandteilen stattfinden kann. Häufig werden in den einzelnen Systembereichen auch Kombinationen eingesetzt. So stellt eine Gasbrennwerttherme kombiniert mit einer Solarthermieanlage eine geläufige Anlagenkombination dar.

Lokale Anforderungen nehmen ebenso wie das Wärmebedarfsprofil Einfluss auf die richtige Heizungsanlagenauslegung. So kann eine Gasbrennwerttherme in einem Wärmelastprofil eine sinnvolle Anlagentechnik darstellen, in einem anderen Wärmelastprofil jedoch vollkommen unprofitabel sein.

Eine Installation der Heizungsanlage innerhalb der thermischen Gebäudehülle sowie eine konsequente Führung der Heizungsverteilung innerhalb dieser, steigert ebenso die Energieeffizienz der Heizungsanlage wie die konsequente Isolierung aller wärmeführenden Leitungen. Da Wärmeverluste nie vollständig zu verhindern sind, sorgt die Installation innerhalb der Gebäudehülle dafür, dass Verluste noch als Wärmegewinne im Innenraum genutzt werden können. Dieser Effekt wird auch in der DIN V 4701 berücksichtigt.

Ein hydraulischer Abgleich durch eine Fachfirma ist bei hydraulischen Anlagen unerlässlich und kann viel Geld sparen. Bei der Einstellung zum hydraulischen Abgleich werden die einzelnen Heizelemente auf den Wärmebedarf und der zur Verfügung stehenden Anlagencharakteristik abgestimmt.

Die Heizungsanlage sollte so in ihrer Größe dimensioniert werden, dass der Wärmebedarf auch unter anspruchsvollen Bedingungen bedient werden kann. Sprechen wir von der Heizungsgröße, dann ist damit die Heizleistung der Anlage gemeint. Je mehr thermische Kilowatt eine Heizungsanlage bereitstellen kann, desto größer ist die Anlage, auch wenn die räumliche Größe eventuell konstant bleibt. Die Heizungsanlage sollte nicht nach dem absoluten Extremwert der kältesten gemessenen lokalen Temperaturen ausgelegt werden, andernfalls besteht die Gefahr der Überdimensionierung. Als guten Auslegungswert hat sich die kälteste Zweitagemitteltemperatur der letzten zwanzig Jahre gezeigt, die mindestens 10-mal erreicht wurde.

Als Heizgradtage werden die Tage gezählt, an denen die Heizung die Gebäudetemperatur reguliert. Ziel einer effizienten Gebäudehülle ist die Reduktion der Heizgradtage auf einen möglichst geringen Wert. Jedoch muss die Luftfeuchtigkeit im Raum an der kühlsten Fläche beachtet werden. Die Heizungsanlage soll nicht nur die Behaglichkeit der Bewohner erhalten, sondern auch den Feuchtigkeitsschutz sicherstellen.¹

Kommt es in einer besonders kalten Fläche zur Kondensation, dann besteht die Gefahr von Schimmelbildung. Im Allgemeinen sind Ecken mit einem hohen Oberflächenverhältnis gefährdet aber auch Bereiche mit Wärmebrücken.

13.1 Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung hat die Aufgabe, die thermische Energie über die Verteilung kontrolliert in die Räume abzugeben. Es sollte eine gleichmäßige Wärmeabgabe für eine hohe Behaglichkeit stattfinden. Zu große Temperaturgradienten können ebenso wie akustische Emissionen störend empfunden werden. Zeitgemäße Wärmeübertragersysteme weisen eine gute Regelbarkeit und schnelle Reaktionszeiten auf.

¹Vgl. DIN 4108-3 (2018).

13.1.1 Wandkonvektoren

Durch den Einsatz von Wandkonvektoren werden die Raumluft und die Raumoberflächen durch Konvektion und Wärmestrahlung der Wandkonvektoren aufgeheizt. Hier kommen vor allem Glieder-, Röhren und Plattenheizkörper zum Einsatz. Während die älteren Gliederheizkörper vor allem nach dem Konvektionsprinzip arbeiten und nur noch in Bestandsbauten zu finden sind, werden Plattenheizkörper auch im modernen Häuserbau gerne verbaut. Ihr Vorteil liegt in der großen Oberfläche zum Raum und dem einhergehenden höheren Strahlungspotenzial. In der Regel wird Wärmestrahlung angenehmer wahrgenommen als über Konvektion aufgenommene Luftwärme, die durch die Luftbewegung viel Staub mit sich führt. Moderne Plattenheizkörper bestehen aus mehreren Kammern. Die richtige Anschlussrichtung bei der Montage ist entscheidend, die heißeste Kammer muss zum Raum zeigen, dann kann der größte Strahlungswärmeübergang in den Raum realisiert werden. Die kälteren Kammern sind zur Wand hin und für den Konvektionsanteil verantwortlich.

Eine thermostatgesteuerte Regelung ermöglicht eine relativ schnelle, unkomplizierte Regelung der Raumtemperatur. Die Konvektoren wurden meistens unterhalb der Fenster angebracht. Dieser Platzierungsort resultiert aus dem Wunsch der kalten Strahlungsabminderung der Fensterflächen in älteren Gebäuden. Werden in einem neuen Haus hochisolierte Fenster eingesetzt, dann sinkt die Fensterinnenoberfläche nur noch unwesentlich unterhalb der Raumtemperatur. Somit können heutige Konvektoren freier positioniert werden.

Vorteilhaft sind die geringeren Kosten und die schnelle Regelbarkeit der Konvektoren. Negativ ist die höhere Temperatur im Vorlauf aufgrund der geringen Oberfläche, was bei einigen Heizungsanlagen zu einem Effizienzverlust führen kann.

13.1.2 Fußbodenheizungen

Fußbodenheizungen sorgen im Allgemeinen für eine hohe Behaglichkeit bei den Bewohnern. Sie können als Nass- oder Trockensysteme in den Boden eingebunden werden. Bei einem Trockensystem liegen die Heizschlangen in einer Isolierung, über die der Fußboden verschlossen wird. Als Nasssystem werden die Heizschlangen in den Estrich vergossen. Im Estrich inkludierte Wärmeübertrager erwärmen den Estrich, was zu warmen Füßen führt und

als angenehm empfunden wird. Durch die relativ hohe Masse des Estrichs ist das System eher träge und kann nicht auf schnelle Anforderungswechsel reagieren. Ebenfalls ist beim Fußbodenauflauf auf eine gute Wärmeleitfähigkeit der Fußbodenoberfläche zu achten. Ein Echtholzboden hat nicht nur mit den thermischen Verspannungen zu kämpfen, sondern er weist in der Regel auch eine schlechte Wärmeleitfähigkeit auf. Hier sollten Materialien mit guten wärmeleitenden Materialien bevorzugt werden. Wenn Sie sich im Baumarkt nicht über die Wärmeleitung eines Materials bewusst sind, dann können sie durch den direkten Vergleich schnell den besser leitenden Körper identifizieren. Stellen Sie sich einfach Barfuß auf die beiden Vergleichsmaterialien (Handkontakt ist auch möglich). Das Material, was nach einigen Sekunden immer noch kälter ist, leitet ihre Körperwärme schnell von Ihnen weg. Somit wird es auch die Wärme der Fußbodenheizung schneller an den Raum ableiten.

Bei sehr geringem Heizenergiebedarf des Gebäudes kann es sein, dass die Fußbodenheizung gar nicht richtig in Betrieb kommt. Wird die Fußbodenheizung in der Übergangszeit häufig an und ausgeschaltet durch den Bediener, dann führt dies zu übermäßigen Energieaufwendungen. Das temperaturgesteuerte An- und Abfahren sollte nicht digital² passieren, sondern durch eine geschickte Regelung erfolgen, wie z. B. bei der nächtlichen Temperaturabsenkung.

Da eine Fußbodenheizung eine sehr große Oberfläche aufweist, kann die Vorlauftemperatur geringer als bei Wandkonvektoren gehalten werden, das verhilft einigen Heizungssystemen zu besseren Effizienzen.

13.1.3 Wand und Deckenheizungen

Wand- und Deckenheizungen erfreuen sich immer größerer Beliebtheit. Die Heizkörper werden entweder in geringer Tiefe in den Putz eingesetzt oder hinter einer dünnen Leichtbauwand versteckt. Es gibt immer mehr Wärmeübertragereinheiten die als modischer Eyecatcher auf der Wand oder unter die Decke gehängt werden können. Die wärmeübertragenden Heizkörper übernehmen die Wärme von einem Medium oder wandeln sie direkt aus elektrischer Energie. Ihre schnelle Regelbarkeit verschafft dem System einen Vorteil gegenüber der konventionellen Fußbodenheizung.

²Mit digital ist in diesem Fall nur die Stellung „Vollgas“ und „Aus“ gemeint.

13.1.4 Betonkernaktivierungen

Eine Betonkernaktivierung kann auch als Bauteilaktivierung bezeichnet werden. Körper mit einer hohen Masse und einem thermisch tragen Verhalten dienen als thermisch regulierendes Element innerhalb der Gebäudehülle. Hier wirkt die hohe Masse wie ein Dämpfer, der schwankende Temperatureinflüsse abfedert. Der große Vorteil des Systems ist gleichfalls auch sein Nachteil: Will man die Temperatur verringern, dann sorgt die Trägheit des Speichers für eine sehr langsame Reaktion.

13.2 Ölheizung

Der Klassiker der vergangenen Jahrzehnte hatte im Jahr 2018 einen fast zu vernachlässigen Anteil an der Beheizungsstruktur im Neubau.³ Ölheizungen sind stark von der aktuellen weltweiten Lage am Ölmarkt abhängig und somit unterliegen die Bezugskosten starken Schwankungen. Da Ölheizungen und die dazugehörigen Tankanlagen regelmäßige Reinigungen erfordern, sind die jährlichen Wartungskosten im Vergleich mit anderen Heizungstechnologien vergleichsweise hoch. Ebenfalls erfordern die Tankanlagen einen verfügbaren Installationsraum mit einer gewissen Zugänglichkeit. Raum ist in den vergangenen Jahren immer teurer geworden und somit haben viele Neubauten keinen Keller mehr, in dem ein Öltank installiert werden könnte. Alternativen bieten Erdtanks mit speziellen sicherheitstechnischen Eigenschaften. Aufgrund der hohen ökologischen Gefährdung durch das gelagerte Heizöl sind Präventionsmaßnahmen für den Wasserschutz unerlässlich und unterliegen regelmäßigen Überprüfungen. Ein weiterer ökologischer Nachteil entsteht durch die unsaubere Verbrennung der Nebenprodukte im Heizöl, selbst moderne Ölheizungen produzieren mehr Schadstoffe als vergleichbare Gasheizungen.

Vorteilhaft an Ölheizungen ist die Unabhängigkeit von einem Gasnetz und die bedingte Autonomie. Somit kann eine Ölheizung eine Alternative in Gebieten mit einer schlechteren Infrastruktur darstellen. Das Nachfüllen des Heizölvorrats sollte in jedem Fall rechtzeitig in Abhängigkeit des Heizölpreises erfolgen. Ist die Versorgungsleitung erst einmal „trocken“,

³Vgl. bdew, Beheizungsstruktur_Wohnungsneubau_Entw_10J_online_o_quartalsweise_Ki_03042019; Stand 02.06.2019.

dann können sich viele Heizungen nicht mehr selbst entlüften. Zur Kraftstoffsumme kommt anschließend noch der Heizungsmonteur mit auf die Rechnung.

13.3 Gasheizung

Die noch am meisten verkaufte Heizungstechnik basiert auf dem Einsatz von Gasbrennwertthermen (2018 ca. 40%).⁴ Diese werden zumeist in Brennwerttechnik ausgeführt und erreichen Wirkungsgrade von mehr als 110 %. Diese unglaublich hohen Wirkungsgrade verdanken der Kondensationsenergie ihre Gültigkeit. Bei der Verbrennung, eine exotherme Oxidation, verbindet sich der Wasserstoff aus dem Erdgas mit Sauerstoff und es entsteht Wasserdampf. Der Wasserdampf kondensiert, wenn die Abgastemperatur weit genug abgekühlt wird. Die aufkommende Kondensationsenergie wird beim Phasenübergang von Dampf zu Wasser als latente Wärme an das Wärmeübertragermedium abgegeben. Wird nun der im Gas vorhandene Heizwert mit dem Brennwert ins Verhältnis gesetzt, dann ergeben sich Wirkungsgrade von ca. 104–114 % – je nach Wasserstoffanteil im Erdgas. Erdgas weist einen deutlich höheren Wasserstoffanteil auf als z. B. Heizöl. Wird für die Energieumwandlung mehr Wasserstoff und weniger Kohlenstoff eingesetzt, dann reduzieren sich die äquivalenten Treibhausgase.

Da es im Abgastrakt zu einer sehr hohen Feuchtigkeitsbildung kommt, und entzweifelte Erdgas immer noch geringe Anteile von Restschwefel enthalten kann, muss der Abgastrakt korrosionsbeständig ausgeführt werden. Bei Brennwertthermen ist das Abgassystem in der Regel aus säure- und hitzebeständigen Kunststoffen ausgeführt in hinterlüfteter Bauweise. Zusätzlich ist eine Entwässerung der Abgasleitungen am tiefsten Punkt notwendig.

Der vorher beschriebene Wirkungsgrad beschreibt die Heizungsanlage im Auslegungspunkt. Befindet sich die Anlage in An- und Abfahrprozessen oder in ungünstigen Betriebszuständen, dann kann der Wirkungsgrad deutlich unter 75 % absinken. Aus diesem Grund ist die Dimensionierung einer Brennwerttherme von Fachleuten durchzuführen, ebenso wie die richtige Einstellung der Betriebsweise.

⁴Vgl. statista; Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2018; Stand 01.07.2019.

13.4 Solarthermie

Die Sonne stellt mit Abstand die größte regenerative Energiequelle auf der Erde zur Verfügung. Die Oberflächentemperatur der Sonne liegt bei knapp 6000 K und die Sonne strahlt an ihrer Photosphäre mit ca. 60 MW/m^2 ins Universum. An der Erdatmosphäre treffen senkrecht noch ca. $1,37 \text{ kW/m}^2$ ein.⁵ Dieser Wert wird in der Literatur auch Solarkonstante betitelt. Zwar wird diese Strahlung durch die Erdatmosphäre weiter verkleinert, dennoch trifft sekündlich eine hohe Energiedichte auf unsere Erdoberfläche auf. Die Reduktion der Strahlungsenergie hängt vor allem vom Einstrahlwinkel und von den reflektierenden bzw. absorbierenden Partikeln auf dem Weg zum Empfänger ab.

Die solarthermische Nutzung zur Warmwasseraufbereitung ist in den südlichen Ländern ein über Jahrtausende genutztes System. Auch heute finden Sie im Süden sehr einfache Anlagen, um Warmwasser bereitzustellen. Wassertanks mit absorbierenden Oberflächen, montiert auf den Dächern, transportieren die eintreffende Solarstrahlung als Wärmeenergie über die Tankwände an das innenliegende Medium. Durch die potenzielle Druckenergie kann das erwärmte Wasser im Haus ohne weiteren Aufwand genutzt werden.

Weil die Solarstrahlung mit steigendem Breitengrad abnimmt, müssen wir in Deutschland eine etwas aufwendigere Anlagentechnik für ein effizientes System nutzen. Der Grundgedanke ist aber der Gleiche. Die Ansicht, dass bei kalten Temperaturen die Solaranlagen keinen Ertrag liefern, ist verbreitet jedoch falsch. Da die solare Strahlung ausgenutzt wird, kann die Anlage sowohl im Sommer, wie auch im Winter beachtliche Wärmemengen erzeugen (Abb. 13.1 und 13.2).

Eine Solarthermieanlage nutzt die direkten, diffusen und die reflektierenden Strahlungen, die auf die Oberfläche des Kollektors ein treffen aus, um die Strahlungsenergie in Wärmeenergie umzuwandeln. Die reflektierende Strahlung von umliegenden Oberflächen hat in der Regel den geringsten Anteil an der thermischen Leistung und ist daher zu vernachlässigen.

Für eine hohe Ausbeute an direkter Strahlungsenergie sollte die Ausrichtung der Kollektoren im rechten Winkel zur Sonne stehen. Jedoch verändert die Sonne über den Tag ihren Azimut-Winkel, wandert von Osten über den Tag nach Norden. Zusätzlich verändert sich über das Jahr der

⁵Vgl. [35].

Täglicher Einstrahleistungsverlauf horizontale Fläche
[kW/m²]

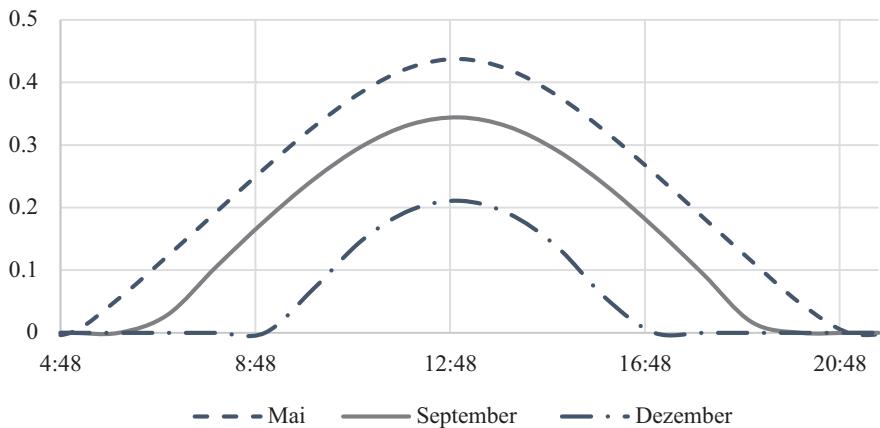


Abb. 13.1 Tägliche Einstrahlleistung auf eine horizontale Fläche. (Quelle: NASA (These data were obtained from the NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program.))

Tägliche solare Einstrahlenergie [kWh/m²]

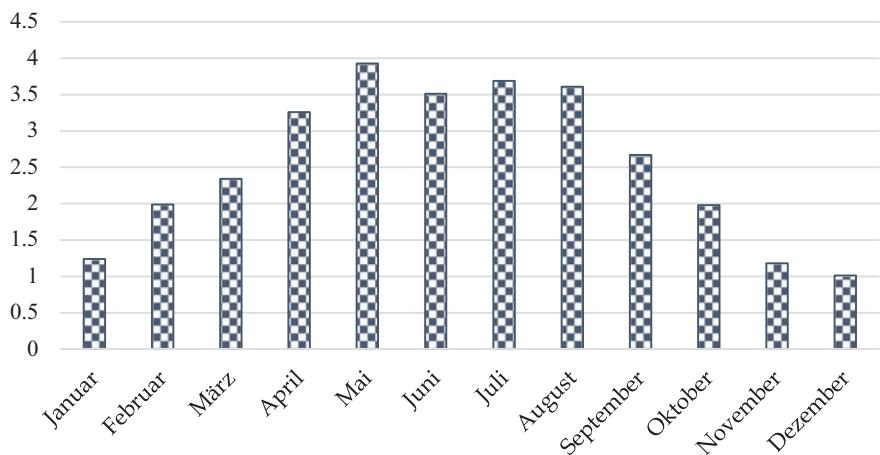


Abb. 13.2 Tägliche solare Einstrahlleistung Potsdam. (Quelle: NASA (These data were obtained from the NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program.))

Sonnenhöhenwinkel (Elevationswinkel). Somit wäre eine variable Anlagen-nachführung nach der direkten Sonneneinstrahlung eine optimale Lösung für eine effiziente Ausnutzung der direkten Einstrahlung. Bei größeren Solarthermieanlagen wird das Verfahren der Kollektornachführung bereits erfolgreich eingesetzt.

In kleineren privaten Haushalten lohnt sich der Aufwand für die Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten einer nachgeführten Kollektor-anlage schwerlich. Ebenfalls sind die Montagebedingungen z. B. auf einem Satteldach für eine Nachführung ungeeignet.

Die diffuse Solarstrahlung übernimmt den Hauptteil des Energieeintrages auf den Kollektor, wenn der Himmel bewölkt und keine direkte Strahlung verfügbar ist. Für einen optimalen Eintrag der diffusen Strahlungsenergie müsste der Himmel nach der hellsten Quelle – also mit der dünnsten Wolkenschicht – abgesucht und ausgerichtet werden. Ohne eine Nach-führung sollten Kollektoren für den Einsatz von diffuser Strahlungsenergie horizontal montiert werden. Das solche Anlagen sehr selten zu sehen sind, liegt an der geringen Strahlungsintensität der diffusen Strahlung gegenüber der direkten. Aus diesem Grund wollen wir auch die direkte Strahlung als Hauptenergiequelle für eine Solarthermieanlage ansehen.

Der Aufbau einer modernen Solarthermieanlage besteht aus dem Kollektorfeld, welches festmontiert mit einem Montagewinkel von 25–90 Grad in Richtung Süden ausgerichtet ist. Der Wirkungsgrad des Moduls ist abhängig von seinem Neigungswinkel. In der Abb. 13.3 ist der Wirkungsgradverlauf bei einer festen Südausrichtung – einem festen Azimutwinkel – unter verschiedenen Neigungswinkeln dargestellt.

Die 100 % beziehen sich auf den gegebenen Wert der Wetterdaten-bank an Einstrahlleistung auf eine horizontale Fläche. Durch die Neigung vergrößert sich die direkte Einstrahlmenge. Dies ist in der Praxis durch einen größeren Schattenwurf deutlich zu erkennen.

Als Kollektorart kommen Flachkollektoren sowie Röhrenkollektoren zum Einsatz, die aufs Dach oder sogar in die Fassade montiert werden können. Natürlich können auch abweichende Montagewinkel von einer reinen Süd-ausrichtung realisiert werden. Jedoch sinkt der Wirkungsgrad der Anlage mit steigendem Differenzwinkel (Abb. 13.4).

Moderne Solarkollektoren sind vakuumisoliert, um Wärmeverluste nach außen weitestgehend zu begrenzen. Ebenfalls sind die Oberflächen, bei guten Systemen auf der strahlungsaufnehmenden Seite, mit speziellen Beschichtungen versehen. Diese sorgen dafür, dass möglichst wenig

Einstrahlungsenergie bei unterschiedlichen Neigungswinkeln

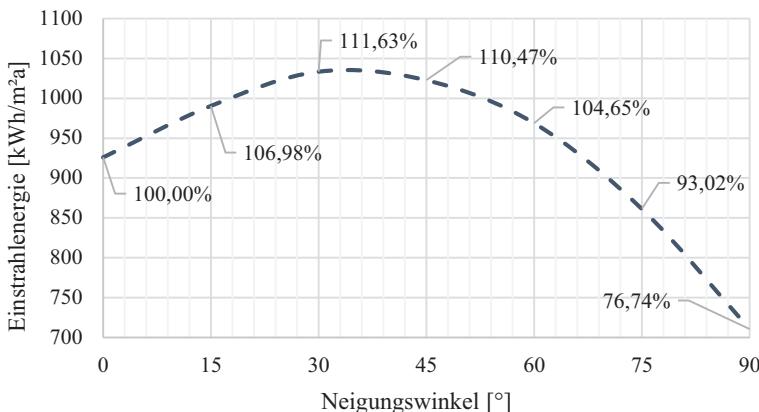


Abb. 13.3 Solare Einstrahlungsleistung bei unterschiedlichen Neigungswinkeln

Einstrahlenergie Ost-Süd-West-Ausrichtung

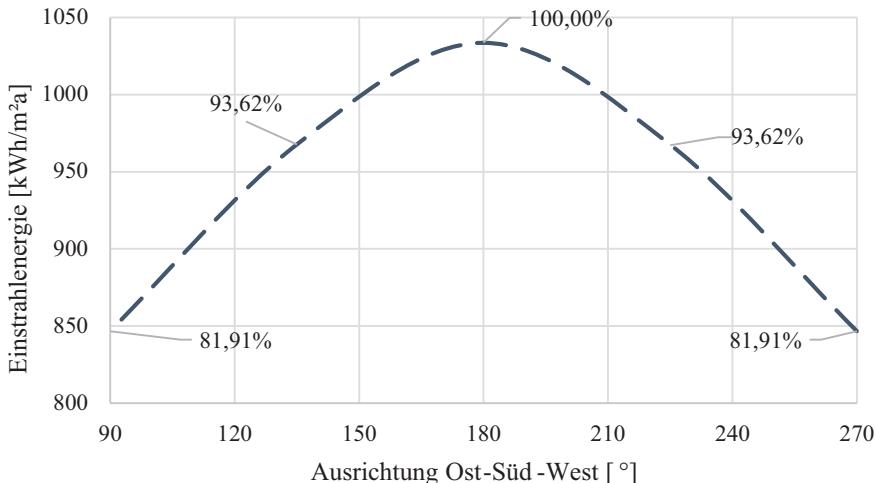


Abb. 13.4 Abweichende Einstrahlleistung bei verändertem Azimut-Winkel

Strahlungen wieder reflektiert werden und mehr thermische Energie ins System eindringt. Eine Berechnung der Anlage, einschließlich der Aufbauwinkel, sollte vom Fachmann durchgeführt werden. Die Kollektoren geben die thermische Energie an ein wärmeübertragendes Medium ab. Hier

kommt in der Regel ein Wasser-Glykol-Mix zum Einsatz, der zum einen Korrosionsschutz und zum anderen eine Frostschutzsicherung bietet.

Das erhitzte Medium wird in einem geschlossenen Kreislauf vom Kollektor durch einen Pufferspeicher geführt. In diesem gibt das heiße Medium seine Wärmenergie an das Warmwasser ab. Der Pufferspeicher ist in der Regel gut isoliert und speichert die Energie, bis der Bedarf durch den Einsatz von Warmwasser oder Heizwasser aufkommt. Der Pufferspeicher sollte ausreichend dimensioniert werden, Größen ab 300 l bis zu 1000 l sind gängige Volumina in Einfamilienhäusern.

