

# Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten



Autoren:

Zeno Bastian  
Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Feist  
Cornelia Baumgärtner  
Dr. Witta Ebel  
Esther Gollwitzer  
Jessica Grove-Smith  
Dr. Berthold Kaufmann  
Dr. Benjamin Krick  
Dr. Jürgen Schnieders  
Tanja Schulz

Externe Beiträge:

Norbert Stärz, InPlan Ingenieurbüro (Kapitel Heizung)  
Dr. Burkhard Schulze Darup, Architekt (Kapitel Modernisierungsablauf)

Darmstadt, November 2009

Die Veröffentlichung wurde erstellt vom:

Passivhaus Institut  
Dr. Wolfgang Feist  
Rheinstr. 44/46  
D-64283 Darmstadt  
[www.passiv.de](http://www.passiv.de)

im Auftrag des  
Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

#### *Inhaltliche Eingrenzung / Haftungsausschluss*

Diese Veröffentlichung befasst sich vor allem mit dem Teilbereich der energetischen Aspekte einer Gebäudemodernisierung. Sie erhebt daher nicht den Anspruch, auch sämtliche anderen für die Planung und Realisierung eines Sanierungsprojekts wichtigen Aspekte abzudecken.

Der Inhalt dieser Veröffentlichung wurde mit größter Sorgfalt und nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Hinsichtlich der Verwendung von gezeigten Informationen muss dennoch jeder die Anforderungen von Gesetzen, Normen oder Verordnungen eigenverantwortlich überprüfen. Jegliche Haftung für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Inhalte und Daten sowie insbesondere für eventuelle Schäden oder Konsequenzen, die durch die Nutzung des dargestellten Wissensstoffes entstehen, ist ausgeschlossen.

# Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort.....	10
2	Modernisierungsablauf, Qualitätssicherung und Monitoring.....	14
2.1	Partner der Modernisierung – integrale Planung.....	14
2.2	Leistungsphasen.....	14
2.2.1	Grundlagenermittlung.....	14
2.2.2	Vorplanung.....	15
2.2.3	Entwurf.....	15
2.2.4	Genehmigungsplanung.....	15
2.2.5	Ausführungsplanung.....	16
2.2.6	Vorbereitung der Vergabe.....	18
2.2.7	Mitwirkung bei der Vergabe.....	19
2.2.8	Objektüberwachung / Bauüberwachung.....	19
2.2.9	Objektbetreuung und Dokumentation.....	20
2.3	Energiebedingte besondere Leistungen.....	21
2.4	Zeit- und Ablaufplanung.....	22
2.5	Kostenschätzung und Kostenverfolgung.....	22
2.6	Qualitätssicherung.....	22
2.6.1	Luftdichtheit und Winddichtheit.....	23
2.6.2	Wärmebrücken.....	25
2.6.3	Abnahme und Inbetriebnahme.....	28
2.7	Gebäudebetrieb.....	29
2.7.1	Bauherren- und Nutzerinformation.....	29
2.7.2	Facility-Management.....	29
2.7.3	Monitoring.....	30
3	Bestandsaufnahme und Bewertung.....	31
3.1	Analyse des Ist-Zustandes eines Gebäudes.....	31
3.2	Klassifizierung und Bewertung.....	33
3.2.1	Gebäudekennwerte.....	33
3.2.2	Bauteilkennwerte.....	34
4	Gebäudehülle.....	36
4.1	Wanddämmung von außen.....	36
4.1.1	Grundlagen.....	36
4.1.2	Konstruktionen und Materialien.....	38
4.1.2.1	<i>Wärmedämm-Verbundsystem</i> .....	38
4.1.2.2	<i>Vorgehängte hinterlüftete Fassaden</i> .....	48
4.1.2.3	<i>Gemauerte Vorsatzschalen mit gedämmtem Schalenzwischenraum</i> .....	51
4.1.2.4	<i>Nachträgliche Kerndämmung im vorhandenen Mauerwerkszwischenraum</i> .....	52
4.1.3	Wärmebrücken.....	54
4.1.3.1	<i>Auskragende Stahlbeton-Deckenplatten</i> .....	54
4.1.3.2	<i>Wärmebrückenarme Befestigung kleiner Lasten an der Fassade</i> .....	58
4.1.4	Luftdichtheit.....	59
4.1.4.1	<i>Innenputz als luftdichte Ebene</i> .....	59
4.1.4.2	<i>Luftdichte Ebene auf der Außenseite der massiven Bestandswand</i> .....	62
4.2	Wanddämmung von innen.....	63
4.2.1	Grundlagen.....	63
4.2.1.1	<i>Innen oder außen dämmen?</i> .....	63
4.2.1.2	<i>Verhalten von Wärmebrücken bei Innendämmung</i> .....	65
4.2.1.3	<i>Innendämmung und relative Feuchte in der Wand</i> .....	67
4.2.1.4	<i>Vermeidung einer Hinterspülung der Innendämmung</i> .....	68
4.2.2	Konstruktionen und Materialien.....	69

4.2.2.1	Geeignete Dämmstoffe für Innendämmung .....	69
4.2.2.2	Sinnvolle Dämmdicken .....	69
4.2.2.3	Ausführungsvarianten von Innendämmung und ihre Auswirkung auf den Feuchteschutz.....	70
4.2.2.4	Hydrophobierung der Fassade als Maßnahme zur Erhöhung des Schlagregenschutzes bei Innendämmung .....	74
4.2.2.5	Sonderfall: Innendämmung bei Fachwerkhäusern .....	75
4.2.3	Wärmebrücken.....	77
4.2.3.1	Anschluss: Kellerdecke zu Außenwand .....	79
4.2.3.2	Anschluss: Geschossdecke an Außenwand.....	80
4.2.3.3	Anschluss: Innenwand an Außenwand .....	80
4.2.3.4	Anschluss: Fenster an Außenwand .....	81
4.2.4	Luftdichtheit .....	83
4.3	Decken über unbeheizten Kellern.....	86
4.3.1	Grundlagen .....	86
4.3.2	Konstruktionen und Materialien .....	88
4.3.2.1	Auf der Kellerdecke .....	88
4.3.2.2	Unter der Kellerdecke .....	89
4.3.2.3	Perimeterdämmung/Dämmschürze .....	89
4.3.3	Wärmebrücken.....	91
4.3.3.1	Sockelwärmebrücke .....	92
4.3.3.2	Keller-Innenwände .....	93
4.3.3.3	Stützen.....	94
4.3.3.4	Treppenhaus.....	95
4.3.4	Luftdichtheit .....	98
4.4	Bodenplatten auf Erdreich .....	99
4.4.1	Grundlagen .....	99
4.4.1.1	Wärmeverluste über das Erdreich - Ermittlung des Reduktionsfaktors.....	100
4.4.1.2	Vermeidung von Feuchteschäden .....	100
4.4.2	Konstruktionen und Materialien .....	101
4.4.2.1	Dämmschürzen.....	101
4.4.2.2	Empfehlungen für Dämmung auf einer Bodenplatte gegen Erdreich .....	101
4.5	Oberste Geschossdecke .....	102
4.5.1	Grundlagen .....	102
4.5.2	Konstruktionen und Materialien .....	103
4.5.2.1	Unter der obersten Geschossdecke.....	103
4.5.2.2	Zwischen den Deckenbalken.....	103
4.5.2.3	Auf der obersten Geschossdecke .....	104
4.5.3	Wärmebrücken.....	105
4.5.4	Luftdichtheit .....	106
4.6	Dach .....	107
4.6.1	Geneigte Dächer .....	107
4.6.1.1	Grundlagen .....	108
4.6.1.2	Konstruktionen und Materialien .....	113
4.6.2	Flachdächer .....	116
4.6.2.1	Grundlagen .....	116
4.6.2.2	Konstruktionen und Materialien .....	117
4.6.3	Wärmebrücken.....	119
4.6.3.1	Wände und Kamine.....	119
4.6.3.2	Falleitungslüftung .....	121
4.6.4	Luftdichtheit .....	123
4.6.4.1	Luftdichtheit in der Fläche.....	124
4.6.4.2	Anschlüsse.....	124
4.6.4.3	Durchdringungen.....	125
4.7	Fenster .....	126
4.7.1	Grundlagen .....	126
4.7.1.1	Exkurs: Schimmel durch Fenstererneuerung? .....	126
4.7.1.2	Anforderungen an Fenster.....	127
4.7.2	Konstruktionen und Materialien .....	131
4.7.2.1	Verglasungen und ihre Kennwerte.....	131
4.7.2.2	Fensterrahmen und ihre Kennwerte.....	134

4.7.2.3	<i>Festereinbau</i> .....	137
4.7.2.4	<i>Dachflächenfenster</i> .....	138
4.7.2.5	<i>RWA-Öffnungen und Aufzugsschachtbelüftung</i> .....	140
4.7.3	<i>Wärmebrücken</i> .....	141
4.7.3.1	<i>Einbauposition</i> .....	141
4.7.3.2	<i>Überdämmung des Fensterrahmens</i> .....	142
4.7.3.3	<i>Fensterbank</i> .....	142
4.7.4	<i>Luftdichtheit</i> .....	143
4.8	<b>Haustüren</b> .....	145
4.8.1	<i>Grundlagen</i> .....	145
4.8.1.1	<i>Einbruchschutz</i> .....	145
4.8.1.2	<i>Kellertür</i> .....	145
4.8.2	<i>Luftdichtheit</i> .....	146
4.9	<b>Luftdichtheit - Grundprinzipien</b> .....	147
4.9.1	<i>Problematik von Undichtigkeiten</i> .....	147
4.9.2	<i>Grundprinzipien für die Verbesserung der Luftdichtheit</i> .....	149
4.9.3	<i>Empfohlenes Luftdichtheitsniveau</i> .....	151
4.9.4	<i>Messung der Luftdichtheit</i> .....	151
4.9.4.1	<i>Drucktest mit der Blower-Door</i> .....	151
4.9.4.2	<i>Erforderliche Vorbereitungen für den Drucktest</i> .....	153
4.9.4.3	<i>Zeitpunkt des Drucktests</i> .....	153
5	<b>Lüftung</b> .....	154
5.1	<b>Grundlagen</b> .....	154
5.1.1	<i>Arten der Gebäudelüftung</i> .....	154
5.1.1.1	<i>Fugenlüftung</i> .....	154
5.1.1.2	<i>Fenster-Kipplüftung</i> .....	155
5.1.1.3	<i>Fenster-Stoßlüftung</i> .....	155
5.1.1.4	<i>Die Minimallösung: Abluftanlage</i> .....	156
5.1.1.5	<i>Die Komfortlösung: Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung</i> .....	157
5.1.2	<i>Planungsprinzipien für eine Wohnungslüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung</i> .....	157
5.1.2.1	<i>Zonierung</i> .....	157
5.1.2.2	<i>Luftmenge</i> .....	158
5.1.2.3	<i>Luftmengenverteilung</i> .....	158
5.1.2.4	<i>Steuerung</i> .....	159
5.1.2.5	<i>Beheizbarkeit über die Zuluft</i> .....	159
5.1.2.6	<i>Kanalführung</i> .....	160
5.1.2.7	<i>Sommerbetrieb</i> .....	162
5.1.2.8	<i>Hilfsmittel</i> .....	162
5.2	<b>Anforderungen an Lüftungssysteme</b> .....	163
5.2.1	<i>Verminderung der Lüftungswärmeverluste</i> .....	163
5.2.1.1	<i>Balance-Abgleich der Lüftung</i> .....	163
5.2.1.2	<i>Effektiver Wärmebereitstellungsgrad</i> .....	164
5.2.2	<i>Elektroeffizienz</i> .....	165
5.2.3	<i>Hygiene</i> .....	166
5.2.3.1	<i>Reinigbarkeit</i> .....	166
5.2.3.2	<i>Materialien der Kanäle und Schalldämpfer</i> .....	166
5.2.3.3	<i>Kondensatabfuhr</i> .....	166
5.2.3.4	<i>Interne Leckage</i> .....	167
5.2.3.5	<i>Reinhaltung während der Bauphase</i> .....	167
5.2.3.6	<i>Luftfilter</i> .....	167
5.2.4	<i>Schallschutzanforderungen</i> .....	168
5.2.5	<i>Brandschutzanforderungen</i> .....	169
5.3	<b>Bauteile und Konstruktionen</b> .....	170
5.3.1	<i>Lüftungsgerät</i> .....	170
5.3.1.1	<i>Anordnung von Zentralgeräten</i> .....	170
5.3.1.2	<i>Qualitätsanforderungen an Zentralgeräte</i> .....	171
5.3.2	<i>Kanäle</i> .....	171
5.3.3	<i>Ein-, Aus- und Überströmöffnungen</i> .....	172
5.3.3.1	<i>Außen- und Fortluftführung</i> .....	172

5.3.3.2	Anordnung von Zulufteinlässen .....	172
5.3.3.3	Überströmöffnungen.....	173
5.3.4	Integration von Lüftungsanlagen im Altbau .....	174
5.3.4.1	Gebäudezentrale oder wohnungszentrale Lüftungsanlage? .....	174
5.3.4.2	Lüftungsgerät .....	176
5.3.4.3	Kanäle in der abgehängten Decke .....	177
5.3.4.4	Unverkleidete Kanäle .....	180
5.3.4.5	Lüftungskanäle im Fußbodenaufbau.....	180
5.3.4.6	Horizontaler Leitungsverzug im Dach- bzw. Kellerbereich.....	180
5.3.4.7	Vertikale Kanalführung .....	180
5.3.4.8	Nachträgliche Erstellung von Wand- und Deckendurchbrüchen .....	181
5.3.5	Praktische Hinweise für Ausführung, Inbetriebnahme und Wartung .....	182
5.3.5.1	Planlage und Bauaufnahme .....	182
5.3.5.2	Mieterinformation .....	182
5.3.5.3	Gewerkekoordination .....	183
5.3.5.4	Inbetriebnahme und Einregulierung .....	183
5.3.5.5	Wartung.....	184
<b>6</b>	<b>Heizung und Warmwasserbereitung.....</b>	<b>185</b>
6.1	Grundlagen.....	185
6.1.1	Heizlast für Raum- und Warmwasserwärmung .....	186
6.1.2	Warmwasser: Wärme- und Leistungsbedarf .....	187
6.1.3	Thermische Behaglichkeit .....	189
6.1.4	Hilfsmittel .....	189
6.2	Wärmebereitstellung.....	190
6.2.1	Qualitätsanforderungen .....	191
6.2.1.1	Wärmeerzeuger .....	191
6.2.1.2	Speicher.....	192
6.2.2	Brennstoffbetriebene Wärmeerzeuger .....	193
6.2.2.1	Brennwert-Wärmeerzeuger .....	193
6.2.2.2	Blockheizkraftwerk .....	194
6.2.2.3	Innovative Wärmeerzeugung.....	195
6.2.2.4	Feuerstätten für Festbrennstoffe.....	195
6.2.2.5	Abgasableitung .....	197
6.2.3	Wärmeerzeuger mit Stromanwendung.....	198
6.2.3.1	Luft-Wärmepumpe.....	198
6.2.3.2	Sole- bzw. Wasser-Wärmepumpe .....	200
6.2.4	Solarthermie.....	201
6.3	Wärmeverteilung .....	202
6.3.1	Pumpen .....	202
6.3.1.1	Heizkreis.....	202
6.3.1.2	Warmwasser-Zirkulation.....	203
6.3.2	Hydraulischer Abgleich.....	203
6.3.2.1	Vorher rechnen - hinterher einstellen .....	204
6.3.2.2	Heizkörpersystem.....	204
6.3.2.3	Weg von der Drosselung zu mehr Effizienz.....	205
6.3.3	Zwei-, Drei- und Vierleiter-System .....	206
6.3.4	Dämmung von Wärmeverteilungen .....	206
6.4	Wärmeabgabesysteme .....	210
6.4.1	Heizkörpersystem .....	210
6.4.2	Flächenheizsysteme.....	211
6.4.3	Zuluftheizung .....	213
6.5	Vorschriften und allgemeine Planungshinweise .....	213
6.5.1	Allgemeine Planungshinweise .....	213
6.5.2	VOB Teil C und abgeleitete Normen.....	214
6.5.3	Warmwassersysteme nach Anforderung Arbeitsblatt W551 Legionellen-Richtlinie sowie EnEV 2007 / 2009 .....	214
6.5.3.1	Definition Anlagentyp .....	214
6.5.3.2	Anforderungen an Trinkwassererwärmer (TWE) .....	215
6.5.3.3	Anforderungen an Leitungsanlagen .....	215

6.5.3.4	Betrieb .....	216
6.5.3.5	Bautechnische Maßnahmen .....	217
<b>7</b>	<b>Bauphysikalische Grundlagen.....</b>	<b>218</b>
7.1	Thermische Behaglichkeit .....	218
7.1.1	PMV und PPD.....	218
7.1.2	Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit .....	218
7.1.2.1	Aktivität [met].....	218
7.1.2.2	Kleidung [clo].....	218
7.1.3	Formen der Wärmeabgabe des Körpers .....	219
7.1.4	Lokale thermische Behaglichkeit.....	219
7.1.5	Thermischer Schlafkomfort.....	219
7.1.6	Kategorien für die Behaglichkeit des Umgebungsklimas .....	220
7.1.7	Messung der thermischen Behaglichkeit.....	220
7.2	Klimatische Randbedingungen.....	220
7.3	Wärmeübertragung .....	222
7.3.1	Wärmetransportmechanismen: Strahlung, Leitung, Konvektion.....	223
7.3.1.1	Strahlung.....	223
7.3.1.2	Wärmeleitung.....	225
7.3.1.3	Konvektion .....	225
7.3.2	Stationärer Wärmedurchgang, U-Wert.....	226
7.3.3	Wärmespeicherung .....	227
7.3.4	Dynamische Wärmeleitung: Speichern oder Dämmen? .....	228
7.3.5	Absorption von Strahlungswärme .....	229
7.3.6	Wärmebrückenvermeidung.....	229
7.4	Luftaustausch .....	230
7.4.1	Verunreinigungen der Innenraumluft.....	230
7.4.1.1	Gesetze und Normen .....	230
7.4.1.2	Häufige Schadstoffe.....	232
7.4.1.3	Hinweise für die Sanierung.....	232
7.4.2	Frischlufbedarf .....	234
7.4.2.1	DIN 1946-6.....	234
7.4.2.2	Einflussfaktoren auf den Frischluftbedarf.....	234
7.4.2.3	Fazit.....	235
7.4.3	Lüftungswärmeverlust .....	235
7.4.3.1	Wärmeverluste durch verschieden Lüftungsarten.....	236
7.4.3.2	Berechnung der Lüftungswärmeverluste.....	237
7.5	Feuchteschutz .....	238
7.5.1	Problematik hoher Feuchtigkeiten.....	238
7.5.2	Feuchtequellen.....	238
7.5.3	Fechteaufnahme von Luft.....	239
7.5.4	Fechteaufnahme von Baustoffen .....	241
7.5.4.1	Mechanismen der Feuchtespeicherung .....	242
7.5.4.2	Wasseraktivität ( $a_w$ -Wert).....	242
7.5.5	Feuchtetransport .....	243
7.5.5.1	Diffusion.....	243
7.5.5.2	Flüssigwassertransportmechanismen .....	243
7.5.5.3	Oberflächenfeuchteübergang .....	244
7.5.5.4	Dampfkonvektion.....	244
7.5.6	Dampfbremse und diffusionsoffene Luftdichtheitsebene .....	244
7.5.6.1	Dampfbremse.....	244
7.5.6.2	Diffusionsoffene Luftdichtheitsebene .....	245
7.6	Schallschutz .....	246
7.6.1	Grundlagen .....	246
7.6.1.1	Schall.....	246
7.6.1.2	Schallpegel .....	247
7.6.1.3	Bewertete Schallpegel.....	247
7.6.1.4	Schallschutz.....	248
7.6.2	Schallschutz von Außenbauteilen, insbesondere in Verbindung mit Wärmeschutzmaßnahmen.....	248

7.6.2.1	<i>Außendämmung</i> .....	249
7.6.2.2	<i>Innendämmung</i> .....	250
7.6.2.3	<i>Fenster</i> .....	250
7.6.3	Schallschutz zwischen Wohnungen.....	251
7.6.4	Schallschutz betreffend Gebäudetechnik.....	252
7.6.4.1	<i>Lüftung</i> .....	252
7.6.4.2	<i>Wärmepumpen (Kompaktaggregate)</i> .....	253
7.7	Brandschutz.....	255
7.7.1	Allgemein.....	255
7.7.2	Brandschutzanforderungen bei der energetischen Altbausanierung.....	256
7.7.2.1	<i>Wärmedämmung von Bauteilen</i> .....	256
7.7.2.2	<i>Öffnungen</i> .....	257
7.8	Tageslicht.....	257
7.8.1	Der Tageslichtquotient.....	257
7.8.2	Einfluss der Modernisierung auf den Tageslichtquotienten.....	258
7.8.2.1	<i>Fenster</i> .....	258
7.8.2.2	<i>Innere Einflüsse auf die Belichtung</i> .....	259
7.8.2.3	<i>Äußere Einflüsse auf die Belichtung</i> .....	260
8	Wirtschaftlichkeit und Energiewirtschaftliche Aspekte.....	261
8.1	Wirtschaftlichkeit von Wärmeschutzmaßnahmen.....	261
8.1.1	Motivation, Zusatznutzen und volkswirtschaftliche Aspekte.....	261
8.1.2	Erläuterungen zur Methode der Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	262
8.1.2.1	<i>Energiebilanzberechnung für Wohngebäude nach PHPP</i> .....	262
8.1.2.2	<i>Dynamische Kapitalwertmethode und grundlegende Annahmen</i> .....	263
8.1.3	Energiekosten.....	263
8.1.4	Korrekturer Ansatz für Investitionskosten (Restwertabzug).....	265
8.1.5	Kombination von Maßnahmen – vom Altbau zum Passivhaus.....	267
8.1.6	Das Kopplungsprinzip.....	270
8.1.7	Zukunftsweisender Wärmeschutz ist sinnvoll.....	271
8.1.8	Vergleich mit dem gesetzlichen Standard (EnEV 2009).....	272
8.1.9	Ist reine Fensterlüftung eine zeitgemäße Methode für gute Luftqualität?.....	273
8.1.10	Preissteigerung und Zinsentwicklung Unsicherheit der Annahmen.....	273
8.1.11	Schrittweise Modernisierung wegen Kapitalmangels.....	274
8.1.12	Fazit.....	274
8.2	Energieträger, Primärenergiebedarf.....	275
8.2.1	Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie, Nutzenergie.....	275
8.2.2	Primärenergiefaktor.....	276
8.2.3	Energiedienstleistung.....	277
8.3	Erneuerbare Energiequellen.....	277
8.4	Treibhauseffekt und Klimaschutz.....	279
9	Anhang.....	282
9.1	Zeittypische Bauteilaufbauten und U-Werte im Bestand (Deutschland, Alte Bundesländer).....	282
9.1.1	Einfamilienhäuser.....	282
9.1.1.1	<i>bis 1918, Einfamilienhaus (Fachwerk)</i> .....	282
9.1.1.2	<i>bis 1918, Einfamilienhaus (massiv)</i> .....	283
9.1.1.3	<i>1919-1948, Einfamilienhaus</i> .....	284
9.1.1.4	<i>1949-1957, Einfamilienhaus</i> .....	285
9.1.1.5	<i>1958-1968, Einfamilienhaus</i> .....	286
9.1.1.6	<i>1969-1978, Einfamilienhaus (Schrägdach)</i> .....	287
9.1.1.7	<i>1969-1978, Einfamilienhaus (Flachdach)</i> .....	288
9.1.2	Reihenhäuser.....	289
9.1.2.1	<i>bis 1918, Reihenhaus</i> .....	289
9.1.2.2	<i>1919-1948, Reihenhaus</i> .....	290
9.1.2.3	<i>1949-1957, Reihenhaus</i> .....	291
9.1.2.4	<i>1958-1968, Reihenhaus</i> .....	292
9.1.2.5	<i>1969-1978 Reihenhaus (Schrägdach)</i> .....	293

9.1.2.6	1969-1978 Reihenhaus (Flachdach) .....	294
9.1.3	Kleine Mehrfamilienhäuser .....	295
9.1.3.1	bis 1918, kleines Mehrfamilienhaus (Fachwerk).....	295
9.1.3.2	bis 1918, kleines Mehrfamilienhaus (massiv) .....	296
9.1.3.3	1919-1948, kleines Mehrfamilienhaus.....	297
9.1.3.4	1949-1957, kleines Mehrfamilienhaus.....	298
9.1.3.5	1958-1968, kleines Mehrfamilienhaus (Schrägdach).....	299
9.1.3.6	1958-1968, kleines Mehrfamilienhaus (Flachdach) .....	300
9.1.3.7	1969-1978, kleines Mehrfamilienhaus (Schrägdach).....	301
9.1.3.8	1969-1978, kleines Mehrfamilienhaus (Flachdach) .....	302
9.1.4	Große Mehrfamilienhäuser .....	303
9.1.4.1	bis 1918, großes Mehrfamilienhaus .....	303
9.1.4.2	1919-1948, großes Mehrfamilienhaus.....	304
9.1.4.3	1949-1957, großes Mehrfamilienhaus.....	305
9.1.4.4	1658-1968, großes Mehrfamilienhaus.....	306
9.1.4.5	1969-1978, großes Mehrfamilienhaus.....	307
9.1.5	Hochhäuser.....	308
9.1.5.1	1969-1978, Hochhaus .....	308
9.2	Weiterführende Literatur und Hilfsmittel .....	309
9.3	Literaturverzeichnis .....	311

## 1 Vorwort

Die hochwertige Sanierung ist ein Gebot der Zeit –  
Vorteilhaft für den Eigentümer und wichtig für die Gemeinschaft

Dass „Eigensinn die beste Grundlage für eine vorteilhafte Entwicklung auch der Gemeinschaft“ darstellt, ist eines der Grunddogmen der modernen Ökonomie. Mit einem gewissen Recht ist dieses Dogma heute umstritten: Zu allgemein und leer sind die verwendeten Begriffe – und uns allen ist klar, dass es zumindest eine Frage der Regeln des ökonomischen Miteinander ist, ob dieses Versprechen in Erfüllung geht.

Eine der wesentlichen Regeln, an die sich die ökonomischen Austauschbeziehungen halten müssen, ist eine korrekte Bestimmung des „Eigensinns“ – keinesfalls kann darunter der unmittelbare, kurzfristige, rücksichtslose Vorteil des Stärkeren gegenüber dem Schwächeren verstanden werden, wie es leider in den Zeiten vor der Finanzkrise immer wieder gern oberflächlich gesehen wurde. Räumlicher, zeitlicher und sozialer Horizont spielen dabei eine Rolle. Kurzfristiger Vorteil kann schnell in kaum mehr reparable mittel- und langfristige Probleme umschlagen. Einbeziehen der Verantwortung für unsere natürliche, kulturelle und soziale Umwelt wird dagegen auf Dauer positive Auswirkungen auch auf den wirtschaftlichen Erfolg haben.

Alles beginnt damit, die ökonomische Bewertung überhaupt korrekt vorzunehmen. Hier herrscht derzeit immer noch große Verwirrung. Gebäude sind extrem langlebige Wirtschaftsgüter – vergleichbar in ihrem Lebenszyklus mit dem Prototyp der nachhaltigen Wirtschaft, dem Baum und dem aus Bäumen gebildeten Wald. Dem muss in der ökonomischen Bewertung Rechnung getragen werden: Für nur 2 oder 5 oder 10 Jahre würden wir gar keine Gebäude errichten, wirtschaftlicher wäre es dann in jedem Fall, in Zelten zu wohnen.

Jede Entscheidung für Maßnahmen an Gebäuden sind damit von sehr langer zeitlicher Tragweite: Und das gilt auch für die Sanierung. Diese Tatsache ist aus der Sicht aller Beteiligten leicht verständlich:

- Eine Sanierung kostet Investitionsmittel – und dies in der Regel nicht zu knapp. Oft sind solche Mittel noch nicht einmal eingeplant.
- Eine Sanierung erfordert Aktivität: Sie muss geplant, ausgeschrieben, abgestimmt und vorbereitet werden. Dazu haben Eigentümer und Bewohner wenig Zeit.
- Eine Sanierung erzeugt Lärm, Schmutz und andere Unannehmlichkeiten. Das vermeidet man so lange wie nur möglich.

Und dies spiegelt sich auch in der Statistik nieder: In jedem Fall weniger als 1,5 % des Wohngebäudebestandes in Deutschland werden jährlich vollsaniert. Das würde Abstände von mehr als 50 Jahren zwischen den Sanierungen bedeuten – diese Zahl täuscht ein wenig, weil es eben auch die Maßnahmen von schrittweisen partiellen Erneuerungen an einzelnen Bauteilen gibt. Aus der Statistik geht jedenfalls klar hervor, dass die Zyklen der Erneuerung lang sind;

eher in Bereichen von 40 Jahren und mehr als die häufig gehandelten 20 bis 25 Jahre. Daher wurden in letzter Zeit Forderungen nach einer Beschleunigung der Sanierungsraten laut - insbesondere, um die in der Modernisierung der Bauteile schlummernden Energie-Einspar-Potentiale zu mobilisieren. Ob sich dieser Wunsch nach Beschleunigung erfüllen lässt, ist jedoch schon nach den oben reflektierten Gründen für die Zögerlichkeit bzgl. baulicher Maßnahmen eher skeptisch zu beurteilen. Noch skeptischer wird man, wenn man ökonomische und ökologische Kriterien mit heran zieht:

Die Bauerneuerung erfordert immer einen nicht unerheblichen Kapitaleinsatz: Geht man schonend und im bewohnten Zustand vor (das ist in jedem Fall eine nicht unbedeutende Belästigung der Bewohner), so liegen minimal erreichte Kosten bei 200 bis 400 €/m<sup>2</sup> Wohnfläche – oft werden aber, wenn die Wohnung leergezogen werden muss und auch Grundrissänderungen anstehen, Kosten um 700 bis 1000 €/m<sup>2</sup> erreicht. Der gesamte Kapitalbedarf ist daher gigantisch: Er liegt fast in der Größenordnung der ursprünglichen Errichtungskosten der Gebäude. Diese wiederum bilden den wesentlichen Teil des Kapitalstocks in Deutschland: Es muss daher gefragt werden, ob für eine massiv beschleunigte Erneuerung überhaupt das erforderliche Kapital zur Verfügung steht.

Dazu kommen auch Effekte, welche die Bauwirtschaft und den Arbeitsmarkt am Bau betreffen: Werden Maßnahmen massiv vorgezogen, so fallen sie natürlich in der Folgezeit nur in geringerem Umfang an: Das kann zu einem Boom an den Märkten und damit verbundenem Aufbau von Produktionskapazitäten führen, die dann hinterher über Jahrzehnte brach liegen.

Vernünftiger ist es daher, bei der baulichen Sanierung auf die natürlichen Erneuerungszyklen zu setzen: Die Bausubstanz ist keine stationäre Größe; es wird ständig dort ein Fenster ausgetauscht, da eine Fassade erneuert, anderswo wiederum ein Kessel ersetzt. Die Motive, aus denen dies erfolgt, sind nicht so entscheidend: Entscheidend ist vielmehr die Qualität, mit der jede einzelne Maßnahme ausgeführt wird.

Denn: Ist ein Bauteil einmal (einzeln oder im Zug einer Gesamtsanierung) modernisiert worden, dann widerspricht es jeder wirtschaftlichen und auch jeder pragmatischen Logik, dieses Bauteil in der näheren Folgezeit (d.h. vor Ablauf des natürlichen Zyklus) noch einmal anzufassen. Da diese Zyklen im Bereich von 30 bis 50 Jahre liegen, lautet die entscheidende Konsequenz:

„Wenn schon, denn schon“.

Das ist schon vor dem oben gegebenen Hintergrund leicht zu verstehen: Ist die Maßnahme erst einmal ausgeführt, so werden alle Beteiligten vermeiden, dieses Bauteil noch einmal zu erneuern. Die ökonomischen Bedingungen sind sogar noch strikter: Wird z.B. im Zuge einer Sanierung ein nur mäßiger Wärmeschutz (z.B. ein U-Wert der Außenwand von immer noch ca. 0,4 W/(m<sup>2</sup>K)) erreicht, so lohnt sich auch in der Zukunft unter keinen Umständen mehr eine Sanierung auf die eigentlich gebotenen noch besseren Werte (das ökonomische Optimum liegt zwischen 0,15 und 0,20 W/(m<sup>2</sup>K)): das liegt daran, dass die konstruktiven Opportunitätskosten jeder solchen Baumaßnahme so hoch sind: Es muss immer ein Gerüst gestellt werden, es muss die neue Fassade befestigt werden, es muss ein Witterungsschutz ausgeführt werden -

alle diese Kosten sind weitgehend unabhängig von der Dicke der ausgeführten Dämmung. Wird eine Wärmedämmung unter diesen Umständen von vorn herein in der ökonomisch gebotenen Qualität – wie in diesem Handbuch dargestellt - ausgeführt, so zahlt sich dies aus. Wird das versäumt und eine nur suboptimale Dämmung ausgeführt – so sind für einen evtl. „zweiten Schritt“ alle Opportunitätskosten noch einmal aufzubringen. Und das rechnet sich in keinem Fall. Mit anderen Worten: Eine mittelmäßige Ausführung führt nicht nur jetzt zu entgangenen Erlösen, sie führt sogar auf alle absehbare Zukunft dazu, dass die betreffende Qualität dann mit ökonomisch vernünftigen Maßnahmen nicht mehr erreicht werden kann.

Die bessere Qualität führt aber nicht nur zu einer weit besseren Wirtschaftlichkeit und zu weit höheren Energiekosten-Einsparungen: Vielmehr

- schützt sie auch die Bausubstanz,
- verhindert Schimmel und andere Bauschäden,
- erhöht die thermische Behaglichkeit und damit den Nutzen für die Bewohner

und führt damit zu einer höheren Wertigkeit der Wohnung, damit leichter Vermietbarkeit und einem nachhaltigen Wertzuwachs. Es ist somit gar nicht richtig, wenn vielfach geglaubt wird, es gäbe in diesem Bereich ein Investor/Nutzer-Dilemma: Gerade der Investor profitiert von einer qualitativ gut ausgeführten Maßnahme am meisten: Nämlich durch stabile Vermietungsquoten und zufriedene Mieter. Modelle, die Heizkosten dann vereinfacht abrechnen zu können (weil sie ohnehin vernachlässigbar gering werden), tun ein Übriges, diese Qualität attraktiv zu machen.

Dass die betreffenden hochwertigen Sanierungsmassnahmen gerade makroökonomisch besonders vorteilhaft sind, daran besteht kein Zweifel:

- hier wird wirklich eine Wertschöpfungskette in Gang gesetzt: Die verbesserte bauliche Qualität schafft Werte, und diese werden hier (an inländischen Immobilien), mit hiesiger Arbeitskraft (vor allem dem Handwerk) und mit in Europa produzierten hochwertigen Komponenten geschaffen. Der Vorteil für Europa ist gleich ein vierfacher:
- Die Werte der Immobilien werden substantiell verbessert.
- Es werden Arbeitsplätze mit hoher Motivation und hoher Stabilität geschaffen.
- Es werden Abhängigkeiten von Energielieferungen aus Nahost und Asien reduziert.
- Es wird ein nachhaltiger Beitrag zum Klimaschutz erbracht.

Dazu, dieses hohe Potential auch qualitativ hochwertig zu nutzen, will dieses Handbuch einen Beitrag leisten. Es behandelt die Grundlagen auf konstruktiver, bauphysikalischer und ökonomischer Ebene – es zeigt die wesentlichen Kriterien für eine hochwertige Sanierung unter Einsatz von Passivhaus-Komponenten und es gibt Hinweise für eine korrekte Ausführung.

Die hier aufgeführten Maßnahmen (die vielen im Vergleich zum heute noch üblichen Durchschnitt „extrem“ erscheinen mögen) sind bereits mehrfach in Demonstrationsvorhaben erfolgreich ausgeführt worden, wie z.B. die ausführlich dokumentierten Modellprojekte in Frankfurt, Ludwigshafen und Nürnberg [117], [107], [135]. Die Maßnahmen haben sich bewährt, sie erweisen sich als reproduzierbar und sie führen zu für viele verblüffend erscheinenden Energieeinsparungen und zugleich Komfort-Verbesserungen.

So schließt sich der Kreis: Wenn die wirtschaftlichen Vorteile des Einzelnen aus einem substantiellen Vorteil entspringen, der andere nicht benachteiligt und nicht behindert – dann kann daraus tatsächlich ein Vorteil auch für die gesamte Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft entspringen. Bei der energetisch hochwertigen Sanierung von Gebäuden ist dies der Fall: Der Zuwachs von Wert beim Eigentümer und beim Nutzer wird begleitet von einer Vielzahl von positiven Folgen für uns alle. Es ist daher sinnvoll, die Voraussetzungen zu schaffen, diese Vorteile ausschöpfen zu können. Im Mittelpunkt steht dabei die substantielle Verbesserung der Qualität, so wie es in diesem Handbuch dargestellt wird.

Eine geringere Qualität sollte heute bei Sanierungen an Bauteilen von Gebäuden nicht mehr ausgeführt werden; wer es dennoch tut, sollte sich später nicht über teure Folgekosten beklagen.

Darmstadt/Innsbruck November 2009

Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Feist

Leitung Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen / Bauphysik der Universität  
Innsbruck  
Wissenschaftlicher Leiter des Passivhaus Instituts

## 2 Modernisierungsablauf, Qualitätssicherung und Monitoring

Ist die Entscheidung zur Durchführung einer Modernisierung gefallen, gilt es zunächst die geeigneten Planungspartner für die Umsetzung zu finden. Grundsätzlich sollte zunächst ein Gesamtkonzept für die Maßnahmen erstellt werden, unabhängig davon, ob alle Bauteile gleichzeitig oder in zeitlichem Abstand saniert werden. Nur dadurch können falsche Investitionen oder doppelte Kosten vermieden werden.

### 2.1 Partner der Modernisierung – integrale Planung

Es hängt vom Umfang des Projektes ab, wie groß das Planungsteam gewählt werden sollte. Grundsätzlich sollten möglichst viele Kompetenzen auf möglichst wenige Beteiligte gebündelt und eine klare Teamstruktur geschaffen werden, um eine hohe Effizienz zu erreichen. Es gilt in interdisziplinärer Zusammenarbeit einen integralen Planungsprozess durchzuführen, bei dem die Aspekte umfassend optimiert werden. Beim Einfamilienhaus heißt das im Idealfall, dass ein energetisch versierter Architekt alle Belange abdeckt. Bei komplexeren Planungsaufgaben ist es sinnvoll, hochwertige Expertise durch die gezielte Auswahl von qualifizierten und erfahrenen Sonderfachleuten zu bündeln. Gegebenenfalls sollten Institute zum späteren Monitoring, Facility-Management oder zur Gebäudezertifizierung frühzeitig in den Planungsprozess einbezogen werden.

### 2.2 Leistungsphasen

Die Planenden sollten sich bewusst sein, dass die Gestaltungsmöglichkeiten zu Beginn eines Planungsprozesses am höchsten sind und mit jeder weiteren Planungsphase abnehmen. Deshalb ist es unabdingbar, dass möglichst alle Beteiligten von Anfang an synergetisch zusammenarbeiten. Bei größeren Planungsteams sollte der Projektleiter – oftmals der Architekt - die Sonderfachleute zumindest an den relevanten Entscheidungspunkten frühzeitig einbinden, um Fehlentscheidungen zu vermeiden.

Die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (vgl. [141]) behandelt den Umfang von Bauleistungen und deren Honorierung. Im Folgenden werden die wichtigsten Inhalte daraus zusammengefasst und Hinweise auf energetisch relevante Aspekte gegeben.

#### 2.2.1 Grundlagenermittlung

Eine sorgfältige Grundlagenermittlung ist Voraussetzung für einen zielgerichteten Projektablauf. Der Planer klärt mit dem Bauherrn die Aufgabenstellung und berät ihn zum gesamten Leistungsbedarf. Die energetischen Ziele sollten ebenfalls bereits im Vorfeld festgelegt werden. Bereits zu diesem Zeitpunkt sollte die Auswahl des Planungsteams erfolgen.

**Alle Planungsbeteiligten sollten von Anfang an synergetisch zusammenarbeiten.**

### 2.2.2 Vorplanung

Die Vorplanung beginnt mit der Analyse der Grundlagen und der Abstimmung der Zielvorstellungen. Daraus wird ein planungsbezogener Zielkatalog erstellt, in dem die Programmziele erfasst sind. Dabei sollten die energetischen Standards benannt sein inkl. der wesentlichen dazu erforderlichen Maßnahmen und Techniken.

Auf dieser Grundlage wird ein Planungskonzept erarbeitet und zeichnerisch dargestellt einschließlich Untersuchung alternativer Lösungsmöglichkeiten. Bereits zu diesem Zeitpunkt setzt die integrale Planung an und die Leistungen der anderen an der Planung fachlich Beteiligten müssen in den Vorentwurf einbezogen werden. Ferner gehören dazu die bauphysikalischen und energiewirtschaftlichen Aspekte wie Effizienzmaßnahmen, rationelle Energieverwendung und die Verwendung erneuerbarer Energien sowie die weichen Faktoren hinsichtlich der Behaglichkeit und des Komforts.

Zu diesem Zeitpunkt müssen intensive Abstimmungen innerhalb des Planungsteams durchgeführt werden. Fehlentscheidungen an dieser Stelle sind die teuersten – zugleich lässt sich zu diesem Zeitpunkt durch hochwertige Planung mitunter ein hoher wirtschaftlicher Vorteil erzielen. Die erste Kostenschätzung nach DIN 276 oder nach dem wohnungsrechtlichen Berechnungsrecht erfolgt bereits zu diesem Zeitpunkt (s. Kap. 2.5.2). Nach außen hin sind Vorverhandlungen mit Behörden und externen Experten zu führen.

### 2.2.3 Entwurf

Die Leistungsphase 3 wird als Entwurfsplanung bezeichnet oder als System- und Integrationsplanung. Dabei wird das vorliegende Vorentwurfskonzept vertieft stufenweise bearbeitet. Das geschieht wiederum mit dem integralen Planungsansatz im Planungsteam, wie er bereits beim Vorentwurf mit den zahlreichen Faktoren beschrieben worden ist. Die jeweiligen Planungen der Fachingenieure müssen eingearbeitet und abgestimmt werden. Die energetische Berechnung kann mit Abschluss dieser Phase in endgültiger Form erstellt werden.

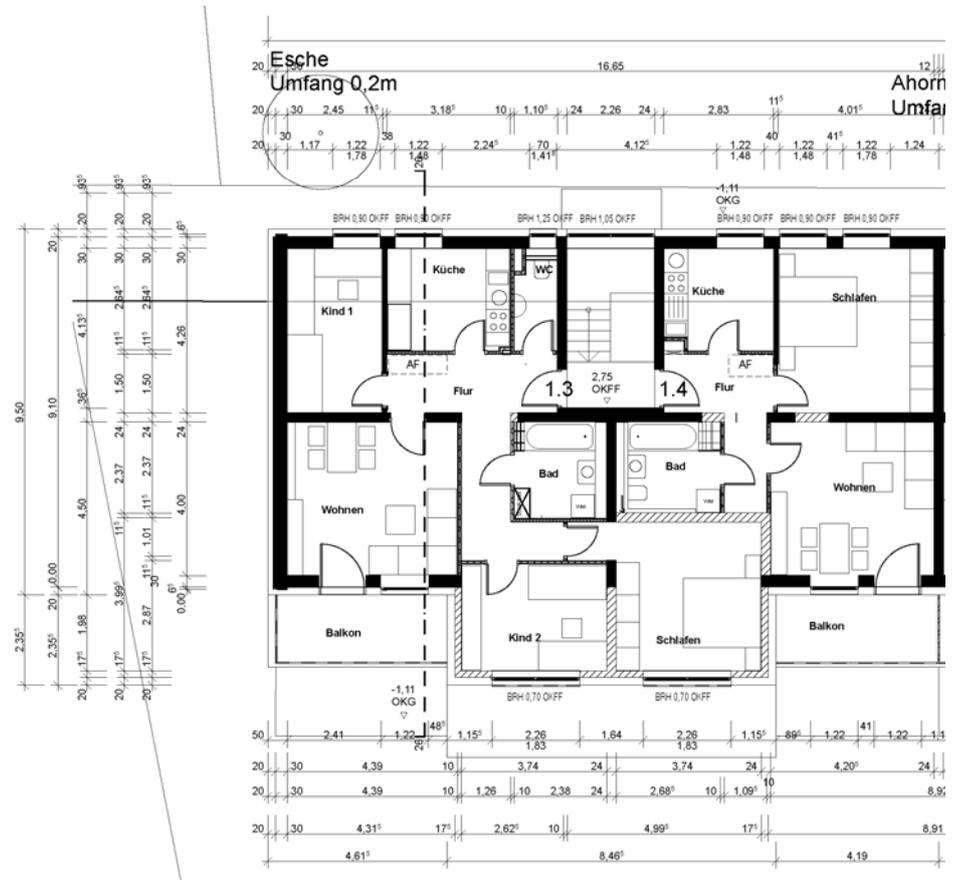
Das Ergebnis wird als Objektbeschreibung und zeichnerische Darstellung (meist im Maßstab 1 : 100) des Gesamtentwurfs geliefert. Eine Kostenberechnung nach DIN 276 oder nach dem wohnungsrechtlichen Berechnungsrecht gibt eine höhere Kostensicherheit als die Kostenschätzung beim Vorentwurf.

Mit Abschluss dieser Leistungsphase sollten im Idealfall alle wesentlichen Entwurfsparameter entschieden sein.

### 2.2.4 Genehmigungsplanung

Bereits in den vorhergehenden Leistungsphasen muss abgeklärt werden, ob das Bauvorhaben genehmigungspflichtig ist. Die Anforderungen ergeben sich aus den Landesbauordnungen. Bei energetischen Modernisierungen der Gebäudehülle, die keinen Einfluss auf das äußere Erscheinungsbild ausüben,

ist im Allgemeinen keine Genehmigung erforderlich. Dennoch sollte der Kontakt mit der jeweiligen Bauordnungsbehörde gesucht und überprüft werden, ob genehmigungspflichtige Aspekte, z. B. aus dem Bereich Denkmal- oder Ensembleschutz gegeben sind. Ebenso ist abzustimmen, welche Auswirkungen die Überbauung von privatem oder öffentlichem Grund durch Außendämmsysteme haben. In vielen Kommunen wird die Dämmung ohne Probleme akzeptiert.



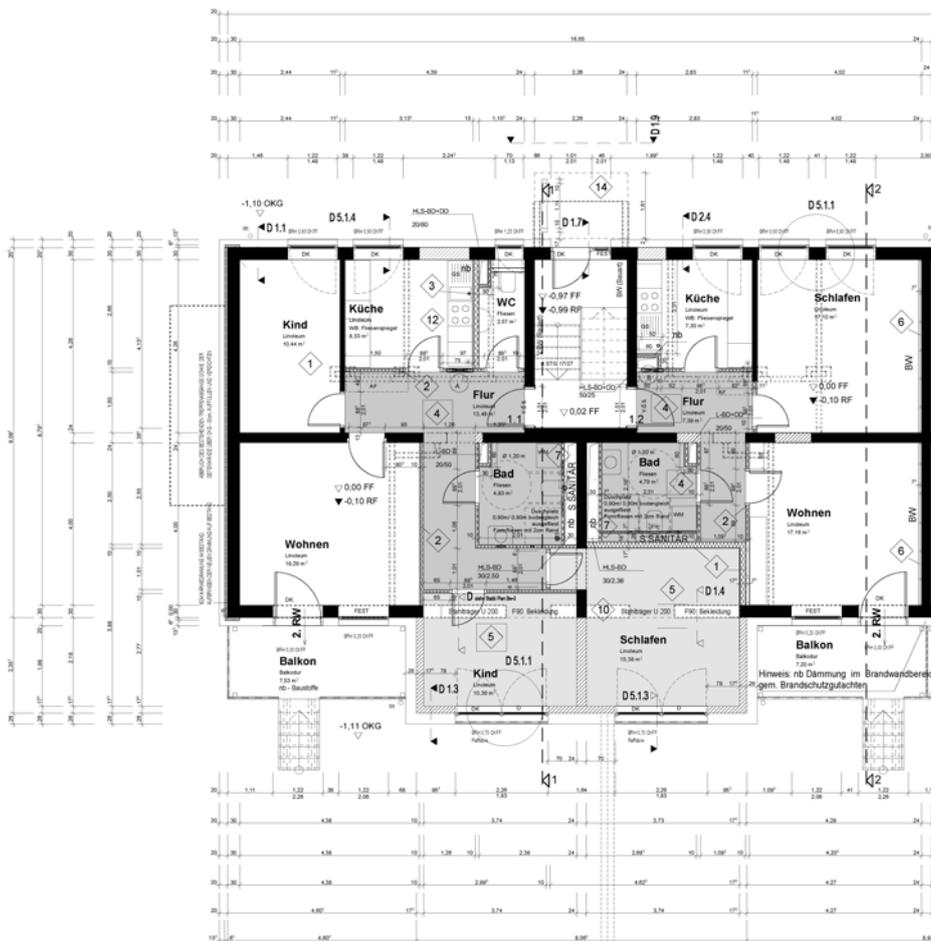
**Abbildung 1 Grundriss aus der Genehmigungsplanung (M 1:100) für die Modernisierung eines Geschosswohnungsbaus (Quelle: Architekt Schulze Darup Sanierungsprojekt Kollwitzstr., WBG Nürnberg)**

### 2.2.5 Ausführungsplanung

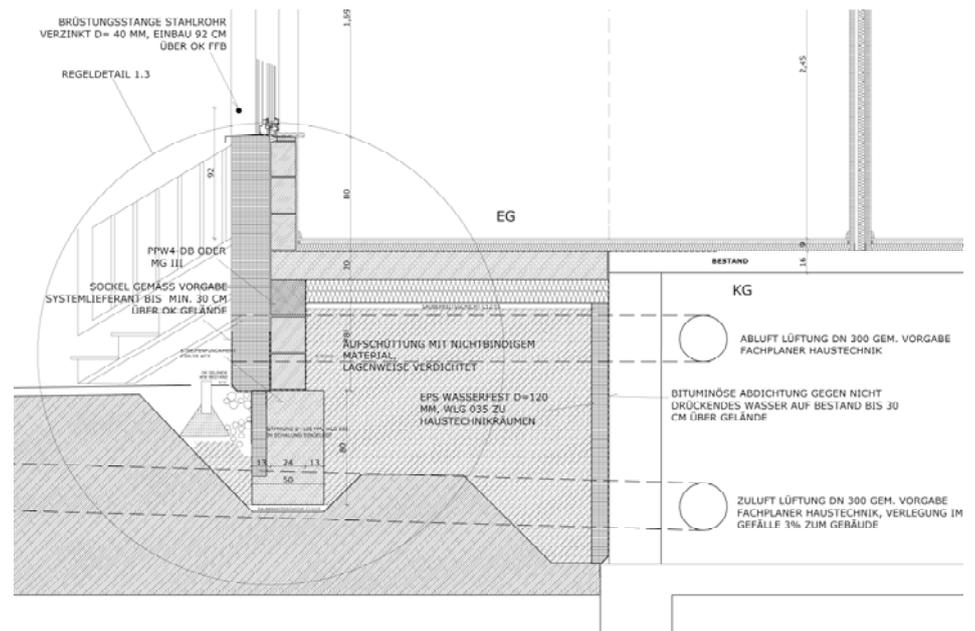
Im Zuge der Ausführungs- bzw. Werkplanung wird eine detaillierte Weiterbearbeitung des Entwurfs durchgeführt, damit die Bauleiter und Handwerker vor Ort möglichst selbst erklärende Pläne für die Ausführung erhalten. In dieser Phase sollte sich zeigen, ob die integrale Planung der ersten Leistungsphase stimmig war und die unterschiedlichen Belange integral zusammenpassen. Gerade bei der Modernisierung muss allerdings davon ausgegangen werden, dass ein letzter Teil von Lösungen auf der Baustelle gefunden werden muss, weil nicht alle Voraussetzungen im Vorfeld bekannt sein können: sei es eine Konstruktion, die doch von den alten Werkplänen abweicht, ein Schaden, der vorher nicht absehbar war – oder einfach Elektroleitungen, die in der neuen Lüftungstrasse liegen.

Die zeichnerische Darstellung erfolgt mittels Werkplänen im Maßstab 1 : 50. Sie werden ergänzt durch Ausführungs-, Detail- und Konstruktionszeichnungen im Maßstab 1 : 10 bis hin zu 1 : 1. Darin enthalten sind die zur Ausführung notwendigen Einzelangaben mit den erforderlichen textlichen Ausführungen. Hinsichtlich der energetischen Anforderungen sind die Dämmdicken und Qualitäten der Konstruktionen und Dämmstoffe sowie der sonstigen Bauteile von Bedeutung. Bei den Details sollten Angaben zur Luftdichtheitsebene und deren Verbindungen enthalten sein. Zudem sind die Detailanschlüsse hinsichtlich der Wärmebrücken zu überprüfen und ggf. zu berechnen. Bei der Gebäudetechnikplanung muss darauf geachtet werden, dass bei der Geräte- und Materialauswahl sowie bei der Trassenführung und Leitungsverlegung eine Optimierung durchgeführt wird und Energieverluste von der Planung her minimiert werden. Die gesamte Werkplanung muss zudem so ausgeführt werden, dass sie mit den Angaben in den vorliegenden energetischen Berechnungen übereinstimmt – oder sogar Verbesserungen herbeigeführt werden können.

**In allen relevanten  
Detailplänen sollte die  
Luftdichtheitsebene  
deutlich gekennzeichnet  
sein.**



**Abbildung 2 Grundriss aus der Werkplanung (M 1:50) für das Modernisierungsprojekt aus Abbildung 1 (Quelle: Architekt Schulze Darup Sanierungsprojekt Kollwitzstr., WBG Nürnberg,)**



**Abbildung 3** Schnitt aus der Detailplanung (M 1:20) für dasselbe Projekt (Quelle: Architekt Schulze Darup Sanierungsprojekt Kollwitzstr., WBG Nürnberg)

### 2.2.6 Vorbereitung der Vergabe

Für das Vergabeverfahren gibt es unterschiedliche Regelungen, die in der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) Teil A § 3 (vgl. [142]) beschrieben werden. Bei Öffentlichen Ausschreibungen werden nach öffentlicher Aufforderung eine unbeschränkte Zahl von Unternehmen zur Einreichung von Angeboten aufgefordert. Bei einer Beschränkten Ausschreibung kann eine Auswahl von Unternehmen an der Angebotserstellung teilnehmen. Freihändige Vergabe ermöglicht eine Vergabe ohne ein förmliches Verfahren.

Eine stimmige Leistungsbeschreibung ist Voraussetzung für faire Kostenangebote bezüglich der Bauleistungen. Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit einer funktionalen Leistungsbeschreibung in Verbindung mit Plänen, die eine ausreichende Grundlage bei Generalunternehmer-Ausschreibungen darstellen kann. Ein genaueres Ergebnis erhält der Bauherr allerdings bei Aufstellung eines detaillierten Leistungsverzeichnisses nach Leistungsbereichen. Voraussetzung ist das Ermitteln und Zusammenstellen der genauen Mengen auf Basis der Werkplanung. Dabei werden wiederum die Beiträge des gesamten Planungsteams eingebracht und alle Bauteile und Materialien nach Gewerken positionsweise präzise beschrieben unter genauer Angabe der jeweiligen Fläche, Länge bzw. des Volumens oder der Stückzahl. In diese Leistungsverzeichnisse tragen die Bieter sowohl die Einzelpreise pro Einheit ein als auch das daraus resultierende Ergebnis.

Bei kleinen Bauvorhaben mit wenigen Gewerken können in Abstimmung mit dem Bauherrn Angebote von erfahrenen und empfohlenen Handwerkern eingeholt werden, die möglicherweise ein paar Prozent über dem niedrigsten Angebotsniveau liegen, aber für eine geregelte und hochwertige Ausführung ihrer Leistungen bekannt sind.

Das gleiche Prinzip gilt ebenso bei Großbauvorhaben: nicht immer ist der billigste Bieter im Endeffekt der günstigste.

### 2.2.7 Mitwirkung bei der Vergabe

Das Zusammenstellen der Vergabe- und Vertragsunterlagen sowie das Einholen von Angeboten ist Aufgabe des Architekten. Das Prüfen und Werten der Angebote einschließlich Aufstellen eines Preisspiegels nach Teilleistungen mit Gegenüberstellung der Einzel- und Gesamtpreise erfolgt nach Eingang der Ausschreibungsergebnisse. Auf diesem Weg hat der Bauherr einen schnellen Überblick über die Angebotssituation. Dabei können die besonders teuren Einzelpositionen hervorgehoben werden, um in Einzelfällen während des Vergabegesprächs über das richtige Verständnis der Positionen mit dem Handwerker reden zu können. Während bei einer öffentlichen Ausschreibung eine Änderung des Angebots nur durch formell abgesicherte Zusatzvereinbarungen möglich ist, kann bei der Vergabe durch einen privaten Bauherrn über einen Nachlass oder das Anpassen einzelner Positionen verhandelt werden. Noch wichtiger ist die Abstimmung über besonders günstig angebotene Einzelpositionen, weil sich dahinter ein Missverständnis verbergen kann, das während der Bauzeit zu Ärger führen würde. Fair ist es, auch solche Positionen offen im Vergabegespräch abzustimmen. Insbesondere bei Firmen, die noch keine Erfahrung mit energieeffizientem Bauen aufweisen, ist es wichtig, die Besonderheiten möglichst genau durchzusprechen.

Zur Vermeidung von Schnittstellenproblemen zwischen den unterschiedlichen Firmen ist es sinnvoll, ein Bauteam zu bilden, bei dem alle beteiligten Handwerker sowie das Planungsteam eingebunden sind, und den Bauablauf detailliert zu besprechen. Darüber hinausgehend kann im Rahmen solch eines Bauteams auch die Werkplanung noch einmal optimiert werden und gemeinsam nach erhöhten Standards bzw. günstigeren Lösungen gesucht werden. Das Ziel eines Bauteams kann es auch sein, Pauschalpreise für die Leistungen festzulegen. Dadurch erhöht sich die Kostensicherheit des Bauherrn und für Handwerker und Architekten fällt nicht nur das arbeitsaufwändige Aufmass weg, sondern auch die üblichen Auseinandersetzungen um die Kosten bei der Bauabwicklung.

*In einem Bauteam können die Handwerker und das Planungsteam den Bauablauf detailliert besprechen.*

Die Verhandlungsergebnisse mit den Bietern werden in Vergabeprotokollen zusammengefasst und auf dieser Basis die Vertragsunterlagen erstellt.

Der Architekt stellt schließlich den Kostenanschlag nach DIN 276 aus Einheits- oder Pauschalpreisen der Angebote auf. In Abhängigkeit vom Genauigkeitsgrad der Ausschreibung liegt das Ergebnis schon sehr nah an den später abgerechneten Kosten. Es sollte allerdings an dieser Stelle noch ein kleiner Prozentsatz für Unvorhergesehenes eingestellt werden, der bei jedem Modernisierungsvorhaben anfällt.

### 2.2.8 Objektüberwachung / Bauüberwachung

Die Überwachen der Bauausführung ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Selbst erfahrene Bauleiter sind immer wieder überrascht, welchen zufälligen oder beabsichtigten Erschwernissen sie während eines Bauablaufs begegnen. Es geht darum, dass eine Übereinstimmung mit der Baugenehmigung, den

Ausführungsplänen und den Leistungsbeschreibungen sowie mit den allgemein anerkannten Regeln der Technik und den einschlägigen Vorschriften gewährleistet ist. Darüber hinaus muss eine Koordination der an der Objektüberwachung fachlich Beteiligten sowie der Handwerker durchgeführt werden. Grundvoraussetzung dafür ist das Aufstellen und Überwachen eines Zeitplanes (Balkendiagramm). Jeder Bauleiter sollte ein Bautagebuch führen, sowohl zur Dokumentation des Bauablaufs gegenüber dem Bauherrn als auch zur Eigenkontrolle und vor allem zur Vorlage im Fall einer rechtlichen Auseinandersetzung – das ist bei vielen Rechtsanwältinnen das Zweite, was sie nach den Bauverträgen sehen wollen. Qualitätssicherung hinsichtlich der energetischen Aspekte muss in diese Abläufe integriert sein (s. Kapitel 2.6).

Ein gemeinsames Aufmass mit den Bau ausführenden Unternehmen ist Voraussetzung für eine stimmige Abrechnung, es sei denn, dieser Arbeitsschritt ist schon bei der Vergabe erfolgt und die Abrechnung wird auf Grundlage der Pauschalpreise durchgeführt.

Die Abnahme der Bauleistungen unter Feststellung von Mängeln ist der rechtlich wesentlichste Schritt bei der Bauausführung. In der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) Teil B § 12ff (vgl. [142]) werden die Festlegungen beschrieben. Eine Abnahme oder Teilabnahme in sich abgeschlossener Leistungen muss auf Verlangen innerhalb von 12 Werktagen durchgeführt werden und kann nur verweigert werden beim Vorliegen wesentlicher Mängel. Die Beseitigung der bei der Abnahme der Bauleistungen festgestellten Mängel muss überwacht werden. Falls erforderlich muss ebenfalls eine behördliche Abnahme bezüglich der bauordnungsrechtlich relevanten Punkte durchgeführt werden.

Ferner ist es Aufgabe des Architekten die Rechnungsprüfung und die Kostenfeststellung nach DIN 276 durchzuführen. Dabei erfolgt eine Kostenkontrolle durch Überprüfen der Leistungsabrechnung der Bau ausführenden Unternehmen im Vergleich zu den Vertragspreisen und dem Kostenanschlag.

Schließlich muss das Objekt übergeben werden einschließlich Zusammenstellung und Übergabe der erforderlichen Unterlagen inkl. Auflisten der Verjährungsfristen für Mängelansprüche.

### **2.2.9 Objektbetreuung und Dokumentation**

Zum Abschluss der Planungsleistungen wird eine systematische Zusammenstellung der zeichnerischen Darstellungen und rechnerischen Ergebnisse des Objekts an den Bauherrn übergeben. Darin enthalten sein sollten einfache Formulare, mit denen eine Überprüfung der tatsächlichen Energieverbrauchswerte gegenüber den berechneten Kennwerten auf einfache Weise möglich ist. Dadurch können Fehlfunktionen durch den Bauherrn schnell festgestellt werden. Bei komplexeren Bauvorhaben sollte dem Architekten oder einem Fachingenieur der zusätzliche Auftrag für eine zweijährige Monitoringphase gegeben werden.

Die Mängelbeseitigung von nachträglich entstandenen Schäden, die innerhalb der Verjährungsfristen aufgetreten sind, wird vom Architekten überwacht.

Vor Ablauf der Verjährungsfristen für Mängelansprüche erfolgt eine Objektbegehung zur Mängelfeststellung gegenüber den Bau ausführenden Unternehmen.

### 2.3 Energiebedingte besondere Leistungen

Die Beachtung bauphysikalischer und energiewirtschaftlicher Aspekte ist Gegenstand des HOAI-Leistungsbildes. Ebenso benannt wird rationelle Energieverwendung und die Verwendung erneuerbarer Energien. Das bedeutet für den Planer, dass er die jeweils aktuellen Verordnungen und den Stand der Technik bezüglich dieser Aspekte erfüllen muss. Der Architekt zieht Fachplaner hinzu, um die notwendigen Leistungen ausführen zu können. Das betrifft die bauphysikalische Untersuchung inklusive der energetischen Berechnungen ebenso wie die Gebäudetechnikplanung sowie bei komplexeren Bauvorhaben weitere oben beschriebene Aufgaben.

Werden erhöhte energetische Standards umgesetzt, bedeutet das für den Planer im Allgemeinen einen Mehraufwand. Es kann nicht in allen Bereichen auf gängige Grundlagen zurückgegriffen werden. Darüber hinaus sind möglicherweise, aber nicht notwendig, zusätzliche Berechnungen erforderlich. Qualität und Innovation haben auch hier ihren Preis. Ein paar Beispiele für mögliche Planungsmehraufwendungen werden im Folgenden zusammengestellt:

Gegenüber einem einfachen EnEV-Nachweis kann ein Mehraufwand entstehen, wenn z.B. alle U-Werte einzeln ermittelt werden müssen, Wärmebrücken individuell nach Längen und Psi-Werten berechnet und Heizungs- sowie Lüftungsanlagen im Detail konfiguriert werden. Andererseits ergeben sich auch Vereinfachungen: eine wärmebrückenfreie Konstruktion erfordert weniger Wärmebrückenberechnungen, und es ergibt sich dazu eine entscheidende Systemvereinfachung bei der Wärmeversorgung. Für die Planung von Passivhäusern und hochenergieeffizienten Sanierungen steht außerdem mit dem Passivhaus Projektierungspaket (PHPP[17]) ein angepasstes Planungstool zur Verfügung.

Qualitätssicherung ist für energieeffiziente Gebäude selbstverständlich und die Anwesenheit beim Blower-Door-Test wird vorausgesetzt.

Bei Förderanträgen ist immer mit einem nicht unwesentlichen Mehr an Arbeit für Beantragung und Abwicklung zu rechnen

Jeder Planer sollte versuchen, ein effizientes Team um sich herum aufzubauen, die diese Leistungen kostengünstig für den Bauherrn erbringen können. Die Nebenkosten für energieeffiziente Maßnahmen sollten so niedrig wie möglich gehalten werden, um keine zusätzliche Barriere für die Bauherrenentscheidung zu errichten.

## 2.4 Zeit- und Ablaufplanung

Der Zeitplan für jede Modernisierung gestaltet sich höchst individuell in Abhängigkeit von den Anforderungen. Die erste grundlegende Frage lautet: Sanierung im bewohnten oder unbewohnten Zustand? Während ohne Nutzer der Bauablauf relativ uneingeschränkt erfolgen kann, sind bei der Anwesenheit von Bewohnern deutliche Einschränkungen gegeben. Die Grundregel lautet: je schneller der Baulärm vorbei ist, desto besser. Das heißt, es muss ein stringenter Zeitplan aufgestellt werden, bei dem die Kernbauphase innerhalb des Wohnbereichs jeweils so kurz wie möglich ist. Bei einer Einfamilienhaussanierung bedeutet das: vorbereitende Arbeiten im Außenbereich und an der Technik werden im Vorfeld ausgeführt, damit die Arbeiten im Haus innerhalb von zwei bis vier Wochen fertig gestellt werden können. Sind Grundrissänderungen oder größere Eingriffe geplant, sollte für diese Kernbauzeit eine Ausweichwohnung gesucht werden, ansonsten kann ein Wohnbereich staubdicht abgetrennt werden und tagsüber das Feld den Handwerkern überlassen werden.

**Bei Sanierungen im bewohnten Zustand muss die Kern-Bauzeit möglichst kurz sein.**

Bei Mehrfamilienhäusern liegt der Unterschied im Allgemeinen darin, dass die Sanierung im Auftrag des Vermieters durchgeführt wird und mit den Mietern möglichst ein positives Einvernehmen über die Art der Beeinträchtigungen erzielt wird. In diesem Fall sollten die Maßnahmen so gewählt werden, dass die Kernbauzeit möglichst nicht länger als zwei Wochen dauert. Gegebenenfalls kann auch in diesem Fall während dieser Zeit für eine Ausweichmöglichkeit gesorgt werden.

## 2.5 Kostenschätzung und Kostenverfolgung

Die Kostenermittlung erfolgt im Bauwesen nach DIN 276, wobei der Hochbau in Teil 1 behandelt wird. Wie schon im Kapitel 2.2 beschrieben, konkretisiert sich die Kostenermittlung mit den fortschreitenden Leistungsphasen.

- Der Kostenrahmen dient zu Beginn der Planung als erste Grundlage für die Bedarfsplanung und zur Festlegung der Kostenvorgabe.
- Die Kostenschätzung erfolgt auf Basis der Pläne des Vorentwurfs.
- Die Kostenberechnung wird in Leistungsphase 3, d. h. auf Grundlage der Entwurfszeichnungen, erstellt.
- Für den Kostenanschlag muss eine Kostenermittlung auf der dritten Ebene durchgeführt werden, um die Mindestanforderungen der DIN 276 zu erfüllen.
- Die Kostenfeststellung dokumentiert die abgerechneten Kosten.

## 2.6 Qualitätssicherung

In Kapitel 2.2.8 werden die wesentlichen Aufgaben der Qualitätssicherung im Zuge der Bauüberwachung bis hin zur Abnahme zusammengestellt. Es muss sichergestellt werden, dass auf der Baustelle auch das gebaut wird, was in der Planung, insbesondere den Ausführungsplänen und den Leistungsbeschreibungen, enthalten ist. Dabei müssen die allgemein anerkannten

Regeln der Technik und die einschlägigen Vorschriften eingehalten werden. Insbesondere bei innovativen Projekten geht die Anforderung insofern noch darüber hinaus, als dass Konstruktionen und Techniken eingebaut werden, die noch nicht in Normen gefasst sind. Die Besonderheiten energieeffizienter Gebäude und ihrer Konstruktionen werden in den folgenden Kapiteln ausführlich mit einem möglichst hohen Praxisbezug dargestellt und können als Grundlage für viele Lösungen gewählt werden. Es ist aber wichtig, dass seitens des Planers ein Abgleich mit den weiteren Regeln der Technik durchgeführt wird. Gegenüber dem Bauherrn sollten bei innovativen Lösungen seitens des Planers Vorteile und Risiken umfassend dargestellt werden. Im Gegenzug wird der Bauherr den Planer von darüber hinaus gehender Gewährleistung freistellen. Dies sollte sorgfältig in schriftlicher Form geschehen. Sinnvoll ist in einem ersten Schritt die Einbeziehung dieser Aspekte in die Baubeschreibung, die vom Bauherrn gegengezeichnet wird.

Besondere Qualitätssicherungsaspekte werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

### **2.6.1 Luftdichtheit und Winddichtheit**

Luft- und Winddichtheit von Gebäuden ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal für energieeffizientes Bauen (siehe auch Abschnitt „

Luftdichtheit - Grundprinzipien“ ab S. 147). Der Planer muss sich allerdings darüber bewusst sein, dass auch bei Standardgebäuden diesbezügliche Qualitätssicherung unabdingbar ist. Luft- und Winddichtheit bewirken für die Nutzer zahlreiche Vorteile:

#### *2.6.1.1.1 Vermeidung von baukonstruktiven Schäden*

Werden undichte Bauteile von innen nach außen mit Luft durchströmt, kondensiert auf Grund der Abkühlung in der Konstruktion der Wasserdampf und fällt im Bauteil in Tröpfchenform an mit der Folge von Bauschäden.

#### *2.6.1.1.2 Funktion der Wärmedämmung*

Wenn zwar die innere luftdichtende Schicht funktionsfähig ist, jedoch auf der Außenseite der Dämmung kein winddichter Schutz vorhanden ist, kann die Wärmedämmung von Kaltluft durchströmt werden. In diesem Fall wird die Wärmedämmfähigkeit der Konstruktion in der Praxis deutlich herabgesetzt.

#### *2.6.1.1.3 Luftschallschutz*

Jede Leckage verschlechtert den Luftschallschutz. Gute Luftdichtheit ist daher Bestandteil des Schallschutzkonzepts.

#### *2.6.1.1.4 Höhere Luftqualität*

Unkontrollierter Eintritt von Luft in Aufenthaltsräume kann zu erhöhter Schadstoffkonzentration führen. So kann Luft, die durch eine Konstruktion strömt, die Raumluft mit Schadstoffpartikeln belasten. Wird Luft durch den thermischen Auftrieb aus tiefer liegenden Bereichen in die darüber liegenden Räume geführt, können Belastungen durch Mikroorganismen, Schadstoffe und ggf. Radon auftreten.

#### 2.6.1.1.5 *Optimierte Lüftung*

Bei Undichtheiten erfolgt der Luftaustausch durch Winddruck oder Thermik, die sehr stark von der Wettersituation abhängig sind. Es stellen sich genau dann überhöhte Luftwechsel ein, wenn sie nicht erwünscht sind: bei starkem Wind und in sehr kalten Witterungsperioden.

Für den sinnvollen Betrieb von Lüftungsanlagen muss das Gebäude luftdicht ausgeführt sein. Bei weitgehender Unabhängigkeit von externen Einflüssen kann der Luftwechsel für die einzelnen Räume gezielt eingestellt werden. Bei Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung sollte die gesamte zugeführte frische Außenluft über den Wärmetauscher des Gerätes laufen. Ein Leckage-Luftwechsel von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  entspricht Lüftungswärmeverlusten in Höhe von etwa 5 bis  $7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

#### 2.6.1.1.6 *Thermischer Komfort*

Durch Undichtheiten einströmende Kaltluft führt zu Zugscheinungen, Kaltluftseen mit der Folge von Fußkälte und zu einer unangenehmen vertikalen Temperaturschichtung in den einzelnen Räumen sowie dem gesamten Gebäude.

#### 2.6.1.1.7 *Verringerter Heizenergieverbrauch*

Aus den beschriebenen Gründen führt die Dichtheit eines Gebäudes zu einer deutlichen Energie- und Kosteneinsparung.

In DIN 4108, Teil 7 wird die Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen behandelt und es werden Planungs- und Ausführungsempfehlungen gegeben. Bei Passivhäusern gelten erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit: der  $n_{50}$ -Wert beträgt  $0,6 \text{ h}^{-1}$ . Dieser Wert wird grundsätzlich empfohlen, wenn eine hochwertige Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung eingebaut wird.

Bei der Planung eines Gebäudes muss frühzeitig das Dichtheitskonzept erarbeitet werden. Grundlegend zu beachten sind folgende Aspekte:

- Bereits in der Vorentwurfs- und Entwurfsphase möglichst einfache Gebäudegeometrien mit einer geringen Anzahl von Konstruktionsaufbauten konzipieren
- Konstruktionen mit einfachen Luftdichtungsdetails bevorzugen
- Bei der Werkplanung eine möglichst einfache Form der wärmeübertragenden Gebäudehülle mit wenig Materialwechseln wählen
- Lage der wind- und luftdichten Ebene festlegen, klare Abtrennung zu unbeheizten Bereichen
- Länge der Anschlüsse minimieren, möglichst homogene Flächen festlegen
- Einfache Konstruktionen wählen, Durchdringungen vermeiden
- Gebäudetechnik-Durchdringungen minimieren
- Flächen- und fugendichtende Materialien und Montagetechnik festlegen, Anschlüsse mit mechanischer Befestigung vor Klebeverbindungen bevorzugen

- Präzise Detailplanung und Abstimmung mit den Handwerkern.

Bei der detaillierten Beschreibung der zahlreichen Konstruktionen werden die Dichtheitsaspekte jeweils individuell behandelt (Kapitel 4).

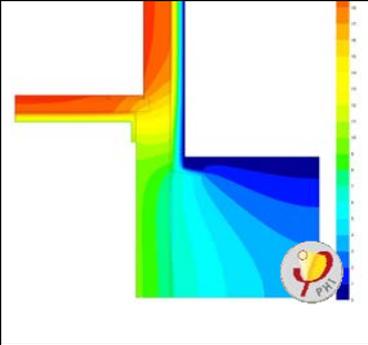
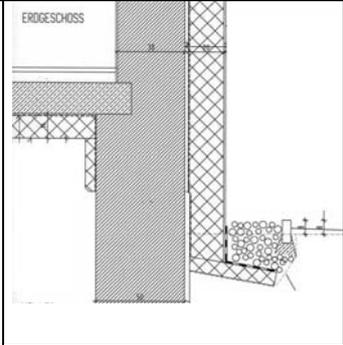
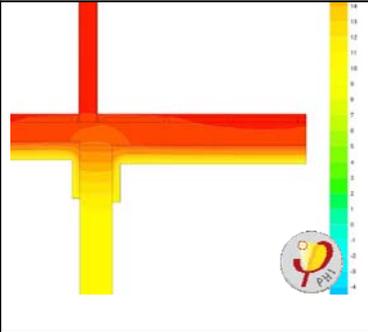
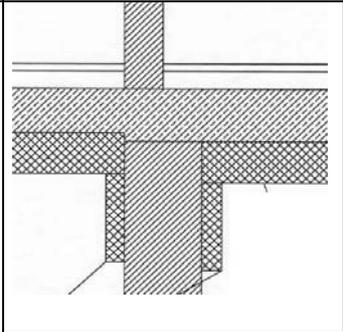
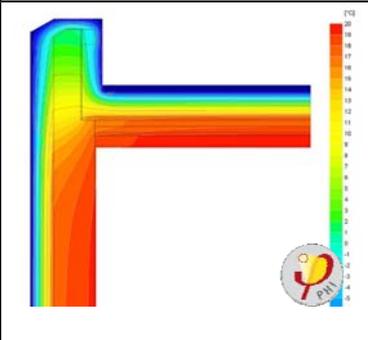
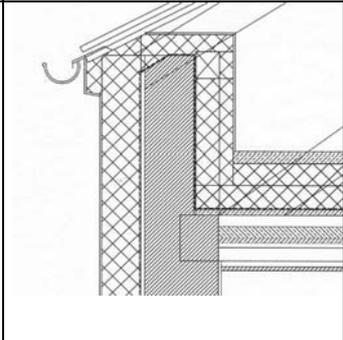
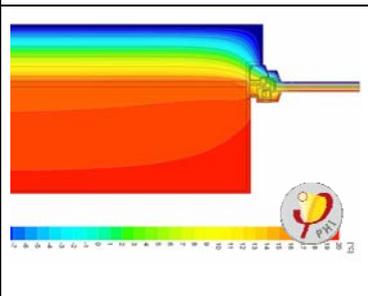
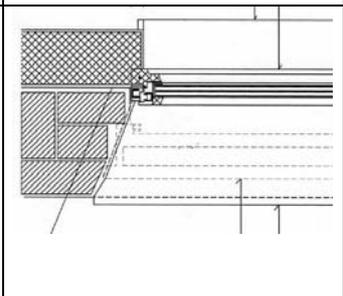
### 2.6.2 Wärmebrücken

Die Bereiche der Gebäudehülle, an denen gegenüber der Fläche erhöhte Transmissionswärmeverluste auftreten, werden als Wärmebrücken bezeichnet. Bei mäßiger Detailausbildung liegt ihr Verlustanteil bei 10 bis 20 % – in ungünstigen Fällen bei über 30 % der Transmissionsverluste in den Flächen. Die Auswirkungen hinsichtlich der niedrigen raumseitigen Oberflächentemperaturen und der sich daraus ergebenden Schimmelpilzproblematik können gravierend sein und mindern Komfort und Gesundheitsqualität eines Gebäudes erheblich.

Wärmebrückenverluste werden nach EnEV pauschal mit einem Aufschlag zum U-Wert von  $\Delta U_{WB} = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gerechnet, bei Einhaltung der vorgegebenen Standarddetails nach DIN 4108 (Beiblatt 2) mit  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Diese sind allerdings bei der Sanierung nur in neu ausgebildeten Bereichen ausführbar. Besonders bei bestehenden Konstruktionsanschlüssen im Sockelbereich und bei Innenwandanschlüssen zum unbeheizten Keller oder zur Bodenplatte sind fast ausnahmslos ungünstige Wärmebrückenfaktoren zu erwarten. Eine ursächliche Behebung ist in diesen Fällen schwierig. Stattdessen geht es bei solchen Details darum den Weg des Wärmeabflusses zu verlängern und damit den Wärmebrückenverlustkoeffizienten zu verbessern.

Bei der Planung einer energieeffizienten Sanierung ist sehr zu empfehlen, alle Wärmebrücken mit ihren Längen zu erfassen. Die dazugehörigen Wärmebrückenverlustkoeffizienten (Psi-Werte) müssen entweder berechnet oder aus Wärmebrückenatlanten bzw. sonstigen Quellen übernommen werden. Bei solch einer detaillierten Wärmebrückenermittlung für charakteristische Mehrfamilienhäuser der 1950er und 1960er Jahre liegt der resultierende Wert für  $\Delta U_{WB}$  bei  $0,02$  bis  $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , wenn eine gewissenhafte Reduzierung der Wärmebrücken betrieben wird. Optimierte Passivhaus-Neubauten weisen dazu im Vergleich einen Wert für  $\Delta U_{WB}$  von  $0,01$  bis minus  $0,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  auf. Diese Kennwerte sind bei Sanierungen im Bereich oberhalb des Sockels in günstigen Fällen zu erzielen, wenn alle Anschlüsse neu ausgebildet werden können.

Im Zusammenhang mit den einzelnen Konstruktionsdetails in Kapitel 4 wird jeweils auf die Wärmebrückenaspekte Bezug genommen und es werden Lösungen dargestellt. In der folgenden Abbildung werden beispielhaft Detailpunkte für ein Gebäude Bj. 1930 dargestellt.

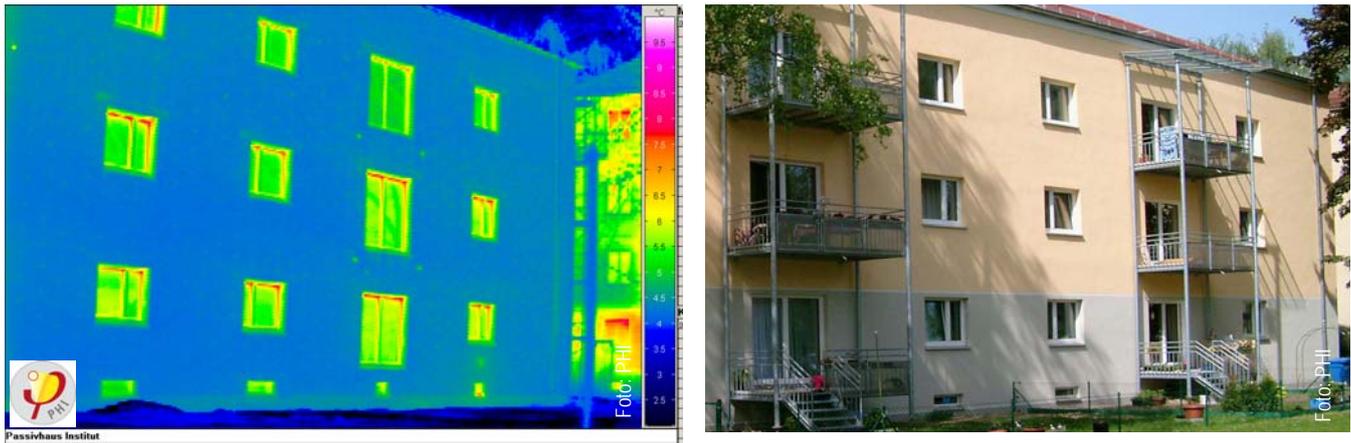
		<p><b>Sockelbereich Keller-Außenwand:</b> die Dämmung wird aus Kostengründen nur 25 cm tief ins Erdreich eingebunden, ergänzend wird eine nach außen verlaufenden Frostschürze verlegt;  <math>\Psi_a = 0.134 \text{ W/(mK)}</math></p>
		<p><b>Keller-Innenwände</b> zu aufgehendem Mauerwerk im EG: durch die senkrechte Fortsetzung der Dämmung an den Kellerwänden nach unten (30 cm) wurde <math>\Psi_a = 0.30 \text{ W/(mK)}</math> erreicht, bei den 38 cm dicken KG-Wänden <math>\Psi_a = 0.46 \text{ W/(mK)}</math></p>
		<p><b>Kniestock:</b> durch vollständiges Umdämmen des Kniestocks mit einer Dicke von seitlich 20 cm und oberhalb 10 cm ergibt sich: <math>\Psi_a = 0.056 \text{ W/(mK)}</math></p>
		<p><b>Fenster:</b> Wärmebrücke vergleichbar einer Neubau-Situation <math>\Psi_a = 0.017 \text{ W/(mK)}</math> beim seitlichen Anschluss; der untere Bereich zum Fensterblech weist <math>\Psi_a = 0.030 \text{ W/(mK)}</math> auf</p>

**Abbildung 4** (Quelle: links PHI [116], rechts Schulze Darup [117])

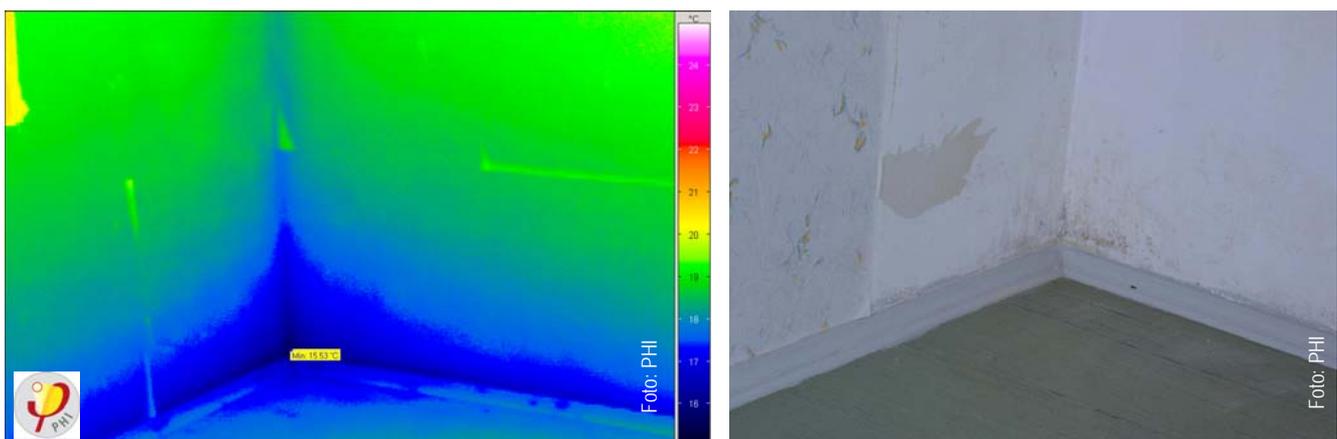
Qualitätssicherung hinsichtlich der Wärmebrückeneffekte erfolgt zunächst durch Optimierung der Details auf Basis der Wärmebrückenberechnung. Bei der Werkplanung geht es darum, die Gebäude lückenlos auf mögliche Wärmebrückeneffekte zu untersuchen. Dazu reicht es nicht, einen Querschnitt zu betrachten, sondern es müssen zusätzlich dreidimensionale Problembereiche und auch punktförmige Wärmebrücken überprüft werden. In Detailbereichen wie z. B. bei den Fenstern sind detaillierte Betrachtungen sowohl der Profile und der Fensterrandverbände sowie der Einbausituation durchzuführen.

Bei der Ausschreibung müssen die Qualitäten der Bauteile auch hinsichtlich der Wärmebrückenparameter beschrieben und vor dem Einbau überprüft werden, damit diese Eigenschaften auch wirklich zutreffen.

Eine Überprüfung kann mit Infrarotthermografie erfolgen. Mit diesem bildgebenden Verfahren wird Infrarotstrahlung sichtbar gemacht und es können mit ausreichender Erfahrung die Farb-Temperatureffekte zur Beurteilung der thermischen Gebäudehülle herangezogen werden. In den folgenden Abbildungen werden wiederum für das 30er-Jahre-Gebäude Infrarotaufnahmen nach Fertigstellung der energetischen Sanierung dargestellt.



**Abbildung 5** Infrarot-Thermografie nach Fertigstellung des Wärmedämm-Verbundsystems vor Montage der Balkons: zu erkennen sind die vier Aussteifungs-Befestigungspunkte für den Balkon sowie die Spuren der Befestigung des Temperaturfühlers unter dem EG-Fenster rechts; zum Vergleich am rechten Bildrand der Thermografie ein unsaniertes baugleiches Bestandsgebäude (Quelle: PHI [118])



**Abbildung 6** Innenraum-Thermografie des Erdgeschoss-Fußpunktbereichs in einer Gebäudeecke (Quelle: PHI [116])

Besonders interessant ist der Aspekt, die Thermografie-Ergebnisse mit den Sollwerten der Wärmebrückenberechnung zu vergleichen. Wichtig ist dabei der Abgleich der jeweils vorliegenden Rahmenbedingungen. An zwei Beispielen im Sockelbereich werden die Sollwerte der Wärmebrückenberechnung den gemessenen Werten der Thermografie gegenüber gestellt.

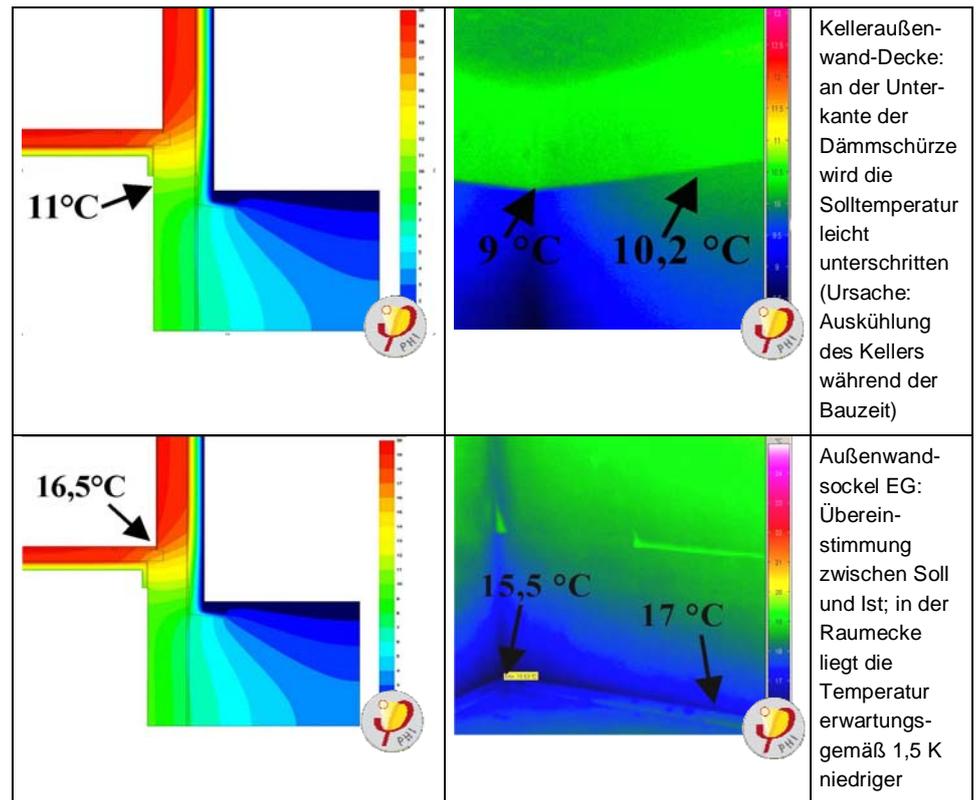


Abbildung 7 (Quelle: PHI [116])

### 2.6.3 Abnahme und Inbetriebnahme

Die Abnahme bezeichnet im juristischen Sinn, dass ein Werk bestimmten Kriterien entspricht und als erfüllungstauglich angesehen wird. Im Werkvertragsrecht ist die Abnahme in § 640 BGB geregelt. Der Auftragnehmer hat Anspruch auf die Abnahme, wenn das Werk vertragsgemäß hergestellt ist. Mängel, die bei der Abnahme festgestellt werden, müssen durch den Auftragnehmer in einer festgelegten Frist behoben werden. Mit der Abnahme wird die Vergütung fällig, die Verjährungspflicht beginnt zu laufen und es erfolgt der Gefahrübergang nach § 644 BGB. Das bedeutet für den Auftraggeber u. a., dass die Beweislast für das Vorhandensein eines Mangels bei ihm liegt, auch bezeichnet als Beweislastumkehr.

Bei einem Bauvertrag nach VOB/B werden die Regelungen des BGB insbesondere durch § 12 zum Teil modifiziert. Insbesondere ist der Auftraggeber zur Abnahme innerhalb von zwölf Werktagen nach entsprechender Aufforderung durch den Auftragnehmer verpflichtet. Wenn keine förmliche Abnahme im Vertrag vereinbart ist und von keiner der Parteien verlangt wird, gilt die Leistung mit dem Ablauf von zwölf Werktagen nach schriftlicher Mitteilung über die Fertigstellung der Leistung als abgenommen, hat der Auftraggeber die Werkleistung oder einen Teil der Werkleistung benutzt, gilt die Abnahme bereits nach Ablauf von sechs Werktagen nach Beginn der Benutzung als erfolgt. Zu empfehlen ist auf jeden Fall eine förmliche Abnahme. Dabei wird das Bauwerk begangen und es sollten Auftraggeber und Auftragnehmer anwesend sein, ggf. unterstützt durch Sachverständige. Ein Abnahmeprotokoll ist zu erstellen, in dem etwaige Vorbehalte wegen Mängel und Vertragsstrafen enthalten sind.

In Ergänzung zur Abnahme sollte eine förmliche Inbetriebnahme des Gebäudes und der Gebäudetechnik erfolgen. Dabei müssen alle Projektunterlagen inklusive der aktuellen Pläne, Betriebsanleitungen und Einweisungsprotokollen übergeben werden. Die Nutzer oder eine Person, die für die Anlagen zuständig ist, sollten bei dieser Einweisung anwesend sein und umfassend in die Technik und den Betrieb eingewiesen werden. Darüber hinaus sollten einfach formulierte Informationen bzw. „Betriebsanleitungen“ z. B. für Mieter von Gebäuden übergeben werden.

## 2.7 Gebäudebetrieb

In Verbindung mit der Planung und Erstellung eines Gebäudes sollte der Betrieb vorbereitet werden. Entgegen der gängigen Praxis setzt sich in den letzten Jahren zunehmend das Bewusstsein durch, dass der Gebäudebetrieb gezielt begleitet werden muss. Beim Einfamilienhaus sind es vor allem die regelmäßigen Überwachungs-, Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen, die in Eigenregie des Bauherrn durchgeführt werden können. Grundlage ist ein vorbereiteter Plan für die jeweiligen Maßnahmen und Zyklen. Bei komplexeren Gebäuden ist anzuraten, eine professionelle Betreuung zur Gebäudebewirtschaftung zu beauftragen.

### 2.7.1 Bauherren- und Nutzerinformation

Seitens des Planers kann in Abstimmung mit dem Eigentümer eine einfach gefasste Bauherren- bzw. Nutzerinformation über die Funktionen, den Betrieb und die Wartung des Gebäudes erstellt werden. In Abhängigkeit vom Gebäudetyp und der Nutzungsart variieren die Anforderungen daran.

Ein Infoblatt für die Nutzer sollte möglichst einfach und kurz formuliert werden und die wesentlichen Funktionen hinsichtlich Heizen, Lüften, Geräten und Komfortfaktoren enthalten. Die darüber hinausgehenden Informationen für die Bewirtschaftung des Gebäudes müssen umfassend sein und die gesamten Gebäudeunterlagen enthalten, ergänzt um übersichtliche Handlungsanleitungen für Wartung, Instandsetzung und Monitoring des Gebäudes.

*Infoblatt für den Nutzer*

### 2.7.2 Facility-Management

Professionelle Gebäudebewirtschaftung in Form von Facility-Management (FM) umfasst technische, infrastrukturelle und kaufmännische Aufgaben, die ein Gebäude betreffen und oftmals nicht zum Kerngeschäft des Gebäudeeigners gehören. Es ist sinnvoll, diese Aufgaben an erfahrene Dienstleister zu vergeben, die Erfahrung in der ganzheitlichen Betreuung von Liegenschaften haben. Ziel der koordinierten Abwicklung ist dabei, die Betriebs- und Bewirtschaftungskosten dauerhaft niedrig zu halten, alle Kostenpositionen regelmäßig zu überprüfen und zu optimieren und dabei die technische Verfügbarkeit des Gebäudes und der Anlagen zu sichern und für Wertbeständigkeit zu sorgen. Ein wesentliches Feld in diesem Aufgabenbereich liegt in der Anlagentechnik und in der Überwachung und Optimierung von Regelungen und Verbrauchskennwerten.

### 2.7.3 Monitoring

Monitoring bezeichnet die systematische Erfassung, Beobachtung oder Überwachung eines Vorgangs oder Prozesses. Beim Gebäudebetrieb geht es darum, auf Grundlage von erfassten Daten zusätzlich Einfluss auf einen optimalen Gebäudebetrieb zu nehmen. Sinnvoll ist es, wenn Regelungstechniken gleichzeitig zur Kontrolle und zur Erfassung der Gebäudekennwerte genutzt werden können.

Zu unterscheiden ist zwischen wissenschaftlichen Auswertungen von Modellprojekten und praxisorientierter Erfassung von Kennwerten zur Gebäudeoptimierung. In einfachster Form funktioniert das bestens mit monatlicher Erfassung der relevanten Kennwerte und einer manuellen Auswertung. Wenn seitens des Planers die Sollwerte des Verbrauchs im Monatsraster vorgegeben werden, kann mit sehr geringem Aufwand überprüft werden, ob der Gebäudebetrieb diese Anforderungen erfüllt. Bei deutlichem Über- oder Unterschreiben der Kennwerte muss Ursachenforschung betrieben und der zu Grunde liegende Mangel behoben werden. Sinnvoll ist es, im Zuge professioneller Gebäudebetreuung mit Fernauslesung zu arbeiten und einen kontinuierlichen Soll-Ist-Abgleich digital mit manueller Überprüfung durchzuführen. Die Erfahrung zeigt, dass bei fast jedem Gebäude ab Inbetriebnahme gelegentlich Fehler auftreten, die relativ folgenlos bleiben, wenn durch eine schnelle Kontrolle und Beseitigung der jeweils optimale Betriebszustand wieder hergestellt wird.

Sowohl für den Eigentümer als auch für die Planer ist es wichtig, auf solch einem Weg eine Erfolgskontrolle durchzuführen – nicht zuletzt um für Folgeprojekte zu lernen.

## 3 Bestandsaufnahme und Bewertung

### 3.1 Analyse des Ist-Zustandes eines Gebäudes

Die Bestandsaufnahme der vorhandenen Bausubstanz ist die Grundlage jeder Modernisierungsplanung und der damit verbundenen Kostenschätzung. Ohne eine sorgfältige Untersuchung des Gebäudes im Vorfeld der Modernisierung ist keine verlässliche Planung und Kostenschätzung möglich. Im Vorfeld nicht erkannte vorhandene Bauschäden können zu einer Überschreitung des Kostenrahmens und zu Verzögerungen im Bauablauf führen. Werden Schäden frühzeitig erkannt, können sie oft kostengünstiger behoben werden. Aus nicht erkannten Bauschäden können weitere Planungs- und Ausführungsschäden resultieren, deren unkalkulierbare Kosten gegebenenfalls auch noch nach Jahren dem Planer angelastet werden können.

Grundlage aller folgenden Untersuchungen und Planungen ist die **maßliche Bestandsaufnahme**. Häufig sind Baupläne aus der Erstellungszeit vorhanden. Es muss allerdings dringend davon abgeraten werden, diese Pläne ungeprüft zu verwenden. Zum einen kann schon die ursprüngliche Ausführung von den Plänen abgewichen sein, zum anderen sind spätere Umbauten häufig nicht verzeichnet. Es ist daher eine Überprüfung der vorhandenen Pläne durch Aufmaß am Gebäude angeraten, um spätere aufwändige Umplanungen zu vermeiden. Es sollte nachgeforscht werden, ob auch Pläne neueren Datums, z.B. von vorangegangenen Umbauten und Modernisierungen, vorhanden sind, da diese eine wertvolle Hilfe sein können.

Für die **technische Bestandsaufnahme** sollten schon geprüfte Gebäudepläne vorliegen, in diese dann sinnvollerweise alle gewonnenen Erkenntnisse eingetragen werden können. Bei der technischen Bestandsaufnahme werden alle vorhandenen Bauteile hinsichtlich Funktionsfähigkeit, Zustand und Qualität erfasst und bewertet. Sie dient als Planungs-, Ausschreibungs- und Kostengrundlage. Insbesondere bei Holz- und Stahlkonstruktionen kann oft nur durch großflächige Freilegung aller tragenden Bauteile der Zustand und eventuelle Schädigung festgestellt werden. Diese Erkenntnisse sind nötig für die Ermittlung der statischen Reserven und evtl. nötiger Ertüchtigungsmaßnahmen. „Schlüsselloch“-Untersuchungen sind hierfür häufig nicht ausreichend.

Die folgende, nicht umfassende Aufzählung enthält Bauteile, die im Rahmen der Bestandsaufnahme erfasst werden sollten:

#### *Gemeinschaftsbereiche*

- Fundamente
- Keller
- Eingang
- Treppenhaus
- Fassaden
- Dach
- Kamine
- Heizung/WW

*Eine sorgfältige und umfassende Bestandsaufnahme ist die unerlässliche Grundlage jeder Altbaumodernisierung.*

- Gas- und Wasserinstallation
- Abwasserinstallation
- Feuerlöschanlagen
- Blitzschutz / Erdung
- Elektroinstallation
- Kommunikationstechnik
- Aufzug
- Raumluftechnische Anlagen
- Außenanlagen

*Wohnungen / Raumbuch*

- Wand
- Decke
- Boden
- Fenster und Rollläden
- Türen
- Einbauten
- Heizflächen
- Sanitärinstallationen
- RLT-Anlagen
- Elektroinstallationen

Dabei können unter anderem die folgenden Punkte aufgenommen werden:

- Material
- Konstruktion
- Zustand
- Schadstoff- oder Geruchsbelastung
- Feuchteprobleme
- Schimmel- oder Schädlingsbefall
- Erfüllung von (evtl. geänderten) Anforderungen an
  - Funktion
  - Sicherheit
  - Brandschutz
  - Statik
  - Komfort
  - Ästhetik
  - Wärmeschutz (U-Werte, Luftdichtheit, Wärmebrücken, Effizienz der Haustechnik)
- Art der aktuellen Nutzung

Für die Untersuchungen müssen gegebenenfalls Fachleute aus verschiedenen Bereichen hinzugezogen werden.

Im Rahmen der Bestandsaufnahme ist außerdem zu klären, ob das Gebäude unter **Denkmalschutz** steht. Entsprechende Auskünfte erteilt das zuständige Bauordnungsamt. Bei denkmalgeschützten Gebäuden sollten die Planungen möglichst frühzeitig mit der Denkmalbehörde abgestimmt werden. Auch schon für die Bestandsaufnahme sind evtl. nötige nicht zerstörungsfreie Untersuchungen mit der Behörde abzuklären.

## 3.2 Klassifizierung und Bewertung

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie hoch die Energieeinsparung durch die Verbesserung des Wärmeschutzes im Zuge einer Gebäudemodernisierung ist, muss man als Vergleichswert zunächst wissen, welche wärmetechnischen Kennwerte das Bestandsgebäude im unsanierten Zustand aufweist. Gebäude der gleichen Epoche haben häufig ähnliche energetische Kennwerte, da in jeder Zeit typische Konstruktionsweisen bevorzugt wurden.

*Gebäude der gleichen Baualtersklasse haben in der Regel ähnliche energetische Kennwerte.*

### 3.2.1 Gebäudekennwerte

Bei Energiekennwerten von Gebäuden unterscheidet man zwischen Verbrauchs- und Bedarfskennwerten. Mit dem **Heizwärmeverbrauch** ist der tatsächliche gemessene Wärmeverbrauch für die Beheizung eines Gebäudes gemeint. Unterschiede und Schwankungen ergeben sich durch eine Vielzahl von Faktoren. Dazu gehören unterschiedliche Innenraumtemperaturen, das Lüftungsverhalten der Bewohner und das Wetter. Daher lassen sich durch den Verbrauchskennwert eines Hauses oder einer Wohneinheit nur sehr grobe Rückschlüsse auf die Gebäudequalität oder zukünftige Verbrauchswerte ziehen.

Der **Heizwärmebedarf** bezeichnet dagegen einen mit geeigneten Methoden berechneten gebäudetypischen Heizwärmeverbrauch. Der tatsächlich gemessene Verbrauch wird aufgrund der oben genannten Einflussfaktoren zum Teil deutlich nach oben oder unten von diesem Wert abweichen. Eine Übereinstimmung ergibt sich in der Regel erst beim statistischen Mittel einer ausreichenden Anzahl von Wohneinheiten. Der Bedarfskennwert ist aber wegen seiner Unabhängigkeit von unvorhersehbaren Einflussfaktoren gut geeignet um die Qualität des Wärmeschutzes eines Gebäudes zu beschreiben. Ein präzises Werkzeug zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs von Altbauten vor und nach der Sanierung ist das Passivhaus-Projektierungspaket [17] (siehe auch 6.1.4).

Bei unsanierten Altbauten liegt der gemessene Heizwärmeverbrauch häufig deutlich unter dem mit dem Passivhaus-Projektierungspaket ermittelten Bedarf. Dies liegt daran, dass in diesen Gebäuden aus Gründen der Heizkosteneinsparung die mittlere Raumtemperatur sowie der Fensterluftwechsel häufig unterhalb der für Komfort, Bauschadensfreiheit und Wohngesundheit erforderlichen Werte liegen.

Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen typische Heizwärmekennwerte verschiedener Gebäudetypen aufgeschlüsselt nach dem jeweiligen Baualter. Die Werte wurden durch Untersuchung von Einzelgebäuden, die für ihren Gebäudetyp und ihre Baualtersklasse repräsentativ sind, gewonnen [214],[125].

**Tabelle 1 Heizwärmekennwerte des heutigen Zustands (Wert in Klammern: ursprünglicher Zustand) von Gebäudetypen für die alten Bundesländer (vgl. [125])**

	mittlerer Heizwärmebedarf <sup>1</sup> nach Baualtersklasse [kWh/(m <sup>2</sup> a)]							
Typ	-1918 Fach- werk	-1918 massiv	1919- 1948	1949- 1957	1958- 1968	1969- 1978	1979- 1983	1984- 1990
EFH	238 (318)	185 (225)	204 (263)	253 (329)	146 (171)	141 (147)	119 (119)	120 (122)
RH	-	203 (249)	166 (205)	163 (219)	160 (211)	156 (187)	121 (121)	94 (94)
MFH (klein)	190 (216)	163 (190)	179 (222)	184 (229)	173 (213)	127 (170)	98 (98)	76 (77)
MFH (groß)	-	161 (190)	164 (203)	151 (191)	153 (184)	123 (139)	-	-
Hoch- haus	-	-	-	-	105 (127)	120 (120)	-	-

**Tabelle 2 Heizwärmekennwerte des heutigen Zustands von Gebäudetypen für die neuen Bundesländer (vgl. [125])**

	mittlerer Heizwärmebedarf nach Baualtersklasse [kWh/(m <sup>2</sup> a)]							
Typ	-1918 Fach- werk	-1918 massiv	1919- 1948	1949- 1957	1958- 1968	1969- 1978	1979- 1983	1984- 1990
EFH	312	312	283	335	335	181	181	152
MFH (klein)	227	189	161	175	174	174	174	-
MFH (groß)	-	195	-	-	109	109	106	87
Hoch- haus	-	-	-	-	-	111	159	-

### 3.2.2 Bauteilkennwerte

Soll eine Energiebilanz, zum Beispiel mit dem Passivhaus-Projektierungspaket [17], für ein Modernisierungsobjekt aufgestellt werden, so benötigt man, insbesondere wenn der Heizwärmebedarf für den unsanierten Zustand ermittelt werden soll, Informationen über Konstruktionen und U-Werte der Bestandsbauteile. Bei einer Gebäudebegehung sind in der Regel viele Bauteilaufbauten nicht zerstörungsfrei erkennbar. Eine nützliche Übersicht zeittypischer Konstruktionen mit den jeweiligen U-Werten befindet sich, nach Gebäudetyp und Baualter geordnet, im Anhang.

<sup>1</sup> Für Standardnutzung. Angenommene mittlere Raumtemperaturen während der Heizperiode: 17,5 °C (EFH/RH) bzw. 18,0 °C (MFH). Für die neuen Bundesländer wurden um 0,5 °C höhere Raumtemperaturen verwendet. Zeitpunkt der Untersuchung: 1990

In den letzten Jahrzehnten kamen Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden aus Normen und Verordnungen hinzu (siehe Tabelle 3). Allerdings wurden häufig schon in der Vergangenheit Modernisierungsmaßnahmen durchgeführt (z.B. Ersatz von Fenstern mit Einfachverglasung), so dass der tatsächlich vorliegende wärmetechnische Standard unter Umständen gegenüber dem Ursprungszustand schon etwas verbessert wurde.

**Tabelle 3 Übersicht über die Mindestanforderungen an den baulichen Wärmeschutz von 1952 bis 1995 (vgl. [124])**

Norm / Verordnung	ab	mindest U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]				
		Wand	Fenster	Dach	oberste Geschossdecke	Kellerdecke
DIN 4108	1952	1,56	5,2 <sup>1</sup>	1,46	0,8	1,01
DIN 4108	1969	1,56	5,2 <sup>1</sup>	1,10	0,8	1,01
erg. best. DIN 4108	1974	1,56	3,5 <sup>2</sup>	0,89	0,68	0,83
WSchVO	1977	1,06	3,5	0,45	0,45	0,80
Neufassung DIN 4108, Teil 2 WSchVO	1984-1995	0,75	3,1	0,30	0,30	0,55

<sup>1</sup> Keine Festlegung in der DIN, U-Wert entspricht Einfachverglasung

<sup>2</sup> Doppel-/Verbundfenster empfohlen

## 4 Gebäudehülle

### 4.1 Waddämmung von außen

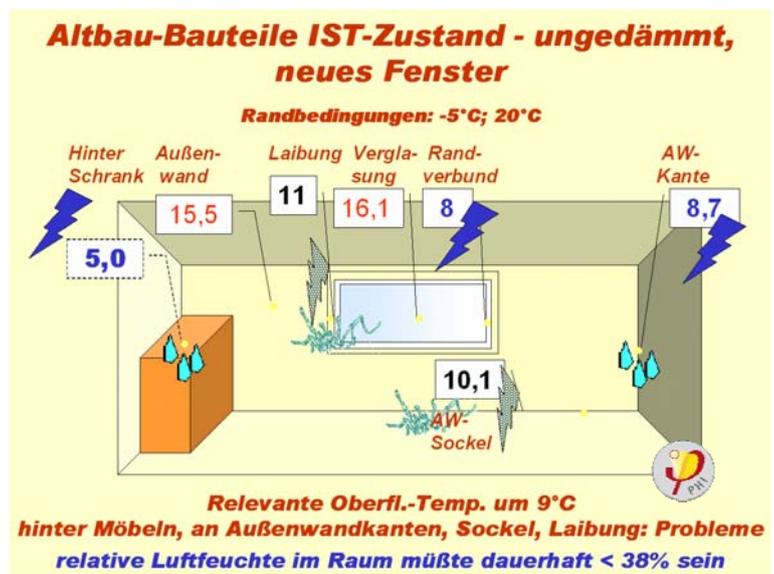
#### 4.1.1 Grundlagen

Die nachträgliche Dämmung von Außenwänden bei Altbauten ist bei einer ohnehin anstehenden Fassadensanierung nicht nur eine äußerst wirtschaftliche Energiesparmaßnahme, sondern auch zur Herstellung einer bauphysikalisch und bezüglich der thermischen Behaglichkeit einwandfreien Konstruktion eine Notwendigkeit.

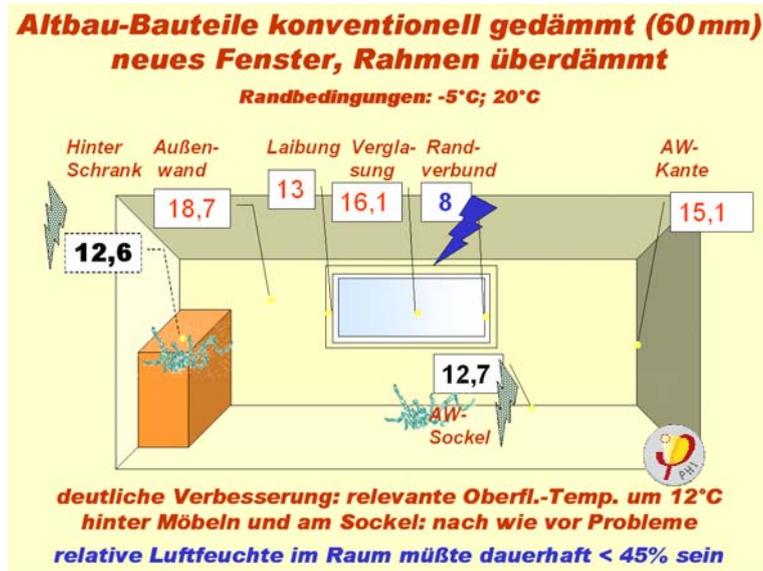
Dabei lassen sich im Bestand fast immer gleich gute Dämmniveaus wie beim Neubau erreichen, nur beim Sockel und bei evtl. vorhandenen auskragenden, thermisch nicht getrennten Bauteilen lassen sich erhöhte Wärmeverluste oft nicht vermeiden. Aber auch hier lassen sich zumindest die feuchtetechnischen Probleme lösen. Die Praxiserfahrungen bestätigen die rechnerischen Ergebnisse; mittels thermografischer Aufnahmen wurde gezeigt, dass die inneren Oberflächentemperaturen bei guter nachträglicher Wärmedämmung auch im Bestand an allen Stellen über die kritische Temperatur für Schimmelwachstum (12,6 °C) gebracht werden können.

Abbildung 8 zeigt die Innenoberflächentemperaturen und die davon abhängige Gefahr von Tauwasserschäden (Schimmel) bei unterschiedlichen Dämmniveaus im Vergleich.

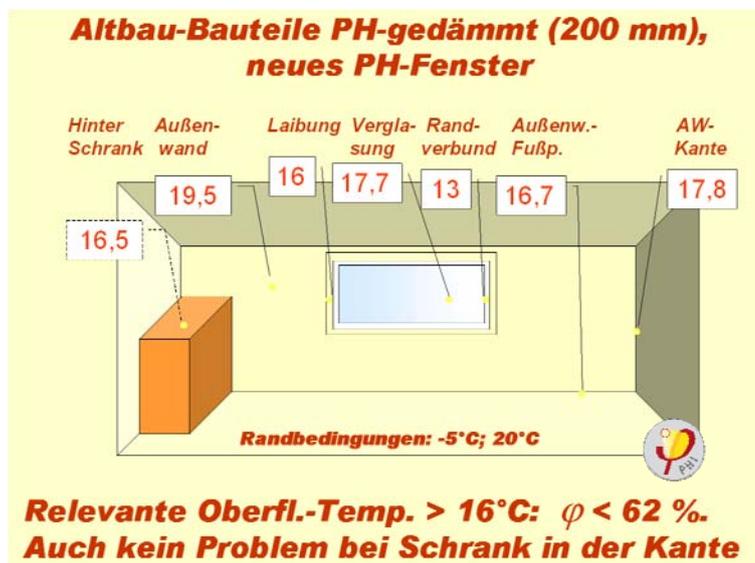
A



B



C



**Abbildung 8** Innentemperaturen und Tauwasserschäden in Abhängigkeit vom Wärmeschutzniveau der Außenwand und maximale relative Feuchte der Innenraumluft, bis zu der Schimmelbildung ausgeschlossen werden kann. (Quelle: Protokollband Nr. 24 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III, PHI, [188])

A) Ohne Verbesserung der Wärmedämmung (U-Werte um 1,4 W/(m<sup>2</sup>K))

Außenwand und Kellerdecke bleiben im alten ungedämmten Zustand. Bei -5 ° außen, + 20 °C Innentemperatur und 50 % Innenluftfeuchtigkeit kommt es bereits zur Tauwasserbildung. Die sehr niedrigen Oberflächentemperaturen führen zu hohen Materialfeuchtigkeiten in diesen Bereichen; die Bedingungen für Schimmelwachstum sind schon erfüllt, wenn die relative Feuchtigkeit der Luft im Innenraum über 38 % liegt. Es ist vor diesem Hintergrund überhaupt nicht verwunderlich, dass es nach dem Einbau dichter Fenster ohne gleichzeitige Verbesserung des Wärmeschutzes der Außenwand zu Schimmelproblemen in den betreffenden Wohnungen kommen kann (siehe auch Abschnitt 4.7.1.1 auf S. 126).

**Der Einbau neuer, dichter Fenster ohne eine gleichzeitige Wärmedämmung der Außenwand führt häufig zur Entstehung von Schimmelpilz an der Innenoberfläche.**

B) Mit geringer Dämmung der Außenwand (60 mm; U-Werte um 0,4 W/(m<sup>2</sup>K))

Durch die außen liegende Dämmung werden die inneren Oberflächentemperaturen generell deutlich angehoben. Auch die Temperaturen an den Wärmebrücken erhöhen sich deutlich. Möglicherweise ausreichende Materialfeuchtigkeiten für Schimmelwachstum werden nun nur noch hinter einem Schrank und vereinzelt am Sockel erreicht. Wenn es durch geeignete Wohnungslüftung gelingt, die relativen Raumlufffeuchtigkeiten konsequent unter 45 % zu halten, können in diesem Fall wärmebrückenbedingte Feuchteschäden bereits ausgeschlossen werden. Allerdings ist der Sicherheitsabstand zum Schadensfall noch nicht sehr groß.

**Mit passivhaustauglichen Dämmdicken und Wärmebrückenvermeidung kann Schimmelwachstum ausgeschlossen werden.**

C) Mit hocheffizienter Dämmung auf Passivhausniveau (mind. 200 mm)

In diesem Fall bleiben alle Wandoberflächentemperaturen, auch die hinter Möbeln in Außenkanten, oberhalb von 16 °C. Unter diesen Umständen sind die Materialfeuchten überall so gering, dass Schimmelwachstum sicher ausgeschlossen werden kann. Es gibt sogar einen Spielraum für die Raumlufffeuchtigkeit, die bis 62 % ansteigen dürfte.

Die Konsequenzen aus dieser Analyse lauten: Mit verbesserter Außenwanddämmung gibt es generell weniger Feuchteprobleme.

#### 4.1.2 Konstruktionen und Materialien

##### 4.1.2.1 Wärmedämm-Verbundsystem



**Abbildung 9** Mit Wärmedämm-Verbundsystem modernisiertes, denkmalgeschütztes Gebäude (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Bernadottestr. 42-48, WBG Nürnberg,)

##### 4.1.2.1.1 Grundlagen

Das Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) ist eine sowohl im Neubau als auch bei der Gebäudesanierung weit verbreitete, kostengünstige und schon seit Jahrzehnten bewährte Form der außenliegenden Wärmedämmung von Außenwänden und Deckenuntersichten. Es ist vergleichsweise kostengünstig und erlaubt bei Putzbauten einen weitgehenden Erhalt des äußeren Erscheinungsbilds. Durch die Verwendung von Flachverblendern oder Riemchen kann der optische Eindruck von Sichtmauerwerk erzeugt werden. Auch historische, ornamentierte Fassaden können, falls gewünscht, mit

entsprechenden Dekorprofilen (vgl. [192]) bzw. mit nachträglichen Ausfräsungen der Dämmstoffoberfläche (vgl. [193]) nachgebildet werden.

Wärmedämm-Verbundsysteme sind immer vollständige, in sich **geschlossene Systeme** eines Systemherstellers, die eine „Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung“ benötigen, die sich auf Materialeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Brandschutz, Schalldämmung), die Stärke der Dämmschicht und auf die Art der Befestigung der Dämmung bezieht. Alle das WDV-System betreffenden Systemkomponenten müssen von einem Systemlieferanten geliefert werden. Bei Mischung von Komponenten unterschiedlicher Hersteller verliert die Systemzulassung ihre Gültigkeit (vgl. [191]) und die Herstellergewährleistung gemäß VOB (vgl. [190]) oder BGB (Bürgerliches Gesetzbuch) erlischt (vgl. [192]).

Nach DIN 55699 (vgl. [75]) umfassen WDVS die folgenden **Komponenten**:

- Klebemörtel und ggf. zusätzliche mechanische Befestigungsmittel
- Wärmedämmstoff
- Unterputz mit Armierung
- Oberputz oder andere „dekorative Schicht“

Ob für die Anbringung eines WDVS bei Altbauten eine **Baugenehmigung** erforderlich ist, wird in den jeweiligen Landesbauordnungen unterschiedlich geregelt. In der Hessischen Bauordnung (HBO - Anlage 2, vgl. [162]) zählen WDVS zu den „Baugenehmigungsfreien Vorhaben“ (Ausnahme: Hochhäuser).

Durch die Anbringung eines WDVS können sich die Schallschutzeigenschaften im Vergleich zur unsanierten Außenwand ändern (siehe Abschnitt 7.6.2.1 auf S. 249). Die Brandschutz-Anforderungen werden in Abschnitt 7.7.2.1 auf S. 256 erläutert.

#### 4.1.2.1.2 Vorbereitungen und Untergrund

Altbaufassaden sind über Jahre unterschiedlichsten Umwelteinflüssen ausgesetzt gewesen. Durch Ablagerung von Schmutz und Ruß, krebende oder sandende Putze oder Altanstriche kann die Haftung des Klebers des WDVS unter Umständen erheblich reduziert werden (vgl. [75]). Art und Zustand des Untergrundes sind im Altbau daher entscheidend für die zu wählende Befestigungsmethode des WDVS.

Grundsätzlich muss der Untergrund tragfähig, ausreichend trocken und eben sein (vgl. [75]). Für die Verklebung muss er außerdem frei von Verschmutzungen, Staub, Fett oder anderen trennend wirkenden Substanzen sein (vgl. [191]). Bei vorliegender starker **Durchfeuchtung** des Mauerwerks (z.B. durch Schlagregen oder die Fassadenreinigung) können sich im Austrocknungsprozess des WDVS Mängel ergeben, wie z.B. Schädigung des Putzes, Markierungen der Plattenfugen und Dübel (vgl. [191]). Tritt im Sockelbereich der Außenwand aufsteigende Feuchtigkeit auf, muss erst die Ursache beseitigt und die Austrocknung abgewartet werden (vgl. [195]).

Bei Polystyrol-Hartschaum-Platten kann u.U. auf eine statisch relevante Verdübelung des WDVS verzichtet werden, wenn die Oberfläche der Wand eine ausreichende **Abreißfestigkeit** von 0,08 N/mm<sup>2</sup> aufweist.

Bei Gebäuden in **dreischaliger Plattenbauweise** muss die Standsicherheit der Wetterschalenverankerung ingenieurmäßig gepruft und beurteilt werden. Bei Bedarf sind Sicherungsmaßnahmen erforderlich (vgl. [193]).

Der Fachhandwerker, der das WDVS anbringt, ist dafür verantwortlich, zu prüfen, ob der Untergrund für die Verklebung bzw. Verdübelung eines WDVS geeignet ist. Ggf. muss er nach VOB/B, Abschnitt 4, Nr. 3 (vgl. [190]) **Bedenken** geltend machen (vgl. [75]).

Alle neuen Horizontalabdeckung wie zum Beispiel Fensterbänke, sowie die Fensterrahmen sollten schon vor dem WDVS angebracht werden, damit die Ausbildung **schlagregendichter Anschlüsse** möglich ist (vgl. [75]).

Bei der Beauftragung des **Baugersts** muss darauf geachtet werden, dass ein ausreichender Abstand (Arbeitsraum) zu den Wandflächen auch nach Anbringung der Dämmblöcke gewährleistet ist. Bei passivhaustauglichen Dämmdicken entstehen dadurch in der Regel Abstände von über 30 cm zwischen Gerstbelag und alter Fassade. In diesem Fall muss auch auf der der Fassade zugewandten Seite des Gerüsts bis zur Anbringung der Dämmblöcke eine Absturzsicherung (Seitenschutz) vorgesehen werden (vgl. [197]).

#### 4.1.2.1.3 Befestigung

Abhängig vom Ergebnis der Untersuchung des Untergrunds kann eine geeignete Befestigungsmethode für das WDVS gewählt werden. Folgende Methoden sind in den Bauaufsichtlichen Zulassungen für WDVS beschrieben (vgl. [191]):

- Verklebung (ohne statisch relevante Dübelung)
- Verklebung mit zusätzlicher statisch relevanter Dübelung
- Schienenbefestigung

Bei einzelnen WDVS können laut Bauaufsichtlicher Zulassung auch andere mechanische Befestigungen verwendet werden.

#### Verklebung

Bei geeignetem Untergrund kann auf eine statisch relevante Verdübelung des WDVS verzichtet werden (siehe Abschnitt 4.1.2.1.2). Die Dämmblöcke werden dann nur durch den Kleber befestigt. Als Montagehilfe zur Fixierung der Dämmblöcke bei noch feuchtem Kleber kann eine zusätzliche konstruktive Verdübelung erfolgen, an die dann keine speziellen Anforderungen (z.B. Bauaufsichtliche Zulassung) gestellt werden.

Die Klebmasse ist nach der Systemhersteller-Vorschrift aufzubringen. Je nach Ebenheit des Untergrunds stehen drei unterschiedliche Methoden zur Auswahl:

Bei der Altbausanierung empfiehlt sich insbesondere die **Randwulst-Punkt-Methode**, weil sie auch für leicht unebene Untergründe geeignet ist.



*Eine unbeabsichtigte „Hinterlüftung“ der Wärmedämmung setzt deren Wirksamkeit stark herab.*

**Abbildung 10** „Freischwebende“ nur mit wenigen Kleberbatzen befestigte Dämmplatte. Die Dämmwirkung ist hier durch Hinterströmung mit Außenluft zumindest stark vermindert. Zudem können durch eine ungenügende Fixierung der Dämmplatte Risse im Putz entstehen. (Quelle: PHI)

Bei wenig lot- und fluchtgerechten Altbauwänden kann es kostengünstiger sein, den Unebenheiten der alten Wandoberfläche mit dem WDVS zu folgen, anstatt einen Ausgleich herzustellen. Dies stellt aber, wenn die Norm-Maßtoleranzen nicht mehr eingehalten werden, einen Mangel dar, so dass eine vorherige schriftliche Vereinbarung zwischen Bauherr und ausführender Firma unbedingt angeraten ist. Dem Bauherrn sollte allerdings bewusst sein, dass die in die Oberfläche des WDVS übernommenen Unebenheiten insbesondere bei Streiflicht deutlich erkennbar sein können.

Bei **maschinellem Kleberauftrag** kann auch ein mäanderförmiger Wulst mit mind. 50 % Flächenanteil (vgl. [75]) direkt auf die Wand aufgespritzt werden.

Eher für den Neubaubereich ist der **ganzflächige Auftrag mit dem Zahntaufel** geeignet, da hierdurch Unebenheiten nur in sehr geringem Maße ausgeglichen werden können. Ein Vorteil des vollflächigen Kleberauftrags gerade bei der Altbausanierung kann allerdings sein, dass hierdurch gleichzeitig die luftdichte Ebene der Außenwand gebildet werden kann (Abbildung 11).

***Tipp:** Die Putzoberflächen von Altbauaußenwänden sind oft nicht lot- und fluchtgerecht. Der Ausgleich durch dickeren Kleberauftrag kostet Material und Zeit. Wird mit dem Handwerker vereinbart, dass die neue Putzoberfläche teilweise den bestehenden Unebenheiten folgen darf, so wird die Ausführung des WDVS günstiger.*



**Abbildung 11** Vollflächiges Aufbringen des Klebers für das Wärmedämm-Verbundsystem mit einem Zahnpachtel zur gleichzeitigen Herstellung einer luftdichten Ebene auf der Außenseite der Bestandswand (Quelle: faktor10 Darmstadt)

#### *Verklebung mit zusätzlicher, statisch relevanter Dübelung*

Die statisch relevante Verdübelung ist zu unterscheiden von einer konstruktiven Dübelung, die nur als Montagehilfe dient. Die Dübel müssen eine Bauaufsichtliche Zulassung besitzen und für die auftretenden Lastfälle (Gewicht, Windsog, thermische Einwirkungen) auch, falls die Verklebung versagt, geeignet sein. In der Zulassung ist der Verankerungsgrund, für den der Dübel verwendet werden darf, benannt. Die Dübelaufteilung und Verarbeitung erfolgt nach den Herstellervorschriften (vgl. [192]). Um ein Verziehen der Dämmplatten auszuschließen, sollte die statisch relevante Verdübelung erst erfolgen, wenn die Klebmasse des WDVS ausgehärtet ist (vgl. [75]).

Je nach Gebäudehöhe und Windbelastung am Gebäudestandort variiert die Anzahl der notwendigen Dübel (ab 4 Stück pro m<sup>2</sup>). In der Fläche sind teilweise weniger Dübel nötig als an den Gebäudeecken. Es stellt sich die Frage, in wie weit die Dübel als **Wärmebrücke** die Dämmwirkung des WDVS reduzieren.

Bei bauaufsichtlich zugelassenen Dübeln geht der  $\chi$ -Wert aus der Zulassung hervor. Auf dem Markt sind WDVS-Dübel mit  $\chi$ -Werten unter 0,0005 W/K erhältlich, die vollständig aus Kunststoff bestehen. Diese sind gewöhnlich nur für Dämmstoffstärken bis ca. 150 mm zugelassen. Dübel bis über 300 mm Dämmstoffstärke erreichen  $\chi$ -Werte von 0,002 W/K. Ein häufiger „Trick“ zur Reduzierung der Wärmeverluste besteht dabei darin, dass die metallischen Befestigungselemente nicht bis an die Oberfläche der Dämmung reichen, sondern in einer mehrere Zentimeter tiefen Vertiefung der Kunststoff-

Dämmscheibe enden. Selbst eine Durchdringung der Wärmedämmung aus gewöhnlichem Stahl führt jedoch bei einem für solche Dübel typischen Durchmesser von 6 mm nur zu einem  $\chi$ -Wert von 0,004 W/K (vgl. [76])

Im Extremfall bei 20 solcher Dübel pro Quadratmeter (Eckbereich eines Hochhauses) kann der Wärmebrückenzuschlag aufgrund der Verdübelung allerdings schon 0,08 W/(m<sup>2</sup>K) betragen und damit bei Passivhaus-Dämmdicken den U-Wert der betroffenen Wand-Teilfläche um mehr als 50 % erhöhen.

Um Wärmeverluste durch Dübel zu verringern bietet sich noch die Möglichkeit an den Dübelkopf bei der Montage in den Dämmstoff zu versenken. Je nach System werden die zylindrischen Löcher teilweise schon automatisch durch spezielle Montagewerkzeuge mit der Befestigung des Dübels in den Dämmstoff geschnitten, so dass kein zusätzlicher Arbeitsschritt anfällt. Der Hohlraum über dem Dübelteller kann dann durch vorgefertigte, ebenfalls zylindrische Dämmstopfen verschlossen werden.



**Abbildung 12** *Edelstahldübel für Wärmedämmverbundsystem mit Kunststoffhülse und Kunststoffteller. Der Dübelkopf ist in einer trichterartigen Vertiefung versenkt, so dass er nicht bis zum Dübelteller reicht. Beim Festdrehen zieht sich außerdem der Dübel ca. 1cm weit in ein vorgesägtes zylindrisches Loch. Dieses wird dann durch den mitgelieferten Dämmstoffstopfen verschlossen.*  
(Quelle: PHI)

#### *Schienenbefestigung*

Bei sehr schwierigen bzw. unebenen Altbau-Untergründen kann die vergleichsweise aufwändige Befestigung des WDVS mit Schienen erforderlich sein, um eine umfangreiche Untergrundvorbereitung zu umgehen. Die Schienenbefestigung ist allerdings nur bis 200 mm Dämmdicke zugelassen, so dass ein Wärmeschutz in Passivhaus-Qualität nicht ganz erreicht wird.

#### *Justierbare Verankerung*

Noch größere Unebenheiten von 10-70 mm können durch eine sogenannte „Stellfuchs“-Befestigung ausgeglichen werden. Es handelt sich hierbei um spezielle Dübel, die eine nachträgliche Justierung des Abstands der Dämmblöcke von der Altbauwand ermöglichen. Eine Verbindung des sich hinter den Dämmblöcken ergebenden Luftraums mit der Außenluft (Hinterlüftung!) muss durch geeignete Ausführung gemäß den Verarbeitungsrichtlinien

sorgfältig vermieden werden. Die Bauaufsichtliche Zulassung gestattet bei diesen Systemen allerdings teilweise keine passivhaustauglichen Dämmdicken.

#### *Aufdopplung auf vorhandenem Wärmedämm-Verbundsystem*

Inzwischen sind WDV-Systeme auf dem Markt, die eine Zulassung für die Befestigung auf einem bestehenden WDVS besitzen. Da die erzielbare zusätzliche Energieeinsparung wegen der schon vorhandenen Wärmedämmung geringer ist, ist eine solche Maßnahme allerdings naturgemäß wirtschaftlich weniger lukrativ als die Dämmung einer zuvor ungedämmten Außenwand. Es lohnt sich also, gleich von Anfang an eine optimale Dämmdicke zu verwirklichen.

#### *4.1.2.1.4 Dämmstoffe*

WDVS sind mit unterschiedlichen Dämmstoffen erhältlich. Den größten Marktanteil haben WDVS aus dem vergleichsweise kostengünstigen **Polystyrol-Hartschaum (EPS)**. Der Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit ist 0,035 bzw. 0,040 W/(mK). In jüngerer Zeit konnte die Wärmeleitfähigkeit von EPS durch den Zusatz von Graphit, das als Infrarot-Absorber bzw. -reflektor wirkt, noch weiter bis auf 0,032 W/(mK) verringert werden.

EPS-Dämmung ist nicht dauerhaft UV-stabil und muss daher bei Transport und Lagerung vor Sonneneinstrahlung geschützt werden (vgl. [75]). Vor dem Aufbringen des Unterputzes müssen durch UV-Einstrahlung vergilbte Dämmstoff-Schichten abgeschliffen werden. Mit Graphit versetztes EPS kann sich durch die dunkle Farbe bei Sonneneinstrahlung stark aufheizen. Zur Vermeidung schädlicher thermischer Längenänderungen muss daher während der Anbringung der Dämmblöcke das Gerüst verschattet werden.

Bei höheren Anforderungen bezüglich des Brandschutzes wird in der Regel auf die etwas teurere **Mineralwolle-Dämmung** zurückgegriffen. Steinwolle-Dämmplatten und -Lamellen für WDVS entsprechen der Baustoffklasse A1 bzw. A2, „nichtbrennbar“. Der Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,035, 0,040 oder 0,045 W/(mK). Das Format bei Mineralwolle-Platten ist in der Regel 80 x 62,5 cm (vgl. [191]). Mineralwolle-Lamellendämmplatten haben durch die rechtwinklig zur Fassade gerichtete Faseranordnung eine höhere Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene. Sie werden in der Regel im Format 120 x 20 cm geliefert und können im Gegensatz zu den gewöhnlichen Mineralwolle-Platten bei geeignetem Untergrund nur durch Verklebung (d.h. ohne statisch relevante Verdübelung) befestigt werden (vgl. [192]).

**Mineralschaum-Dämmplatten** entsprechen ebenfalls der Baustoffklasse A1 bzw. A2, „nichtbrennbar“. Sie müssen verklebt bzw. verklebt und verdübelt werden. Durch die höhere Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,045$  W/(mK) bei einer Rohdichte von 100 - 130 kg/m<sup>3</sup> (vgl. [191]) sind allerdings etwas größere Dämmdicken nötig.

Weitere Dämmstoffe mit geringeren Marktanteilen sind:

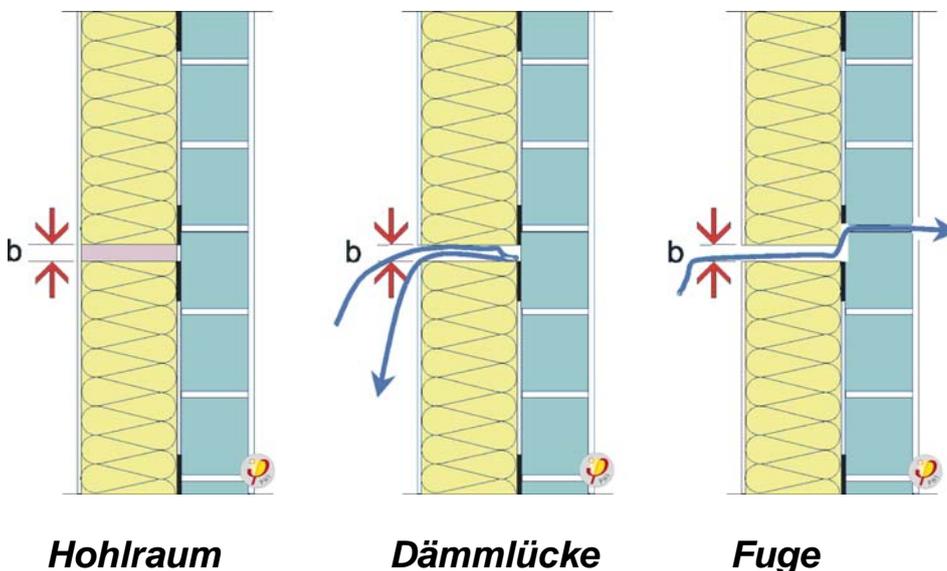
- Holzweichfaserplatten
- Kork
- Polyurethanschaum (PUR)
- Polystyrol-Extrusionsschaum (XPS)
- Schilf
- Holzwolle-Dämmplatten / Holzwolle-Mehrschichtplatten

#### *Verlegung*

Dämmblöcke eines WDVS müssen immer im **Verband** ( $\geq 10$  cm) ohne Kreuzfugen verlegt werden. An den Gebäudeecken sollte eine Verzahnung der Dämmblöcke erfolgen (vgl. [191]). Versprünge zwischen den Platten sind zu vermeiden. Es darf kein Kleber in die Plattenstöße gelangen.

Die Dämmblöcke sind press aneinander zu stoßen. **Lücken** sind in zweierlei Hinsicht problematisch. Zum einen können an dieser Stelle Putzrisse entstehen. Zum anderen können Lücken zwischen den Dämmblöcken eines WDVS die effektive Dämmwirkung verschlechtern.

Theoretisch können in einer Wärmedämmung drei Arten von Lücken auftreten: der allseitig geschlossene Hohlraum, die nach außen offene Dämmücke sowie die durchgehende Fuge, die einen Luftaustausch zwischen beheiztem Innenraum und Außenluft ermöglicht (siehe Abbildung 13).



**Abbildung 13** Fehlstellen bei außenliegender Wärmedämmung (Quelle: PHI, [74])

Am ehesten wird beim Wärmedämm-Verbundsystem der erste Fall des allseitig geschlossenen Hohlraums auftreten. Für diesen Fall wurde durch Berechnung der Wärmetransportvorgänge (vgl. [74]) festgestellt, dass die Auswirkungen von Hohlräumen bis 5 mm lichter Breite auf den Wärmeverlust der Außenwand vernachlässigbar gering sind. Ein 10 mm breiter Spalt verschlechtert aber den

U-Wert der Konstruktion bereits um 13 % (bei 300 mm Dämmdicke und 1 m Fugenlänge pro 1 m<sup>2</sup> Wandfläche).

Eine absolut lückenlose Verlegung ist aber in der Praxis kaum möglich. Bei der Altbauanierung mit Dämmdicken über 20 cm kann der unebene Untergrund dazu führen, dass benachbarte Dämmplatten leicht gegeneinander gekippt sind, was in Verbindung mit den großen Dämmdicken zu keilförmigen Lücken zwischen den Platten führt. Diese Lücken müssen nach Anbringung der Dämmblöcke verfüllt werden. Obwohl Lücken  $\leq 5$  mm kaum zusätzliche Wärmeverluste bewirken, ist eine Verfüllung zur Vermeidung von Putzrissen nach den Hersteller-Anweisungen in der Regel trotzdem erforderlich. Dämm-lücken bis maximal 5 mm Breite dürfen laut DIN 55699 (Verarbeitung von Wärmedämm-Verbundsystemen, vgl. [75]) mit systemrelevantem Schaum verfüllt werden.

Einen Sonderfall stellen **Dehnfugen** im WDVS dar. Diese sind nur an vom Bauwerk vorgegebenen Trennfugen (Bewegungsfugen, Dehnungsfugen) erforderlich (vgl. [75]). Sie sollten, bevor die äußere Schlagregen-Abdichtung der Fuge erfolgt, mit einem weichen Dämmstoff wie Mineralwolle ausgestopft werden, um gleichermaßen die Beweglichkeit als auch den Wärmeschutz zu gewährleisten. Das Ausstopfen ist ohnehin aus Brandschutzgründen (Kamineffekt im Spalt) zwingend erforderlich.