Das Konzept der Wärmeversorgung durch Solarthermie kann auch so weit getrieben werden, dass kein weiteres Heizungssystem mehr erforderlich ist. Dafür benötigt es eine ausreichende Kollektorfläche und einen sehr großen Saisonspeicher. Der Saisonspeicher muss eine sehr gute Isolierung aufweisen. Häufig arbeiten diese nach dem Schichtladungsprinzip. Bei der Schichtladung werden temperaturabhängige Dichteunterschiede im speichernden Medium ausgenutzt. Je wärmer das Medium ist, desto geringer ist die Dichte⁶. Somit steht heißes Wasser oben im Speicher und das warme schichtet sich unten auf.

Eine reine Wärmeversorgung über eine Solarthermieanlage erfordert hohe Investitionskosten, jedoch sinken die Betriebskosten auf ein Minimum ab. Obwohl solche Anlagen einer sorgfältigen Planung unterliegen, kann es zu Unvorhersehbarkeiten gerade in der solaren Prognose kommen. Damit die Bewohner nicht im Kalten stehen haben solche Anlagen immer einen elektrischen Zuheizer installiert. Das gibt die Sicherheit, auch in Ausnahmefällen versorgt zu werden. Es birgt aber die Gefahr, dass bei einer falschen Planung oder Installation ständig zugeheizt wird. Das würde den Betriebsvorteil verkleinern oder sogar eliminieren.

Reine Solarthermieanlagen haben einen marginalen Anteil in der Beheizungsstruktur im Neubau (Stand 2018). Als Kombination mit einer Primärenergiequelle sind sie aber nicht wegzudenken.

13.4.1 Solarthermieanlage zur Warmwasserunterstützung

Als Erstes soll eine Solarthermieanlage zur Unterstützung für die Warmwasseraufbereitung untersucht werden. Nach der DIN 4108 wird der Warmwasserbedarf mit 12,5 kWh/m² und Jahr angesetzt. Als Faustformel in

⁶Wasser bietet hier eine Anomalität, welche aber bei Temperaturen über 4 °C zu vernachlässigen sind.

der Praxis gelten für den Wärmespeicher 80 l und für die Solarthermiefläche 1 bis 1,5 m² pro Person als eine sinnvolle Dimensionierungsgröße. Dies gilt es zu überprüfen (Abb. 13.5).

In unserem Beispiel setzen wir wieder das Referenzhaus mit 150 m² Wohnfläche an und gehen davon aus, es vier Bewohnern gibt. Somit ergibt sich ein Warmwasserbedarf von 1875 kWh pro Jahr. Zwar ist der Bedarf im Winter etwas größer als im Sommer, doch für eine überschlägige Analyse ist ein linearer Ansatz des Bedarfs akzeptabel.

In der Abb. 13.6 sind die gemittelten Tagesbedarfslinien über ein Jahr, nach der VDI 4655 für einen durchschnittlichen Werktag und einen Sonntag, dargestellt.

Diese Grafiken sind sehr interessant, weil sie ein breites Spektrum an Verbrauchern als Mittelwert repräsentieren und somit eine Grundlage für eine allgemeine Bewertung ermöglichen. Zu sehen ist, dass der Warmwasserbedarf während eines Werktages am Morgen bis in den Vormittag hinein als hoch zu betiteln ist. Ab dem Mittag sinkt der Bedarf deutlich ab und steigt

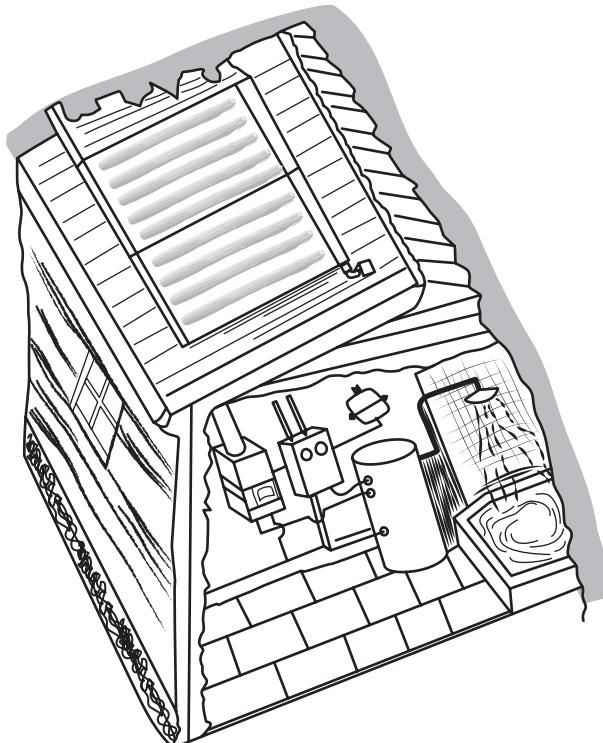


Abb. 13.5 Beispiel Solarthermieranlage Warmwasser

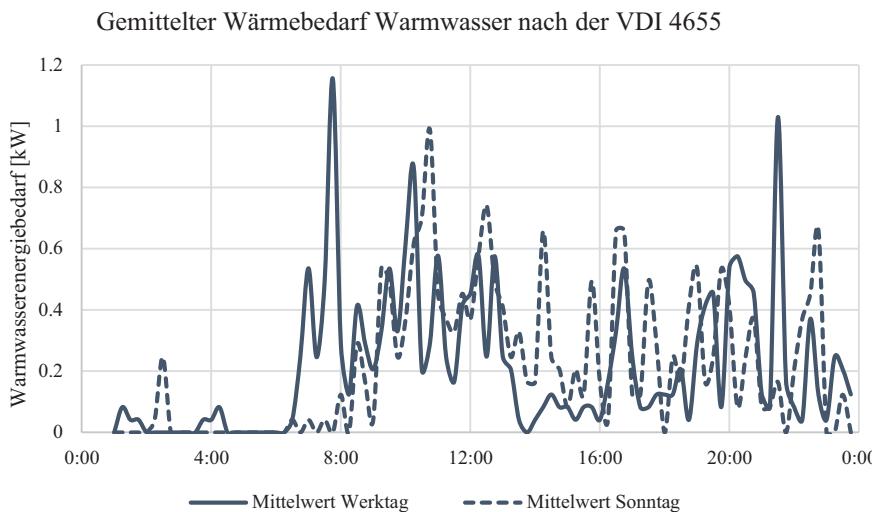


Abb. 13.6 Tagesbedarf Warmwasser nach der VDI 4655

zur Kaffeezeit wieder an. Abends genießen anscheinend viele noch eine heiße Dusche oder Badewanne und das Bild fügt sich.

Am Sonntag hingegen ist der Bedarf gleichmäßiger verteilt. Damit ein großer Anteil am Warmwasserbedarf über die Solarthermieanlage abgedeckt werden kann, ist eine ausreichende Wärmespeicherung über den Tag erforderlich. Mit der gespeicherten Wärmeenergie vom Tag kann der folgende Energiebedarf am Abend und am nächsten Morgen gedeckt werden, wenn der Speicher eine ausreichende Größe aufweist. Jedoch sollte der Speicher nicht zu groß dimensioniert sein, dann würde seine Kapazität nicht ausgenutzt werden und die Wärmeverluste über die Außenfläche wären unverhältnismäßig groß.

Um die zu speichernde Wärmemenge berechnen zu können, schauen wir uns die Tagesbedarfswerte etwas genauer an:

Der Warmwasserbedarf eines Tages ergibt 5,14 kWh. Umgerechnet in die Energieeinheit Joule sind das 18493,2 kJ.⁷ Wasser hat eine spezifische Wärmekapazität von 4,179 kJ/kgK bei 40 °C und 1 bar. Wollen wir das Wasser von 10 °C, das entspricht annähernd dem tatsächlichen Wert übers Jahr, auf 75 °C im Speicher erwärmen, dann müssen wir einem Kubikmeter Wasser 272.090 kJ an thermischer Energie zuführen.

⁷Mit Joule als Energieeinheit lässt sich einfacher rechnen.

$$Q_{1m^3} = \varrho \cdot c_F \cdot \Delta T$$

$$Q_{1m^3} = 272.090 \text{ kJ}$$

Nun ist eine große Menge an thermische Energie im Wasser gespeichert, doch nutzen können wir leider nur einen geringen Anteil. Das liegt nicht an den vernachlässigten Wärmeverlusten, sondern an der Mindesttemperatur, welche beim Warmwasser zum Schutz vor Legionellen einzuhalten ist. Des Weiteren können wir den Speicher auch nicht komplett leer fahren. Somit setzen wir die nutzbare Temperaturdifferenz auf 15 °C fest, dann sind wir nach einer Entleerung immer noch bei 60 °C.

$$Q_{1m^3} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,186 \text{ kJ/kgK} \cdot 15 \text{ K}$$

$$Q_{1m^3} = 62.790 \text{ kJ}$$

Die benötigte Speichermasse ergibt sich nun aus der Gleichung, wenn diese umgestellt wird:

$$Q_{WW_{Tag}} = m_{Sp} \cdot c_F \cdot \Delta T$$

$$m_{Sp} = \frac{Q_{WW_{Tag}}}{c_F \cdot \Delta T}$$

$$m_{Sp} = \frac{18.493,15 \text{ kJ}}{4,186 \text{ kJ/(kgK)} \cdot 15 \text{ K}}$$

$$m_{Sp} = 294,52 \text{ kg} \approx 295 \text{ l}$$

Somit ist ein Speicher von mindestens 295 l für eine Wohnfläche von 150 m² anzusetzen. Da man 30–40 m² als Wohnfläche für einen Bewohner bei einem Einfamilienhaus rechnet, kann die Faustformel mit 80 l pro Person als eine sinnvolle Näherung angesehen werden. Wir wollen nun einen Wärmespeicher mit einem Fassungsvolumen von 300 l in unser Referenzhaus einbinden.

Steht der Speicher fest, muss die Auslegung der Solarmodule bedacht werden. Egal ob Sie Flachkollektoren oder Vakuumröhren einsetzen, der thermische Wirkungsgrad liegt im direkten Zusammenhang mit der

Einstrahlleistung, dem Einstrahlwinkel und den Verlusten. Als Verluste sind vor allem vier unterschiedliche Quellen anzusetzen:

- Verluste durch die Kollektorabdeckung durch Absorption/Reflexion der eintreffenden Sonnenstrahlen und durch Verluste durch Wärmeleitung.
- Reflexionsverluste des Absorbers
- Wärmeverluste durch das Kollektorgehäuse
- Verschattungsverluste

Plattenkollektoren haben bei einer senkrechten Ausrichtung zur Sonne einen besseren Wirkungsgrad als Röhrenkollektoren. Verändert sich der Einstrahlwinkel, dann gewinnen die Röhrenkollektoren aber gegenüber dem Plattenkollektor an Effizienz. Dieser Effekt ist vor allem auf die Reflexion an der Abdeckung zurück zu führen.

Die Wärmeverluste über das Gehäuse oder über die Abdeckung sind abhängig vom Temperaturunterschied und somit verlieren beide Kollektortypen mit steigendem Temperaturunterschied zwischen der Umgebung und dem warmen Medium an Effizienz.

Für unsere weiteren Berechnungen wird ein durchschnittlicher spezifischer Wirkungsgrad mit 65 % angesetzt. Ebenfalls wird eine ideale Südausrichtung mit einem Aufstellwinkel von 30° angesetzt. Die Wärme wird in dem 300 l Speicher gefüllt, jedoch nur, bis dieser komplett gefüllt ist.

In der Abb. 13.7 sind die Strahlungswerte über das Jahr mit dem Warmwasserbedarf unseres Referenzhauses und dem ausgewählten Speicher (300 l) kombiniert. Obwohl auch hier interne Wärmeverluste vernachlässigt worden sind, kann die Solarthermieanlage den Bedarf keinesfalls decken. Das liegt daran, dass aktuell nur ein Quadratmeter Kollektorfläche aufgebaut ist. In den solarstarken Monaten würde für eine gemittelte Deckung des Bedarfs ein weiterer Quadratmeter ausreichen. In den Wintermonaten wären im Mittel ca. 7 m² erforderlich.

Die Wetterdaten stammen wieder von der NASA für den Referenzstandort Potsdam. Ganz einfach betrachtet müssen die jährlichen Einsparungen die Investitionskosten einer Solarthermieanlage kompensieren. Eine Lebenszeit von 20 Jahren ist für eine Solarthermieanlage eine gängige Größe. In der vereinfachten Betrachtung werden die Wartungskosten genauso wie die jährlichen Preissteigerungen der Primärenergie vernachlässigt. Die Energieaufwendungen für den Betrieb der gesteuerten Umwälzpumpe verringert die jährlichen Einsparungen an Primärenergie. Die Umwälzpumpen sind in der Regel mit einer bedarfsgerechten Steuerung ausgerüstet. Sie dürfen nur so viel Förderungsleistung aufbringen, wie hydraulische Leistung erforderlich

Tägliche solare Deckungsrate/Speicherstand

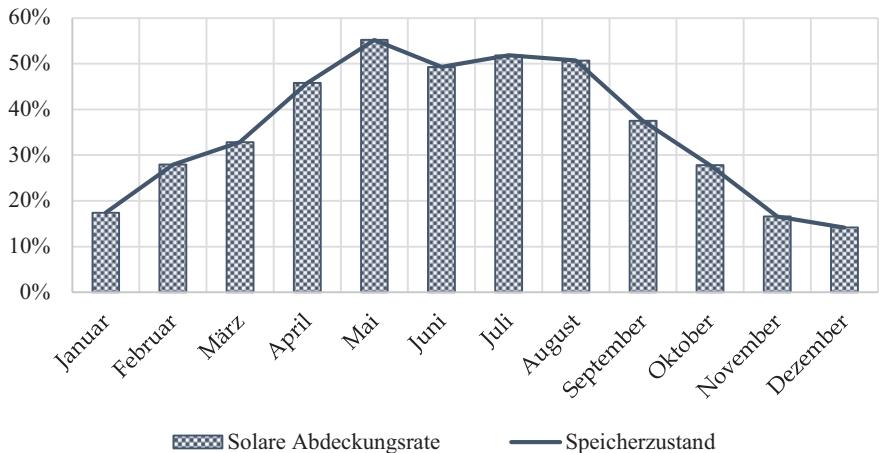


Abb. 13.7 Tägliche solare Deckungsrate/Speicherstand

ist, um die thermische Leistung in den Speicher zu bringen. Sollte die Steuerung nicht richtig arbeiten, besteht die Gefahr, dass Wärme aus dem Speicher wieder in die Kollektoren gefördert wird. In diesem Fall würde nicht nur elektrische, sondern auch thermische Energie verschenkt werden.

Eine Möglichkeit der Berechnung bildet die Gleichung (Gl. 13.1).

$$a = \frac{K_{i\text{fix}} + K_{Sp} + K_{Kf} \cdot x}{\sum_{i=\text{Jan}}^{\text{Dez.}} \{ [(q_{St\text{mtl}} \cdot \eta_{Kf} \cdot \eta_{Azi} \cdot \eta_{AW}) - q_{WL}] \cdot t_i \cdot x \cdot k_{\text{Prim.}} \} - P_{\text{Pump}} \cdot t_{\text{Pump}} \cdot k_{el}} \quad (13.1)$$

- $K_{i\text{fix}}$ = Investitionskosten [€]
- K_{Sp} = Wärmespeicher Kosten [€]
- K_{Kf} = Spezifische Kollektorkosten [€/m²]
- x = Kollektorfläche [m²]
- $q_{St\text{mtl}}$ = Solare monatliche Strahlung [kWh/d]
- η_{Kf} = *Wirkungsgrad Kollektor*
- η_{Azi} = Wirkungsgrad Azimutausrichtung
- η_{AW} = Wirkungsgrad Höhenausrichtung
- q_{WL} = Spezifischer Wärmeverlust [kWh/d]
- t_i = Monatstage [d/mth]
- $k_{\text{Prim.}}$ = Primärkosten [€/kWh]
- P_{Pump} = Pumpenleistung [kW]
- t_{Pump} = Einsatzzeit Pumpe [€/kWh]
- k_{el} = Spezifische Kosten elektrische Energie [€/kWh]

Tab. 13.1 Berechnungswerte Solarthermie

Bezeichnung	Index	Wert	Einheit
Energiebedarf Tag	Q_{BW_t}	5,14	kWh
Energiebedarf Tag	Q_{BW_t}	18493,15	kJ
Spezifischer Energiegehalt Wasser	c_F	4,186	kJ/kgK
Dichte	ϱ	1	kg/l
Temperatur Eintritt Wassernetz	T_{zu}	10	°C
Durchschnittstemperatur Speicher geladen	T_{Sp}	75	°C
Spez. Energiespeicher Wasser pro 1000 l	Q_{Br}	62790	kJ
Spez. Energiespeicher Wasser pro 1000 l	Q_{Br}	17,44	kWh
Notwendige Speichergröße Tagesenergiebedarf	m_{Sp}	294,52	l
Kollektorwirkungsgrad	η_{Kf}	65 %	%
Wirkungsgrad Anstellwinkel	η_{AW}	111 %	
Wirkungsgrad Südausrichtung	η_{Azi}	100 %	
Spezifische Energiekosten	k_{Gas}	0,08	€/kWh
Spezifische Kosten Kollektorfläche	K_{Kf}	450	€/m²
Pumpentechnik/Einbau	$K_{i_{ij}}$	650	€
300 l Speicher	K_{Sp}	750	€/Stück
Elektrische Leistung Umlölpumpe	P_{Pump}	25	W
Triebzeit pro Jahr	t_{Pump}	1825	h/a
elektrische Stromkosten	k_{el}	0,29	€/kWh

Die Werte für die Lösung der Gleichung sind in der Tab. 13.1 ingetragen. Spezifische Investitionsaufwendungen entstammen einer Mittelwertbildung aus Internetrecherchen. Die Berechnung ist aber mit Vorsicht anzuwenden, da übermäßige thermische Energien nicht gespeichert werden können und somit im Ergebnis zu Verfälschungen führen. Die Gleichung vereinfacht sich enorm, bei einer tabellarischen Auswertung.

Die monatlichen Einstrahlleistungen werden zuerst mit den Verlusten auf die tatsächlich übertragene thermische Energie pro Quadratmeter bezogen:

$$q_{KF} = q_{St_{mtl}} \cdot \eta_{Kf} \cdot \eta_{Azi} \cdot \eta_{AW} - q_{WL} \quad (13.2)$$

Die aufgenommene Wärmemenge des Kollektors reduziert sich nicht nur durch die Einstrahlungsverhältnisse und die Ausrichtungen, sondern auch durch die Wärmeverluste q_{WL} vom Kollektor an die Umgebung. Der Kollektor erwärmt sich und verliert Wärme über die innenliegende Isolation und das Kollektorgehäuse. Der Wärmestrom kann über den Wärmeleitwert der eingesetzten Isolierung, der Isolierstärke und der treibenden Temperaturdifferenz zwischen der Kollektoroberfläche und der Umgebung mit der Gleichung GL. 13.3 berechnet werden.

Anschließend erfolgt die Multiplikation mit der zu bewertenden Kollektorfläche. In der Tab. 13.2 sind zwei Quadratmeter Nettokollektorfläche angesetzt worden. Das führt zur gesamten Kollektorleistung.

$$Q_{KF} = q_{KF} \cdot x \quad (13.3)$$

Die vermiedene Primärenergie beschreibt die Warmwassermenge, die von der Solarthermieanlage aufbereitet wurde, ohne den Einsatz einer Heizenergiewandlung z. B. aus Erdgas. Die maximale Einsparleistung wird durch den Warmwasserbedarf begrenzt. Aus diesem Grund ist die Leistung im Mai auf 100 % Einsparung begrenzt.

Abschließend wird die täglich eingesparte Energiemenge mit den Monatstagen zu den Monatswerten multipliziert.

$$a = \frac{K_{fix} + K_{Sp} + K_{Kf} \cdot x}{Q_{KF_a} \cdot k_{Prim.} - P_{Pump} \cdot t_{Pump} \cdot k_{el}} \quad (13.4)$$

Für das Beispiel mit zwei Quadratmetern und den Tabellenwerten ergibt sich:

$$a = \frac{650\text{€} + 750\text{€} + 450\text{€}/m^2 \cdot 2 m^2}{1278,9 \text{ kWh/a} \cdot 0,08\text{€}/\text{kWh} - 0,025 \text{ kW} \cdot 1825 \text{ h/a} \cdot 0,29\text{€}/\text{kWh}}$$

$$a = 25,82 \text{ Jahre}$$

Die Anlage würde ihre Investitionskosten nach ca. 26 Jahren kompensiert haben und anschließend die Kosten senken. Natürlich könnten die Wartungskosten und Preissteigerungen für die volatilen Energien im Nenner eingebunden werden.

Die Berechnungen setzen voraus, dass ein ausreichend großer Speicher für eine Speicherung über 24 Stunden vorgesehen wurde. Der Speicher wurde am Anfang des Abschnitts dimensioniert. Da es sich bei den Einstrahlleistungen und dem Warmwasserbedarf um tägliche Durchschnittswerte handelt, kann ein etwas größerer Speicher kompensierende Arbeit leisten.

Der Kostenverlauf nach Tab. 13.2 ist in der Abb. 13.8 aufgezeigt.

Stellt man die Kollektorfläche der Amortisationszeit gegenüber, dann ist deutlich zu erkennen, dass mit steigendem nicht nutzbarem Anteil in den Sommermonaten, durch eine überdimensionierte Kollektorfläche die Amortisationszeit steigt (Abb. 13.9).

Die anfängliche Aussage, dass pro Bewohner eine Kollektorfläche von 1 bis 1,5 Quadratmeter zur Verfügung zu stellen ist, muss nach den Ergebnissen der durchgeföhrten Berechnungen eher auf 0,75 m² pro Kopf gesenkt

Tab. 13.2 Tabellarische Berechnung solare Deckung Warmwasser

Nat	Solare Einstrahlung NASA [kWh/m ² d]	Wärme-verlust-leistung [kWh/m ² d]	Spezifischer Kollektorertrag [kWh/ m ² d]	Kollektorleistung gesamt [kWh/d]	Bedarf WW [kWh/d]	Vermiene Energie [h/d]	Anteil [%]	Monats-tage [d]	Energieein-sparung [kWh/ mtl]
Januar	1,24	0,208	0,80	1,59	5,14	1,59	31,02 %	31,00	49,40
Februar	1,99	0,255	1,36	2,71	5,14	2,71	52,84 %	28,00	76,00
März	2,34	0,264	1,63	3,26	5,14	3,26	63,53 %	31,00	101,16
April	3,26	0,281	2,36	4,72	5,14	4,72	91,89 %	30,00	141,61
Mai	3,93	0,286	2,90	5,80	5,14	5,14	100,00 %	31,00	159,25
Juni	3,51	0,300	2,54	5,09	5,14	5,09	99,04 %	31,00	157,71
Juli	3,69	0,280	2,71	5,42	5,14	5,14	100,00 %	30,00	154,11
August	3,61	0,250	2,68	5,35	5,14	5,14	100,00 %	31,00	159,25
September	2,67	0,246	1,92	3,83	5,14	3,83	74,64 %	30,00	115,03
Oktober	1,98	0,236	1,37	2,74	5,14	2,74	53,26 %	31,00	84,81
November	1,18	0,244	0,71	1,43	5,14	1,43	27,74 %	30,00	42,75
Dezember	1,01	0,208	0,61	1,22	5,14	1,22	23,75 %	31,00	37,82

Kosten Solarthermieanlage Warmwasser

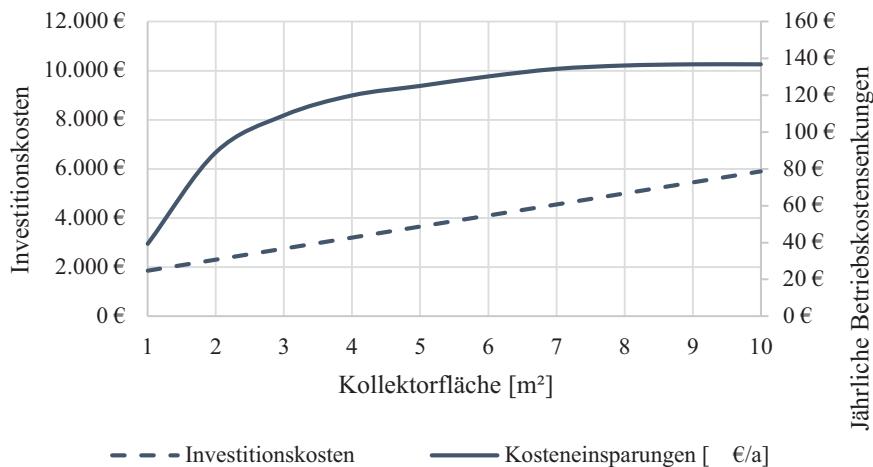


Abb. 13.8 Kostenverlauf Solarthermieanlage Warmwasser

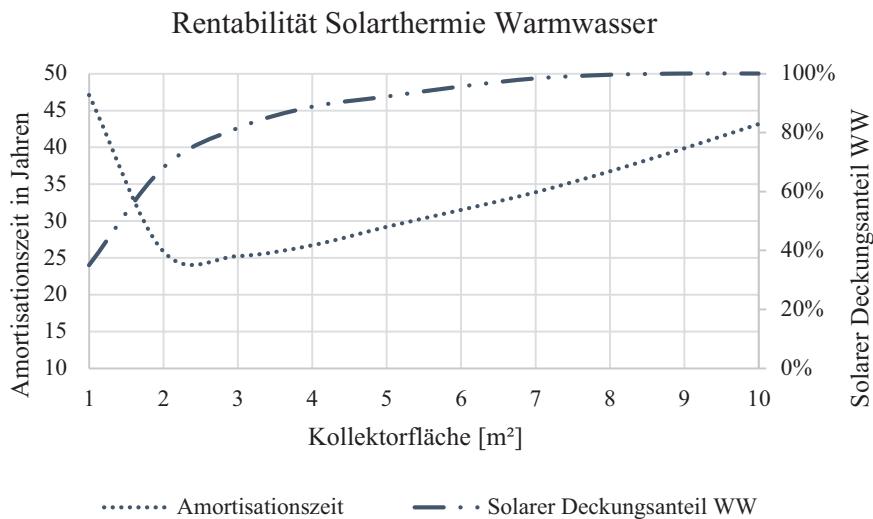


Abb. 13.9 Rentabilität Solarthermieanlage Warmwasser (WW)

werden. Daher ist es auch hier von entscheidender Bedeutung, dass Sie Ihre Kosten und Verbräuche, sowie die geografischen Randbedingungen individuell betrachten.