In jedem Fall sollte, bevor der Unterputz aufgebracht wird, eine Abnahme der Wärmedämmung durch die Bauleitung erfolgen, weil danach Mängel nur noch durch eine Thermografieaufnahme erkannt werden können und eine zerstörungsfreie Mängelbeseitigung dann nicht mehr möglich ist.

Der häufig vorhandene Rücksprung zwischen Wanddämmung und Perimeterdämmung bzw. der untere Abschluss der Wanddämmung bei Gebäuden mit kaltem Keller wird oftmals mit Hilfe eines speziellen **Sockelprofils** ausgebildet. Es dient als Anschlag und sauberer Abschluss, sowie als Kantenschutz und Tropfkante. Üblicherweise wird es leider oft noch als Blechprofil aus Aluminium oder Edelstahl ausgeführt. Inzwischen sind Sockelprofile aus Kunststoff auf dem Markt, die aus baupraktischer Sicht ausreichen und mit einem  $\Psi$ -Wert von 0,002 bis 0,012 W/(mK) nahezu wärmebrückenfrei sind (vgl. [77]). In vielen Fällen ist allerdings gar kein durchgehendes Sockelprofil erforderlich. Häufig ist die Ausbildung einer Tropfkante durch ein Kunststoffprofil mit Einputzgewebe ausreichend. Metallische Sockelprofile als unterer Abschluss einer Wanddämmung, die nicht in den Perimeterbereich weitergeführt wird, sind ebenfalls eher unproblematisch.



**Abbildung 14** Das Erdgeschoss ist bezüglich der Wärmeverluste fast „doppelt so hoch“, wenn ein Sockelprofil aus Aluminiumblech verwendet wird (Fotomontage: ebök)



**Abbildung 15** Konventionelle Sockelprofile aus Aluminium verursachen starke Wärmebrückeneffekte (Quelle: PHI)

#### 4.1.2.1.5 Putz

Die Putzschicht des WDVS besteht aus dem Unterputz mit eingebetteter Bewehrung/Armierung sowie dem Oberputz, der die sichtbare Fassadenoberfläche darstellt.

Der **Unterputz** hat die Aufgabe Zug- und Druckspannungen (durch thermische Einflüsse) aufzunehmen und in Verbindung mit der Schlussbeschichtung den notwendigen Wetterschutz herzustellen. Dazu wird das Armierungsgewebe mittig in den zweilagig, „nass in nass“ aufgetragenen Unterputz eingebettet. Zur Erhöhung der Stoß- und Schlagfestigkeit kann an besonders beanspruchten Stellen ein spezielles Panzergewebe verwendet werden.

Beim **Oberputz** ist eine große Vielfalt an Strukturen und Farben möglich. Da der Putz sich beim WDVS aufgrund der fehlenden Kopplung an die thermische Masse der tragenden Wand bei Sonneneinstrahlung schneller erwärmt, sollte die Farbe des Oberputzes / der Schlussbeschichtung allerdings einen Hellbezugswert von 20 nach DIN 5033-3 (vgl. [201]) nicht unterschreiten (vgl. [75]), d.h. es sollten keine zu dunklen Farben verwendet werden. Dies gilt insbesondere für großflächige, besonnte Fassaden. So werden übermäßige Längenänderungen aufgrund von Temperaturschwankungen vermieden.

Statt einem Oberputz kann die Fassade auch durch **Flachverblender** (kunstharzgebundene Platten) oder **keramische Beläge** (Riemchen, Fliesen, Platten) gestaltet werden.



**Abbildung 16** Nachbildung einer historischen Backstein-Fassade mit sogenannten „Riemchen“ auf einem Wärmedämm-Verbundsystem (Quelle: Schulze Darup)

#### 4.1.2.2 Vorgehängte hinterlüftete Fassaden

Neben dem Wärmedämm-Verbundsystem wird bei Gebäudesanierungen auch häufig eine vorgehängte, hinterlüftete Fassade (im Folgenden: VHF) gewählt. Schon bei historischen Fachwerkgebäuden findet sich an der am meisten schlagregenbelasteten Wetterseite häufig eine hinterlüftete Bekleidung, deren ersatzlose Entfernung zur Freilegung des Fachwerks in der Vergangenheit teilweise zu bedeutenden Schäden an der historischen Substanz geführt hat (siehe auch Abbildung 42 auf Seite 77).

Vorgehängte Fassaden sind in den meisten Fällen teurer als ein WDVS bei Preisen die um 100 €/m<sup>2</sup> beginnen und bis 500 €/m<sup>2</sup> für eine repräsentative Fassade gehen<sup>1</sup>. Trotzdem sprechen einige Gründe für eine VHF:

- Durch die Hinterlüftung ist die Wandkonstruktion nach außen diffusionsoffen, selbst wenn die sichtbare Wandbekleidung aus diffusionsdichten Materialien wie Glas oder Metall besteht. Die VHF bietet daher vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten bei gleichzeitig unproblematischem Diffusionshaushalt der Konstruktion.
- Auch Feuchtigkeit die von außen in die Konstruktion gelangt, sei es Schlagregen oder Tauwasser, kann über den Hinterlüftungsspalt wirksam wieder abgeführt werden.
- VHF's können auch auf unebenen Untergründen verwirklicht werden
- Mit VHF's sind Konstruktionen möglich, die eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Vandalismus und andere Belastungen

<sup>1</sup> Kosten im Jahr 2007

aufweisen. Sollten doch Schäden auftreten lassen sich einzelne Bekleidungsselemente relativ leicht austauschen.

- Die Bauschadenshäufigkeit von VHF's gilt als gering.
- VHF's können im Gegensatz zu Wärmedämm-Verbundsystemen auch bei Temperaturen unter +5 °C montiert werden, so dass witterungsbedingte Unterbrechungen des Baufortschritts vermieden werden können.

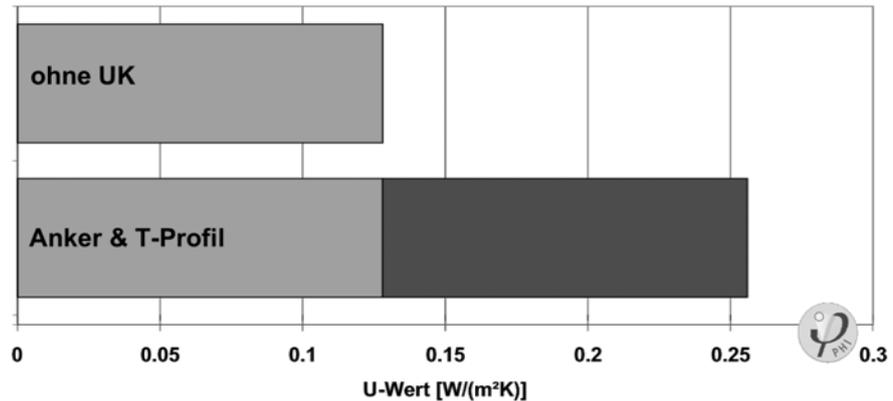
Bei der Planung und Ausführung müssen jedoch einige Punkte beachtet werden:

- Eine sorgfältige Ausführung bezüglich dichter Anschlüsse und Schlagregenschutz muss gewährleistet sein.
- Die Bekleidung muss zwängungsfrei montiert werden, da das System große Temperaturdifferenzen (ca. -20 bis +80 °C) ohne Knackgeräusche oder Risse in der Bekleidung verkraften muss.
- Die Wärmedämmung muss zum Hinterlüftungsspalt hin winddicht (aber diffusionsoffen) ausgeführt werden.
- Die Möglichkeiten bei der Entwicklung wärmebrückenreduzierter Lösungen sind dadurch eingeschränkt, dass eine bauaufsichtliche Zulassung für die Bekleidung, die Unterkonstruktion und die Befestigungsmittel erforderlich ist. Wenn für eine ambitionierte energetische Sanierung keine geeigneten Produkte auf dem Markt verfügbar sind, kann es sinnvoll sein eine Zulassung im Einzelfall anzustreben.
- Hinter der Bekleidung dürfen aufgrund des Kamineffekts nur feuerbeständige Materialien eingesetzt werden.
- Dadurch, dass die Unterkonstruktion der Fassadenbekleidung die Dämmebene durchdringt, um an der Bestandswand befestigt zu werden, können erhebliche Wärmebrücken entstehen.

#### *Vermeidung von Wärmebrücken bei der Konstruktion von VHF*

Unterkonstruktionen von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden bestehen häufig aus Aluminium. Bei handelsüblichen Unterkonstruktionen, selbst wenn diese eine thermische Trennung von der massiven Wand durch Hart-PVC-Unterlegplättchen aufweisen, kann diese Wärmebrücke zu einer massiven Verschlechterung des U-Werts führen, die die Energiebilanz des sanierten Gebäudes stark beeinträchtigen kann (vgl. [76]). Dagegen stellen die Dämmstoffhalter, die zusätzlich die Wärmedämmung durchdringen und von denen nach der einschlägigen DIN 18516 mindestens 5 Stück pro m<sup>2</sup> vorgeschrieben sind, in aller Regel kein Problem dar. Es gibt sogar absolut wärmebrückenfreie Dämmstoffhalter, die sich an der Unterkonstruktion der Fassadenbekleidung abstützen und die Dämmung von außen halten.

**Aluminium-Unterkonstruktionen von vorgehängten Fassaden können eine Verdopplung der Wärmeverluste über die opake Fassade bewirken.**

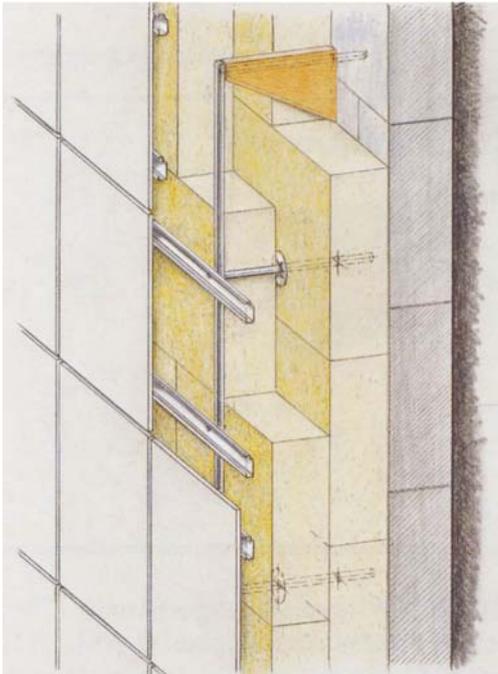


**Abbildung 17** Beispielhafte Berechnung der Verschlechterung des U-Werts einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade durch eine handelsübliche Aluminium-Unterkonstruktion (mit thermischer Trennung von der massiven Wand durch 6 mm Hart-PVC). (Quelle: PHI, [76])

Um die Wärmebrückenverluste über die Unterkonstruktion zu reduzieren empfiehlt sich die Orientierung an den folgenden Prinzipien (vgl. [76]):

- Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit wählen (z.B. Edelstahl statt Aluminium oder Normalstahl, GFK, Leimholz, Kohlefaser)
- thermische Trennungen verwenden
- geometrische Optimierung: minimierte Querschnitte, Fachwerkstrukturen mit hoher Tragfähigkeit bei geringem Materialeinsatz
- lieber wenige dicke als viele dünne Durchdringungen

Verschiedene wärmebrückenreduzierte Unterkonstruktionen werden im Protokollband Nr. 35 „Wärmebrücken und Tragwerksplanung“ des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser untersucht (vgl. [76]): zum Beispiel Holzstegträger und Kreuzlattung. Für schwere Fassadenbekleidungen, z.B. aus Naturstein, werden inzwischen auch Konsolen aus Polyurethan und Faserverbundwerkstoff angeboten (Abbildung 18).



**Abbildung 18** Wärmebrückenarme Konsolen aus Polyurethan und GFK (Quelle: Fingerling)

#### 4.1.2.3 Gemauerte Vorsatzschalen mit gedämmtem Schalenzwischenraum

Eine eher kostenintensive Variante der energetischen Fassadensanierung ist die Erstellung einer nachträglichen Vormauerung, wobei die Wärmedämmung im Zwischenraum zwischen tragender Wand und neuer Außenschale zu liegen kommt. Kosten entstehen nicht nur durch die neue Fassade an sich, sondern auch durch die aufwändige Abfangung der Eigenlast am Fußpunkt der Vormauerung. Entweder werden die Lasten über ein frostfrei gegründetes Fundament in den Baugrund abgeleitet, oder die äußere Schale stützt sich über Edelstahlkonsolen auf der bestehenden Wand ab. Hierbei muss untersucht werden, ob nicht die Wärmebrückenwirkung der Konsolen eine übermäßige Verschlechterung des Wärmeschutzes der Außenwand bewirkt. Bei passivhaustauglichen Dämmdicken und dadurch großem Schalenabstand werden die Konsolen entsprechend aufwändiger.

Zweischaliges Mauerwerk ist in DIN 1053 (vgl. [80]) genormt. Für Schalenabstände von 6 bis 15 cm können ohne weiteren Aufwand Standardkonstruktionen eingesetzt werden. Hier sind je nach Schalenabstand mindestens 5 bis 7 Edelstahl-Anker pro m<sup>2</sup> mit 3 bis 5 mm Durchmesser nötig. Der Wärmebrückeneffekt durch solche Anker ist mäßig: Ein typischer  $\chi$ -Wert für einen solchen Anker beträgt 0,002 W/K. Bei 6 Ankern pro m<sup>2</sup> ergibt sich ein Wärmebrückenzuschlag von 0,012 W/(m<sup>2</sup>K). Die meisten Hersteller bieten neben Ankern für den Neubau, die beim Bau der tragenden Wand in die Lagerfugen eingelegt werden, auch Anker an, die nachträglich in einer bestehenden Wand verübelt werden.

Um den begrenzten Schalenzwischenraum voll auszunutzen, kann unter Umständen auf eine Hinterlüftung der Vormauerung verzichtet werden. Voraussetzung ist die Verwendung hydrophobierter Dämmstoffe sowie eine

möglichst diffusionsoffene Vormauerung. Besonders bei Klinkermauerwerk kann die Diffusionsoffenheit durch einen hohen Fugenanteil und den Einbau von Lüfterziegeln erhöht werden. Eingedrungenes Wasser wird durch eine Folie am Fußpunkt der Dämmung über offene Stoßfugen abgeleitet.

Allerdings muss auch für Schalenabstände über 15 cm keine Zustimmung im Einzelfall erwirkt werden. Eine statische Berechnung ist ausreichend. Luftanker mit einer bauaufsichtlichen Zulassung bis 20 cm Schalenabstand sind inzwischen erhältlich.

**Sogenannte Gelenkanker können bei Schalenabständen über 15 cm verwendet werden.**

Die Begrenzung der Schalenabstände auf maximal 15 cm in der DIN ist dadurch begründet, dass bei größeren Abständen die Gefahr besteht, dass die Luftanker ausknicken. Sogenannte Gelenkanker können dagegen aufgrund ihrer Konstruktion nicht ausknicken. Solche Anker sind daher mit bauaufsichtlicher Zulassung bis 20 cm Schalenabstand erhältlich, und mit Zustimmung im Einzelfall bis 35 cm Schalenabstand.

Wo zusätzlich Lasten abgetragen werden müssen, beispielsweise über Wandöffnungen, werden Edelstahlkonsolen eingesetzt. Diese sind mit bauaufsichtlicher Zulassung bis 35 cm Schalenabstand erhältlich. Auch hier entstehen zusätzliche Wärmebrückenverluste, die aber meist in einem noch tolerierbaren Rahmen liegen.

#### 4.1.2.4 *Nachträgliche Kerndämmung im vorhandenen Mauerwerkszwischenraum<sup>1</sup>*

Die Außenwände von Mauerwerksbauten im Gebäudebestand sind häufig zweischalig ausgeführt, mit einer tragenden Innenschale und einer gemauerten Außenschale als Sichtfassade und Wetterschutz. Zwischen diesen beiden Schalen befindet sich üblicherweise eine Luftschicht. Diese kann laut DIN 1053-1 (vgl. [80]) *„...ohne verbleibende Luftschicht verfüllt werden, wenn Wärmedämmstoffe verwendet werden, für die die Brauchbarkeit nach den bauaufsichtlichen Vorschriften nachgewiesen ist, z.B. durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung.“* Das nachträgliche Einbringen von Dämmstoff in den Mauerwerkszwischenraum kann eine einfache und kostengünstige Methode der Verbesserung des Wärmeschutzes sein.

Zunächst muss allerdings geprüft werden, ob die Bestandssituation für diese Maßnahme geeignet ist. Die Luftschichtdicke sollte mindestens 5 cm betragen und über die gesamte Gebäudehöhe durchgehend sein. Es sollten möglichst keine Verbindungen zwischen den beiden Schalen in Form von Mörtelresten oder Schutt bestehen, da diese sonst später Wärmebrücken darstellen. Der Zustand des Luftzwischenraums kann vor Ausführung der Maßnahme mit einem Endoskop überprüft werden. Des Weiteren sollte ausgeschlossen werden, dass der Mauerwerkszwischenraum aufgrund von undichten Mauerwerksfugen oder Putzrissen dauerhaft durch Schlagregen durchnässt wird.

Für die nachträgliche Kerndämmung können verschiedene schütt- oder einblasfähige Baustoffe verwendet werden. Tabelle 4 gibt eine Übersicht.

<sup>1</sup> vgl. [89]

Grundsätzlich sollte der verwendete Dämmstoff eine bauaufsichtliche Zulassung für den Einsatz zur nachträglichen Kerndämmung haben. Aufgrund der nicht auszuschließenden Feuchtebelastung muss er, wenn er nicht von Natur aus wasserabweisend ist, bei der Produktion hydrophobiert werden. Der Dämmstoff muss außerdem „nichtbrennbar“ sein.

**Tabelle 4** *Übersicht über Dämmstoffe für die nachträgliche Kerndämmung von zweischaligem Mauerwerk (Quelle (außer EPS): Institut für Bauforschung e.V., Hannover)*

Dämmstoff für Kerndämmung	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
Blähperlit	0,045 - 0,060
Blähton	0,08 - 0,02
Calcium-Silicate	0,055 - 0,085
Steinwoll-Granulat	0,045
Blähglas-Granulat	0,035
aufgeschäumte EPS-Perlen mit Graphit	0,035

Für das Einbringen der Wärmedämmung bei Sichtmauerwerk werden mit einer Fräse die Mörtelfugen einzelner Mauerwerkssteine entfernt und diese entnommen. Durch die entstehenden Löcher wird der Dämmstoff eingeblasen. Die Steine können später wieder eingesetzt werden, so dass keine sichtbaren Spuren in der Fassade verbleiben. Bei Putzfassaden werden ausreichend große Bohrungen erstellt. Ist dies z.B. auf Grund von Denkmalschutzanforderungen an der Fassade nicht möglich, so kann notfalls auch vom Innenraum aus gebohrt werden. Dies ist aber aufgrund einer evtl. größeren Stärke der tragenden Innenschale, sowie wegen der Beschädigung der Innenwandoberfläche (Putz, Tapete) meist aufwendiger. Als Richtwert braucht man für 20 m<sup>2</sup> Fassadenfläche abhängig von der Lage von Fenstern und Türen ca. 4-6 Öffnungen.

Wegen der begrenzten Breite des Mauerwerkszwischenraums von üblicherweise 4-10 cm kann die nachträgliche Kerndämmung nicht die ausgezeichneten Dämmwerte einer außenliegenden Fassadendämmung erreichen. Bei einem zweischaligen Vollziegelmauerwerk (2 x 11,5 cm) mit 7 cm Luftzwischenraum wird durch eine Kerndämmung mit Blähperlit ( $\lambda = 0,045 \text{ W/(mK)}$ ) nur ein U-Wert von ca. 0,5 W/(m<sup>2</sup>K) erreicht (Vergleich: mit außenliegender Dämmung 22 cm,  $\lambda = 0,045 \text{ W/(mK)}$ :  $U = 0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ). Unvermeidliche Wärmebrücken an den Fenster- und Türleibungen sowie durch die Rückverankerung der Außenschale im tragenden Mauerwerk vermindern den effektiven Dämmwert der Außenwand zusätzlich. Die nachträgliche Kerndämmung kann also nur eine Notlösung sein, wenn andere weitergehende Wärmedämmmaßnahmen, zum Beispiel wegen einer erhaltenswerten Sichtfassade, nicht möglich sind. Denkbar ist auch eine Kombination von Kerndämmung mit Innendämmung.

**Nachträgliche Kerndämmung nur ausführen, wenn keine außenliegende Wärmedämmung möglich ist.**

### 4.1.3 Wärmebrücken

Bei der nachträglichen Dämmung eines Altbaus sollte als Ziel angestrebt werden, dass die Dämmebene so wie beim Neubau unterbrechungsfrei das gesamte Gebäude umfasst. Verschiedene bestehende Elemente wie Balkonplatten und Vordächer kragen an der Außenwand aus und unterbrechen zwangsläufig die wärmegeämmte Gebäudehülle. Neben den dadurch entstehenden Wärmeverlusten stellt sich auch die Frage nach der bauphysikalischen Unbedenklichkeit - Stichwort Tauwasser und Schimmelbildung an kalten Oberflächen.

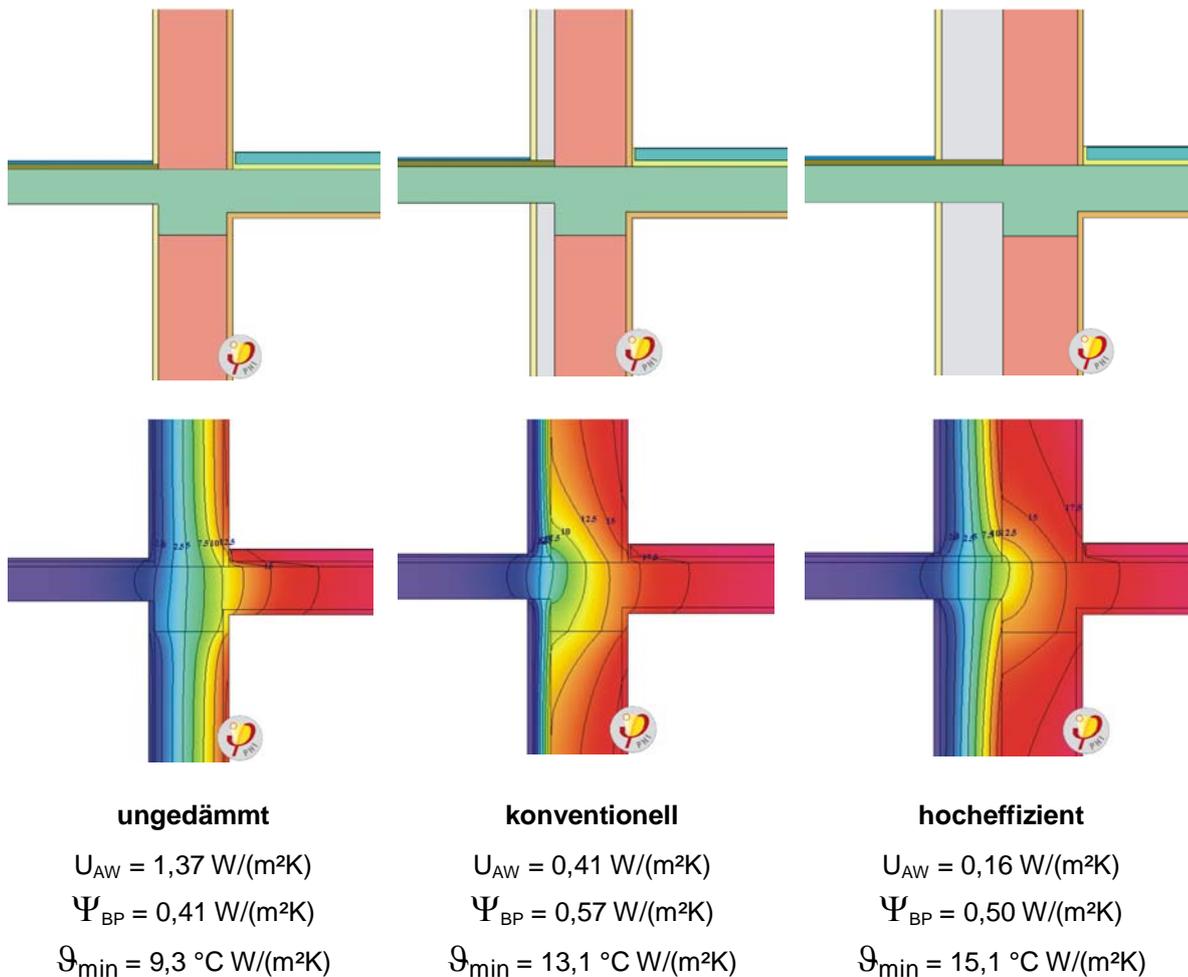
#### 4.1.3.1 Auskragende Stahlbeton-Deckenplatten

Bei Wohngebäuden, die nach dem 2. Weltkrieg mit Stahlbetondecken erstellt wurden, kragt die Decke häufig von innen nach außen als Balkon oder Loggia aus. Hier liegt das Musterbeispiel einer klassischen Wärmebrücke vor. Ohne Außenwanddämmung sind hier mit ca. 9 °C an der kältesten Stelle bereits die Bedingungen für Tauwasserbildung und daraus häufig resultierendes Schimmelwachstum erfüllt (Abbildung 19, links).

Entgegen einer verbreiteten Ansicht wird dieses Problem durch das Anbringen von Wärmedämmung auf der Außenwand nicht verschärft, sondern im Gegenteil sogar beseitigt, selbst wenn die Balkonplatte an sich gar nicht mit Dämmstoff „eingepackt“ wird.

Abbildung 19 Mitte zeigt die Situation nach einer Sanierung mit 60 mm Wärmedämmung. Die niedrigste innere Oberflächentemperatur liegt nun über 13 °C, so dass bei normaler Nutzung und ausreichender Lüftung keine Feuchteschäden mehr auftreten sollten. Nach Aufbringen einer Wärmedämmung in Passivhausqualität steigen die inneren Oberflächentemperaturen sogar auf gut 15 °C, so dass ein ausreichender Sicherheitsabstand zum Schadensfall gegeben ist (Abbildung 19, rechts).

**Die Gefahr von Schimmelbildung an bestehenden Wärmebrücken wird durch die Anbringung einer außenliegenden Dämmung verringert.**

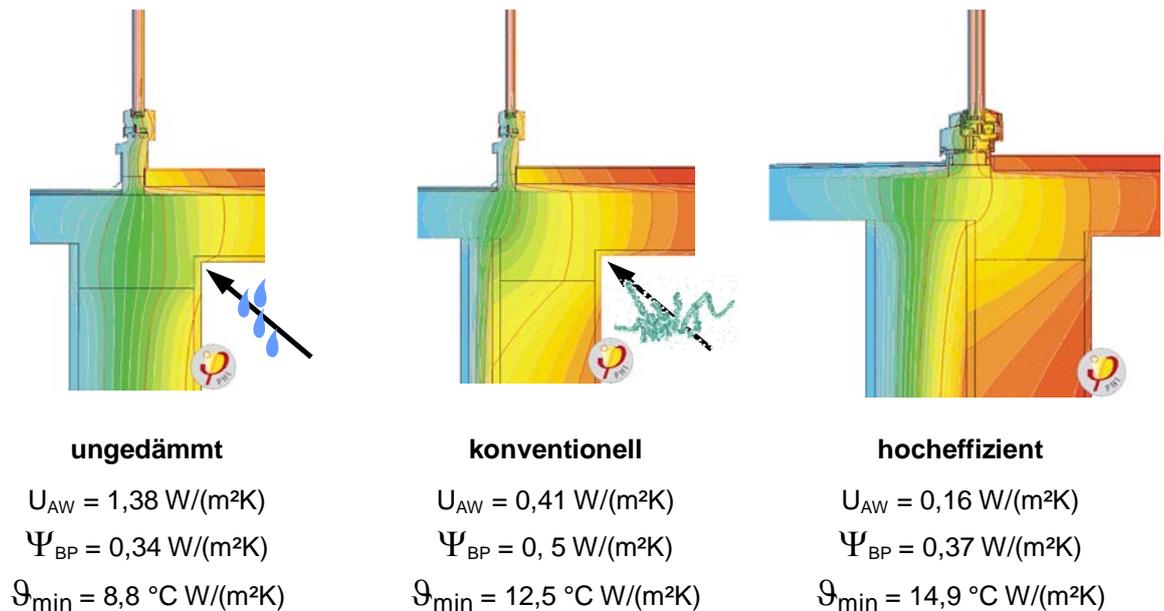


**Abbildung 19 Wärmebrückenverlust und niedrigste Innenoberflächentemperatur für eine auskragende Balkonplatte in einer Hochlochziegelwand. (Quelle: PHI, [65])**

Allerdings sind auch im dritten Fall die Wärmeverluste durch die Balkonplatte selbst fast unverändert hoch ( $\Psi = 0,50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Durch Dämmung der Untersicht der Balkonplatte lassen sich diese nur geringfügig auf  $\Psi = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  senken. Erst durch das, allerdings sehr aufwändige und gestalterisch sowie funktional problematische „Einpacken“ der ganzen Balkonplatte mit 60 mm Wärmedämmung sinkt der Wärmeverlust auf den Wert von  $\Psi = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Es stellt sich die Frage ob dieser immer noch recht hohe Wert den hohen Aufwand die ganze Balkonplatte rundherum zu dämmen rechtfertigt. Zumal der Tauwasserschutz schon durch die Dämmung der Außenwandfläche allein sichergestellt ist.

Eine nochmals kritischere Situation ergibt sich bei der beschriebenen auskragenden Balkonplatte im Bereich der Balkontürschwelle. Der Fensterrahmen hat einen nochmals schlechteren U-Wert und eine sehr viel geringere Stärke als die Bestandswand. Dies verringert die niedrigsten inneren Oberflächentemperaturen noch weiter (Abbildung 20, links). Auch bei einer Sanierung mit 60 mm Wärmedämmung der Außenwand kommt man nur in einen Bereich, der bezüglich der Tauwassergefahr zumindest noch als grenzwertig anzusehen ist (Abbildung 20, Mitte). Erst durch

Außenwanddämmung in Passivhausqualität, verbunden mit einem Austausch des Fensters gegen einen gedämmten Passivhaus-Fensterrahmen und der oberseitigen Dämmung der Bodenplatte mit einem dünnen Dämmkeil kann auch an diesem kritischen Punkt sichere Tauwasserfreiheit erreicht werden (Abbildung 20, rechts). Als Unterlage für das Fenster wird in diesem Fall eine Konsole aus wärmedämmendem und druckbelastbarem PU-Recyclat verwendet. Diese kann je nach Anforderung auch höher ausfallen, um einen verbesserten Schutz gegen Spritzwasser und Schnee zu erreichen.



**Abbildung 20** Auskragende Balkonplatte mit Fenstertür (Quelle: PHI, [65])

#### 4.1.3.1.1 Vorgestellte Balkonkonstruktionen

Wie in Abschnitt 4.1.3.1 beschrieben, kann bei einer Gebäudesanierung durch Aufbringen von Außenwanddämmung zwar die Tauwasserproblematik bei einer auskragenden Stahlbeton-Balkonplatte beseitigt werden, die durch die Wärmebrücke entstehenden Heizwärmeverluste können jedoch nur schwer reduziert werden. Eine sinnvolle Alternative kann daher die Möglichkeit darstellen die Balkonplatte abzutrennen und durch einen auf einer eigenen Stützkonstruktion frei vor dem Gebäude stehenden neuen Balkon zu ersetzen. Eine Rückverankerung in der Gebäudewand ist dann, wenn überhaupt, nur noch zur Aussteifung erforderlich und kann entsprechend mit Anker erfolgen, die nur einen geringen Querschnitt und daher auch nur eine geringe Wärmebrückenwirkung besitzen. Diese Lösung ist auch sinnvoll, wenn ein Altbau bei einer Sanierung durch zuvor noch nicht vorhandene Balkone aufgewertet werden soll.

**Bei vorgestellten Balkonen gilt: Je besser die Balkonkonstruktion in sich ausgesteift ist, desto schlanker kann die Rückverankerung am Gebäude ausfallen.**

Hinweis: Kann die vorgestellte Balkonkonstruktion keine Horizontalkräfte aufnehmen, müssen die Anker zur Befestigung am Gebäude neben Druck und Zugbelastung auch ein Moment aufnehmen. Dies führt zu einem relativ großen Querschnitt, der die Dämmung durchdringt und damit zu entsprechenden Wärmebrückenverlusten (z.B. pro Anker von  $\chi = 0,0885 \text{ W}/\text{K}$  [135]) führt. Deutlich geringere Wärmebrückenverluste können erzielt werden, wenn die Balkonkonstruktion die parallel zur Fassade auftretenden Horizontallasten

durch Stahlseil-Diagonalverspannungen oder durch eine Rahmenkonstruktion mit biegesteifen Ecken selbst aufnehmen kann. Die Anker können sehr viel schlanker bemessen werden, wodurch die Wärmebrückenverluste nochmals um ca. 80 % verringert werden können (vgl. [81]). Grundsätzlich sollte für die Anker immer Edelstahl und keinesfalls verzinkter Normalstahl oder Aluminium verwendet werden, da diese Metalle eine ca. 3 - 10 mal höhere Wärmeleitfähigkeit besitzen.

Vorgestellte Balkone sind im Neubau meist teurer als auskragende Konstruktionen. Grund dafür sind neben der Stützkonstruktion vor allem die nötigen Fundamentierungsarbeiten. Eine auch im Altbau vorhandene Möglichkeit diese Kosten zu senken kann darin bestehen, die Lasten aus den beiden wandseitigen Stützen nicht über eigene Fundamente sondern über die bestehende Kellerwand in den Baugrund abzuleiten. Zum Beispiel können die wandseitigen Stützen auf einem horizontalen Stahlträger stehen, der an einem Ende auf einem Betonkissen in der Kellerwand und am anderen Ende auf einem Fundament für die vordere Stütze aufgelagert ist.

#### 4.1.3.1.2 *Verglaste Balkone*<sup>1</sup>

Die im vorherigen Abschnitt 4.1.3.1.1 beschriebene Lösung vorhandene Balkons abzuschneiden und durch vorgestellte Konstruktionen zu ersetzen ist zwar aus energetischer Sicht wünschenswert aber kostenintensiv und je nach Lage des Balkons (z.B. Gehweg unterhalb des Balkons) nicht immer realisierbar.

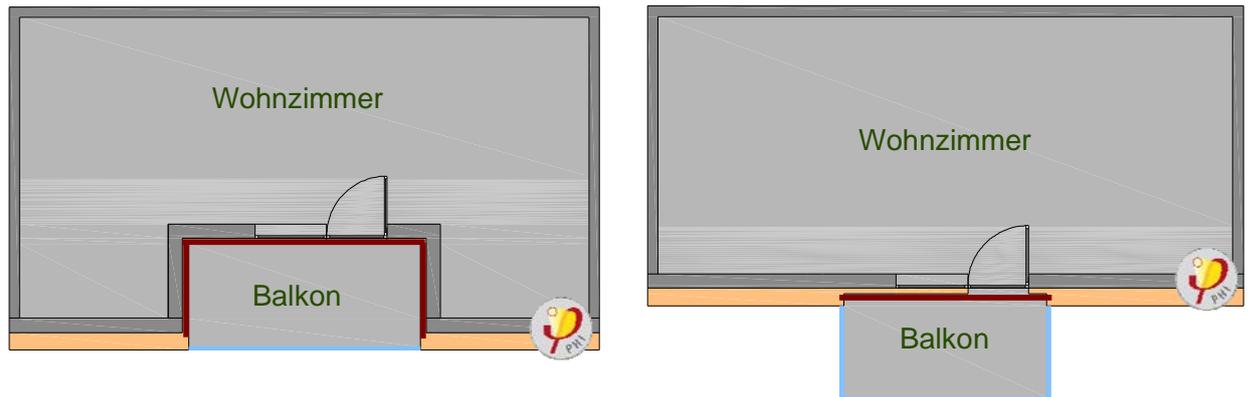
Alternativ kann eine Verglasung des Balkons ein weiteres Optimierungspotential darstellen. Der dadurch geschaffene „**Wintergarten**“ wird gerne als zusätzlicher Wohnraum genutzt. Die Verglasung von Balkons trägt allerdings nicht immer zu einer Reduzierung des Wärmebedarfes bei. Welche Lösung im jeweiligen Fall angemessen ist, sollte daher sorgfältig überprüft werden. Sinnvoll einsetzbar sind die Verglasungen dann, wenn es sich um unbeheizte Räume handelt, die während der Heizperiode eine Pufferzone zur kalten Außenluft bilden. Die Pufferwirkung hängt zum einen von der Ausrichtung und Verschattung der verglasten Fläche ab und wird zum anderen maßgeblich vom Verhalten der Bewohner beeinflusst. Mit jedem Öffnungsvorgang zwischen Wohnraum und Balkon wird der Wintergarten indirekt durch das Einströmen warmer Raumluft mit beheizt. Statt der gewünschten Energieeinsparung führt dies schnell zu einem zusätzlichen Heizwärmebedarf und bewirkt somit das Gegenteil! Eine Pufferwirkung kann sich also nur dann ausbilden wenn die Tür zum Wintergarten während der Heizperiode konsequent geschlossen gehalten wird.

Einen weiteren bedeutenden Einfluss auf den Erfolg einer Verglasung hat die Balkongeometrie. Ein Beurteilungskriterium stellt hier das Verhältnis von Verglasungsfläche zu Wärmebrückenlänge dar. [161]

**Wird der Balkon als unbeheizte „Pufferzone“ verglast, so sollte die Tür zwischen beheiztem Wohnraum und Balkon in der Heizperiode nicht dauerhaft offenstehen.**

---

<sup>1</sup> vgl. [161]



**Abbildung 21 Balkongeometrien.**

**Links: Loggiabalkon mit kleiner Verglasungsfläche (blau) aber großer Wärmebrückenlänge (rot);**

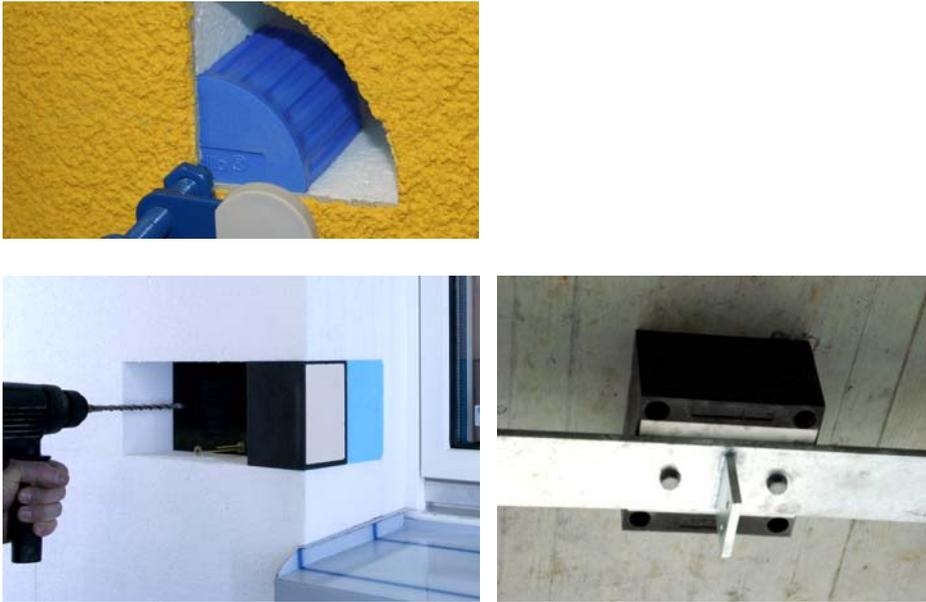
**Rechts: auskragender Balkon mit großer Verglasungsfläche aber geringer Wärmebrückenlänge. (Quelle: PHI, [161])**

#### 4.1.3.2 Wärmebrückenarme Befestigung kleiner Lasten an der Fassade

Bei vorhandenen Vordächern und Geländern sollte ähnlich wie bei den Balkonen geprüft werden, ob nicht ein Abriss und eine nachfolgende thermisch optimierte Neumontage aus Gründen der Heizenergieeinsparung aber auch der Gestaltung gegenüber einer Sanierung des Bauteils zu bevorzugen ist. Hierfür gibt es Konsolen aus Glasfaserverbundmaterialien und druckfesten Dämmstoffen, die keine nennenswerten Wärmebrücken bei der Durchdringung eines Wärmedämm-Verbundsystems darstellen. In vielen Fällen ist auch eine Konstruktion mit Leimholzklötzen möglich.

Vorgehängte Fassaden sind hier oft im Vorteil, da eine einfache Befestigung an der Fassadenunterkonstruktion ohne ein vollständiges Durchdringen der Dämmebene unter Umständen möglich ist.

Sehr kleine Lasten, wie zum Beispiel Außenleuchten, Bewegungsmelder usw. können mit speziellen Dämmstoffdübeln wärmebrückenfrei direkt im Dämmstoff eines WDVS befestigt werden.



**Abbildung 22** Auswahl von Produkten für die wärmebrückenarme Befestigung von Lasten im Wärmedämm-Verbundsystem: eingeklebter Dämmstoffzylinder für die Befestigung kleiner Lasten (oben), Konsole für die Befestigung eines Geländers (Absturzsicherung) vor einer Fenstertür (links unten), Konsole für die Abtragung eines schweren Vordachs (rechts unten) (Quelle: Fa. Dosteba)

#### 4.1.4 Luftdichtheit

Grundsätzlich gilt für die Außenwand das gleiche wie für das restliche Gebäude: Es muss eine (einzige!) luftdichte Ebene geben, deren Lage schon frühzeitig in der Planung geklärt werden sollte. Bei nachträglich außengedämmten Altbauwänden hat man die Möglichkeit die luftdichte Ebene entweder auf der Innenseite oder auf der Außenseite der massiven Bestandswand anzuordnen.

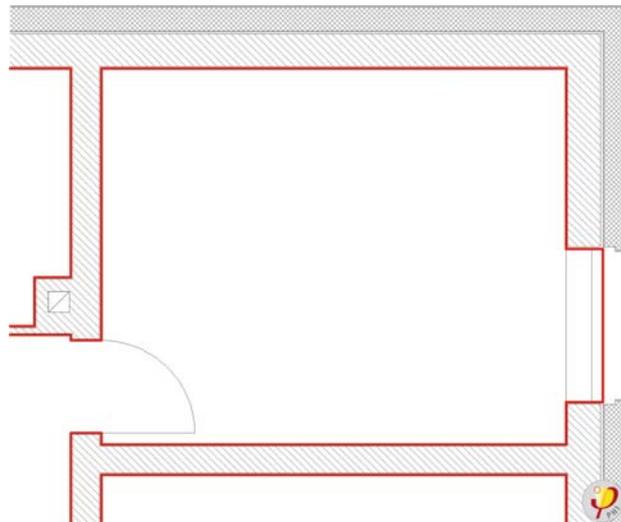
##### 4.1.4.1 Innenputz als luftdichte Ebene

Wird die luftdichte Ebene auf der Innenseite der Außenwände realisiert, führt das insbesondere bei Gebäuden mit massiven Stahlbeton-Decken zu guten Ergebnissen. Dafür muss der vorhandene Innenputz entsprechend ertüchtigt werden. Da Strömungspfade durch das Mauerwerk der Innenwände nicht ausgeschlossen werden können, gelten die folgenden Maßnahmen für Außen- und Innenwände gleichermaßen (Abbildung 23):

- Putzschäden (Risse) sind auszubessern.
- Bei Erneuerung der Elektroinstallation sind Steckdosen luftdicht auszuführen (siehe Abbildung 25)
- Der Wandputz ist von oben und unten lückenlos an die Stahlbeton-Geschossdecken anzuschließen (siehe Abbildung 24). Dies geht naturgemäß nur zu einem Zeitpunkt, wenn evtl. vorhandener alter Estrich entfernt wurde, der neue Bodenaufbau aber noch nicht eingebracht wurde.

- Bei einer Erneuerung der Türzargen sollte die Rohbauleibung mit einem Glattnstrich abgedichtet und luftdicht an den Wandputz angeschlossen werden.
- Bei der Erneuerung von Vorwandinstallationen wird vor Montage der neuen Installationen die dahinterliegende Wand luftdicht gespachtelt bzw. der Putz vollflächig ergänzt.
- Lüftungskanäle, die die Außenwand durchdringen, müssen sorgfältig an den Innenputz angedichtet werden. Hierfür sind teilweise schon geeignete gedämmte Kanalstücke mit Anschlussmanschetten erhältlich.
- Die Fenster werden anlässlich ihres Austausches, bei dem in der Regel die Oberfläche der inneren Fensterleibung ohnehin überarbeitet werden muss, luftdicht an den Innenputz angeschlossen (siehe Abschnitt 4.7.2.4). Dasselbe gilt für die Haustüren.

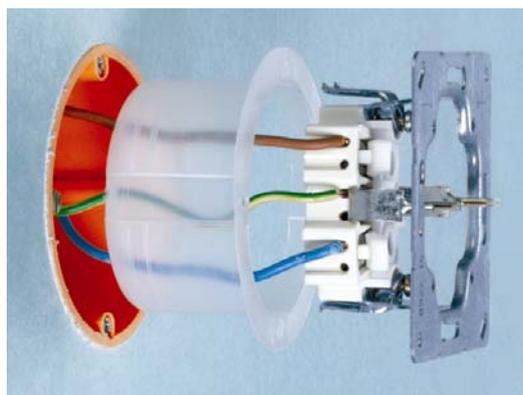
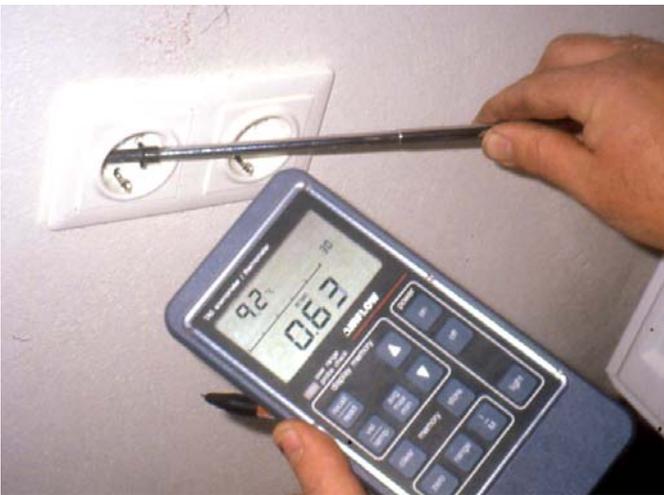
Falls es sich nicht um eine Totalsanierung mit Leerzug der Wohnungen handelt, werden die Maßnahmen sinnvoller Weise immer bei einem Mieterwechsel und einer dabei ohnehin durchgeführten Wohnungsrenovierung ausgeführt. So wird Wohnung für Wohnung am Ende eine ausgezeichnete Luftdichtheit für das gesamte Gebäude erreicht.



**Abbildung 23** Innenputz der Bestandswand als luftdichte Ebene: Neben der Außenwand sollten nach Möglichkeit auch die Innenwände vollflächig rissfrei und lückenlos verputzt sein, weil sich sonst Strömungspfade durch Mauerwerksfugen oder Elektroschlitze ergeben können (Quelle: PHI, [189])



**Abbildung 24** Im Altbaubestand ist der Innenputz häufig schadhaft und wurde nicht vollständig an den Rohfußboden angeschlossen. Wird der Fußbodenaufbau wie auf diesem Foto ohnehin erneuert, sollte die Gelegenheit zur entsprechenden Ergänzung des Innenputzes genutzt werden. (Quelle: faktor10 Darmstadt)



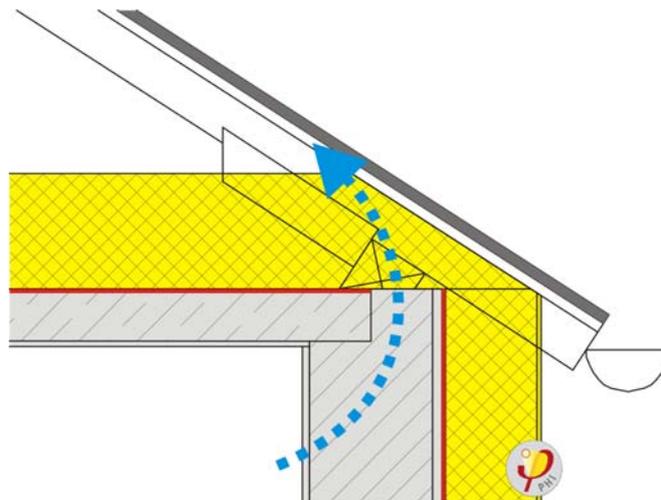
**Abbildung 25**

**Oben:** Leckage an konventionell ausgeführter Steckdose (Quelle: Schulze Darup)  
**Unten:** Zur Vermeidung von Undichtigkeiten im Bereich der Elektroboxen gibt es Unterputzdosen mit elastischen Abdichtungen an den Kabeldurchführungen (links). Bestehende Dosen können mit speziellen Einsätzen nachträglich abgedichtet werden (rechts). (Quelle: Fa. Kaiser)

Bei älteren Gebäuden sind die Geschosdecken häufig noch als Holzbalkenkonstruktion mit Dielenbelag ausgeführt. Die Verwendung des Innenputzes als luftdichte Ebene kann dann problematisch sein, da dieser in der Regel auf Höhe der Geschosdecke nicht durchgehend ausgeführt ist. Es muss dann die Decke entlang der Wand beidseitig geöffnet werden (Dielen, Deckenputz und Putzträger, Blindboden), um den Wandputz zu ergänzen. Allerdings verbleibt eine Vielzahl von Durchdringungen durch die Deckenbalken. Ein Andichten des Wandputzes an jeden Deckenbalken ist aufwändig und das Erreichen einer guten Luftdichtheit zumindest fraglich, insbesondere wenn die Balken selbst Risse aufweisen.

#### 4.1.4.2 *Luftdichte Ebene auf der Außenseite der massiven Bestandswand*

Eine Alternative kann die Anordnung der luftdichten Ebene auf der Außenseite der massiven Bestandswand sein. Die Durchdringungen durch Deckenbalken und Innenwände entfallen dann, so dass sich die Ausführung vereinfacht. Der vorhandene Außenputz ist allerdings nicht per se luftdicht, da er über Jahre Temperaturschwankungen und anderen Witterungseinflüssen ausgesetzt war und daher in der Regel Haarrisse und andere Schäden aufweist (vgl. [144]). Es muss daher eine zusätzliche luftdichte Ebene auf dem Altputz aufgebracht werden. Bei einem Wärmedämm-Verbundsystem kann dies evtl. der ohnehin erforderliche Kleber sein (vgl. Abschnitt 4.1.2.1.3). Ansonsten muss eine zusätzliche Spachtelung auf dem Altputz aufgebracht werden. Fenster und Außentüren werden in beiden Fällen durch geeignete Dichtungsbänder an die außenliegende luftdichte Ebene angeschlossen (siehe Abbildung 106 auf S. 144). Ein luftdichter Anschluss der Fenster an den Innenputz ist nicht notwendig, da dieser in diesem Fall nicht die luftdichte Ebene bildet. Schwierigkeiten können sich beim Anschluss an die luftdichte Ebene von Kellerdecke und oberster Geschosdecke ergeben, da hier unter Umständen die Keller-Außenwände bzw. die Auflager der Dachkonstruktion (Abbildung 26) einer durchgehenden luftdichten Ebene im Wege stehen (siehe auch 4.3.4).



**Abbildung 26** Bei Ausführung der luftdichten Ebene (rot) auf der Außenseite der Bestands-Außenwand ist im Bereich der Lagerhölzer der Dachkonstruktion ein durchgehender Anschluss an die oberste Geschosdecke erschwert. (Quelle: PHI)

## 4.2 Wanddämmung von innen



**Abbildung 27** *Altbau nach der energetischen Modernisierung. Wegen der erhaltenswerten Sichtmauerwerksfassade entschied sich der Bauherr für eine Innendämmung (Quelle: PHI, [205])*

### 4.2.1 Grundlagen

Manchmal werden der Innendämmung Bauschäden angelastet, welche jedoch häufig durch mangelnden Schlagregenschutz oder andere Ursachen unabhängig von der Innendämmung entstanden sind. Andererseits kann eine mangelhafte Planung und Ausführung von Innendämmung tatsächlich einen Bauschaden verursachen. Zur Beurteilung vorhandener Schäden und zur bauschadensfreien Planung und Ausführung von Innendämmmaßnahmen ist daher ein grundlegendes Verständnis der damit zusammenhängenden bauphysikalischen Prinzipien notwendig. Eine grundlegende Ausarbeitung wurde im Rahmen des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Nr. 32 durchgeführt [230].

#### 4.2.1.1 *Innen oder außen dämmen?*

Wenn immer möglich ist bei Altbausanierungen eine Außendämmung der Wände empfehlenswert, weil diese eine ganze Reihe Vorteile aufweist:

- Gutmütigkeit bezüglich feuchtebedingter Bauschäden, hohe Fehlertoleranz
- Verbleibende Wärmebrücken werden bezüglich Tauwasser und Schimmelbildung entschärft
- Die nach außen gedämmte und zum Innenraum zugängliche thermische Masse der Außenwand verbessert die Temperaturstabilität im Gebäude
- Das Mauerwerk der Außenwand wird insgesamt trockener und verkraftet dann auch besser temporären, außerplanmäßigen Feuchteintrag

- Es lassen sich sehr hohe Heizenergieeinsparungen erzielen

Dagegen hat die Innendämmung prinzipbedingte Nachteile:

- Die Konstruktion ist, wenn nicht alle nötigen Voraussetzungen erfüllt sind oder die Planung oder Ausführung Fehler aufweist, anfällig für Feuchteschäden.
- Es verbleiben durch die einmündenden Innenwände und -decken viele Wärmebrücken, die nicht eliminiert werden können. Diese begrenzen nicht nur die erzielbare Heizenergieeinsparung, sondern können bei falscher Ausführung auch zu Bauschäden durch Kondensat an den kalten Innenoberflächen führen.
- Durch die raumseitige Lage der Dämmschicht verringert sich die Nettogeschossfläche.

Eine Innendämmung kann also nur dort empfohlen werden, wo eine Außendämmung nicht möglich ist.

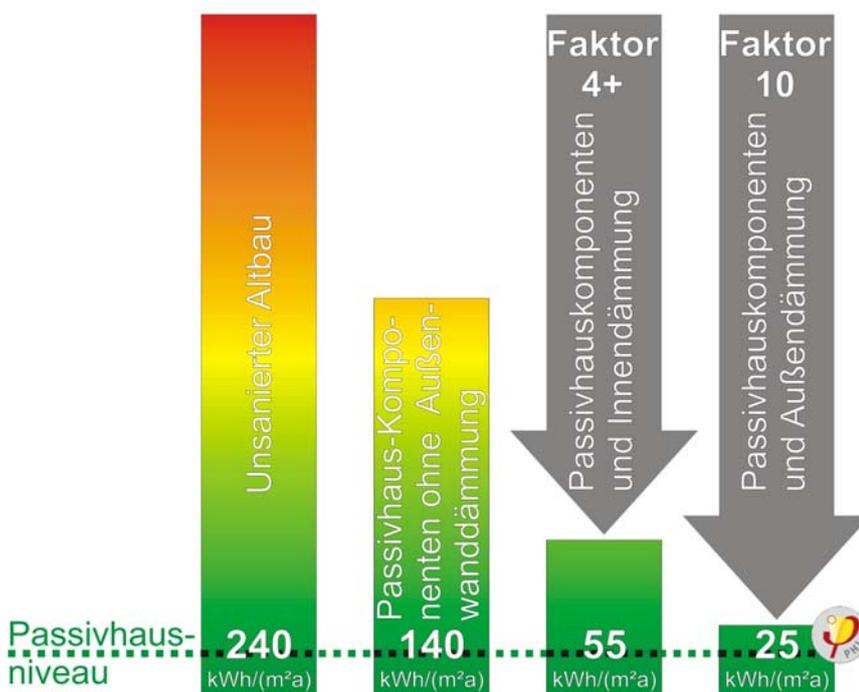
**Innendämmung nur dann ausführen, wenn keine Außendämmung möglich ist.**



**Abbildung 28** Auch bei solchen Stadthäusern mit einer reich strukturierten Straßenfassade, die nur innen gedämmt werden kann, lässt sich häufig auf der schlichteren, straßenabgewandten Fassade eine Außendämmung verwirklichen. (Quelle: Schulze Darup)

Sind jedoch die nötigen Voraussetzungen gegeben und liegt eine korrekte Planung und Ausführung vor, so bewirkt eine funktionierende Innendämmung trotz aller Nachteile eine immer noch deutliche Verbesserung bezüglich Bautenschutz, Behaglichkeit und Wärmeschutz. Abbildung 29 zeigt typische Einsparpotentiale bei energetischen Altbauanierungen. Bei einem Altbau mit 240 kWh/(m<sup>2</sup>a) spezifischem Heizwärmebedarf kann durch eine Sanierung mit Passivhauskomponenten aber ganz ohne Außenwanddämmung (d.h. nur mit

Passivhausfenstern, kontrollierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung, gedämmter Bodenplatte/Kellerdecke und gedämmtem Dach/oberster Geschossdecke) der Heizwärmebedarf nur knapp halbiert werden ( $140 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ). Dies liegt daran, dass in Deutschland bei den meisten Altbauten die Wärmeverluste über die Außenwände sehr dominant sind, da die Außenwände sowohl einen hohen Anteil an den Außenflächen aufweisen als auch einen sehr schlechten U-Wert haben. Wird nun zusätzlich zu den genannten Maßnahmen noch eine Innendämmung eingesetzt, so sinkt der Heizwärmebedarf schon auf nur noch weniger als ein Viertel des Ausgangswerts, nämlich ca.  $55 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Weitergehende Heizeneinsparungen von 90 % und mehr gegenüber dem Bestand lassen sich nur mit einer Außendämmung der Außenwand erzielen (ca.  $25 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  verbleibender Bedarf).

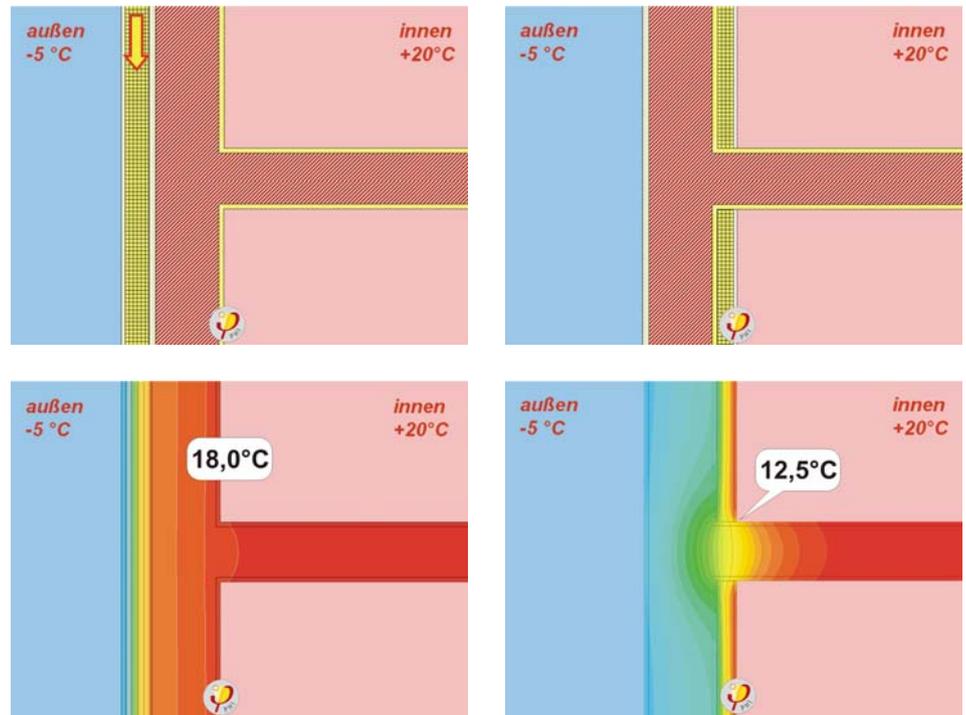


**Abbildung 29** Typische Einsparpotentiale bei energetischer Altbausanierung (spezifischer Jahresheizwärmebedarf) (vgl. [82]). (Quelle: PHI)

#### 4.2.1.2 Verhalten von Wärmebrücken bei Innendämmung<sup>1</sup>

Bei einer Innendämmung verbleiben im Bereich der an die Außenwand anschließenden Innenwände und -decken unvermeidliche Wärmebrücken. Diese erhöhen die Wärmeverluste und können gleichzeitig zu verminderten Innenoberflächentemperaturen und daraus folgenden Tauwasserschäden führen. Abbildung 30 zeigt den Anschluss einer Innenwand an eine Außenwand, links mit Außendämmung rechts mit Innendämmung. Es ist gut erkennbar, dass bei Außendämmung der gesamte Querschnitt der alten Mauerwerkswand gleichmäßig warm ist ( $17 - 19 \text{ °C}$ ). Die Innenwand verursacht keine Wärmebrücke. Die Innenoberflächen sind ausreichend warm um eine hohe thermische Behaglichkeit sowie sichere Tauwasservermeidung zu gewährleisten. Bei Innendämmung wird die Temperatur der Mauerwerkswand

dagegen stark abgesenkt. Da die Außenwand von innen kaum mehr erwärmt wird, können die Oberflächentemperaturen am Innenwandanschluss sogar beträchtlich niedriger sein als bei einer ungedämmten Wand. Im Beispiel ist die Temperatur an der Kante mit  $12,5\text{ °C}$  bereits grenzwertig. Wenn zusätzlich Möbel vor die Kante gestellt werden, die die Wärmeabgabe an die Innenwand behindern, sinken die Oberflächentemperaturen noch weiter ab, so dass bei dieser Art der Ausführung ein Tauwasserschaden nicht auszuschließen ist.



**Abbildung 30**

**Links: Außendämmung, das Temperaturniveau des gesamten Wandquerschnitts wird angehoben. Innenoberflächentemperaturen von ca.  $18\text{ °C}$**

**Rechts: Innendämmung, die Außenwand wird insgesamt kälter. An einbindenden Innenwänden treten niedrige Oberflächentemperaturen auf, die, vor allem wenn Möbel vor der Kante stehen, zu Tauwasserschäden führen können. Diese Art der Ausführung kann daher nicht empfohlen werden (wärmebrückenreduzierte Ausführung: siehe Abschnitt 4.2.3 auf Seite 77).**

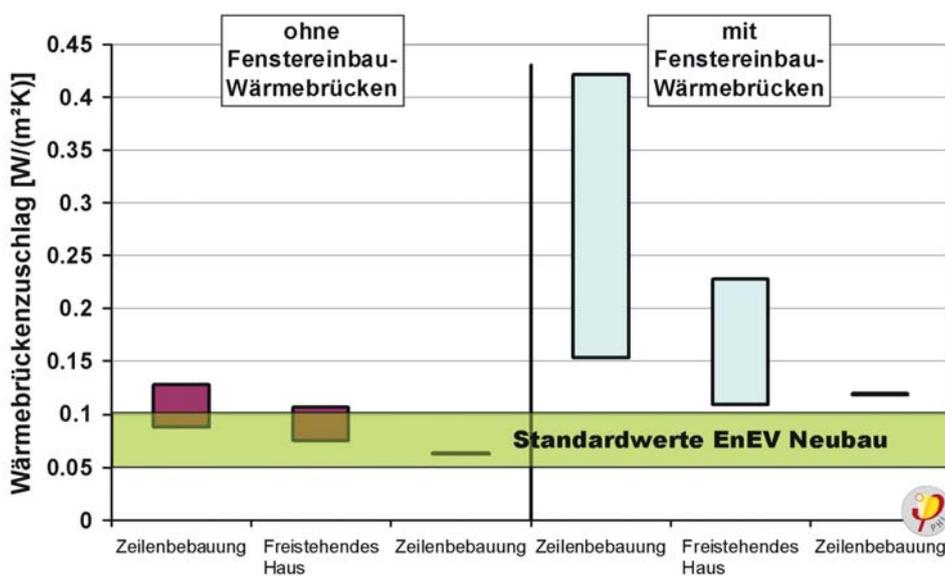
**(Quelle: Protokollband Nr. 32 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III, PHI, [206])**

Um den Einfluss der Wärmebrücken auf die Energiebilanz eines innengedämmten Gebäudes zu ermitteln, müssen die Wärmebrückenverlustkoeffizienten und die Längen sämtlicher Bauteilanschlüsse ermittelt werden. Um zumindest in der Vorplanung diesen beträchtlichen Aufwand vermeiden zu können, ist ein pauschaler Wärmebrückenzuschlag für Innendämmung hilfreich.

Für drei Mehrfamilienhäuser (1 freistehend, 2 in Zeilenbebauung) wurden solche Wärmebrückenzuschläge beispielhaft errechnet (vgl. [83]). Die Werte beziehen sich jeweils auf die Fläche der innengedämmten Außenwand - nicht der gesamten thermischen Hülle - und enthalten sämtliche Wärmebrücken, die

<sup>1</sup> vgl. [83]

an diese Wand angrenzen (also beispielsweise auch die Anschlüsse Außenwand an Außenwand, die insbesondere bei innengedämmten Gebäuden negative  $\Psi$ -Werte um  $-0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  annehmen). Abbildung 31 zeigt das Ergebnis der Berechnung jeweils als Spanne zwischen einer wärmebrückenreduzierten Ausführung und einer Ausführung ohne Entschärfung von Wärmebrücken (beim dritten Objekt wurde nur eine Variante gerechnet). Links sind die Werte ohne die Fenstereinbauwärmebrücken dargestellt. Es wird deutlich, dass eine wärmebrückenreduzierte Innendämmung, wie sie in Abschnitt 4.2.3 auf Seite 77 gezeigt wird und zur Tauwasservermeidung nötig ist, die Wärmeverluste nur in geringem Maße reduzieren kann. Anders verhält es sich beim Fenstereinbau (siehe ebenfalls Abschnitt 4.2.3). Hier kann durch eine wärmebrückenreduzierte Ausführung der Wärmeverlust der Außenwand erheblich verringert werden.



**Abbildung 31** Wärmebrückenzuschläge auf den U-Wert für drei Beispielobjekte, bezogen auf die Fläche der innengedämmten Wand (Quelle: PHI, [83])

Als typischen Wert für einen Wärmebrückenzuschlag für eine innengedämmte Außenwand ohne Berücksichtigung des Fenstereinbaus kann man  $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ansetzen. Mit Fenstereinbau wären es ca.  $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Da beim Fenstereinbau die Streubreite allerdings sehr hoch ist, sollten diese Wärmebrücken am besten gesondert berücksichtigt werden.

Es zeigt sich, dass die Innendämmung durch die verbleibenden Wärmebrücken keinesfalls wertlos wird. Bei einem typischen U-Wert einer innengedämmten Wand von  $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  macht der Wärmebrückenzuschlag ungefähr ein Drittel aus.

#### 4.2.1.3 Innendämmung und relative Feuchte in der Wand

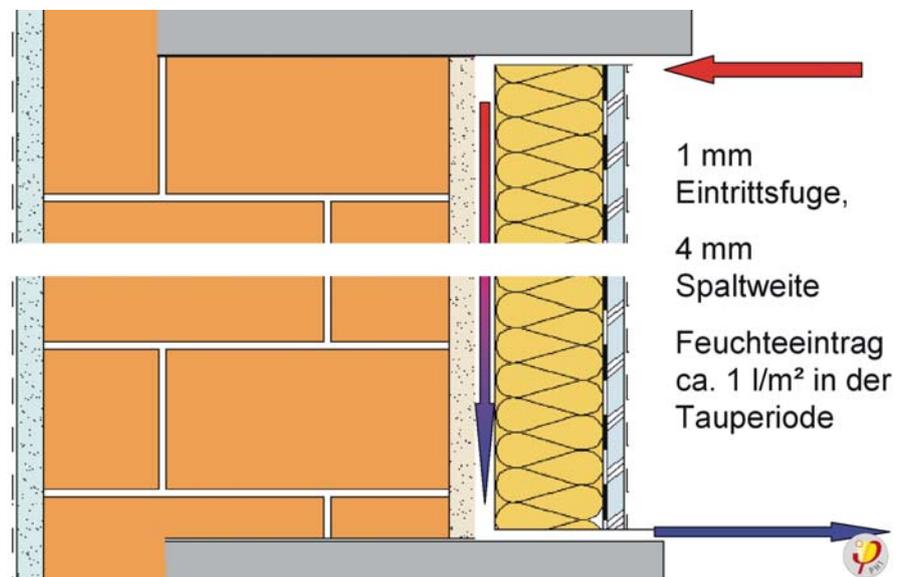
Wie in Abbildung 30 sichtbar, wird die Temperatur der massiven Außenwand durch eine Innendämmung deutlich abgesenkt. Im Altbau vorhandene Wandbaustoffe, also Holz und mineralische Baustoffe weisen großteils verbundene Porenräume auf, die wiederum in Verbindung mit der Außenluft stehen und sich nach einer ausreichenden Zeit gleichbleibender Bedingungen

auf einen annähernd gleichen Wasserdampfgehalt einstellen. Durch die niedrigere Wandtemperatur steigt so bei Innendämmung bei ansonsten gleichen Randbedingungen die relative Feuchte der Luft in den Poren. Je höher die relative Luftfeuchtigkeit in den Poren, desto mehr Wasser wird durch Sorption und Kapillarbindung im Material gespeichert. Dies ist ein Grund weshalb bei der Innendämmung in besonderem Maße jeder übermäßige Feuchteintrag in die Wand vermieden werden muss.

#### 4.2.1.4 Vermeidung einer Hinterspülung der Innendämmung

**Eine „Hinterlüftung“ der Innendämmung mit Raumluft kann zu Tauwasserbildung in der Größenordnung von 1 l pro Quadratmeter führen.**

Eine der wichtigsten Maßnahmen zur Verhinderung von Bauschäden bei Innendämmung ist die Vermeidung einer Hinterspülung der Dämmung mit warmer Raumluft. Innenraumluft kann durch ihre vergleichsweise hohe Temperatur relativ viel Feuchtigkeit aufnehmen - bei + 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte sind es beispielsweise 8,7 g/m<sup>3</sup>. Die Oberflächentemperaturen in einem eventuell bestehenden Hohlraum zwischen Innendämmung und massiver Außenwand sind aber durch die (erwünschte) Dämmwirkung sehr viel niedriger, nämlich ca. 0 °C bei -5 °C Außentemperatur. Wenn sich nun die Raumluft beim Durchströmen des Hohlraums auf diese Temperatur abkühlt, sinkt ihre Sättigungsfeuchte auf 4,8 g/m<sup>3</sup>, d.h. pro m<sup>3</sup> Luft können bis zu 3,9 g Wasser als Kondensat auf den Bauteiloberflächen ausfallen. Innerhalb einer Heizperiode kann sich dies bei der in Abbildung 32 beispielhaft gezeigten Situation auf ca. 1 l/m<sup>2</sup> Wandfläche summieren (vgl. [28]). Dies ist weit mehr als durch Wasserdampfdiffusion in die Konstruktion gelangen kann und vor allem auch mehr, als die Poren in mineralischen Baustoffen ohne unzulässige Erhöhung des  $a_w$ -Wertes aufnehmen und ableiten können.



**Abbildung 32 Konvektiver Feuchteintrag bei „hinterlüfteter“ Innendämmung (Quelle: PHI, [20])**

## 4.2.2 Konstruktionen und Materialien

### 4.2.2.1 Geeignete Dämmstoffe für Innendämmung

Grundsätzlich sind die meisten Dämmstoffe auch für Innendämmung geeignet. Allerdings muss bei jeder Maßnahme je nach den baulichen Gegebenheiten jeweils der passende Dämmstoff und die für diesen Dämmstoff geeignete Konstruktion ausgewählt werden. Grundsätzlich unterscheidet man kapillaraktive Dämmstoffe, die für einen nach innen diffusionsoffenen Aufbau geeignet sind und nicht kapillaraktive Dämmstoffe, die auf der Raumseite eine ausreichend wirksame Dampfbremse benötigen.

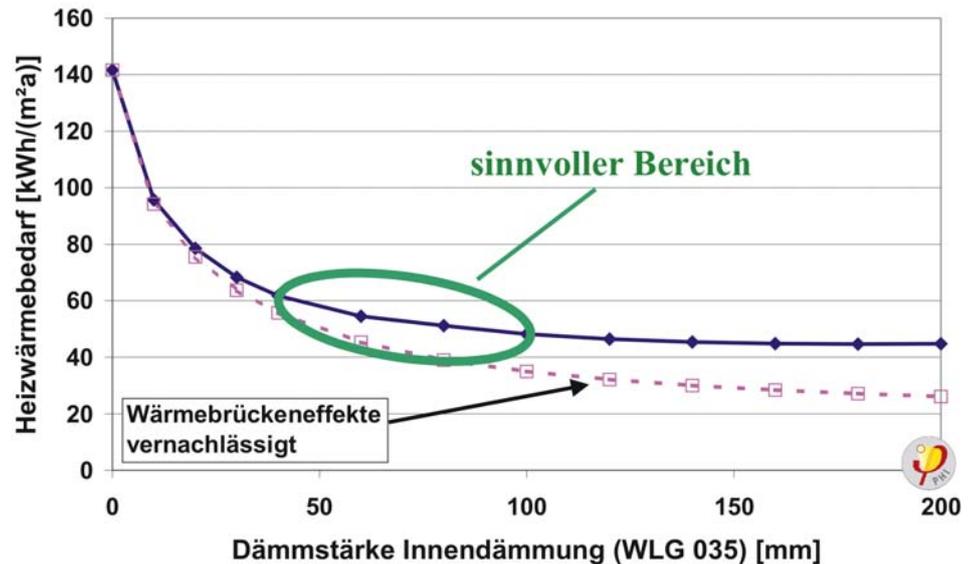
Für einen nach innen diffusionsoffenen Aufbau (siehe Abschnitt 7.5.6.1) werden vor allem Zellulosedämmung sowie Kalziumsilikatplatten verwendet. Damit die kapillaraktiven Dämmstoffe anfallende Feuchtigkeit an den Raum abgeben können, sollten auf der Innenoberfläche keine dampfbremsenden Tapeten oder Anstriche oder gar ein Fliesenbelag angebracht werden. Eine ausreichende Luftdichtheit zur Vermeidung einer konvektiven Hinterströmung der Innendämmung mit Raumluft ist trotzdem unverzichtbar. Beim beschriebenen Mechanismus der kapillaraktiven Dämmstoffe kommt es auf das Zusammenwirken einer Vielzahl von Materialeigenschaften an (Feuchtespeicherfunktion, Oberflächendiffusion, Diffusionswiderstandszahl, Wasserresistenz, Wärmeleitfähigkeit,...). Diese Eigenschaften müssen für genau das verwendete Material **verbrieft** sein. Schon geringe Zusätze (z.B. Öle oder Wachse) können diese Eigenschaften u.U. so grundlegend ändern, dass eine Funktion der kapillaraktiven Innendämmung nicht mehr gewährleistet ist. Insbesondere müssen auch Verunreinigungen an der Baustelle vermieden werden (vgl. [82]).

Alle anderen Dämmstoffe benötigen eine sorgfältig ausgeführte raumseitige Dampfbremse mit einem  $s_d$ -Wert von mindestens 15 m. Zur Vereinfachung der Montage sind sogenannte Verbundplatten mit bereits auf den Dämmstoff aufkaschierten Dampfbremsen und einer Innenschale aus Gipsplatten erhältlich. Naturgemäß kann in diesem Fall die Dampfbremse an den Plattenstößen nicht direkt verbunden werden. Diese Lücke in der Dampfsperre kann zu einer erhöhten Wasseraktivität an der dahinterliegenden kalten Wandoberfläche führen (vgl. [28]). Dies ist insbesondere bei Mineralfaserdämmung der Fall. Bei EPS-Dämmung wirkt der Dämmstoff selbst dampfbremsend und begrenzt den eindringenden Diffusionsmassenstrom. Es ist daher in jedem Falle ratsam, die Fugen vor dem Verspachteln mit elastischem Fugenkitt, z.B. Silikon, auszuspritzen. Zusätzlich sollte der Plattenstoß mit einem diffusionsdichten Klebeband auf den Gipskartonplatten überdeckt werden.

### 4.2.2.2 Sinnvolle Dämmdicken

Die Stärke einer Innendämmung ist grundsätzlich dadurch begrenzt, dass ein übermäßiger Wohnflächenverlust vermieden werden soll. Dämmdicken von 30 cm und mehr, wie sie bei Passivhaus-Außendämmung vorkommen, sind daher kaum zu verwirklichen. Zudem ist die erzielbare Heizenergieeinsparung durch die verbleibenden Wärmebrücken der einbindenden Innenwände und Decken begrenzt. Des Weiteren kann eine große Dämmdicke zu einer sehr

starken Temperaturabsenkung der tragenden Außenwand führen, was bei Wänden mit ohnehin kritischem Feuchtehaushalt das Auftreten von Feuchteschäden begünstigt.



**Abbildung 33** *Abhängigkeit des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs von der Stärke der Innendämmung am Beispiel eines freistehenden Mehrfamilienhauses mit 6 Wohnungen (unter Berücksichtigung des Wohnflächenverlusts). (Quelle: PHI, [83])*

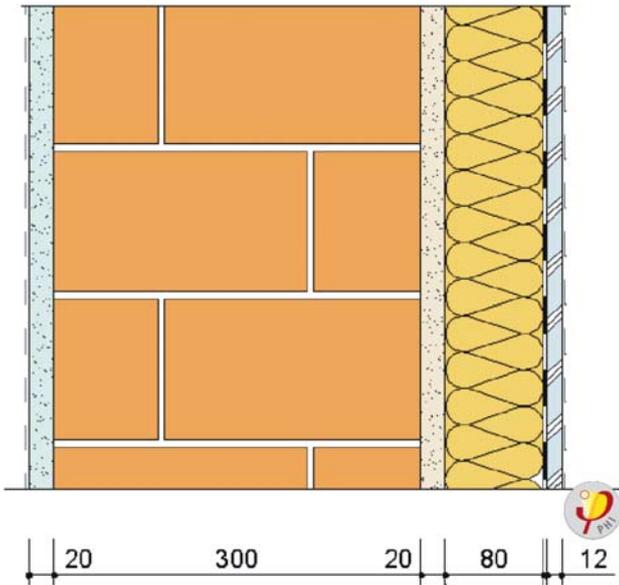
**Dämmdicken zwischen 4 und 10 cm sind für Innendämmung sinnvoll.**

Abbildung 33 zeigt dass die zusätzlich erzielbare Heizenergieeinsparung mit steigender Dämmdicke abnimmt. Dieser auch bei der Außendämmung vorhandene Effekt wird bei der Innendämmung durch die unvermeidlichen Wärmebrücken noch verstärkt (obere Kurve). Wenn man die Verringerung der Wohnfläche mit berücksichtigt, sind oberhalb von 200 mm Dämmdicke keine weiteren Energieeinsparungen erzielbar. Es ergibt sich für Innendämmung eine empfehlenswerte Dämmdicke von 40-100 mm. Weniger Dämmung erscheint angesichts des erforderlichen Grundaufwands nicht sinnvoll. Mehr Dämmung bringt keine bedeutende weitere Reduzierung des Heizwärmebedarfs.

#### 4.2.2.3 *Ausführungsvarianten von Innendämmung und ihre Auswirkung auf den Feuchteschutz*

Um die Auswirkungen verschiedener Ausführungsvarianten von Innendämmung auf den Feuchtehaushalt der Konstruktion beurteilen zu können, wurde in [28] ein prinzipieller Wandaufbau mit einer Software<sup>1</sup> zur dynamischen gekoppelten Simulation von Wärme- und Feuchtigkeits-Transportvorgängen in porösen Baustoffen untersucht. Die Berechnungen wurden für einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt mit einem Mittelwert der relativen Luftfeuchte in den Wintermonaten von ca. 50 %. Die Ergebnisse, die hier auszugsweise dargestellt sind, können wertvolle Hinweise für die Planungspraxis geben. Sie können aber aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren nicht eins zu eins auf ein reales Gebäude übertragen werden.

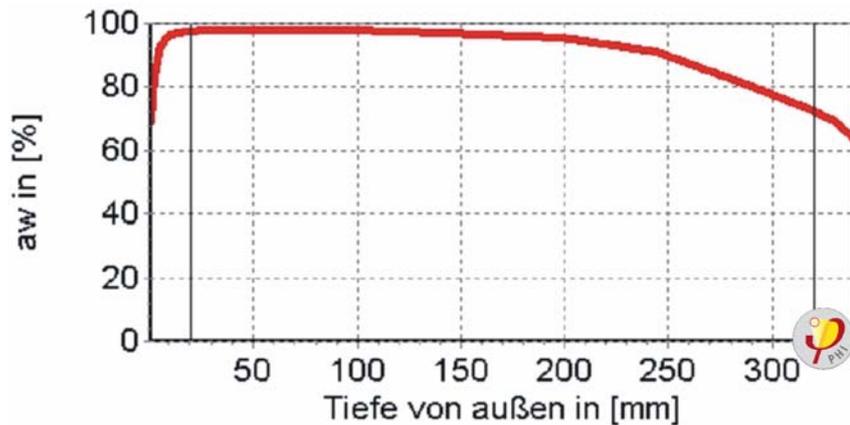
<sup>1</sup> DELPHIN, Institut für Bauklimatik IBK, TU-Dresden



**Abbildung 34** Prinzipieller Wandaufbau der simulierten Ausführungsvarianten: 30 cm verputztes Vollziegelmauerwerk mit Innendämmung (Quelle: PHI, [28])

#### 4.2.2.3.1 Vollziegelmauerwerk ohne Innendämmung

Wie in Abbildung 35 sichtbar kann Vollziegelmauerwerk auch ohne Innendämmung stark durchfeuchten, wenn die Schlagregenbelastung hoch ist und kein ausreichender Schlagregenschutz (wasserabweisender Außenputz) vorhanden ist. Allerdings bleibt der  $a_w$ -Wert (Erläuterung siehe Abschnitt 7.5.4.2) im nahe der Innenoberfläche liegenden Abschnitt der Wand unter 80 %. Unterhalb dieses Werts ist kein Schimmelwachstum zu erwarten.

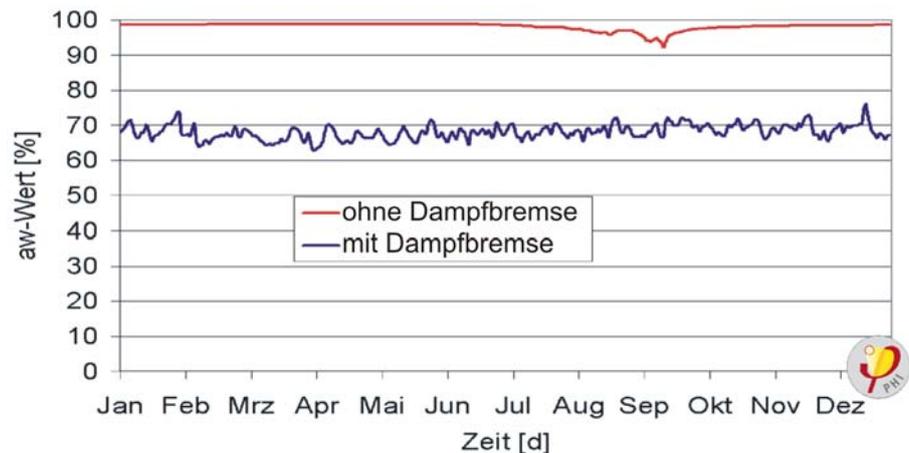


**Abbildung 35**  $a_w$ -Werte am 1. Januar nach 5 Jahren Einschwingzeit: Vollziegelmauerwerk ohne Innendämmung, Schlagregenbeanspruchungsgruppe III, kein wasserabweisender Außenputz (Quelle: PHI, [28])

#### 4.2.2.3.2 Dampfbremse

Vor allem beim Einsatz von Mineralwolle bei Innendämmmaßnahmen ist der Einbau einer Dampfbremse ( $s_d > 100 \text{ m}$ ) unverzichtbar. Abbildung 36 zeigt, dass sonst unter der Innendämmung an der Oberfläche des alten Innenputzes  $a_w$ -Werte von nahezu 100 % erreicht werden. Auch in den Sommermonaten trocknet der Putz kaum aus. Hier ist die Wahrscheinlichkeit von Schimmelpilzwachstum hoch. Mit einer sorgfältig ausgeführten Dampfbremse

auf der Raumseite der Innendämmung bleiben die  $a_w$ -Werte das ganze Jahr um 70 % und damit im unkritischen Bereich. Für die Dampfbremse sollte ein  $s_D$ -Wert von mindestens 15 m erreicht werden.



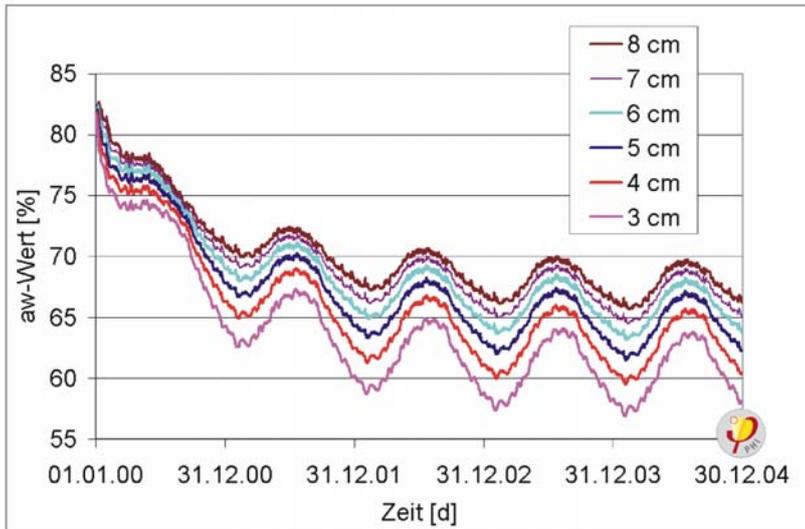
**Abbildung 36**  $a_w$ -Werte an der Oberfläche des alten Innenputzes im 5. Jahr bei Mineralwolle-Innendämmung mit und ohne Dampfbremse (wasserabweisende Fassadenbeschichtung, Schlagregengruppe III) (Quelle: PHI, [28])

**Feuchteadaptive  
Dampfbremsen sind nur  
bedingt für  
Innendämmung geeignet.**

Feuchteadaptive Dampfbremsen (siehe Abschnitt 7.5.6.1) erreichen diesen Wert auch im Winterhalbjahr bei realistischen Randbedingungen nicht. Es kommt daher zu einer übermäßigen Feuchteeinlagerung in der Wand, die auch durch die verbesserte sommerliche Austrocknungsmöglichkeit nicht in einem solchen Maß abgebaut werden kann, dass ausreichend Puffer für die Heizperiode zur Verfügung stünde

#### 4.2.2.3.3 Dämmdicke der Innendämmung

Die erwünschte Wärmedämmwirkung der Innendämmung führt dazu, dass eine Erhöhung der Dämmdicke eine Absenkung der Oberflächentemperatur des alten Innenputzes unter der Dämmung zur Folge hat. Niedrigere Temperaturen bei gleichbleibendem Feuchtegehalt führen jedoch bekanntermaßen zu einer Erhöhung des  $a_w$ -Wertes. Dies lässt sich auch am Simulationsergebnis in Abbildung 37 ablesen. Allerdings führt keine der untersuchten Dämmdicken von 3 - 8 cm beim gewählten Beispiel zu problematischen Bauteilfeuchten auf der Oberfläche des alten Innenputzes. Bei sowieso schon grenzwertigen Situationen kann der gezeigte Unterschied im  $a_w$ -Wertes von ca. 6 % zwischen einer Ausführung mit 3 cm oder mit 6 cm Dämmdicke durchaus relevant sein. Diese Erkenntnis sollte allerdings nicht als Grund für eine Ausführung mit geringer Dämmdicke gesehen werden. Vielmehr sollte die ökonomisch, ökologisch und funktional möglichst optimale Dämmdicke gewählt werden und diese nach den weiter oben erläuterten bauphysikalischen Prinzipien korrekt geplant und ausgeführt werden.



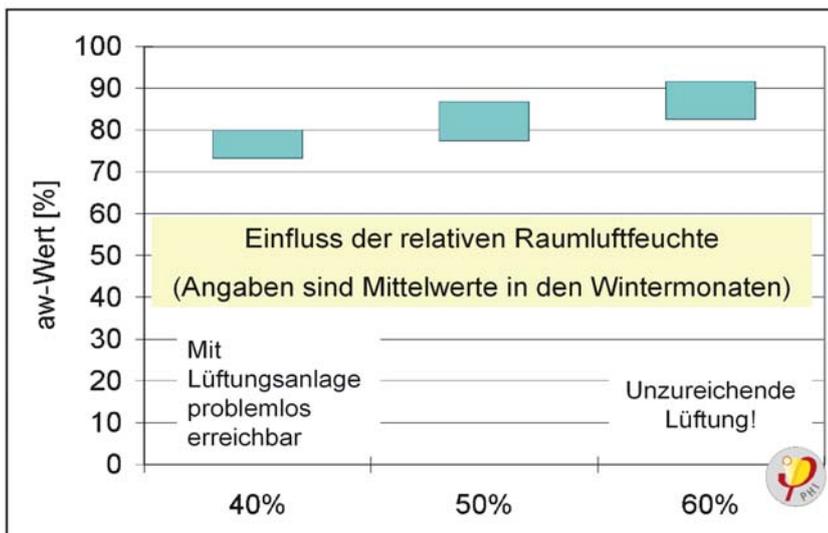
**Abbildung 37**  $a_w$ -Wert auf der Oberfläche des alten Innenputzes bei unterschiedlichen Dämmdicken (mit Dampfsperre, wasserabweisende Fassadenbeschichtung, Schlagregengruppe III) (Quelle: PHI, [28])

#### 4.2.2.3.4 Außenwandstärke und Mauerstein

Obwohl die Wärmedämmwirkung des Bestandsmauerwerks im Vergleich zur nachträglich aufgetragenen Innendämmung sehr gering ist, kann eine größere Wandstärke neben der geringfügig höheren Oberflächentemperatur unter der Innendämmung vor allem durch die stärkere Feuchtepufferwirkung ausgleichend wirken [28].

#### 4.2.2.3.5 Luftfeuchte im Innenraum

In den vorherigen Beispielen wurde immer von einer relativen Feuchte der Raumluft in der Heizperiode von 50 % ausgegangen. Bei Vorhandensein einer mechanischen Lüftungsanlage werden aber meist Werte um 40 % oder darunter erreicht. Dagegen können bei verhältnismäßig dichten Gebäuden ohne Lüftungsanlage relative Luftfeuchten um 60 % leicht erreicht oder überschritten werden, wenn nicht ausreichend über die Fenster gelüftet wird.

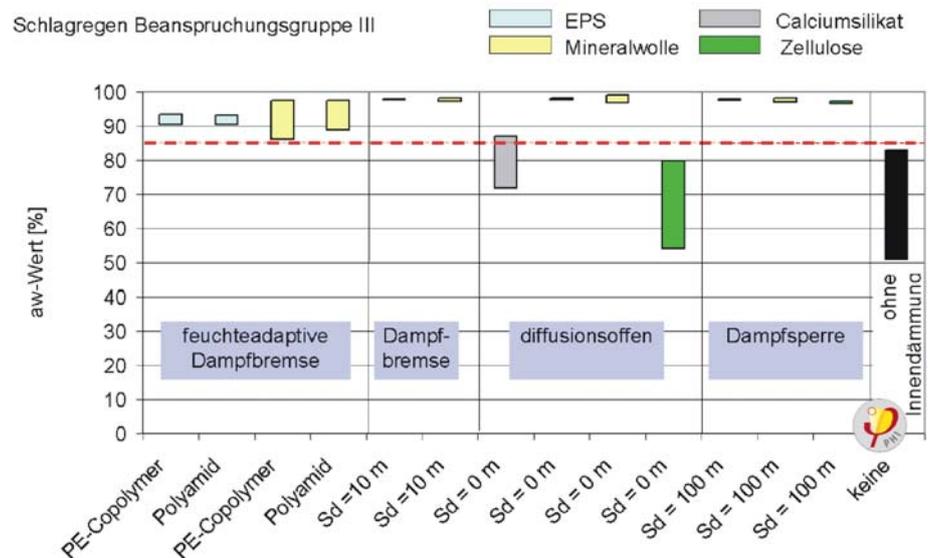


**Abbildung 38** Einfluss der relativen Raumluftfeuchte auf den  $a_w$ -Wert an der Oberfläche des alten Innenputzes (80 mm EPS, ohne Dampfbremse) (Quelle: PHI, [28])

**Bei Schlagregenbelastung der Fassade ist ein diffusionsoffener Aufbau der Innendämmung mit kapillaraktiven Dämmstoffen empfehlenswert.**

#### 4.2.2.3.6 Diffusionsoffener Aufbau mit kapillaraktiven Dämmstoffen

Wie im Grundlagenteil Abschnitt 7.5.6.1 erläutert, können kapillaraktive Dämmstoffe - dies sind Zellulosefaser und Calciumsilikat – Feuchtigkeit auch entgegen dem Dampfdruckgefälle transportieren. Hierdurch können auch erhöhte Feuchtelasten, die von außen wegen einer hohen Schlagregenbelastung der Wandkonstruktion zugeführt werden, bis zu einem gewissen Maß abtransportiert werden (vgl. [230]).



**Abbildung 39** a<sub>w</sub>-Werte unterschiedlicher Innendämmvarianten, hier exemplarisch: Außenwand westorientiert ohne wasserabweisende Fassadenbeschichtung, Schlagregenbeanspruchungsgruppe III; weitere Ergebnisse in [28]

#### 4.2.2.4 Hydrophobierung der Fassade als Maßnahme zur Erhöhung des Schlagregenschutzes bei Innendämmung<sup>1</sup>

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, ist ein funktionierender Schlagregenschutz an der Fassade in jedem Fall unverzichtbar, um auch mit Innendämmung eine übermäßige Durchfeuchtung der Wand sicher auszuschließen. An erster Stelle stehen hierbei konstruktive Maßnahmen, wie ein ausreichender Dachüberstand. Sind diese Maßnahmen nicht ausreichend, so kann ein zusätzlicher Schlagregenschutz durch eine Imprägnierung der Fassade mit einem Hydrophobierungsmittel erreicht werden. Der Wirkstoff lagert sich dabei an den Porenwandungen an und macht sie wasserabweisend. Da die Poren aber nicht verschlossen oder ganz aufgefüllt werden, bleibt die Diffusionsfähigkeit des Baustoffs weitestgehend erhalten. Heute gibt es unterschiedliche Hydrophobierungsmittel auf dem Markt, wobei jedoch alle im Baustoff als Endprodukt ein Silikonharz bilden. Der Erfolg der Imprägnierung hängt von der Eindringtiefe der Substanz ab. (siehe auch Abbildung 40).

<sup>1</sup> vgl. [85]



**Abbildung 40** Querschnitt durch einen hydrophobierten Ziegelstein. Der Stein weist eine ungewöhnlich hohe Porosität auf, weshalb hier eine weit über dem üblichen liegende Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels von mehr als 3 cm erzielt wurde (heller Bereich). (Quelle: PHI, [205])

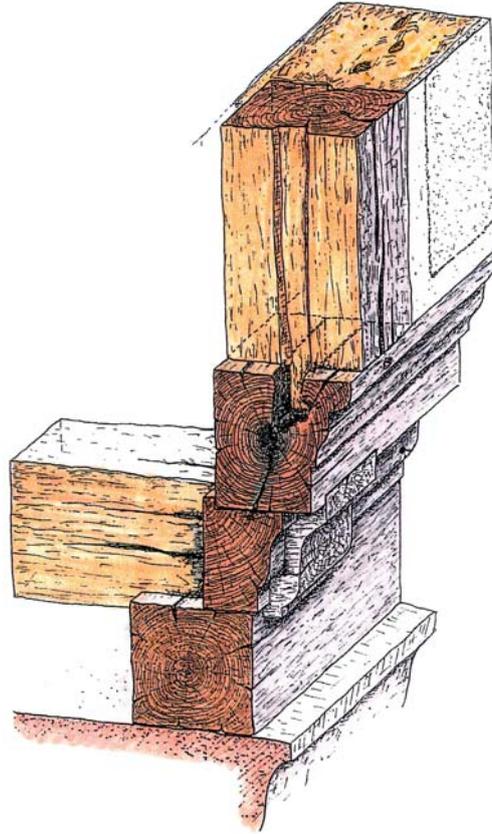
Eine Hydrophobierung sollte nur dann durchgeführt werden, wenn eine Hinterfeuchtung der Oberfläche dauerhaft ausgeschlossen werden kann. Sollte durch Risse und marode Mörtelfugen, aufsteigende Feuchte oder Fehlstellen in der Hydrophobierung Wasser hinter die Hydrophobierungsschicht gelangen, so kann es zu einer Abspaltung der Oberfläche durch eine zu hohe Salzkonzentration in den oberflächennahen Schichten führen. Eine Fassadenhydrophobierung kann also ein wirksames Mittel zur Verbesserung des Schlagregenschutzes sein. Allerdings muss sie sorgfältig und mit ausreichenden Voruntersuchungen geplant und umgesetzt werden, um den erwünschten Effekt zu erzielen und Bauschäden durch die Hydrophobierung auszuschließen.

**Eine Hinterfeuchtung der Hydrophobierung kann zu Fassadenschäden führen.**

#### 4.2.2.5 Sonderfall: Innendämmung bei Fachwerkhäusern<sup>1</sup>

Schon der römische Architekt und Schriftsteller Vitruv kannte die Schwachpunkte der Fachwerkkonstruktion, die durch das Quellen und Schwinden von Holz entstehen. Von ihm stammt das Zitat: „Fachwerk, wünschte ich, wäre nie erfunden.“ ([87]). In der Tat ist die tragende Holzkonstruktion von Fachwerkhäusern durch Feuchtebelastung stark gefährdet. An erster Stelle ist hier die Schlagregenbelastung an der Fassade zu nennen. Bei Sichtfachwerk entstehen durch das unterschiedliche Ausdehnungsverhalten von Holz und Putz unvermeidlich Risse und Fugen, vor allem am Anschluss des verputzten Gefachs an einen sichtbaren Holzbalken. Hier können innerhalb kurzer Zeit große Regenwassermengen in die Konstruktion eindringen. In geringerem, aber nicht zu vernachlässigendem Maße, ist Fachwerk auch durch Feuchtigkeit, die im Winter aus dem Innenraum durch Diffusion und Konvektion in die Außenwand eindringt gefährdet. Durch den schlechten Wärmeschutz der nur 12-16 cm dicken Fachwerkwände von  $U = 1,8 - 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  kann sich unter Umständen auch schon auf der inneren Wandoberfläche Kondensat bilden, welches zur Holzzerstörung führen kann. Eine sachgerecht geplante und ausgeführte Wärmedämmung (innen oder außen) verursacht dagegen entgegen einem verbreiteten Vorurteil keine Schäden am Fachwerk.

<sup>1</sup> vgl. [86]



**Abbildung 41** *Typisches Schadensbild einer Fachwerkaußenwand: Über Fugen zwischen Fachwerkstiel und Ausfachung und über Risse in Fachwerkbalken dringt Regenwasser ein und sammelt sich in Zapflöchern. Das Holz verfault von innen heraus. (Quelle: Fingerling)*

**In Lagen mit höherer Schlagregenbelastung sollten Fachwerkfassaden immer verkleidet werden.**

Historisch waren Fachwerkfassaden in regenbelasteten Gebieten meist zum Schutz gegen Schlagregen verkleidet (siehe Abbildung 42). Schäden können entstehen, wenn solche Verkleidungen zur Sichtbarmachung der Fachwerkfassade entfernt werden. Bei hoher Schlagregenbelastung (DIN 4108-3 [26] Schlagregenbeanspruchungsgruppe III oder Schlagregenbeanspruchungsgruppe II bei exponierter Lage, siehe auch Abschnitt 7.5.2) wird generell eine Verkleidung von Sichtfachwerk empfohlen. Bei solchen Fassaden ist dann auch eine Außendämmung durch ein Wärmedämm-Verbundsystem oder eine gedämmte vorgehängte Fassade möglich und vorzuziehen. So ist neben dem ausgezeichneten Wärmeschutz auch ein langfristiger Schutz der historischen Konstruktion gegeben.



**Abbildung 42** In Gebieten mit hoher Schlagregenbelastung (hier: Bergisches Land) wird zum Schutz der Fachwerkkonstruktion traditionell zumindest die Fassade auf der Wetterseite mit einer Bekleidung versehen. (Quelle: PHI)

Soll die Fachwerkkonstruktion von außen sichtbar sein, so kann durch eine Innendämmung der Wärmeschutz und die Behaglichkeit verbessert werden.

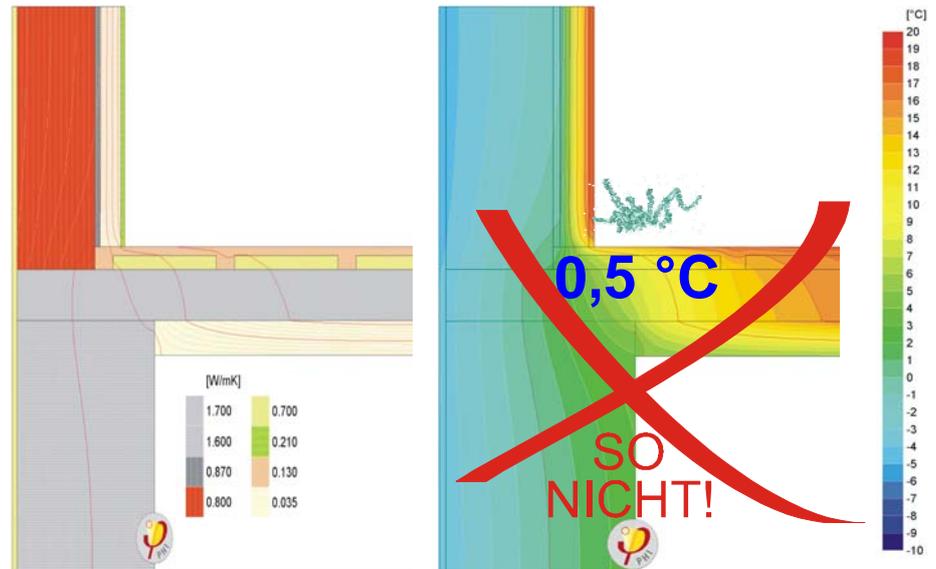
Die Ursachen für übermäßige Auffeuchtung durch Schlagregen müssen aber auch mit Innendämmung auf jeden Fall beseitigt werden. Für den Außenputz der Gefache gilt, dass er weder stark wassersaugend, noch stark wasserabweisend sein sollte. Innendämmmaßnahmen sind dafür prädestiniert schrittweise durchgeführt zu werden, da jeder Raum einzeln gedämmt werden kann. So bietet es sich beispielsweise an, bei Mehrfamilienhäusern im Mietwohnungsbau die Dämmmaßnahme jeweils bei Mieterwechsel wohnungsweise durchzuführen.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch die Innendämmung immer die angrenzenden Innenoberflächen der Außenwand im noch ungedämmten benachbarten Raum absinken. Ob die niedrigeren Oberflächentemperaturen unproblematisch sind oder zu einer Auffeuchtung der Oberflächen mit nachfolgender Schimmelbildung führen können, sollte im Einzelfall geprüft werden. Hierzu eignet sich die Berechnung des Details mit einem mehrdimensionalen Wärmestromprogramm.

#### 4.2.3 Wärmebrücken

Bei einer Innendämmung entstehen unvermeidliche Wärmebrücken durch einbindende Innenwände und Decken, die die Wirksamkeit der Dämmmaßnahme vermindern und zu einer Absenkung der Innenoberflächentemperaturen führen, die zur Anlagerung von Feuchte und zu nachfolgendem Schimmelbefall und Bauschäden führen kann (siehe Abbildung 43). Daher sollte die sich einstellende Oberflächentemperatur im Bereich von Wärmebrücken bei der Planung sorgfältig analysiert werden.

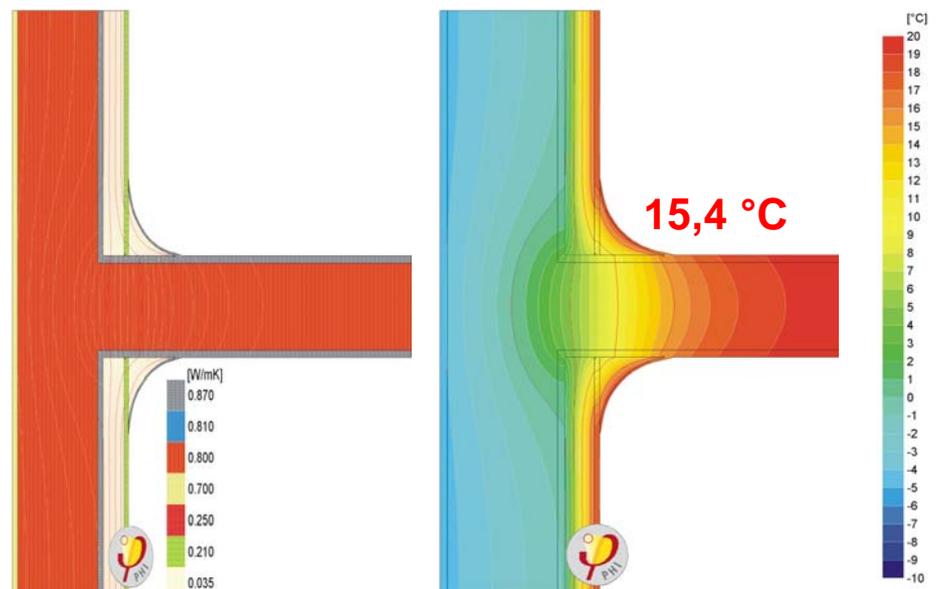
**Eine sachgerecht  
ausgeführte  
Innendämmung  
verursacht keine  
Holzschäden bei  
Fachwerkhäusern.**



**Abbildung 43** Negativbeispiel für gedankenlos ausgeführte Innendämmung. Der bestehende Dielenboden auf der Kellerdecke wurde belassen und die Innendämmung nur bis Oberkante Dielen geführt. Im Holzfußboden an der Wand sinken die Temperaturen bis nahe 0 °C. Dies führt unweigerlich zu einer Durchfeuchtung durch Kondensat aus der Raumluft. Der Holzfußboden verrottet (Quelle: PHI, [207])

**Dämmkeile entschärfen die Wärmebrücken bei einbindenden Innenwänden und Decken.**

Eine wirksame Methode, um die Oberflächentemperaturen an den kritischen Wärmebrücken anzuheben sind Dämmkeile entlang des einbindenden Bauteils [230] (siehe Abbildung 44).

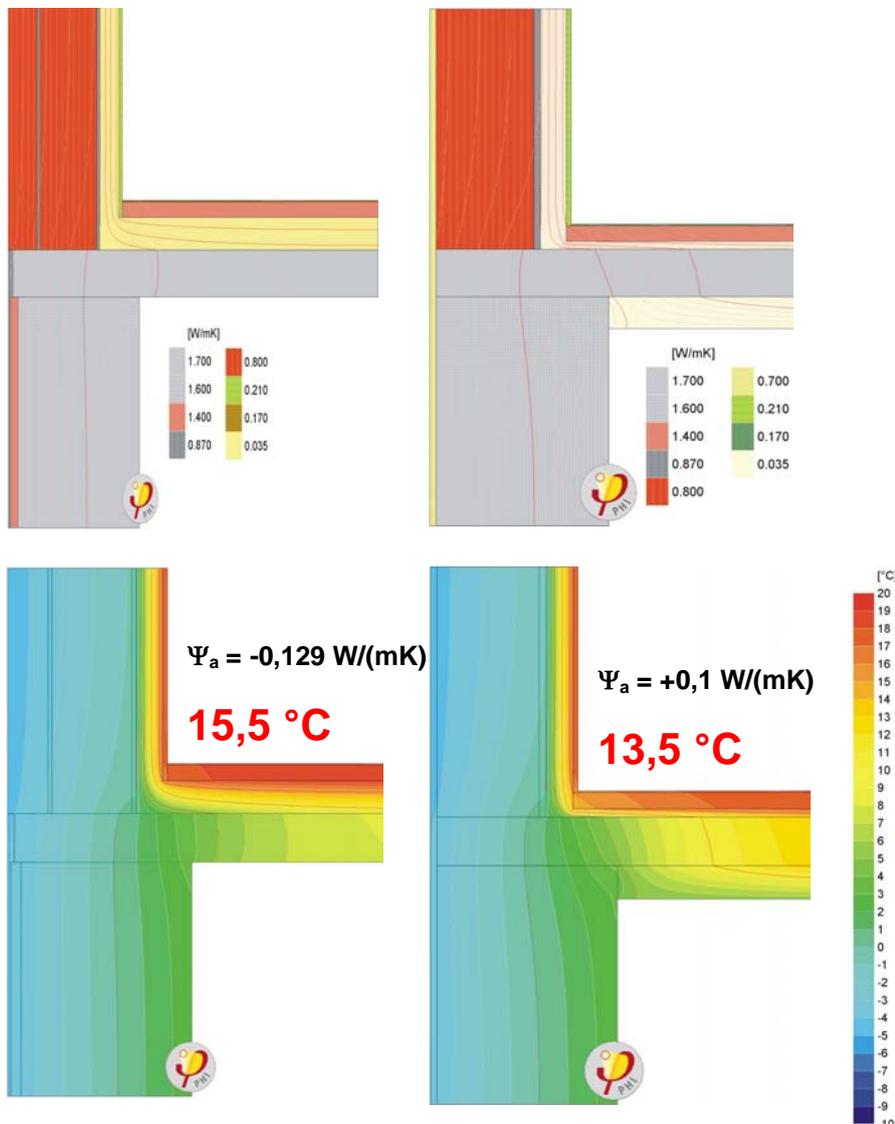


**Abbildung 44** Dämmkeile zur Entschärfung von Wärmebrücken als betontes Gestaltungselement „runde Ecke“ am Anschlusspunkt Innenwand/Außenwand. Die Oberflächentemperaturen liegen überall oberhalb von 15,4 °C. Schimmelbildung ist weitgehend ausgeschlossen. Gleichzeitig reduziert der Dämmkeil den Wärmeverlust durch die Wärmebrücke moderat um 25 %. (Quelle: PHI, [207])

#### 4.2.3.1 Anschluss: Kellerdecke zu Außenwand

Bei einer Innendämmung an der Außenwand bietet es sich an, auch die Kellerdecke zum unbeheizten Keller innen - also auf der Kellerdecke - zu dämmen. So kann eine durchgehende Dämmebene erreicht werden. Der Wärmebrückenverlustkoeffizient am Übergang von der Außenwand zur Kellerdecke wird geometriebedingt sogar negativ. Tauwasserschäden können weitgehend ausgeschlossen werden (siehe Abbildung 45 links).

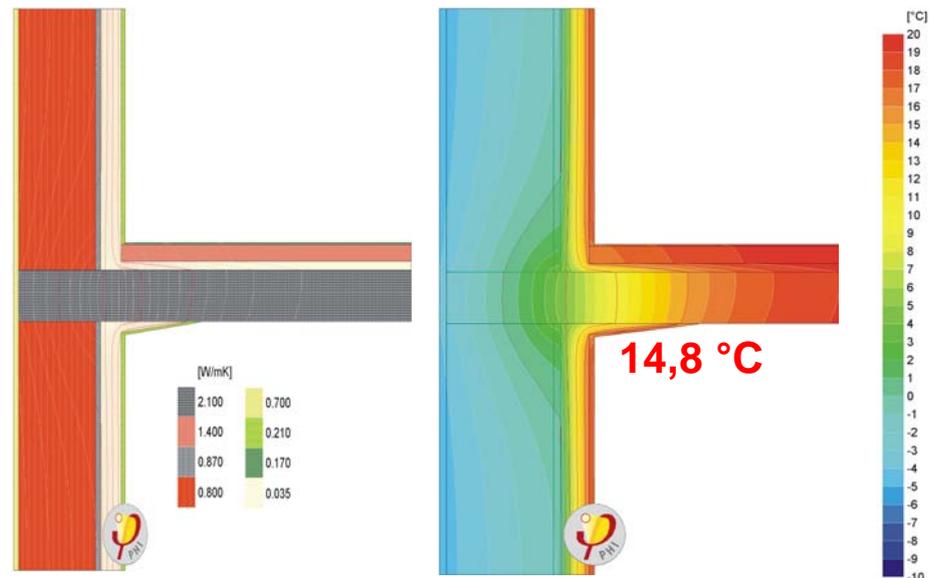
Wenn die Wärmedämmung auf der Kellerdecke nicht möglich ist (vgl. 4.3.2.1), kommt auch eine Dämmung unter der Kellerdecke in Frage. Eine geringfügige Trittschalldämmung (ca. 25 mm) auf der Kellerdecke sollte aber zumindest vorhanden sein (mit durchgängiger Dampfbremse raumseitig der Trittschalldämmung). Dann bleiben die Oberflächentemperaturen bauphysikalisch akzeptabel. Der Wärmebrückenverlustkoeffizient ist aber höher als bei einer Dämmung auf der Bodenplatte (siehe Abbildung 45 rechts).



**Abbildung 45 Innendämmung an der Außenwand im Anschluss an die Kellerdecke. Kellerdeckendämmung auf (links) und unter (rechts) der Kellerdecke. (Quelle: PHI, [207])**

#### 4.2.3.2 Anschluss: Geschossdecke an Außenwand

Bei einer in die Außenwand einbindenden Stahlbeton-Geschossdecke ist der eingangs beschriebene Dämmkeil notwendig, um die Oberflächentemperaturen im unkritischen Bereich zu halten. Wirksame Abmessung sind 200 mm Länge und 40 mm Stärke an der dicksten Stelle. Auf der Oberseite der Decke ersetzt die Trittschalldämmung unter dem Estrich den Dämmkeil.



**Abbildung 46** In die Außenwand mit Innendämmung einbindende Stahlbeton - Geschossdecke. Bauphysikalisch richtige Ausführung mit Dämmkeil unter und Trittschalldämmung auf der Geschossdecke (Quelle: PHI, [207])

#### 4.2.3.3 Anschluss: Innenwand an Außenwand

Auch bei einbindenden Innenwänden sind Dämmkeile zur Verhinderung von kritischen Innenoberflächentemperaturen in den meisten Fällen unverzichtbar. Falls die Dämmkeile an dieser Stelle als störend empfunden werden, kann man versuchen, sie soweit wie möglich zu minimieren. Ausführliche Darstellungen sind im Protokollband Nr.32 „Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten“ [207] zu finden.

Im Gegensatz zu einer Minimierung der Dämmkeile kann es stattdessen auch sinnvoll sein, diese zusätzlich für andere Zwecke nutzbar zu machen. So kann z.B. der raumseitig letzte Abschnitt des Dämmkeils als Installationshohlraum genutzt werden. Eine solche Ausführung zeigt Abbildung 47.

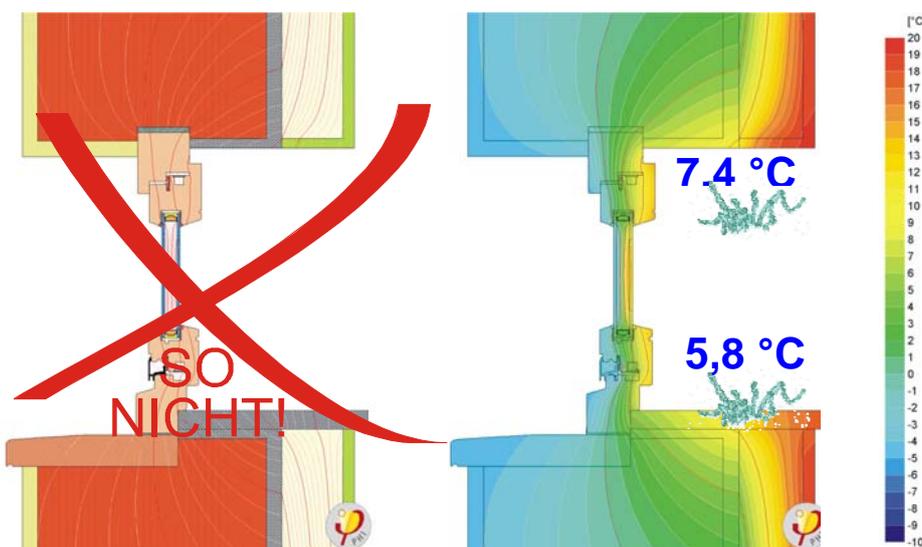


**Abbildung 47** Beispiel für die Integration eines Installationshohlraums in den Dämmkeil der Innendämmung bei einer einbindenden Innenwand. Im Bereich des Hohlraums (im Modellfoto mit Mineralwolle ausgefüllt) verspringt die Dampfbremse von der raumseitigen Oberfläche der Innendämmung auf die Altputzoberfläche. (Foto: Architekt Werry, LUWOGÉ).

#### 4.2.3.4 Anschluss: Fenster an Außenwand

Fenster sind im Altbaubestand häufig mittig in der Mauerwerksebene montiert. Wird bei der Gebäudesanierung mit Innendämmung das bestehende Fenster belassen, oder das neue Fenster wieder an der selben Position eingebaut, so muss die Innendämmung in ausreichender Stärke in die Leibung hinein gezogen und direkt an den Fensterrahmen angeschlossen werden, damit eine durchgehende thermische Hülle entsteht. Wird die innere Fensterleibung nicht gedämmt, so treten an dieser Stelle sehr niedrige Oberflächentemperaturen auf, die fast unweigerlich zu Feuchteschäden führen (siehe Abbildung 48).

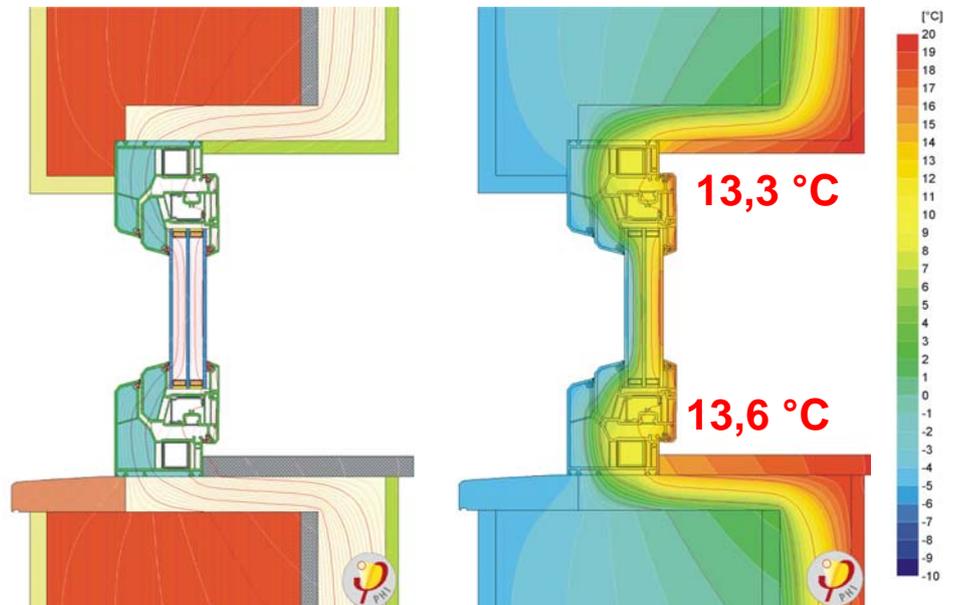
**Die innere Fensterleibung muss, um Bauschäden zu vermeiden, immer mit gedämmt werden.**



**Abbildung 48** Energetische Modernisierung mit Innendämmung ohne Fenstererneuerung und ohne Dämmung der inneren Fensterleibung. Ein Feuchteschaden ist hier, wegen der sich einstellenden sehr niedrigen minimalen Oberflächentemperaturen, vorprogrammiert. (Quelle: PHI, [207])

Die innere Fensterleibung muss daher bei Innendämmung unbedingt auch wärmegeklämt werden. Im optimalen Fall werden dabei ca. 40 mm Dämmung bis an die Stirnseiten des neuen, wärmegeklämten Fensterrahmens gezogen. Dazu muss allerdings der Altputz und meist auch die Oberfläche der Rohbau-Mauerwerksleibung abgetragen werden. Dies verursacht einen nicht unerheblichen Arbeitsaufwand und kann zudem die Statik der Fensteröffnung beeinträchtigen. Eine Reduktion der Dämmdicke in der Leibung auf 20 mm führt zwar zu etwas erhöhten Wärmeverlusten ( $U_{w, eingebaut} = 1,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  statt  $1,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Die Oberflächentemperaturen bleiben aber noch knapp im unkritischen Bereich.

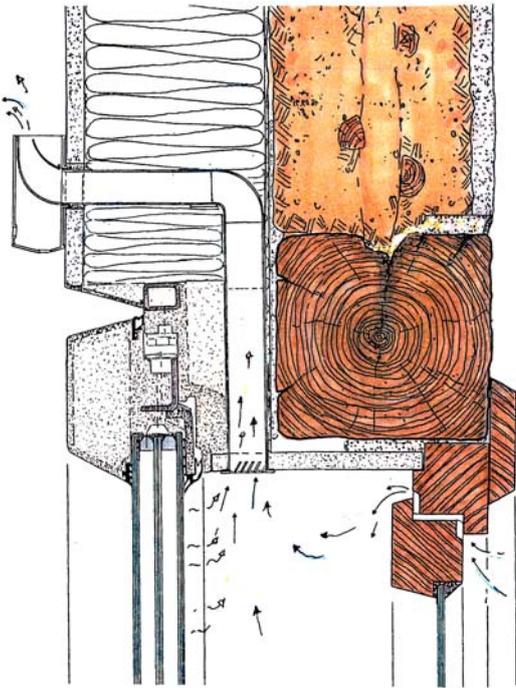
Wird die Leibungsdämmung wie in Abbildung 49 ausgeführt, mit dem Unterschied, dass die Dämmung schon an der Innenkante des Fensterrahmens endet, so können allerdings zu niedrige Innenoberflächentemperaturen von knapp unter  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  auftreten. Schon eine Leibungsdämmung von nur 20 mm, die in der Einbaufuge zwischen Fensterrahmen und Wand verläuft, verbessert die Oberflächentemperatur.



**Abbildung 49** Optimierter Fenstereinbau mit Innendämmung: Die Leibung ist in 40 mm Stärke gedämmt. Die Wärmedämmung schließt unterbrechungsfrei an die Dämmebene des Fensterrahmens an. Bei Verwendung eines Passivhausfensters mit wärmegeklämtem Rahmen und 3-fach Wärmeschutzverglasung kann im eingebauten Zustand so ein noch befriedigender U-Wert von  $U_{w, eingebaut} = 1,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht werden. (Quelle: PHI, [207])

Bei älteren Gebäuden prägen die Fenster oft entscheidend die äußere Erscheinung. Wenn einfachverglaste Fenster mit filigraner Sprossenteilung durch großflächige neue Verglasung ersetzt werden, geht auch ein Teil des ursprünglichen Charakters des Hauses verloren. Der Nachbau der Sprossenteilung bei einem neuen Fenster kann aber, wenn auch die Scheiben geteilt werden, den Wärmeverlust über die Fenster deutlich erhöhen, insbesondere wenn ein stark wärmeleitender Aluminium-Randverbund in den Scheiben verwendet wird (siehe auch Abschnitt 4.7.2.2.1 auf S. 136). Eine sinnvolle Alternative kann es daher sein, das alte Fenster zu überarbeiten und

es an seiner Position in der Leibung zu belassen. In einer Ebene mit der Innendämmung wird zusätzlich ein neues Fenster eingebaut. So entsteht eine Art Kastenfenster (siehe Abbildung 50). Auf diese Weise kann der Wärmeschutz gegenüber der Ausführung nach Abbildung 49 nochmals deutlich verbessert werden, da es keinen Versprung mehr in der Dämmebene im Fensterbereich gibt. Bei Kastenfenstern muss das innere Fenster luftdicht sein, während das äußere Fenster eine geringfügige Undichtigkeit nach außen zum Dampfdruckausgleich aufweisen muss.



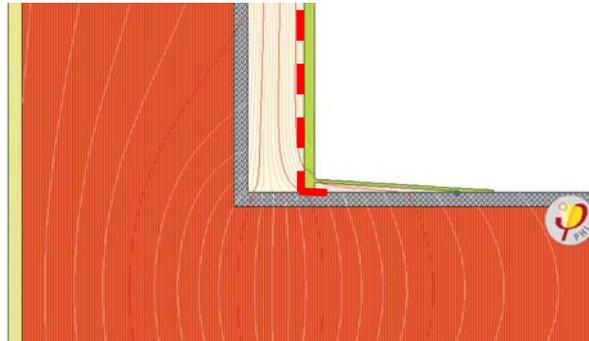
**Abbildung 50** *Kastenfenster bei einem innengedämmten Fachwerkhaus (hier mit integrierter Zuluftöffnung für eine Abluftanlage). Das äußere Erscheinungsbild des Hauses bleibt durch den Erhalt der einfachverglasten Sprossenfenster bestehen. Das neue wärmegeämmte Fenster mit 3-fach Wärmeschutzverglasung wird - thermisch optimal - in der Dämmebene montiert. (Quelle: Fingerling)*

#### 4.2.4 Luftdichtheit

Die luftdichte und dampfbremsende Ebene muss auch bei der Innendämmung immer auf der warmen Seite der Dämmebene liegen (vgl. Abschnitt 4.2.2.3). Das heißt die dampfbremsende Folie wird generell direkt unterhalb der raumseitigen Beplankung aus Gipskarton- oder Holzwerkstoffplatten angeordnet. Bei doppelter Beplankung wird sie zwischen den beiden Platten angeordnet. Bei Kalzium-Silikat-Platten bildet der neue raumseitig liegende Putz die luftdichte Schicht.

Schlitze oder Löcher in der Dampfbremse müssen auf jeden Fall vermieden werden. Die Folie muss an den Rändern sorgfältig an die angrenzenden Bauteile (Innenwände, Geschossdecken, Fensterrahmen) angedichtet werden. An Kanten oder Bauteilstößen ist es besonders wichtig, das evtl. auftretende Bauteilbewegungen ausreichend aufgenommen werden können, damit die Verbindungen nicht reißen. Die Folienverbindungen müssen z.B. mit Dehnungsschlaufen eingebaut werden.

Eine Folienüberdeckung der Randdämmkeile ist allerdings aus bauphysikalischer Sicht nicht notwendig. Die Dampfbremse kann direkt am Rand der flächigen Innendämmung auf das angrenzende Bauteil verklebt werden (siehe Abbildung 51). Dies erleichtert die bauliche Ausführung. Verklebungen auf altem oder neuen Putz lassen sich am besten mit Klebmassen aus Kartuschen realisieren statt mit Klebebändern.



**Abbildung 51** Die dampfbremsende Folie muss nicht über den Randdämmkeil gezogen werden, sondern kann direkt am Rand der flächigen Innendämmung auf dem angrenzenden Bauteil verklebt werden. (Quelle: PHI, [207])

**Balkenköpfe von Holzbalkendecken sind durch unsachgemäß ausgeführte Innendämmung besonders gefährdet.**

#### Holzbalkendecken

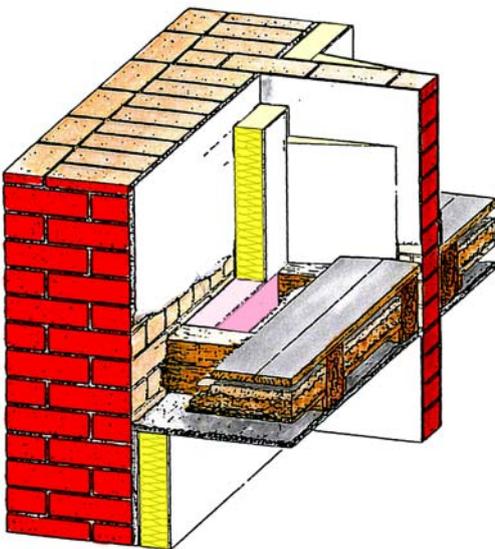
Geschossdecken wurden bis in die sechziger Jahre des 20. Jahrhunderts auch in Massivbauten häufig als Holzbalkendecken ausgeführt (Ausnahme: Kellerdecke). Die im Mauerwerk auflagernden Balkenköpfe sind schon im Bestand regelmäßig durch Feuchtigkeit geschädigt. Hieran ist insbesondere auch die Aufnahme von Schlagregen durch eine undichte Fassade beteiligt.



**Abbildung 52** Durch Feuchtigkeit zerstörter Balkenkopf im Bestand (links) und sanierter Zustand vor Aufbringung der Innendämmung (rechts). Der zerstörte Balkenkopf wurde abgesägt und der Deckenbalken im gesunden Holz mittig geschlitzt. Im Schlitz wurde ein Stahlschwert mit Stabdübeln befestigt. Das Auflager des Stahlschwerts im Mauerwerk wurde zur Verminderung der Wärmebrückenwirkung mit PU-Recycling-Dämmstoff „eingepackt“. (Quelle: Projekt Ensan, 'Kleine Freiheit' in HH-St.Pauli, Arch. und Foto: Dittert und Reumschüssel).

Bei unsachgemäß ausgeführter Innendämmung sind die Köpfe der Deckenbalken nach einer Sanierung noch weit mehr gefährdet als davor. Dies liegt daran, dass sich das Mauerwerk durch die Innendämmung abkühlt. Mit einer wirksamen Dampfbremse raumseitig auf der Innendämmung ist das normalerweise kein Problem. Im Deckenbereich ist die Luftdichtheit bei Holzbalkendecken aber nur sehr schwierig herzustellen. Feuchte Innenraumluft dringt dann durch Fugen in den Deckenaufbau und kondensiert am kalten Mauerwerk. Die dort auflagernden Deckenbalken durchfeuchten und werden bei länger anhaltender Feuchtebelastung unter Umständen nachhaltig beschädigt. Eine Möglichkeit wie sowohl die Luftdichtheits- als auch die Dämmebene weitgehend unterbrechungsfrei durch die Holzbalkendecke geführt werden können zeigt Abbildung 53 ([28]):

- Prüfung der Regendichtheit der Außenwände im Bereich der Balkenköpfe. Bei Durchnässung die Durchführung einer technischen Trocknung prüfen.
- Abnehmen der Fußleiste und von zwei bis drei Dielen.
- Herausnehmen des Lehmschlags (o.ä.) und des Blindbodens in dieser Breite.
- Anstrich der Balkenköpfe und der Balken auf 20-50 cm Länge mit dampfbremsendem Material (z.B. Bitumen oder Dispersionsanstriche).
- Einsetzen von dampfdichten Dämmplatten (Schaumglas, XPS, EPS, PU) in den Balkenzwischenraum. Die Dämmplatten müssen satt in dampfbremsende Klebmasse verlegt werden, damit ein dichter Verbund mit allen unebenen Oberflächen entsteht. Hilfreich ist hier z.B. Kaltbitumenkleber oder PU-Komponentenkleber. Dichtung der Anschlussfuge zwischen der Wanddämmung und dem Dämmstoff im Balkenzwischenraum mit dem gleichen Material.
- Wiederverfüllung des Hohlraumrestes und Wiederanbringung der Dielung bis zur Dämmplatte.



**Abbildung 53** Herstellung einer durchgehenden Luftdichtheits- und Dämmebene an einer Holzbalkendecke bei Innendämmung. (Quelle: Fingerling)

## 4.3 Decken über unbeheizten Kellern

### 4.3.1 Grundlagen

Die Kellerdecke ist bei energetischen Altbausanierungen meistens das Bauteil, bei dem die Herstellung eines ausreichenden Wärmeschutzes auf die größten Schwierigkeiten stößt. Zum einen wird die Dämmdicke oft dadurch begrenzt, dass die lichte Geschosshöhe nicht beliebig verringert werden kann, zum anderen durchstoßen an der Kellerdecke die lastabtragenden Bauteile die Dämmebene. Dennoch sind auch bei der Kellerdecke in fast allen Fällen entscheidende Verbesserungen des Wärmeschutzes möglich.



**Abbildung 54** Dämmung der Kellerdecke von unten mit Nut-und-Feder-Platten aus EPS. Auch unter den Stürzen der Kellerfenster sollte gedämmt werden. (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Jean-Paul-Platz, WBG Nürnberg )

Da im Keller die Lufttemperatur, außer bei starker Durchlüftung, normalerweise im Winter nicht unter 5 °C absinkt tritt hier bei gleicher Dämmdicke ein geringerer Wärmeverlust auf als bei Bauteilen der thermischen Hülle, die direkt an die Außenluft grenzen. Diese Differenz kann bei der Aufstellung einer Gebäudeenergiebilanz (zum Beispiel mit dem Passivhaus Projektierungs Paket) durch einen Reduktionsfaktor auf den Transmissionswärmeverlust des Bauteils berücksichtigt werden. Das Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP) enthält ein Tabellenblatt, mit dem die Höhe dieses Temperaturgewichtungsfaktors ermittelt werden kann (vgl. [17]). Wird keine Berechnung vorgenommen so arbeitet das PHPP mit einem pauschalen Reduktionsfaktor, der bei Verwendung des Standardklimadatensatzes für Deutschland bei 0,64 liegt.

Grundsätzlich reicht im Keller also auf Grund der höheren Temperaturen eine etwas geringere Dämmdicke als bei den anderen Außenbauteilen aus.

Die Kellerdeckendämmung wirkt sich auch auf die Feuchtigkeit des Kellers aus, denn sie reduziert die indirekte Beheizung der Kellerräume vom Wohnraum her. Dadurch sinkt die mittlere Temperatur des Kellers, vor allem in den Wintermonaten. Das führt bei der gleichen absoluten Feuchte der Kellerluft (in kg Wasser pro kg trockener Luft) zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchte (in Prozent), der bei konsequenter Kellerdeckendämmung 10 bis 15 Prozentpunkte

**Auswirkung der  
Kellerdeckendämmung  
auf die Feuchtigkeit des  
Kellers**

betragen kann. Dadurch erhöht sich das Risiko von Schimmelbildung auf den Bauteiloberflächen im Keller.

Sind im Keller Feuchtebelastungen vorhanden, etwa durch aufsteigende Feuchte oder insbesondere durch Wäschetrocknen, so kann auch eine verbesserte Luftdichtheit (etwa Änderungen bei den Fenstern, Einbau einer luftdichten Kellertür zum EG) zu erhöhter Luftfeuchte führen.

Im Wesentlichen gibt es zwei Möglichkeiten, um die relative Feuchte und damit das Schimmelrisiko wieder auf das Niveau vor der Kellerdeckendämmung abzusenken: gezieltes Lüften zur Feuchteabfuhr sowie Erhöhung der Oberflächentemperaturen im Keller.

Will man durch Lüften das Schimmelrisiko auf das Niveau vor Dämmung der Kellerdecke zurückbringen, so führt eine einfache Erhöhung des Luftwechsels nicht zum Ziel. Auch saisonal verstärkte Lüftung im Sommer (um die Temperaturen zu erhöhen) bzw. im Winter (um die niedrige absolute Außenluftfeuchte zu nutzen) ist nicht zweckmäßig. Es sind jedoch Steuerungen bzw. komplette Systeme am Markt, die immer dann verstärkt lüften (durch motorisches Öffnen der Kellerfenster oder Ansteuerung eines Ventilators), wenn die absolute Feuchte der Außenluft niedriger ist als diejenige der Raumluft.



**Abbildung 55** Abluftventilator für die Kellerentfeuchtung (Quelle: PHI [203])

Eine Reduzierung der relativen Feuchte an den Oberflächen ergibt sich auch bei Erhöhung der Oberflächentemperaturen, die sich etwa durch ein Herunterziehen der Außenwanddämmung bis Oberkante Erdreich erreichen lässt. Das wird man in der Regel ohnehin tun, zum einen aus gestalterischen Gründen, zum anderen zur Gewährleistung ausreichender Oberflächentemperaturen an der Wärmebrücke, die in der Kante Kellerdecke - Außenwand im EG entsteht.

Zusätzliche Beiträge zur Temperaturerhöhung kann ein verbesserter Wärmeschutz der Kellerfenster leisten. Gegebenenfalls können die alten Öffnungen der Kellerfenster auch einfach überdämmt werden. In beiden Fällen ist jedoch darauf zu achten, dass eine ausreichende Belüftung des Kellers erhalten bleibt, insbesondere wenn Feuchtequellen zu erwarten sind.

Ob und in welchem Maße die Kellertemperatur in einem konkreten Projekt absinkt, lässt sich mit Hilfe des Blattes „Erdreich“ im PHPP ermitteln. Dort werden die monatsmittleren Kellertemperaturen ausgewiesen. Vorsicht vor Fehlinterpretationen: Für das Schimmelrisiko kommt es auf die Oberflächentemperaturen an. Diese können gerade bei schlecht gedämmten Kellerwänden durch einen verbesserten Wärmeschutz spürbar steigen, ohne dass die mittlere Kellertemperatur sich ändert.

#### **4.3.2 Konstruktionen und Materialien**

Grundsätzlich gibt es für die Dämmung der Decke über einem unbeheizten Keller die folgenden Möglichkeiten:

- Dämmung unter der Kellerdecke
- Dämmung auf der Kellerdecke
- Kombination von Dämmung auf und unter der Kellerdecke
- Dämmung der Kelleraußenwände und der Außenfundamente rund um das Haus (meist in Kombination mit anderen Varianten)

Welche der Varianten gewählt wird, hängt unter anderem davon ab, wie weit die lichte Raumhöhe durch die Dämmung verringert werden kann und ob gleichzeitig andere Bauteile, wie zum Beispiel der Erdgeschossfußboden, erneuert werden sollen.

##### *4.3.2.1 Auf der Kellerdecke*

Bei einer ausreichenden Deckenhöhe, wie es zum Beispiel in Gründerzeitbauten meist der Fall ist, ist eventuell die Einbringung einer größeren Dämmdicke oberhalb der Kellerdecke möglich. Dies bietet sich vor allem an, wenn der Fußboden im Rahmen einer Gebäudesanierung sowieso erneuert werden soll. Allerdings ergeben sich durch die resultierende Anhebung des Fertigfußbodenniveaus verschiedene Probleme, die gelöst werden müssen. Falls die alten Türen erhalten bleiben, müssen diese an der Unterseite entsprechend gekürzt werden. Entsprechend verringern sich auch Sturz und Brüstungshöhen der Fenster.

Für die Dämmung auf der Kellerdecke können bis auf die Lage der luftdichten Ebene grundsätzlich ähnliche Konstruktionen und Dämmmaterialien, wie für eine begehbare Dämmung der obersten Geschossdecke verwendet werden (siehe Kapitel 4.5.2). Bei unebenem Untergrund empfiehlt sich eine Ausgleichsschüttung z.B. aus Blähperlite unterhalb der eigentlichen Wärmedämmplatten. Ist die verwendbare Dämmdicke sehr stark begrenzt, so kann mit etwas erhöhten Investitionskosten eine Vakuumdämmung eingebaut werden. Die Dämmpaneele können dann mit einem Trockenestrich geringer Aufbauhöhe abgedeckt werden.

**Auch bei größeren Dämmdicken ist bei normaler Belastung keine Bewehrung des Estrichs nötig.**

Als Estrich auf konventioneller, mineralischer Dämmung bietet sich unter anderem ein Asphaltestrich an. Soll ein Zementestrich auf einer EPS-Dämmung eingebracht werden, so muss, entgegen manchmal geäußerter Befürchtungen, die Estrichdicke auch bei großen Dämmdicken nicht über die übliche Auslegung hinaus erhöht werden. Genauso wenig ist wegen der Elastizität des Dämmstoffs

eine Bewehrung des Estrichs nötig. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass eine Zusammendrückung von Wärmedämmstoffen aus EPS für die im Wohnbau auftretenden Lasten praktisch keine Rolle spielt und daher für die Bemessung des Estrichs zu vernachlässigen ist (vgl.[62]).