13.4.2 Solarthermieanlage zur Heizungsunterstützung

Soll die Solarthermieanlage erweitert zur Warmwasseraufbereitung das Heizungssystem unterstützen, dann muss neben einer Erweiterung der Kollektorflächen auch die Speicherleistung angepasst werden. Dies erfordert Kosten und benötigt Raum für die Wärmespeicheranlage. Wird die Anlage richtig dimensioniert, dann können bis zu 50 % Primärenergie eingespart werden. Auch hier gibt es Faustformeln für eine Auslegung. Pro Person sollten 2,5 bis 4 Quadratmeter und mindestens 50 l Extraspeichervermögen eingebunden werden. Die Berechnung erfolgt analog zu den Berechnungen für die Solarthermieanlage für die Warmwasseraufbereitung, jedoch muss nun die ungleichmäßig verteilte Heizlast über das Jahr berücksichtigt werden.

In der Abb. 13.10 sind die Heizgradtage für den Standort Potsdam als Mittelwert über 20 Jahre eingetragen. Die Daten stammen von der NASA und beziehen sich auf eine Temperaturgrenze von 18,3 °C – für deutsche Breitengrade sind 15 °C als Bezugswert gängig. Die daraus ergebenden Abweichungen in der Analyse können aufgrund einer Beziehung auf den Referenzhausverbrauch vernachlässigt werden. Der Jahresheizungsenergiebedarf wird über die Heizgradtage auf die jeweiligen täglichen Warmwasserverbräuche hinzugaddiert (siehe Tab. 13.3).

Die Tabellenwerte beziehen sich auf den Einsatz von neun Quadratmetern Kollektorabsorberfläche, dies entspricht 2,25 Quadratmeter pro Bewohner. Bei dieser Fläche und einem Speicher von 500 l (Kosten angesetzt mit 1050,- €) kann die gesamte solare Einstrahlleistung im Durchschnitt eingebunden werden.

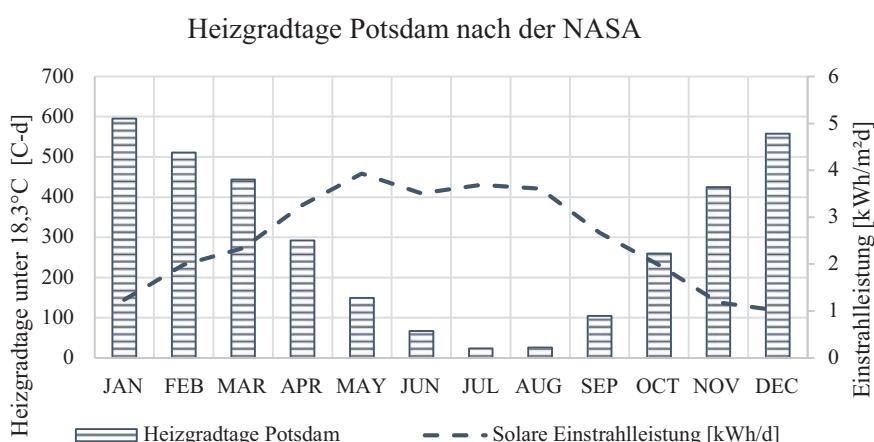


Abb. 13.10 Heizgradtage Potsdam

Tab. 13.3 Solarthermieanlage Warmwasser (WW) und Heizwasser (HW)

Monat	Solare Einstrahlung NASA [kWh/m ² d]	Wärmeverlustleistung [kWh/m ² d]	Spezifischer Kollektorenergie- ertrag [kWh/m ² d]	Kollektor- leistung gesamt [kWh/d]	Bedarf WW [kWh/d]	Heizungs- bedarf gesamt [kWh/d]	Wärme- bedarf gesamt [kWh/d]	Ver- miedene Primär- energie [kWh/d]	Anteil [%]	Monats- tage [d]	Energie- einsparung [kWh/ mtl.]
Januar	1,24	0,208	0,80	7,17	5,14	64,63	69,76	7,17	10,28 %	31,00	222,29
Februar	1,99	0,255	1,36	12,22	5,14	61,39	66,53	12,22	18,36 %	28,00	342,02
März	2,34	0,264	1,63	14,68	5,14	48,20	53,34	14,68	27,53 %	31,00	455,23
April	3,26	0,281	2,36	21,24	5,14	32,80	37,94	21,24	55,99 %	30,00	637,22
Mai	3,93	0,286	2,90	26,09	5,14	16,21	21,34	21,34	100,00 %	31,00	661,61
Juni	3,51	0,300	2,54	22,89	5,14	0,00	5,14	5,14	100,00 %	31,00	159,25
Juli	3,69	0,280	2,71	24,39	5,14	0,00	5,14	5,14	100,00 %	30,00	154,11
August	3,61	0,250	2,68	24,08	5,14	0,00	5,14	5,14	100,00 %	31,00	159,25
September	2,67	0,246	1,92	17,25	5,14	11,68	16,82	16,82	100,00 %	30,00	504,55
Oktober	1,98	0,236	1,37	12,31	5,14	28,19	33,32	12,31	36,95 %	31,00	381,66
November	1,18	0,244	0,71	6,41	5,14	47,66	52,79	6,41	12,15 %	30,00	192,39
Dezember	1,01	0,208	0,61	5,49	5,14	60,58	65,71	5,49	8,35 %	31,00	170,17

Wird die Kollektorfläche weiter vergrößert, dann steigt zwar der Wirkungsgrad der Anlage, jedoch nimmt auch der Anteil an der nicht nutzbaren Energie im Sommer zu. Dies ist sehr deutlich an dem Steigungsabfall der Kosteneinsparungsgraden in der Abb. 13.11 zu erkennen. Durch den ungünstigen, konträren Verlauf der Solarleistung und dem gegenläufigen Heizungswärmebedarf kann die Wärme nicht oder nur bedingt integriert werden.

Der solare Deckungsanteil verliert an Steigung ab einer Kollektorfläche von 9 m^2 , jedoch erreicht die beste und somit geringste Amortisationszeit ihr Optimum bei 12 m^2 . Die langen Amortisationszeiten von über 27 Jahren sind eine Herausforderung für die ökonomische Vorteilhaftigkeit (Abb. 13.12 und 13.13).

13.4.3 Saisonspeicher

Als Lösungsansatz für das Problem der zeitlichen Differenz zwischen der größten Einstrahlleistung und der Phase des höchsten Wärmebedarfs, kann ein sogenannter Saisonspeicher dienen. Der Speicher muss den Hauptanteil des jährlichen Wärmebedarfs in den warmen, sonnenreichen Monaten aufnehmen und diese an den kalten Tagen zur Verfügung stellen. Kurz gesagt muss der Speicher die Wärme für die Wintermonate in den Sommermonaten aufnehmen. Damit dies gelingt, sind sehr große Schichtspeicher notwendig, die einen minimalen Wärmeverlust über einen langen

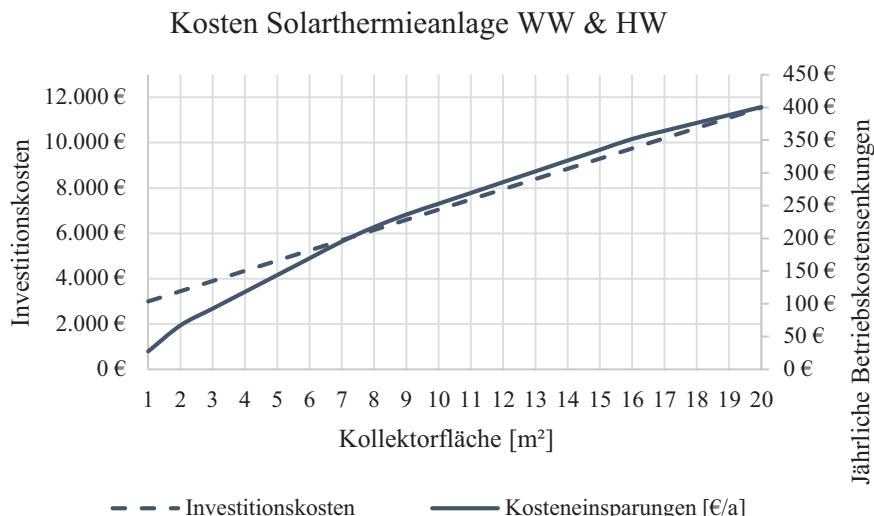


Abb. 13.11 Kosten Solarthermieanlage Warmwasser (WW) und Heizwasser (HW)

Rentabilität Solarthermie WW & HW

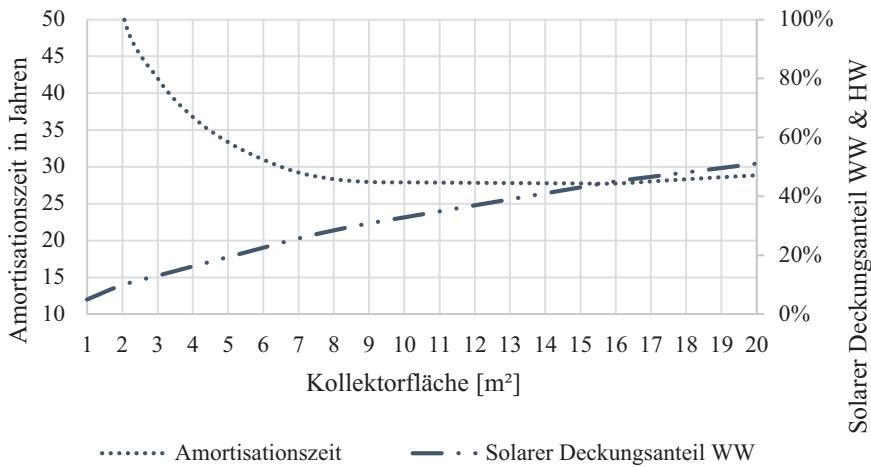


Abb. 13.12 Rentabilität Solarthermie Warmwasser (WW) und Heizwasser (HW)

Tägliche solare Deckungsrate/Speicherstand

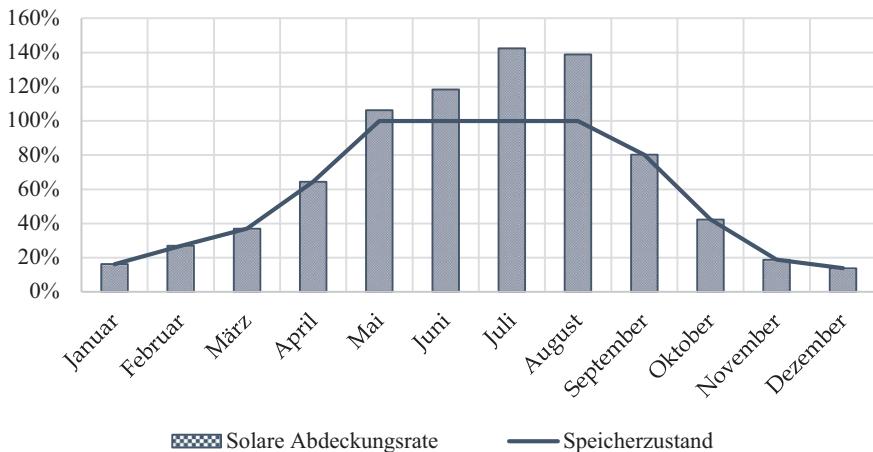


Abb. 13.13 Tägliche solare Deckungsrate/Speicherzustand Warmwasser (WW) und Heizwasser (HW)

Zeitraum sicherstellen. Diese Speicher sind sehr teuer und benötigen einen hohen Platzbedarf. Um die Speichergröße und somit die Kosten zu reduzieren, muss das zu beheizende Haus extrem gut gedämmt und luftdicht abgeschlossen sein. Ein Passivhaus bietet sich für den Einsatz eines

Saison speichers an. Falls die Sonne über eine längere Zeit nicht zur Verfügung steht und der Speicher leer gefahren ist, bietet eine elektrische Notheizung Schutz vor einem kalten Zuhause.

In Dänemark wird ein anderer Denkansatz verfolgt und bei Neubauten umgesetzt. Es handelt sich hierbei um die Sektorenkopplung. So gibt es vermehrt Anlagen, die das Verfahren Power to Heat ansetzen. Dabei wird überschüssiger Strom z. B. von Windkraftanlagen lieber in großen unterirdischen Warmwassertanks gespeist, als dass die Windenergieanlagen abgeregelt werden. Somit kann auch ein primär solargespeister Erdtank an kalten Tagen regenerative Energie aufnehmen von einer sekundären Quelle. Es gibt so große Speicheranlagen, das kleine Dörfer, ja sogar Städte zuverlässig mit Wärme versorgt werden können. In Deutschland ist dieses Verfahren noch nicht etabliert. Grund hierfür ist unter anderem die Gesetzgebung, die einen sinnvollen Einsatz von Energieströmen zwischen unterschiedlichen Sektoren erschwert.

13.4.4 Ökologische Bewertung Solarthermieanlage

Basierend auf den Ertragsrechnungen und den einhergehenden Primärenergieeinsparungen wird nun die ökologische Auswirkung der Solarthermieanlage untersucht. Beispielhaft wollen wir eine Solarthermieanlage mit 9 m² Flachkollektorfläche und einem 500 l Speichertank berechnen. Der 500 l Speichertank mit einer Masse von 250 kg wird jedoch nur anteilig in die Bilanzierung einbezogen. Auch für eine konventionelle Heizungsanlage empfiehlt sich ein Speichertank. Dieser wäre jedoch kleiner dimensioniert worden. Der Vergleichstank wird mit 160 l und einem Trockengewicht von 86 kg angerechnet.

In der Abb. 13.14 sind die jeweiligen CO₂ äq. Emissionen für die Lebenszyklusphasen der Herstellung A1-A3, des Transports C2, dem Rückbau C4 und dem Recycling D berücksichtigt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Treibhausgasemissionen für die Kollektormodule und den Wärmespeicher die größten ökologischen Belastungen darstellen. Anschließend kommen die Isolierungen für die Rohrleitungen und dem Speicher hinzu.

In der Tab. 13.4 finden eine Auflistung der Werte und ein Vergleich der ökologischen Aufwendungen zwischen einer Anlage mit Flachkollektoren und Röhrenkollektoren statt. Zusätzlich wurden die Primärenergieaufwendungen der jeweiligen Komponenten eingetragen.⁸

⁸Quelle: <https://www.oekobaudat.de/>; Stand 20.07.2019.

Verteilung CO₂ äq.-Aufwand 9 m² Solarthermieanlage

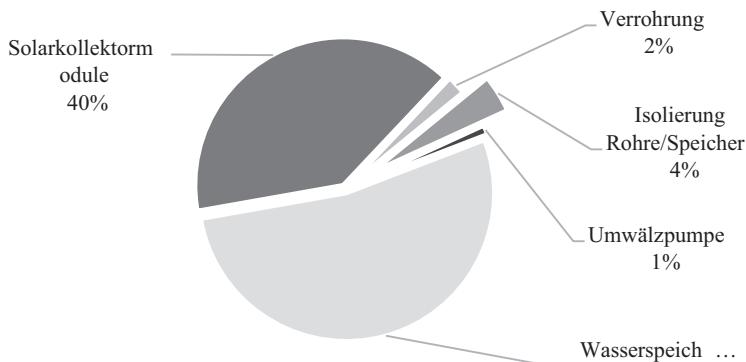


Abb. 13.14 Verteilung Treibhausgasemissionen Solarthermieanlage mit 9 m² Fläche

Tab. 13.4 Ökologische Aufwendungen Solarthermieanlage. (Quelle: Ökobaudat.de)

Komponenten	CO ₂ äq. Emissionen [kg CO ₂ äq.]		Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT) [MJ]	
	Flachkollektor	Rohrkollektor	Flachkollektor	Rohrkollektor
Spezifische Solarkollektorfläche [pro m ²]	460,74	681,53	5943,88	5943,88
Polybutadien-Rohr; m=4 kg	23,69	23,69	355,28	355,28
Polyurethan-Isolierung; V=0,24 m ³	47,23	47,23	936,95	936,95
Umwälzpumpe kleiner 50 W	11,47	11,47	156,42	156,42
Wasserspeicher 500 l; m=250 kg	614,09	614,09	7612,65	7612,65
Summe Erstaufwendungen	1157,22	1378,01	15.005,18	15.005,18

Als Referenzwert für die thermische Energiebereitstellung wird eine Gasbrennwerttherme angesetzt mit einem idealisierten Wirkungsgrad von 100 %.

Vereinfacht werden folgende Werte eingesetzt:

Bezeichnung	CO ₂ äq. Emissionen [kg CO ₂ äq.]	Primärenergiefaktor
Erdgas 1 kWh	0,259	1,1
Strom 1 kWh	0,489	1,8

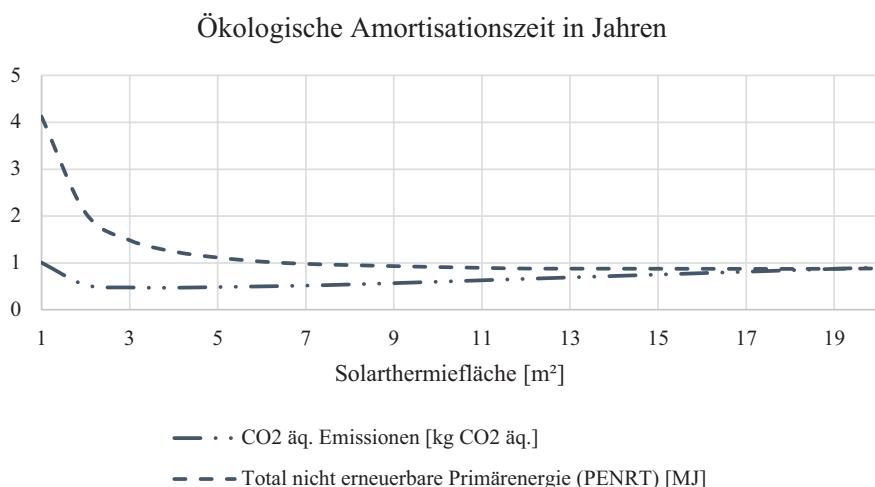


Abb. 13.15 Ökologische Amortisationszeit Solarthermieanlage

Die Berechnungen für den Carbon Footprint und dem Primärenergieaufwand erfolgen analog zueinander:

$$a = \frac{CF_{\text{Solarth.}} - CF_{\text{Sp.ref.}}}{Q_{KF_a} \cdot cf_{\text{Prim.}} - P_{\text{Pump}} \cdot t_{\text{Pump}} \cdot cf_{\text{el}}} \quad (13.5)$$

$$a = \frac{KEA_{\text{Solarth.}} - KEA_{\text{Sp.ref.}}}{Q_{KF_a} \cdot KEA_{\text{Prim.}} - P_{\text{Pump}} \cdot t_{\text{Pump}} \cdot KEA_{\text{el}}} \quad (13.6)$$

Die resultierenden Amortisationszeiten sind in der Abb. 13.15 dargestellt. Im Gegensatz zur ökonomischen Bewertung sind die Amortisationszeiten aus ökologischer Sicht sowohl bei den Treibhausgasen als auch bei dem Primärenergieaufwand sehr schnell erreicht.

13.4.5 Fazit Solarthermieanlage

In den vorangegangenen Analysen konnten wir feststellen, dass eine Solarthermieanlage den regenerativen Energieanteil nach der EEG WärmeG sicherstellen und den Primärenergiebedarf eines konventionellen Heizungssystems senken kann. Solare Unterstützungen für die Warmwasserbereitstellung und Heizungsunterstützung ist aus ökologischer Betrachtung sinnvoll und mit nicht allzu großem Aufwand realisierbar. Sie kann nicht nur den

Jahresenergiebedarf senken, sondern sie kann auch das primäre Heizungssystem in seiner Effizienz verbessern. Moderne Gebäude arbeiten häufig mit Fußbodenheizungen die sehr geringe Vor- und Rücklauftemperaturen erfordern, was dem Wirkungsgrad der meisten Heizungssysteme entgegenkommt. Das Warmwasser muss bei einer zentralen Erwärmung jedoch deutlich höher auf ca. 65 °C erwärmt und gehalten werden. Übernimmt eine Solarthermieanlage die Warmwasserbereitstellung, dann hat dies positiven Einfluss auf das Primärheizsystem. Allerdings muss erwähnt werden, dass auch Solarthermieanlagen einen besseren Wirkungsgrad bei niedrigen Rücklauftemperaturen des wärmeübertragenden Trägermediums der Solaranlage aufweisen. Somit werden die vermiedenen Verluste im primären Heizungssystem auf die Solarthermieanlage transferiert.

Aus ökonomischer Sicht ist eine Solarthermieanlage nach unseren Berechnungen grenzwertig zu beurteilen. Die Amortisationszeiten liegen im Bereich der Lebenserwartung der Solarthermieanlagenkomponenten. Kommt es zu einer Neuinvestition, dann sind monetäre Einsparungen schwerlich möglich. Das hat auch die Bundesregierung erkannt und Förderprogramme für solare Anlagen ins Leben gerufen. Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und die KfW-Bankengruppe sind die bekanntesten Förderorgane für Zuschüsse von Solaranlagen. Die BAFA fördert solare Warmwasseraufbereitungsanlagen mit mindestens 500 € und in Kombination mit einer Heizungsunterstützung mit mindestens 2000 €, maximal sind sogar bis zu 20.000 € möglich.⁹ Die KfW bietet für Neu- und Bestandsbauten besonders geförderte Investitionskredite an.¹⁰ Bei allen Förderungen sollte immer auf eine mögliche Wechselwirkung und gegenseitige Einschränkung der Förderung geachtet werden.

Natürlich müssen die vorliegenden Randbedingungen für den sinnvollen Einsatz einer Solarthermieanlage individuell geprüft werden. Kann die Solarthermieanlage nur suboptimal ausgerichtet werden oder erleidet die geplante Solarthermieanlage eine zu hohe Verschattung, z. B. durch Bäume, dann leidet die Rentabilität darunter stark. Ebenfalls ist auf den notwendigen Platzbedarf für einen ausreichenden, aber auch nicht zu großen Wärmespeicher zu achten.

Die Kombination mit einem primären Heizungssystem sorgt für eine hohe Versorgungssicherheit und vermeidet Umweltaufwendungen wie wir im vorherigen Abschnitt deutlich sehen konnten.

⁹Quelle: [36] Stand 18.11.2019.

¹⁰KfW-Kredit 151 & 167; Stand 18.11.2019.

13.5 Wärmepumpen

Während die Wärmepumpen im Jahr 2000 noch eine reine Marktranderscheinung im Gebäudesektor waren (Marktanteil im Neubau von ca. 0,6 %)¹¹, hat sich ihre Relevanz in der Zwischenzeit deutlich gesteigert. So lag der Marktanteil bei Neubauten im Jahr 2018 bei knapp 30 %.¹² Die Entwicklung der Marktanteile zeigt das Potenzial der Wärmepumpen im Bereich der Wärmeerzeugung. Dabei können die Wärmepumpen neben der Heizenergiebereitstellung auch die Erwärmung des Warmwassers realisieren.

Eine Wärmepumpe nutzt unterschiedliche Aggregatzustände mit der Hilfe von verschiedenen Drücken aus, um einem Medium gezielt innere Energie in Form von Wärme zu- und abzuführen. Als Energiequelle kann z. B. das Erdreich über Erdkollektoren oder Erdsonden fungieren. Weitere Energiequellen können Solaranlagen, das Grundwasser und die Außenluft darstellen. Die Wärmepumpe setzt sich aus vier Hauptbestandteilen zusammen, welche mit weiteren Installationsmaterialien sowie Steuer- und Regelungstechnik zu einer Gesamtanlage komplementiert werden. Die Hauptkomponenten sind der Verdampfer, der Kompressor, der Verflüssiger und das Expansionsventil. Eine schematische Grafik ist in Abb. 13.16 dargestellt.

Im nächsten Abschnitt folgt eine tiefergehende Erklärung basierend auf dem Carnotkreisprozess.

13.5.1 Der ideale Wärmepumpenprozess

Nicolas Léonard Sadi Carnot hatte sich bereits 1824 intensiv mit einer Abhandlung zum Wirkungsgrad der Dampfmaschine beschäftigt und festgestellt, dass Grenzen in der Effizienz bei Wärmekraftprozessen vorhanden sind. Seine Beschreibungen waren theoretischer Natur und basierten auf reversiblen Arbeitsschritten. Unter reversibel werden Prozesse in der Thermodynamik betitelt, die in beide Richtungen ablaufen können. Sie sind also umkehrbar. Was in der Praxis und nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik jedoch unmöglich ist. Carnot hat den reversiblen Kreisprozess als unüberwindbaren Grenzwert bei der Energieumwandlung definiert. Durch diese Leistung gilt er als einer der Grundväter der Thermodynamik.