#### 4.3.2.2 *Unter der Kellerdecke*

Eine besonders kostengünstige Form der nachträglichen Gebäudedämmung ist die Dämmung unterhalb der Kellerdecke. Einschränkungen gibt es hier oft durch sowieso schon recht geringe Deckenhöhen im Keller, die keine großen Dämmdicken zulassen. Außerdem muss bei der Ausführung der Kellerdeckendämmung darauf geachtet werden, dass Türen oder Fenster, deren Oberkante nur einen geringen Abstand zur Decke hat, auch nach Ausführung der Dämmmaßnahme noch aufschwingen können. An der Kellerdecke befinden sich oft Wasser- und Heizungsrohre, die eine einfache Montage von Dämmplatten erschweren. Absperrventile usw. müssen weiterhin frei zugänglich bleiben und dürfen nicht durch Dämmstoff verdeckt werden (siehe Abbildung 56). Ist die Kellerdecke feucht, so muss zuerst die Ursache der Durchfeuchtung gesucht und behoben werden.



**Abbildung 56** Kellerdeckendämmung mit halb und ganz integrierten gedämmten Warmwasserleitungen und Aussparungen für die Absperrventile (Quelle: PHI, [203])

Dämmplatten können einfach an die Kellerdecke geklebt, geschraubt oder gedübelt werden. Grundsätzlich ist im Kellerbereich meist keine hochwertige Sichtoberfläche der Dämmung nötig. Eine Spachtelung der Dämmplatten kann aber trotzdem vorteilhaft sein, um Wärmeverluste durch Konvektion in Fugen zwischen und über den Platten zu reduzieren. Aus dem gleichen Grund sollten bei der Verwendung von Dämmplatten Produkte mit einem vorgefertigten Nut- und-Feder-System bevorzugt werden.

#### 4.3.2.3 *Perimeterdämmung/Dämmschürze*

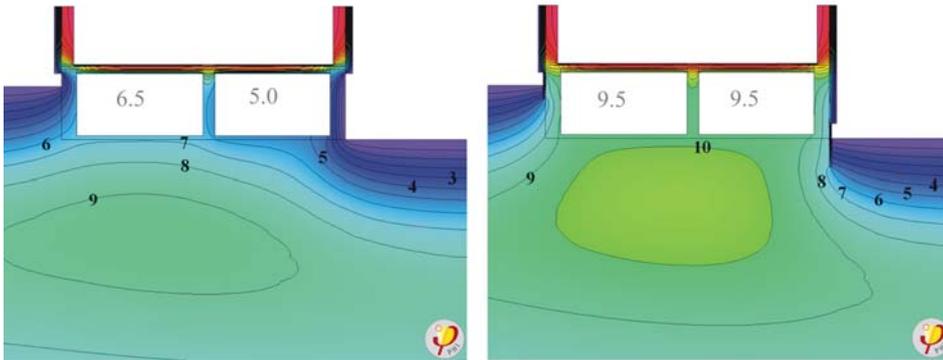
Auch durch eine sogenannte Dämmschürze kann die Kellertemperatur angehoben werden und so eine Verbesserung des Wärmeschutzes oder eine Verhinderung von Schimmelpilzbildung wegen zu niedriger Bauteiltemperaturen erreicht werden [232]. Dazu wird die Außenwanddämmung bis zum Erdreich oder sogar als Perimeterdämmung bis zum Kellerwandfundament weitergeführt. Für letzteres sind Erdarbeiten nötig, so dass diese Maßnahme sich vor allem

anbietet, wenn die Kellerwände ohnehin aufgedigelt werden müssen, zum Beispiel, um die Wand gegen Bodenfeuchtigkeit abzudichten. Alternativ kann im Einzelfall auch eine horizontale Dämmschürze, die in geringerer Tiefe und einer jeweils zu ermittelnden Breite rund um das Haus läuft kostengünstiger sein. Da für die Wirksamkeit der Maßnahme jahreszeitliche Speichereffekte des Erdreichs eine große Rolle spielen, empfiehlt sich eine dynamische Simulationsberechnung zur Bestimmung der tatsächlich erzielbaren Energieeinsparung. Abbildung 58 zeigt, wie durch eine Dämmung der freiliegenden Kelleraußenwände, welche als Dämmschürze ins Erdreich verlängert wird, die Erdreichtemperaturen unter dem Kellerfußboden und die Kellerinnentemperaturen im Winter angehoben werden können. Dies reduziert den Wärmeverlust über die Kellerdecke und vor allem auch über die Kellerwände signifikant.

Dämmschürzen können besonders auch bei nicht unterkellerten Bodenplatten in speziellen Fällen empfohlen werden.



**Abbildung 57** *Muss die Kellerwand ohnehin für das Aufbringen einer Feuchtigkeitssperre aufgedigelt werden, so ist die gleichzeitige Anbringung einer Wärmedämmung im Erdreich sinnvoll. (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Ingolstädter-Str., WGB Nürnberg)*



**Abbildung 58** Isothermenbild einer dynamischen Simulation am 1. Februar [231]  
 links: ohne Wärmedämmung der Kellerwände  
 rechts: Kellerwände wärmegeprägert, Dämmung ca. 1 m tief mit 80 mm Stärke ins Erdreich verlängert (Dämmschürze) (Quelle: PHI)

Gibt es bestehende Kellerfenster, so ist es am einfachsten, diese mit zu überdämmen (Abbildung 59). Dadurch verlieren sie allerdings selbstverständlich ihre Funktion zur Belichtung und Belüftung. Es muss dann geprüft werden, ob eventuell eine mechanische Abluftanlage zur Kellerbelüftung nötig ist. Diese kann über Sensoren, die die Feuchte der Innen- und der Außenluft messen gesteuert werden. Diese Steuerung verhindert, dass es an schwülwarmen Sommertagen zu übermäßigem Feuchteintrag in den Keller kommt, was sonst zu Kondensatbildung an den kalten Kellerbauteilen führen könnte.



**Abbildung 59** Mit Dämmblöcken verschlossene Kellerfenster - die ganze Außenwand wurde nachfolgend bis knapp über OK-Erdreich wärmegeprägert. (Quelle: PHI, [203])

#### 4.3.3 Wärmebrücken

Bei der energetischen Altbausanierung treten beim Übergang zwischen beheiztem Erdgeschoss und kaltem Keller meist die größten unvermeidbaren Wärmebrücken auf. Der Grund dafür ist, dass hier die lastabtragenden Wände die Dämmebene durchstoßen. Eine thermische Entkopplung der Wände in dieser Ebene wäre theoretisch durch ein Aufschneiden und schrittweise Ersetzen des alten Wandbaustoffs in der Dämmebene durch einen tragfähigen Baustoff geringerer Wärmeleitfähigkeit möglich. Diese Maßnahme ist aber sehr aufwändig und daher im Allgemeinen nicht wirtschaftlich durchführbar. Als Alternative bleibt (neben der Erstellung einer sogenannten Dämmschürze, siehe Abschnitt 4.3.2.3) die Möglichkeit den Weg der Wärme in den Wänden

**Verminderung der Wärmebrückenwirkung von Kellerwänden durch Begleitdämmung.**

durch eine Begleitdämmung (Flankendämmung) zu verlängern. Dies gilt sowohl für Außenwände als auch für Keller-Innenwände. Sinnvolle Längen der Begleitdämmung liegen zwischen 50 cm für Mauerwerkswände im Bereich von  $\lambda = 0,8 \text{ W/(mK)}$  und 100 cm für Wände aus Materialien größerer Wärmeleitfähigkeit (z.B. Stahlbeton). Auch bei der Begleitdämmung muss bei der Ausführung eine Hinterlüftung der Dämmung sorgfältig vermieden werden. Fugen über 5 mm sollten vom Plattenrand aus z.B. mit PU-Ortschaum verschlossen werden [232].

#### 4.3.3.1 Sockelwärmebrücke

Ein Beispiel zeigt Abbildung 61. Durch die Begleitdämmung werden die durch die Sockelwärmebrücke verursachten zusätzlichen Wärmeverluste um 80 % reduziert. Dadurch sinkt der Heizwärmebedarf für dieses Gebäude um ca.  $1,5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ . Außerdem kann in diesem Fall durch die Begleitdämmung verhindert werden, dass die Temperaturen auf der Bauteilinnenseite so weit absinken, dass sich Kondensat und in der Folge Schimmel bilden können.



**Schimmelbildung an einer Außenecke im Sockelbereich aufgrund zu geringer Oberflächentemperaturen (Schulze Darup)**



**Abbildung 60 Konventionelle Sanierung: Unzureichende Wärmedämmung der Außenwand nur bis UK-Kellerdecke (Quelle: PHI)**



**Abbildung 61 Bauphysikalisch bessere Ausführung: Sockelbegleitdämmung außen (links) und innen (rechts) während der Montage (Quelle: PHI, [203])**

#### 4.3.3.2 Keller-Innenwände

Thermisch nicht getrennte Keller-Innenwände stellen ebenfalls eine bedeutende Wärmebrücke dar. Auch hier ist im Altbau meist die einzige gangbare Möglichkeit diese zu entschärfen, eine Begleitdämmung anzubringen. Allerdings ist die Gefahr von Tauwasserschäden durch wärmebrückenbedingt kalte Bauteil-Innenoberflächen aufgrund der im Vergleich zur Außenluft während der Heizperiode höheren Temperaturen im Keller sehr viel geringer als bei der Sockelwärmebrücke. In den im Folgenden beschriebenen Beispielen bleiben die Oberflächentemperaturen auch in der schlechtesten Ausführung immer über 16 °C. Die Bemessung der Begleitdämmung erfolgt also vor allem nach dem angestrebten Wärmeschutz.

In Abbildung 62 ff wurden verschiedene Varianten einer Begleitdämmung bei einer gemauerten Kellerwand, die eine im Altbau nachträglich angebrachte Kellerdeckendämmung durchstößt, mit einem Wärmestromprogramm berechnet. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei den im Altbau häufig vorkommenden Mauerwerks-Kellerwänden in den meisten Fällen eine Begleitdämmung von ca. 50 cm Höhe und 50 - 100 mm Stärke eine sinnvolle Richtgröße ist. Im Einzelfall sollten aber für eine Energiebilanz des Gebäudes Wärmebrückenberechnungen für die tatsächlich bestehende Situation vorgenommen werden.

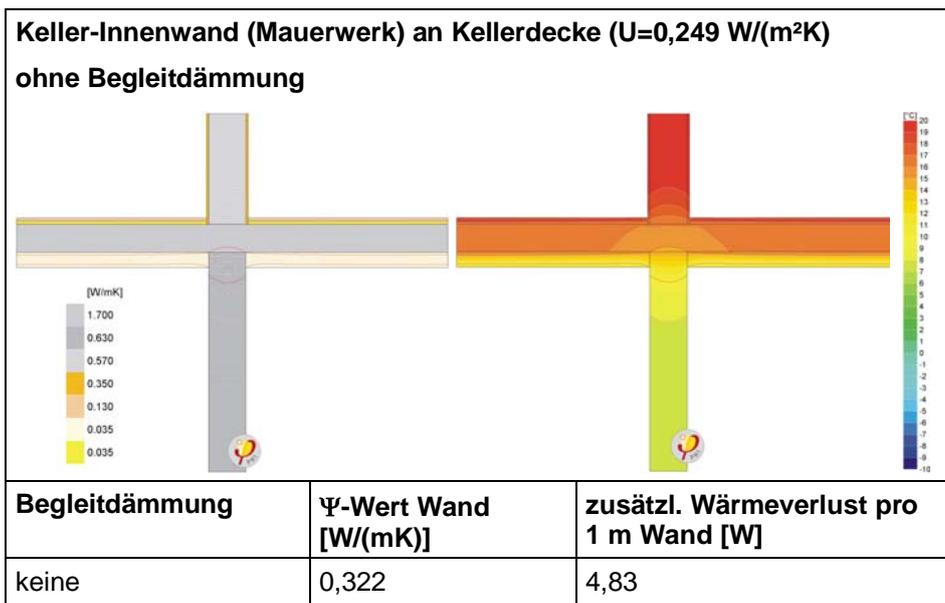


Abbildung 62 (Quelle PHI, [135])

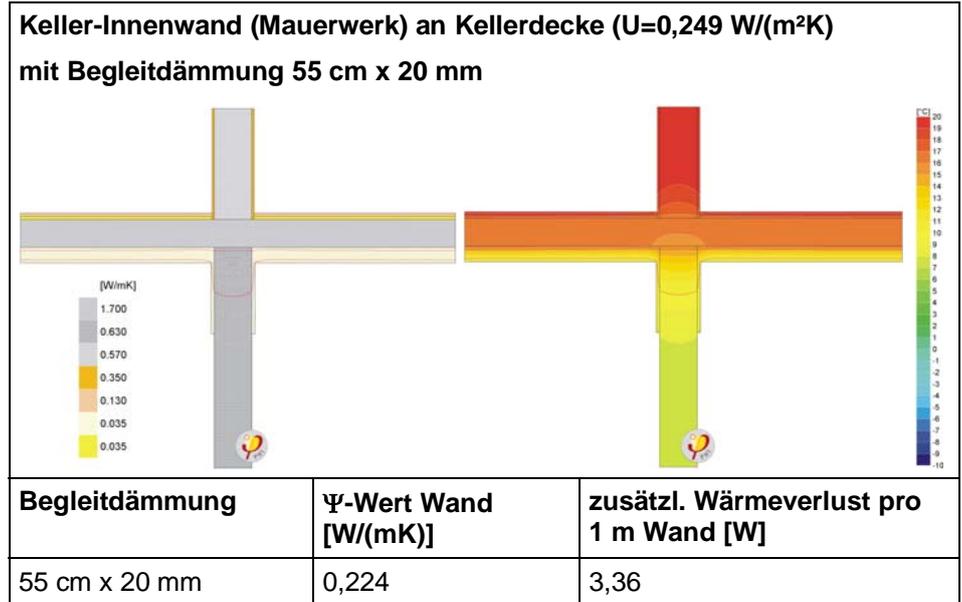


Abbildung 63 (Quelle: PHI, [135])

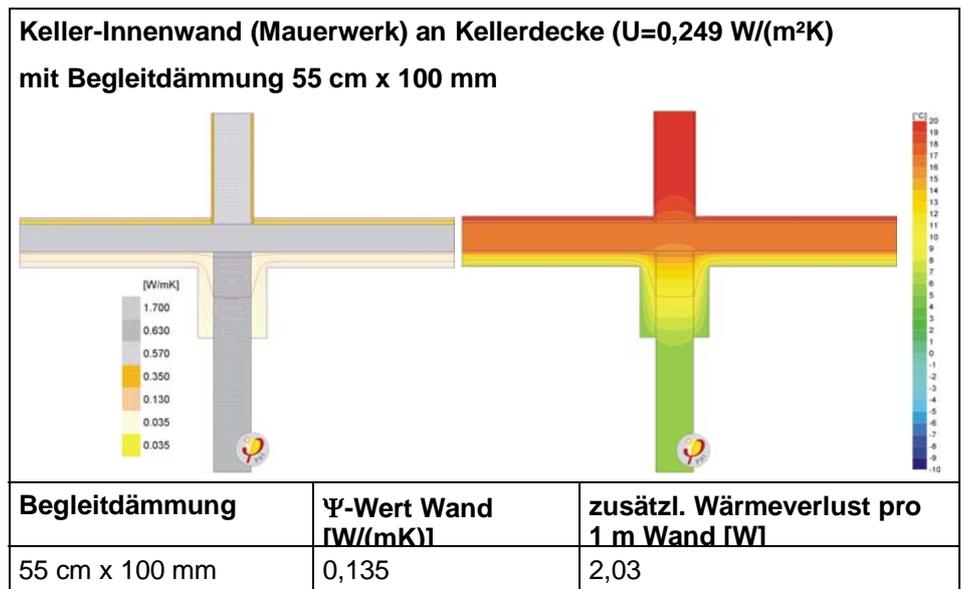


Abbildung 64 (Quelle: PHI, [135])

4.3.3.3 Stützen

Grundsätzlich verursachen Wände durch ihre größere Schnittfläche mit der Kellerdecke ungleich höhere Wärmeverluste als Stützen. Dies wird beim beispielhaften Vergleich einer Stahlbetonkellerwand mit einer Stahlbetonstütze deutlich. 6 laufende Meter Wand ohne Begleitdämmung erzeugen im Vergleich zur ungestörten, gedämmten Decke im Auslegungsfall einen zusätzlichen Wärmeverlust von 64 W. Ersetzt man im Rechenmodell die 6 m lange Wand durch eine Stütze, so verursacht diese trotz einer insgesamt höheren Wärmeleitfähigkeit aufgrund eines erhöhten Bewehrungsgrads, nur einen zusätzlichen Wärmeverlust von 9 W. Trotzdem ist natürlich auch bei Kellerstützen eine Begleitdämmung sinnvoll (vgl. [233]).

#### 4.3.3.4 Treppenhaus

Ist im Bestand eine Treppe, die direkt vom Erdgeschoss in den unbeheizten Keller führt, vorhanden, stellt diese, wenn die Kellerdecke gedämmt wird, eine schwerwiegende Wärmebrücke, sowie, wenn es sich um einen offenen Abgang ohne Tür handelt, eine Unterbrechung der luftdichten Ebene dar. Ein ungedämmter, offener Kellerabgang kann mit einem äquivalenten U-Wert von  $12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (vgl. [63]) angesetzt werden, was z.B. bei  $4,5 \text{ m}^2$  Grundfläche im Auslegungsfall einem Wärmeverlust von  $729 \text{ W}$  (vgl. [64]) entspricht. Dieser Zustand sollte daher im Rahmen einer energetischen Modernisierung vor allem bei kleineren Gebäuden unbedingt verbessert werden. Im Folgenden werden Lösungsstrategien sowohl für Einfamilien- und Reihenhäuser als auch für Geschosswohnungsbauten vorgestellt.

**Offene Treppenhäuser  
zum kalten Keller können  
beträchtliche  
Wärmeverluste  
verursachen.**

##### 4.3.3.4.1 Kellertreppen bei Einfamilien- und Reihenhäusern

Bei kleineren Wohngebäuden fallen die Wärmeverluste durch einen nicht optimal ausgeführten Kellerabgang besonders ins Gewicht, da sie in Relation zu einer nur relativ geringen Geschossfläche stehen. Grundsätzlich gibt es hier drei Möglichkeiten mit der Kellertreppe umzugehen, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben (vgl. [64]). Welche Lösung die sinnvollste ist, muss im Einzelfall entschieden werden.

##### *Kellertreppe wird Teil der beheizten Zone*

Vorteile sind hier die offene Gestaltung des Wohnbereichs im EG mit sichtbarer räumlicher Durchdringung der Geschossebenen und ein grundsätzlich ausreichendes Raumangebot für Dämmschichten. Allerdings muss im unteren Antrittsbereich der Treppe in der Regel auch ein Teil des Kellerbodens gedämmt werden. Eine Wärmebrücke verbleibt meist am unteren Treppenaufleger.

Schließt die Kellertreppe an eine Außenwand oder an die Wand zu einem Nachbargebäude an, z.B. bei einer Reihenhausezeile, so entsteht eine kaum vermeidbare Wärmebrücke (Abbildung 65). Am Fußpunkt der Treppe muss eine hochwertige Kellertür vorgesehen werden, die sowohl eine gute Wärmedämmung als auch eine zuverlässige Luftdichtigkeit gewährleistet.



**Abbildung 65** Wärmebrücke Kellerwand (Quelle: PHI, [64])

##### *Kellertreppe wird Teil des kalten Kellers*

Dies ist in vielen Fällen die einfachste und kostengünstigste Lösung. Die Dämmung sollte wiederum auf der kalten Seite der Umschließungsflächen des Treppenraumes liegen, diesmal also dem Treppenlauf zugewandt. Der für die Dämmung verfügbare Raum wird hierbei meist begrenzt sein. Die gedämmte,

luftdichte Kellertür sollte sich in diesem Fall ebenfalls wieder in der Dämmebene, das heißt am oberen Treppen-Ende befinden.



**Abbildung 66** Deckendämmung und Begleitdämmung der Wände bei der Kellertreppe eines Geschosswohnungsbaus nach der Sanierung (Quelle: PHI, [203])

*Keller ist nur vom kalten Bereich aus zugänglich*

Dies ist sowohl hinsichtlich des Wärmeschutzes als auch in der baupraktischen Durchführung die bevorzugte Lösung, da es keinerlei Durchdringungen der thermischen Gebäudehülle für die Kellertreppe gibt. Durch Anbau eines „Wintergartens“ ist auch bei schlechtem Wetter ein bequemer und geschützter Zugang zum Keller möglich.

**Energetisch ist der Kellerzugang von außen die günstigste Lösung.**

*4.3.3.4.2 Kellertreppen bei großen Gebäuden*

Geschosswohnungsbauten im Bestand sind fast immer unterkellert und weisen dann ein Treppenhaus auf, das die warmen Wohngeschosse mit dem unbeheizten Keller verbindet. Hier entstehen genauso wie bei kleineren Gebäuden Wärmeverluste durch die Wärmebrücke des Treppenlaufs und der durchgehenden Treppenhauswände. Bei offenen Treppenhäusern kommen noch Wärmeverluste durch Luftaustausch und Wärmestrahlung hinzu. Allerdings ist der Einfluss der Durchdringung der thermischen Gebäudehülle durch das Treppenhaus auf den spezifischen Heizwärmebedarf bei großen Geschosswohnungsbauten geringer, weil er in Relation zu einer größeren Geschossfläche steht. Die Anforderungen an den Wärmeschutz sind daher an diesem Punkt unter Umständen nicht ganz so streng wie bei Einfamilienhäusern. Lokal muss dennoch untersucht werden ob sich durch übermäßige Wärmeverluste an einzelnen Bauteilen Tauwasser niederschlagen kann, ob in einzelnen Räumen eine höhere Heizlast entsteht, die nicht mehr durch reine Zuluftheizung gedeckt werden kann und ob Komfortprobleme durch Strahlungsasymmetrie und Kaltluftkonvektion auftreten.

**Bei großen Gebäuden fallen die Wärmeverluste über bis in den kalten Keller reichende Treppenhäuser häufig weniger stark ins Gewicht.**

Im Rahmen des Möglichen sollten aber auch bei größeren Gebäuden Wärmeverluste durch den Kellerabgang vermieden werden. Sind die Treppenhauswände aus Stahlbeton, so stellen sie besonders wirksame

Wärmebrücken dar. Diese können ähnlich wie bei anderen Kellerwänden durch eine Begleitdämmung (siehe 4.3.3.2) zumindest entschärft werden. Allerdings sollte bei Stahlbetonwänden aufgrund der gegenüber Mauerwerkswänden zwei- bis dreifachen Wärmeleitfähigkeit die Begleitdämmung mindestens 1 m weit heruntergezogen werden. Auf der Treppenhaus-Innenseite muss es sich bei bestehenden Brandschutzanforderungen um einen nichtbrennbaren Dämmstoff handeln.

Für ein 8-geschossiges Wohngebäude mit zusätzlich einem warmen Keller- und zwei kalten Tiefgaragengeschossen wurde untersucht welche Wärmeverluste durch das alle 11 Geschosse verbindende Treppenhaus entstehen [vgl. [63]]. Das Treppenhaus war weder zu den beheizten Wohngeschossen, noch zur kalten Tiefgarage gedämmt (Abbildung 67). In einem solchen Treppenhaus treten Wärmeverluste der warmen zu den kalten Geschossen durch Luftaustausch, Luftströmungen (Konvektion, Undichtigkeiten) und Strahlungsaustausch auf. Der Wärmeverlust durch Luftströmungen wird allerdings durch die Ausbildung einer Temperaturschichtung im Treppenhaus verringert. Es zeigte sich dass Strömungen, die durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle (insbesondere der Zugangstüren) und durch Türöffnungsvorgänge verursacht werden, die Stabilität dieser Schichtung stören können. Daher ist auch bei „offenen“ Treppenhäusern die Luftdichtigkeit der Treppenhauswände und -türen (Abbildung 67) zu unbeheizten Bereichen besonders wichtig. Das Angebot für wärmegeämmte und luftdichte Brandschutztüren ist derzeit allerdings noch nicht groß. Eine beispielhafte Auswahl zeigt Tabelle 5.

Es zeigte sich aber auch, dass bei einem so großen Gebäude die Wärmeverluste durch ein durchgehendes Treppenhaus für die Energiebilanz und den thermischen Komfort kein Problem sind. Als ein Ergebnis der Studie wurde festgestellt, dass für Öffnungen in der thermischen Hülle durch einen Treppenhausschacht ein äquivalenter U-Wert für alle Wärmetransportvorgänge gemeinsam (außer Infiltration) von  $12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angesetzt werden kann.



**Abbildung 67** Links: Gebäudeschnitt mit von der Tiefgaragenebene bis ins oberste Geschoss durchgehender Treppe; Mitte und rechts: Tür vom Treppenhaus zur Tiefgarage mit Absenkdichtung (Quelle: PHI, [63])

Hersteller	Modell	Brandschutz	U <sub>b</sub>	Leckage
DANA-Türenindustrie G.m.b.H	Passivhaustür	T 30	0,8	keine Angabe
HOBA Holzbau Schmidt GmbH & Co. KG	Laubengangtür Typ 9	T 30	1,3	9 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h) 100 Pa
VARIOTEC Sandwichelemente GmbH&Co.KG	Multifunktionstür	T 30 / T 60	0,58	1.3 m <sup>3</sup> /(hm) 100 Pa

**Tabelle 5** *Beispielhafte, ausgewählte luftdichte und wärmegeämmte Türen (Herstellerangaben ohne Anspruch auf Vollständigkeit, ohne Gewähr) (vgl. [64])*

#### 4.3.4 Luftdichtheit

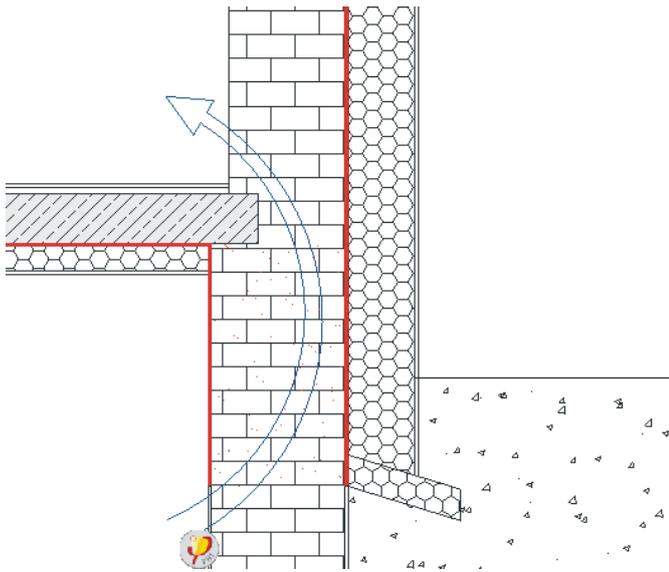
**Die Dämmung auf der Kellerdecke stellt eine Innendämmung dar.**

Die Dämmung *auf* der Kellerdecke stellt grundsätzlich eine Innendämmung dar, mit den bekannten, bauphysikalischen Gefahren der Bildung von Tauwasser auf der kalten Seite der Dämmung bei unsachgemäßer Ausführung. Grundsätzlich sollte daher die luftdichte Ebene bei Dämmung auf der Kellerdecke an der Oberseite der Dämmung liegen - d.h. bauphysikalisch richtig im warmen Bereich. Dies gilt nicht für Dämmung auf einer nicht unterkellerten Bodenplatte (siehe Kapitel 4.4) und ebenfalls nicht bei nur geringen Dämmdicken, die durch eine Dämmung unterhalb der Kellerdecke ergänzt werden.

Liegt die luftdichte Ebene oberhalb der Dämmung auf der Kellerdecke, so ist es vorteilhaft auch bei den aufgehenden Erdgeschoss-Außenwänden die luftdichte Ebene auf die Innenseite zu legen, weil es sonst zu Unterbrechungen der luftdichten Ebene kommt. Die Luftdichtheitsfolie muss dann an den Rändern sorgfältig an den raumseitigen Putz der Erdgeschosswände angedichtet werden. Hierfür sind beispielsweise Klebebänder mit Einputzgewebe geeignet.

Liegt die luftdichte Ebene direkt oberhalb der vorhandenen Kellerdecke, so kann sie durch einen dünnen (ab 20-30mm) Anhydritestrich gebildet werden. Dies bietet sich zum Beispiel bei den im Altbau häufig vorkommenden Hohlsteindecken an. Hohlsteindecken sind im Gegensatz zu massiven Stahlbetondecken auf Grund von häufig vorhandenen Rissen nicht per se luftdicht. Um eine durchgängige luftdichte Ebene zu erzeugen, muss der raumseitige Wandputz direkt an den Estrich anschließen und darf nicht schon einige Zentimeter oberhalb des Fußbodens aufhören.

Gibt es im Bereich der Wände einen Versprung in der luftdichten Ebene (siehe Abbildung 68), so kann normalerweise nicht von einer ausreichenden Luftdichtheit ausgegangen werden, da Mauerwerk an sich nicht luftdicht ist. Unter Umständen kann aber durch eine Verlängerung der luftdichten Ebene am Mauerwerk entlang eine kumulierte Luftdichtheit über den von dieser Verlängerung umschlossenen Mauerwerksabschnitt erzeugt werden, was dann zu einer ausreichenden Luftdichtheit an dieser Stelle führen kann. Dies wurde zumindest an einem so ausgeführten Sanierungsprojekt mit einer Vollziegel-Mauerwerkswand nachgewiesen [65]. Dieses Ergebnis kann aber mit Sicherheit nicht auf Hochlochziegel oder modernes Mauerwerk mit offenen Fugen übertragen werden.



**Abbildung 68** Versprung der Luftdichtheitsebene im Sockelbereich. Die kumulierte Luftdichtheitswirkung der Mauerwerkswand hängt stark von der Art der Mauerziegel und -fugen ab. (Quelle: PHI)

## 4.4 Bodenplatten auf Erdreich

### 4.4.1 Grundlagen

Ist ein Gebäude nicht unterkellert, so ist es bei Neubauten bauphysikalisch am unproblematischsten die Wärmedämmung unterhalb der Bodenplatte auf dem Erdreich zu verlegen. Bei Altbausanierungen ist das aus naheliegenden Gründen nicht möglich. Es bleibt nur die Dämmung auf der Bodenplatte, welche eine bezüglich des Feuchteverhaltens prinzipiell schadensanfälliger Innendämmung darstellt. Zudem entstehen im Bereich der aufgehenden EG-Wände unvermeidbare Wärmebrücken. Im Neubaubereich kann man bei Dämmung auf der Bodenplatte die in der Dämmebene liegenden ersten ein bis zwei Steinreihen der Wände zur Wärmebrückenvermeidung in einem besser wärmedämmenden Material ausführen (z.B. Porenbeton). Bei der Altbausanierung ist das nur bei Wänden möglich, die im Zuge einer Grundrissänderung neu aufgebaut werden. Ein weiteres Problem ist, dass auf der Bodenplatte ähnlich wie bei der Dämmung auf der Kellerdecke aus verschiedenen Gründen (vgl. Abschnitt 4.3.2.1 „Auf der Kellerdecke“) oft nicht die wirtschaftlich und bauphysikalisch optimale Dämmdicke aufgebracht werden kann.

Die ausreichende Wärmedämmung einer bestehenden Bodenplatte auf dem Erdreich ist also eine nicht ganz einfache Aufgabe. Es liegen zur Zeit auch noch relativ wenige Beispiele aus der Praxis für eine Sanierung mit Passivhauskomponenten für ein nicht unterkellertes Gebäude vor. Dennoch sollte fast immer eine Wärmedämmung möglich sein, die eine ausreichende thermische Behaglichkeit im Erdgeschoss herstellt und gleichzeitig zumindest zu einer signifikanten Reduzierung der Wärmeverluste über die Bodenplatte führt. Der folgende Abschnitt zeigt die vorhandenen Möglichkeiten und potentiellen Fehler auf.

#### 4.4.1.1 *Wärmeverluste über das Erdreich - Ermittlung des Reduktionsfaktors*

Die Schwierigkeiten bei der Herstellung eines ausreichenden Wärmeschutzes auf der Bodenplatte werden glücklicherweise dadurch abgemildert, dass bei Bauteilen, die ans Erdreich angrenzen, auf Grund der vorhandenen Dämmwirkung und Wärmespeicherkapazität des Erdreichs immer ein Reduktionsfaktor auf den Wärmeverlust angerechnet werden kann. Der Wärmeverlust in der Heizperiode ist hier immer geringer, als bei einem Bauteil gleichen U-Werts, das an die Außenluft grenzt. In den meisten Fällen ist ein Wert von 0,5 auf der sicheren Seite. Ausnahmen können bei relativ kleinen Einfamilienhäusern auftreten, so dass hier auf jeden Fall eine Berechnung durchgeführt werden sollte, um eine Unterschätzung des Wärmeverlusts über die Bodenplatte zu vermeiden [66].

Mit der europäischen Norm EN ISO 13370 [67] steht ein funktionierendes Verfahren zur Berechnung von Wärmeverlusten an das Erdreich im mitteleuropäischen Klima zur Verfügung. Mit einigen Korrekturen und Anpassungen ist dieses Verfahren in das Passivhaus Projektierungs Paket [17] im Tabellenblatt „Erdreich“ übernommen worden und erlaubt hier, wenn die Randbedingungen bekannt sind, eine ausreichend genaue Berechnung des Reduktionsfaktors für das Jahresverfahren bzw. der Erdreichtemperaturen für das Monatsverfahren [222].

#### 4.4.1.2 *Vermeidung von Feuchteschäden Bodenfeuchtigkeit*

Im gewachsenen Erdreich muss man von vorliegenden 100 % Bodenfeuchtigkeit ( $a_w=100\%$  entsprechend 100% Luftfeuchtigkeit in eingeschlossenen Hohlräumen) ausgehen (vgl. [62]). Die Bodenfeuchte kann durch Hohlraumdiffusion oder, wenn eine kapillarbrechende Schicht (Schotter-, Kiesschüttung) im Altbau nicht vorhanden ist, durch kapillaren Wassertransport zur Bodenplatte gelangen. Berechnungen zur Wasseraktivität auf der Bodenplatte eines Neubaus (mit kapillarbrechender Schicht) ergaben, dass der  $a_w$ -Wert von 80 %, ab dem die Gefahr von Schimmelbildung besteht, zu allen Zeiten auf der gesamten Plattenoberseite überschritten wurde (vgl. [62]).

**Eine Abdichtung gegen aufsteigende Bodenfeuchtigkeit ist unbedingt erforderlich.**

Eine Bauteilabdichtung gegen Bodenfeuchtigkeit ist daher zwingend erforderlich. Weil unter der Abdichtung nach wie vor ideale Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze (bzgl. Feuchtigkeit) herrschen, wird empfohlen, die Bodenplattenoberfläche vor Aufbringen der Sperre sorgfältig zu reinigen (Staubsaugen), um organische Substrate zu entfernen und so zur Charakterisierung „biologisch kaum verwertbare Inhaltsstoffe“ zu kommen. Die DIN 18195 [68] schreibt Feuchtesperren gegen Bodenfeuchtigkeit bei allen an das Erdreich grenzenden Bauteilen vor. Die Norm gibt Hinweise zu Materialien und Ausführungsarten der Bodenplattenabdichtung.

#### *Raumluftfeuchte (Tauwasser)*

Bei Innendämmung wird normalerweise eine wirksame luftdichte Dampfbremse auf der warmen Seite der Dämmung empfohlen, um zu verhindern dass Feuchtigkeit aus der Raumluft über Diffusion oder Konvektion auf die kalte Seite der Dämmung gelangt und dort kondensiert. Die Bodenplattendämmung stellt hier jedoch eine Ausnahme dar.

Wird bei einer Dämmung auf einer Bodenplatte gegen Erdreich raumseitig auf der Dämmung eine Dampfbremse angebracht, so steigt die Wasseraktivität in der Dämmung auf Werte über 80 % an. Bezüglich der Feuchtigkeit sind dann also die Bedingungen für Schimmelpilzwachstum erfüllt (vgl. [62]). Die relative Feuchte der Raumluft hat selbstverständlich einen entscheidenden Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit von Tauwasserbildung auf der Bodenplatte. Dies ist ein weiterer Grund für die Installation einer mechanischen Lüftungsanlage zur Sicherstellung des hygienisch notwendigen Luftwechsels wodurch gleichzeitig die Raumluftfeuchte im Winter relativ niedrig bleibt.

Neben der Vermeidung erhöhter Raumluftfeuchten in der Heizperiode (über 40 % rel. F.) kann die relative Feuchte oberhalb der Horizontalsperre auf der Bodenplatte vor allem durch die Anhebung der Temperaturen an dieser Stelle verringert werden. Dies kann durch eine Reduzierung der Dämmdicken sowie durch die Wärmeableitung durch die im Altbau sowieso vorhandenen Wärmebrücken der EG-Wände erfolgen. Beim Neubau sollten Dämmdicken von 250 mm ( $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$ ) nicht überschritten werden, beim Altbau sollte dieser Wert aufgrund der ungünstigeren Randbedingungen wahrscheinlich noch weiter reduziert werden.

#### 4.4.2 Konstruktionen und Materialien

##### 4.4.2.1 Dämmschürzen

Der Erhöhung der Bodenplattentemperatur zum Tauwasserschutz steht an sich die gewünschte Reduzierung der Wärmeverluste über die Bodenplatte entgegen. Eine Möglichkeit diese beiden scheinbar gegensätzlichen Ziele unter einen Hut zu bringen ist die Ausbildung einer sogenannten Dämmschürze [232]. Hierbei wird die Außenwanddämmung entlang der Außenwandfundamente vertikal ins Erdreich hinein verlängert. Wenn dies beim spezifischen Projekt günstiger zu verwirklichen ist, ist auch eine horizontal oder im 45°-Winkel verlaufende Dämmschürze möglich, bei etwas reduzierter Wirksamkeit gegenüber der vertikalen Lösung. Ein Nagerschutz (Kunststoffgewebe) für die Dämmschürze ist grundsätzlich erforderlich. Wie wirksam die Dämmschürze ist kann annähernd mit dem Tabellenblatt „Erdreich“ aus dem Passivhaus Projektierungs Paket [17] ermittelt werden.

##### 4.4.2.2 Empfehlungen für Dämmung auf einer Bodenplatte gegen Erdreich

- Die Dämmung sollte zum Raum hin diffusionsoffen sein (vgl. [62]).
- Die luftdichte aber diffusionsoffene Ebene sollte raumseitig liegen.
- Die Temperatur an der „kalten“ Seite der Wärmedämmung sollte möglichst hoch sein.
- Auf der Bodenplatte muss eine Horizontalsperre gegen Bodenfeuchtigkeit ausgeführt werden. Unter der Sperre sollten keine für Schimmelpilze verwertbaren organischen Materialien vorhanden sein.
- Eine Dämmschürze als Verlängerung der Außendämmung ins Erdreich hinein kann die Lösung für Probleme bei der Ausführung der

**Die Dämmung auf der Bodenplatte sollte zum Innenraum hin diffusionsoffen ausgeführt werden.**

Bodenplattendämmung bei der Altbausanierung sein. Trotzdem sollte auf eine Dämmung der Bodenplatte nicht vollständig verzichtet werden.

- Kapillarleitende Dämmstoffe (Zellulose) im Zusammenspiel mit einem nach innen diffusionsoffenen Bodenaufbau können von Vorteil sein weil sie eine schnellere Austrocknung der Dämmung ermöglichen [(vgl. [70]), (siehe auch Abschnitt 7.5.5.2 „Flüssigwassertransportmechanismen“)]

## 4.5 Oberste Geschossdecke

Eine nachträgliche Wärmedämmung empfiehlt sich nicht nur bei Bauteilen, die an die Außenluft angrenzen, sondern auch, wenn Wärmeverluste zu dauerhaft unbeheizten Räumen auftreten. Dies ist zum Beispiel bei einer obersten Geschossdecke, die an einen nicht ausgebauten Dachraum grenzt, der Fall. Die hier auftretenden Wärmeverluste durch Wärmetransmission und Fugenlüftung können erheblich sein. Im wettergeschützten Dachraum lässt sich eine Dämmung einfacher und kostengünstiger als an den meisten anderen Bauteilen realisieren. Auch eine Ausführung in Eigenleistung ist oft möglich. Wenn die Dämmdicke nicht durch räumliche Gegebenheiten eingeschränkt wird, sollte die Möglichkeit genutzt werden, auch hier gleich ein hochwertiges, zukunftsfähiges Bauteil zu schaffen. Der finanzielle Zusatzaufwand für eine größere Dämmdicke ist moderat.



**Abbildung 69** Mehrschichtige Dämmung der obersten Geschossdecke mit EPS. Vorne im Bild die Dampfbremse zwischen dem alten Dielenbelag und der Dämmung. (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Jean-Paul-Platz, WBG Nürnberg)

### 4.5.1 Grundlagen

In der Vergangenheit kam es vor, dass entsetzte Bauherren nach der nachträglichen, oberseitigen Dämmung der obersten Geschossdecke über an der Deckenunterseite austretendes Wasser berichteten (vgl. [65]). Ursache ist meist eine falsche Ausführung in Unkenntnis der bauphysikalischen Zusammenhänge. Auf die bestehende (undichte) Geschossdecke wurde eine

**Auch bei der Dämmung der obersten Geschossdecke sollte der Diffusionswiderstand von innen nach außen abnehmen.**

Wärmedämmung aufgebracht und darauf ein Estrich. Beim Aufbringen eines Zementestrichs verwenden die Estrichleger meist eine PE-Folie, um zu verhindern, dass der Zementmörtel in die Fugen zwischen den Dämmplatten eindringt. Diese (nur als „Rieselschutz“ gedachte) Folie hat aber zugleich eine dampfsperrende Wirkung - und sie sitzt auf der kalten Seite der Konstruktion. Feuchtwarme Innenraumluft kann nun durch die undichte Decke und durch Fugen an den Stößen zwischen den Dämmplatten konvektiv bis an die Unterseite der kalten PE-Folie gelangen und führt dort zu teils massivem Tauwasseranfall.

Die bauphysikalisch korrekte Ausführung der Dämmung auf der obersten Geschossdecke sieht folgendermaßen aus:

- Auf der warmen Seite der Dämmung, d.h. zwischen Dämmung und oberster Geschossdecke ist eine sorgfältig ausgeführte Luftdichtheitsebene erforderlich.
- Entscheidend ist, dass die luftdichtende Lage nicht nur in der Fläche, sondern auch an allen Anschlüssen sowohl zwischen den Bahnen als auch an den Rändern oder bei Durchdringungen sorgfältig luftdicht angeschlossen wird.
- Die Wirksamkeit der Dämmung, die auf der Luftdichtheitsebene aufliegt, ist in allen Bereichen sicherzustellen. Wird nur eine Luftdichtheitsebene (Folie) ausgeführt, ohne dass eine ausreichende Überdeckung durch Wärmedämmung erfolgt, so ist von einer massiven Tauwasserbildung an der Unterseite der Folie auszugehen.
- Auf der kalten Seite der Dämmung sind dampfdichte Schichten zu vermeiden: Statt einer dampfdichten PE-Folie unter dem Zementestrich muss in diesem Fall ein diffusionsoffenes Papier als Rieselschutz verwendet werden.
- Auch vorhandene Treppenhausköpfe müssen komplett mit Dämmung und einer durchgängigen luftdichten Ebene „eingepackt“ werden. Dasselbe gilt für evtl. vorhandene Dachbodenluken.

#### 4.5.2 Konstruktionen und Materialien

##### 4.5.2.1 *Unter der obersten Geschossdecke*

Die Dämmung unter der obersten Geschossdecke stellt eine Innendämmung dar, mit den schon an anderer Stelle erwähnten Risiken bezüglich Tauwasserbildung im Bauteil. Diese Form der Dämmung sollte daher nur in Ausnahmefällen gewählt werden, wenn keine andere Position der Dämmebene in Frage kommt. Die Hinweise bezüglich der Vermeidung von Tauwasserschäden in Abschnitt 4.2 ab Seite 63 sollten sorgfältig beachtet werden.

##### 4.5.2.2 *Zwischen den Deckenbalken*

Bei Altbauten, die bis in die sechziger Jahre errichtet wurden, handelt es sich bei der obersten Geschossdecke auch bei Mauerwerksbauten meist um eine Holzkonstruktion. Es besteht die Möglichkeit nachträglich Wärmedämmung

zwischen den Balken einzubringen. Jedoch wird auch diese Variante auf Grund verschiedener, im Folgenden genannter Probleme eher die Ausnahme bleiben und höchstens ergänzend eingesetzt werden, wenn die Dämmdicke *auf* der obersten Geschossdecke durch räumliche Gegebenheiten begrenzt ist:

- Die Dämmdicke ist durch die vorhandene Balkenhöhe begrenzt. Zudem stellen die durchgehenden, meist kräftigen Balkenquerschnitte eine deutliche Wärmebrücke dar, welche den U-Wert der gedämmten Konstruktion üblicherweise um ca. 50 % verschlechtert.
- Das Einbringen der Dämmung erfordert recht umfangreiche Vorarbeiten, wie die Demontage der Dachbodendielen und das Entfernen der vorhandenen Deckenfüllung.
- Die Ausbildung einer luftdichten und dampfbremsenden Ebene auf der warmen Seite der Dämmung ist schwierig. Der vorhandene alte Deckenputz, meist auf Putzträgern wie Schilfmatten aufgebracht, ist oft rissig und reißt zudem an den Anschlüssen zu den Außen- und Innenwänden regelmäßig ab. Die einfachere „wellenförmige“ Verlegung der Dampfbremse vom Dachraum aus - unter der Dämmung aber jeweils über die Deckenbalken gezogen - kann aus bauphysikalischen Gründen nur empfohlen werden, wenn die Dämmung zwischen den Balken durch Dämmung auf der Decke ergänzt wird.

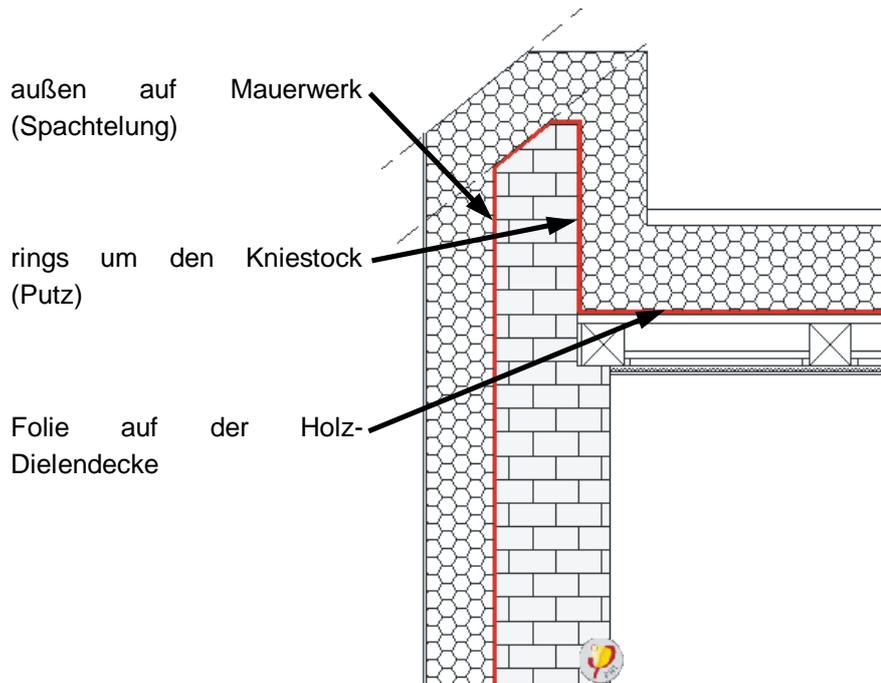
#### 4.5.2.3 *Auf der obersten Geschossdecke*

Die Dämmung *auf* der obersten Geschossdecke wird auf Grund der einfachen und kostengünstigen Realisierung in den meisten Fällen die bevorzugte Ausführungsart sein. Ist eine Begehbarkeit nicht gefordert, zum Beispiel bei Spitzböden mit nur geringer lichter Raumhöhe, so kann die Dämmung einfach auf die oberste Geschossdecke gelegt werden.

##### Exkurs

Für die Dämmung der obersten Geschossdecke enthielt schon die heute nicht mehr gültige Energieeinsparverordnung 2002 (EnEV 2002 [71]) eine Nachrüstpflicht. Sie schrieb eine nachträgliche Dämmung von nicht begehbaren aber zugänglichen obersten Geschossdecken mit einer Dämmdicke entsprechend einem nicht sehr ambitionierten U-Wert von  $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bis Ende 2006 vor. Für zu dieser Zeit genau nach EnEV-Anforderung gedämmte Decken ist eine Nachrüstung auf die bei heutigen und zukünftig zu erwartenden Energiepreisen ökonomisch optimale Dämmdicke von 28 - 36 cm ( $\lambda = 0,040 \text{ W}/(\text{mK})$ ; U-Wert:  $0,13 - 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) nun leider nicht mehr wirtschaftlich durchführbar (vgl. [159]). Dies macht augenscheinlich deutlich, dass es bei der Ausführung von Wärmedämmmaßnahmen nicht sinnvoll ist, nur ein Mindestmaß anzustreben. Es sollte vielmehr eine Dämmdicke realisiert werden, von der erwartet werden kann, dass sie voraussichtlich über die gesamte Lebensdauer der Maßnahme von mehreren Jahrzehnten die ökonomischen und ökologischen Anforderungen erfüllt.

Die Wärmedämmung sollte auch bei der obersten Geschossdecke lückenlos an die Dämmebene aller angrenzenden Bauteile anschließen. Dies wird bei der Altbauanierung oft durch die vorhandenen baulichen Gegebenheiten erschwert. Ein Beispiel einer gelungenen Lösung zeigt Abbildung 70.



**Abbildung 70** Aufgemauerter Kniestock eines sanierten Altbaus. Wärmedämmung und Luftdichtheitsebene (rot) sind unterbrechungsfrei ausgeführt. (Quelle: PHI)

#### 4.5.3 Wärmebrücken

Bei der Dämmung auf der obersten Geschossdecke verbleiben unvermeidbar Wärmebrücken im Bereich der Giebelwände sowie einer evtl. vorhandenen Haustrennwand. Der Wärmebrückeneffekt kann, ähnlich wie bei den Kellerwänden, durch eine Begleitdämmung abgeschwächt werden. Detaillierte Berechnungen und Vergleiche von Dämmmaßnahmen sind im Protokollband Nr. 39 „Schrittweise Mordernisierung mit Passivhauskomponenten“ (vgl. [189]) ausgeführt.

#### 4.5.4 Luftdichtheit

##### **Durchdringung der horizontalen luftdichten Ebene durch Balken Anleitung zur wirksamen Andichtung<sup>1</sup>**



1. Die Umgebung der Durchstoßung wird gereinigt.
2. Es wird ein Folienstreifen lose um die Durchstoßung herumgelegt, die stehende Breite sollte mindestens ca. 15 cm ringsum betragen
3. Etwa 10 mm hohe Leisten (z.B. Bilderrahmenleisten) werden um die Durchstoßung herumgelegt und festgenagelt, auf beiden Seiten der Leisten sollte ausreichend Folie stehen bleiben
4. Breite Ritzen in den Dielen, in den Balken und zwischen Balken und Dielen bzw. Wand werden so mit Fasern (oder auch Papier) verstopft, dass der unter 5. verwendete Gips nicht einfach wegfließen kann
5. Die so vorbereiteten Stellen werden mit flüssigem Gips, Mindesthöhe 5 mm, ausgegossen. Die Ausstopfmateriale nach 4. dürfen nicht aus dem Gips herausragen. Der Gips sollte ruhig in alle Ritzen des Holzbalkens etc. eindringen. Er muss den Folienstreifen mindestens 30 mm überdecken.
6. Wenn die Leisten nach 3. stören, können sie nach dem Aushärten des Gipses wieder entfernt werden; sie dürfen aber auch stehen bleiben;
7. Folien der Dichtbahn, die auf der Dachgeschossdecke verlegt wird, über die Folienstreifen nach 2 legen und dort verkleben
8. Die Oberseite über der Luftdichtungsebene muss eine Wärmedämmung erhalten.

<sup>1</sup> Anleitung entwickelt für das Demonstrationsobjekt „Modernisierung Mehrfamilienhaus, Jean-Paul-Platz 4, Nürnberg“, Architekt: Dr.-Ing. Burkhard Schulze Darup (vgl. [72])

## 4.6 Dach

### 4.6.1 Geneigte Dächer

Bei einer Sanierung kann das bestehende Dach abgerissen werden, und ein neues Dachgeschoss geschaffen werden, um neuen, hochwertigen Wohnraum zu erstellen. Die zusätzlichen Mieteinnahmen können einen Beitrag zur Finanzierung der gesamten Modernisierungsmaßnahme leisten. In diesem Fall kann die Planung ähnlich wie bei einem Neubau relativ frei gestaltet werden. Insbesondere besteht die Möglichkeit bezüglich Wärmeschutz und Luftdichtheit einen optimalen (Passivhaus-) Neubaustandard zu verwirklichen. Es muss aber selbstverständlich gewährleistet sein, dass die Lasten des neuen Geschosses sicher von den darunter liegenden Bestandswänden abgeleitet werden können.

Für die Beibehaltung einer bestehenden Konstruktion sprechen in erster Linie wirtschaftliche Gründe: Ist ein Dachstuhl schon (teilweise) mit Wohnraum ausgebaut, so wird eine vollständige Entfernung bzw. Erneuerung teuer. Aber auch aus ökologischen Gründen ist es sinnvoll, bestehendes Material wieder bzw. weiter zu verwenden, denn dies trägt zur Ressourcenschonung bei. Es muss jedoch im Einzelfall geprüft werden, ob die Beibehaltung von Bausubstanz nicht die hoch-wärmegeämmte Konstruktion zu stark verteuert.



**Abbildung 71** Abriss des alten Dachstuhls und anschließende Aufstockung in Passivhausqualität mit vorgefertigten Holzelementen (Quelle: faktor10 Darmstadt)

Noch ein Hinweis: Wird ein Dach saniert, sollte man die Gelegenheit nutzen, sich darüber Gedanken zu machen, ob die gleichzeitige Installation einer thermischen Solaranlage oder einer Photovoltaikanlage auf dem Dach in Frage kommt.

#### 4.6.1.1 Grundlagen

##### 4.6.1.1.1 Anforderungen an geneigte Dächer<sup>1</sup>

Ein Schrägdach verfügt meist über die folgenden Bauteilschichten und Elemente:

- Die **statische Konstruktion** trägt alle anderen Elemente.
- Das Niederschlagswasser wird über die **Dachdeckung** (z.B. aus Dachsteinen) abgeleitet. Bei Flachdächern benötigen wir dagegen eine Dachabdichtung.
- Bei einer nicht absolut wasserdichten Dachdeckung führt ein **Unterdach**, eine **Unterdeckung** oder eine **Unterspannbahn** den durch Winddruck durch die Dachdeckung getriebenen Niederschlag (Schlagregen und Flugschnee) ab und bildet die winddichte Ebene des Daches. Nur eine ausreichende Winddichtigkeit kann verhindern, dass Dämmstoffe von kalter Luft durchspült werden und dadurch einen Teil ihrer Dämmwirkung verlieren. Dies gilt vor allem für Faserdämmstoffe. Allerdings sind die Anforderungen an die Winddichtheit etwas weniger streng als an die Luftdichtheitsebene (siehe unten).
- Der winterliche und sommerliche Wärmeschutz wird durch die **Wärmedämmung** gewährleistet. Die korrekte Funktion ist bei herkömmlichen Dämmstoffen aber nur gegeben, wenn die Dachkonstruktion wie an anderer Stelle beschrieben von innen luftdicht und von außen winddicht ist. Im Dach ist es in der Regel besonders einfach und kostengünstig möglich, auch große Dämmdicken zu realisieren.
- Die **Luftdichtheitsebene** liegt im mitteleuropäischen Klima in der Regel auf der Raumseite der Wärmedämmung. Sie hat die Aufgabe, wirksam zu verhindern, dass warme, feuchte Luft aus dem Dachraum in die Wärmedämmschicht eindringt.

**Innen luftdicht, außen winddicht!**

##### 4.6.1.1.2 Das diffusionsoffene Dach

Ein diffusionsoffenes Dach oder Kaltdach unterscheidet sich vom diffusionsdichten Dach oder Warmdach dadurch, dass es auf der kalten Bauteilseite diffusionsoffen ist und dort eine Unterlüftungsebene unterhalb der Dachdeckung enthält. Über diese kann in die Dachkonstruktion eingedrungene Feuchtigkeit wieder nach außen entweichen. Grundsätzlich kann Wasserdampf in Mittel-, West-, Ost, und Nordeuropa während der Heizperiode nur nach *außen* entweichen, es sei denn die Konstruktion ist bereits „nass“. Dies liegt daran, dass im Gebäudeinneren durch Wohnaktivitäten und die höhere Lufttemperatur ein höherer Wasserdampfpartialdruck als außen vorliegt. Ein diffusionsoffenes Dach weist von innen nach außen die folgenden, für die Funktion entscheidenden Bauteile auf (siehe auch Abbildung 72):

**Luftdichtheitsebene:** Die Luftdichtheitsebene sollte möglichst weit auf der warmen Seite der Konstruktion liegen – im Idealfall unterhalb der innersten Dämmlage- um Wasserdampfkonzentration in außenliegende, kältere Dämmschichten mit daraus folgender Kondensatbildung zu vermeiden. Ausnahmen können bei innenliegenden, gedämmten Installationsebenen

<sup>1</sup> vgl. [42]

gemacht werden, wenn diese einen nicht zu großen Anteil an der Dämmdicke haben. Hier liegt die Luftdichtheitsebene auf der kälteren Seite der Installationsebene, um eine Beschädigung und daraus folgende Undichtigkeiten zu vermeiden. Auch bei diffusionsoffenen Dächern ( $s_d$  der Unterdeckung / Unterspannung  $\leq 0,1$  m) sollte die Innenverkleidung mindestens einen Dampfdiffusionswiderstand  $\geq 2$  m aufweisen (vgl. [55]), sonst dringen unter Umständen durch Wasserdampfdiffusion höhere Feuchtelasten in die Konstruktion ein, als über die Unterdeckung / Unterspannung wieder entweichen können. Wie aus Tabelle 24 (S.246) zu entnehmen ist, bleibt eine Gipskartonplatte unterhalb dieser Anforderungen. Höhere  $s_d$ -Werte der Innenverkleidung, z.B. durch eine Dampfbremsfolie, sind dagegen unproblematisch. Bei der Ausbildung der luftdichten Ebene mittels einer Kraftpapierbahn ( $s_d = 2,3$  m) ergibt sich ein Wasserdampfdiffusionsstrom von ca.  $5 \text{ g}/(\text{m}^2\text{Tag})$ . Unter diesen Umständen bleibt der Querschnitt tauwasserfrei. Das Normverfahren (Glaser-Verfahren) erlaubt für das Tauwasserrisiko eine realistische Bewertung (vgl. [56]) solange die Innenverkleidung luftdicht ist.

**Wärmedämmung:** In feuchttechnischer Hinsicht ergeben sich keine besonderen Anforderungen an den verwendeten Dämmstoff. Es sollte lediglich darauf geachtet werden, dass bei zwei Lagen aus unterschiedlichen Dämmstoffen der diffusionsoffener Dämmstoff weiter außen verbaut wird.

**Unterdach, Unterdeckung, Unterspannbahn:** Die heute angebotenen Unterspannbahnen mit einem  $s_d$ -Wert kleiner oder gleich  $0,1$  m besitzen die nötige Diffusionsoffenheit, damit bei einer weitgehend luftdichten Dachinnenverkleidung ( $s_d$ -Wert  $\geq 2$  m) ausreichend viel Wasserdampf nach außen abgeführt werden kann. Inzwischen ist auch erwiesen, dass bei einer korrekten Ausführung des Dachaufbaus, gemäß den in diesem Kapitel genannten Prinzipien, eine Belüftung der Unterdeckung (d.h. eine Luftschicht unterhalb der Unterdeckung) *nicht* nötig ist, um eine ausreichende Austrocknung der Dachkonstruktion zu gewährleisten (vgl. [57]).

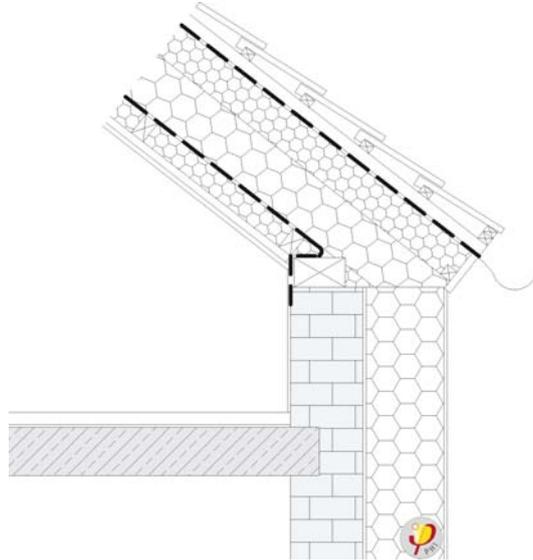
*Eine Luftschicht unterhalb der Unterdeckbahn ist in der Regel nicht erforderlich.*

**Unterlüftungsschicht:** Diese dient dazu in Form von Regen, Schnee oder Kondensat unter die Dachdeckung eingedrungenes Wasser wieder abzuführen. Dies gelingt umso besser, je stärker der Luftstrom in der Unterlüftungsschicht ist. Da der Luftstrom vor allem durch thermischen Auftrieb erzeugt wird, ist er umso stärker je steiler das Dach ist und je größer die Temperaturdifferenz zwischen Spaltluft und Umgebung ist. Daher kann es bei relativ flach geneigten Dächern, die eine sehr gute Wärmedämmung, die zu kalten Temperaturen in den äußeren Dämmschichten führt, aufweisen, nötig sein, größere Unterlüftungsquerschnitte zur Verringerung des Strömungswiderstands vorzusehen (vgl. [59]).

Zusammenfassend können folgende feuchttechnische Anforderungen an ein diffusionsoffenes Dach formuliert werden:

- Die Dachdeckung muss Niederschlagswasser zuverlässig abführen können.
- Die Dachdeckung sollte unterlüftet sein.
- Die zusätzliche regensichernde Schicht (Unterdeckung) muss nicht belüftet werden, sie muss jedoch diffusionsoffen sein ( $s_d \leq 0,1$  m).

- Die Innenverkleidung muss luftdicht sein ( $q_{50} \leq 2,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ ). Das erfordert vor allem Sorgfalt an allen Anschlüssen (siehe Kapitel 4.6.4 Luftdichtheit).
- Die Innenverkleidung sollte dampfbremsend sein ( $s_d$ -Wert  $\geq 2\text{m}$ ).



**Abbildung 72** *Geneigtes Dach mit diffusionsoffenem Aufbau, von innen nach außen:*

- raumseitige Verkleidung
  - Lattung
  - Installationsebene mit Lattung und dazwischen liegender Wärmedämmung
  - Dampfbrems-Folie als luftdichte Ebene, Anschluss an Innenputz
  - Sparren und Zwischensparrendämmung
  - Aufsparrendämmung
  - diffusionsoffene Unterdeckbahn
  - Lattung
  - Konterlattung
  - Dachdeckung
- (Quelle: PHI)

#### 4.6.1.1.3 Das außen diffusionsdichte, flachgeneigte Dach

Wird die wasserführende Schicht eines Schrägdaches weitgehend wasser- und diffusionsdicht ausgeführt z.B. bei einem Gründachaufbau, muss kein Unterdach mehr vorhanden sein, weil im Gegensatz zu einer Ziegeldeckung kein Niederschlagswasser in das Dach eindringen kann. In diesem Fall kann unter bestimmten Umständen auch auf eine Unterlüftungsebene unterhalb der Dachdeckung verzichtet werden. Man spricht dann von einem *Warmdach* oder einem *außen diffusionsdichten Dach*. Diese Dachkonstruktion ist insgesamt weniger tolerant gegen Planungs- und Ausführungsfehler als eine unterlüftete Dachdeckung, weshalb sie in der Vergangenheit immer wieder Anlass zu Diskussionen gegeben hat.

#### „Warmdach“ mit stark diffusionshemmender Dach-Innenschale

Weil durch die außenliegende Dachdichtungsbahn keine Feuchtigkeit mehr aus der Dachkonstruktion abgeführt werden kann, wird versucht, das Eindringen von Feuchtigkeit aus dem Innenraum möglichst vollständig zu unterbinden. Dies

**Feuchtigkeit, die durch Undichtigkeiten der luftdichten Ebene im Winter in die Dachkonstruktion gelangt, kann im Sommer nicht im gleichen Maße abtrocknen.**

geschieht durch die raumseitige Anordnung einer Dampfbremse mit einem möglichst hohen  $s_d$ -Wert ( $\geq 100\text{m}$ ). In der Theorie, führt dies zu einer Reduktion der eindringenden Feuchtigkeit auf nur noch  $8\text{g/m}^2$  in der Heizperiode, was an sich unproblematisch ist. Trotzdem kommen Schäden bei diesen Bauteilen relativ häufig vor. Ursache ist nicht, wie oft vermutet, die sogenannte Flankendiffusion, d.h. die Wasserdampfdiffusion durch Bauteile (Wände, Stützen), die die Dampfbremse durchstoßen. Tatsächlich sind die so zusätzlich in die Konstruktion gelangenden Feuchtemengen vernachlässigbar gering. Werden die Anschlüsse der dampfbremsenden Ebene an diese Bauteile allerdings nicht sorgfältig ausgeführt, was in der Praxis häufig der Fall ist, so gelangen über konvektiven Feuchtetransport (vgl. Abschnitt 7.5.5.4) sehr viel höhere Mengen an Wasserdampf in die Konstruktion (vgl. auch [238]). Feuchteadaptive Dampfbremsen können das Schadensrisiko bei Ausführungsmängeln vermindern.

Befindet sich auf der Dachinnenseite eine gedämmte Installationsebene, wird die Dampfbremse oberhalb dieser Ebene angeordnet. In diesem Fall sollte die Dampfbremse gemäß DIN 4108-3 aber näher als 20 % zur Innenseite bzgl. des gesamten Wärmedurchgangswiderstands angeordnet werden, damit sie nicht im zu kalten, tauwassergefährdeten Bereich der Dämmschicht liegt (vgl. [26]).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein außen *und* innen weitgehend diffusionsdichter Dachaufbau innen extrem gut luftdicht sein muss (inkl. aller Anschlüsse). Für die Luftdichtheit sollte ein Wert von  $q_{50} = 0,6\text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  nicht überschritten werden.

#### 4.6.1.1.4 Sommerlicher Wärmeschutz im Dachgeschoss

Da das Dach meist eine relativ große, unverschattete Oberfläche aufweist, treten hier besonders häufig sommerliche Überhitzungsprobleme auf. Bei einer energetischen Sanierung muss daher auch diesem Thema ausreichend Beachtung geschenkt werden. Die wichtigsten Maßnahmen gegen sommerliche Überhitzung unterscheiden sich dabei allerdings nicht grundlegend von denen für andere Gebäudeteile:

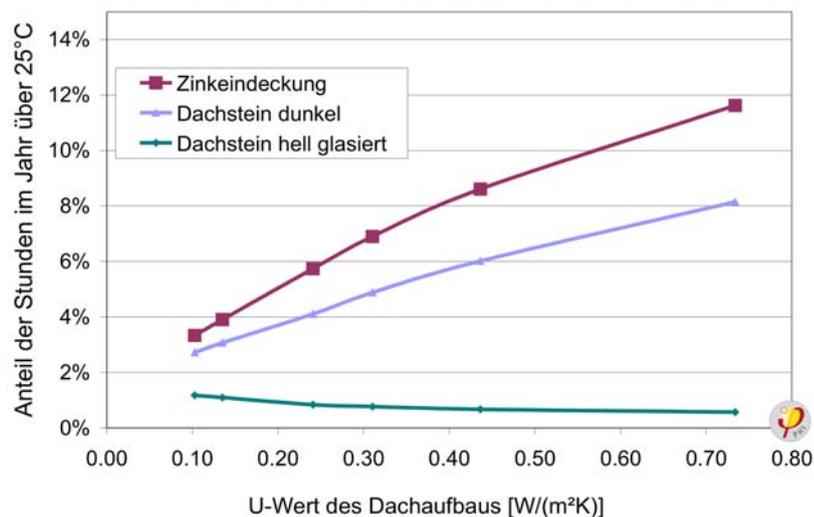
- Sind relativ zur Raumfläche große Fensterflächen, vor allem mit Ost-/Westorientierung vorhanden, so sollte ein (möglichst) außenliegender **Sonnenschutz** vorgesehen werden, um die solaren Wärmelasten zu reduzieren.
- Die Fenster sollten so beschaffen sein, dass in Kippstellung ein ausreichend großer **Luftaustausch** zur Abfuhr warmer Luft, vor allem in den kühlen Nachtstunden, möglich ist.
- Einen geringeren Einfluss hat der Planer auf die Begrenzung der **inneren Wärmelasten** durch die Verwendung energieeffizienter Haushaltsgeräte.

Über diese allgemeinen Faktoren hinaus werden manchmal auch weitere Einflussgrößen auf die sommerliche Behaglichkeit speziell im Dach diskutiert:

- Durch **Farbe und Material der Dachdeckung** kann deren Strahlungsbilanz beeinflusst werden, wodurch sich das Dach mehr oder weniger stark durch Solarstrahlung aufheizt. Es ist naheliegend, dass dieser Effekt bei schlecht gedämmten, unsanierten Altbaudächern sehr viel stärker ausgeprägt ist, da hier die thermische Kopplung zwischen

Dachbelag und Innenraum viel direkter ist. Bei sanierten Dächern mit U-Werten unter  $0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  spielt der Dachbelag keine große Rolle mehr. Abbildung 73 zeigt, dass zum Beispiel eine Zinkeindeckung auf einem schlecht gedämmten Dach, gegenüber hell glasierten Dachziegeln zu einem starken Anstieg der Übertemperaturhäufigkeit führt, da Metalldächer ein verringertes Abstrahlvermögen im Infrarotbereich besitzen und sich dadurch stärker aufheizen. Das Diagramm zeigt aber auch, dass der Einfluss der Dachdeckung mit besserem Dämmstandard immer weiter abnimmt. Allerdings ist der Einfluss des Dachdeckungsmaterials auf die sommerliche Überhitzung bei gut gedämmten Gebäuden immer noch größer als ein eventueller Einfluss auf den Heizwärmebedarf im Winter. Falls überhaupt sollte daher die Auswahl des Materials nach den Kriterien für den sommerlichen Wärmeschutz erfolgen.

**Bei guter Wärmedämmung sinkt der Einfluss der Art der Dacheindeckung auf die sommerliche Überhitzung.**



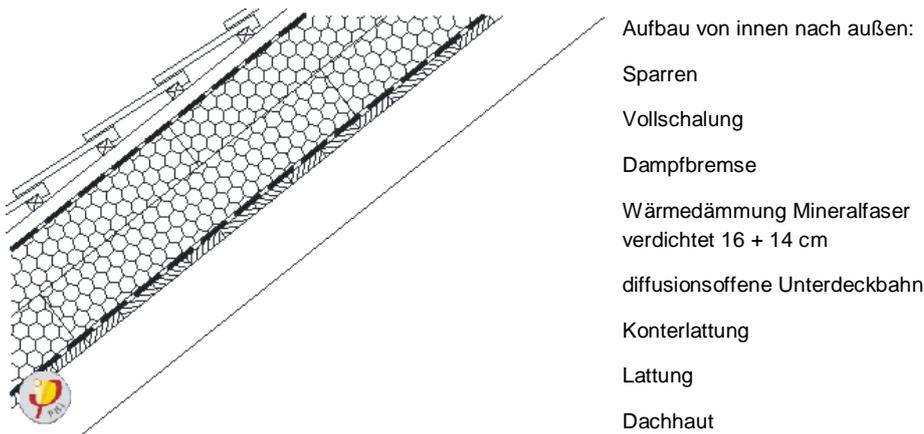
**Abbildung 73 Einfluss der Dachoberfläche bei einem südorientierten, geneigten Dach (40°). Die Dachdeckung ist unterlüftet. (Quelle: PHI, [217])**

- Die **Wärmespeicherfähigkeit** des bei der Sanierung ins Dach eingebrachten Dämmstoffs hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die sommerliche Behaglichkeit. Leichte Verbesserungen sind hier durch eine Ausführung mit Zellulose oder Holzweichfaserplatte gegenüber einer Dämmung mit Mineralwolle erreichbar.
- Eine steigende **Dämmdicke** hat fast immer eine positive Auswirkung auf die sommerliche Behaglichkeit, wie man ebenfalls in Abbildung 73 sehen kann. Ausnahme sind hell glasierte Dachziegel. Hier steigt die Kurve bei besserem Dämmstandard sogar wieder minimal an. Dies liegt daran, dass durch die dickere Dämmung bei kühlen Außentemperaturen in der Nacht weniger Wärme nach außen abgeführt werden kann. In der Regel trägt eine dicke Dämmung aber zu einem angenehmen Dachraumklima im Sommer bei. Dies ist immer dann der Fall, wenn durch ausreichende Nachtlüftung der Innenraum abgekühlt werden kann. Die geringeren Innentemperaturen können dann tagsüber durch die bessere Entkopplung von den Außentemperaturen leichter bewahrt werden. Das bedeutet, dass eine bessere Wärmedämmung im Dach immer dann hilfreich für die thermische Behaglichkeit im Sommer ist, wenn gleichzeitig eine geeignete Lüftungsstrategie angewandt wird.

#### 4.6.1.2 Konstruktionen und Materialien

##### 4.6.1.2.1 Aufsparrendämmung

Für die Montage einer Aufsparrendämmung muss die gesamte Dachdeckung entfernt werden. Sie bietet sich daher vor allem dann an, wenn die Dachdeckung ohnehin erneuert werden muss. Ist der Dachraum schon ausgebaut, so kann die bestehende Dachinnenverkleidung unverändert erhalten bleiben. Bei noch nicht ausgebauten Dächern und Dächern, die noch keine Dachinnenverkleidung aufweisen, besteht die Möglichkeit, das Dachgebälk sichtbar zu lassen, was insbesondere bei schönen, historischen Dachstühlen die Innenraumgestaltung bereichern kann (Abbildung 74). Eine reine Aufsparrendämmung hat zudem den Vorteil, dass sie nicht durch die Balken der Tragkonstruktion unterbrochen wird, was sonst unter Umständen zu Wärmebrücken und Schwierigkeiten bei der Ausführung der luftdichten Ebene führen könnte. Außerdem können bis in die Sparrenebene ragende Wände einfach überdämmt werden, so dass in diesem Bereich keine Wärmebrücken entstehen. Ein Nachteil der Aufsparrendämmung ist, dass sämtliche Anschlüsse an Schornsteine, Nachbargebäude, die Dachentwässerung usw. an die veränderte Konstruktionshöhe angepasst werden müssen. Zudem muss geprüft werden, ob die Dachstatik für die veränderten Bedingungen geeignet ist.



**Abbildung 74 Aufsparrendämmung aus verdichteter Mineralwolle mit von innen sichtbaren Sparren (Quelle: PHI, s.[238])**

Für die Aufsparrendämmung stehen heute von vielen Herstellern unterschiedliche Systeme zur Verfügung. Bei den Dämmmaterialien kann unter anderem zwischen Glas-/Mineralwolle, Holzweichfaserplatten, Hartschaumplatten und Foam-Glass gewählt werden. Bis vor kurzem stellten die verfügbaren Materialstärken noch eine Grenze für die realisierbaren Aufbauten dar. Eine hochverdichtete Mineralwolleplatte ( $\lambda=0,035$ ) für Aufsparrendämmung ist inzwischen aber schon in einer Stärke von 20 cm (einlagig) lieferbar. EPS-Platten ( $\lambda=0,035$ ) sind bis zu einer Stärke von 24 cm verfügbar. Beidseitig mit Aluminiumfolie kaschierte PU-Platten ( $\lambda=0,025$ ) als Aufsparrendämmung sind ebenfalls bis zu einer Stärke von 24 cm standardmäßig lieferbar. Dämmdicken von 30 cm und mehr sind durch mehrlagige Ausführung bzw. durch Kombinationen von Auf-, Zwischen- oder Untersparrendämmung in der Regel problemlos möglich.

**Allein durch Ausdämmen der bestehenden Sparrenzwischenräume können im Altbau in der Regel keine optimalen Dämmdicken erreicht werden.**

#### 4.6.1.2.2 *Zwischensparrendämmung*

Schrägdächer von bestehenden Wohngebäude haben eine Sparrenhöhe von typischerweise ca. 14 cm. Mit einer reinen Zwischensparrendämmung können daher keine ökonomisch und ökologisch sinnvollen Dämmdicken erreicht werden. Zudem bilden die Sparren, wenn sie die gesamte Dämmdicke durchdringen, eine Wärmebrücke, die eigentlich durch etwas erhöhte Dämmdicken ausgeglichen werden müsste. Nichtsdestotrotz kann der Sparrenzwischenraum als ohnehin vorhandener, ungenutzter Raum kostengünstig für die Wärmedämmung genutzt werden (siehe Abschnitt 4.6.1.2.4 „Kombination“).

Je nachdem ob eine zusätzliche Auf- oder Untersparrendämmung montiert wird, kann dann der Dämmstoff von oben oder von unten zwischen die Sparren eingebracht werden. Bei einer Einbringung von unten, ohne gleichzeitige Erneuerung der Dacheindeckung kann allerdings keine durchgehende Unterdeckung / Unterspannung oberhalb der Sparren eingebracht werden. Eine regelgerechte Ausführung ist daher nicht möglich. Für die Zwischenzeit bis bei einer dann ohnehin erforderlichen Neueindeckung auch eine regelgerechte Unterdeckung erstellt werden kann, besteht ein höheres Risiko dass Wasser in die Dachkonstruktion eindringt. Im Einzelfall muss dieses Risiko gegen den erhöhten Aufwand für eine eigentlich noch nicht erforderliche Neueindeckung abgewogen werden.

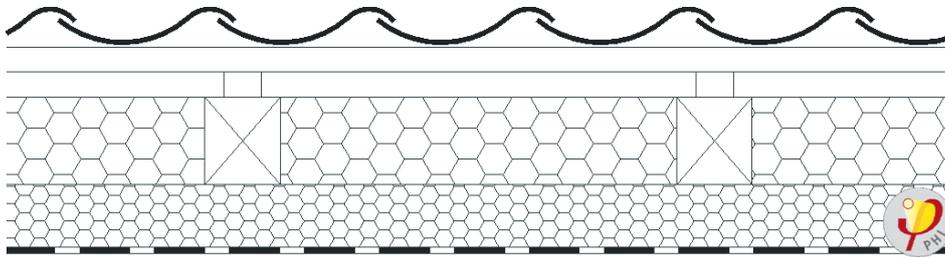
Wird die Zwischensparrendämmung von oben eingebracht, weil eine vorhandene Dachinnenverkleidung erhalten bleiben soll, so stellt sich das Problem der Erstellung der diffusionshemmenden und luftdichten Ebene. Diese muss möglichst weit im warmen Bereich liegen, um Tauwasserbildung zu vermeiden. Eine Möglichkeit ist die Verlegung einer dünnen Aluminiumfolie unter der Tapete. Eine andere Variante ist das Einlegen der Dampfbremssfolie von oben in die Sparrenzwischenräume, bevor die Zwischensparrendämmung eingebracht wird. Da man die Folie in diesem Fall nicht unter den Sparren hindurchziehen kann muss sie an der Sparrenseite hochgezogen und über die Sparren gelegt werden. Bei reiner Zwischensparrendämmung führt dies dazu, dass die Dampfbremse oberhalb der Sparren nun im kalten Bereich liegt und von innen Kondensation auftritt, was zu einer Durchfeuchtung und daraus folgenden Schädigung der Balken führen kann. Daher sollte diese Methode nur dann angewandt werden, wenn eine ausreichend große Überdämmung der Sparren durch eine zusätzliche Aufsparrendämmung erfolgt (Abbildung 77).

Für die Zwischensparrendämmung sollte nach Möglichkeit ein weicher Dämmstoff wie zum Beispiel Glaswolle verwendet werden, weil sonst leicht Lücken zwischen Dämmstoff und Sparren entstehen, wodurch eine Luftzirkulation ermöglicht wird, die die Dämmwirkung stark herabsetzen kann. Dies gilt insbesondere für Altbauten mit ungleichmäßigen Sparrenabständen oder nicht perfekt rechteckigen Sparrenprofilen.

#### 4.6.1.2.3 *Untersparrendämmung*

Wenn die Dachdeckung noch eine lange verbleibende Lebensdauer hat, ist es meist nicht sinnvoll für die Dachdämmung das Dach abzudecken, da dies hohe Kosten unter Anderem für das Gerüst verursacht. Die Dämmung des Dachs kann dann nur vom Dachinnenraum aus erfolgen (siehe dazu die Hinweise in Abschnitt 4.6.1.2.2, 2. Absatz). Wirtschaftlich ist dies insbesondere bei einem

erstmaligen Dachausbau, da dann ohnehin eine Dachinnenverkleidung erstellt werden muss. Die Untersparrendämmung hat im Gegensatz zur Zwischensparrendämmung den Vorteil, dass sie meist vollflächig verlegt werden kann und nicht an im Altbau oft auftretende unterschiedliche Sparrenprofile und –abstände angepasst werden muss. Der große Nachteil der Untersparrendämmung ist allerdings, dass sie durch eine Aufdopplung der Konstruktion nach unten den vorhandenen Dachinnenraum verkleinert. Um diese Verkleinerung in einem vertretbaren Rahmen zu halten, ist daher die praktisch ausführbare Dämmdicke normalerweise auf maximal 10 cm begrenzt. Um sinnvolle Dämmdicken zu erreichen, sollte die Untersparrendämmung daher mit weiteren Dämmmaßnahmen im Dach kombiniert werden (siehe Abschnitt 4.6.1.2.4 „Kombination“). Ein weiterer Nachteil der Untersparrendämmung ist, dass im Gegensatz zur Aufsparrendämmung Wärmebrücken durch bis in die Sparrenebene ragende Wände bestehen bleiben.



Zwischensparrendämmung Mineralfaser hydrophobiert, 14 cm ( $\lambda=0,035 \text{ W/(mK)}$ )

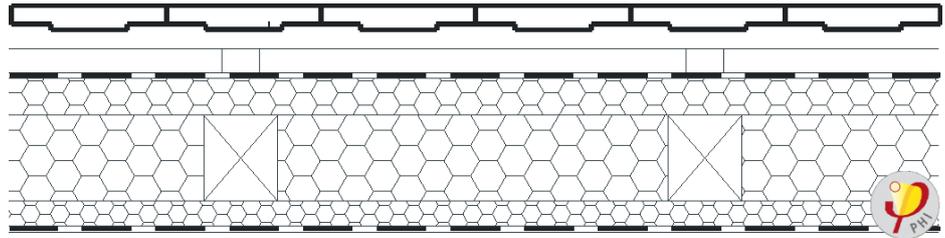
Untersparrendämmung PU-Verbundplatte (Gipskarton, Alukaschierung, 10 cm PU ( $\lambda=0,025 \text{ W/(mK)}$ ))

U-Wert (inkl. Holzanteil):  $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

**Abbildung 75 Dämmlösung, wenn die vorhandene Dacheindeckung erhalten bleiben soll: Untersparrendämmung in Kombination mit einer Zwischensparrendämmung. (Quelle: PHI)**

#### 4.6.1.2.4 Kombination

In den vorhergehenden Abschnitten wurde deutlich, dass die ausführbaren Dämmdicken bei einer jeweils reinen Auf-, Zwischen- oder Untersparrendämmung meist nicht ausreichen, um ökonomisch und ökologisch sinnvolle Dämmniveaus zu erreichen. Abhängig von der vorhandenen Konstruktion und anderen Anforderungen sollte daher meist eine Kombination von zwei oder drei dieser Dämmarten ausgeführt werden. So sind kostengünstig hohe Dämmdicken erreichbar. Dabei muss aber immer darauf geachtet werden, dass der Diffusionswiderstand der einzelnen Dämmschichten nach außen hin abnimmt. Innen sollte immer eine Schicht, die als Dampfbremse fungiert, angeordnet sein. In den folgenden Abbildungen werden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einige Beispiele gezeigt, um die Vielfalt der Ausführungsvarianten zu veranschaulichen. Darunter sind, neben Beispielen mit optimalen Dämmdicken auch Varianten mit noch akzeptablen „Mindest-Dämmdicken“ enthalten, die den oft vorhandenen eingeschränkten Platzverhältnissen bei der Altbausanierung Rechnung tragen. Bei der Altbausanierung wird man in jedem einzelnen Fall entscheiden müssen, welcher Dachaufbau der vorhandenen Situation am ehesten entspricht.



Aufsparrendämmung: PU (diffusionsoffen) 6 cm ( $\lambda=0,030$  W/(mK))

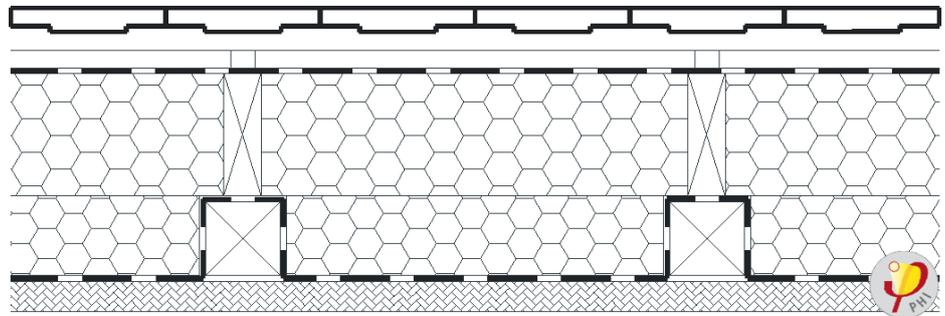
Zwischensparrendämmung: Mineralwolle 14 cm ( $\lambda=0,035$  W/(mK))

Untersparrendämmung: PU-Verbundplatte (alukaschiert, dampfdicht), 4 cm ( $\lambda=0,025$  W/(mK))

Gesamt-Dämmdicke: 24 cm

U-Wert (inkl. Holzanteil): 0,14 W/(m<sup>2</sup>K)

**Abbildung 76** Kombination aus Auf-, Zwischen- und Untersparrendämmung.  
(Quelle: PHI)



Glaswolle 14 + 26 cm ( $\lambda=0,035$  W/(mK))

U-Wert (inkl. Holzanteil): 0,11 W/(m<sup>2</sup>K)

**Abbildung 77** Aufdopplung eines alten Sparrendachs mit KVH  
(Konstruktionsvollholz, 60x260 (Quelle: PHI)

## 4.6.2 Flachdächer

### 4.6.2.1 Grundlagen

Dächer mit Neigungen bis 5° werden als Flachdach bezeichnet. Flachdächer können in bauphysikalisch unterschiedliche Konstruktionsarten unterschieden werden: Kaltdächer mit Unterlüftung unter der Dachabdichtung und Warmdächer ohne eine solche Unterlüftungsebene. Ist direkt über der Wärmedämmung eine belüftete Luftschicht angeordnet, so spricht man von einem belüfteten Dach, ansonsten von einem unbelüfteten Dach. Flachdächer weisen eine Dachabdichtung auf, deren Dachabdichtungswerkstoffe wasserdicht miteinander verbunden sind. Die Dachabdichtung ist durch thermische und mechanische Einwirkungen besonderen Belastungen ausgesetzt. Neben den Witterungseinflüssen gefährdet auch der Baustellenbetrieb die Abdichtung. Das Umkehrdach ist eine Variante des unbelüfteten Flachdachs. Bei diesem wird die Dachabdichtung unter der Wärmedämmung angeordnet. Die Dachabdichtung ist durch diese Anordnung besonders gut vor mechanischen und thermischen Beanspruchungen geschützt.

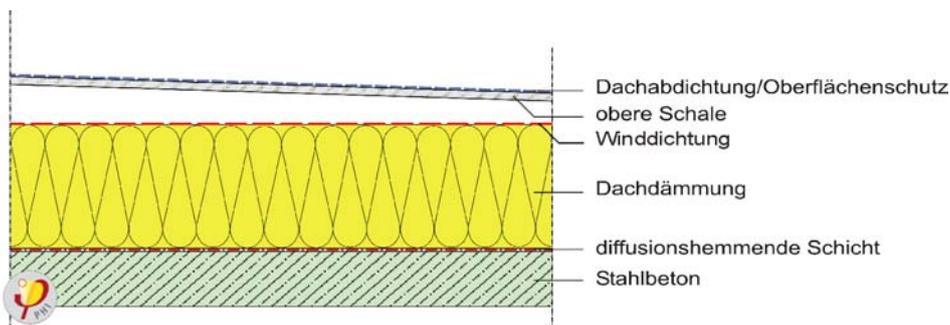
#### 4.6.2.1.1 Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten bei einer Gefälledämmung

In DIN EN 6946 Anhang C (vgl. [146]) wird ein Verfahren zur Berechnung des U-Werts von Dämmkeilen angegeben. In die aktuelle Version des Passivhaus Projektierungspakets (PHPP 2007, erhältlich beim Passivhaus Institut Darmstadt, vgl. [17]) wurde das Verfahren eingearbeitet. Die Herstellung des Gefälles durch Dämmkeile verringert das Eigengewicht der Konstruktion. An den dünnsten Stellen sollten allerdings Mindestwerte der Wärmedämmung (U-Wert  $< 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) nicht unterschritten werden.

#### 4.6.2.2 Konstruktionen und Materialien

##### 4.6.2.2.1 Flachdach mit unterlüfteter Dachabdichtung („Kaltdach“)

Wird ein Flachdach als sogenanntes „Kaltdach“ ausgeführt, heißt das, dass sich unter der Dachabdichtung ein belüfteter Hohlraum befindet. Die Unterlüftung der Konstruktion mit Außenluft soll Wasserdampf, der durch die Dachdecke diffundiert, aufnehmen (solange die Außenluft nicht Wasserdampf gesättigt ist) und abführen. Der Aufbau der zweischaligen Konstruktion besteht von innen nach außen im Wesentlichen aus den Schichten Tragkonstruktion, diffusionshemmende Schicht, Wärmedämmung, belüftete Luftschicht und der oberen Schale mit der Dachabdichtung.



**Abbildung 78 Flachdach mit unterlüfteter Dachabdichtung („Kaltdach“)** (Quelle: PHI, [238])

Durch die Aufständigung bzw. Tragkonstruktion der oberen Schale und die obere Schale selbst ist die Dachkonstruktion gegenüber einer nicht unterlüfteten Variante aufwendiger. Ein wesentlicher Vorteil dieser Konstruktion wird darin gesehen, dass durch die Unterlüftung Kondensat und Baufeuchte abtrocknen können. Doch auch bei dieser Konstruktion muss die Luftdichtheit sorgfältig ausgeführt werden. Wasserdampfkonvektion durch Leckagen kann zu beträchtlichen Wasserdampfkondensatmengen führen, die auch mit der unterlüfteten Konstruktion nicht abgeführt werden können. Außerdem zeigte sich in der Vergangenheit, dass die Durchlüftung der Konstruktion aufgrund unterschiedlicher Faktoren z.T. nicht ausreichend wirksam war (zu geringe Öffnungsquerschnitte, Hindernisse im Unterlüftungskanal, etc.).

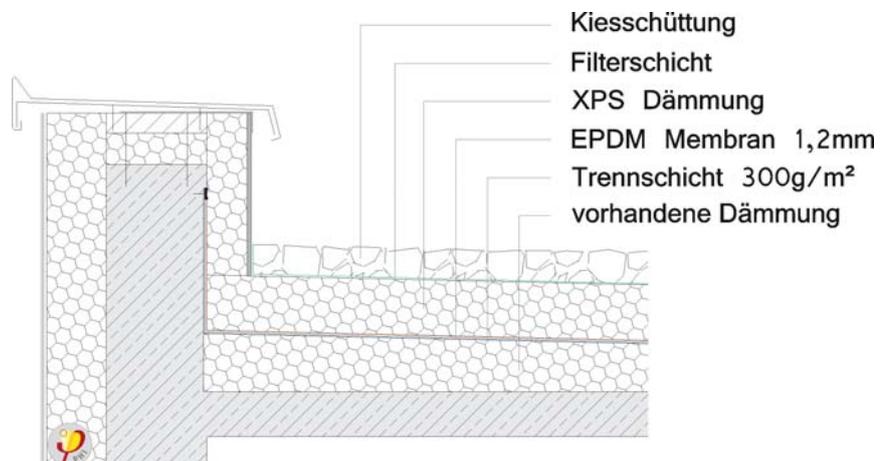
Neben der Luftdichtheit zum Innenraum hin muss beim unterlüfteten Dach weiterhin die Winddichtheit bedacht werden. Zum belüfteten Hohlraum hin muss die Wärmedämmung gegen eine Durchspülung mit Außenluft z.B. durch eine Unterdeckbahn geschützt werden.

#### 4.6.2.2.2 Das außen diffusionsdichte Flachdach („Warmdach“)

Von innen nach außen besteht der Dachaufbau im Wesentlichen aus der Tragkonstruktion, einer diffusionshemmenden Schicht, der Wärmedämmung und der Dachabdichtung. Durch den diffusionsdichten Abschluss der Dachabdichtung nach außen ist der Schichtenaufbau bauphysikalisch kritisch. Wenn Wasserdampf durch Diffusion oder Konvektion von den Innenräumen in die Konstruktion eindringt, würde er bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur das Bauteil durchfeuchten. Der Wärmeschutz und die Standsicherheit der (Holz-) Konstruktion wären gefährdet. Der Aufbau muss daher auch zum Innenraum hin dicht gegen Dampfdiffusion und Dampfkonvektion sein. Gemäß DIN 4108-3 ist kein rechnerischer Nachweis des Tauwasserschutzes notwendig, wenn die raumseitig diffusionshemmende Schicht einen  $s_{d,i}$ -Wert größer 100 m aufweist und wenn höchstens 20 % des Gesamtwärmedurchlasswiderstandes unterhalb dieser Schicht liegt (vgl. [26]). Aufgrund des nach außen diffusionsdichten Aufbaus muss bei der Bauausführung auf eine trockene Einbringung der Wärmedämmung geachtet werden. Das unbelüftete Flachdach kann sowohl mit massiver als auch mit leichter Tragkonstruktion und geringen Konstruktionshöhen ausgeführt werden. Es ist insbesondere eine sehr gute Luftdichtheit sowie eine auch im Stoßbereich und den Anschlüssen hohe diffusionshemmende Wirkung erforderlich. Die Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse anstelle der Dampfsperre ist vorzuziehen (hierfür ist ein rechnerischer Nachweis des Tauwasserschutzes erforderlich). Sie erleichtert eine schadensfreie Ausführung.

#### 4.6.2.2.3 Umkehrdach und DUO-Dach

Mit der Entwicklung von feuchte-unempfindlichen Wärmedämmstoffen (extrudiertes Polystyrol) wurde es möglich, die Dachdichtung unter der Wärmedämmung anzuordnen. Der Vorteil dieser umgekehrten Dachkonstruktion besteht darin, dass die Dachdichtungsbahn vor mechanischen und thermischen Einwirkungen geschützt wird. Die Temperaturschwankungen an der Dachabdichtung unter der Wärmedämmung werden deutlich reduziert. Die Dachdichtung übernimmt bei dieser Konstruktion gleichzeitig die Funktion der diffusionshemmenden Schicht.



**Abbildung 79** Aufdopplung einer bestehenden, zu geringen Wärmedämmung oberhalb der Dachabdichtung als DUO-Dach (Quelle: PHI)

Nachteilig ist der Umstand, dass mit dem auf der Dachhaut ablaufenden Niederschlagswasser dem Gebäude Wärme entzogen wird. Das Niederschlagswasser mit Außenlufttemperatur erwärmt sich auf der Dachabdichtung und führt zu niederschlagsbedingten Wärmeverlusten.

Eine Lösung bieten hier wasserabführende, diffusionsoffene Trennlagen, die auf die Wärmedämmung aufgebracht werden. Das Niederschlagswasser wird bei diesem Aufbau überwiegend über der Trennlage abgeführt. Auf die Dachdichtung gelangen in diesem Fall nur Restmengen des Niederschlags. „Die wasserableitende Trennlage vermindert die unter den Dämmplatten abfließende Wassermenge soweit, dass der  $\Delta U$ -Zuschlag unberücksichtigt bleiben kann“ [60]. Produkte mit einer Zulassung des DIBt sind auf dem Markt erhältlich.

Ein weiterer Nachteil des Umkehrdachs besteht darin, dass die Wärmedämmung nur einlagig ausgeführt werden darf (vgl. [61] etc.) und die verfügbaren einlagigen Dämmdicken nicht ausreichend sind. Bei zweilagiger Verlegung besteht an der Trennschicht der beiden Lagen ein erhöhter Wasserdampfdiffusionswiderstand. In der unteren Dämmlage würde sich Wasserdampf anreichern und die Wärmeleitfähigkeit dieser Lage würde im Laufe der Nutzungszeit deutlich zunehmen. Aus produktionstechnischen Gründen sind die Dämmdicken für extrudierte Polystyrol-Dämmplatten auf 200 mm begrenzt. Marktverfügbar sind nur Dämmdicken bis 180 mm. Die verfügbaren Dämmdicken beim Umkehrdach sind für hochwärmegeämmte Dachkonstruktionen daher allein nicht ausreichend.

Eine Alternative bietet sich mit dem DUO-Dach- oder dem Plusdach-Aufbau. Dabei wird ein nicht belüftetes Flachdach mit einem Umkehrdach kombiniert. Die Dachabdichtung verläuft zwischen den Wärmedämmlagen. Die Dachabdichtung ist auch beim DUO-Dach geschützt. Aufgrund des diffusionsdichten Dachaufbaus der ersten Dämmlage ist auch hier sorgfältig auf eine luftdichte Ausführung zu achten, um Wasserdampfkonvektion in die untere Dämmlage dauerhaft zu verhindern. Dies gilt besonders bei einer Ausführung des DUO-Dachs als Leichtbaukonstruktion. Hier sollte die Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse auf der warmen Seite geprüft werden (vgl. Abschnitt 7.5.6).

### 4.6.3 Wärmebrücken

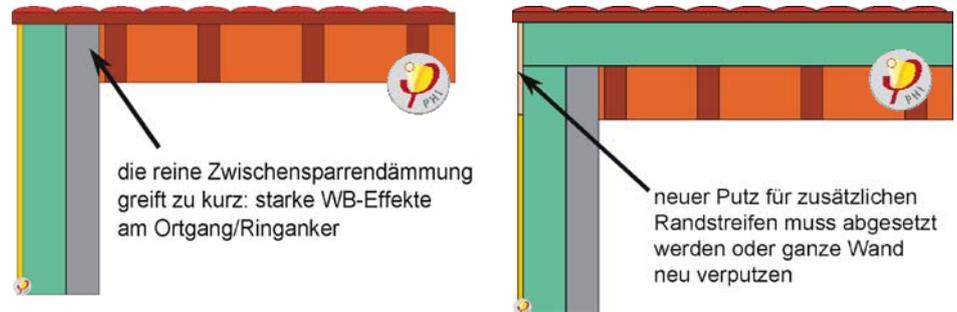
Eine Vielzahl von Wärmebrücken kann die Wirksamkeit der Dachdämmung mindern. Dazu gehören Giebel- und Haustrennwände, die bis unter die Dacheindeckung reichen, Kamine sowie Unterkonstruktionen für Antennen und Satellitenschüsseln. Im Zuge einer Modernisierung sollte versucht werden, diese Wärmebrücken so weit wie mit vertretbarem Aufwand möglich zu entschärfen.

#### 4.6.3.1 Wände und Kamine

Im Altbau reichen **Giebel- und Haustrennwände** in der Regel bis unter die Dacheindeckung. Das bedeutet, dass bei diesen Wänden nach einer Zwischen- und/oder Untersparrendämmung im Dach eine signifikante Wärmebrücke verbleibt (Abbildung 80). Diese ist bei entsprechenden Wetterbedingungen im

**Mit einer Aufsparren-  
dämmung können  
Wärmebrücken durch  
Giebel- und Haustrenn-  
wände am einfachsten  
minimiert werden.**

Winter häufig als ein Streifen auf den Dachziegeln zu erkennen, der frei von Schnee oder Raureif ist (Abbildung 81). Die beste Möglichkeit, diese Wärmebrücke weitgehend zu beseitigen, ist eine Aufsparrendämmung, die über die Mauerkrone durchläuft. Allerdings sind hierbei insbesondere bei Brandwänden die geltenden Brandschutzbestimmungen zu beachten.



**Abbildung 80** Wärmebrücken durch bis Oberkante Sparren reichende Giebel- oder Haustrennwände (links) können durch eine durchlaufende Aufsparrendämmung (rechts) wirksam entschärft werden. Wird die Giebelwand nicht gleichzeitig gedämmt, so muss eine Lösung für den Wandputz-Streifen am Ortgang an der Stirnseite der Aufsparrendämmung gefunden werden (rechts). (Quelle: PHI. [218])



**Abbildung 81** Wärmebrückenwirkung einer aufgehenden Haustrennwand beim Anschluss an das Dach (Quelle: PHI, [58])

Nicht mehr genutzte **Kamine** sollten nach Möglichkeit abgerissen werden, damit eine durchlaufende Dämmebene erzielt wird. Bei Kaminen, die noch in Betrieb sind, kann die Wärmebrückenwirkung durch eine Begleitdämmung entlang des Kamins im Dachraum abgemindert werden. Auch hier sind die brandschutztechnischen Fragen, insbesondere hinsichtlich des zu verwendenden Dämmstoffes, zu beachten.

**Antennen und Satellitenschüsseln** sind häufig auf vom warmen in den kalten Bereich durchlaufenden Rundrohren aus verzinktem Stahl montiert (Abbildung 81). Hier sind alternative Konstruktionen ohne eine solche Wärmebrücke zu bevorzugen.

#### 4.6.3.2 *Falleitungslüftung*

Die ordnungsgemäße Funktion einer Gebäude- und Grundstücksentwässerungsanlage sowie der öffentlichen Kanäle erfordert eine ausreichende Lüftung. Dies wird ist in den Normen DIN EN 12056-2 (vgl. [165]) bzw. DIN 1986-100 (vgl. [166]) für Gebäudeentwässerungsanlagen bzw. deren Falleitungen geregelt.

Danach sind Falleitungen über Dach zu belüften. Zielsetzung ist dabei einen Druckausgleich zu erreichen: Vermeidung von Unterdruck in der Falleitung, Vermeidung von Überdruck in der Grundleitung.

Für die erste Zielsetzung sind Lüftungsventile (funktional: Belüftungsventile) zugelassen, diese müssen in Abhängigkeit der nachfolgend angeschlossenen Sanitärobjekte für bestimmte Luftmengen ausgelegt sein. Für ein einzelnes WC liegt die geforderte minimale Luftmenge bei 16 l/s bzw. ca. 60 m<sup>3</sup>/h. Die am Markt erhältlichen Rohrbelüfter in Nennweite 70/100 verfügen über eine Lüftungsleistung von ca. 32 l/s.

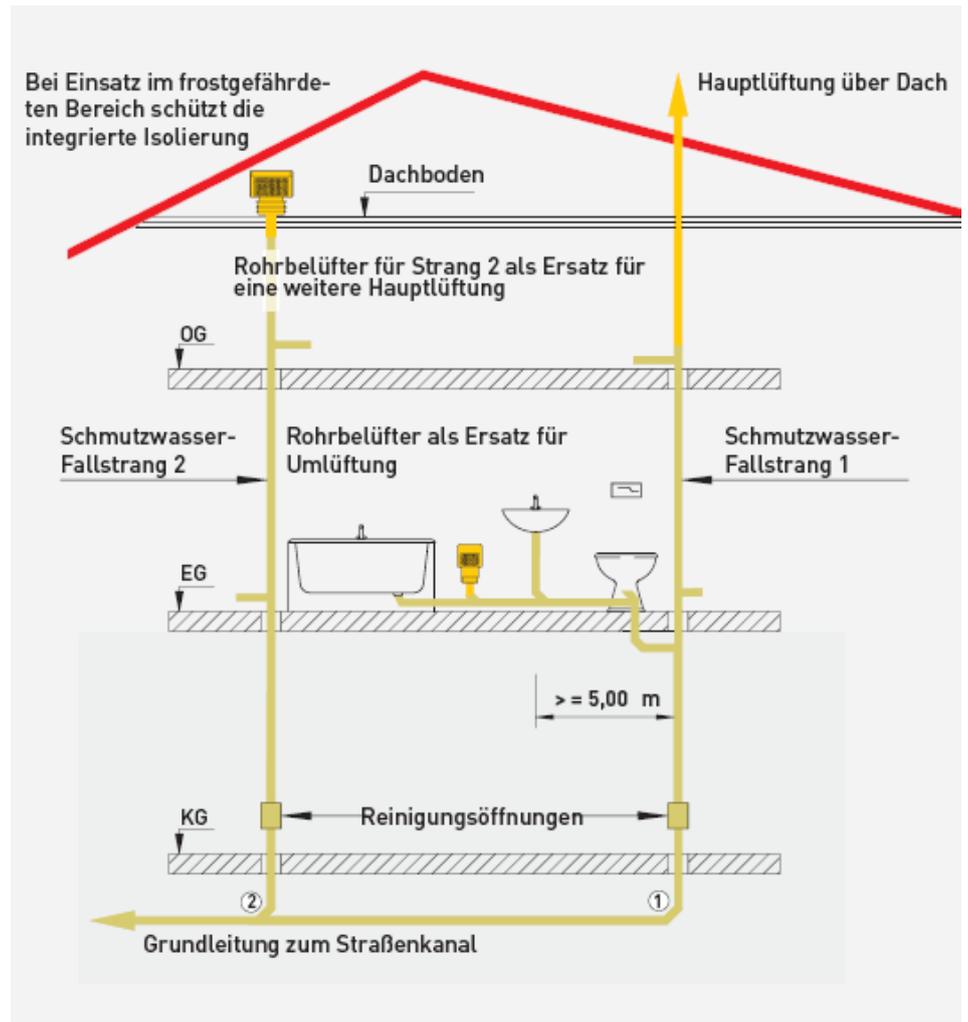
Die Belüftungsventile lassen das Nachströmen von Luft in die Leitung bei Unterdruck zu, ansonsten sind sie verschlossen, sodass keine Gerüche austreten können. Die Lüftungsventile müssen der Produktnorm EN 12380 (vgl. [167]) entsprechen, sie dürfen normgerecht in Ein- und Zweifamilienhäusern bei Falleitungen eingesetzt werden, wenn mindestens eine Falleitung zur Entlüftung über Dach geführt wird.

Die Begrenzung auf Ein- und Zweifamilienhäuser ist nach baupraktischer Erfahrung nicht notwendig, die Druck- bzw. Unterdruckverhältnisse in Falleitungen von Mehrfamilienhäusern und Nichtwohngebäuden sind in der Regel nicht grundsätzlich anders, die Luftleistung der Belüftungsventile ist auch hier ausreichend. Auch im Genehmigungsverfahren, d.h. bei entsprechender Darstellung im Entwässerungsgesuch, werden die Belüfter bei größeren Bauvorhaben in der Regel akzeptiert. Die Verantwortung für den Einsatz, da streng genommen nicht normgerecht, liegt jedoch beim Planer.

Die zweite Zielsetzung, Druckausgleich in der Grundleitung, wird durch die nach wie vor geforderte zweite Falleitung über Dach erfüllt. Dies sollte bei einer Gebäudesanierung Richtung Passivhaus-Standard vermieden werden, da über den Verbund der Falleitung mit den Grundleitungen während der Heizperiode ein Luftstrom durch die Falleitung aufsteigt, dieser entnimmt dem Gebäude somit Wärme bzw. die Falleitung ist aufwändig zu dämmen.

Nach baupraktischer Erfahrung ist es völlig ausreichend, die Grundleitungsentlüftung bei Mischabwasserentwässerung über die ebenfalls angeschlossenen Regenfalleitungen zu erreichen. Diese bieten auch bei Starkregen eine ausreichende Querschnittsreserve (die Regenfallrohre haben keine Volfüllung), sodass der Druckausgleich funktioniert.

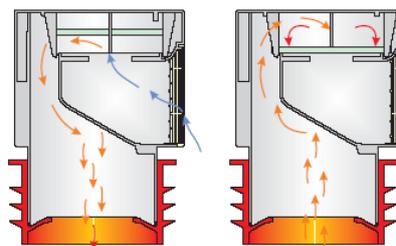
Ist das Gebäude in Trennkanalisation zu entwässern, kann das Grundleitungssystem der Schmutzwasserentwässerung mit einem zusätzlichen Anschluss z.B. neben einem Regenfallrohr ausgeführt werden. Parallel zum Regenrohr kann dann ein zweites Rohr bis über Dach geführt werden, dieses übernimmt dann den Druckausgleich für die Schmutzwassergrundleitungen.



**Abbildung 82** Schema Anordnung von Belüftungsventilen (Quelle: Fa. Dallmer)

Funktionsprinzip:

Bei Unterdruck im Rohrsystem öffnet das Belüftungsventil und die einströmende Luft bewirkt den Druckausgleich.



Bei Überdruck im System dichtet das Belüftungsventil ab. Es können keine Kanalgase austreten.

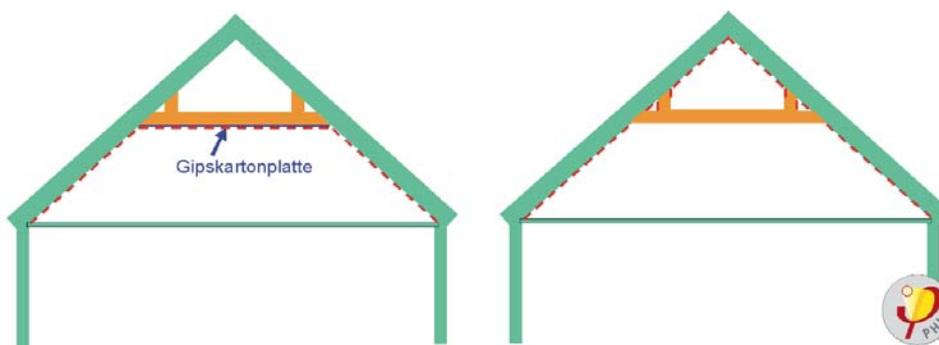
**Abbildung 83** Funktionsprinzip Belüftungsventil (Quelle: Fa. Dallmer)

Einbauhinweis: Der Rohrbelüfter muss mindestens 60 cm oberhalb des höchsten Anschlussabzweiges montiert werden. Die Zuführung der Luft muss gesichert sein, dies erfolgt bei Einbau in einer Installationswand oder Schachtverkleidung über ein separates Lüftungsgitter. Zusätzlich ist eine Revisionsöffnung für einen evt. erforderlichen Austausch des Belüfters vorzusehen.

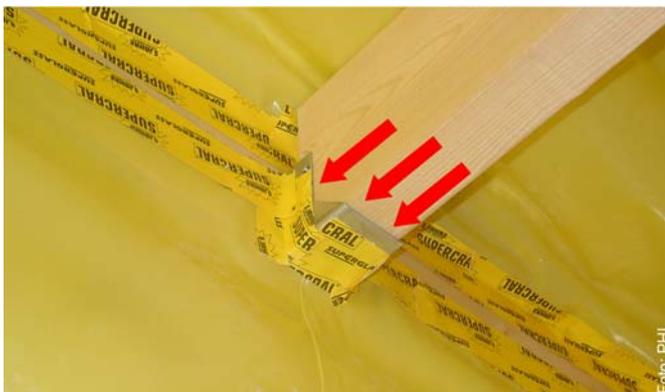
#### 4.6.4 Luftdichtheit

Das Erreichen einer guten Luftdichtheit im Dach wie auch bei der restlichen Gebäudehülle hängt nicht nur von einer sorgfältigen Planung sondern insbesondere auch von der Bauleitung vor Ort ab. Meist ist die luftdichte Ebene im Dach im Endzustand durch Verschalungen o.ä. nicht mehr sichtbar. Leckagen können dann nur noch schwer geortet und nur mit großem Aufwand behoben werden. Daher hat es sich als sinnvoll erwiesen, in solchen Bereichen, die später nur noch schwer zugänglich sind, mit den Handwerkern eine Abnahme durchzuführen, solange die luftdichte Ebene noch sichtbar ist. In den meisten Fällen können Ausführungsfehler die zu Undichtigkeiten führen, auf diese Weise leicht erkannt und ohne großen Aufwand nachgebessert werden.

Außerdem ist es Aufgabe der Bauleitung, Informationen über Lage und Ausführung der luftdichten Ebene an die Handwerker weiterzuleiten, so dass die diesbezügliche Planung auch wirklich umgesetzt wird. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 84. Der Verlauf der luftdichten Ebene im Dachgeschoss war unterhalb der Pfetten und Kehlbalcken jeweils oberhalb der Gipskartonlage geplant (linkes Bild). Die ausführende Firma hat dann den Verlauf der Ebene bis in den First hinein verlegt und jeweils die PE-Folie an den Leimbändern verklebt.



**Abbildung 84** Links ist der geplante Verlauf der luftdichten Ebene (PE-Folie) gestrichelt angedeutet. In der Realisierung (rechts) verläuft sie bis in die Spitze und kreuzt damit die beiden Pfetten. (Quelle: PHI, [58])



**Abbildung 85** Aufwändige und fehlerträchtige Umklebung von Kehlbalcken samt Balkenschuhen. Zwischen Balkenschuh und Balken entsteht so regelmäßig eine Leckage. (Quelle: PHI, [58])

#### 4.6.4.1 Luftdichtheit in der Fläche

Neben der Dichtigkeit des verwendeten Materials muss auf eine luftdichte Verbindung an den Stößen geachtet werden. Tabelle 6 gibt Hinweise über einige geeignete Materialien und passende Verbindungsmittel.

Material Fläche	Anschlüsse Fläche
Harte Holzwerkstoffplatten	Streifen (Folie / arm. Baupappe) Klebeband
Folien / armierte Baupappe	Klebeband (Anpresslatte mit Höhenausgleich)
Beton	Dichtschlauch Putz (nur bei kraftschlüssigen Verbindungen)

**Tabelle 6** Luftdichte Verbindungen zwischen Flächenabdichtungen

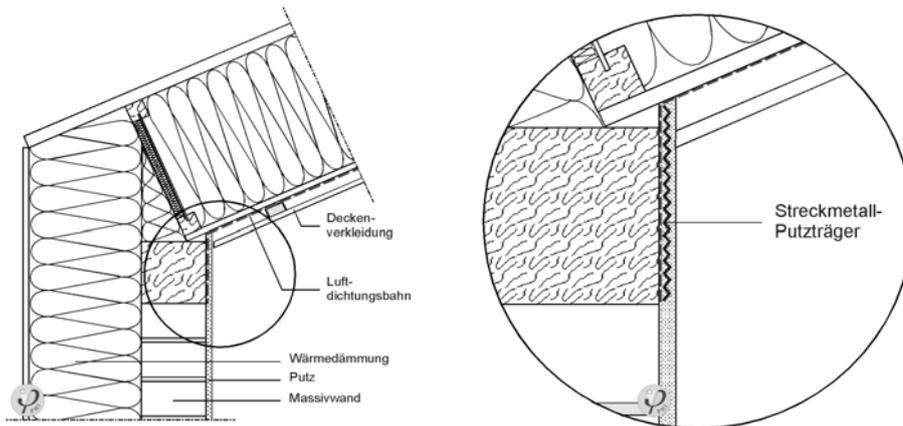


**Abbildung 86** Beispiel für die luftdichte Verklebung der Stöße von Holzwerkstoffplatten mit Spezial-Klebeband im Dach (Quelle: PHI, [58])

#### 4.6.4.2 Anschlüsse

Schwieriger als die Abdichtung in der Fläche sind die Anschlüsse des Dachs an andere Bauteile.

Relativ häufig kommt es vor, dass die Folie der luftdichten Ebene des Daches an den Innenputz der Außenwand angeschlossen werden muss. Eine gute Lösung ist dabei das Herunterziehen und vollständige Überputzen der Folie im Wandbereich. Damit der Putz auf der Folie hält, muss zuvor ein Streckmetallputzträger auf die Folie genagelt werden (Abbildung 87).



**Abbildung 87** Prinzip der luftdichten Verbindung einer Folie im Dach an eine verputzte Massivwand unter Verwendung eines Streckmetall-Putzträgers (Quelle: PHI, [43])

Alternativ sind auch Klebebänder mit integriertem Einputzgewebe erhältlich. Damit Bauteilbewegungen ohne Zerstörung oder Ablösung des Klebebands aufgenommen werden können, müssen die Folien noch etwas Spiel haben und dürfen nicht straff verlegt werden. Eine tabellarische Auflistung einiger luftdichter Werkstoffe und mögliche Anschlüsse an die luftdichte Ebene der Außenwand ist im Protokollband Nr. 29 „Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen“ [58] zu finden.

#### 4.6.4.3 Durchdringungen

Erstes Gebot ist Durchdringungen der luftdichten Ebene schon möglichst in der Planung zu vermeiden. Beispielsweise können Dachdurchdringungen für die Fallrohrbelüftung durch den Einsatz von Unterdach-Fallrohrbelüftern vermieden werden (siehe Abschnitt 4.6.3.2 auf S. 121). Für Kabel- und Rohrdurchführungen durch Holzwerkstoffplatten, Folien oder armierte Baupappen, die die luftdichte Ebene bilden, sind geeignete vorgefertigte Klebemanschetten erhältlich (Abbildung 88).

**Durchdringungen der luftdichten Ebene sollten soweit möglich vermieden werden.**



**Abbildung 88** Manschetten für Kabel- und Rohrdurchführungen; alternativ ist auch eine „handwerkliche“ Ausführung der Abdichtung möglich. (Quelle: PHI[58])

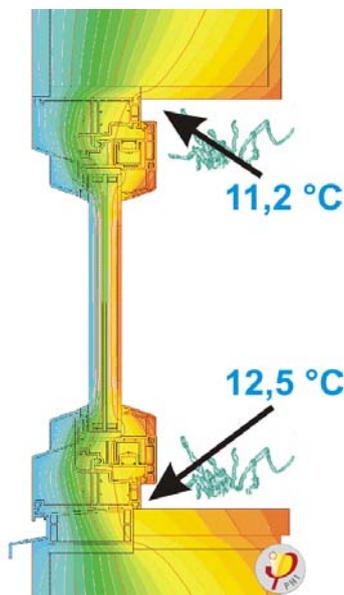
Eine ausführliche Behandlung hochwärmegedämmter Dachkonstruktionen findet sich in [238].

## 4.7 Fenster

### 4.7.1 Grundlagen

#### 4.7.1.1 Exkurs: Schimmel durch Fenstererneuerung?

Durch den Austausch alter Fenster mit Einfachverglasung oder Zweifach-Isolierverglasung kann der Heizwärmebedarf eines Altbaus deutlich verringert werden, da diese Bauteile einen sehr schlechten Wärmeschutz aufweisen. Es gibt jedoch immer wieder den Fall, dass es nach dem Einbau neuer Fenster zu Schimmelbildung in der Fensterleibung und an anderen Stellen kommt. Bei den Bewohnern führt dies in der Folge teilweise zu einer pauschal ablehnenden Haltung gegenüber Wärmeschutzmaßnahmen jedweder Art.



**Abbildung 89** Beim Einbau neuer, dichter Fenster ohne gleichzeitige Fassaden-dämmung ist u.U. mit Schimmelbildung zu rechnen. (Quelle: PHI, [65])

Die Ursache für die genannten Schäden ist jedoch nicht zu viel sondern zu wenig Wärmeschutz in Verbindung mit einem nicht ausreichenden Luftwechsel. Ungedämmte Altbauten haben in der Heizperiode sehr niedrige Innenoberflächentemperaturen an den an die Außenluft grenzenden Bauteilen. Häufig kommt es dennoch nicht zu Kondensat- und Schimmelbildung, weil ein hoher Fugenluftwechsel durch die ausgesprochen undichte Außenhülle stattfindet (vor allem die Fenster), der in der Heizperiode dafür sorgt, dass die relative Feuchte der Luft niedrig bleibt. Eine Beheizung durch Einzelöfen in den Räumen erzeugt durch die Ansaugung der notwendigen Verbrennungsluft einen zusätzlichen Antrieb für den Fugenluftwechsel.

Werden nun im Zuge einer Modernisierungsmaßnahme neue, dichte Fenster eingebaut und die Einzelöfen durch eine Zentralheizung ersetzt, so geht der nutzerunabhängige Luftwechsel stark zurück. Außerdem sind die Bewohner nicht an die Notwendigkeit einer regelmäßigen Fensterlüftung gewöhnt. Da nun die im Gebäude entstehende Feuchtigkeit nicht mehr ausreichend durch Lüftung abgeführt wird, steigt die relative Luftfeuchte. Wurde auf eine gleichzeitige Wärmedämmung der übrigen Außenhülle (Kellerdecke, Außenwand, Dach) verzichtet, sind die Innenoberflächentemperaturen aber immer noch sehr niedrig. Die Kombination von kalten Oberflächen mit hoher Luftfeuchtigkeit führt dann mit relativ großer Sicherheit zu Schimmelbefall (siehe Abbildung 90).

Ein Fensteraustausch ohne gleichzeitige Verbesserung des Wärmeschutzes der übrigen Außenhülle kann daher nur dann empfohlen werden, wenn eine ausreichende Lüftung sichergestellt werden kann. Die Bewohner müssen unbedingt darüber informiert werden, dass ein verändertes Lüftungsverhalten erforderlich ist. Insbesondere im Mietwohnungsbau ist ohne den Einbau einer Lüftungsanlage nicht grundsätzlich von einem angemessenen Lüftungsverhalten der Bewohner auszugehen. Für Berufstätige ist es ohnehin nicht möglich ausreichend über die Fenster zu lüften (vgl. Abschnitt 5.1.1.3 auf Seite 155).



**Abbildung 90** Schimmel am Fensteranschluss nach dem Einbau dichter Fenster in einem Altbau ohne gleichzeitige Verbesserung des Wärmeschutzes der Fassade (Quelle: PHI)

#### 4.7.1.2 Anforderungen an Fenster

Fenster müssen eine Vielzahl von Funktionen erfüllen: u.a.

- Realisierung passiver solarer Gewinne
- Wärmeschutz

Sie spielen eine wichtige Rolle für die Energiebilanz des Gebäudes. Ziel sind sogenannte Energiegewinn-Fenster, bei denen die nutzbaren solaren Wärmegewinne in der Heizperiode größer sind als die Wärmeverluste über die Fensterflächen. Der Wärmeschutz steht außerdem in direktem Zusammenhang mit der Erfüllung der Behaglichkeitsbedingungen sowie dem Tauwasserschutz.

##### 4.7.1.2.1 Behaglichkeit

Die Fensteroberfläche ist in der Heizperiode meist die kälteste Oberfläche im Raum und daher bestimmend für den Komfort. In Altbauten und auch in nach den aktuellen Verordnungen gebauten Neubauten können die Fensteroberflächen so kalt werden, dass zur Herstellung behaglicher Wohnbedingungen ein Heizkörper unter dem Fenster unverzichtbar ist. Nur bei Passivhäusern ist der Wärmeschutz so gut, dass die Innenoberflächentemperaturen auch bei sehr kalten Außentemperaturen so warm sind, dass kein Heizkörper zur Gewährleistung der Behaglichkeit benötigt wird. Soll bei einem Altbau nach der Sanierung ebenfalls auf Heizkörper unter dem Fenster verzichtet werden, so sind die gleichen Anforderungen wie für Passivhausfenster einzuhalten.

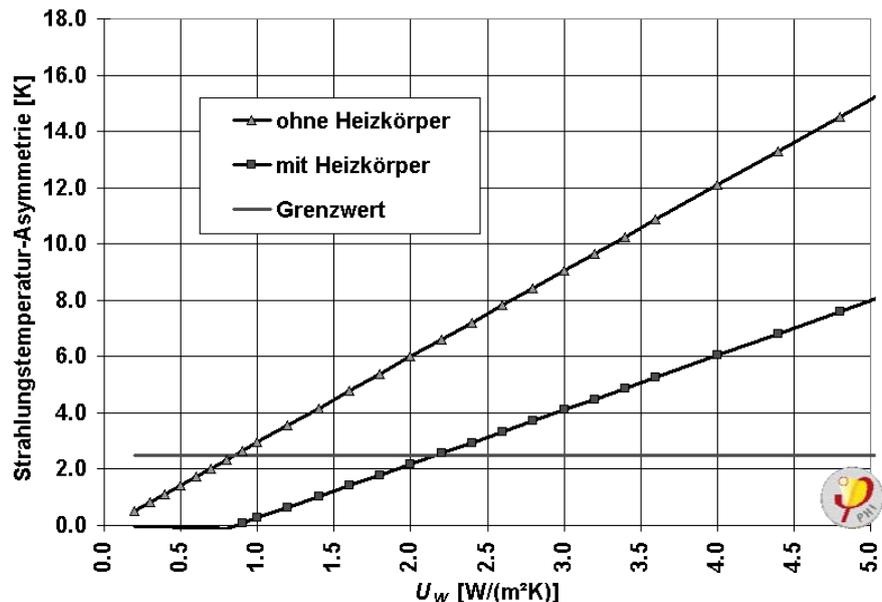
Die Bedingungen für optimalen thermischen Komfort (Komfortkategorie A nach DIN EN ISO 7730) werden in Abschnitt 7.1 ausführlich erläutert.

Um diese Anforderungen im Aufenthaltsbereich (ab 0,5 m Abstand vom Fenster) auch ohne Heizkörper zu erfüllen, dürfen die regulären Oberflächentemperaturen aller raumumfassenden Bauteile nicht mehr als 4,2 K unter der mittleren operativen Temperatur im Raum liegen. Für die Fenster kann diese

**Die Fensteroberfläche ist in der Regel im Winter die kälteste Fläche im Innenraum.**

**Für optimale Wohnbehaglichkeit sollte das Fenster im eingebauten Zustand einen  $U_w$ -Wert von 0,85 W/(m<sup>2</sup>K) nicht überschreiten.**

Anforderung im mitteleuropäischen Klima (Auslegungstemperatur  $-16\text{ °C}$ ) nur bei einem Fenster-U-Wert von  $U_{w, \text{Einbau}} \leq 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht werden (inklusive durch Einbau bedingte Wärmebrückenverluste). Dies ist daher der Grenzwert für Passivhausfenster (siehe Abbildung 91). In wärmeren Klimaten (z.B. Mittelmeerküste mit Auslegungstemperatur  $0\text{ °C}$ ) reicht dagegen schon eine Zweifach-Wärmeschutzverglasung mit Holzfensterrahmen. In kälteren Klimaten benötigt man noch bessere Rahmen und Verglasungen zum Erreichen des gleichen thermischen Komforts.



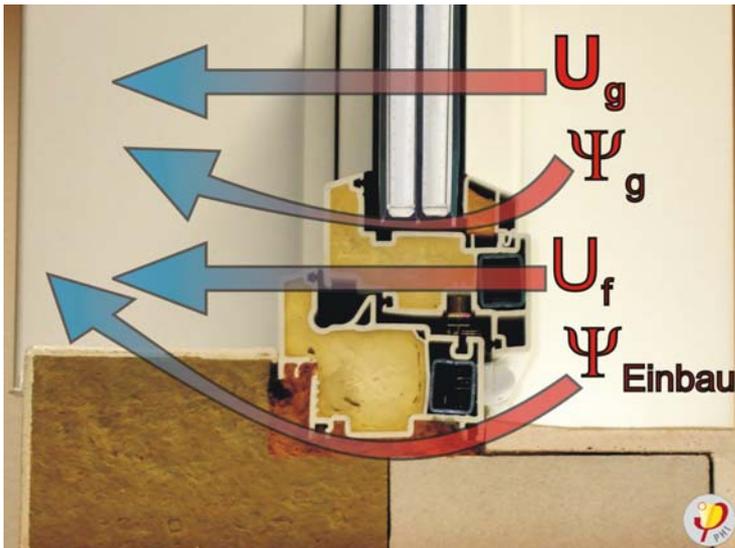
**Abbildung 91** Strahlungstemperatur-Asymmetrie vor einem fast raumhohen Fenster in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten  $U_w$  des Fensters. (Quelle: PHI [94])

#### 4.7.1.2.2 Energiegewinn

Die Energiebilanz eines Fensters setzt sich zusammen aus den Wärmeverlusten durch Transmission über Rahmen, Verglasung, Glasrandbereich und Leibung, sowie den diesen gegenüberstehenden nutzbaren solaren Wärmegevinen. Ziel ist eine positive Energiebilanz im Durchschnitt aller Fenster eines Gebäudes als Beitrag zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs. Da Gebäude mit sehr gutem Wärmeschutz im mitteleuropäischen Klima nur von Anfang November bis Mitte März beheizt werden müssen, kann nur in diesem Zeitraum ein Beitrag zur Heizenergieeinsparung geleistet werden.

Die Wärmeverluste für das gesamte Fenster im eingebauten Zustand berechnen sich in Anlehnung an DIN EN 10077 (vgl. [96]) nach der folgenden Formel:

$$U_{w, \text{Einbau}} = \frac{U_g \cdot A_g + U_f \cdot A_f + \Psi_g \cdot l_g + \Psi_{\text{Einbau}} \cdot l_{\text{Einbau}}}{A_f + A_g}$$



**Abbildung 92** Kennwerte für die Berechnung der Wärmeverluste eines Fensters im eingebauten Zustand (Quelle: PHI):

$U_g$ : Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung

$\Psi_g$ : Längenbezogener Wärmebrückenverlustkoeffizient des Glasrandbereichs

$U_f$ : Wärmedurchgangskoeffizient des Fensterrahmens

$\Psi_{\text{Einbau}}$ : Längenbezogener Wärmebrückenverlustkoeffizient des Fenstereinbaus

Nur Fenster mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung können, wenn sie überwiegend nach Süden orientiert und nicht übermäßig verschattet sind, nutzbare Netto-Wärmegewinne generieren. Voraussetzung ist, dass auch die Wärmeverluste über Glasrandbereich, Fensterrahmen und Einbauwärmebrücke begrenzt werden.

#### 4.7.1.2.3 Tauwasserschutz

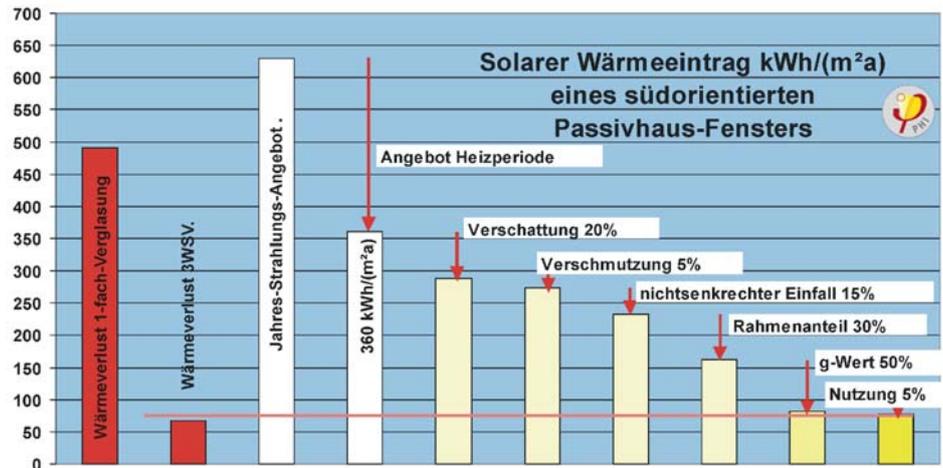
Unterhalb einer Oberflächentemperatur von ca. 13 °C muss bei üblichen Wohnraumbedingungen in der Heizperiode mit Tauwasserbildung gerechnet werden. Auf Oberflächen, die längere Zeit feucht sind also schon vor dem Ausfall von Tauwasser, bildet sich Schimmel, wenn verwertbares organisches Material vorhanden ist.

Werden die in Abschnitt 4.7.1.2.1 genannten Behaglichkeitsanforderungen von einem Fenster im eingebauten Zustand erfüllt, so liegen gleichzeitig auch die Innenoberflächentemperaturen des Fensters in der Regel so hoch, dass Tauwasser und Schimmelbildung bei üblicher Raumtemperatur und relativer Feuchte ausgeschlossen werden können.

#### 4.7.1.2.4 Verfügbarkeit des solaren Wärmeangebots

Für die Energieeinsparung verfügbar ist nur der Anteil des solaren Angebotes während der Heizperiode und davon nur der Anteil, der in die zu beheizende Hülle gelangt. Die Sonneneinstrahlung durch eine Fensterfläche wird durch verschiedene Faktoren reduziert, so dass der Anteil der Solarenergie der in den Raum gelangt am Ende selbst unter sehr günstigen Bedingungen bei 35 % liegt, aber auch sehr viel weniger betragen kann. In Abbildung 93 werden die verschiedenen Reduktionsfaktoren dargestellt.

**Nur ein relativ geringer Anteil der Solarstrahlung, die auf das Fenster trifft, gelangt in den Raum.**



**Abbildung 93** Solarer Wärmeeintrag eines südorientierten Passivhausfensters (Quelle: PHI)

**Nicht alle solaren Wärmegewinne können genutzt werden.**

#### 4.7.1.2.5 Ausnutzbarkeit des solaren Wärmeangebots

Die Wärmeströme durch solare Einstrahlung (genauso wie durch nutzungsbedingte Wärmequellen im Gebäude) tragen in beträchtlichem Umfang zur Erwärmung der Räume bei, dies prozentual umso mehr, je besser das betroffene Haus wärmegeämmt ist. Der Anfall dieses „freien“ Wärmeangebots orientiert sich im Gegensatz zur aktiven Gebäudeheizung aber nicht am Wärmeverlust des Hauses. Vielmehr fällt die freie Wärme räumlich und zeitlich so an, wie sich Wetter, Personen oder elektrische Verbraucher einfinden und Wärme eintragen. Aus diesem Grund ist es nicht selbstverständlich, dass die angebotene freie Wärme auch zur Reduktion des Heizwärmebedarfs nutzbar wird. Vielmehr wird auch der Fall eintreten, dass die solaren und die inneren Wärmeangebote den Raum übermäßig erwärmen: Die Raumtemperaturen liegen dann zeitweise über den gewünschten Solltemperaturen. Wird das Überangebot von freier Wärme sehr groß, so können die Raumtemperaturen zeitweilig sogar das Behaglichkeitsfeld verlassen. Dann werden die Bewohner überschüssige Energie durch zusätzliches Lüften nach außen abführen. Damit ist klar, dass nur ein Teil des solaren Wärmeangebots als Wärmegewinn wirksam wird. Der Ausnutzungsgrad des gesamten Wärmeangebots wird in der Energiebilanz berechnet [17], Der solare Ausnutzungsgrad ist vom jeweiligen Gebäude abhängig und kann im Bereich zwischen 40 und 100 % variieren.

#### 4.7.1.2.6 Der Einfluss des Fensterflächenanteils bei einem gut gedämmten Gebäude

Aus Abbildung 94 ist erkennbar, wie sich die Jahreswärmebilanz eines gut gedämmten Gebäudes verändert, wenn zunehmend größere Südfenster eingebaut werden. Wird die Südfensterfläche vergrößert, so steigen

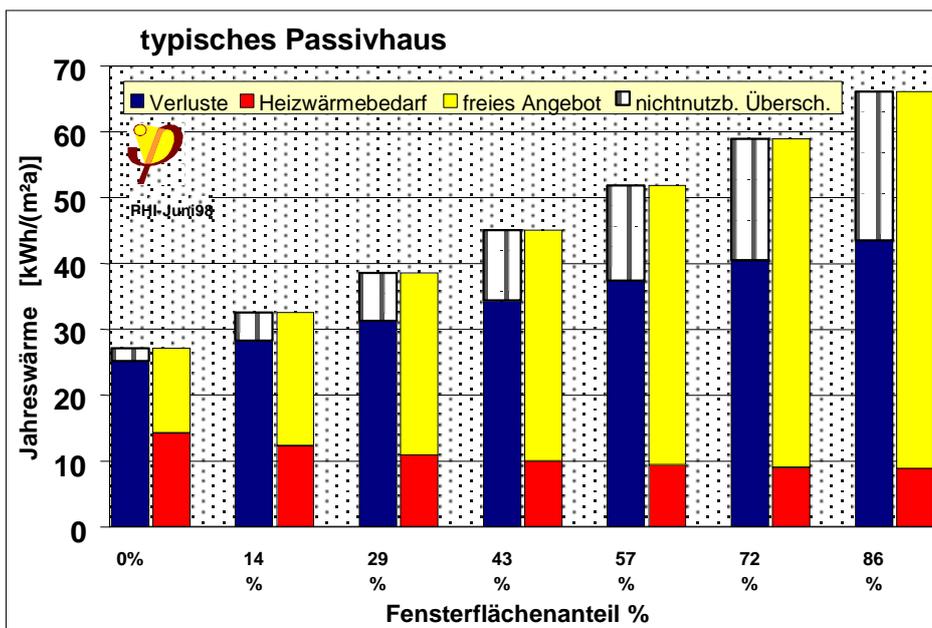
- sowohl die Wärmeverluste linear an (wegen des im Vergleich zur Außenwand höheren U-Wertes der Fenster),
- als auch das freie Wärmeangebot linear an (wegen der größeren transparenten Fläche).

**Bei zu großen Fensterflächen steigt der Heizwärmebedarf u. U. wieder an**

Allerdings ist vom freien Wärmeangebot ein zunehmend höherer Anteil nicht mehr nutzbar: Die solaren Überschüsse steigen. Dementsprechend nimmt der

Jahresheizwärmebedarf nicht linear ab, sondern bewegt sich mit zunehmendem Fensterflächenanteil immer weniger nach unten. Es kann sogar vorkommen, dass unter bestimmten Randbedingungen der Heizwärmebedarf bei weiter vergrößerter Fensterfläche wieder ansteigt.

Der Anteil der Verglasung an der gesamten Fassadenfläche ist bei der Altbauomodernisierung aufgrund der vorhandenen Rohbauöffnungen und Stürze nur bedingt variabel. Der optimale Verglasungsanteil bewegt sich im Spannungsfeld von winterlichem und sommerlichen Wärmeschutz, Investitionskosten und Belichtung. Für die Belichtung müssen Aufenthaltsräume nach Hessischer Bauordnung (HBO, vgl. [162]) Rohbauöffnungen für Fenster mit einer Fläche von mindestens 12,5 % der Grundfläche haben. Für die Reduktion des Heizwärmebedarfs ist bei Einbau von Passivhausfenstern ein Fensteranteil von ca. 30 % für die Südfassade sinnvoll (vgl. [92]). Bei darüber hinaus gehenden Anteilen beginnen die Überhitzungszeiten stark anzusteigen, wenn nicht temporäre Verschattungseinrichtungen (Raffstores o.ä.) installiert werden (vgl. [163]). Fenster auf der Ost-, West- und Nordseite sollten eher moderat entsprechend den Anforderungen an die Belichtung dimensioniert werden.