¹¹Vgl. Platt, M., et al. (2010).

¹²Vgl. [37].

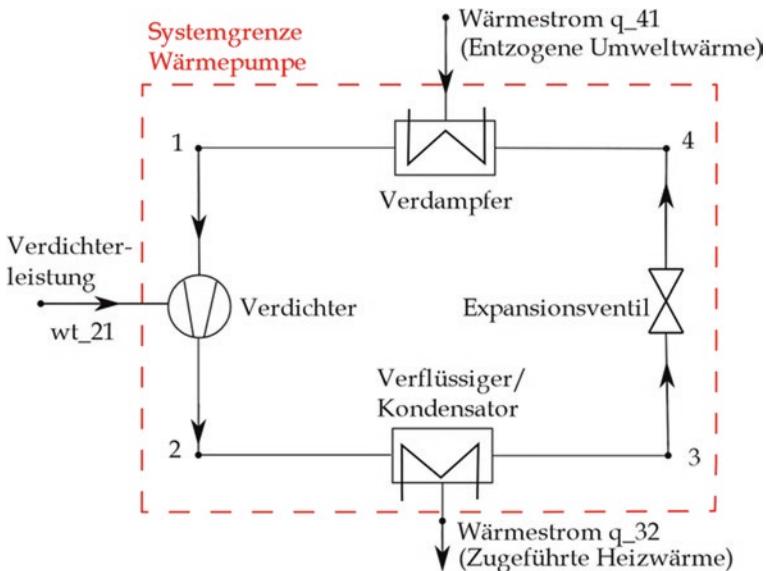


Abb. 13.16 Schemata einer Wärmepumpe

Carnot entwickelte basierend auf seinen Erkenntnissen den Carnotwirkungsgrad nach der Gleichung (Gl. 13.7). Je wärmer die heiße Seite und kälter die kalte Seite ist, desto größer ist der theoretisch zu erreichende Wirkungsgrad in einem rechtsdrehenden Kreisprozess.

$$\eta_C = 1 - \frac{T_K}{T_H} \quad (13.7)$$

η_C = Carnotwirkungsgrad [%]

T_K = Kalte Temperatur [K]

T_H = Warme Temperatur [K]

Die Dampfmaschine ist ein rechtsdrehender Kreisprozess, in dem wir thermische Energie einbringen und mechanische Energie in Form von Arbeit herausholen wollen. Gegenteilig verhält sich unsere Wärmepumpe. Mit ihr wollen wir thermische Energie bereitstellen und dafür müssen wir mechanische Arbeit investieren. Die Wärmepumpe ist ein linksdrehender Kreisprozess, wie wir in der Abb. 13.16 bereits erkennen konnten.

Der idealisierte Kreisprozess ist in der Abb. 13.17 für das Kältemittel Wasser dargestellt. Wir wollen die Verfahrensschritte einmal durchgehen und so die Funktion innerhalb der Wärmepumpe verstehen.

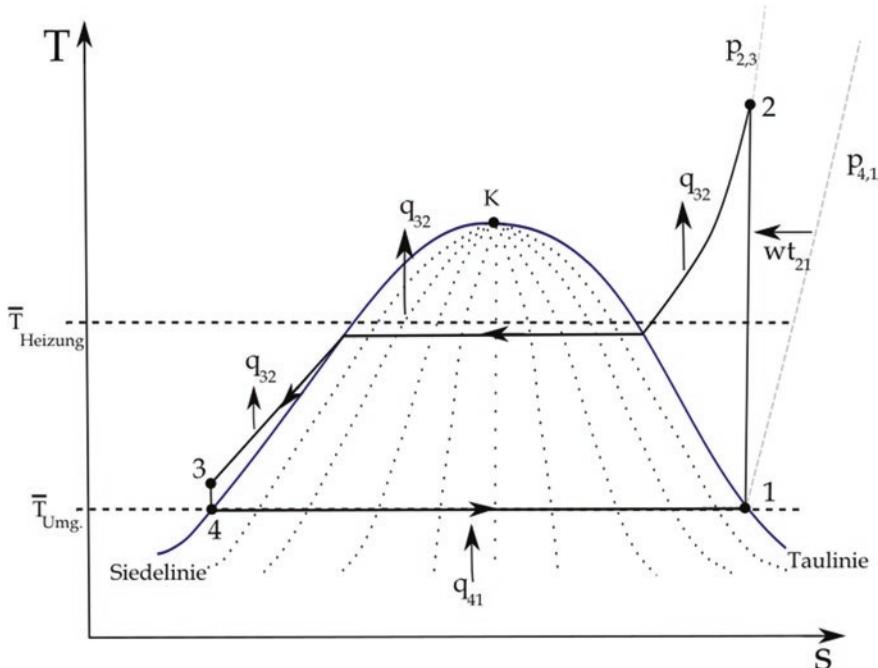


Abb. 13.17 Idealisierter Kreisprozess einer Wärmepumpe

Im Prozessschritt von 1 zu 2 erfolgt die Druckerhöhung im Verdichter. In der Thermodynamik wird von einer isentropen Verdichtung gesprochen. Die Entropie bleibt konstant. Das Gas (in Form von Wasserdampf) wird mechanisch verdichtet, wodurch Druck und Temperatur im Arbeitsfluid zunehmen.

Von 2 zu 3 wird dem warmen Kältemittel isobar¹³ Wärme entzogen. Bis zur Taueline verändert sich die Temperatur. Ab der Siedelinie erfolgt eine latente Wärmeabgabe. Bei der Kondensation, also bei der Aggregatzustandsänderung von Dampf zu Wasser, wird thermische Energie abgegeben bis das Medium vollständig auskondensiert ist. Ab der Taueline liegt nur noch Wasser in flüssiger Form vor und bei einer Wärmeabgabe sinkt die Temperatur auf die Positionsnummer 3 ab.

Über die Drossel wird der Druck im Prozessschritt 3 zu 4 auf ein niedrigeres Druckniveau abgesenkt, was in diesem idealisierten Diagramm überspitzt dargestellt ist.

¹³Isobar = bei konstantem Druck.

Wärme aus der Umgebung wird auf einem niedrigen Druck im Schritt von 4 zu 1 aufgenommen. Dabei sollte das Druckniveau so gewählt werden, dass die Verdampfungstemperatur unterhalb der Umgebungstemperatur liegt. Die Wärmeaufnahme von der Siede- zur Taulinie erfolgt bei konstanter Temperatur, gegenläufig zur Wärmeabgabe von 2 zu 3 wird bei der Wärmeaufnahme das Medium verdampft.

Dieser Effekt ist Ihnen vielleicht vom Kochen geläufig. Wenn das Wasser im offenen Topf erst einmal kocht, dann können Sie den Heizplattenregler voll aufdrehen und jede Menge Energie in den Topf bringen, die Temperatur des kochenden Wassers jedoch bleibt konstant. Das Wasser ändert seinen Aggregatzustand von flüssig zu gasförmig. Durch den angepassten Druck kann eine Wärmepumpe Wärmeenergie bei niedriger Temperatur aufnehmen und bei höheren wieder abgeben.

Gegenläufig zur Dampfmaschine kann der Carnotwirkungsgrad als Leistungszahl für einen linksdrehenden Prozess definiert werden.

$$\xi_C = \frac{T_H}{T_H - T_K} \quad (13.8)$$

ξ_C = Carnotleistungszahl [-]

Nun betrachteten wir in der vorherigen Abbildung einen idealen, reversiblen Prozess, dies können wir an den isentropen Zustandsänderungen von 1 zu 2 und 3 zu 4 erkennen. Ebenfalls sind isobare Zustandsänderungen¹⁴ im Verdampfer und Verflüssiger nicht mit der Realität vereinbar. Somit bietet die Leistungszahl nach Carnot eine absolute Grenze der Effizienz und ist in der Realität nicht erreichbar. Für unser Verständnis über die Grundfunktion in einer Wärmepumpe ist die Gleichung jedoch sehr aussagekräftig.

„Der reale, linkslaufende Kreisprozess einer Wärmepumpe unterscheidet sich vom idealisierten Carnotprozess in seiner Unumkehrbarkeit. Die Prozesse laufen nicht in unendlichen Zeiteinheiten ab und erfordern somit eine größere Temperaturdifferenz, daraus erfolgt unweigerlich eine Erhöhung der Entropie. Zusätzlich sind die druckverändernden Maßnahmen nicht isentrop.“ [38]

¹⁴Bei konstantem Druck.

13.5.2 Grundlage der Wärmepumpenberechnung

Im Abschn. 13.5.1 haben wir den Kreisprozess einer Wärmepumpe nach Carnot betrachtet und die Gleichung (Gl. 13.8) für die Leistungszahl nach Carnot kennengelernt. Anhand der Berechnung können wir erkennen, dass die theoretisch beste Leistungszahl bei einer geringen Temperaturspreizung zu erreichen wäre, zwischen der warmen und der kalten Seite des Kreisprozesses. Die kalte Seite (k) ist die Wärmequelle (z. B. die Außenluft bei einer Luft-/Wasserwärmepumpe) und die warme Seite (h) ist die Wärmesenke (das Heizungswasser/Warmwasser). Je größer die Leistungszahl ist, desto weniger Energie müssen wir einsetzen, um die gewünschte Nutzenergie zu erhalten. Dazu zwei Beispiele zur Verdeutlichung:

Im Frühjahr haben wir eine Außentemperatur von 15 °C und die Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung benötigt eine Temperatur von 35 °C. Da wir die absoluten Temperaturen in Kelvin betrachten, addieren wir zu den gegebenen Temperaturen in Grad Celsius den Wert 273,15 K und erhalten die absoluten Temperaturen in Kelvin.

$$\xi_C = \frac{T_H}{T_H - T_K} = \frac{(35+273,15) \text{ K}}{(35+273,15) \text{ K} - (15+273,15) \text{ K}}$$

$$\xi_C = 15,41$$

Nun befinden wir uns im kalten Winter bei –15 °C und die Wärmepumpe muss Warmwasser auf 65 °C erwärmen.

$$\xi_C = \frac{T_H}{T_H - T_K} = \frac{(65+273,15) \text{ K}}{(65+273,15) \text{ K} - (-15+273,15) \text{ K}}.$$

Während im Frühjahr eine theoretische Leistungszahl nach Carnot von über 15 möglich gewesen wäre, liegt die theoretische Leistungszahl im Winter bei der Warmwasseraufbereitung nur noch bei 4,22. Somit können wir festhalten, dass eine stabile, möglichst hohe Temperatur auf der Quellenseite einen großen Anteil an einer effizienten Anlage hat. Genau hier liegt aber auch eine Schwachstelle der Wärmepumpentechnologie. Je stabiler die Wärmequelle ist, desto teurer sind die Erschließungskosten.

In der Realität ist die Leistungszahl nach Carnot der maximale Grenzwert, der aber praktisch nicht zu erreichen ist. Daher haben die Wissenschaftler weitere Kennzahlen für die Beschreibung der Effizienz von Wärmepumpen entwickelt. Wärmepumpenhersteller nutzen den COP-Wert, um die Effizienz ihrer Anlagen darzustellen. Dabei steht COP für den Coefficient of performance.

Der COP-Wert berechnet sich aus der Enthalpieänderung auf der wärmeaufnehmenden Seite, gegenüber der eingebrachten Enthalpieänderung durch die notwendige Druckerhöhung.¹⁵ Die Berechnung erfolgt über die Gleichung (Gl. 13.9).

$$\text{COP} = \frac{h_3 - h_2}{h_2 - h_1} \quad (13.9)$$

COP = *Coefficient of performance [-]*

h = *Spezifische Enthalpie [J]*

Um eine Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Wärmequellen zu ermöglichen, wird auf Basis der DIN EN 14511 der COP-Wert bei vordefinierten Betriebspunkten bestimmt.¹⁶ Tab. 13.5 zeigt diese in Abhängigkeit des Wärmepumpentyps. Die Buchstaben vor den Temperaturen benennen lediglich die Wärmequelle, Air/Luft (A), Brine/Sole (B) und Water/Wasser (W). Auf der Sekundärseite wird die Wärme bei 35 °C wieder an das Heizungswasser abgegeben.

Der COP-Wert gilt für bestimmte Betriebspunkt nach der Tab. 13.4 nach der DIN EN 14511. Leider sind die Betriebspunkte und vor allem die Temperaturen auf den Senken- und Quellenseiten nicht immer konstant und somit können die COP-Werte zwar theoretisch erreicht werden, in der Praxis weisen Wärmepumpen jedoch nur selten langfristig die berechneten COP-Werte auf. Aus diesem Grund wollen wir eine weitere Kennzahl für die Bewertung von Wärmepumpen betrachten.

„Die Jahresarbeitszahl, kurz JAZ, betrachtet die Effizienz der Wärmepumpe in Kombination mit der Wärmequelle über ein gesamtes Jahr. Somit ist für eine Verbrauchsanalyse die JAZ deutlich aussagekräftiger als der COP. In der JAZ steht die abgegebene Wärmemenge der Wärmepumpe in einem Jahr der zugeführten elektrischen Arbeit gegenüber.“[38]

Die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe ist die realistischste Kennzahl und kann bei einer spezifischen Berechnung und einer richtig betriebsgefährten Anlage auch wirklich erreicht werden. Berechnet wir die JAZ nach der folgenden Gleichung:

¹⁵Die Enthalpie ist eine kalorische Zustandsgleichung und setzt sich zusammen aus der inneren Energie und der Multiplikation aus Druck und spezifischem Volumen.

¹⁶Vgl. Viessmann Deutschland GmbH (2011), S. 22.

Tab. 13.5 Betriebspunkte für Wärmepumpen nach der DIN EN 14511

Wärmepumpenart	Eintrittstemperatur Wärmequelle [°C]	Vorlauftemperatur Sekundärkreis [°C]
Luft/Wasser	A 2 °C	W 35 °C
Erdwärmesonde/ Wasser	B 0 °C	W 35 °C
Wasser/Wasser	W 10 °C	W 35 °C

$$JAZ = \frac{Q_{WP}}{W_{el}} \quad (13.10)$$

JAZ = Jahresarbeitszahl [-]

W_{el} = Elektrischer Energiebedarf [Wh/a]

Q_{WP} = Wärmemenge [Wh/a]

Eine Wärmepumpe nutzt eine kostenfreie Energiequelle für die Wärmebereitstellung. Für den Kreislauf ist ein Verdichter notwendig, der das Arbeitsfluid auf ein höheres Druckniveau befördert. Anhand der Gleichung (Gl. 13.9) konnten wir bereits die beiden relevanten Prozessschritte ausfindig machen. Damit eine Wärmepumpe gegenüber einer konventionellen Heizungsanlage ökonomische Vorteile in der Betriebsphase generieren kann, müssen die Energiekosten für den Verdichter kleiner sein als die Energiekosten für die konventionelle Wärmeaufbereitung.

Wir stellen also die Betriebskosten gegenüber und erhalten die folgende Gleichung:

$$JAZ_{min_{BW}} = \frac{Q_h \cdot k_{el}}{Q_h \cdot k_{gas}} = \frac{k_{el}}{k_{gas}} = \frac{0,299 \text{ €/kWh}}{0,08 \text{ €/kWh}}$$

$$JAZ_{min} = 3,74.$$

Damit muss eine Wärmepumpe mindestens eine Jahresarbeitszahl von 3,74 erreichen, damit sie nach unseren Werten eine ökonomische Vorteilhaftigkeit gegenüber einer Gasbrennwerttherme während der Betriebsphase generieren kann. Die höheren Investitionskosten einer Wärmepumpe sind darin jedoch noch nicht berücksichtigt.

Die ökologische Vorteilhaftigkeit, bewertet über die äquivalenten Treibhausgasemissionen in der Betriebsphase, wird deutlich früher erreicht:

$$\text{JAZ}_{\min_{\text{CO}_2}} = \frac{\text{cf}_{\text{el}}}{\text{cf}_{\text{gas}}} = \frac{0,486 \text{ kg CO}_2\text{äq./kWh}}{0,256 \text{ kg CO}_2\text{aq./kWh}}$$

$$\text{JAZ}_{\min_{\text{CO}_2}} = 1,88$$

13.5.3 Wärmepumpentypen

Am Markt sind unterschiedliche Typen von Wärmepumpen verfügbar. Diese unterscheiden sich vor allem nach der genutzten Wärmequelle. Der am häufigsten eingesetzte Wärmepumpentyp ist auch gleichzeitig der einfachste mit dem geringsten Installationsaufwand, was sich wiederum in niedrigeren Investitionskosten niederschlägt. Es handelt sich um die Luft/Wasser-Wärmepumpe. Der Außenluft wird Wärme über einen außenliegenden Verdampfer entzogen. Die Wärme wird an dem innenliegenden Verflüssiger vom Wärmeübertragermedium (z. Bsp. das Kältemittel R 407 C) an den Heizkreis wieder abgegeben. Nachteilig an der Luft/Wasser-Wärmepumpen sind die Abhängigkeit zur schwankenden Außenlufttemperatur und die entstehenden Schallemissionen durch die notwendigen Lüftermotoren am Außengerät, die für eine erzwungene Luftströmung sorgen.

Die Sole/Wasser-Wärmepumpe ist bereits ein gutes Stück aufwendiger in der Installation. Sie entnimmt dem Erdreich entweder über Erdreichkollektoren oder Erdsonden die Wärme. Die Erdkollektoren werden in einer Tiefe von ca. 1,2–1,5 Metern großflächig, horizontal eingesetzt, die Erdsonden kommen in vertikaler Ausrichtung in den Boden. Die notwendige Fläche für die Kollektoren oder die Tiefe für die Sonden richtet sich nach dem Bodenentzugswert, der abhängig vom Bodenaufbau ist. Dem Boden darf nicht zu viel Wärme durch das Wärmeübertragermedium, meistens ein frostsicheres Wasser-Glykol-Gemisch, entzogen werden, da es ansonsten zu großflächigen Vereisungen im Boden kommen kann. Ebenfalls ist ein dauerhaftes Auskühlen des Bodens schlecht für die zu erreichende JAZ der Wärmepumpenanlage. Somit ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Wärmeentnahme und nachgeföhrter Wärmemenge durch solare Einstrahlung und Niederschlag notwendig. Die Berechnung des Bodenentzugswertes ist nach der Richtlinie VDI 4640 möglich. Das erwärmte Wärmeübertragermedium gibt die aufgenommene Wärme über einen Wärmeübertrager an den im Gebäude liegenden Verdampfer der Wärmepumpe ab.

Erdsonden haben gegenüber den Erdkollektoren den Vorteil, dass ab einer Tiefe von 15 m die Bodentemperaturen konstant über das Jahr und weniger Erdbewegungen notwendig sind. Jedoch erfordern tiefe Bohrungen (100 m und mehr) spezielles Equipment und sind in der Regel zulassungspflichtig.

Die Wasser/Wasser-Wärmepumpe nutzt Grundwasser als Wärmequelle. Dies bedarf einer behördlichen Genehmigung. Das Grundwasser weist ganzjährig eine relativ konstante Temperatur zwischen 8–12 °C auf. Für die direkte Nutzung des Grundwassers sind zwei Bohrungen notwendig. In der ersten Bohrung wird die Entnahmesonde installiert, welche „warmes“ Grundwasser absaugt. Nach der Wärmeabgabe des Grundwassers in der Wärmepumpe an den Verdampfer wird das „kalte“ Grundwasser an die zweite Bohrung wieder abgegeben. Da keine Beeinflussung zwischen der Entnahme- und Rückgabebohrung stattfinden sollte, sind die Bohrungen mit einem ausreichenden Abstand zueinander zu setzen. Zum Schutz vor Verschmutzungen oder aggressiven Inhaltsstoffen durch das Grundwasser werden manchmal Zwischenkreisläufe eingesetzt. Diese Schutzmaßnahme kosten auf der Kehrseite jedoch die Wärmepumpe wieder Effizienz durch zusätzliche Pumpenleistungen und notwendigen Grädigkeiten bei den zusätzlichen Wärmeübertragern. Wie bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe müssen auch hier die geografischen Randbedingungen für den Einsatz dieser Wärmepumpenart geprüft werden.

Für eine bessere Übersichtlichkeit wollen wir die unterschiedlichen Wärmepumpen bezüglich der durchschnittlichen Investitionskosten und Jahresarbeitszahlen gegenüberstellen. Es handelt sich bei den Kosten um durchschnittliche Werte für gut erreichbare Wärmequellen. Sind die Wärmequellen schwerlich erreichbar, z. B. wenn das Erdreich keinen ausreichenden Wärmeentnahmewert für den Einsatz eines Kollektors hat und ausgetauscht werden müsste oder es befinden sich Steinplatten in geplanten Bohrungsbereichen, dann können sich die Kosten deutlich erhöhen.

Grundlage unserer Betrachtungen stellt wieder unser Referenzhaus mit den bereits beschriebenen Randwerten (Tab. 13.6).

Über die durchschnittlichen Jahresarbeitszahlen berechnen sich die elektrischen Energieaufwendungen für die Pumpen, dem Verdichter und der Regelungstechnik (siehe Gleichung (Gl. 13.10)).

$$W_{el} = \frac{Q_{WP}}{JAZ} = \frac{Q_H + Q_{WW}}{JAZ}$$

Beispielhaft für die Luft/Wasser-Wärmepumpe aus der Tab. 13.7:

Tab. 13.6 Grundlage Vergleich Wärmepumpentypen

Nummer	Beschreibung	Wert	Einheit
1	Wärmebedarf Heizung im Jahr	11625	kWh/a
2	Vorlauftemperatur Heizung	38	°C
3	Warmwasserbedarf im Jahr	1875	kWh/a
4	Warmwassertemperatur	65	°C
5	Spezifische Gaskosten	0,08	€/kWh
6	Spezifische Stromkosten	0,299	€/kWh
7	Mindeste Jahresarbeitszahl ökonomisch	3,74	
8	Spezifische Treibhausgasemissionen Gas	0,259	kg CO ₂ äq./kWh
9	Spezifische Treibhausgasemissionen Strom	0,486	kg CO ₂ äq./kWh
10	Mindeste Jahresarbeitszahl ökologisch	1,88	

$$W_{el} = \frac{11625 \text{ kWh/a} + 1875 \text{ kWh/a}}{4,14} = 3260,9 \text{ kWh/a}$$

Die Kosten ergeben sich aus der einfachen Multiplikation zwischen dem Verbrauch und den spezifischen Energiekosten.

Der Zusammenhang zwischen den Investitionskosten und der zu erreichenden Jahresarbeitszahl ist in der Abb. 13.18 deutlich zu erkennen.

13.5.4 Fazit Wärmepumpen

Wärmepumpen haben durch den Einsatz von Strom, der heutzutage einen hohen regenerativen Anteil aufweist, ökologische Vorteile bei dem Primärenergieverbrauch und den emittierten Treibhausgasen. Ökonomische Vorteile sind deutlich schwieriger durch die Kosten von elektrischer Energie und die höheren Investitionskosten zu erreichen. Während die passenden Randbedingungen für den jeweiligen Wärmepumpenbetrieb sicherzustellen sind, könnten erweitert vergünstigte Stromtarife helfen, die Wärmepumpen weiter im Markt zu etablieren.

13.6 Pelletheizung

Die Pelletheizung bietet die Möglichkeit Holzpellets als biogene Festbrennstoffe einzusetzen. Das Heizen mit Holz ist näherungsweise CO₂-neutral, da die Treibhausgase, die während der Verbrennung emittiert werden, vorher im Holz aus der Atmosphäre gebunden waren. Vorteil der Pelletheizungen gegenüber den herkömmlichen biogenen Festbrennstoffheizungen, z. B. mit

Tab. 13.7 Vergleich Wärmepumpentyp

Nummer	Wärmepumpenart	Index	Jahresarbeitszahl (JAZ)	Investitionskosten [€]	jährlicher Energiebedarf WP [kWh/a]	jährliche Energiekosten WP [€/a]
1	Luft/Wasser-Wärmepumpe (A2/W35)	JAZ _{L-W}	4,14	11.500,00 €	3260,87	975,00
2	Erdreichkollektor/Wasser-Wärmepumpe (B0/W35)	JAZ _{EK-W}	4,61	14.250,00 €	2928,42	875,60
3	Erdwärmesonde/Wasser-Wärmepumpe (B0/W35)	JAZ _{E-W}	4,73	16.350,00 €	2854,12	853,38
4	Wasser/Wasser-Wärmepumpe (W10/W35)	JAZ _{W-W}	5,84	18.700,00 €	2311,64	691,18

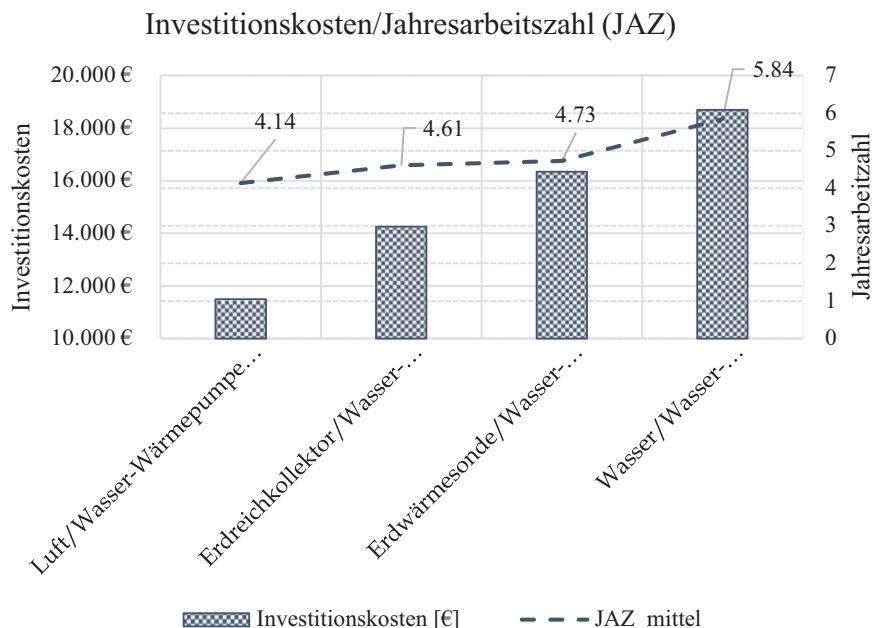


Abb. 13.18 Verhältnis Investitionskosten und Jahresarbeitszahl (JAZ) bei Wärmepumpen

Scheitholz, ist das hohe Maß der Automatisierung einer Pelletheizung. So weist eine Pelletheizung in der Bedienung während der Betriebsphase keine signifikanten Abweichungen zu einer Gasbrennwerttherme oder einem Ölkkessel auf. Die Brennstoffversorgung aus dem Vorratsspeicher erfolgt automatisiert über Förderschnecken oder durch eine Vakuumansaugung. Eine automatische Zündung, eine exakte Dosierung der Brennstoffe und die Regelung der Verbrennungsluftzuführung sorgen für Effizienzen von über 90 % und geringen Verbrennungsemissionen. Holzpellets bestehen zum größten Teil aus gepressten Holzresten der holzverarbeiteten Gewerke.

Obwohl die Pelletheizung ökologisch attraktiv und ihr Einsatz förderungsfähig ist, lag der Marktanteil im Wohnungsneubau im Jahr 2018 lediglich bei ca. 4,3 %.¹⁷ Gründe für die geringen Marktanteile sind die hohen spezifischen Investitionskosten einer Pelletheizung und dem notwendigen Zubehör. Zu den hohen Investitionskosten gesellen sich jährliche

¹⁷Vgl. [37].

Schwankungen bei den Brennstoffkosten, ähnlich wie beim Heizöl. Ebenfalls erfordert eine Pelletheizung einen großen Aufstellplatz für die Peripherie und die Speicherung der Pellets. Aus der Verbrennung verbleiben Asche und Verschlackung, die kontrolliert aus dem Brennraum gefördert werden müssen und für einen erhöhten Wartungsbedarf der Pelletheizung sorgen.

13.7 Fernwärme

Die Heizwärmeverversorgung über Fernwärmennetze ist die dritthäufigste Wärmeversorgung im Neubau und wird mit einem Anteil von ungefähr 25 % in jedem vierten Wohnungsneubau eingesetzt. Die Fernwärme besticht mit geringen Investitions- und Wartungskosten. Ebenfalls sind Reinvestitionskosten in der Energieumwandlungsanlage auf den Versorger ausgesourct. Der Versorger hingegen lässt sich die Energiewandlung und vor allem das Verteilnetz wieder von seinen Kunden vergüten, wodurch die spezifischen Energiekosten erhöht werden. Für sehr energiesparende Gebäude können durch die geringen Investitions- und Wartungskosten jedoch schnell monetäre Vorteile über die Laufzeit entstehen.

Die ökologische Bilanz ist bei Fernwärmennutzung abhängig vom Versorger und Wärmennetz. Welche Energiequelle nutzt der Versorger? Wie weit und effizient ist das Verteilnetz? Diese Punkte haben einen großen Einfluss auf die Ökobilanz und sind somit nur schwer pauschal zu bewerten.

13.8 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

In der Kraft-Wärme-Kopplung werden die Wärme- und Stromproduktion miteinander gekoppelt. Zwar verschlechtert sich der thermische Wirkungsgrad gegenüber einer Gasbrennwerttherme doch die elektrische Energiegewinnung sorgt für einen ökologischen Vorteil der KWK gegenüber der herkömmlichen Stromversorgung. Aus diesem Grund werden die dezentralen Anlagen nach der Kraft-Wärme-Kopplung staatlich gefördert. Um den positiven Effekt von Kraftwärmekopplungsanlagen aufzuzeigen, wollen wir die beiden Prozesse gegenüberstellen und den notwendigen Endenergiebedarf für die Deckung unserer Nutzenergie bewerten.

Um die Energieflüsse besser darstellen zu können, nutzen wir das Energieflussdiagramm nach Sankey und setzen die Energieflüsse ins Verhältnis zur Nutzwärme.

Für eine Vergleichsfähigkeit der beiden Konzepte sind die Nutzenergie und der zur Verfügung stehende elektrische Strom die Grundlage der rückwärtsangesetzten Berechnung. In der konventionellen Energiebereitstellung erfolgt die Wärmeerzeugung dezentral am Nutzungsplatz. Die Wandlungsverluste einer modernen Heizungsanlage (z. B. einer Brennwerttherme) sind abhängig von der eingesetzten Technik und als sehr gering anzusehen.

Die zentrale Energiewandlung in elektrische Energie hingegen hat unter sehr guten Randbedingungen das Problem (in unserem Beispiel 52,5 %), dass die Abwärme nicht genutzt werden kann. Bei der angesetzten zentralen Energiewandlungsanlage handelt es sich wahrscheinlich um ein Gas- und Dampfkraftwerk mit Nachverbrennung, Zwischenüberhitzung und Warmwasservorwärmung im Economiser¹⁸. Andernfalls liegen die Wirkungsgrade bei einer Gasturbinenanlage bei um die 40 % und bei modernen Dampfturbinen bei um die 50 % elektrischen Wirkungsgrad. In der Summe ist eine Endenergiezufuhr von über 200 % erforderlich (Abb. 13.19).

Die KWK-Anlage muss die gleichen Nutzenergiemengen bereitstellen, benötigt hierfür jedoch nur ca. 167 % Endenergiezufuhr (Abb. 13.20). Angesetzt wurde ein modernes BHKW mit einem Gesamtwirkungsgrad von 90 %. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt knapp 30 %. Die Netzverluste entfallen durch die dezentrale Erzeugung beim Verbraucher.

KWK-Anlagen erzeugen elektrische Energie, die energetisch deutlich wertvoller als thermische Energie ist. Eine Energieform ist immer dann besonders wertvoll, wenn sie unter allen Umgebungsbedingungen in der Lage ist Arbeit zu verrichten.

Um die energetische Wertigkeit zu ergründen, ist ein kleines Gedankenexperiment sinnvoll. Nach einigen Stunden auf dem Bau möchten Sie ihre mitgebrachte Suppe aus der Thermoskanne genießen. Leider ist die Isolierung nicht mehr sonderlich gut und somit hat die Suppe nur noch eine Temperatur von 35 °C. An einem warmen Tag ist die Suppe nur noch als Nahrungsquelle anzusehen. Haben wir hingegen einen eisigen kalten Winter- tag und Sie sind durchgefroren, dann kann Ihnen diese Suppe zu einem Himmelsgeschenk avancieren, sei es zum Essen oder Fingerwärmen. Wir

¹⁸Über den Economizer wird ein Teil der thermischen Energie zur Vorwärmung im Dampfturbinkreislauf eingesetzt. Dadurch wird die mittlere Prozesstemperatur angehoben, was sich positiv auf den Wirkungsgrad auswirkt.

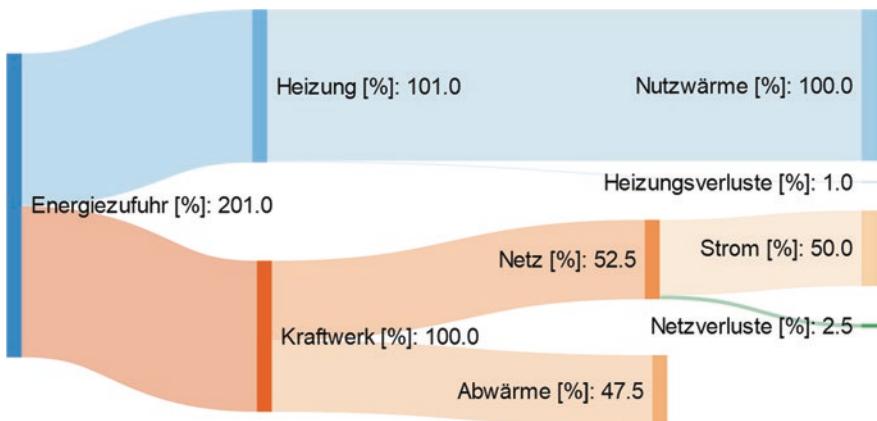


Abb. 13.19 Sankey-Diagramm konventionelle Energieversorgung

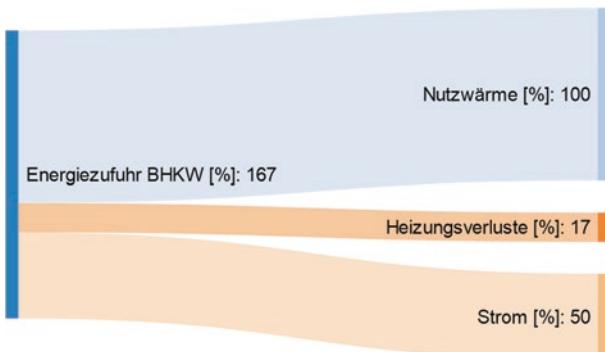


Abb. 13.20 Sankey-Diagramm Kraftwärmekopplung (KWK)

stellen fest, dass die Wertigkeit von den Umgebungsbedingungen abhängt. Elektrische Energie lässt sich fast uneingeschränkt von der Umgebung in andere Energieformen umwandeln und somit nutzen. Aus diesem Grund werden KWK-Anlagen auch in erster Linie nach dem elektrischen Wirkungsgrad bewertet und optimiert. Die Abwärme ist das praktische Nebenprodukt.

Der ökologische Vorteil einer dezentralen Energieerzeugung liegt in der kombinierten Nutzbarkeit der Energieströme. Zwar haben große Kraftwerke zur elektrischen Energieerzeugung einen besseren Wirkungsgrad als kleine dezentrale Anlagen, jedoch kann die thermische Abwärme häufig nicht genutzt werden, wodurch der Gesamtwirkungsgrad sinkt.

Die letzte Novellierung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes erfolgte zum Januar 2016. Ziel der Novellierung ist eine Steigerung des Ausbaus an

KWK-Anlagen. Die Förderungen zur Attraktivitätssteigerung werden auf die allgemeinen Strompreise umgelegt. Somit finanziert die breite Masse ein Teil der KWK-Anlagen mit, auch wenn sie keine Besitzer einer solchen Anlage ist. Das gleiche Verfahren findet bei den erneuerbaren Energien mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) statt.

Die Bezugszahlung erfolgt abhängig von der installierten elektrischen Leistung der Anlagen. Neben einer Investitionsbezugszahlung können Vergütungen für jede produzierte Kilowattstunde eingefordert werden, wenn die Anlage nach der BAFA zugelassen ist. In Ein- und kleineren Mehrfamilienhäusern kommen KWK-Anlagen mit elektrischen Leistungen von kleiner 50 kW zum Einsatz.

Bei dieser KWK-Anlagengröße gibt es eine Förderung für eigenverbrauchten Strom von 4 ct pro kWh und zusätzlich noch eine Zulage vom Netzbetreiber über die vermiedenen Netzbeanspruchungen von 0,1 bis 2 ct pro kWh. Ebenfalls fallen die Bezugskosten vom Stromversorger aus dem öffentlichen Stromnetz weg, was Einsparungen um die 29 ct/kWh bedeuten kann.

Wird der Strom eingespeist und lokal verbraucht, dann kommen zu dem verkauften Strompreis an der Leipziger-Strombörsen (aktuell ca. 3,3 ct/kWh) der KWK-Zuschlag mit 8 ct/kWh und ebenfalls die vermiedenen Netzkosten hinzu. Nach dem § 61 EEG 17 ist der Betreiber einer KWK-Anlage unter gewissen Voraussetzung verpflichtet die EEG-Umlage auf seinen eigenverbrauchten Strom zu bezahlen. Im Jahr 2018 waren das immerhin 6,792 ct/kWh. Ein Wert der die Förderungen wieder mehr als kompensiert.¹⁹

Zu beachten ist außerdem, dass die Förderungen durch den Gesetzgeber begrenzt sind auf max. 10 Jahre oder 60.000 Betriebsstunden.

13.8.1 Blockheizkraftwerk

Neben Sonderformen, wie z. B. dem Sterlingmotor sind in Blockheizkraftwerken (BHKW) in der Regel Verbrennungsmotoren nach dem Vieraktverfahren für die Energieumwandlung verantwortlich. Die chemisch gebundene Energie aus dem Kraftstoff wird im Brennraum durch eine exotherme Oxidation in Druck und Wärme gewandelt. Der Druck wirkt auf die Kolbenfläche und mechanische Arbeit wird über das Pleuel und die Kurbelwelle an einen Generator geleitet. Der Generator wandelt die

¹⁹Vgl. [39].

mechanische Arbeit in elektrische Energie. Die thermische Abwärme des Motors wird an das Kühlmittel abgegeben und anschließend dem Heizungskreislauf zugeführt. Ebenfalls werden die Abgase wie bei der Brennwerttherme abgekühlt. Die Wärme fließt zusätzlich in den Heizungskreislauf. Je nach Temperatur der Abgase am Austritt des Abgaswärmeübertragers kann die Kondensationsenergie des Wasserdampfes in den Heizprozess integriert werden.

Blockheizkraftwerke erreichen Totalwirkungsgrade von größer 90 % und Betreiber erhalten beim Einsatz von hocheffizienten Anlagen staatliche Fördermittel. BHKW weisen jedoch auch sehr hohe Investitions- und Wartungskosten auf. Aus diesem Grund sollten sie für mindestens 3500 bis 5000 Stunden im Jahr, am besten im optimalen Wirkungsgradbereich, betrieben werden. Häufige An- und Abfahrten, sowie ständige Lastwechsel verschlechtern die Bilanz eines BHKWs.

Damit ein BHKW in seinem effizienten Betriebsbereich gehalten werden kann, kommen hauptsächlich zwei Verfahren in Betracht. In der ersten Variante sollte das BHKW mit einem sehr, sehr großen Wärmespeicher kombiniert und wärmegeführt gefahren werden. Der Speicher dient zur Versorgung der Wärmeverbraucher, bestehend aus Heizungswärme und Warmwasser. Sinkt das thermische Potenzial des Speichers unter ein festgelegtes Minimum ab, startet das BHKW und fährt in seinem optimalen Betriebsbereich, bis der Wärmespeicher wieder aufgefüllt ist.

Die elegantere und wirtschaftlichere Methode ist die Kombination eines BHKWs mit einer konventionellen Brennwerttherme. Der benötigte Wärmespeicher ist ebenso wie das BHKW deutlich kleiner dimensioniert als in der vorherigen Betrachtung. Das BHKW wird nun als Grundlastversorgung geplant und das separate Heizungssystem kompensiert die Differenz zum Wärmebedarf. Somit können hohe Betriebszeiten des BHKWs im optimalen Betriebspunkt ohne ständiges An- und Abfahren realisiert werden.

Mit der Version nach der vereinfachten Darstellung aus der Abb. 13.21 können hohe Betriebslaufzeiten des Blockheizkraftwerkes über ein Kalenderjahr erreicht werden, in einem optimalen Wirkungsgradbereich. In den Sommermonaten erfolgt eine Komplettabschaltung des BHKWs, der Warmwasserbedarf wird nun ausschließlich über die Brennwerttherme und/oder einer Solarthermieanlage realisiert.

Ein BHKW lohnt sich meistens erst bei einem großen thermischen Energiebedarf, z. B. bei Mehrfamilienhäusern oder bei Gruppierungen von Wohneinheiten in einem sogenannten Nahwärmennetz. Nachteilig ist die Energiewandlung in mehreren Schritten, da in jedem Schritt auch immer

Wärmeverteilung BHKW/Brennwertkessel

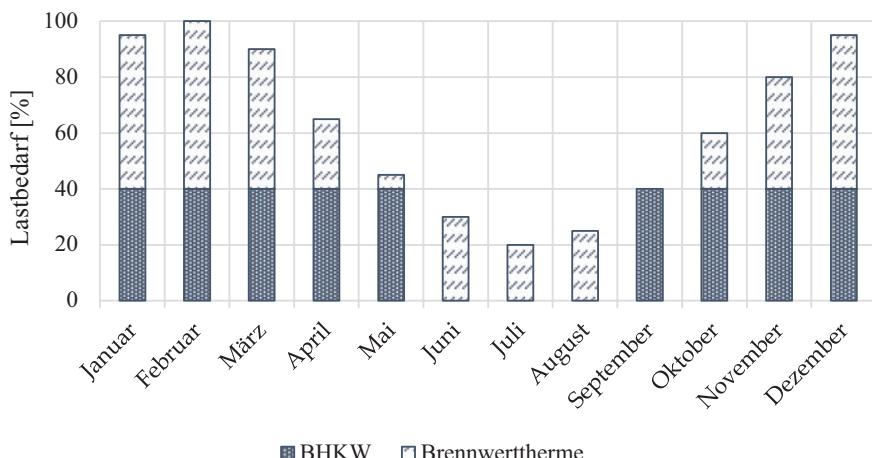
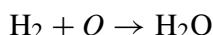


Abb. 13.21 Lastverteilung Blockheizkraftwerk/Brennwerttherme

ein wenig Dissipationsenergie erzeugt wird. Jedes sich bewegende Teil erzeugt Reibung und langfristig Abnutzungen, ein Grund für die hohen Wartungskosten und der eingeschränkten Lebenszeit eines BHWs. Obwohl der Verbrennungsmotor als Energiewandlungsanlage eine gut erforschte und beherrschbare Technologie darstellt, variieren die Lebenszeiten eines BHKWs zwischen 40.000 und 80.000 Betriebsstunden. Ebenfalls sind die hohen Geräuschemissionen negativ zu bewerten.

13.8.2 Brennstoffzelle

Der Brennstoffzellentechnologie werden große Potenziale auf dem Weg der Energiewende zugeschrieben, nicht nur im mobilen Sektor, sondern auch in der Heizungstechnologie. Während in Europa ein sehr zögerlicher Markteinzug der Brennstoffzellen stattfindet, haben die Brennstoffzellen einen erfolgreichen Start auf dem japanischen Markt verzeichnet. Grundlage der Technologie ist die Elektrolyse, bei der Wasser aufgetrennt wird in Wasserstoff und Sauerstoff. In der Brennstoffzelle läuft der Prozess rückwärts ab. Wasserstoff und Sauerstoff verbinden sich zu reinem Wasser.



Aus der Schule ist einigen dieser Ablauf sicherlich noch unter dem Begriff Knallgasreaktion bekannt. Damit es nicht zu einer plötzlichen Reaktion

kommt, müssen die Reaktanten in der Brennstoffzelle kontrolliert zusammengeführt werden. Diese Aufgabe übernimmt die Membran. Je nachdem welche Reaktanten und welche Membranen eingesetzt werden, unterscheiden sich Niedertemperatur- und Hochtemperaturbrennstoffzellen.

In Heizungsanlagen für Einfamilienhäuser kommen normalerweise Niedertemperaturbrennstoffzellen (Betriebstemperatur kleiner 100 °C) mit einer Polymermembran zum Einsatz (PEMFC). Die Membran muss feucht gehalten werden und dient somit als Elektrolyt. Sie ist durchlässig für Protonen, in unserem Fall lässt sie H⁺-Ionen durch. Damit der Wasserstoff aber zum Ion wird, muss er ein Elektron abgeben. Dies erfolgt an der Anode. Während das Wasserstoffsion durch die Membran zum Sauerstoff wandert, ist das Elektron von der Anode über den geschlossenen Stromkreis auf dem Weg zur Katode. Von der Katode wird das Elektron wieder vom Wasserstoff aufgenommen (Abb. 13.22).

Reaktion an der Anode:



Reaktion an der Kathode:



Bei der Reaktion wird nicht nur elektrische Energie frei, sondern es entsteht auch Wärme und das völlig geräuschlos (lediglich die Nebenverbraucher wie Lüfter usw. verbreiten Unruhe). Es gibt keine rotierenden Teile, was

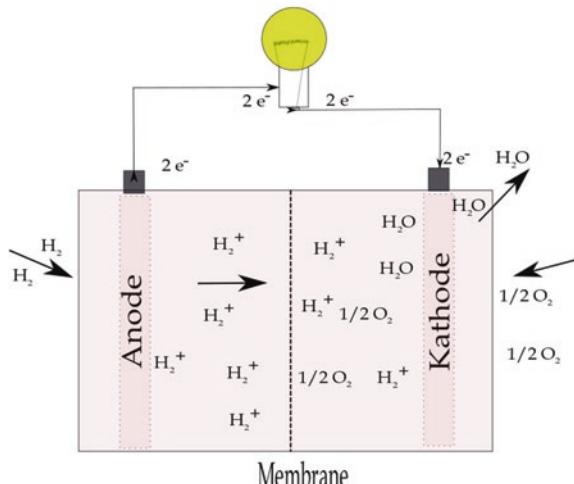


Abb. 13.22 Prinzipbild Brennstoffzelle

einem mechanischen Verschleiß zuvorkommt. Die Energiewandlung findet nicht wie bei dem BHKW in mehreren Stufen statt, sondern die chemische Energie wird direkt in unsere gewünschte Endenergie umgewandelt, wodurch der Wirkungsgrad steigt. Für Hochtemperaturbrennstoffzellen sind theoretische Wirkungsgrade größer als 65 % möglich, was die Hochtemperaturbrennstoffzellen in Kombination mit der Gasturbine zu einer der effizientesten Energiewandlungsanlagen avancieren lässt.²⁰

An den aufgezeigten Reaktionen kann aber auch schon auf das Problem der Brennstoffzelle rückgeschlossen werden. Zur sauberen Reaktion einer PEMFC-Zelle wird reiner Wasserstoff benötigt. Dieser ist in einem Haushalt aber nicht verfügbar und das Gasnetz transportiert zum größten Teil Methan (CH_4), eine Verbindung von Kohlenstoff und Wasserstoff. Die Brennstoffzelle reagiert auf Kohlenmonoxid mit einer Vergiftung des Katalysators, was letztendlich zu einem Totalausfall der Brennstoffzelle führt. Somit ist man gezwungen eine vorgeschaltete Trennung des Kohlenstoffes vom Methan vorzunehmen. Dieser Prozess kostet Energie, hierdurch wird der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle reduziert und die Investitionskosten durch den notwendigen Reformer werden steigert. Ebenfalls muss für ein effizientes System der abgespaltene Kohlenstoff energetisch genutzt werden. Ein weiterer Nachteil sind die An- und Abfahrzeiten einer Brennstoffzelle, die auf die Lebensdauer der Brennstoffzelle gehen.

Als Lösungsansatz bieten die Heizungshersteller Kombinationen von Brennstoffzellen und Brennwertthermen an. Damit die Brennstoffzelle möglichst konstant durchläuft, wird die Brennstoffzelle sehr klein dimensioniert und die Anlage muss mit einem Speicher kombiniert werden. Als aktuelles Größenverhältnis zwischen der Gasbrennwerttherme und der Brennstoffzelle kann das Verhältnis 10 zu 1 an thermischer Leistung angesetzt werden. Somit handelt es sich meistens eher um eine Brennwerttherme mit einer KWK-Erweiterung. Trotzdem bietet auch hier der Gesetzgeber Förderungen für ein Brennstoffzellenheizerät an. Für eine Förderung muss ein Wartungsvertrag mit einem autorisierten Fachhändler über 10 Jahre abgeschlossen werden. Die entstehenden Kosten sind ebenfalls nicht zu vernachlässigen.

Abschließend bleibt festzustellen, dass das Verfahren der Elektrolyse sehr wohl eine wertvolle Brückentechnologie im Bereich der Energiewende darstellen kann. Der produzierte Wasserstoff aus einer Elektrolyse, angetrieben durch nachhaltige, überschüssige Energie, kann ins vorhandene Erdgasnetz eingespeist werden. Der riesige Energiespeicher bietet dem Verfahren Power

²⁰Vgl. [40, S. 73].

to Gas eine enorme Möglichkeit. Dadurch würden nicht nur die Brennstoffzellen profitieren, sondern alle Energiewandlungsanlagen, die am Erdgasnetz angeschlossen sind und mit dem Wasserstoff arbeiten können.

13.9 Heizen mit elektrischer Energie

Während vor einigen Jahren das Heizen mit Strom noch vom Markt verdrängt werden sollte, beginnt sich das Bild der elektrischen Heizung wieder zu wandeln.²¹ Begründet ist dies vor allem durch den hohen regenerativen Energieanteil im europäischen Strommix. Der ansteigende regenerative Anteil sorgt für eine Reduzierung des Primärenergiefaktors. Verstärkt wird das Interesse am elektrischen Heizen durch den sinkenden Energiebedarf und der daraus resultierenden geringeren Heizleistung im Neubau-sektor. Bei einer kleinen Heizleistung nehmen Nebenkomponenten wie z. B. Zirkulationspumpen eine größere Gewichtung ein, was wiederum für eine nebenkomponentenfreie Anlage spricht. Muss nur eine geringe Heizenergie zur Verfügung gestellt werden, dann kann eine elektrische Heizung dies schnell und investitionskostenarm realisieren. Eine elektrische Heizung hat in der Regel keine Wartungskosten, was ebenfalls hilft das System zu präferieren.

Zur Heizwärmeerzeugung können Heizstrahler, Heizlüfter, Infrarotstrahler oder Heizflächen genutzt werden. Um eine schnelle Regelbarkeit zu gewährleisten, sollte die flexible Heizung nicht mit einer trügen Masse kombiniert werden. Das bedeutet, wird eine elektrische Flächenheizung in den Estrich als Fußbodenheizung eingebunden, dann kompensiert dies ihren Vorteil.