**Abbildung 94** Die Entwicklung der Jahresheizwärmebilanz mit zunehmendem Südfensterflächenanteil; Beispiel: Passivhaus mit Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung ( $U_{\text{Glas}} = 0.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ;  $g = 51 \%$ ; Klima: Frankfurt). (Quelle: PHI)

## 4.7.2 Konstruktionen und Materialien

### 4.7.2.1 Verglasungen und ihre Kennwerte

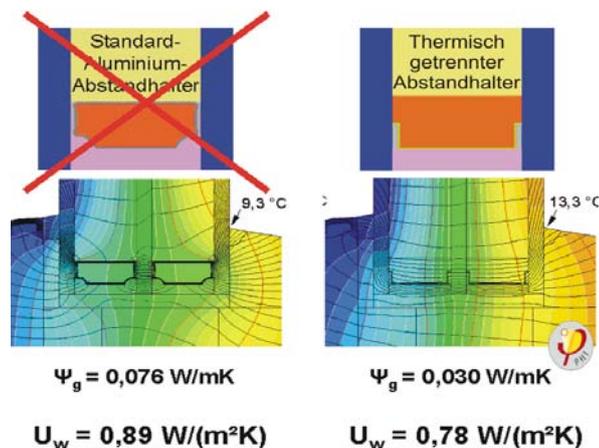
#### 4.7.2.1.1 Energiefluss durch die Verglasung

Um zu verstehen, wie die über die Verglasungsfläche auftretenden Wärmeverluste reduziert werden können, muss man die Wärmetransportmechanismen in einer Mehrscheiben-Verglasung kennen. Der **Strahlungsaustausch** zwischen den Scheiben verursacht bei Isolierverglasung ca. zwei Drittel der Wärmeverluste. Auf Wärmeleitung und Konvektion entfällt

das restliche Drittel. Durch die Entwicklung spezieller Beschichtungen ist es gelungen das Emissionsvermögen der Glasoberfläche von 0,89 auf nur noch ca. 0,04 zu senken. Damit wird der Strahlungsaustausch sehr weitgehend unterdrückt.

Die Wärmeübertragung durch **Konvektion** und **Wärmeleitung** des Gases im Scheibenzwischenraum kann durch Füllung mit Edelgasen, die deutlich schwerer als Luft sind und dazu eine geringere Wärmeleitfähigkeit haben, verringert werden. Damit kann mit dem üblichen Aufbau 4/16/4/16/4 (4 mm Verglasung, 16 mm Scheibenzwischenraum) ein  $U_g$ -Wert von 0,60 W/(m<sup>2</sup>K) erreicht werden. Schlankere Verglasungen mit einem verbesserten  $U_g$ -Wert von 0,5 W/(m<sup>2</sup>K) ergeben sich mit Krypton-Füllung (4/12/4/12/4).

Neben den Wärmeverlusten über die Fläche kann auch in nicht zu vernachlässigendem Umfang Wärme über den **Glasrandbereich** verloren gehen. Eine Verringerung dieser Wärmeverluste ist durch die Verwendung von thermisch verbesserten Abstandhaltern (warme Kante) z.B. aus dünnwandigem Edelstahlblech (Wandstärke  $\leq 0,2$  mm) oder aus Kunststoffprofilen möglich. Passivhaus-Fensterrahmen haben zudem häufig einen erhöhten Glaseinstand, der den Randverbund deutlich überdeckt. Dies führt zu einer weiteren Verbesserung. Insgesamt lässt sich so eine Einsparung von ca. 8 % der gesamten Wärmeverluste über das Fenster erreichen (vgl. [90]). Wegen der geringeren Wärmebrückenwirkung ist dann zudem die Gefahr von Tauwasserbildung (siehe Abbildung 96) am Glasrand deutlich reduziert (siehe Abbildung 95).



**Abbildung 95** Einfluss der Abstandhalter auf die Innenoberflächentemperaturen am Glaseinstand, den Wärmebrückenverlustkoeffizienten des Glasrands sowie den Fenster-U-Wert (berechnet mit:  $U_g = 0,70$  W/(m<sup>2</sup>K) und  $U_f = 0,71$  W/(m<sup>2</sup>K)). (Quelle: PHI, [219])



**Abbildung 96** Sichtbarer Ausdruck der Wärmebrückenwirkung von Aluminiumabstandhaltern ist die Bildung von Kondensat aufgrund niedrigerer Innenoberflächentemperaturen am Rand der Verglasung. (Quelle: PHI)

Über hochwertige Dreifach-Wärmeschutzverglasung geht nur noch wenig Wärme verloren. Dieser erwünschte Effekt hat allerdings zur Folge, dass die Außenoberfläche der Verglasung relativ kalt werden kann. Bei bestimmten Wetterbedingungen kann die Taupunkttemperatur der Außenluft unterschritten werden, so dass sich Kondensat auf der Außenseite der Verglasung bildet.

Den Wärmeverlusten über die Verglasung stehen Gewinne durch Sonneneinstrahlung gegenüber, die die Verluste idealerweise aufwiegen oder sogar übersteigen. Neben externen Faktoren wie Ausrichtung, Verschattung, Verschmutzung usw. ist der **Energiedurchlassgrad** (g-Wert) dafür das entscheidende Maß. Er sagt aus, welcher Anteil der auf die Scheibenoberfläche auftreffenden Solarstrahlung durch die Verglasung in den Raum gelangt. Heute erhältliche Dreifach-Wärmeschutzverglasung hat einen g-Wert von 0,50 bis 0,52 (je nach Beschichtung). Das Zertifizierungskriterium für passivhaustaugliche Verglasungen ist:  $g \cdot 1,6 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{K}) \geq U_g$  [223].

Es hat sich gezeigt, dass mit einer Verglasung, bei der der g-Wert mindestens in diesem Verhältnis zum  $U_g$ -Wert steht, netto über den Kernwinter solare Gewinne erzielt werden können, falls die Fenster nicht verschattet oder ungünstig orientiert sind.

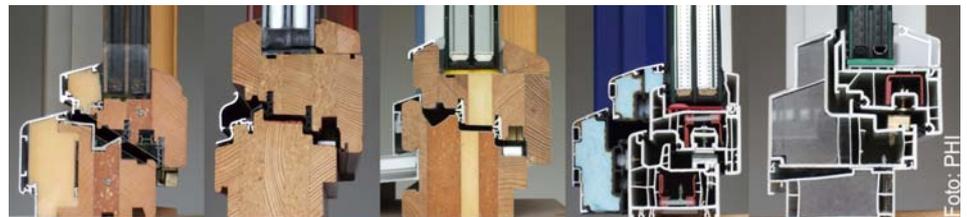
Sogenannte Sonnenschutzgläser mit einem absichtlich verringerten g-Wert, die die sommerliche Überhitzung von Gebäuden mit großem Verglasungsanteil verhindern sollen, sind aus energetischer Sicht nicht empfehlenswert, da sie gleichermaßen die solaren Gewinne während der Heizperiode reduzieren. Sinnvoller sind entweder temporäre Verschattungselemente oder aber feststehende Überstände über den Fenstern, die auf der Südseite im Sommer eine Verschattung bewirken, die tiefstehende Wintersonne aber weitgehend ungehindert ins Haus lassen. Eine weitere Alternative, vor allem bei exponierter, windiger Lage kann die Integration einer Jalousie in den

Zwischenraum zwischen einer Dreifach-Wärmeschutzverglasung und einer außen montierten weiteren Glasscheibe sein (Verbundfenster). Entsprechende Produkte mit den passenden Fensterrahmen sind in Passivhausqualität auf dem Markt erhältlich (vgl. [97]).

Der g-Wert benennt die Durchlässigkeit einer Verglasung für das gesamte Spektrum der Sonnenstrahlung. Er erlaubt jedoch keine Rückschlüsse auf den Einfluss einer Verglasung auf die Raumbelichtung. Den Durchlassgrad für den sichtbaren Anteil der Solareinstrahlung gibt der  $\tau$ -Wert (sprich: Tau) an (näheres hierzu im Abschnitt 7.8).

#### 4.7.2.2 Fensterrahmen und ihre Kennwerte

Bei üblichen Fensterformaten liegt der Rahmenanteil an der gesamten Fensterfläche bei ca. 30 - 40 %. Herkömmliche, ungedämmte Fensterrahmen haben einen U-Wert von  $U_f = 1,5$  bis  $2,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Das ist zwei- bis dreimal so hoch wie bei einer Dreifach-Verglasung mit  $U_g = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Es liegt daher auf der Hand, dass die Wärmeverluste über einen ungedämmten Fensterrahmen erheblich sein können. Zu einer hochwertigen Verglasung gehört daher auch ein gut wärmedämmender Fensterrahmen. Dieser trägt zum Erreichen eines U-Wertes (eingebaut) von  $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bei, was dazu führt, dass ohne Behaglichkeitsverlust auf einen Heizkörper vor dem Fenster verzichtet werden kann (vgl. Abschnitt 4.7.1.2.1 auf Seite 127).

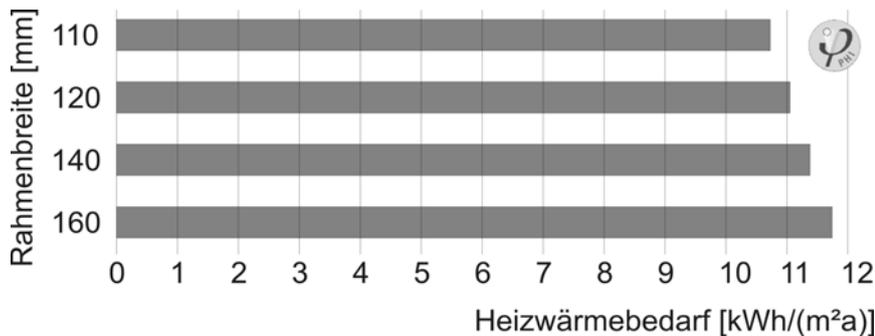


**Abbildung 97** Gedämmte Fensterrahmen mit Dreifach-Verglasung im Querschnitt. Erkennbar ist die vergrößerte Bautiefe, sowie der erhöhte Glaseinstand der den thermisch getrennten Randverbund überdeckt. Von links nach rechts: Holz-PUR mit gedämmter Alu-Vorsatzschale, Holz-Kork, Holz-PUR, PVC mit gedämmter Alu-Vorsatzschale und thermisch getrenntem Aussteifungsprofil, PVC mit gedämmten Kammern (Quelle: PHI).



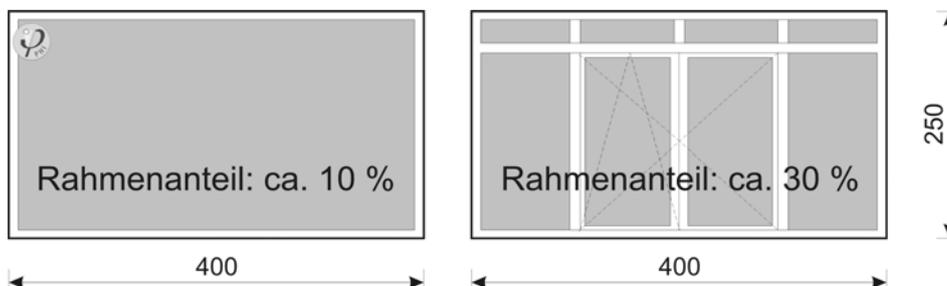
**Abbildung 98** Auch für Pfosten-Riegel-Fassaden werden gedämmte Systeme angeboten, die eine Dreifach-Wärmeschutzverglasung aufnehmen können (Quelle: PHI)

Dem Wunsch der Architekten nach schmalen Ansichtsbreiten der Fensterrahmen kommen inzwischen Hersteller nach und bieten gedämmte Fensterrahmen mit auf 110 oder sogar 100 mm reduzierter Breite an. Solche Rahmen helfen gerade im Altbau die begrenzten Rohbauöffnungsweiten der Fenster optimal auszunutzen, da sie größere Verglasungsflächen ermöglichen. Dadurch kann neben einer verbesserten Belichtung auch eine Vergrößerung der solaren Gewinne erreicht werden, was zu einer weiteren Verringerung des Heizwärmebedarfs führt (siehe Abbildung 99).



**Abbildung 99 Einfluss der Rahmenansichtsbreite auf den Heizwärmebedarf eines Reihenhhauses bei gleichbleibendem Rahmen-U-Wert  $U_f = 0,70 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und Überdämmung mit 0,4-facher Rahmenbreite (Quelle: PHI, vgl. [92])**

Eine weitere Möglichkeit den Rahmenanteil gering zu halten ist der Verzicht auf unnötige Fensterteilungen, sowie der Einsatz von Festverglasung. Diese hat schmalere Rahmenprofile.



**Abbildung 100 Der Rahmenanteil an der gesamten Fensterfläche steigt mit der Anzahl der Fensterteilungen (Quelle: PHI).**

Bei der Altbaumodernisierung können vorhandene Heizkörper unter den Fenstern unter Umständen beibehalten werden, wenn diese noch in gutem Zustand sind. Die Anforderungen an die Oberflächentemperaturen der Fenster zur Gewährleistung einer ausreichenden thermischen Behaglichkeit sind dann geringer. Im Gegensatz zur Dreifach-Wärmeschutzverglasung ist der Einbau eines gedämmten Fensterrahmens in Passivhausqualität eine Maßnahme, die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Veröffentlichung noch etwas unterhalb der Wirtschaftlichkeitsschwelle liegt. Zur Kosteneinsparung können daher in diesem Fall ungedämmte Profile eine Alternative sein, wenn ein optimaler Einbau, wie in Abschnitt 4.7.2.3 Seite 137 beschrieben, realisiert wird. Dann sollten aber zumindest verbesserte Profile verwendet werden, d.h. Holzkanteln mit 90 mm Stärke ( $U_f = 1,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) oder verbesserte Mehrkammer-Kunststoffrahmen mit einem  $U_f$  von ca.  $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

**Eine Verringerung der Anzahl der Fensterteilungen und Öffnungsflügel vermindert die Wärmeverluste und erhöht die solaren Gewinne.**

#### 4.7.2.2.1 Sprossenfenster

Die Unterteilung von Fensterflügeln mit Sprossen war in historischer Zeit auf Grund der damals fertigungstechnisch bedingten Begrenzung der Scheibengröße notwendig. Mit der heutigen industriellen Floatglass-Produktion, die auch die Herstellung sehr großer Fensterscheiben erlaubt, sind diese technischen Gründe für Fenstersprossen entfallen. Dennoch kann bei der Modernisierung von historischen Altbauten aus Gründen des Denkmalschutzes und der Beibehaltung der ursprünglichen Fassadengestalt eine Rekonstruktion der früheren Sprossenteilung beim Einbau neuer Fenster erforderlich oder gewünscht sein.

Es kommen verschiedene Sprossenkonstruktionen in Frage (vgl. [100]):

- **Aufsetzbarer Sprossenrahmen**, der mit Spezialbeschlägen innen oder außen vor die Glasfläche gesetzt wird und zu Reinigungszwecken entfernt werden kann (auf Grund des fertigungstechnischen Aufwands nur noch selten eingesetzt).
- **Sprosse nur im Scheibenzwischenraum**. Zur Vermeidung von Glasbruch muss die Sprosse etwas dünner als der Abstandhalter sein. Da die Glasoberfläche nicht unterbrochen wird, ist weiterhin eine einfache Glasreinigung möglich.
- Meist beidseitig **aufgeklebte Sprossenprofile** aus Holz, Kunststoff oder Metall. Befestigung mit Klebeband oder Dichtstoff. Aus optischen Gründen werden z.T. zusätzlich Abstandhalter-Sprossenprofile in den Scheibenzwischenraum eingesetzt.
- **Glasteilende Sprossen** unterbrechen die Glasscheibe, so dass einzelne kleinere Scheiben mit umlaufendem Randverbund entstehen. Sind die Scheiben kleiner als 60 cm Kantenlänge, kann bei ungünstigen Kantenverhältnissen und Randbedingungen ein Glasbruch auftreten.

Sprossenteilungen können einen deutlichen Einfluss auf den Heizwärmebedarf eines Gebäudes haben. Zum einen können die Sprossen Wärmebrücken darstellen, zum anderen vermindern sie die solaren Wärmegewinne durch die Verringerung der transparenten Fensterfläche. Zudem verschlechtern sie Ausblick und Belichtung.

Bezüglich der Transmissionswärmeverluste unterscheiden sich die oben genannten Konstruktionen zum Teil deutlich. Insbesondere glasteilende Sprossen können deutliche Wärmebrücken darstellen, mit einem Wärmebrückenverlustkoeffizienten bis über  $\Psi = 0,3 \text{ W}/(\text{mK})$ . Dadurch können sich die Wärmeverluste über die Scheibe verdoppeln. Auch Sprossen im Scheibenzwischenraum bei durchgehender Verglasung können noch eine signifikante Wärmebrückenwirkung haben (vgl. [100]).

**Aufgeklebte Sprossen sind aus energetischer Sicht am günstigsten.**

Falls eine Sprossenteilung nicht vermieden werden kann, sollten daher ein- oder beidseitig aufgeklebte Sprossenprofile ohne zusätzliche Sprosse im Scheibenzwischenraum verwendet werden. Diese haben nahezu keinen Einfluss auf die Wärmeverluste. Allerdings bleibt das Problem der Verringerung der solaren Wärmegewinne durch die Verschattungswirkung. Daher sollte die Ansichtsfläche der Sprossen soweit möglich durch eine Reduktion der Sprossenbreite sowie der Anzahl der Sprossenteilungen vermindert werden.

Alternativ kann die Aufarbeitung und Beibehaltung der originalen Sprossenfenster sinnvoll sein. Der nötige Wärmeschutz kann dann durch eine ungeteilte, innenliegende zweite Fensterebene, die mit dem außenliegenden alten Fenster ein Kastenfenster bildet, erreicht werden. Diese Konstruktion bietet sich insbesondere bei einer Innendämmung an (vgl. dazu Abbildung 50 auf Seite 83).

#### 4.7.2.3 Fenstereinbau

##### 4.7.2.3.1 Montage in der Dämmebene

Zur Wärmebrückenreduktion sollten neue Fenster in der Dämmebene eingebaut werden (vgl. Abschnitt 4.7.3 auf Seite 141). Diese Art der Montage ist etwas aufwändiger als bei einer Lage in der Mauerwerksleibung und ist den ausführenden Firmen oft noch weniger geläufig. Die Befestigungsmethoden sind aber teilweise ähnlich wie bei kerngedämmtem, zweischaligen Mauerwerk, wo eine Montage des Fensters in der Dämmebene heute schon Stand der Technik ist (vgl. [95]). Grundsätzlich gibt es drei übliche Befestigungsarten:

##### *Montagewinkel*

Dies ist die in Deutschland wohl gängigste Befestigungsart bei Passivhäusern. Das Fenster wird mit einzelnen Edelstahlwinkeln auf der Fassade verübelt. Der senkrecht zur Fassade stehende Schenkel des Winkels sollte dabei nur so lang sein, wie zur Befestigung des Fensters und zur Lastabtragung nötig. Der Winkel in Abbildung 101 ist in dieser Hinsicht schon etwas zu lang und verursacht dadurch unnötige Wärmeverluste. Werden nur einzelne Winkel verwendet, ist die Wärmebrückenwirkung jedoch in der Regel vernachlässigbar. Durchgehende Stahlschienen können dagegen deutliche Wärmeverluste verursachen. Die vorab erfolgte, nivellierte Anbringung eines Kantholzes zur Aufnahme der Vertikallasten des Fensters vereinfacht die Montage, weil das Fenster darauf abgestellt werden kann.



**Abbildung 101** Vor der Montage werden zuerst die Dichtungsbänder und dann die Befestigungswinkel am Fensterrahmen angebracht. (Quelle: PHI)

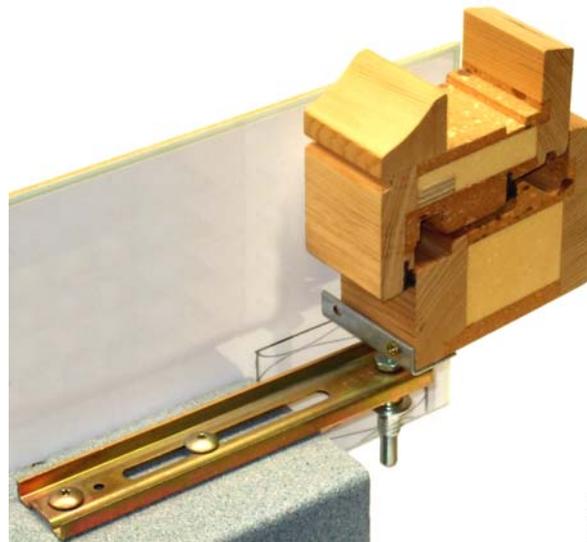
### *Blindrahmen*

Bei dieser Art der Montage wird ein Rahmen aus Vierkanthölzern an der Wand verschraubt. Die lichte Innenweite des Rahmens ist so groß wie die vorhandene Mauerwerksleibung, so dass er das eigentliche Fenster aufnehmen kann.

### *Justierbare Montagekonsolen und -schienen*

Diese Produkte wurden für die Fenstermontage in der Ebene der Kerndämmung bei zweischaligem Mauerwerk entwickelt. Sie sind aber auch für außenliegende Fassadendämmung einsetzbar und ermöglichen eine einfache und genaue Einjustierung des Fensters.

**Mit Montagekonsolen können die Fenster optimal einjustiert werden.**



**Abbildung 102** *Justierbare Montageschiene für die Befestigung von Fenstern in der Dämmebene (üblicherweise wird die Innenkante Fensterrahmen bündig zur Außenkante Massivwand gesetzt) (Quelle: PHI)*

#### *4.7.2.3.2 Rollläden und Jalousien*

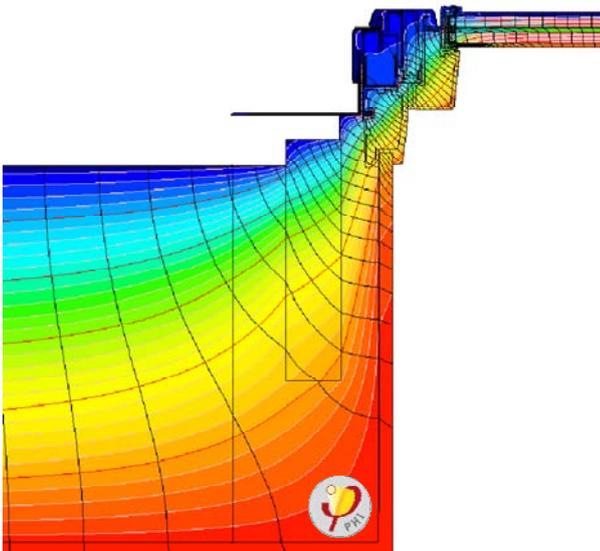
Der Einbau von Rollläden und Jalousien verursacht eine zusätzliche Wärmebrücke. Um zumindest die Tauwasserfreiheit an der Innenoberfläche zu gewährleisten, sollte im Bereich des Rollladenkastens eine Dämmdicke von mindestens 6 cm vorhanden sein (vgl. [90]). Dies ist am einfachsten beim Einsatz von Vorbau-Rollläden zu verwirklichen. Die Dämmung kann dann hinter dem Rollladenkasten in der Ebene des Fensterrahmens angebracht werden.

Die Bedienung sollte möglichst über einen luftdichten Antrieb erfolgen (elektrisch oder mit Kurbelwelle). Es gibt inzwischen aber auch luftdichte Gurtdurchführungen. Bei elektrischem Antrieb ist auf Luftdichtheit der Kabeldurchführungen zu achten.

#### *4.7.2.4 Dachflächenfenster*

Dachflächenfenster sind ein populäres Mittel um nachträglich ausgebaute Dachgeschosse zu belichten und so hochwertigen Wohnraum zu schaffen. Bezüglich der thermischen Eigenschaften von Dachflächenfenstern im Vergleich zu Fassadenfenstern sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Das Dachflächenfenster muss oberhalb der wasserführenden Ebene (z.B. Ziegel) liegen, um einen Wassereinstau zu verhindern. Es wird also (wie z.B. ein Blumenfenster in der vertikalen Fassade) aus der wärmedämmenden Ebene geschoben. Dadurch erhöht sich die Einbauwärmebrücke signifikant (siehe hierzu Abbildung 103).
- Aus dem gleichen Grund wird auch der Glasrandbereich nicht überdämmt. Dies hat eine erhöhte Wärmebrücke in diesem Bereich zur Folge.
- Zum Dritten verschlechtert sich der U-Wert einiger Verglasungen in Abhängigkeit vom Scheibenzwischenraum und Füllgas erheblich, sobald diese aus der Vertikalen gedreht werden. Dieser Effekt ist mit geänderten Konvektionsströmen im Scheibenzwischenraum erklärt. Tabelle 7 listet die U-Werte einiger Gläser in vertikaler und 45° geneigter Orientierung auf.
- Eine zusätzliche Schwierigkeit stellt der Wunsch der Nutzer dar, auch die Außenseite der Dachflächenfenster putzen zu können. Dazu ist es nötig, das Fenster um nahezu 180 Grad zu drehen. Dies zieht eine massive Erhöhung des Konstruktionsaufwandes sowie weitere Wärmebrücken nach sich und kompliziert thermische Verbesserungen.



**Abbildung 103** Einbausituation eines Dachflächenfensters mit Dreischeibenverglasung am Beispiel des Velux GPU 65 (Innentemperatur: 20 °C, Außentemperatur: -10 °C) (Quelle: PHI)

**Tabelle 7** *U-Wert einiger Verglasungen bei verschiedenen Neigungen*  
(Quelle: PHI)

Scheibenaufbau	$U_{g,vertikal}$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$U_{g,45^\circ}$ [W/(m <sup>2</sup> K)]
4/8Ar/4/8Ar/4	1,00	1,00
4/12Ar/12/8Ar/4	0,74	0,76
4/16Ar/4/16Ar/4	0,60	0,74
4/8Kr/4/8Kr/4	0,68	0,69
4/12Kr/12/8Kr/4	0,51	0,67

1. Zahl: Dicke des 1. Glases, 2. Zahl: Dicke des 1. Scheibenzwischenraumes....  
Ar = Argon, Kr = Krypton

Zwar wurde vom Passivhaus Institut in Modellstudien nachgewiesen, dass Dachflächenfenster, welche die Passivhaus Kriterien ( $U_{w, eingebaut} \leq 0,85$  W/(m<sup>2</sup>K) bei einem Fensterformat von 1,23 m x 1,48 m) erfüllen, möglich sind. Die Umsetzung seitens der Hersteller steht jedoch noch aus. Allerdings sind Dachflächenfenster in der Regel kleiner als Fassadenfenster, so dass die Behaglichkeit durch die weniger guten U-Werte der Dachflächenfenster möglicherweise nicht beeinträchtigt wird. Unter großflächigen Dachverglasungen, die nicht den Passivhaus-Kriterien entsprechen, sollten jedoch Wärmequellen angeordnet werden, um der Entstehung einer Kaltluftwalze vorzubeugen.

Solange keine zertifizierten Dachflächenfenster zur Verfügung stehen, sollten in Passivhäusern bzw. in Objekten nahe am Passivhaus Standard nur Dachflächenfenster mit Dreischeiben Wärmeschutzglas oder sogenannte 2+1-Verglasungen, die aus einem Zweischeiben Wärmeschutzglas und einer weiteren, vorgesetzten Einfachverglasung bestehen, eingesetzt werden.

Eine interessante Betrachtung ist der Vergleich zwischen Dachgauben und Dachflächenfenstern zur Belichtung von Dachräumen. Dachflächenfenster bringen, bei gleicher Fläche, mehr Licht als Fenster in Gauben. Wird der Energieverlust durch die Gauben zum Energieverlust der Fenster addiert, schneidet das Dachflächenfenster auch hier besser ab. Allerdings bringt eine Dachgaube in der Regel zusätzliche Wohnfläche.

#### 4.7.2.5 RWA-Öffnungen und Aufzugsschachtbelüftung

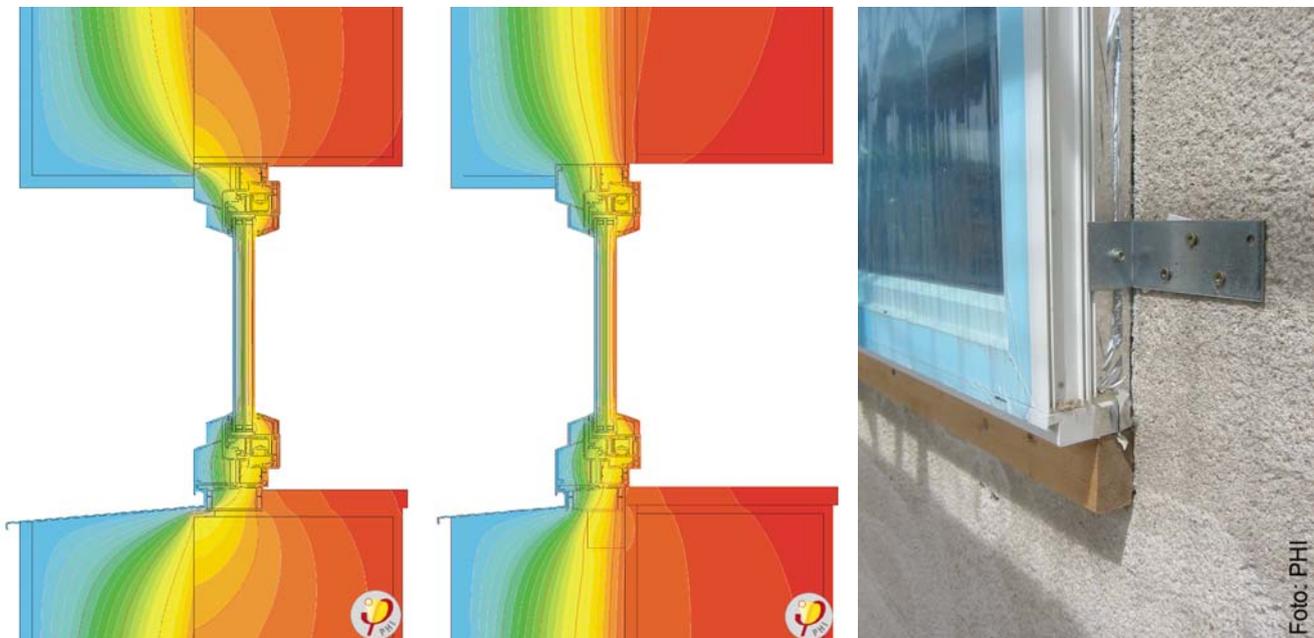
In Mehrfamilienhäusern ist im Zuge einer umfassenden Modernisierung die Aufstellung eines Brandschutzkonzeptes nötig. Hieraus ergibt sich unter Umständen die Notwendigkeit im Dach RWA-Klappen einzubauen. Wärmedämmte Dunkelklappen sind hierfür erhältlich. Ist ein Aufzug vorhanden sollte nach Möglichkeit die Entrauchung von Treppenhaus und Aufzugsschacht über dieselbe Öffnung erfolgen. Dies hat Vorteile bezüglich Luftdichtheit, Wärmedämmung und Baukosten. Dauerhaft zur Außenluft geöffnete Belüftungsquerschnitte für Aufzugsschächte sind mit dem Ziel einer luftdichten Hülle nicht zu vereinbaren und sollten daher unbedingt vermieden werden.

### 4.7.3 Wärmebrücken

Der gute Wärmeschutz eines Fensters kann durch einen ungünstigen Einbau deutlich verschlechtert werden. Die Wärmeverluste, die durch die spezifische Einbausituation des Fensters entstehen, gibt der lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient  $\Psi_{\text{Einbau}}$  an (vgl. 4.7.1.2.2.).

#### 4.7.3.1 Einbauposition

Wärmestromberechnungen haben gezeigt, dass ein Einbau des Fensters in der Dämmebene am vorteilhaftesten ist. Anzustreben ist ein möglichst geringer Versatz der Dämmebenen von Fenster und Wand. Da eine Fensterposition in der Mitte der Dämmebene baupraktisch nur schwierig auszuführen ist, empfiehlt sich der Einbau direkt vor der Mauerwerksaußenkante. Wird das Fenster innerhalb der Mauerwerksleibung montiert, steigen die Wärmeverluste stark an (siehe Abbildung 104) (vgl. auch [94]).



$U_w$ (nicht eingebaut)	=	$U_w$ (nicht eingebaut)	=
0,79 W/(m <sup>2</sup> K)		0,79 W/(m <sup>2</sup> K)	
$U_w$ (eingebaut)	=	$U_w$ (eingebaut)	=
0,97 W/(m <sup>2</sup> K)		0,85 W/(m <sup>2</sup> K)	
$\Psi_{\text{Einbau}}$ (oben/seitl.)	=	$\Psi_{\text{Einbau}}$ (oben/seitl.)	=
0,063 W/(mK)		0,011 W/(mK)	
$\Psi_{\text{Einbau}}$ (unten)	=	$\Psi_{\text{Einbau}}$ (unten)	=
0,125 W/(mK)		0,050 W/(mK)	

**Abbildung 104** links: Thermisch ungünstiger Einbau eines Passivhausfensters (3-WSV, gedämmter Rahmen) außenbündig mit dem Mauerwerk mit ca. 3 cm Rahmenüberdämmung Mitte und rechts: Wärmebrückenreduzierter Fenstereinbau in der späteren Dämmebene mit Hilfe von Stahlwinkeln. Das Wärmedämm-Verbundsystem überdeckt seitlich und oben den Rahmen um einige Zentimeter. (Quelle: PHI, [135])

**Thermisch optimal ist der Einbau des Fensters in der Dämmebene.**

Der Fenstereinbau in der Dämmebene hat noch weitere Vorteile. Die solaren Wärmegewinne werden erhöht, da die Verschattung durch die Leibung umso mehr abnimmt, je weiter außen das Fenster sitzt.

**Durch Rahmenüberdämmung wird die Einbauwärmebrücke vermindert.**

#### 4.7.3.2 *Überdämmung des Fensterrahmens*

Außer durch die Einbauposition kann die Einbauwärmebrücke auch noch durch eine äußere Überdämmung des Fensterrahmens verringert werden (siehe Abbildung 104). Die Einbauwärmebrücke nimmt mit dem Maß der Überdämmung ab (vgl. [94]), so dass eine obere Begrenzung der Überdämmungsbreite nur aus der Rahmengeometrie und anderen baupraktischen Gründen, wie z.B. der Montage von Rollladenschienen auf dem Rahmen resultiert. Bei Fensterrahmen mit einem äußeren Deckprofil aus dem stark wärmeleitenden Aluminium bleibt eine Rahmenüberdämmung weitgehend unwirksam. Hier kann durch die Verwendung schmalere Deckprofile, die nur den nicht überdämmten Teil des Rahmens abdecken, Abhilfe geschaffen werden.

Die Überdämmung des Rahmens verkleinert allerdings die äußere Leibung und vermindert daher bis zu einem gewissen Grad die Belichtung und die solaren Wärmegewinne. Zumindest für den Heizwärmebedarf haben Gebäudesimulationen aber ergeben, dass der positive Effekt durch die Verringerung der Wärmeverluste sich stärker auswirkt, als der negative Effekt durch die Reduktion der Solareinstrahlung (vgl. [92]). Trotzdem kann die Abschrägung der Fensterleibung zur Verbesserung der Solarapertur sowohl energetisch als auch architektonisch eine reizvolle Lösung sein.

#### 4.7.3.3 *Fensterbank*

**Ungedämmte Rahmenverbreiterungen verursachen zusätzliche Wärmeverluste.**

Im Bereich der Fensterbank ist normalerweise keine Rahmenüberdämmung möglich, da die Fensterbank unterhalb der Entwässerungsöffnungen des Blendrahmenprofils angeschlossen werden muss. Der Einbau-Wärmebrückenverlustkoeffizient ist daher im Brüstungsbereich in der Regel höher. Häufig haben die Fensterrahmen einen Rücksprung auf der Vorderseite des Brüstungsprofils unter den die Fensterbank gesetzt wird. Ist dies nicht der Fall, wird normalerweise eine Rahmenverbreiterung an das Brüstungsprofil angesetzt, die schmaler als das eigentliche Rahmenprofil ist, um so die nötige Tropfkante herzustellen. Dabei kommt es immer wieder vor, dass an einen gedämmten Fensterrahmen eine ungedämmte Rahmenverbreiterung montiert wird. Die Wärmeverluste über den Rahmen steigen dadurch deutlich an. Abbildung 105 zeigt wie sich dieses Detail durch das Einfügen eines zusätzlichen Streifens Dämmstoff wärmetechnisch verbessern lässt.



**Abbildung 105 (Fotos von innen) Links: die zurückgesetzte ungedämmte Rahmenverbreiterung ist unterhalb des Fensterrahmens sichtbar. Rechts: Ein Dämmstreifen wurde eingefügt (dunkelgrau). Das Luftdichtheitsband wird raumseitig vor dem Dämmstreifen geführt und auf der verspachtelten Fensterbrüstung verklebt. (Quelle: PHI)**

#### 4.7.4 Luftdichtheit

Undichte Fenster haben im Altbau in der Regel einen bedeutenden Anteil an den hohen Lüftungswärmeverlusten. Hier können und sollten beim Fensteraustausch deutliche Verbesserungen erzielt werden.

Die Luftdichtheitsebene sollte sich dabei möglichst weit auf der Innenseite des Rahmens befinden. Dies ist die einzige Luftdichtheitsebene. Andere außenliegende Ebenen, die dem Schlagregenschutz oder der Winddichtheit dienen, stehen nicht im Zusammenhang mit der Luftdichtheit.

Beim Einbau muss das Fenster immer unmittelbar an die luftdichte Ebene der Außenwand angeschlossen werden.

Der luftdichte Anschluss kann zum Beispiel mit Hilfe von geeigneten Klebebändern ausgeführt werden. Diese werden am besten vor dem Einbau umlaufend an den Fensterrahmen geklebt. Der luftdichte Anschluss an die Außenwand erfolgt bei Klebebändern mit angeschlossenem Gewebestreifen (siehe Abbildung 107) durch Einputzen des Bandes. Vlieskaschiertes Klebeband muss mit einer geeigneten Dichtungsmasse direkt auf die Leibung geklebt werden und kann dann überputzt werden. Allerdings ist die Leibungsoberfläche im Altbau nach dem Entfernen des alten Fensters und dem evtl. nötigen Abschneiden von bestehenden massiven Fensteranschlüssen häufig stark zerklüftet und uneben. Für eine kontrollierte Verbindung zum Klebeband muss dann erst ein einfacher Glatstrich auf der Leibung hergestellt werden. Auf eine ausreichende Trocknungszeit des Glatstrichs vor Aufbringen der Klebemasse ist hierbei zu achten.

Grundsätzlich dürfen nicht-elastische Dichtungsbänder nie auf Spannung verlegt werden, da sie sonst bei Bauteilbewegungen, verursacht zum Beispiel durch thermische Längenänderung, abreißen können. Es sollte daher immer eine Bewegungsschleufe vorgesehen werden.

**Dichtungsbänder immer spannungsfrei (z.B. schlaufenförmig) verlegen!**



**Abbildung 106** Fensteranschluss mit Dichtungsbändern an die auf der Außenseite Außenwand liegende Luftdichtheitsebene. Die Luftdichtheit in der Fläche wird in diesem Fall durch eine vollflächige Spachtelung auf dem bestehenden Außenputz hergestellt (im Bild noch nicht ausgeführt). Danach wird das Wärmedämm-Verbundsystem angebracht. (Quelle: PHI, [202])



**Abbildung 107** Klebeband mit Einputzgewebe für den späteren luftdichten Anschluss des Fensters an den Innenleibungsputz (Quelle: PHI, [203])

Eine weitere Möglichkeit der Fensterabdichtung ist die Verwendung von Anputzprofilen. Allerdings können Anputzleisten bauartbedingt nur in sehr begrenztem Umfang Bewegungen des Fensterrahmens ohne Abriss aufnehmen.

Neben dem luftdichten Anschluss des Fensters an die Außenwand ist gleichermaßen ein luftdicht schließender Rahmen wichtig. Heutige Fenster verfügen über mehrere Dichtungsebenen mit unterschiedlichen Funktionen (z.B. auch Schutz vor Schlagregen). Dabei ist die für die Luftdichtheit entscheidende Dichtung ausschließlich die innenraumseitige. Weitere Lippendichtungen bringen keine Verbesserung, wenn nicht eine der beiden Dichtungen schon für sich ausreichend luftdicht ist.

In der Baupraxis hat sich gezeigt, dass eine Prüfung der Einstellung der Fensterflügel während der Blower-Door-Messung sehr effektiv und damit dringend angeraten ist.

**Für die Dichtigkeit der Lippendichtungen zwischen Blendrahmen und Flügel ist das sorgfältige Einstellen der Flügel bei der Montage Voraussetzung.**

## 4.8 Haustüren

### 4.8.1 Grundlagen

Neben den Fenstern stellt die Haustür bei Altbauten häufig eine Schwachstelle bezüglich Wärmedämmung und Luftdichtheit dar. Trotz der verhältnismäßig kleinen Fläche kann durch eine Verbesserung sowohl des Wärmeschutzes als auch der Luftdichtheit der Haustür eine spürbare Verringerung des Heizwärmebedarfs in der Größenordnung von mehreren Kilowattstunden pro Quadratmeter Nettogeschossfläche im Jahr erreicht werden. Dies gilt insbesondere für Einfamilien- und Reihenhäuser. Bei größeren Gebäuden hat die Haustür einen vergleichsweise kleinen Anteil an der thermischen Hüllfläche des Gebäudes. Bei diesen Gebäuden haben die Anforderungen bezüglich Luftdichtheit eine höhere Priorität als die Wärmedämmwirkung der Haustür.

Grundsätzlich sollten jedoch die gleichen Qualitätsanforderungen wie im Abschnitt Fenster genannt, auch für Haustüren eingehalten werden. Über diese Anforderungen an den Wärmeschutz hinaus müssen Haustüren aber noch einige besondere Funktionen gewährleisten. Diese zusätzlichen Anforderungen sind oft eine besondere Herausforderung:

- Formstabilität auch unter Klimabelastungen
- Dauerbelastungs-Standfestigkeit
- Minimierte Schwellenhöhe
- Einfache Handhabung
- Gestalterische Anforderungen
- Einbruchschutz
- Brandschutz

#### 4.8.1.1 Einbruchschutz

Nach DIN EN 1627 (vgl. [98]) werden Türen in verschiedene Widerstandsklassen eingeteilt. Wird ein erhöhter Einbruchschutz für die Haustür gewünscht, so erfordert dies gegebenenfalls den Einbau von mehr Verstärkungen an den Bändern und im Türblatt, welche meist aus Metall gefertigt sind. Diese Verstärkungen bilden in der Regel zusätzliche Wärmebrücken.

**Maßnahmen zum Einbruchschutz können u.U. den Wärmeschutz der Haustür verschlechtern.**

#### 4.8.1.2 Kellertür

Grundsätzlich werden an eine Tür, die den beheizten Wohnraum mit einem kalten Keller verbindet, die gleichen Anforderungen bezüglich Luftdichtheit und Wärmedämmung wie an eine Haustür gestellt. Es handelt sich also um eine relativ aufwändige Konstruktion (zu Lösungsmöglichkeiten siehe Abschnitt 4.3.3.4.1 auf Seite 95). Die Wärmeverluste zum Keller sind aufgrund der höheren Erdreichtemperaturen allerdings geringer als bei der Haustür. Insbesondere auf eine gute Luftdichtheit sollte jedoch großen Wert gelegt werden, da durch die Thermik im Haus während der Heizperiode ein dauerhafter Antrieb für eine Ansaugung von Kellerluft in das beheizte

Gebäudevolumen besteht. Undichte Kellerabgangstüren verursachen neben Wärmeverlusten und Komforteinschränkungen auch die Gefahr, dass belastete Kellerluft (Radon, Gerüche etc.) in die Wohnräume gelangt.



**Abbildung 108** Einbau einer wärmegeprägten Haustür im Zuge der energetischen Modernisierung eines Mehrfamilienhauses. Der Türrahmen wird seitlich und oben mit dem Wärmedämm-Verbundsystem überdämmt. Die Anschlagschwelle liegt auf einem Block aus druckbelastbarem aber trotzdem wärmedämmendem PU-Recyclingmaterial (hellbraun). (Quelle: PHI, [203])

#### 4.8.2 Luftdichtheit

**Für die Erreichung einer guten Luftdichtheit ist die Stabilität der Tür ein entscheidender Faktor.**

Der luftdichte Anschluss der Haustür an die Außenwand sollte bei Haustüren nach den gleichen Prinzipien und Methoden wie bei Fenstern erfolgen (vgl. Abschnitt 4.7.2.4 auf Seite 138). Dagegen ist der luftdichte Anschluss des Türflügels an den Rahmen schwieriger zu gewährleisten, da Haustüren im geschlossenen Zustand nicht wie Fenster durch den Beschlag an die umlaufende Dichtung angepresst werden und zudem an der Schlossseite nur durch die Schlosszunge zugehalten werden. Besonders wichtig ist daher die Stabilität der Tür. Heute übliche Dichtungsprofile weisen einen maximalen Verformungsweg von 4 mm auf. Daher sollte das Türblatt eine maximale Verformung von 2-3 mm nicht überschreiten.

Die Luftdichtheit wird im Labor nach DIN EN 1026. Daraus ergibt sich die Luftdichtheitsklasse nach DIN EN 12207 von Klasse 1 (hohe Luftdurchlässigkeit) bis Klasse 4 (sehr geringe Luftdurchlässigkeit). Zur Vermeidung übermäßiger Lüftungswärmeverluste empfiehlt sich eine Tür, die mindestens Klasse 3 erreicht.

Die Labormessung zur Ermittlung der Luftdichtheitsklasse findet allerdings mit der Tür im verriegelten Zustand statt. Dadurch erhält das Türblatt mit den zusätzlichen Schließriegeln oben und unten einen Anpressdruck gegen die Falzrichtung, einer Verformung wird so entgegengewirkt. Tatsächlich wird die Haustür, zumindest wenn die Bewohner zu Hause sind, häufig nicht abgeschlossen sein. Es ist dann lediglich die Schließe eingeschnappt. In diesem Zustand ist die nach Norm gemessene Luftdichtheit aber nicht gewährleistet. Abhilfe kann hier ein sogenannter Knaufzylinder bieten. Bei vom

Passivhaus Institut zertifizierten Haustüren wird abweichend vom üblichen Vorgehen die Luftdichtheit im *nicht* verriegelten Zustand gemessen. Bei diesen Türen ist somit eine Verriegelung zur Gewährleistung der Luftdichtheit nicht nötig. Während sich die Luftdichtheit seitlich und oben relativ problemlos gewährleisten lässt, ist dies an der Schwelle aufgrund der Anforderung die Schwellenhöhe möglichst zu minimieren, schwieriger. Nur durch die Konstruktion einer Anschlagsschwelle können die Anforderungen insbesondere an die dauerhafte Dichtheit erfüllt werden. Die Schwelle muss deshalb besonders tritt- und formstabil sein. Zusätzlich sollte das Schwellenprofil eine thermische Trennung aufweisen. Schleifdichtungen oder durch die Türbewegung auf und ab bewegte Dichtungen (sogenannte Wind-Ex-Dichtungen), Magnetdichtungen u.ä. sind erfahrungsgemäß weniger wirksam.

**Auch im Schwellenbereich ist ein (niedriger) Türanschlag für die Sicherstellung der Luftdichtheit erforderlich.**



**Abbildung 109** Nur wenn die Blower-Door in ein Fenster statt in die Haustür eingebaut wird, kann auch die Luftdichtheit der Haustür beim Drucktest überprüft werden. (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Bernadottestr., WBG Nürnberg)

## 4.9 Luftdichtheit - Grundprinzipien

Hinweis: Dieses Kapitel behandelt allgemeine Aspekte der Luftdichtheit im Altbau. Spezifische Informationen zur Herstellung der Luftdichtheit bei den einzelnen Bauteilen finden sich in den jeweiligen Bauteilkapiteln (4.1 bis 4.8).

### 4.9.1 Problematik von Undichtigkeiten

Unsanierete Altbauten haben in der Regel eine relativ undichte Gebäudehülle. Drucktests in 80 verschiedenen Ein- und Mehrfamilienhäusern ergaben eine durchschnittliche Luftdichtheit im Altbaubestand von  $n_{50} = 7,4 \text{ h}^{-1}$  (vgl. [160]) und damit eine mehr als 10-mal höhere Undichtigkeit als bei Passivhäusern zulässig. Auch bei so hoher Undichtigkeit können die Fugen in der Gebäudehülle keinen zuverlässigen Beitrag zur erforderlichen Belüftung des Gebäudes liefern (vgl. Abschnitt 5.1.1.1). Daneben verursachen Undichtigkeiten eine ganze Reihe von Problemen:

#### *Bauschäden durch Tauwasser*

Feuchtwarme Raumluft gelangt durch Fugen in die kalten, äußeren Bereiche der Außenbauteile. Dort kondensiert der in der Luft enthaltene Wasserdampf. Das führt zur Verminderung der Wärmedämmwirkung und kann zu Schäden durch Schimmel und Fäulnis führen. Insbesondere im Dachbereich besteht im Winter durch den thermischen Auftrieb im Gebäude ein dauerhafter Antrieb für die Exfiltration (siehe Abbildung 114 auf Seite 155).

#### *Mangelhafte thermische Behaglichkeit*

Bei sehr undichten Altbauten wird die Behaglichkeit durch Infiltration kalter Luft durch Fugen mit dem daraus resultierenden Zugluftrisiko und sich u. U. bildenden Kaltluftseen auf Fußbodenhöhe beeinträchtigt.

#### *Lüftungswärmeverluste*

Je weniger dicht die Gebäudehülle ist, desto höher sind die Lüftungswärmeverluste durch In-/Exfiltration. Diese Wärmeverluste durch In-/Exfiltration fallen insbesondere bei Gebäuden mit ansonsten gutem Wärmeschutz deutlich ins Gewicht. Der zusätzliche Heizwärmebedarf bei einer Verschlechterung der Luftdichtheit von  $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$  (Passivhaus-Grenzwert) auf  $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$  (Grenzwert nach Energieeinsparverordnung (vgl. [140]) für Gebäude ohne Lüftungsanlage) beträgt bei üblichen Wohngebäuden gut  $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

#### *Luftschallschutz*

Durch eine undichte Bauweise wird der Luftschallschutz auch bei ansonsten gut schalldämmenden Bauteilen deutlich herabgesetzt. Dies gilt insbesondere auch für den Fenstereinbau (vgl. auch Abschnitt 7.6.2.3).

#### *Luftqualität*

Durch Leckagen in der Gebäudehülle können gesundheitsschädliche Stoffe in das Gebäude eindringen. Besondere gesundheitliche Relevanz hat dabei die Infiltration von radioaktivem Radon aus dem Erdreich in die Innenraumluft. Sie wird für etwa 7 % der Lungenkarzinome mit jährlich ca. 2500 Todesfällen in Deutschland verantwortlich gemacht (vgl. [152]). Die Radonbelastung im Erdreich ist nicht überall gleich, sondern hängt vom geologischen Untergrund ab (vgl. [153]). Wichtigste Maßnahme zur Verringerung der Radonkonzentration in der Innenraumluft ist neben einer ausreichenden Wohnungslüftung die luftdichte Abdichtung des Gebäudes zum Erdreich bzw. zum mit dem Erdreich verbundenen Keller.

#### *Betrieb einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung*

Voraussetzung für Funktion und Effizienz einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ist eine weitgehend luftdichte Gebäudehülle.

Leckagen in größerem Umfang können dazu führen, dass sich durch den an der Gebäudehülle außen anliegenden Winddruck bzw. -sog die Druckverhältnisse im Gebäude ändern. Die Effizienz der Anlage kann dadurch stark vermindert werden. Für den Anteil der Luft, der nicht über die Lüftungsanlage transportiert wird, ist natürlich keine Wärmerückgewinnung möglich.

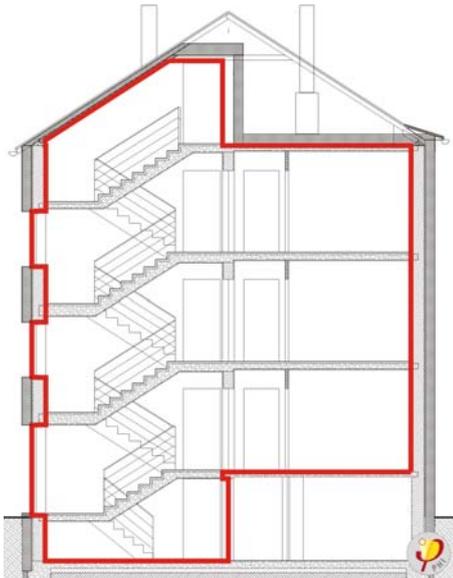
**Radon, das durch nicht ausreichend luftdichte Bodenplatten und Kellerdecken eindringt, kann Lungenkrebs verursachen**

**Luftdichtheit ist Voraussetzung für den Betrieb einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung**

#### 4.9.2 Grundprinzipien für die Verbesserung der Luftdichtheit

Zur weitgehenden Behebung der in Abschnitt 4.9.1 genannten Probleme ist eine Verbesserung der Luftdichtheit im Zuge einer Modernisierung dringend angeraten. Die dafür erforderlichen Maßnahmen lassen sich naturgemäß immer dann besonders effektiv und kostengünstig durchführen, wenn das betreffende Bauteil ohnehin erneuert oder instandgesetzt wird. Solche Gelegenheiten müssen daher unbedingt auch zur Verbesserung der Luftdichtheit genutzt werden, da durch die lange Lebensdauer der Bauteile ansonsten Jahrzehnte vergehen können, bis wieder Arbeiten am Bauteil anstehen.

*Gelegenheiten, wie die Erneuerung der Dacheindeckung, sollten zur gleichzeitigen Verbesserung der Luftdichtheit genutzt werden.*



**Abbildung 110** Die luftdichte Ebene (rot) sollte das beheizte Volumen lückenlos umgeben. (Quelle: PHI)

Oberstes Prinzip ist, dass es **nur eine luftdichte Ebene** gibt, die das gesamte Gebäude umschließt. Diese sollte entsprechend sorgfältig ausgeführt werden. Nicht zielführend ist die Ausbildung von mehr als einer luftdichten Ebene - z.B. innenseitig und außenseitig der Mauerwerkswand.

Die „Luftdichtheit“ wird im deutschen Sprachgebrauch häufig mit der „Winddichtheit“ verwechselt. Tatsächlich handelt es sich aber um zwei gänzlich unterschiedliche Anforderungen. Die winddichte Ausführung der Außenseite der Wärmedämmung soll eine Durch- oder Hinterströmung der Wärmedämmung durch kalte Außenluft verhindern, welche die Wirksamkeit der Wärmedämmung deutlich herabsetzen kann.

*Luftdichtheit und Winddichtheit werden in der Umgangssprache häufig verwechselt.*

Die Beachtung der folgenden Gesichtspunkte erleichtert die erfolgreiche Verbesserung der Luftdichtheit auch im Altbau (vgl. [43]):

- **Einfachheit:** Alle Konstruktionsdetails sollten so einfach wie möglich ausführbar sein, um Mängeln bei der handwerklichen Arbeit weitgehend vorzubeugen.
- Möglichst **große geschlossene** Flächen mit einer einzigen, einfachen Grundkonstruktion. Dadurch werden weniger Wechsel im Material und somit weniger Probleme bei der Gestaltung der Anschlüsse erreicht.

- Auswahl **zuverlässiger und bewährter Grundkonstruktionen** - es müssen keine völlig neuartigen oder exotischen Dichtprinzipien entwickelt werden.
- **Prinzipientreue** bei der Planung von Anschlüssen: Wird ein Anschlussdetail zwischen zwei Grundkonstruktionen an einer Stelle eingesetzt, so wird dasselbe Detail auch überall sonst beim entsprechenden Anschluss verwendet.
- Grundsätzlich sollten **Durchdringungen** der dichtenden Hülle **vermieden** bzw. minimiert werden.

Die luftdichte Ebene ist in der Regel gleichzeitig die Dampfbremse. Sie sollte daher auf der warmen Seite der Wärmedämmung angeordnet werden.

**Luftdichtheit ist eine Planungsaufgabe.**

Die Luftdichtheit ist zuallererst eine Planungsaufgabe. Lösungen die von Handwerkern in Ermangelung einer Planung spontan selbst entwickelt werden müssen, führen häufig zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Für jeden Bauteilaufbau und für jedes Anschlussdetail muss in der **Werkplanung** die Lage der luftdichten Ebene bestimmt werden und deutlich erkennbar eingezeichnet werden (z.B. durch eine rote Linie).

Die Erfahrung zeigt, dass neben einer sorgfältigen Planung eine umfassende Qualitätssicherung auf der Baustelle für das Erreichen einer guten Luftdichtheit unerlässlich ist. Dies ist Aufgabe der **Bauleitung**. Die entsprechenden Details müssen mit den Handwerkern durchgesprochen werden. Die gewissenhafte Ausführung muss regelmäßig kontrolliert werden. Für alle Bereiche der luftdichten Ebene sollte eine „Abnahme“ mindestens durch Sichtkontrolle erfolgen, bevor diese durch Verkleidungen etc. nicht mehr zugänglich sind. Bei luftdichten Anschlüssen zwischen unterschiedlichen Gewerken muss eindeutig geklärt sein, wer für die Herstellung der Luftdichtheit am Anschluss verantwortlich ist.

**Zur Vermeidung von Bauschäden muss die Verbesserung der Luftdichtheit immer mit dem Einbau einer Lüftungsanlage und der Wärmedämmung des Gebäudes einhergehen!**

Eine Verbesserung der Luftdichtheit hat den erwünschten Effekt, dass die Infiltrationswärmeverluste sinken. Dies kann, wenn keine ausreichende Belüftung auf anderem Wege sichergestellt wird, zu einem Anstieg der relativen Feuchte der Innenraumluft führen. In der Folge kann sich Kondensat an kalten Innenoberflächen, insbesondere im Bereich von Wärmebrücken und hinter Möbeln bilden, was bei dauerhaft zu hoher Feuchte zu Schimmelbefall und Schädigung von Bauteilen führen kann (siehe Abschnitt 4.7.1.1 auf Seite 126). Die Verbesserung der Luftdichtheit im Altbau muss daher zwingend mit den folgenden zwei Maßnahmen einhergehen - sonst können Bauschäden nicht ausgeschlossen werden:

- Anhebung der Innenoberflächentemperaturen durch ausreichende Wärmedämmung der Außenbauteile
- Einbau einer Lüftungsanlage (durch Fensterlüftung kann ein ausreichender Luftwechsel nicht dauerhaft und zuverlässig sichergestellt werden, vgl. Abschnitt 5.1.1.3 auf Seite 155)

Bei Betrieb von **Feuerungsanlagen** wie z.B. Stückholzöfen in sehr luftdichten Gebäuden müssen insbesondere bei Vorhandensein einer Lüftungsanlage besondere Vorsichtsmaßnahmen eingehalten werden, um ein Austreten

gesundheitsgefährdender oder lebensgefährlicher Verbrennungsprodukte (insbesondere Kohlenmonoxid) auszuschließen. Auch bei Öfen die für raumluftunabhängigen Betrieb zugelassen sind (z.B. Pelletsöfen der Dichtheitsklasse D1) sollte auf jeden Fall sichergestellt sein, dass kein Unterdruck im Gebäude durch eine Fehlfunktion (Disbalance) der Lüftungsanlage entstehen kann. Dies erfüllt zum Beispiel eine Differenzdrucküberwachung mit gegebenenfalls automatischer Abschaltung der Lüftungsanlage (vgl. [154]).

#### 4.9.3 Empfohlenes Luftdichtheitsniveau

Für das Erreichen des Passivhaus-Standards ist eine Gebäudedichtheit entsprechend einem Drucktestergebnis von  $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$  erforderlich. Bei der Altbaumodernisierung gibt es in der Regel keine das gesamte Gebäude umschließende gut zugängliche und unterbrechungsfreie Ebene für die Herstellung der Luftdichtheit. Dennoch können auch im Altbau Luftdichtheitswerte wie bei Passivhäusern erreicht werden. Dies beweist eine ganze Reihe inzwischen realisierter Sanierungsprojekte (siehe zum Beispiel [135] und [155]).

*Eine passivhaus-typische Luftdichtheit kann auch im Altbau erreicht werden.*

Für das Anstreben der passivhaustypischen Luftdichtheit auch im Altbau sprechen mehrere Argumente:

- Bei undichten Gebäuden gelangt, wie weiter oben gezeigt, Feuchtigkeit aus der Raumluft durch Fugen in die kalten äußeren Bereiche der Außenbauteile und kann dort zu Schäden durch Schimmel und Fäulnis führen. Berechnungen haben gezeigt, dass beispielsweise bei einem Warmdach zur Bauschadensvermeidung ein Wert für die Luftdichtheit von  $q_{50} = 0,6 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  (bezogen auf die Dachfläche) nicht überschritten werden sollte (vgl. [42]).
- Bei sehr undichten Altbauten wird die Behaglichkeit durch Infiltration kalter Luft durch Fugen mit dem daraus resultierenden Zugluftrisiko beeinträchtigt. Dem wird durch eine Verbesserung der Luftdichtheit im Zuge der Modernisierung begegnet. Der Erfolg der Maßnahmen kann nur mit einem Drucktest geprüft und quantifiziert werden. Leckagen, die ein Zugluftrisiko verursachen können, können in der Regel bei der Leckagesuche im Zuge eines Drucktests (Blower-Door) entdeckt und behoben werden. (vgl. [156]).
- Wie oben gezeigt, kann eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung nur bestimmungsgemäß und effizient funktionieren, wenn eine weitgehend luftdichte Gebäudehülle vorliegt.

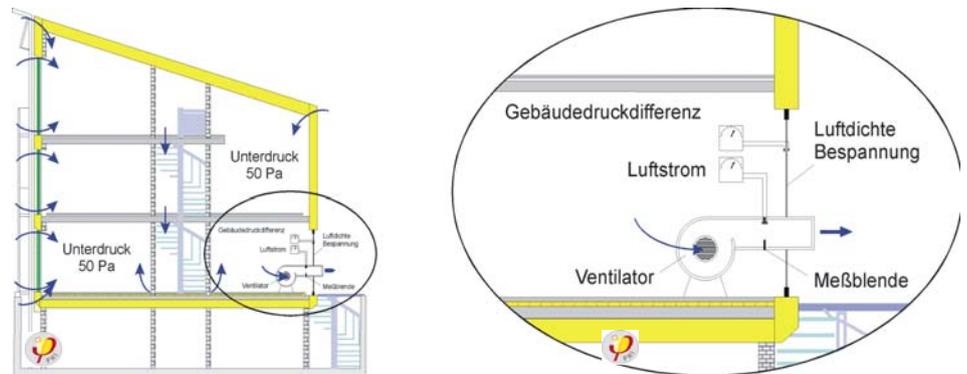
#### 4.9.4 Messung der Luftdichtheit

##### 4.9.4.1 Drucktest mit der Blower-Door

Als Qualitätskontrolle für die Luftdichtheit und als Gelegenheit noch vorhandene Leckagen effektiv nachzubessern sollte zumindest bei Komplettmodernisierungen von Gebäuden auf jeden Fall ein Drucktest (Blower-Door-Messung) durchgeführt werden (siehe Abbildung 112). Für einen solchen Test wird in eine Tür- oder Fensteröffnung ein Gebläse eingebaut, mit welchem

im ganzen Haus ein Über- oder Unterdruck erzeugt werden kann. Die Durchführung solcher Tests ist in der europäischen Norm EN 13829 beschrieben (vgl. [157]).

Unter bestimmten Voraussetzungen kann auch die Zu- und Abluftanlage auf einfachem und kostengünstigem Weg zur Luftdichtheitsmessung anstelle der Blower-Door eingesetzt werden (vgl. [158]).



**Abbildung 111** Prinzipieller Messaufbau für die Messung der Luftdichtheit (Quelle: [43])



**Abbildung 112** Durchführung eines Drucktests mit der Blower-Door in der Eingangstür eines Altbaus vor der Sanierung. Sichtbar ist die rote Folie der Blower-Door mit dem unten eingebauten Gebläse sowie der Rechner zur Steuerung und Auswertung der Messung. (Quelle: PHI, [203])

### ***n<sub>50</sub>-Wert und q<sub>50</sub>-Wert***

Die Luftwechselrate ( $n_{50}$ -Wert) mit der Einheit  $[h^{-1}]$  bei der Prüfdruckdifferenz von 50 Pa stellt das Ergebnis des Drucktests dar. Sie errechnet sich aus dem gemessenen Volumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz (Mittelwert aus Unter- und Überdruck) in der Einheit  $[m^3/h]$ , geteilt durch das Gebäudeluftvolumen  $V_L$  in  $[m^3]$ . Hierbei handelt es sich um die üblicherweise verwendete volumenbezogene Luftdurchlässigkeit eines Gebäudes, die als Nachweisgröße für die

Gebäudeuntersuchung verwendet wird. Seltener wird der Wert auf die Hüllfläche  $A$  [m<sup>2</sup>] des Gebäudes bezogen. Dann stellt er sich als  $q_{50}$ -Wert dar.

#### 4.9.4.2 Erforderliche Vorbereitungen für den Drucktest

Das Gebäude muss für die Messung vorbereitet werden, indem alle während der Heizperiode normalerweise geschlossenen Öffnungen wie Fenster und Türen verschlossen werden. Auch Rohre wie noch nicht gefüllte Abwassersiphons und die Lüftungsrohre der Frisch- und Fortluft müssen verschlossen werden.

#### 4.9.4.3 Zeitpunkt des Drucktests

Es ist äußerst sinnvoll den Drucktest zum Aufspüren und anschließendem Verschließen noch vorhandener Leckagen in der Gebäudehülle zu nutzen. Die einfachste Möglichkeit Undichtigkeiten zu finden ist das Fühlen mit der Hand an den typischen Leckagestellen während das Gebäude unter Unterdruck steht.

Die Luftgeschwindigkeit an Leckagen kann während des Tests auch mit einem Anemometer gemessen werden (vgl. [203]).



**Abbildung 113** Nach der Fertigstellung der Verkleidung von Vorwand-Installationen ist die Behebung von beim Drucktest gefundenen Leckagen in der dahinter liegenden luftdichten Ebene (Wandputz) nicht mehr zerstörungsfrei möglich. (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Ingolstädterstr., WBG Nürnberg)

Damit die Leckagen in der luftdichten Hülle während des Drucktests aufgespürt und abgedichtet werden können, muss der Test direkt nach der Fertigstellung der luftdichten Gebäudehülle, d.h. nach dem luftdichten Einbau aller Außenfenster und Außentüren, aber unbedingt vor dem Innenausbau stattfinden. Sonst sind Anschlüsse der luftdichten Ebene durch Verkleidungen o.ä. evtl. nicht mehr zugänglich.

**Beim Drucktest sollte die luftdichte Ebene noch möglichst vollständig zugänglich sein.**

## 5 Lüftung

### 5.1 Grundlagen

Innenraumlufte wird stets aus verschiedenen Quellen belastet. Dazu gehören unter anderem Schadstoffe aus Baustoffen, Mobiliar und Geräten, Mikroben, Partikel und Schimmelsporen, aus dem Boden aufsteigendes radioaktives Radon, außerdem durch Bewohner und deren Tätigkeiten (Duschen, Kochen etc.) erzeugter Wasserdampf, sowie das bei der Atmung freiwerdende Kohlendioxid. Schadstoffe und Wasserdampf müssen in ausreichendem Maße abgeführt werden, um dauerhaft gesundheitlich unbedenkliche und frische Luft zu gewährleisten, sowie um Bauschäden durch zu hohe Luftfeuchtigkeit zu vermeiden. Hierzu ist eine Belüftung des Wohnraums erforderlich. Die Diffusion des Wasserdampfs durch die Gebäudehülle kann auch bei sehr diffusionsoffener Bauweise keinen nennenswerten Beitrag zur Entfeuchtung leisten.

Der Luftaustausch erfolgt über Fugen in der Gebäudehülle und Fensteröffnung bzw. eine mechanische Wohnungslüftung mit oder ohne Wärmerückgewinnung - tatsächlich liegt in der Regel eine Kombination mehrerer Lüftungsarten vor. Der erforderliche Luftaustausch mit der Außenluft verursacht bei Außenlufttemperaturen unterhalb der Innenraumlufttemperaturen zwangsläufig einen Wärmeverlust.

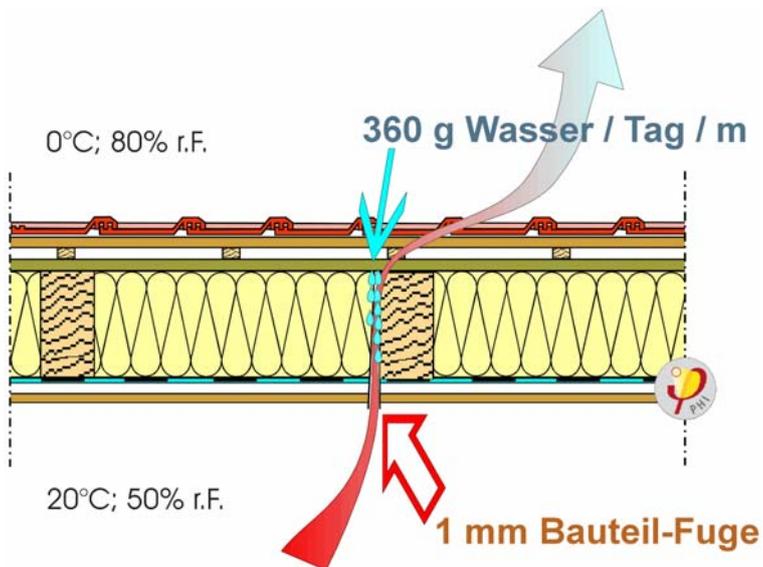
#### 5.1.1 Arten der Gebäudelüftung

##### 5.1.1.1 *Fugenlüftung*

Grundsätzlich kann bei undichten Gebäuden, zumindest im längerfristigen Durchschnitt ein ausreichender Luftwechsel über die Fugen erzielt werden. Dazu muss aber ein sehr große Undichtigkeit von  $n_{50} > 5 \text{ h}^{-1}$  vorliegen (siehe dazu Abschnitt 7.4.3.1 auf Seite 236). Eine derart hohe Undichtigkeit verursacht allerdings eine ganze Reihe von Problemen (siehe auch Abschnitt 4.9.1 „Problematik von Undichtigkeiten“):

- Unzuverlässiger, stark schwankender, Luftwechsel abhängig von der momentanen Stärke der zwei Antriebskräfte Wind und thermischer Auftrieb
- Komforteinbußen durch Zugluft und Strömungsgeräusche
- Bauschäden durch konvektiven Feuchtetransport in Außenbauteile bei einer Fugendurchströmung von innen nach außen (siehe Abbildung 114).
- Hohe Lüftungswärmeverluste

Fugenlüftung ist daher als „Lüftungsstrategie“ auch bei modernisierten Altbauten grundsätzlich nicht zu empfehlen.