Dezentrale Warmwasseraufbereitungen haben den großen Vorteil, dass ein ständiger Schutz vor Legionellen unnötig wird. Das Warmwasser muss nicht mehr auf ca. 60–65 °C erwärmt werden. Die dezentralen Warmwasseraufbereiter (Durchlauferhitzer) sind einsatznah zu montieren und somit reicht eine bedarfsgesteuerte Aufheizung. Dadurch lassen sich auch ständige Wärmeverluste von einer Zirkulationsleitung verhindern, hier werden bis zu 25 % Wärmeverluste vermieden.²² Eine genauere Berechnung des Wärmeverlustes in der Zirkulationsleitung ist nach der DIN V 4701-10 über die Nutzfläche und den Verteilungsort zu ermitteln.

²¹Vgl. [41].

²²Vgl. [41, S. 16].

Des Weiteren kann in Kombination mit einem reinen Ökostromanbieter eine hohe ökologische Güte erreicht werden. Auch wenn diese nur bilanziell über das Verbundnetz begründet wird.

Bei einem sehr geringen Energiebedarf im Bereich eines Passivhauses sollte über eine elektrische Heizung nachgedacht werden. Bei höheren Energieverbräuchen kann eine Kombination Vorteile erzielen.

13.10 Vergleich der Heizungssysteme

Final wollen wir nun die unterschiedlichen Heizungssysteme miteinander vergleichen. Ein objektiver Vergleich kann jedoch nur gelingen, wenn einheitliche Randbedingungen für alle Heizungsanlagen gelten. Daher wollen wir wieder unser Referenzhaus aus dem Kap. 8. für den Vergleich nutzen. Jedes Heizungssystem muss die Heizungswärme HZ für eine Fußbodenheizung und den Warmwasserbedarf für eine vierköpfige Familie bereitstellen. Die Heizungswärmeübertragung erfolgt über eine Fußbodenheizung mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C und einer Rücklauftemperatur von 28 °C, somit können die Heizungssysteme die Kondensationsenergie des Wasserstoffs ausnutzen, der im Brennstoff gebunden ist. Ein jährlicher Warmwasserbedarf wird nach der DIN V 4108 mit 12,5 kWh pro Quadratmeter Wohnfläche angesetzt. Die entstehenden Wärmeverluste, z. B. einer Zirkulationsleitung oder des Wärmespeichers, werden über den Nutzungsgrad der jeweiligen Anlagensysteme eingebunden. Alle Wärmeverteilungsleitungen und der Wärmespeicher befinden sich innerhalb der thermischen Hülle. Diese Näherung vereinfacht die Gegenüberstellung, wenn Sie die genannten Effekte jedoch unterschiedlich bewerten wollen, dann finden Sie Richtwerte für eine Betrachtung in der DIN V 4701-10.

Die Heizungsanlage für unser Referenzhaus soll eine thermische Leistungsgroße von ca. 12 kWth aufweisen.

Die eingesetzten Parameter in den kommenden Berechnungen entstammen einer großen Bandbreite an Quellen, diese sind als Indikatoren anzusehen.²³ Für eine individuelle Bewertung sollten die lokalen Bedingungen des jeweiligen Bauprojektes berücksichtigt werden.

²³Vgl.[42]; Vgl. KWK-Gesetz (2017); Vgl. KWK-Zuschlag; Vgl. Ökobaudat.de; Vgl. [43].

13.10.1 Ökonomische Bewertung Heizungsanlagen

Grundlage der Wirtschaftlichkeitsberechnung sind die Werte aus der Tab. 13.8, in der die allgemeinen Randparameter aufgeführt sind. Neben den bereits bekannten spezifischen Energiekosten für Gas und Strom sind auch spezielle Stromangebote für Wärmepumpen und die Vergütungen für die Einspeisung von Stromerzeugnissen inkludiert.

Die Kraftwärmekopplung erhält für 10 Jahre oder 60.000 Betriebsstunden eine Förderung. Ebenfalls vergütet der Netzbetreiber den Eigenverbrauch mit einem Netzvermeidungszuschuss (Siehe Abschn. 13.8).

In der Abb. 13.23 sind die Investitionskosten der jeweiligen Systeme abgebildet. In den Investitionskosten sind neben der Heizungsanlage auch anlagenspezifische Kosten z. B. für den Schornstein, Heizungspufferspeicher (für das BHKW und die Brennstoffzelle vergrößert), die Wärmeverteilung und Übertragung im Haus, Energiespeicher (Öltank, Pelletspeicher), Anschlusskosten vom Versorger und Erschließungskosten berücksichtigt. Eine so umfangreiche Betrachtung ist notwendig, um die Gesamtkosten der Heizungssysteme miteinander vergleichen zu können. Die elektrische,

Tab. 13.8 Allgemeine Randparameter Heizungsanalyse

Pos.	Bezeichnung	Wert	Einheit
1	Spezifischer Energiebedarf	77,5	kWh/m ² a
2	Nutzfläche	150	m ²
3	Energiebedarf Heizen	11625	kWh/a
4	Bewohner des Hauses	4	Bewohner
5	Spez. Warmwasser	12,5	kWh/m ² a
6	Energiebedarf Warmwasser	1875	kWh/a
7	Gesamtenergiebedarf Wärme	13500	kWh/a
8	Spezifische Stromkosten	0,299	€/kWh
9	Spezifische Gaskosten	0,08	€/kWh
10	Spezifische Heizölkosten	0,065	€/kWh
11	Spezifische Holzpelletkosten	0,052	€/kWh
12	Spezifische Fernwärmekosten	0,098	€/kWh
13	Spezifische Stromkosten WP-Tarif	0,21	€/kWh
14	EEG Umlage Strom (Stand 2018)	0,06405	€/kWh
15	Eigenstrombedarf vier Personen	4000	kWh/a
16	Energiekosten pro Jahr Strom	1160	€/a
17	Vergütung Energiemarkt KWK	0,08	€/kWh
18	Vergütung Energiemarkt KWK	0,04	€/kWh
19	Vergütung Eigenverbrauch KWK	0,04	€/kWh
20	Vergütung Netzvermeidungszuschuss	0,01	€/kWh

Investitionskosten Heizungsanlage
mit ca. 12 kWth

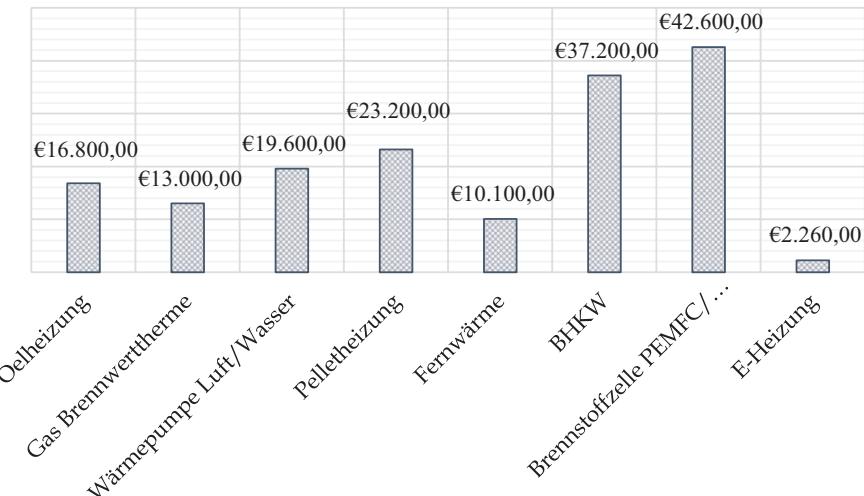


Abb. 13.23 Investitionskosten Heizungssysteme (Die Preisindikationen entstammen gemittelten Werten mehrerer Rechercheergebnisse. Zugehörige Anlagenkomponenten wurden eingebunden.)

dezentrale Heizungstechnik kann ihre ökonomischen Vorteile in der Investition voll ausspielen, es werden fast keine Zusatzkosten veranschlagt.

Bei der Brennstoffzellenheizung handelt es sich um eine kombinierte Anlage zwischen einer Brennstoffzelle und einer Gasbrennwerttherme. Die Brennstoffzelle kann lediglich eine thermische Leistung von 1,1 kW und eine elektrische von 0,75 kWe produzieren. Die restliche Wärmeproduktion findet in der Brennwerttherme statt. Trotz des geringen Brennstoffzellenanteils sind die Investitionskosten noch sehr hoch. Mit einer Weiterentwicklung und einem steigenden Marktanteil ist mit einer Verringerung der Investitionskosten zu rechnen. Ob das Preisniveau einer normalen Brennwerttherme erreicht werden kann, bleibt aber fraglich. Ebenfalls kann die Lebensdauer solcher Systeme aktuell nur prognostiziert werden, da Erfahrungswerte fehlen. Die Fernwärmeanlage ist von den Investitionskosten her sehr ansprechend, was ihr großer und ansteigender Marktanteil auch wider spiegelt. Berechnet man den spezifischen Mittelwert an Kosten für die aufgezeigten Heizungsanlagen, dann ergeben sich Kosten von 1716,25 €/kWth.

Die Investitionskosten eines Blockheizkraftwerkes sind aufgrund der vielen Komponenten deutlich über dem Durchschnitt. Sie liegen bei 3100 €/kWth.

Die jährlichen Betriebskosten setzen sich aus den fixen Kosten, wie z. B. die Wartungskosten, den Anschlusskosten des Versorgers, die intervallmäßigen Prüfkosten und den flexiblen Energieversorgungsaufwendungen zusammen. In den jährlichen Energieversorgungskosten wurden neben den Kosten für die Primärenergieversorgung auch die sekundären Energiekosten eingebunden. Unter den sekundären Energiekosten verstecken sich die Regel- und Steueraufwendungen sowie die Wärmeverteilungsaufwendungen.

In der Abb. 13.24 ist deutlich zu erkennen, dass die Energieversorgungskosten größeren Einfluss auf eine Wirtschaftlichkeit haben als die Fixkosten. Die KWK-Anlagen haben neben den Aufwendungen auch jährliche Vergütungen zu verbuchen. Hier sind Vermeidungskosten und Ausgleichserträge für hocheffiziente Anlagen als jährliche Erträge berücksichtigt worden.

Die Betriebskosten der elektrischen Heizung können trotz ihrer hohen Effizienz durch eine verlustfreie Verteilung und nahezu verlustfreien Umwandlung keinen monetären Vorteil generieren. Auch nicht, wenn ein reduzierter Strompreis angesetzt wird (in die Berechnungen ist der Wärme pumpenstrompreis eingegangen).

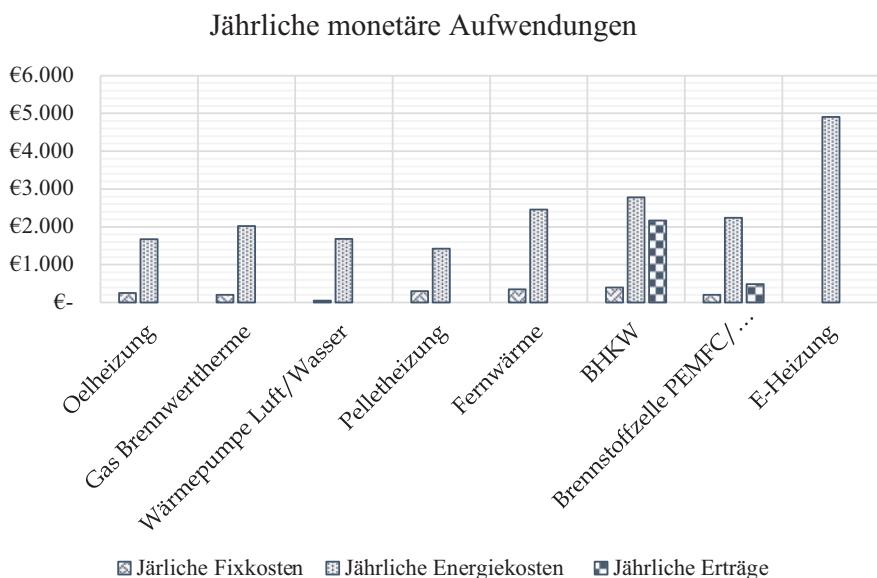


Abb. 13.24 Jährliche Betriebskosten Heizungsanlagen

In den Nutzungsgraden sind nicht nur die Wirkungsgrade der jeweiligen Heizungsanlagen berücksichtigt, sondern die Energieverluste bei der Speicherung der Wärmeenergie und die Verteilungsverluste (Abb. 13.25).

Bei einer Betrachtung über 20 Jahre ergeben sich die Gesamtlebenszykluskosten der Heizungsanlagen. Diese ermöglichen einen ökonomischen Vergleich. Die meisten Heizungssysteme sollten die Lebenszeit von 20 Jahren im Durchschnitt erreichen können. Lediglich die KWK-Anlagen stellen hier eine Ausnahme dar. Während die Lebensdauer von Brennstoffzellen noch mit einer Unsicherheit behaftet ist, kann die Lebensdauer von einem BHKW eher auf 10 Jahre angesetzt werden. Die sich bewegenden Teile des Verbrennungsmotors sorgen für einen Verschleiß, sodass solche Anlagen nach 40.000 bis 80.000 Betriebsstunden komplett überholt oder ausgetauscht werden müssen. In der Abb. 3.26 sind die Reinvestitionskosten für einen Austausch vom BHKW nach 10 Jahren bereits inbegriffen. Ebenfalls sind die jährlichen Vergütungen der KWK-Anlagen berücksichtigt.

Die Wärmepumpe profitiert von dem vergünstigten Wärmepumpenstromtarif. Ohne diesen wären die Aufwendungen ca. 14.512 € höher über die Lebenszykluszeit von 20 Jahren ausgefallen.

Überraschend ist, dass aus ökonomischer Sicht die klassischen fossilen Heizungssysteme neben der Wärmepumpe im Vergleich gut abschneiden. Natürlich hat sich diese Technik bewährt und durch ihre Ausreifung sind Aufwendungen der Hersteller für Forschung und Weiterentwicklungen

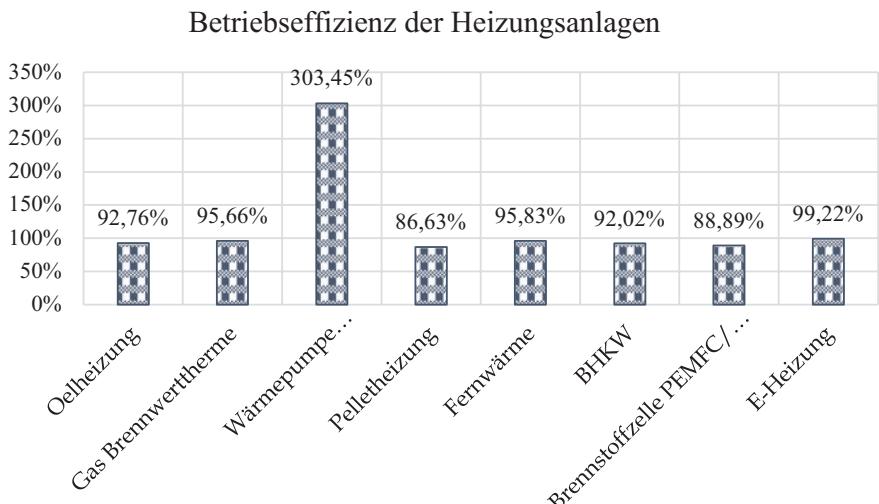


Abb. 13.25 Betriebseffizienz der Heizungsanlagen (Die Werte basieren auf den Aufwandszahlen der DIN 4701 sowie Internetrecherchen als Mittelwerte.)

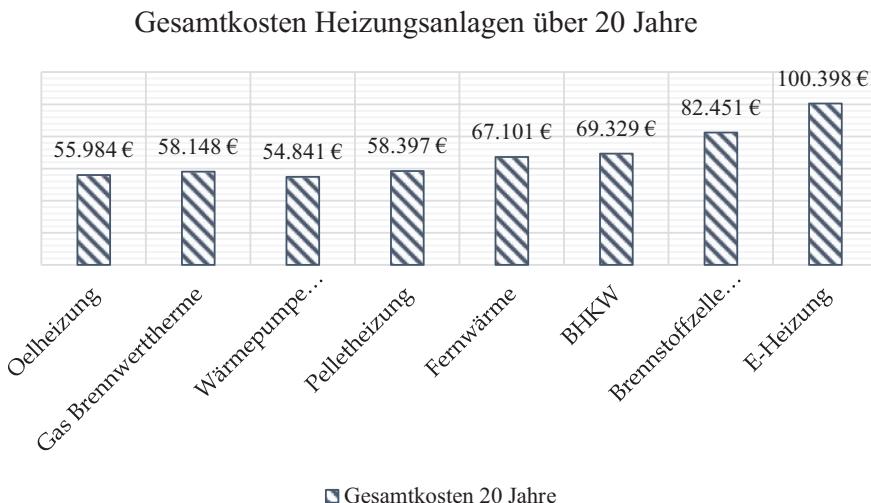


Abb. 13.26 Gesamtkosten Heizungssysteme über 20 Jahre (Basierend auf statistischen Mittelwerten ohne zukünftige Preissteigerungen.)

sehr gering. Dies wirkt sich wiederum positiv auf die Investitionskosten aus. Jedoch ist zu beachten, dass alle Analysen auf statischen Berechnungen basieren, Teuerungen und Verzinsungen wurden nicht berücksichtigt. Verändern sich die Energiekosten, dann kann sich auch das Ergebnis aus der Abb. 13.26 schnell verschieben. Die volatilen Energiekosten, gerade im Bereich der fossilen Energien, haben schon immer für eine Unsicherheit gesorgt. Somit wäre eine Abkehr von eben diesen ein sinnvoller Schritt. Streng betrachtet ist lediglich die Pelletheizung einigermaßen unabhängig von den volatilen Energiequellen der fossilen Energieversorgung.

13.10.2 Ökologische Bewertung Heizungsanlagen

Die ökologischen Bewertungen erfolgen wieder über den Carbon Footprint und über den Primärenergieeinsatz. Als Quelle für die Treibhausgasemissionen und die Primärenergieaufwendungen in der Herstellung A1-A3, dem Transport C2, der Beseitigung C4 und dem Recyclingpotenzial D dient die Internetplattform Ökobaudat.de [44]. In der Herstellung werden die Kategorien A1 bis A3 ausgewertet. Nicht berücksichtigt sind die Aufwendungen A4 und A5 welche den Transport zum Aufstellungsort und den Aufwand für den Einbau beschreiben. Diese Aufwendungen sind durch die hohe Individualität der Anwendung und des Anwendungsortes nur sehr schwer zu pauschalisieren. In unseren Betrachtungen können die

Aufwendung in diesem Bereich annähernd gleichgesetzt werden, wodurch sie ebenfalls vernachlässigbar werden.

Für eine konsequente Analyse wurden wieder die gleichen Heizungssysteme, wie in der ökonomischen Bewertung angesetzt. Leider waren für die Systeme der Kraftwärmekopplung keine Ökobilanzen verfügbar. Als Näherung wurden aus den vorhandenen Anlagenparametern gewichtsspezifische Emissionen gebildet und diese mit dem angesetzten Gewicht der KWK-Anlagen multipliziert.

Die Summe an Emissionen in den Kategorien A1-A3, C2, C4 und D werden als fixe Aufwendungen zusammengefasst. Hier schneidet wieder die elektrische Heizung am besten ab. Das BHKW hat aufgrund seiner hohen Masse die schlechtesten Startwerte (siehe Abb. 13.27). Sehr interessant ist, dass die fixen Aufwendungen für die Anlagenerrichtung geringer als die jährlichen Aufwendungen durch die Betriebsemisionen sind. Natürlich ist dies im Zusammenhang mit unseren Kennwerten von unserem Referenzhaus entstanden, dennoch kann diese Erkenntnis richtungsweisend eingestuft werden.

In den Betriebsemisionen, bestehend aus dem Primär- und Sekundärenergieeinsatz schneidet der Pelletofen mit Abstand am besten ab. Er profitiert vom Einsatz einer regenerativen Energiequelle, die in der Wachstumsphase Kohlendioxid aus der Umgebungsluft in sich bindet und bei der Verbrennung wieder freigibt. Die elektrische Heizung liegt durch den hohen elektrischen Verbrauch mit 11.356 kg CO₂ äq. Emissionen um den Faktor 1,72 über den Emissionen der Gasbrennwerttherme. Ein zukünftiger steigender Anteil an regenerativen Energien im Strommix kann diesen Wert jedoch verbessern, ob er ausgeglichen werden kann, bleibt abzuwarten. Das mit Strom auch ökologisch sinnvoll umgegangen werden kann, zeigen die Betriebsemisionen der Wärmepumpe. Ein solches Ergebnis setzt einen Betrieb der Wärmepumpe unter günstigen Konditionen jedoch voraus.

In der Analyse über die Lebenszeit von 20 Jahren überzeugt die Pelletheizung mit bestechenden Werten. An zweiter Stelle kommt die Luft/Wasser-Wärmepumpe gefolgt vom BHKW, dass sich aufgrund der angerechneten Emissionsvermeidungen durch die Stromproduktion deutlich verbessert hat. Die nötige Erneuerung der BHKW nach 10 Jahren hat Einfluss an der Analyse genommen (Abb. 13.28).

Etwas überraschend ist das Ergebnis der Fernwärmehitzung. Hier sind Umwandlungsverluste in der Energiewandlung vom zentralen Kraftwerk, Leitungsverluste und Wandlungsverluste in der Übergabestation ausschlaggebend für das Gesamtergebnis. Baut das versorgende Kraftwerk auf erneuerbare Energiequellen z. B. Geothermie, dann würde sich das Resultat der FernwärmeverSORGUNG schlagartig verbessern.

Treibhausgasemissionen Heizungsanlagen

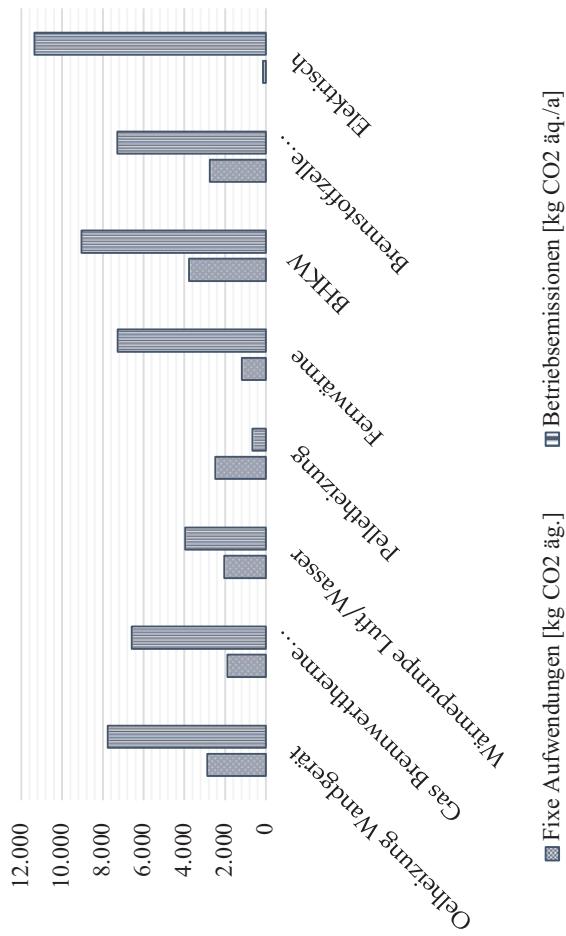


Abb. 13.27 Treibhausgasemissionen Heizungssysteme

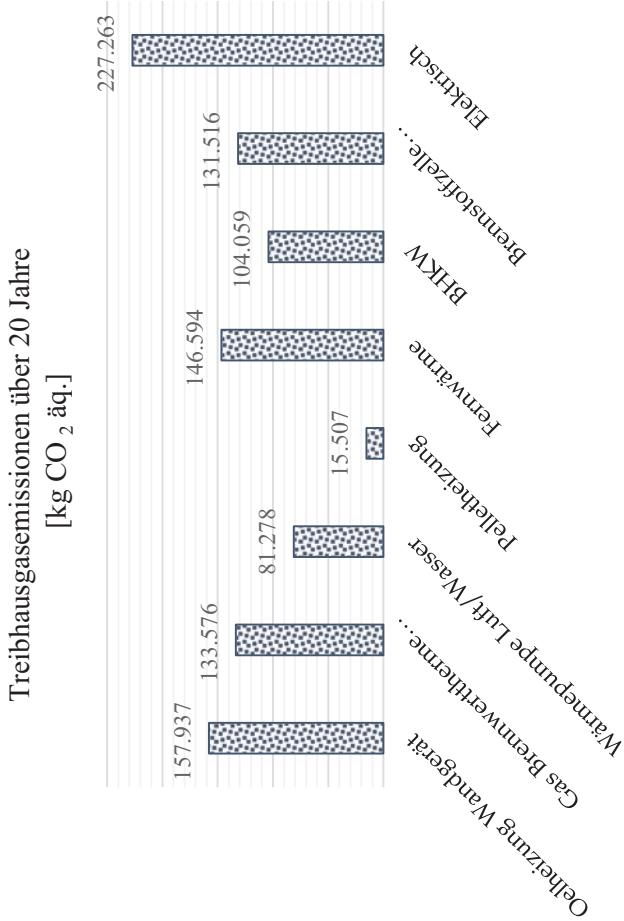


Abb. 13.28 Gesamte Treibhausgasemissionen Heizungssysteme über 20 Jahre

Für die Bewertung des Primärenergiebedarfs nutzen wir die totalen nicht erneuerbaren Primärenergien aus den Kategorien A1-A3, C2, C4 und D, welche wieder unter den Begriff der fixen Aufwendungen zusammengefasst werden. Die jährlichen Betriebsaufwendungen resultieren aus dem Bedarf an Nutzenergie, den Umwandlungsverlusten und dem Primärenergiefaktor des jeweiligen Energieträgers (Abb. 13.29).

Auch beim Primärenergiebedarf für die Heizungssysteme ist zu erkennen, dass die jährlichen Aufwendungen über den Erstaufwendungen liegen. Die Wärmepumpe unterliegt der direkten elektrischen Heizung bei den fixen Aufwendungen deutlich, jedoch hat die Wärmepumpe den geringsten Betriebsenergiebedarf. Dem BHKW und der Brennstoffzelle werden die jährlichen Stromproduktionen angerechnet.

Die Fernwärmestation gewinnt durch den guten Primärenergiefaktor nach der EnEV deutlich an ökologischem Potenzial. Die restlichen Ergebnisse verhalten sich analog zu den Resultaten aus der Treibausgasanalyse. Alle Resultate sind in der Abb. 13.30 dargestellt.

13.10.3 Wechselwirkung Heizungssysteme

Da in einer individuellen Betrachtung auch die Möglichkeit vorhanden sein muss, subjektive Eigenschaften einzubinden, bietet sich hier das Verfahren der Technologieanalyse nach [3] an. Setzen wir neben den ökonomischen

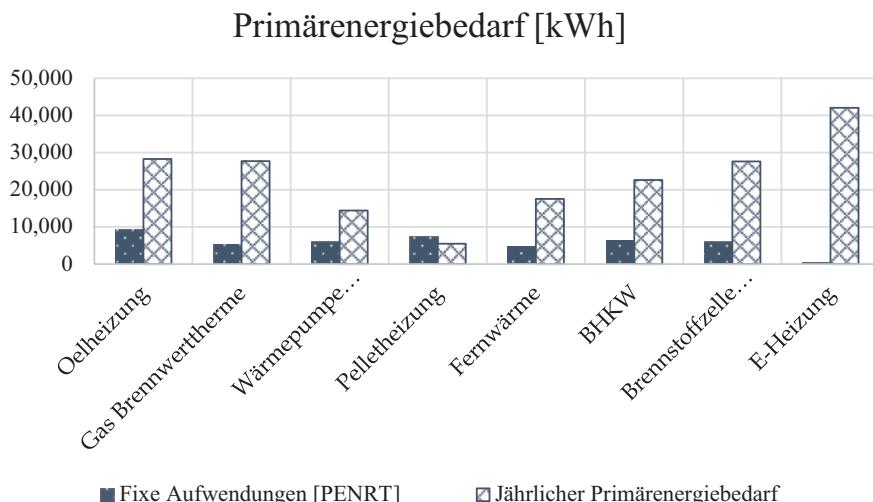


Abb. 13.29 Primärenergiebedarf Heizungssysteme

Primärenergiebedarf über 20 Jahre [kWh]

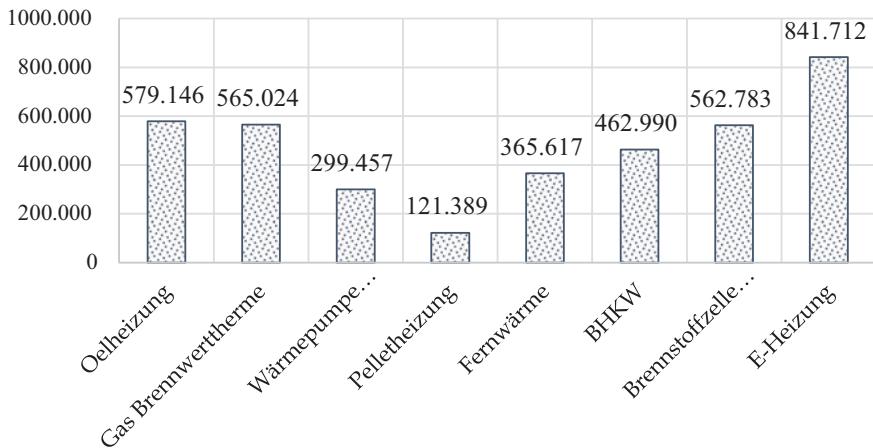


Abb. 13.30 Primärenergieaufwendungen über 20 Jahre

und ökologischen Erkenntnissen aus dem vorherigen Abschnitt noch den Platzbedarf für die Heizungssysteme und die Energieträgerspeicherung ein, dann ergibt sich Tab. 13.9.

Faktorisieren wir die einzelnen Größen mit dem lokalen Bestwert ergibt sich Tab. 13.10:

Mit der Technologieanalyse kann eine gemeinsame Bewertung durchgeführt werden, welche das Gesamtergebnis über den Anlagenfaktor präsentiert.

Durch die Kombination der Einflussparameter gewinnt die Wärmepumpe knapp vor der Fernwärmeheizungsanlage (Abb. 13.31). Die Wärmepumpe weist Vorteile vor allem in den ökologischen Aspekten auf. Die Fernwärme ist betriebswirtschaftlich interessant und hat einen sehr geringen Platzbedarf. Die persönliche Wertigkeit kann über eine prozentuale Verteilung (einer Gewichtung) weiter personalisiert werden.

13.11 Fazit Heizungssystem

In den vorherigen Abschnitten haben wir die unterschiedlichen Aspekte in der Anlagenbewertung ausführlich betrachtet. Dabei wurde deutlich, dass die subjektive Gewichtung des Bauherrn eine entscheidende Rolle spielt. Somit ist eine individuelle Analyse, basierend auf den vorliegenden Kennwerten des jeweiligen Bauprojektes, elementar wichtig.

Tab. 13.9 Ergebnisse Heizungssysteme in der Übersicht

Nummer	Kosten -positionen	Ölheizung	Gas Brenn- werttherme	Wärme- pumpe Luft/ Wasser	Pellet- heizung	Fern- wärme	BHKW	Brennstoff- zelle PEMFC/ Gasheizung	E-Heizung	Ein- heit
1	Betriebskosten	55.984	58.148	54.841	58.397	67.101	69.329	82.451	10.0398	€/a
2	CO ₂ Auf- wendungen gesamt	15.7937	13.3576	81.278	15.507	146.594	104.059	131.516	22.7263	kg CO ₂ äq.
3	Primärenergie- bedarf 20 Jahre	579.146	565.024	299.457	121.389	365.617	462.990	562.783	841.712	kWh
4	Platzbedarf 20 Jahre	12,00	1,50	2,00	14,00	1,00	4,00	3,50	0,50	m ³

Tab. 13.10 Faktorisierte Kennwerte Heizungssysteme

Nummer	Kostenpositionen	Ölheizung	Gas-Brennwerttherme	Wärme-pumpe Luft/Wasser	Pellet-heizung	Fern-wärme	BHKW	Brennstoffzelle PEMFC/Gas-heizung	E-Heizung
5	BwO-Faktor	1,02	1,06	1,00	1,06	1,22	1,26	1,50	1,83
6	CFO-Faktor	10,19	8,61	5,24	1,00	9,45	6,71	8,48	14,66
7	KEA-Faktor	4,77	4,65	2,47	1,00	3,01	3,81	4,64	6,93
8	Platzbedarf faktoriert	24,00	3,00	4,00	28,00	2,00	8,00	7,00	1,00
9	Anlagenfaktor	9,99	4,33	3,18	7,77	3,92	4,95	5,41	6,11

Technologieanalyse

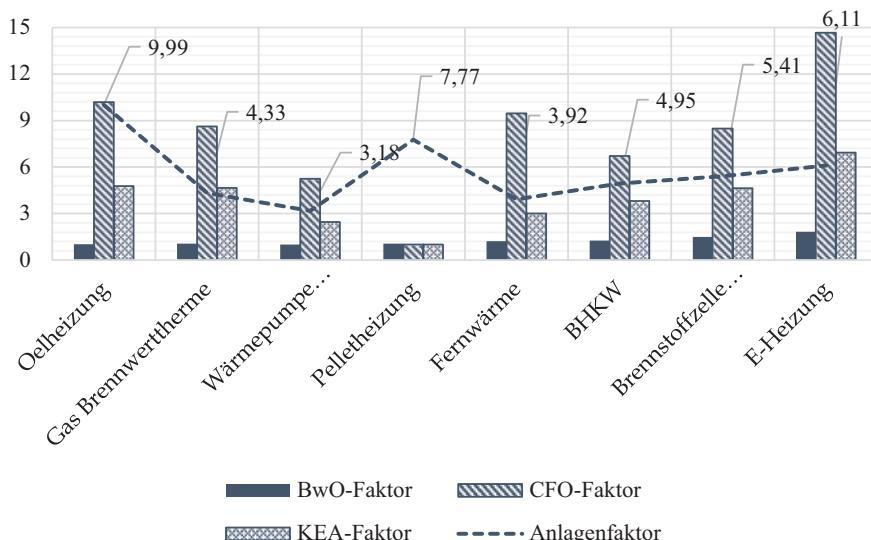


Abb. 13.31 Ergebnis Technologieanalyse Heizungssysteme

Liegt der Fokus auf dem Finanziellen und es sind keine speziellen Wärmepumpentarife vom elektrischen Energieversorger erhältlich, dann kann in unserem Referenzhausbeispiel nur eine konventionelle Öl- oder Gasbrennwerttherme eingesetzt werden. Die langbewährten, fossilangetriebenen Heizungsanlagen profitieren von den geringen Anschaffungskosten. Aus diesem Grund sind gerade Gasbrennwertthermen noch ein fester Bestandteil im Neubausektor, als negativ sind die volatilen Energiepreise zu benennen.

Wird hingegen der Treibhauseffekt als erste Prämisse angesetzt, dann liegt klar die Pelletheizung vorne. Weiter Aspekte wie z. B. Platzbedarf, Wartungsaufwand, Fehleranfälligkeit, Serviceperspektiven und vieles mehr können das Ergebnis je nach Betreiberinteresse verändern. Eine umfangreichere Beschäftigung mit der Thematik Heizungsanlage sollte aufgrund der langen Betriebsphase von jedem Bauherrn vertieft erfolgen.

Sobald spezielle Wärmepumpentarife durch den Stromversorger angeboten werden, gewinnt die Wärmepumpe an Vorteilen. Ihre guten ökologischen Eigenschaften können dann auch ökonomische Vorteile generieren. Dafür müssen aber zwingend die lokalen Randbedingungen für den Einsatz einer Wärmepumpe gegeben sein.

Doch egal welche Heizungsanlagenart Anwendung findet, es kommt auf die richtige Installation und Betriebsführung an. Deutschlandweit arbeiten

zahlreiche Anlagen in einem ineffizienten Kennfeldbereich.²⁴ Damit kann eine einfache Anlage Vorteile gegenüber einer hoch technologischen Anlage aufweisen, wenn diese für den Installateur und dem Betreiber verständlicher ist.

Eine effiziente Heizungsanlage benötigt ein entsprechendes Monitoring-system und regelmäßige Kontrollen/Inspektionen, damit die Betriebs-effizienz gewahrt wird.

Ein ausreichendes Monitoringsystem verursacht anfängliche Investitions-kosten, doch höhere Effizienzen während der Lebenszeit kompensieren diese Kosten in der Regel. Wichtig hierbei ist, dass der Anlagenführer (Haus-besitzer, Installateur) die Werte lesen und bewerten können muss. Dies kann sowohl im privaten als auch im gewerblichen Sektor zu Problemen führen. Sind die Heizungsanlagen zu komplex, dann muss ausgewiesenes Fachpersonal für die Installation und die folgenden Wartungen beauftragt werden.

²⁴Vgl. [45].



14

Optimierung Referenzhaus

Gemeinsam wollen wir nun die Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln nutzen und unser Referenzhaus optimieren. Dabei werden wir die ökonomischen Kosten und die ökologischen Aufwendungen als Optimierungsparameter ansetzen. Die vorangestellten Kapitel haben uns das Handwerkzeug zur Verfügung gestellt und diese werden wir nun bei unserem Referenzhaus angewendet – Schritt für Schritt. Vorgreifend möchte ich erwähnen, dass wir sowohl die ökonomischen als auch die ökologischen Lebenszykluskosten deutlich beeinflussen werden. Beginnen wollen wir mit einer Absenkung des Heizenergiebedarfs, indem wir die baulichen Eigenschaften verändern, bestehend aus der Gebäudeform, der Gebäudeausrichtung, den Transmissionsverlusten und den Energieerträgen über die Gebäudehülle. Wir optimieren also zuerst die Kostengruppe KG 300.

Im zweiten Verfahrensschritt kümmern wir uns anschließend um die Anlagentechnik, welche in der Kostengruppe KG 400 hinterlegt ist. Dafür gehen wir chronologisch durch die vorherigen Kapitel.

Die Startwerte vor der Optimierung – oder sagen wir die Gebäudeeigenschaften aus der ursprünglichen Gebäudeplanung – sind in der Tab. 14.1 aufgeführt.

Tab. 14.1 Gebäudeeigenschaften vor der Optimierung

Startwerte Referenzhaus			
Nummer	Bezeichnung	Wert	Einheit
1	Nutzfläche	150	m ²
2	Jahresheizwärmebedarf	77,5	kWh/m ² a
3	Warmwasserbedarf	12,5	kWh/m ² a
4	U-Wert Wand	0,28	W/m ² K
5	U-Wert Bodenplatte	0,35	W/m ² K
6	U-Wert Oberste Geschossdecke	0,2	W/m ² K
7	U-Wert Fenster	1,3	W/m ² K
8	U-Wert Tür	1,8	W/m ² K
9	Fensterfläche	42,18	m ²
10	Türfläche	6,75	m ²

14.1 Optimierung der Gebäudeeigenschaften

14.1.1 Gebäudegeometrie

Da es sich bei unserem Referenzhaus um ein Winkelbungalow handelt, können wir im ersten Schritt die Gebäudeform für ein verbessertes A/V-Verhältnis optimieren. Dafür sollte die Geometrie möglichst in eine Würfelform überführt werden.¹ Aus diesem Grund entscheiden wir uns für eine Stadthausvilla. Die Berechnung des A/V-Verhältnisses wurde bereits im Abschn. 11.1 durchgeführt und es wurde eine Reduzierung des Verhältnisses um ca. 25 % festgestellt. Nun ist die Reduktion des Heizungswärmebedarfs nicht einfach um diesen Wert zu reduzieren, da z. B. die Eigenschaften der reduzierten Oberflächen nicht linear eingehen müssen. Ebenfalls bleiben z. B. die Lüftungswärmeverluste konstant. Daher erfolgt eine Berechnung über das Verfahren der DIN V 4108-6. In der Berechnung bleiben die Ausrichtung, die Wärmeübergangswiderstände der Bauteile, die Tür- und Fensterflächen konstant, lediglich die Gebäudeform ändert sich.

Die ökonomischen und ökologischen Aufwendungen in der Herstellungsphase werden idealisiert als ausgeglichen angesehen. Zwar erfordert ein zweistöckiges Gebäude eine Zwischendecke und die Außenwandfläche vergrößert sich, dafür reduzieren sich die Fundament- und Dachflächen. In der Betriebsphase sorgt die Optimierung des Oberflächen-/Volumenverhältnisses für eine Reduktion von 11,77 % des Jahresheizwärmebedarfs. Die zusammengefassten Ergebnisse sind in der Tab. 14.9 aufgestellt.

¹Wenn wir es ganz genau nehmen, dann hätte eine Kugel das beste Oberflächen-Volumenverhältnis, nur wer möchte schon in einer Kugel wohnen?

Tab. 14.2 Verschiebung der Fensterflächen

Verschieben der Fensterflächen auf die Sonnenseiten		Wert	Einheit
Nummer	Bezeichnung		
31	Fensterfläche Norden alt	8,78	m^2
32	Fensterfläche Süden alt	15,37	m^2
33	Fensterfläche Westen alt	11,39	m^2
34	Fensterfläche Osten alt	6,64	m^2
35	Fensterfläche alt	42,18	m^2
36	Fensterfläche Norden neu	2,63	m^2
37	Fensterfläche Süden neu	18,69	m^2
38	Fensterfläche Westen neu	11,39	m^2
39	Fensterfläche Osten neu	9,47	m^2
40	Fensterfläche gesamt neu	42,18	m^2
41	Jahresheizwärmebedarf Stadthausvilla nach Fensterverschiebung	67,18	$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$
42	Verringerung Jahresheizwärmebedarf	2,96	%

Mit der effizienteren Stadthausvilla wollen wir nun den solaren Eintrag verbessern, dafür verschieben wir Fensterflächen von der Nordseite auf die Sonnenseiten. Da vorher schon ein Großteil auf den Sonnenertragsseiten lag, ist der Effekt eher gering. Trotzdem kann durch eine Verschiebung der spärlichen Fensterflächen von der Nordseite auf die Ost- und Südseite eine Jahresheizwärmebedarfseinsparung von knapp 3 % erreicht werden, ohne zusätzliche Kosten in der Kostengruppe KG 300. Die angesetzten Parameter sowie die Optimierungsergebnisse sind in der Tab. 14.2 festgehalten.

14.1.2 Bauteileoptimierung

Nachdem wir die Geometrie verbessert haben, steigen wir nun in die Bauteilekonfiguration ein. Wir wollen den Jahresheizergiebedarf durch bessere Komponenten als der EnEV-Mindeststand verringern und wirtschaftliche sowie ökologische Vorteile generieren. Dafür nutzen wir die Berechnungen der DIN V 4108 und nutzen unsere Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln für die Komponentenauslegung.

Fangen wir gleich mit den Fenstern an, der Standard nach der EnEV weist einen Wärmedurchgangskoeffizienten für die Fenster von $U_w = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf. In der Tab. 11.5 konnten wir die geringen Amortisationszeiten effizienterer Konfigurationen belegen. Bezogen hatten wir die ökonomischen Einsparungen im Abschn. 11.2.5 auf die Heizenergiekosten mit einer Gas-Brennwerttherme. Für unser Referenzhaus haben wir aber noch keine Anlagentechnik definiert und somit geht eine gewisse Unsicherheit mit ein.

Tab. 14.3 Wärmedurchgangskoeffizient Fenster optimiert

Wärmedurchgangskoeffizient U_w Fenster von 1,3 auf 0,838 W/(m ² K)		Wert	Einheit
Nummer	Bezeichnung		
50	Fensterfläche gesamt	42,18	m ²
51	Jahresheizwärmebedarf Stadthausvilla	59,41	kWh/m ² a
52	Verringerung Jahresheizwärmebedarf	13,08	%
53	Jährliche Einsparungen Heizenergie	1165,5	kWh/a
54	Differenzkosten	1419,36	€
55	Differenz Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	576,18	kg CO ₂ äq/m ²
56	Differenz Total nichterneuerbare Primärenergie (PENRT)	3009,96	kWh/m ²

Berechnet wurden die Werte aus der Tab. 14.3 über das Verfahren der DIN V 4108-6, somit sind solare Erträge, Verschattungen und Ausrichtungen der Fensterflächen pauschal berücksichtigt. Allein durch die Verbesserung der Fensterisolierung lassen sich jährlich gut 13 % Nutzenergie einsparen. Grundlage der Kostenanalysen ist die Tab. 11.5 und für die ökologischen Aufwendungen die Tab. 11.6.

Analog zu den Fenstern wollen wir die Eingangstür auf der Nordseite optimieren. Dafür wird eine Tür mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von 1,1 W/(m²K) versehen. Die ökonomischen und ökologischen Aufwendungen wurden den Tabellen für die Fensteraufwendungen entnommen. Da Eingangstüren sehr individuell design werden und Unterschiede im Kunststoff-Glasfläche-Verhältnis je nach Design auftreten, kann dies nur eine Näherung darstellen.

Durch die besser isolierte Eingangstür auf der Nordseite lassen sich ca. 3,3 % Heizenergie pro Jahr einsparen (Tab. 14.4).

Als Nächstes wollen wir den geplanten Klinker auf der Außenwand durch ein Wärmeisolierputz austauschen. Zwar ist der spezifische Aufwand bezüglich des Primärenergieaufwandes und der Treibhausgase in der Herstellung

Tab. 14.4 Wärmedurchgangskoeffizient Eingangstür

Wärmedurchgangskoeffizient U_d Eingangstür von 1,8 auf 1,1 W/(m ² K)		Wert	Einheit
Nummer	Bezeichnung		
57	Türfläche gesamt	6,75	m ²
58	Jahresheizwärmebedarf Stadthausvilla	57,50	kWh/m ² a
59	Verringerung Jahresheizwärmebedarf	3,32	%
60	Jährliche Einsparungen Heizenergie	12,8925	kWh/a
61	Differenzkosten	227,14	€
62	Differenz Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	92,21	kg CO ₂ äq.
63	Differenz Total nichterneuerbare Primärenergie (PENRT)	481,68	kWh

von einem Wärmedämmputz höher als von einem Klinker (Tab. 11.8), doch der benötigte Schichtdickenunterschied kompensiert diesen Aufwand vollständig und sorgt für ökologische Vorteile (siehe Tab. 11.9). Wir setzen in den kommenden Analysen einen flächenspezifischen Preisunterschied zwischen dem Klinker und dem WDVS-Putz mit 85 €/m² zum Vorteil für den Außenputz an.

Die ökonomischen und ökologischen Aufwendungen in der Herstellungsphase verringern sich bei dem Außenputz gegenüber dem Klinker, wohingegen die jährlichen Aufwendungen zur Deckung des Heizenergiebedarfs leicht ansteigen (Tab. 14.5).

Nach den Außenwänden erfolgt eine Anpassung der Innenwände. Anstelle der eingeplanten Porenbetonsteinen mit einer Wandstärke von 175 mm wird ein Holzständerwerk mit Zwischenraumwärmespeicherung eingesetzt. In den Zwischenraum zwischen den Holzträgern wird ein Holzfaserdämmstoff eingefügt. Die ökologischen Vorteile beziehen sich auf den Vergleichswerten aus der Tab. 11.3. Die ökonomischen Vorteile resultieren vor allem aus der geringeren Aufbauzeit an der Baustelle eines Holzständerwerks gegenüber eines Massivmauerwerks. Bewertet wurden die Einsparungen mit 45 €/m² Wandfläche.

Die Kombination zwischen dem Holzständerwerk und der Zwischenraumisolierung sorgt für eine Reduktion des Heizwärmeverbrauchs um ca. 5 %, was ökonomische und ökologische Vorteile in der Betriebsphase aufwirft. Das Ergebnis der Absenkung wurde durch die abnehmende Wärmespeicherfähigkeit des Holzständerwerkes gegenüber der massiven Porenbetoninnewände geschwächt (Tab. 14.6).

Mit der Dimensionierung der Isolierung haben wir nun die effektivste Komponente in der Gebäudehülle vor uns. Wir erhöhen die Sockeldämmung (XPS) von 68 mm auf 180 mm, die Außenwandisolierung wechselt von Mineralwolle auf EPS, damit der WDVS einen tragfähigen Isolierkörper

Tab. 14.5 Austausch Klinker durch WDVS-Putz

Außenwand Klinker zu Wärmedämmputz mit 15,5 mm			
Nummer	Bezeichnung	Wert	Einheit
64	Wandfläche gesamt	162,97	m ²
65	Jahresheizwärmeverbrauch Stadthausvilla	57,67	kWh/m ² a
66	Verringerung Jahresheizwärmeverbrauch	-0,29	%
67	Jährliche Einsparungen Heizenergie	-27,70558	kWh/a
68	Differenzkosten Klinker-Putz	-13852,79	€
69	Differenz Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	-6206,05	kg CO ₂ äq.
70	Differenz Total nichterneuerbare Primärenergie (PENRT)	-13884,93	kWh

Tab. 14.6 Innenwände als Holzständerwerk

Innenwand Holzständerbauweise mit Holzfaserzwischendämmung		Wert	Einheit
Nummer	Bezeichnung		
71	Wandfläche gesamt	162,97	m ²
72	Jahresheizwärmeverbrauch Stadthausvilla	54,91	kWh/m ² a
73	Verringerung Jahresheizwärmeverbrauch	5,03	%
74	Jährliche Einsparungen Heizenergie	414	kWh/a
75	Differenzkosten	-7333,83	€
76	Differenz Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	-14392,23	kg CO ₂ äq.
77	Differenz Total nichterneuerbare Primärenergie (PENRT)	-9868,98	kWh

erhält. Die Isolierstärke der Außenwandisolierung erhöht sich um 200 mm auf 280 mm. Die Deckenisolierung mit 170 mm Steinwolle wird gegen eine 300 mm starke Flachsisolierung ausgetauscht. Die ökonomischen und ökologischen Aufwendungen entstammen dem Abschn. 11.5.

Durch die Anpassung der Isolierung erhalten wir zusätzlich eine Heizbedarfsreduktion um ca. 15,7 %. Nachteilig ist der Herstellungsenergiebedarf für den Mehraufwand bei den Isolierungen zu nennen (Tab. 14.7).

Bevor wir in die Anlagentechnik des Gebäudes einsteigen werden wir noch den Wärmebrückenkorrekturwert und Außenluftwechselrate verbessern. Der Wärmebrückenkoeffizient kann nach der DIN V 4108 pauschalisiert mit $\Delta U_{WB} = 0,05 \frac{W}{m^2 K}$ angesetzt werden, wenn in den Planungs- und Bauphasen auf eine wärmebrückenarme Konstruktion geachtet wird. Die Außenluftwechselrate verringert sich bei einem geprüften hochabgedichteten Gebäude in der Berechnung nach der DIN 4108 auf $0,6 h^{-1}$. Die Kosten

Tab. 14.7 Isolierungsanpassung

Isolierungsmaterial und Isolierschichtanpassung		Wert	Einheit
Nummer	Bezeichnung		
78	Wandfläche gesamt	162,97	m ²
79	Fußbodenfläche gesamt	89,49	m ²
80	Deckenfläche gesamt	89,49	m ²
81	Jahresheizwärmeverbrauch Stadthausvilla	44,84	kWh/m ² a
82	Verringerung Jahresheizwärmeverbrauch	15,70	%
83	Jährliche Einsparungen Heizenergie	1056	kWh/a
84	Isolierungsverstärkung Sockel (XPS)	118	mm
85	Isolierungsverstärkung Wand (EPS)	200	mm
86	Isolierungsverstärkung Decke (Flachs)	130	mm
87	Differenzkosten	6740,07	€
88	Differenz Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	418,49	kg CO ₂ äq.
89	Differenz Total nichterneuerbare Primärenergie (PENRT)	30018,35	kWh

Tab. 14.8 Optimierung Wärmebrückenkorrekturwert und Außenluftwechselrate

Wärmebrückenkorrekturwert/Außenluftwechselrate			
Nummer	Bezeichnung	Wert	Einheit
90	Wärmebrückenkorrekturwert alt	0,10	W/(m ² K)
91	Wärmebrückenkorrekturwert neu	0,05	W/(m ² K)
92	Jahresheizwärmebedarf Stadthausvilla	37,30	kWh/m ² a
93	Verringerung Jahresheizwärmebedarf	20,21	%
94	Jährliche Einsparungen Heizenergie	1131	kWh/a
95	Außenluftwechsel ohne Dichtheitsprüfung alt	0,70	1/h
96	Außenluftwechsel mit Dichtheitsprüfung neu	0,60	1/h
97	Jahresheizwärmebedarf Stadthausvilla	32,51	kWh/m ² a
98	Verringerung Jahresheizwärmebedarf	14,73	%
99	Jährliche Einsparungen Heizenergie	718,5	kWh/a

sind pauschal in die Bewertung eingeflossen, während die ökologischen Auswirkungen unberücksichtigt blieben (Tab. 14.8).

14.1.3 Fazit Gebäudeoptimierung

Der Heizenergiebedarf für das Referenzgebäude konnte durch eine Optimierung des Oberflächen-Volumen-Koeffizienten, einer Verschiebung einiger Fensterflächen auf die Südseite und die Anpassung der Gebäudekomponenten um ca. 58 % abgesenkt werden. Setzen wir eine Gasbrennwerttherme mit einem Primärenergiefaktor von 1,1 und spezifischen Treibhausgasemissionen von 0,259 kg CO₂ äq./kWh an, dann bedeuten die Einsparungen eine jährliche Absenkung von ca. 7423 kWh an Primärenergie und ca. 1,92 t an Treibhausgasen. Die Ergebnisse aus der Gebäudeoptimierung sind in der Tab. 14.9 zusammengefasst. Die Investitionskosten in der KG 300 sind durch die durchgeführten Änderungen gesunken, leicht angestiegen sind die Aufwendungen hingegen in der Kostengruppe Planung KG 700.

14.2 Einfluss der Heizungsanlage

Nachdem das Gebäude optimiert wurde, wollen wir uns nun den Einfluss der ausgewählten Heizungsanlage auf den Primärenergiebedarf ansehen, somit befinden wir uns nun in der Kostengruppe KG 400. Dafür nutzen wir die Analgenaufwandszahl e_g aus der DIN V 4701-10. Grundlage ist eine Vor-/Rücklauftemperatur von 55/45 °C. Bei einer hinzugefügten Solaranlage für das Warmwasser wird von einem Deckungsanteil der Solarthermieanlage von 54 % ausgegangen. Die Ergebnisse der einzelnen Analgenkonfigurationen sind in der Tab. 14.10 aufgeführt.

Tab. 14.9 Zusammengefasste Ergebnisse Gebäudeoptimierung

Position	Maßnahme	Betriebsphase		Mehraufwand Investitionen/Erstaufwendungen		Globales Erwärmungspotenzial (GWP)
		Veränderung Heizenergie (%)	Kosten	Total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)		
101	Reduktion A/V-Verhältnis	-1,77	-	-	-	-
102	Verschiebung der Fensterflächen	-2,96	-	-	-	-
103	Wärmedurchgangskoeffizient Fenster von 1,3 auf 0,838 W/(m ² K)	-13,08	1.419,36 €	3009,96	576,18	
104	Wärmedurchgangskoeffizient Tür von 1,8 auf 1,1 W/(m ² K)	-3,32	227,14 €	481,68	92,21	
105	Außenwand Klinker zu Putz	0,29	-13.852,79 €	-13884,93	-6206,05	
106	Innenwand Holzständerbauweise mit Holzfaserzwischendämmung	-5,03	-7.333,83 €	-9868,98	-14392,23	
107	Isolierschichtanpassung	-15,70	6.740,07 €	30018,35	418,49	
108	Wärmebrückenkorrekturwert	-20,21	1.500,00 €	-	-	
109	Außenluftwechselrate	-14,73	1.000,00 €	-	-	

Tab. 14.10 Ergebnisse Heizungsanlage auf den Primärenergiebedarf (Die Anlagenauflandszahlen wurden über die DIN V 4701 bestimmt.)

Heizungs-anlagen	Anlagen Aufwands- zahl	Jahresende- nergiebedarf [kWh/(m ² a)]	Jahreshilfs- energie- bedarf [kWh/(m ² a)]	Jahresprimär- energiebedarf Q _{p,vorh} [kWh/(m ² a)]	Jahresprimär- energiebedarf bezogen auf das Referenz- gebäude der EnEV 2014 (%)	Effizienz- klasse
Gas-Brennwerttherme mit solar unterstützter Trinkwassererwärmung	1,05	38,96	5,63	47,26	61	A
Gas Brennwerttherme und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung	1,22	40,85	5,97	54,91	71	A
Gas Brennwerttherme mit solar unterstützter Trinkwassererwärmung und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung	0,85	25,05	2,53	38,26	49	A+
Wärmepumpe (Luft/Wasser) mit gebäudezentraler Trinkwassererwärmung	0,84	18,27	5,38	37,81	49	A+
Wärmepumpe (Luft/Wasser) mit gebäudezentraler Trinkwassererwärmung und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung	0,74	13,11	4,47	33,31	43	A+
Wärmepumpe (Sole/Wasser) mit gebäudezentraler Trinkwassererwärmung	0,76	14,9	6,83	34,21	44	A+
Wärmepumpe (Sole/Wasser) mit gebäudezentraler Trinkwassererwärmung und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung	0,71	10,94	2,78	31,96	41 %	A+

Die Kombinationsmöglichkeit zwischen den einzelnen Heizungsanlagen sowie eine Anpassung der Randparameter ermöglichen eine weitere Absenkung des Primärenergiebedarfs. So würde eine Fußbodenheizung die Anlagenaufwandszahl reduzieren, da niedrigere Temperaturen der Gasbrennwerttherme und der Wärmepumpe entgegenkommen.

Ebenfalls wäre der Einsatz regenerativer Energien, z. B. durch eine Erhöhung der Solarthermieanlage, der Einsatz von Photovoltaikanlagen oder das Heizen mit einer Holzpelletsheizung denkbar.



15

Fazit

Energieeffizientere Gebäude, als der Mindeststandard nach der aktuellen EnEV 2014 mit der Verschärfung 2016, können ökologisch wie auch ökonomisch sinnvoll sein. Während eine pauschalisierte Hauskonfiguration die ökonomischen Mehraufwendungen unnötig in die Höhe treiben kann, können gezielte Gebäudeoptimierungen die Mehrkosten deutlich senken und somit über die Lebenszyklusphase der Komponenten vorteilhaft gestalten. Natürlich sollen sich die Baufirmen die Aufwendungen für hochenergieeffiziente Gebäude auch vergüten lassen, doch muss der ökonomische Mehraufwand durch die sinkenden jährlichen Energiekosten zu kompensieren sein.

Es scheint, dass unter diesem Aspekt dem Bauherren ein wichtiger regulierender Überwachungsauftrag zufällt. Wir haben in den vergangenen Kapiteln einige Grundlagen für eine erste Sondierung von sinnvollen Maßnahmen aufgezeigt. Nun muss jedes Bauprojekt individuell betrachtet und bewertet werden. Dieser Aufwand scheint im ersten Moment unverhältnismäßig hoch, doch bei einer Gebäudeplanung gerade bei den Baukonstruktionen entscheiden Sie sich für Komponenten, die über viele Jahrzehnte im Betrieb sein werden. Noch vor einem Bauantrag sollte immer ein unabhängiger, staatlich zugelassener Energie-Effizienzexperte hinzugezogen werden. Dieser ermöglicht Ihnen, neben einer Absicherung der entwickelten Effizienzstrategien, dass Sie an staatlichen Fördermitteln teilhaben können. Die Förderungen können die Rentabilität der geplanten Maßnahmen weiter steigern.

Unter ökologischen Aspekten sind die meisten Energieeffizienzsteigerungsmaßnahmen, ob sie in der Baukonstruktion oder Anlagentechnik durchgeführt werden, ökologisch wertvoll.¹ Gerade der Weg zurück zu nachhaltigen Gebäudekomponenten sorgt nicht nur auf der ökologischen Seite für eine deutliche Reduktion der Umweltaufwendungen, sondern bringt auch das Potenzial mit sich die Gebäudekosten deutlich zu reduzieren.

Es ist festzustellen, dass der Gebäudesektor ein großes Potential für das Erreichen der Klimaschutzziele aufweist. Warum die Regierung die Anforderungen an die Energieeffizienz im kommenden Gebäudeenergiegesetz nicht verschärft, ist bezüglich der ausgegebenen Ziele auf dem Weg zur Klimaneutralität fraglich.² Den anfallenden Mehrkosten im Hochbau müsste die Bundesregierung entweder mit einer Deckelung oder weiteren Be zuschussungen entgegenwirken.

Der aktuelle politische Druck auf die Regierung durch die weltweiten Umweltschutzbewegungen sorgt bereits für ein Umdenken.³ So steht zur Debatte, dass emittierte Treibhausgase monetär bewertet werden. Dadurch würden sich energieeffiziente Systeme früher amortisieren und der Anreiz für Bestandsgebäude an Sanierungen ansteigen. Es bleibt abzuwarten, was in den kommenden Jahren passiert. Langfristig muss das Ziel sein, unabhängig(er) von den fossilen Brennstoffen zu werden. Gerade deshalb und wegen der weiteren Verknappung der Rohstoffe ist mit einem Anstieg der Kosten für die Nutzung von volatilen, fossilen Brennstoffen zu rechnen.

¹ Bewertet wurde das Treibhauspotenzial und der Primärenergieaufwand.

² Das Gebäudeenergiegesetz ist aktuell noch nicht verabschiedet, somit sind Änderungen noch möglich.

³ Vgl. [46].

Quellenverzeichnis

1. „Energiedaten: Gesamtausgabe Stand: August 2018“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Zusammenfassung, 2018.
2. K. Schild und H. Brück, *Energie-Effizienzbewertung von Gebäuden*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2010.
3. N. Beckmann, *Wechselwirkungsanalyse zwischen dem physikalischen Optimum, dem betriebswirtschaftlichen Optimum und dem Carbon-Footprint-Optimum (PhO-BwO-CFO)*. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger Verlag, 2018.
4. „Sonderbericht über 1,5 °C globale Erwärmung (SR1.5), 2018“, Intergovernmental Panel on Climate Change.
5. „The Global Climate in 2015–2019“, World Meteorological Organization, Switzerland, 2019.
6. „Nationaler Klimareport“, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2017.
7. D. Welle (www.dw.com), „Forscher: Der Welt droht eine Heißzeit | DW | 06.08.2018“, DW.COM, 06-Aug-2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://p.dw.com/p/32aqI>. [Zugegriffen: 17-Nov-2019].
8. D. Welle (www.dw.com), „US-Regierung kündigt offiziell Pariser Klimaabkommen auf | DW | 04.11.2019“, DW.COM, 04-Nov-2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://p.dw.com/p/3SSnR>. [Zugegriffen: 17-Nov-2019].
9. „DIN V 4108-6 (2003–06); Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden“, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Vornorm ICS 91.120.10.
10. Bundesregierung, *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude*. 2019, S. 182.
11. „DIN EN ISO 6946 : Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren“, Deutsches Institut für Normung e. V, Berlin, 1996.

12. „POWER Data Access Viewer“. [Online]. Verfügbar unter: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Zugegriffen: 14-März-2019].
13. D. Volta, „Das Physikalische Optimum als Basis von Systematiken zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz von Produktionsprozessen“, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2014.
14. P. Icha und G. Kuhs, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2017“, S. 29.
15. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), „Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“, Entwicklungsbericht, 2019.
16. „Umstellung von L- auf H-Gas: Was Sie wissen sollten“, Bundesnetzagentur, Bonn, 2015.
17. „Prozess-Datensatz: Nutzung – 1 kWh Endenergie aus Gas Brennwert (entspr. EnEV) (de)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oekobaudat.de/OEKBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6167bec3-0bc2-425a-9c87-479fa310f8f2&stock=OBD_2019_III&lang=de. [Zugegriffen: 07-Juli-2019].
18. „Wetter und Klima – Deutscher Wetterdienst – Leistungen – Testreferenzjahre (TRY)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>. [Zugegriffen: 10-März-2019].
19. Oschatz, Hartmann, und Werdin, „Anteil der Energieeffizienz an Kostensteigerungen im Wohnungsbau (Kurzgutachten)“, Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden, Dresden, Kurzgutachten, 2018.
20. Neitzel, Michael, „Baukosten und Energieeffizienz Nachweis des Einflusses von Energieeffizienzstandards auf die Höhe von Baukosten“, InWIS Forschung & Beratung GmbH, Bochum, InWIS-Gutachten, 2017.
21. S. Erdmann, A. Lückert, und K. Probst, *Wirtschaftlichkeit baulicher Investitionen bei Erhöhung energetischer gesetzlicher Anforderungen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018.
22. D. Walberg, T. Gniechwitz, und M. Halstenberg, *Kostentreiber für den Wohnungsbau: Untersuchung und Betrachtung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Gestehungskosten und auf die aktuelle Kostenentwicklung von Wohnraum in Deutschland*. Kiel: Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen, 2015.
23. D. Walberg, M. Neitzel, S. Aastrup, W. Gottschalk, und T. Gniechwitz, *Instrumentenkasten für wichtige Handlungsfelder der Wohnungbaupolitik*. Bochum: InWIS Forschung & Beratung GmbH, 2016.
24. „Energieeffizient Bauen – Kredit (153)“, *Kreditanstalt für Wiederaufbau*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Bauen-\(153\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Bauen-(153)/). [Zugegriffen: 10-Juni-2019].
25. Fraunhofer IRB Verlag, „Licht, Luft, Sonne, Wärme und gesundes, behagliches Wohnen“, Stuttgart, Forschungsbericht F2043, 1986.
26. G. Hauser und K. Höttges, *Bauphysik 22*. 2000.

27. J. Raschdorf, „Fenster: PVC-, Alu-, Holz- oder Kombi? – BundesBauBlatt“, *BundesBauBlatt*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesbau-blatt.de/artikel/bbb_Fenster_PVC_Alu_Holz_oder_Kombi_3187837.html. [Zugegriffen: 17-Nov-2019].
28. „Baugenehmigung von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff“, Statistisches Bundesamt, Statistik 5311107187005, 2019.
29. N. Becker, „Ressourceneffizienz der Dämmstoffe im Hochbau“, S. 40, 2014.
30. Heinze GmbH, NL Berlin, und BauNetz, „Stroh | Dämmstoffe | Dämmstoffe | Baunetz_Wissen“, *Baunetz Wissen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/stroh-782356>. [Zugegriffen: 17-Nov-2019].
31. „EN 13829 – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden“, Deutsches Institut für Normung e. V, Berlin, Deutsche Norm ICS 91.120.10, 2001.
32. „Prozess-Datensatz: Lüfter zentral mit WRG 1000 m³/h (de)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=bc243a22-e260-43d9-9072-dc2006bf8d19&stock=OBD_2019_III&lang=de. [Zugegriffen: 23-Juni-2019].
33. „Prozess-Datensatz: Lüfter dezentral (Wand & Decke) 60 m³/h (de)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c8cf7494-2f23-4193-a185-f7d4dfa36b6&stock=OBD_2019_III&lang=de. [Zugegriffen: 23-Juni-2019].
34. Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN und RWTH Aachen University – Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Hrsg., „Energieeffizienz und kostensparendes Bauen – ein Widerspruch?“, Aachen, 2017, S. 19.
35. U. Wagner, L. Rouvel, und H. Schaefer, *Nutzung regenerativer Energien*, 8. Aufl. München: E&M Energie und Management, 1997.
36. „BAFA – Solarthermie“, *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/Solarthermie/solarthermie_node.html. [Zugegriffen: 18-Nov-2019].
37. „Entwicklung der Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau 1) in Deutschland“, BDEW Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e. V., 2019.
38. N. Beckmann, „Abhandlung zur Wechselwirkungsanalyse PhO-BwO-CFO“, Clausthal-Zellerfeld, Abhandlung, 2018.
39. 50hertz, Amprion, Tennet, und Transnet BW, „Prognose der EEG Umlage 2018 nach EEG; Prognosekonzept und Berechnung der ÜNB Stand: 16.10.2017“.

40. B. Droste-Franke, Hrsg., *Brennstoffzellen und virtuelle Kraftwerke: energie-, umwelt- und technologiepolitische Aspekte einer effizienten Hausenergieversorgung*. Berlin: Springer, 2009.
41. „Passivhaus Informationen“, Lokal.Plan, Leipzig, 2014.
43. „Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland“, Umweltbundesamt, Köln, 2011.
44. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat und Referat Presse; Online-Kommunikation; Öffentlichkeitsarbeit, „Ökobaudat“, Berlin, 2019.
45. C. Berger, „Zu viele Heizungsanlagen sind ineffizient“, *springerprofessional.de*, 30-Juni-2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/bauphysik/zu-viele-heizungsanlagen-sind-ineffizient/6557942>. [Zugegriffen: 18-Nov-2019].
46. „Umweltbewusstsein in Deutschland 2018“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin, Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, 2019.

Stichwortverzeichnis

A

Abgleich
 hydraulischer 188
Absorptionskoeffizient 46
Abstrahlungskoeffizient 46
Aggregatzustand 215
Anlagenaufwandszahl 52
Anlagenfaktor 72
Anlage
 raumlufttechnische 115
Annuitätsgleichung 98
Argon 116
Armierungsschicht 133
Ausnutzungsgrad 50
Azimut-Winkel 193

B

Baumwolle 151
Bauteil
 opakes 45
Behaglichkeit 1, 7
Belüftungsanlage
 dezentrale 179
 mechanische 174

Betriebswirtschaftliches Optimum
 (BwO) 60
Bilanzgrenze 24
Blähperlit 154
Blähton 154
Blower-Door-Test 41, 90, 169
Bodenentzugswert 222
Brennstoffzelle 232
Brennwerttechnik 192
Bruttovolumen 37
Bundesamt für Wirtschaft und Aus-
 fuhrkontrolle (BAFA) 214

C

Carbon Footprint 61
Carbon-Footprint-Optimum (CFO) 63
Carnot, Nicolas Léonard Sadi 215, 219
Carnotwirkungsgrad 218
Coefficient of performance 219

D

Dampfmaschine 216
Deckenheizung 190
Dekarbonisierung 13

dezentrale Belüftungsanlage 179
Diffusionsfähigkeit 131
Dispersionsputz 136

E

Effektivität 70
Effizienz 14, 70
Effizienzstrategie 14
elektrische Heizung 235
Emissionsgrad 46
Endenergie 6
Endenergielos 70
Energieaufwand
 kumulierter 69
Energieeinspargesetz 17, 18
Energieeinsparverordnung 17
Erdreichkollektor 222
Erdsonde 222
Erneuerbare-Energien-Gesetz 64
Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz
 18, 19
Europäische Gebäuderichtlinie 17
Europäisches Verbundnetz 64
Evaluation-Winkel 195
Exfiltration 169
expandiertes Polystyrol 153
extrudiertes Polystyrol 153

F

Fenster 115
Fernwärme 227
Fingerspalt 134
flächenbezogener Warmwasserbedarf 52
Flachkollektor 195
Flachs 150
freie Lüftung 170
Fußbodenheizung 189

G

Gasbrennwerttherme 192

Gebäudeenergiegesetz 18
Gebäudegeometrie 35
Gebäudehülle 128
Gesamtenergiedurchlassgrad 117
Gesamtwärmeenergiegewinn 49
Glaswolle 155
Gliederheizkörper 189
Grädigkeit 223

H

Hanf 150
Heizgradtage 188
Heizung
 elektrische 235
Heizungsanlage 188
Heizungsanlagenverordnung 17
Heizungssystem 187
Hinterlüftung 134
Hochbau 17
Holz 152
Holzfassade 134
hydraulischer Abgleich 188

I

Infiltration 169
interner Wärmegewinn 48
Isobar 217
Isobarer Wärmekapazitätswert Luft 41
Isolierung 133, 147

J

Jahresarbeitszahl 220
Jahresheizenergiebedarf 52

K

Kalziumsilikat 155
Kante
 warme 116, 122
Kapillarität 130

Kapitalwertmethode 59
Kerndämmung 134
KfW-Bankengruppe 214
KfW-Effizienzhaus 40+ 90
KfW-Effizienzhaus 40 90
KfW-Effizienzhaus 55 90
Klebemörtel 133
Klimaschutz 12
Klimawandel 11
Kollektorfeld 195
Kompaktheit 114
Kondensationsenergie 192
Konsistenz 14
Konsistenzstrategie 15
Kork 151
Kostengruppen (KG) 94
Kraft-Wärme-Kopplung 227
Kreditinstitut für Wiederaufbau 89
Kreisprozess 216
Kreuzwärmeübertrager 175
Kumulierter Energieaufwand (KEA)
10, 69

L

latente Wärme 192
latente Wärmeabgabe 217
Leakage-Effekt 2, 14
Lebenszykluskosten 58
Luft/Wasser-Wärmepumpe 222
Luftfeuchtigkeit
relative 131
Lüftung
freie 170
Lüftungsgerät
zentrales 175
Lüftungswärmeverlust 41
Luftwechselrate 41, 171

M

Mauerwerk
zweischaliges 134

maximaler Transmissionswärmeverlust
55
mechanische Belüftungsanlage 174
Merit-Order-Prinzip 64
Mindestwärmeschutz 53
Mineraldämmplatte 156
Mineralwolle 155
monatlicher solarer Wärmegewinn 43

N

Nachhaltigkeit 2, 13
Nachtabsenkung 82
Nahwärmennetz 231
Neigungswinkel 195
Niedrigstenergiegebäude 20
Normalmauermörtel 136
Nullenergiehaus 92
Nutzenergie 5
Nutzungsgrad 52

O

Oberflächen-Volumen-Verhältnis 113
Oberputz 133
Ökobaudat.de 62
Ökologie 9
Ölheizung 191
opakes Bauteil 45

P

Paris Agreement 12
Passivhaus 92
Pelletheizung 224
Perimeterdämmung 149
Photosphäre 193
Physikalisches Optimum (PhO) 61
Plattenheizkörper 189
Plattenkollektor 201
Plusenergiehaus 93
Polymermembran 233
Polystyrol 153

expandiertes 153
extrudiertes 153
Polyurethan 153
Power to Gas 234
Power to Heat 211
Primärenergie 6, 10
Primärenergiefaktoren 70
Pufferspeicher 197
Putz 133
PV-Anlage 93

R

raumlufttechnische Anlage 115
Reboundeffekt 14
Referenzhaus 77
Referenzhausverfahren 54
Referenzklima 42
Rekuperator 174
relative Luftfeuchtigkeit 131
Ressourcenbedarf 10
Röhrenkollektor 195, 201
Rollladen 37
Rolladenkästen 37

S

Saison speicher 197, 209
Schafwolle 151
Schichtladung 197
schwarze Wanne 130
Siedelinie 217
Smart-Home-Komponenten 86
Sockelabdichtung 130
Solaranlage 193
Solarkonstante 193
Solarthermieanlage 193
Sole/Wasser-Wärmepumpe 222
Sorptionsrad 175
Steinwolle 155
Stroh 150
Stromerzeugungsanlage 93
Strommix 64

Suffizienz 14, 81
Suffizienzstrategie 15
Systemvariable (SV) 71

T

Tagabsenkung 82
Tauline 217
Technologieanalyse 74
Temperaturabsenkung 82
Testreferenzjahre 31
Thermoplast 153
Transmissionswärmeverlust
maximaler 55
Treibhausgasemissionen 10, 70

V

Vormauerschale 134

W

Wachstums-/Mengeneffekt 14
Wandheizung 190
Wandkonvektor 189
Wanne
schwarze 130
Wärmeabgabe
latente 217
Wärmebereitstellungswirkungsgrad 176
Wärmebrücke 38, 128, 130
Wärmedämmverbundsystem 133
Wärmeeindringkoeffizient 8
Wärmegewinn
interner 48
solarer, monatlicher 43
warme Kante 116, 122
Wärme
latente 192
Wärmepumpe 215
Wärmerekuperator 174
Wärmerückgewinnung 174

Wärmerückgewinnungswirkungsgrad
176
Wärmeschutzverordnung 17
Wärmespeicherfähigkeit 49
Wärmeübertragung 188
Warmwasserbedarf
flächenbezogener 52
Wasser/Wasser-Wärmepumpe 223
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
131
Wechselwirkungsanalyse 70
Windkraftanlage 93
Wohnraumbelüftung 169

Z

zentrales Lüftungsgerät 175
Zugspannung 133
zweischaliges Mauerwerk 134