**Abbildung 114** Durch eine Fuge von 1 m Länge und 1 mm Breite können bei im Winter üblichen Innen- und Außenluftbedingungen 360 g Wasser pro Tag durch Kondensation aus der Innenraumluft in die Dachkonstruktion gelangen (Quelle: PHI, vgl. [99]).

#### 5.1.1.2 Fenster-Kipplüftung

Da in vielen Haushalten die Fensterbänke als Ablagefläche benutzt werden, können die Fenster zum Lüften nicht mehr richtig geöffnet werden. Die winterliche Lüftung über längere Zeit gekippte Fenster wird daher häufig praktiziert. Sie verbindet allerdings schlechte Lüftungseffektivität mit hohen Lüftungswärmeverlusten. Darüber hinaus weist sie bezüglich Unzuverlässigkeit und Komfortbeeinträchtigung ähnliche Probleme wie die Fugenlüftung auf. Auch die Fenster-Kipplüftung ist daher keine empfehlenswerte Lüftungsstrategie.

**Fenster-Kipplüftung verbindet schlechte Lüftungseffektivität mit hohen Lüftungswärmeverlusten.**

#### 5.1.1.3 Fenster-Stoßlüftung

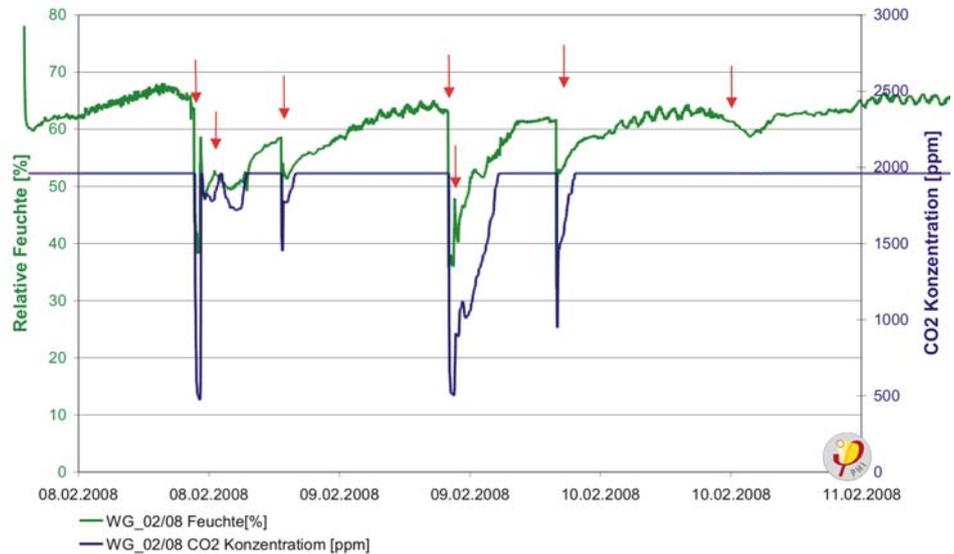
Unter Stoßlüftung versteht man die Lüftung über ganz geöffnete Drehfenster für einen begrenzten Zeitraum. Für eine einigermaßen ausreichende Luftqualität muss mindestens viermal täglich für je ca. 5 min gelüftet werden. Gerichtssentscheide gehen allerdings davon aus, dass es einem Mieter nicht zugemutet werden kann, mehr als zweimal täglich eine Stoßlüftung durchzuführen. Für Vollzeitbeschäftigte ist dies in den erforderlichen Abständen auch kaum möglich. Schimmelprobleme können dann aufgrund zu hoher relativer Raumluftfeuchte vor allem bei Altbauten mit niedrigen Innenoberflächentemperaturen im Bereich von Wärmebrücken nicht ausgeschlossen werden, lassen sich aber, wie oben erläutert, häufig nicht den Bewohnern (Mieter) anlasten.

**Berufstätigen ist es in der Regel nicht möglich, ausreichend über die Fenster zu lüften.**

Zudem lässt sich bei Fensterlüftung kaum vermeiden, dass entweder zuviel oder zu wenig gelüftet wird, da sich der exakt richtige Zeitpunkt, um die Fenster wieder zu schließen, in der Praxis nicht ermitteln lässt.

Eine Wärmerückgewinnung ist naturgemäß bei Fensterlüftung nicht möglich, so dass die Lüftungswärmeverluste bei konsequent und richtig durchgeführter Stoßlüftung ebenfalls relativ hoch sind, wenn auch meist etwas niedriger als bei

der Kipplüftung. Simulationen mit einem CFD-Programm ergaben einen Lüftungswärmeverlust bei viermal täglich durchgeführter Stoßlüftung von etwa 19 kWh/(m<sup>2</sup>a) (vgl. [123]). Ein Heizwärmebedarf der sich dem Passivhaus-Standard annähert, wie er in modernisierten Altbauten schon in einigen Projekten verwirklicht wurde, lässt sich mit Fensterlüftung daher nicht erreichen.



**Abbildung 115** Messwerte einer Wohnung ohne Lüftungsanlage in einem sanierten Altbau. Trotz zweimal täglich durchgeführter Fensterlüftung (vor und nach der Arbeit) ist sowohl die relative Feuchte als auch die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu hoch. Der CO<sub>2</sub>-Sensor maß nur Werte bis knapp 2000 ppm, bei höheren Werten ist die Kurve abgeschnitten. (Quelle: PHI,[106])

#### 5.1.1.4 Die Minimallösung: Abluftanlage

Die einfachste und kostengünstigste Lösung, um dauerhaft frische Luft und eine nicht zu hohe relative Luftfeuchte zu gewährleisten, ist die Installation einer Abluftanlage. Hierbei wird die Luft in Räumen mit Geruchs- oder Feuchtebelastung (Küche, Bad, WC) abgesaugt und wird durch frische Luft, die in den Wohn- und Schlafräumen über Öffnungen in der Außenwand nachströmt, ersetzt. Aus Gründen der Behaglichkeit sollten die Außenlufteinlässe oberhalb von Heizkörpern oder an der Decke positioniert werden, um zu verhindern, dass Bewohner direkt mit kalter Luft angeblasen werden. Falls erforderlich können die Außenwanddurchlässe mit Schalldämpfern und Luftfiltern ausgestattet werden. Eine Schallbelastung durch den Abluftventilator wird durch geeignete Schalldämpfer vor und evtl. auch hinter dem Ventilator verhindert.

**Ein Stromverbrauch von 0,15 Wh/m<sup>3</sup> sollte bei Abluftanlagen nicht überschritten werden.**

Da Abluftanlagen systembedingt keine Wärmerückgewinnung aus der Abluft ermöglichen, lässt sich durch sie keine Verminderung der Lüftungswärmeverluste erreichen. Ein Stromverbrauch von 0,15 Wh/m<sup>3</sup> sollte bei Abluftanlagen nicht überschritten werden. (vgl. [101]).

Eine Abluftanlage sichert die hygienisch notwendige Luftzufuhr, und begrenzt dabei die Energiezufuhr auf das notwendige Maß. Eine Reduktion des Wärmebedarfs für die Lüftung und eine Senkung des Heizwärmebedarfs um

90 %, wie sie schon bei modernisierten Altbauten erreicht wurde, ist allerdings nur mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung möglich.

#### 5.1.1.5 Die Komfortlösung: Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung

Eine deutliche Reduktion der Lüftungswärmeverluste um über 80 % ist mit einer Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung möglich. Die Außenluft strömt, nachdem sie ein Feinfilter passiert hat, durch einen Wärmetauscher. Dabei wird die Wärme der Abluft zu großen Teilen (zur Zeit bis zu 92 %) auf die Zuluft übertragen. Eine Durchmischung der beiden Luftströme findet dabei nicht statt. Eine ausreichend luftdichte Hülle ist Voraussetzung für Effizienz und Funktion einer Lüftungsanlage. Infiltrationsluftströme durch Fugen in der Außenhülle gehen an der Wärmerückgewinnung vorbei und erhöhen dadurch die Lüftungswärmeverluste. Zudem kann bei größeren Undichtigkeiten in Ablufträumen durch Windeinwirkung ein Überdruck entstehen, wodurch belastete Luft in die Wohnräume gelangt.

### 5.1.2 Planungsprinzipien für eine Wohnungslüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

#### 5.1.2.1 Zonierung

Für die Planung einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung müssen die Räume zunächst in drei Zonen eingeteilt werden: Zuluft-, Überström- und Abluftzone. Die Zuluftzone umfasst alle Aufenthaltsräume, in denen keine übermäßige Feuchte- oder Geruchsbelastung erwartet wird, d.h. Wohn-, Schlaf-, Kinder- und Arbeitszimmer. Hier wird die frische Luft über Zuluftdüsen unter der Decke eingebracht. Sie strömt dann durch geeignete Öffnungen zur Überströmzone, die meist die interne Erschließung (Flur und Treppe) sowie gegebenenfalls den Essbereich offener Wohnküchen umfasst. Durch weitere Überströmöffnungen gelangt die Luft in die Ablufträume. Das sind alle Räume mit Geruchs- oder Feuchtebelastung, also Küche, Bad, WC und evtl. Abstellräume. Dadurch dass eine Mehrfachnutzung der Luft in den Zonen erfolgt und indem Kontaminationen direkt am Ort der Entstehung mit der Abluft abgesaugt werden, reicht eine relativ niedrige Luftwechselrate aus. Ein Luftwechsel von 0,3 1/h sollte jedoch nicht unterschritten werden.

**Mit der Aufteilung in Zuluft-, Überström- und Abluftzone kann die erforderliche Luftwechselrate gesenkt werden.**

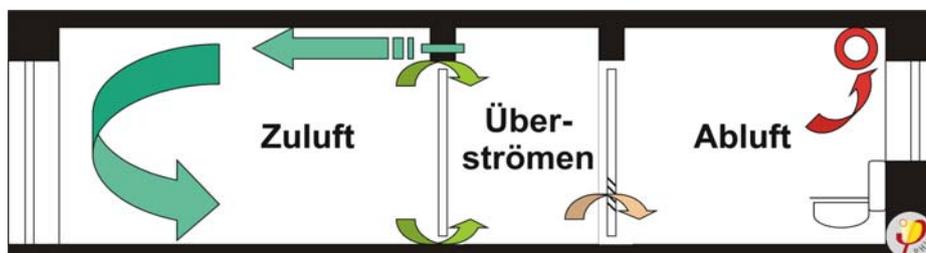


Abbildung 116 Zonierungsschema für eine Komfortlüftungsanlage mit Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung. (Quelle: PHI, vgl.[239])

### 5.1.2.2 Luftmenge

Der erforderliche Volumenstrom der Anlage ermittelt sich aus drei verschiedenen Anforderungen:

Für den Zuluftbedarf ist bei maschineller Lüftung im Wohnungsbau für jeden Bewohner ein Zuluftvolumenstrom von 30 m<sup>3</sup>/h anzusetzen. Dies entspricht dem hygienisch notwendigen Luftbedarf einer dauerhaft anwesenden erwachsenen Person.

Den Ablufträumen sind nach DIN 1946-6 jeweils erforderliche Abluftvolumenströme zugeordnet (vgl. [9]).

**Tabelle 8 Abluftbedarf nach [9]**

Raum	Küche	Bad-Raum	WC-Raum
Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	40-60	40	20

Ein Mindestluftwechselrate von 0,3 1/h sollte unabhängig von der Personenbelegung gewährleistet sein, da auch in Zeiten ohne Belegung die Luft durch personenunabhängige Quellen wie Möbel, Textilien, Baustoffe und Pflanzen belastet werden.

Die höchste Anforderung bezüglich Zu- und Abluftbedarf bestimmt den Auslegungsvolumenstrom der Lüftungsanlage. Der Auslegungsvolumenstrom bestimmt aber nur den Maximalvolumenstrom, den die Anlage bei temporären höheren Anforderungen (Essenszubereitung, Party etc.) noch leisten können muss. Der Volumenstrom im Normalbetrieb sollte 77 % des Auslegungsvolumenstroms betragen.

**Ein deutlich über dem Zuluftbedarf liegender Luftwechsel kann im Winter zu trockener Luft führen.**

Generell sollten möglichst keine deutlich über den Zuluftbedarf hinausgehenden Luftwechsel projiziert werden, da sonst, abgesehen von dem daraus resultierenden Mehrbedarf an Heizwärme und Lüfterstrom, auch die Raumluft in der kalten Jahreshälfte zu trocken wird.

### 5.1.2.3 Luftmengenverteilung

Nachdem der Standardvolumenstrom ermittelt worden ist, stellt sich die Frage, wie die erforderliche Zuluftmenge auf die Zulufräume verteilt werden soll. Dabei kann davon ausgegangen, dass eine Belegung von mehr als zwei Personen in einem Raum über einen längeren Zeitraum eher selten vorkommt. In diesem Fall kann zudem ein zusätzlicher Luftaustausch durch die geöffnete Innentür erfolgen. Um die CO<sub>2</sub>-Konzentration unterhalb von 1500 ppm zu halten, ist ein Volumenstrom von 20 m<sup>3</sup>/h pro Person erforderlich (vgl. [102]). Es ergibt sich also als grober Richtwert ein Standardvolumenstrom von 40 m<sup>3</sup>/h für Zulufräume.

**Ein Volumenstrom von 40 m<sup>3</sup>/h kann als Richtwert für Zulufräume in Wohngebäuden angesetzt werden.**

Bei kleinen Wohnungen sind die erforderlichen Abluftströme unter Umständen deutlich größer als die nötigen Zuluftvolumenströme (z.B. 1-Zi.-Wohnung für eine Person mit Küche und Bad). Dann kann der Volumenstrom in einem Abluftraum verkleinert werden solange die Luftwechselrate in diesem Raum

noch über 2 l/h liegt (vgl. [102]). Eine zweite Möglichkeit ist eine variable Aufteilung der Abluftmengen je nach aktuellem Bedarf, zwischen Bad/WC und Küche (z.B. über einen Bedarfsschalter in der Küche).

Wenn ein oder mehrere der BewohnerInnen Raucher sind, empfiehlt es sich, einen Wohnraum als Raucherzimmer vorzusehen, der dann direkt an den Abluftkanal (ca. 40 m<sup>3</sup>/h) angeschlossen wird (vgl. [103]).

#### 5.1.2.4 Steuerung

Um eine Anpassung der Luftwechselrate an zeitlich wechselnde Belegung und Nutzung zur ermöglichen, sollte der Volumenstrom von den Bewohnern in einem gewissen Umfang regelbar sein. Bewährt hat sich eine Steuerung über einen Drehschalter o.ä. in vier Stufen:

**Tabelle 9**      **Empfohlene Lüfterstufen**

Bezeichnung	Wann?	Volumenstrom
„AUS“	im Sommer bei Fensterlüftung	ausgeschaltet
„ABWESENHEIT“	keine Belegung (z.B. Urlaub)	Standardvolumenstrom minus 30 %
„NORMAL“	normale Belegung	Standardvolumenstrom (mind. 0,3-fach)
„PARTY“	Starke Belegung, Kochen, Raucher	Standardvolumenstrom plus 30 %

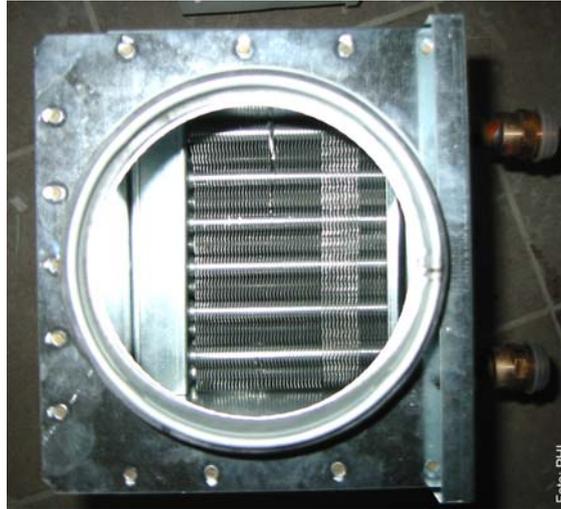
Die Regelung sollte einfach und leicht verständlich möglich sein. Eine Lüftungsanlage wird in der Regel nur akzeptiert, wenn der Nutzer Einflussmöglichkeiten hat und sich nicht ohne Eingriffsmöglichkeit der Technik ausgeliefert sieht. Eine Regelbarkeit der Lüftungsanlage jeweils für eine gesamte Wohneinheit ist ausreichend.

Da der Betrieb der Lüftungsanlage in der Maximaleinstellung sich bei guten Anlagen nicht durch laute Geräusche bemerkbar macht, vergessen die Bewohner evtl. die Anlage auf Standardbetrieb zurückzustellen. Es empfiehlt sich daher, besonders im Mietwohnungsbau, eine automatische Rückstellung auf Standardbetrieb nach einem festgelegten Zeitraum vorzusehen. Die Anlage sollte nicht auf den Maximalbetrieb sondern auf den zeitlich am häufigsten vorkommenden Standardbetrieb hin optimiert werden.

#### 5.1.2.5 Beheizbarkeit über die Zuluft

(siehe auch Abschnitt 6 „Heizung“ auf Seite 185)

Passivhäuser zeichnen sich dadurch aus, dass sie durch die Nacherwärmung der hygienisch erforderlichen Zuluftmenge beheizt werden können, ohne dass zusätzliche Heizkörper notwendig sind. Auf diese Weise kann allerdings nur eine sehr geringe Heizlast gedeckt werden. Für die Berechnung der Heizlast von hochenergieeffizienten Gebäuden steht ein Planungstool im PHPP zur Verfügung [17].



**Abbildung 117** Blick auf den Wärmeübertrager eines Nachheizregisters für die Wohnungsheizung im Zuluftkanal. Rechts die Anschlussstutzen für den Warmwasser-Vor- und Rücklauf. (Fabrikat Fa. Helios) (Quelle: PHI)

**Bei mit Passivhaus-komponenten modernisierten Altbauten müssen ergänzend zur Zuluftheizung häufig noch Heizkörper installiert werden.**

Bei der Altbaumodernisierung ist es unter anderem wegen verbleibender Wärmebrücken im Bereich der Bodenplatte/Kellerdecke häufig nicht mit vertretbarem Aufwand möglich, die Wärmeverluste so weit zu reduzieren, dass eine alleinige Beheizung über die Zuluft im ganzen Gebäude möglich wird. Insbesondere im Erdgeschoss, wo die nicht zu beseitigenden Wärmebrücken zum Keller lokalisiert sind, ist dann unter Umständen ein Zusatzheizkörper nötig (siehe Abbildung 118).



**Abbildung 118** Kleiner Heizkörper zur Deckung der zusätzlichen Heizlast für die Erdgeschosswohnung eines modernisierten Altbaus. (Quelle: PHI, [203])

#### 5.1.2.6 Kanalführung

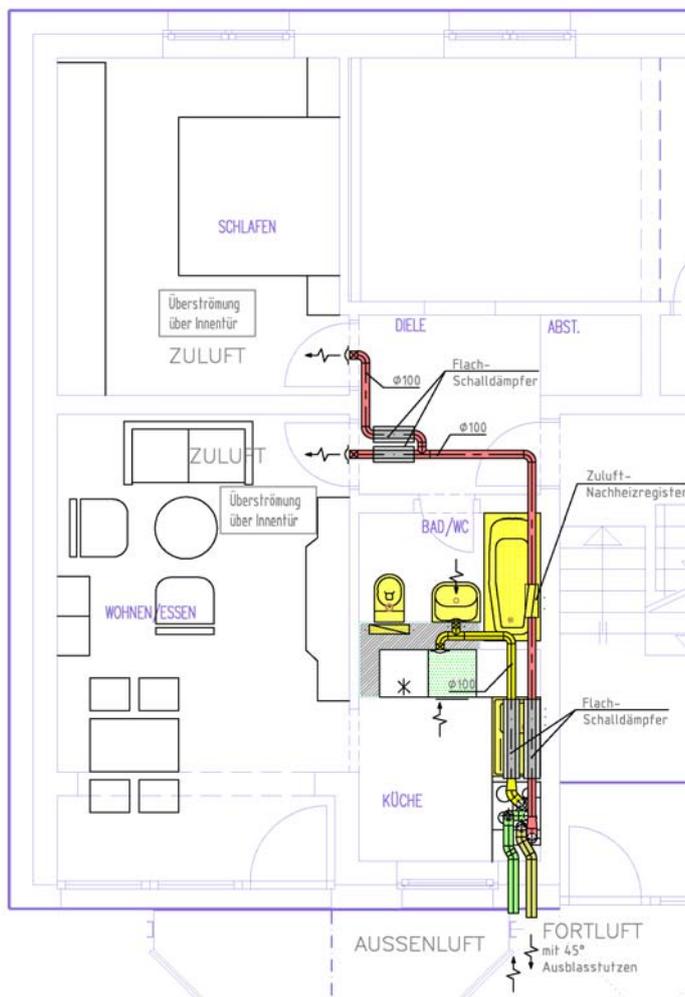
##### 5.1.2.6.1 Kurze Kanäle

Kurze und ausreichend dimensionierte Lüftungskanäle sollten aus zwei Gründen bei der Planung angestrebt werden. Zum einen verursacht jeder Meter Lüftungskanal einen zusätzlichen Druckverlust, der durch höhere Leistung der Ventilatoren kompensiert werden muss, und so den Stromverbrauch erhöht. Dies gilt insbesondere für den Außenluft/Zuluft-Strang, da dieser ohnehin schon

durch den zusätzlichen Druckverlust des Außenluftfilters (sowie evtl. eines Erdkanals) beaufschlagt ist. Zum zweiten verursachen lange Kanalnetze naturgemäß höhere Investitionskosten.

Wird bei der Altbaumodernisierung auch die Grundrissaufteilung neu gestaltet, sollte versucht werden, die Länge der Abluftkanäle durch eine zueinander benachbarte Lage der Ablufträume zu minimieren. Die Zuluftkanäle können durch das Einblasen der Luft über Weitwurfdüsen von der flurseitigen Wand aus kurz gehalten werden (siehe Abschnitt 5.3.3.2). Ein optimiertes kurzes Kanalnetz in einem modernisierten Altbau zeigt Abbildung 119.

Durch die gleichzeitige Verwendung von flexiblen Schalldämpfern als Krümmer können Kanalstücke eingespart und evtl. ebenfalls die Kanallänge reduziert werden; ein gutes Beispiel im Geschosswohnungsbau ist in [226] dokumentiert.



**Abbildung 119 Optimierte Lüftungsplanung in einem modernisierten Altbau: Das Lüftungsgerät befindet sich direkt an der thermischen Hülle. Durch benachbarte Lage der Ablufträume (Küche und Bad) sind die Abluftkanäle sehr kurz. Die Zuluft wird durch Weitwurfdüsen über der Tür eingebracht. Daher sind in den Wohnräumen keine Lüftungskanäle und abgehängten Decken erforderlich. Die Rückströmung in die Ablufträume erfolgt über Überströmöffnungen (Quelle: Krämer, GAG Ludwigshafen, Sanierungsprojekt Hohelooogstr., Ludwigshafen).**

#### 5.1.2.6.2 *Wärmeabgabe von Lüftungskanälen*

Wird ein Gebäude ganz oder teilweise über die Zuluft beheizt, so erfolgt ein Teil der Wärmeabgabe bereits über die Oberfläche der Zuluftkanäle. Aus diesem Grund müssen diese vollständig innerhalb des gedämmten beheizten Gebäudevolumens verlaufen. Die Wärmeabgabe des Zuluftkanalnetzes hat den Vorteil, dass die Luft auf dem Weg vom Nachheizregister bis zur Zuluftdüse schon etwas abkühlt und dadurch als frischer empfunden wird.

Die Berechnung der Wärmeabgabe von Lüftungskanälen ist mit dem kostenlosen Programm PHLuft [105] möglich (siehe Abschnitt 5.1.2.8.2 auf Seite 162).

#### 5.1.2.7 *Sommerbetrieb*

Prinzipiell kann die Lüftungsanlage im Sommer ausgeschaltet werden, wenn stattdessen ausreichend über die Fenster gelüftet wird. Ist die Fensterlüftung nicht gewünscht (z.B. wegen Einbruchgefahr, Verkehrsbelastung, Bequemlichkeit, Pollenallergie etc.), so kann die Lüftungsanlage auch im Sommer betrieben werden. Allerdings sind mit Querlüftung über die Fenster sehr viel höhere Luftwechselraten als mit einer für die Wohnraumlüftung ausgelegten Lüftungsanlage möglich, was insbesondere eine deutlich effektivere (nächtliche) Gebäudeauskühlung erlaubt. Ein im Sommer gegenüber dem winterlichen Nennvolumenstrom erhöhter Luftwechsel über die Lüftungsanlage aus Gründen der Gebäudekühlung führt zu einem massiven Anstieg des Stromverbrauchs und kann daher nicht empfohlen werden.

**Die Wärmerückgewinnung muss im Sommer deaktiviert werden.**

Wird die Lüftungsanlage im Sommer betrieben, so sollte keine Wärmerückgewinnung stattfinden, da sonst kaum Wärme aus dem Haus über die Lüftungsanlage abgeführt werden kann. Im Durchschnitt liegen die Temperaturen auch im Sommer unter der Raumlufttemperatur und dieses Potential kann gut zur Kühlung genutzt werden. Der Einfluss der Lüftungsstrategie auf das sommerliche Raumklima wurde in [120] eingehend untersucht.

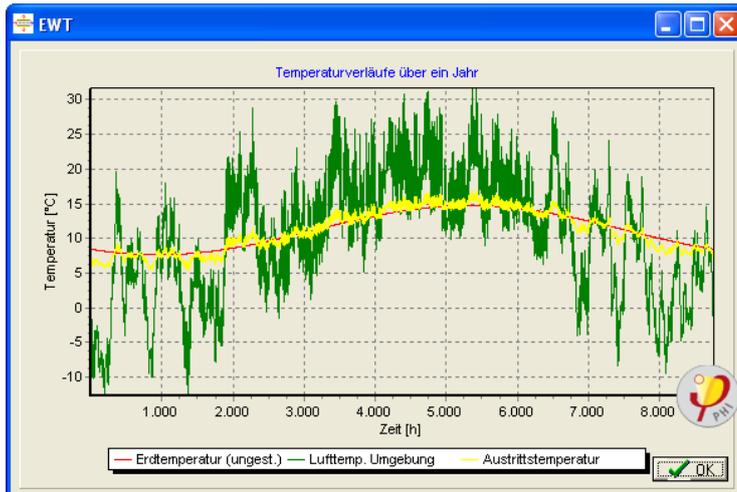
#### 5.1.2.8 *Hilfsmittel*

##### 5.1.2.8.1 *Exceltool für die Berechnung des Druckverlustes von Lüftungskanalnetzen*

Die Druckverlustberechnung von Kanalnetzen ist sowohl für die Auswahl und Auslegung eines Lüftungsgerätes als auch für den Abgleich der Lüftungsanlage notwendig. Darüber hinaus ist sie die Voraussetzung für die Berechnung der Energieeffizienz der Wärmerückgewinnung. Beim Passivhaus Institut kann ein Rechenhilfsmittel zur Druckverlustberechnung für Komponenten von Lüftungskanalnetzen kostenlos heruntergeladen werden [126]. Das Excel®-Tabellenblatt kann für gerade Rohrstücke, sowie für Bögen, Abzweige, Gabelungen, Filter etc. verwendet werden. Es gibt für jede Einzelkomponente von Rund- bzw. Rechteckkanälen einen Druckverlust aus.

##### 5.1.2.8.2 *PHLuft*

Mit der kostenlos erhältlichen Software PHLuft [105] können die Wärmeabgabe von Lüftungskanälen sowie für Erdreichwärmetauscher die Jahresarbeitszahl und der Wärmebereitstellungsgrad berechnet werden.



**Abbildung 120** Ergebnisdigramm des Programms PHLuft [105] für die Berechnung der Austrittstemperatur der Luft nach einem Erdreichwärmetauscher (Quelle: PHI)

## 5.2 Anforderungen an Lüftungssysteme

### 5.2.1 Verminderung der Lüftungswärmeverluste

Die Lüftungswärmeverluste eines Gebäudes setzen sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

- Freie In- / Exfiltration über die Gebäudehülle durch Wind oder Auftrieb.
- Erzwungene In- / Exfiltration durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle wegen einer Disbalance zwischen Zuluft- und Abluftvolumenstrom.
- Wärmeverluste im Fortluftstrom der Lüftungsanlage

Vor allem die Höhe der letzten zwei Anteile wird direkt bzw. indirekt durch die Lüftungsanlage bestimmt.

#### 5.2.1.1 Balance-Abgleich der Lüftung

Wenn der durch den Außenluft / Zuluft-Ventilator geförderte Volumenstrom nicht dem Volumenstrom des Abluft / Außenluft-Ventilators entspricht, entsteht ein Über- oder Unterdruck im Gebäude. Dieser führt zu einer Erhöhung des Fugenluftwechsels, bei dem naturgemäß keine Wärmerückgewinnung stattfindet, und somit zu einer Erhöhung der Lüftungswärmeverluste. Wenn Bauteile in der kalten Jahreszeit von innen nach außen durchströmt werden, droht zudem ein Feuchteschaden durch Kondensatbildung im Bauteil. Bei einer Disbalance über 10 % steigt der Lüftungswärmeverlust aufgrund von freier In- / Exfiltration deutlich an (vgl.[227]). Bei 20 % Disbalance steigt er schon um 19 % (vgl.[102]). Die Lüftungsanlage sollte daher so abgeglichen werden, dass die Disbalance maximal 10 % beträgt.

Beim Balance-Abgleich erreichen passive Messgeräte mit Hitzdraht- bzw. Flügelradanemometer erfahrungsgemäß keine ausreichende Genauigkeit. Besser geeignet sind Strömungsmessgeräte mit Kompensationsventilator (Abbildung 121) (vgl.[90]).

**Lüftungsanlagen sollten so abgeglichen werden, dass sie eine maximale Disbalance von 10 % aufweisen.**



**Abbildung 121** Messung des Volumenstroms an einem Zuluftventil (Quelle: PHI)

**Der Wärmebereitstellungsgrad aus der bauaufsichtlichen Zulassung des Lüftungsgeräts ist nicht für die Verwendung in einer exakten Gebäudeenergiebilanzberechnung geeignet.**

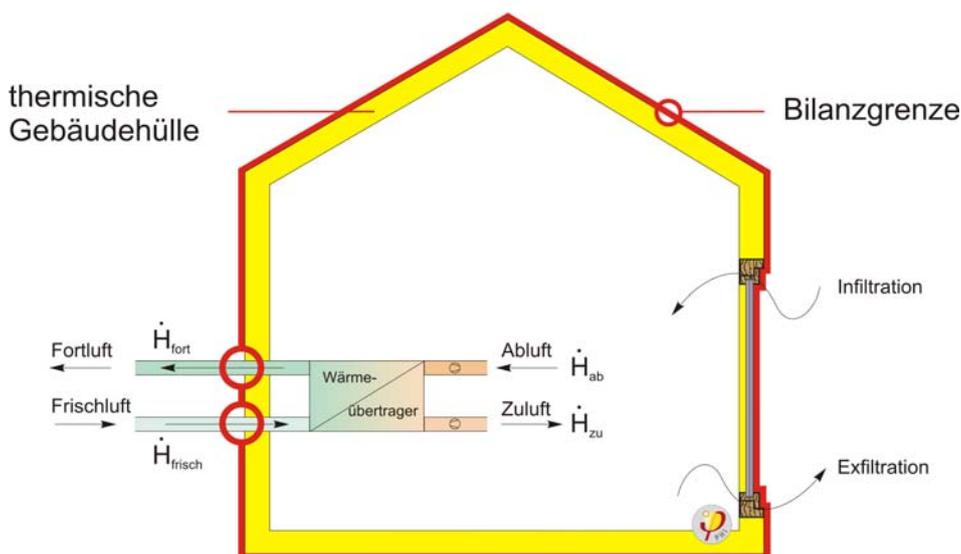
#### 5.2.1.2 Effektiver Wärmebereitstellungsgrad

Das zentrale Element des Lüftungsgeräts ist der Rotations- oder Plattenwärmeübertrager, in dem die Abluft ihre Wärme an den Außenluftstrom übergeben kann. Der Wärmebereitstellungsgrad gibt an, wie stark die Temperaturdifferenz zwischen Abluft- und Außenluftstrom durch den Wärmeübertrager ausgeglichen wird. Bei einem Wärmebereitstellungsgrad von 100 % würde die Abluft ihre Wärme soweit an den Außenluftstrom übertragen, dass der Fortluftstrom die gleiche Temperatur wie der Außenluftstrom hätte. Die besten Geräte erreichen zur Zeit Werte von etwas über 90 %.

Verfügt das Lüftungsgerät über eine Bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), so ist darin ein Wert für den Wärmebereitstellungsgrad angegeben. Dieser wird durch Messung der Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Abluftvolumenstrom im Prüflabor ermittelt. Diese Position der Messpunkte hat zur Folge, dass Wärmeströme von Luftströmen, die über Leckagen im Wärmeübertrager oder im Gehäuse fließen sowie der gesamte Transmissionswärmeverlust, der vom Raum an die ( in wesentlichen Teilen kältere) Lüftungsanlage abgegeben wird, nicht korrekt berücksichtigt werden. Die warme Raumluft erwärmt zum Beispiel die Zuluft über eine schlecht gedämmte Gerätehülle mit, wodurch ein besserer Wärmebereitstellungsgrad ermittelt wird, als bei gut wärmegeprägten Geräten. Tatsächlich verursachen schlecht gedämmte Geräte aber höhere Lüftungswärmeverluste. Der Wärmebereitstellungsgrad aus der bauaufsichtlichen Zulassung ist daher für eine exakte Ermittlung der Lüftungswärmeverluste eines Gebäudes nicht geeignet. Liegt kein anderer Wert vor, so sollte ein Sicherheitsabschlag von 12 Prozentpunkten für die Gebäude-Energiebilanzberechnung vorgenommen werden. Selbst damit liegt man aber noch nicht in jedem Fall auf der sicheren Seite (vgl. [113]).

Eine korrekte Berechnung der Lüftungswärmeverluste über die Gebäudehülle ist möglich, wenn außen/fortluft-seitig ermittelte Messwerte für das Gerät vorliegen (Abbildung 122). So werden sämtliche Nebenwärmeströme des

Gerätes (interne und externe Leckagen / Transmission über das Gehäuse) automatisch richtig berücksichtigt. Mit einer Ausnahme: Wird das Gerät innerhalb des beheizten Gebäudevolumens installiert, so ergeben sich zusätzliche Wärmeverluste über die Oberfläche der zwischen Gebäudehülle und Gerät liegenden Abschnitte der kalten Außenluft- und Fortluftkanäle. Das gleiche gilt bei Installation des Geräts außerhalb der thermischen Hülle für die im Kalten liegenden Abschnitte der Zu- und Abluftkanäle. Diese verschlechtern den Wärmebereitstellungsgrad mehr oder weniger je nach Länge und Dämmung der Kanäle. Der sich ergebende Wert inklusive Kanalverluste wird als effektiver Wärmebereitstellungsgrad bezeichnet und ist der eigentliche Rechenwert für die Energiebilanz eines Gebäudes.



**Abbildung 122 Bilanzierung des Lüftungsgeräts an der Außenluft/Fortluft-Seite in der Ebene der thermischen Gebäudehülle (Quelle: PHI, [112])**

Ein Außen/Fortluft-seitig gemessener Wärmebereitstellungsgrad kann, bei vom Passivhaus Institut Darmstadt zertifizierten Geräten, dem Zertifikat entnommen werden. Eine einfache Ermittlung des effektiven Wärmebereitstellungsgrades ist dann, wenn Kanallänge, Durchmesser und Dämmdicke bekannt sind, mit Hilfe des Passivhaus Projektierungs Pakets (PHPP) [17] möglich. Der effektive Wärmebereitstellungsgrad sollte, um eine Mindesteffizienz der Lüftungsanlage zu gewährleisten, mindestens 75 % betragen (ohne die Berücksichtigung von Kondensatbildung).

### 5.2.2 Elektroeffizienz

Im Lüftungsgerät wandelt ein von einem Elektromotor angetriebenes Lüfterblatt elektrische Energie in mechanische Leistung für den Transport der Luft durch das Kanalsystem um. Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung haben jeweils einen Ventilator im Außenluft-/Zuluftstrang sowie im Abluft-/Fortluftstrang. Folgende Einflussgrößen bestimmen den Stromverbrauch der Ventilatoren im Betrieb:

- der geförderte Volumenstrom
- der Druckverlust des Kanalnetzes

**Auch der Standby-Verbrauch sowie der Stromverbrauch der Steuerung haben einen Einfluss auf die Effizienz des Lüftungsgeräts.**

- der Wirkungsgrad von Motor und Lüftungsblatt bei der Umwandlung von elektrischer in mechanischer Energie sowie der Druckverlust des Lüftungsgeräts
- stand by-Verbrauch und Ausschaltmöglichkeit

Die spezifische elektrische Leistungsaufnahme des Lüftungsgeräts kann bei passivhausgeeigneten zertifizierten Geräten aus den Zertifikatsunterlagen des Passivhaus Instituts ([www.passiv.de](http://www.passiv.de)) entnommen werden. Volumenstrom und Druckverlust sind dagegen von der Planung für das jeweilige Gebäude abhängig. Der Grenzwert von  $0,45 \text{ W/m}^3$  für Passivhäuser kann auch als Empfehlung für den Einsatz von Lüftungsanlagen bei der Altbaumodernisierung gelten. In den Grenzwert fließt auch der von der elektronischen Steuerung verbrauchte Strom ein.

### 5.2.3 Hygiene

Vergleichsmessungen in einem modernisierten Altbau mit Lüftungsanlage und einem baugleichen Gebäude im unsanierten Zustand mit Fensterlüftung ergaben, dass die Luftqualität in dem Gebäude mit Lüftungsanlage deutlich besser war. Dies galt sowohl für die Belastung mit Mikroorganismen (Schimmelpilze) als auch mit leichtflüchtigen organischen Substanzen (VOC) (vgl. [117]). Die Belastung mit Schimmelpilzen lag sogar unter der der Außenluft.

Die in der Vergangenheit immer wieder aufgetretenen Probleme mit Raumluftbelastungen durch Klimaanlage kommen bei der kontrollierten Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung nicht vor, da die relative Feuchte der Luft im Winter durch die Erwärmung absinkt und kein Wachstum von Schimmelpilzen und anderen Mikroorganismen erlaubt. Trotzdem sind zur Sicherstellung der Lufthygiene Anforderungen zu erfüllen, die im Folgenden erläutert werden.

#### 5.2.3.1 *Reinigbarkeit*

Normalerweise werden das Lüftungsgerät und die Kanäle im Außenluft/Zuluft-Strang durch das vorgeschaltete Feinfilter dauerhaft saubergehalten. Ein Schadensfall (Filterdurchbruch, Filterleckage etc.) kann allerdings dazu führen, dass die Kanäle gereinigt werden müssen. Dieser Fall ist daher bei der Planung der Anlage zu berücksichtigen. (vgl. [36]).

#### 5.2.3.2 *Materialien der Kanäle und Schalldämpfer*

Lösungsmittelhaltige Anstriche und Dichtmaterialien sowie poröse Auskleidungen im Zuluftstrom sind zu vermeiden. Schalldämpfer müssen aus abriebfestem, gesundheitlich unbedenklichem Material bestehen.

#### 5.2.3.3 *Kondensatabfuhr*

Die Kondensatwanne ist in der Regel ab Werk schon mit ausreichendem Gefälle im Lüftungsgerät eingebaut, damit anfallendes Wasser rasch und rückstandslos ablaufen kann. Eine schiefe Montage des Geräts kann den

Wasserablauf behindern und zu stehendem Wasser führen. Kondensatablauf und Siphon sind leicht inspizier- und reinigbar zu gestalten.

#### 5.2.3.4 Interne Leckage

Um eine Beimengung belasteter Abluft zur Zuluft zu vermeiden, sollte der interne Leckluftstrom des Lüftungsgeräts möglichst nicht mehr als 3 % betragen. Die Grenze für die Zulassungsprüfung nach DIBt liegt mit 5 % aus hygienischer Sicht zu hoch (vgl. [115]).

#### 5.2.3.5 Reinhaltung während der Bauphase

Während der Bauphase ist die Gefahr der Verschmutzung einzelner Komponenten der Lüftungsanlage durch die baubedingte allgemeine Staub- und Feuchtebelastung groß. Die Bauleitung sollte daher unbedingt die Einhaltung der im Folgenden genannten Schutzmaßnahmen durchsetzen und kontrollieren:

- Auf der Baustelle gelagerte Lüftungskanäle und sonstige Komponenten müssen zum Schutz vor Verschmutzungen durch Folien o.ä. abgedeckt werden (Abbildung 123).
- Offene Kanal-Enden von teilinstallierten Anlagen sind bis zur Fertigstellung temporär zu verschließen.
- Die Ventilatoren sollten, um die Ansaugung von stark staubbelasteter Luft zu vermeiden, während der Bauphase nicht in Betrieb sein.
- Lässt sich ein Betrieb während der Bauphase nicht vermeiden, so sollte ein zusätzliches Grobfilter vor dem Feinfilter installiert werden.

**Offene Enden von auf der Baustelle gelagerten oder eingebauten Lüftungskanälen oder -komponenten müssen gegen Verschmutzung geschützt werden.**



**Abbildung 123** Das Innere von Lüftungskanälen muss während der Lagerung auf der Baustelle immer vor Verschmutzungen geschützt sein. (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Ingolstädterstr., WBG Nürnberg)

#### 5.2.3.6 Luftfilter

Luftfilter werden nach Ihrem Wirkungsgrad (Abscheidegrad) unter Laborbedingungen nach DIN EN 779 (vgl. [122]) in 9 unterschiedliche Filterklassen eingeteilt. Diese beinhalten Grobstaubfilter (G1-G4) und Feinstaubfilter (F5-F9). Eine höhere Ziffer bedeutet einen besseren mittleren Abscheidegrad des synthetischen (genormten) Prüfstaubs bzw. Prüfaerosols.

**Das Außenluftfilter sollte mindestens die Klasse F7 aufweisen.**

Da die Außenluftqualität in der Regel schon ausreichend gut ist, dient die Filterung vor allem der Reinhaltung der Lüftungskanäle, um eine aufwändige Reinigung zu vermeiden. Das Außenluftfilter sollte mindestens die Klasse F7 aufweisen. Für Pollenallergiker bringen bessere Filter allerdings eine deutliche Verbesserung. Bei Stillstand der Anlage kann es zu einer Taupunktunterschreitung im Bereich der Luftfilter kommen. Daher sollte bei Wohnnutzung ein intermittierender Betrieb möglichst vermieden werden. Nach einer Außerbetriebnahme über den Sommer sollte ein neues Filter eingesetzt werden.

Das Abluftfilter sollte mindestens Stufe G4 sein. Bewährt haben sich Vorlegefilter direkt an den Abluftventilen, die bei Verschmutzung einfach ausgetauscht werden können. Im Badezimmer können Flusen aus Kleidungsabrieb mit einer Grobfiltermatte abgeschieden werden. Für die Küche sind dagegen Edelstahlfilter zur Fettkondensation geeignet. Diese können, wenn erforderlich, durch Auswaschen regeneriert werden.



**Abbildung 124** Metallisches Fettfilter vor einem Ablufteinlass in der Küche (die Abdeckblende wurde für das Foto entfernt) (Quelle: PHI, [203])

**Luftfilter verursachen durch Druckverlust einen höheren Stromverbrauch der Lüfter. Sie sollten daher nicht zu klein dimensioniert sein.**

#### 5.2.3.6.1 Dimensionierung und Druckverlust

Jedes Luftfilter verursacht einen Druckverlust und erhöht damit den Stromverbrauch der Lüfter. Die Filtergröße sollte sorgfältig dimensioniert werden, da zu kleine Filter sowohl zu einem überhöhten Stromverbrauch führen, als auch durch die geringere Filterfläche schneller verschmutzen und daher geringere Standzeiten haben. Unterschiedlich stark verschmutzte Filter im Außenluft/Zuluft- bzw. Abluft/Fortluft-Strang können durch den unterschiedlich zunehmenden Druckverlust eine Disbalance der Volumenströme verursachen und so die Lüftungswärmeverluste erhöhen. Moderne Systeme mit integrierter dynamischer Massenstrombilanz sind hier im Vorteil.

#### 5.2.4 Schallschutzanforderungen

Siehe hierzu Abschnitt 7.6.4 auf Seite 252.

### 5.2.5 Brandschutzanforderungen

Führen Leitungen durch Bauteile, an die Anforderungen hinsichtlich der Feuerwiderstandsdauer gestellt werden, werden auch Anforderungen an die Leitungen gestellt, um eine Schwächung der durchdrungenen Bauteile zu verhindern. Dies gilt für Rohrleitungen, elektrische Leitungen und Lüftungsleitungen. Die genauen Anforderungen an Lüftungsanlagen hinsichtlich des Brandschutzes sind in den „(Muster-)Richtlinien über die Brandschutztechnischen Anforderungen an Lüftungsanlagen“ geregelt.



**Abbildung 125**

**Links:** Brandschutzklappen im Bereich der Deckendurchdringung

(Quelle: Architekt Schulze Darup, Ingolstädterstr)

**Rechts:** Feuerfeste Verkleidung über die gesamte Kanallänge (links im

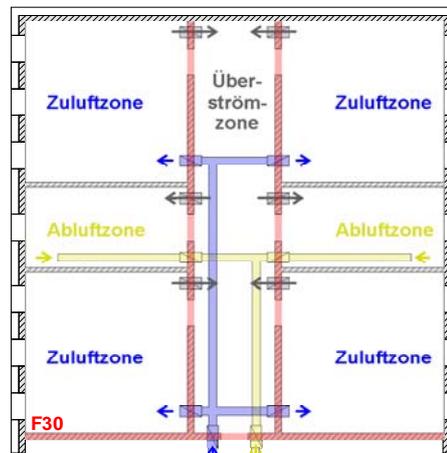
Bild) und getrenntes Anfahren jedes einzelnen Brandabschnitts (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Kollwitzstr., WBG Nürnberg)

Grundsätzlich bestehen zwei (auch kombinierbare) Möglichkeiten, die Anforderungen des Brandschutzes an Lüftungsleitungen zu erfüllen.

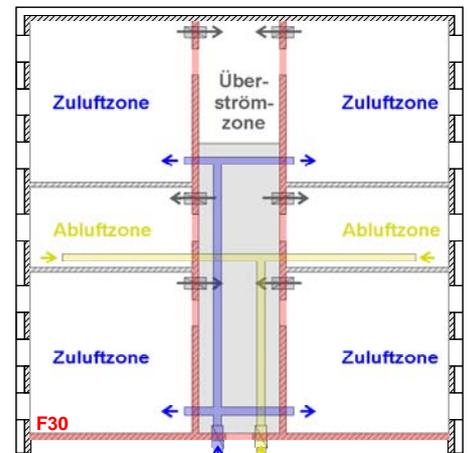
- Offene Verlegung der Leitungen und Abschottung der Leitung an der Durchdringung des Bauteils. Dabei entspricht die Anforderung an die Abschottung der Anforderung des durchdrungenen Bauteils (vgl. Abbildung 125 links).
- Verlegung der Leitungen in Installationsschächten, Installationskanälen oder Abkofferungen. Dabei muss die Feuerwiderstandsdauer der Installationsschächte bzw. -kanäle einschließlich deren Abschlüsse und Öffnungen der Feuerwiderstandsdauer der Bauteile entsprechen, die sie durchdringen.

Aus Kostengründen ist es sinnvoll, Durchdringungen von Bauteilen mit Brandschutzanforderungen nach Möglichkeit zu reduzieren (Abbildung 126). Wird mit einem Überströmkonzept gearbeitet, sind auch Überströmöffnungen, welche Bauteile mit Brandschutzanforderungen durchdringen, mit

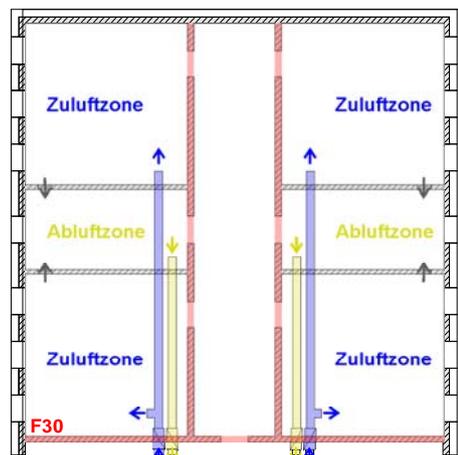
entsprechenden Brandschutzklappen zu versehen (A in Abbildung 126). Durch die Abkofferung von Lüftungsleitungen kann die Anzahl der Brandschutzklappen reduziert werden (B in Abbildung 126).



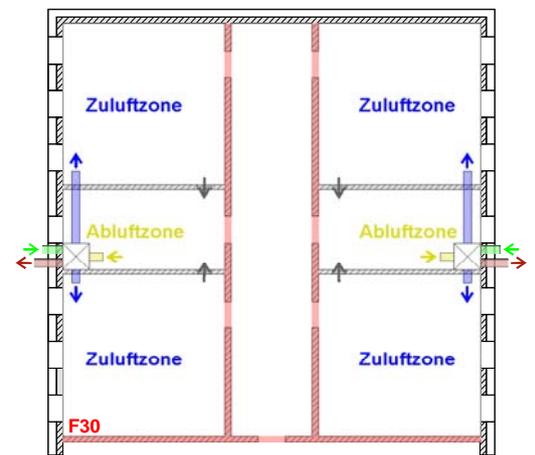
A: Offene Leitungsführung, Überströmung über den Flur



B: Abgekofferte Leitungsführung, Überströmung über den Flur



C: Leitungsführung in den Nebenzonen



D: Dezentrale Lüftung

**Abbildung 126** verschiedene Leitungsführung von Lüftungsanlagen (Quelle: PHI)

## 5.3 Bauteile und Konstruktionen

### 5.3.1 Lüftungsgerät

#### 5.3.1.1 Anordnung von Zentralgeräten

Das Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung kann sowohl innerhalb als auch außerhalb des beheizten Gebäudevolumens positioniert werden. Wichtig ist aber in beiden Fällen die Lage so nah wie möglich an der thermischen Hülle. Dies hat den Vorteil, dass bei Außenaufstellung die warmen Kanäle an der kalten Außenluft, bzw. bei Innenaufstellung die kalten Kanäle innerhalb des beheizten Gebäudevolumens sehr kurz ausfallen können. Auch sehr kurze Kanäle müssen in jedem Fall sehr gut wärmegeklämt werden. Kalte Kanäle im warmen Bereich müssen zudem auf der Außenseite der Wärmedämmung eine sorgfältig ausgeführte Dampfbremse aufweisen oder mit sehr diffusionsdichtem Dämmstoff gedämmt sein.

### 5.3.1.2 Qualitätsanforderungen an Zentralgeräte

Die Effizienz des Lüftungsgeräts (Wärmebereitstellungsgrad) ist entscheidend für die erzielbaren Energieeinsparungen. Bei guten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung steht dem Stromverbrauch für Ventilatoren und Steuerung eine mehr als zehnfach so hohe Heizwärmeeinsparung durch die Reduktion der Lüftungswärmeverluste gegenüber. Bei einer ineffizienten Anlage in einem wenig luftdichten Gebäude kann es dagegen sein, dass trotz Wärmerückgewinnung mehr Strom durch die Anlage verbraucht wird, als sie Heizwärme einspart (vgl. [112]).

**Effiziente Lüftungsanlagen weisen einen hohen Wärmebereitstellungsgrad bei niedrigem spezifischem Stromverbrauch auf.**

#### 5.3.1.2.1 Behaglichkeit

Um ausreichende Behaglichkeit auch bei sehr niedrigen Außentemperaturen zu gewährleisten, sollte die Lüftungsanlage so beschaffen sein, dass bei  $-10\text{ °C}$  Außentemperatur eine minimale Zulufttemperatur von  $16,5\text{ °C}$  eingehalten wird. So werden Kaltlufteneinfall und Zugerscheinungen vermieden.

#### 5.3.1.2.2 Luftdichtheit

Der interne Leckluftstrom und der externe Leckluftstrom des Lüftungsgeräts sollten aus Gründen der Geräteeffizienz und der Lufthygiene jeweils 3 % des Nenn-Abluftstromes nicht übersteigen.

#### 5.3.1.2.3 Frostschutz

Zur Verhinderung des Einfrierens von Kondensat ist ein (elektrisches) Vorheizregister auf der Außenluftseite des Wärmeübertragers unbedingt erforderlich. Ein regulärer Betrieb der Lüftungsanlage muss auch bei  $-15\text{ °C}$  Außentemperatur möglich sein. Die (auch nur kurzzeitige) Abschaltung eines Ventilators zum Auftauen des Wärmeübertragers ist nicht zulässig.

**Ein Vorheizregister verhindert das Einfrieren des Wärmeübertragers bei sehr kalten Außentemperaturen.**

Das Frostschutzheizregister muss sicherstellen, dass die Außenluft immer auf mindestens  $-4\text{ °C}$  vortemperiert wird. Eine weitergehende Vorerwärmung ist in der Regel nicht erforderlich und verursacht nur unnötigen Energieverbrauch.

## 5.3.2 Kanäle

Anhaltswert für die Dimensionierung von Kanälen und Komponenten ist eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von  $3\text{ m/s}$  bei Nennvolumenstrom. Zielwert bei Wohnungslüftungsanlagen sollte aber eher eine Strömungsgeschwindigkeit von etwa  $1 - 2\text{ m/s}$  sein. Kanäle sollten glattwandig sein und möglichst geradlinig verlegt werden. Daher hat die Führung von Luftkanälen Priorität gegenüber Wasser- oder Heizleitungen.

In der DIN EN 13779 gibt es vier Luftdichtheitsklassen für Lüftungskanäle mit von Klasse A bis Klasse D jeweils um den Faktor 3 zunehmender Luftdichtheit. Die Luftdichtheitsklasse beschreibt dabei das gesamte Kanalsystem, es werden also keine einzelnen Komponenten betrachtet.

Wird ein Teil des Zuluftstrangs mit Unterdruck betrieben (z.B. bei einer semizentralen Anlage für ein Mehrfamilienhaus mit Anordnung der Zuluftventilatoren in den Wohnungen), so könnte bei Verlegung von Zu- und Abluft im selben Schacht eine Geruchsübertragung erfolgen. Um dies zu vermeiden, ist für beide Kanäle, in erhöhtem Maße aber für den Zuluftstrang, eine sehr gute Dichtheit erforderlich. Ein undichtes Kanalnetz kann außerdem

störende Geräusche verursachen. Bei Dichtheitsanforderungen empfiehlt es sich zur Sicherung der geforderten Verarbeitungsqualität in der Ausschreibung mindestens einen Leckagetest einer Sammellüftungsleitung im Leistungsverzeichnis vorzusehen.

### 5.3.3 Ein-, Aus- und Überströmöffnungen

#### 5.3.3.1 Außen- und Fortluftführung

Besonderes Augenmerk muss bei der Lüftungsplanung darauf gelegt werden, dass keine Kurzschlussströmung zwischen Fortluftauslass und Außenluftansaugung sowohl desselben Lüftungsgeräts als auch unterschiedlicher Geräte entsteht. DIN EN 13779 fordert (allerdings für Nichtwohngebäude): „Außenluftfassungen sollten nicht an Stellen angeordnet sein, an denen eine Rückströmung von Fortluft oder eine Störung durch Verunreinigungen bzw. Geruchsemissionen zu erwarten ist“ [114]. Im Geschosswohnungsbau kann insbesondere bei ungünstiger Anordnung und Form der Fortluftauslässe eine als störend empfundene Geruchsübertragung zwischen übereinander oder über Eck nebeneinander liegenden Wohnungen entstehen.

**Die Position der Außenluftansaugung sollte sorgfältig gewählt werden.**

Hinsichtlich der Lufthygiene sollte die Position der Außenluftansaugung sorgfältig gewählt werden. Fernhalten sollte man sie von allen Störquellen wie beispielsweise Kaminen, Mülleimern, Parkplätzen und Komposthaufen. Um die Ansaugung von Staub und Mikroorganismen zu verhindern, sollte möglichst ein Mindestabstand von 3 m vom Boden eingehalten werden.

Die über die Fortluftöffnung ausgeblasene Luft befindet sich fast permanent im Sättigungszustand. Daher sollten andere Bauteile nicht direkt vom Fortluftstrahl angeströmt werden, da hier sonst unter Umständen eine dauerhafte Befeuchtung durch Kondensat gegeben ist.

#### 5.3.3.2 Anordnung von Zulufteinlässen

Über die Zuluftdüsen wird die frische Luft in die Zuluft Räume eingebracht. Sie müssen sorgfältig ausgewählt, dimensioniert und positioniert werden, um Zugscheinungen, Kurzschlussströmungen und Geräuschbildung zu vermeiden. Folgende Kriterien sind bei der Auswahl von Zu- und Abluftventilen zu beachten [102]:

- Abgleichbar anhand einer Differenzdruck-Volumenstromkennlinie
- Angaben über die Luftausbreitung im Raum (vollständige Raumdurchlüftung und Zugluftfreiheit)
- Angaben über Schalldämpfung und Eigengeräuscherzeugung
- leicht (de-) montierbar und gut zu reinigen
- Messvorschrift zum Volumenstromabgleich angegeben

Grundsätzlich unterscheidet man die Ventile nach Art der Strahlausbildung. Tritt der Strahl direkt in den Raum aus, so spricht man von einem Freistrahler, wird er dagegen umgelenkt und breitet sich entlang der Wand aus, so wird der Strahl

als Halbstrahl bzw. Wandstrahl bezeichnet. Ersterer tritt z.B. bei Weitwurfdüsen auf, letzterer bei Tellerventilen.



**Abbildung 127** Einbringung der Zuluft mit einer Weitwurfdüse knapp unter der Decke unter Ausnutzung des Coanda-Effekts (Quelle: PHI, [203])

Nicht empfehlenswert ist die Positionierung von Weitwurfdüsen und Abluftöffnungen auf gleicher Höhe an gegenüberliegenden Wandflächen, da sonst eine Kurzschlussströmung auftritt, wodurch der Schadstoffabtransport vermindert wird (vgl. [110]).

#### 5.3.3.3 Überströmöffnungen

Damit die Luftströmung von den Zulufräumen über die Überströmzone in die Ablufträume auch bei geschlossenen Türen funktioniert, sind Überströmöffnungen nötig. Überströmöffnungen sollten grundsätzlich einen Druckverlust von nicht mehr als 1 Pa aufweisen. Je nach Anforderungen sind unterschiedliche Ausführungsvarianten möglich.

Am einfachsten ist es, den Spalt zwischen Türblatt und Fußboden so weit zu vergrößern, dass dessen lichter Querschnitt für die Überströmung ausreicht. Bei Türspalten sollte eine Strömungsgeschwindigkeit von maximal 1 m/s eingehalten werden. Die Luftgeschwindigkeit im Spalt lässt sich im Rahmen einer Qualitätssicherung leicht mit Hilfe eines Hitzdraht-Anemometers überprüfen. Begrenzt wird die mögliche Höhe des Türspalts durch Schallschutzanforderungen. Weitere Ausführungsvarianten sind die Überströmung zwischen Türzarge und Rohbausturz. (siehe Abbildung 128) und spezielle Überstromelemente.

**Überströmöffnungen sollten einen Druckverlust von 1 Pa nicht überschreiten.**



**Abbildung 128** Ausfräsung in der Türzarge für die Überströmung der Luft zwischen Zarge und Rohbausturz hindurch in den Flur (Quelle: faktor10 Darmstadt)

### 5.3.4 Integration von Lüftungsanlagen im Altbau

**Bei der nachträglichen Integration von Lüftungsanlagen in Altbauten gilt: „Geht nicht - gibt's nicht!“**

Die Gründe, weshalb die kontrollierte Wohnungslüftung auch bei der Altbaumodernisierung unverzichtbar ist, wurden in Abschnitt 5.1.1.1 bis 5.1.1.5 bereits erläutert. Im Altbau ergeben sich allerdings häufig besondere Herausforderungen. Der Lüftungsplaner muss mit beengten Platzverhältnissen, niedrigen Decken und Schwierigkeiten bei der Erstellung von Wand- und Deckendurchbrüchen umgehen. Aus diesem Grund wurden Lösungen in einem eigenen Arbeitskreis systematisch erarbeitet [228].

Sie zeigen, wie trotz dieser Schwierigkeiten der nachträgliche Einbau einer Lüftungsanlage in fast allen Gebäuden auch in beengten Situationen möglich ist. Es gilt: „geht nicht - gibt's nicht!“ Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick.

#### 5.3.4.1 Gebäudezentrale oder wohnungszentrale Lüftungsanlage?

**Zentrale und dezentrale Lüftungsanlagen im MFH unterscheiden sich bezüglich der Investitionskosten in der Regel nicht wesentlich.**

Bei der Modernisierung von Mehrfamilienhäusern ist je nach den Gegebenheiten sowohl eine gebäudezentrale als auch eine wohnungszentrale Lüftungsanlage möglich. Die Investitionskosten unterscheiden sich in der Regel nicht wesentlich, so dass für die Entscheidung andere Faktoren wie die Eigentumsstruktur und Überlegungen bezüglich Planung, Ausführung, Betrieb und Wartung der Anlagen ausschlaggebend sind. Bei der Altbausanierung werden insbesondere die Platzverhältnisse sowie die Möglichkeit von Wand- und Deckendurchbrüchen entscheidend sein. Die im Folgenden aufgeführten Vor- und Nachteile von gebäudezentralen und wohnungszentralen Lüftungsanlagen sind am konkreten Projekt sorgfältig gegeneinander abzuwägen [104]:

**Gebäudezentrales System:***Vorteile*

- Zentrale Außen-/Fortluftführung spart Wanddurchbrüche in jeder Wohneinheit
- Kein Platzbedarf in den einzelnen Wohneinheiten für Wärmerückgewinnungsgeräte nötig, evtl. können vorhandene Schächte oder unbenutzte Kamine für die Vertikalverteilung genutzt werden.
- Bei Sanierungen im bewohnten Zustand können die Arbeiten an der Lüftungszentrale außerhalb der Wohneinheiten durchgeführt werden.
- Schalltechnisch günstige Lösungen, weil Ventilatoren außerhalb der Wohneinheiten.
- Wartung und Filterwechsel kann ohne Terminabsprache mit den Bewohnern durchgeführt werden.
- Je nach baulicher Situation besteht evtl. ein Kostenvorteil, weil weniger Einzelkomponenten notwendig sind (Ventilatoren, Wärmerückgewinnung, Frostschutz, Kondensatablauf etc.).

*Nachteile*

- Relativ hoher Planungsaufwand
- Lüftungszentrale (z.B. am Dach oder im Keller) mit relativ hohem baulichen Aufwand nötig.
- Vertikale Kanäle mit entsprechenden Durchführungen und Brandschutzeinrichtungen notwendig.
- Relativ hoher Platzbedarf für die vertikale Kanalführung
- zusätzlicher Aufwand für Schallschutz zwischen den Wohneinheiten
- Volumenstromregler für jede Wohnung
- Regelaufwand für Balanceabgleich in Wohnung und Gebäude

### Wohnungszentrales System:

#### *Vorteile*

- Individuelle Regelbarkeit und Wartung
- Kein Technikraum nötig, Aufstellung in Bad oder Küche möglich
- Keine Geruchsübertragung zu Nachbarwohnungen durch Leckagen möglich
- Geringer Planungsaufwand, standardisierte Lösungen, Vorfertigung möglich
- Einfacher Balanceabgleich

#### *Nachteile*

- Wartungsarbeiten nur in Abstimmung mit den Bewohnern
- Außenwanddurchbrüche in jeder Wohneinheit notwendig
- Geräteschallabgabe der dezentralen Geräte im Aufstellraum
- Platzbedarf für die Einzelgeräte
- Filter, Frostschutz und Kondensatablauf an jedem Einzelgerät
- Geruchsübertragung durch Kurzschlussströmung möglich

Eine weitere Möglichkeit sind semizentrale Lüftungssysteme [104].



**Abbildung 129** Lüftungszentrale für ein Mehrfamilienhaus (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Bernadottestr., WBG Nürnberg)

#### 5.3.4.2 Lüftungsgerät

Während Lüftungskanäle und Schalldämpfer meist in einer abgehängten Decke verborgen werden können, ist bei Altbauten mit vorgegebenem Grundriss die Unterbringung des Lüftungsgeräts unter Umständen schwieriger. Die Möglichkeiten für den Altbau werden ausführlich diskutiert in [240].

#### 5.3.4.2.1 Deckenintegration

Für die Deckenintegration sind Geräte mit speziell angepasster Bauform nötig. Das insbesondere bei kalten Außentemperaturen auf der Abluft/Fortluft-Seite im Wärmeübertrager des Lüftungsgeräts anfallende Kondensat muss ablaufen können.



**Abbildung 130** In die abgehängte Decke integriertes Lüftungsgerät mit Revisionsöffnungen für das Zentralgerät und die Taschen-Luftfilter(Quelle: [99])

#### 5.3.4.2.2 Wandintegration

Wandintegrierte Geräte sind etwas leichter für die Wartung zugänglich als Geräte in abgehängten Decken. Ist das Gerät an einer Außenwand montiert, können zudem die kalten Außenluft- und Fortluftkanäle im warmen Bereich sehr kurz bleiben, was die Effizienz der Anlage (effektiver Wärmebereitstellungsgrad) verbessert.

#### 5.3.4.2.3 Fensterintegration

Wenn Belastungen der Bewohner durch Vibrationen, Staub und Lärm bei der Erstellung von Außenwanddurchbrüchen vermieden werden sollen, kann die Integration des Lüftungsgeräts in vorhandene Fensteröffnungen eine Lösung sein [104]. Da die Fensterfläche dadurch verkleinert wird, ist die Maßnahme immer mit einem Fensteraustausch verbunden. Zudem muss überprüft werden, ob die natürliche Belichtung nicht übermäßig verschlechtert wird (siehe auch Abschnitt 7.8.2 auf Seite 258).

#### 5.3.4.3 Kanäle in der abgehängten Decke

Die Integration von Lüftungskanälen in Bestandsgebäuden ist eine Herausforderung, weil die Kanalführung jeweils individuell an das Gebäude angepasst werden muss. Um den Platzbedarf an die vorhandenen Gegebenheiten anzupassen, muss unter Umständen von der bewährten Ausführung mit Wickelfalzdunstrohr und Rundschalldämpfern abgewichen werden. Als Alternative zur abgehängten Decke können Abkofferungen um einzelne Kanäle ausgeführt werden.

#### 5.3.4.3.1 Kanalstruktur

Bei begrenztem Platz für die Verlegung der Lüftungskanäle kann schon bei den grundsätzlichen Überlegungen zum Layout des Kanalnetzes je nach Variante Aufbauhöhe eingespart werden.

Die klassische Variante des Kanalnetzes ist die „**Baumstruktur**“ bei der die gesamte Zuluft vom Lüftungsgerät durch einen Hauptkanal mit mindestens einem Geräteschalldämpfer geführt wird. Vom Hauptkanal zweigen die Teilstrecken für die Raumanbindung ab. Diese enthalten die Telefoneschalldämpfer zur Schallentkopplung der Räume untereinander. Da der Hauptkanal die gesamte Zuluft für alle Räume transportieren muss weist er üblicherweise Durchmesser von DN 100 bis DN 160 je nach Wohnungsgröße und Volumenströmen auf. Diese Kanalstärken und die entsprechenden Schalldämpfer müssen in Abkofferungen oder in der abgehängten Decke untergebracht werden.

Eine Alternative zu dieser klassischen Variante ist ein „**sternförmiges Kanalnetz**“. Von einem zentralen Verteilerkasten, der mit entsprechender Auskleidung auch eine schalldämpfende Wirkung hat, werden die einzelnen Zulufräume jeweils direkt angefahren.

#### 5.3.4.3.2 Kanalform

Bei der Verlegung in der abgehängten Decke tragen bei Rundkanalsystemen insbesondere die Schalldämpfer und die Kanalkreuzungen stark auf und können die verbleibende lichte Deckenhöhe evtl. übermäßig einschränken.

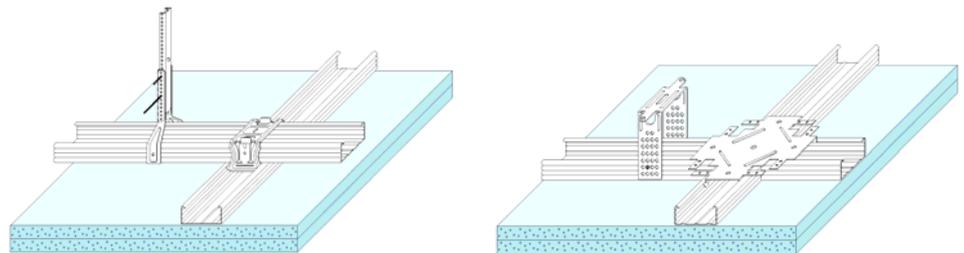
**Flachkanäle haben einen etwas höheren Druckverlust als Rundkanäle mit gleicher Querschnittsfläche.**

Flachkanäle haben bei gleicher Querschnittsfläche einen um ca. 5-20 % höheren Druckabfall pro Meter Rohrlänge als Rundkanäle (vgl. [36]) und müssen daher entsprechend bei gleichem Volumenstrom etwas größer dimensioniert werden.

#### 5.3.4.3.3 Abgehängte Deckenkonstruktionen

Neben der Minimierung der Aufbauhöhe von Kanälen und Formstücken kann auch durch eine Optimierung der Konstruktion der abgehängten Decke einer übermäßigen Verringerung der lichten Raumhöhe entgegengewirkt werden.

Abgehängte Decken werden meistens mit Gipskartonplatten mit einer Unterkonstruktion aus Holz oder Metallprofilen ausgeführt. Die Plattenstärke richtet sich nach den Anforderungen an Schall- und Brandschutz. Mit der Plattenstärke verändert sich der mögliche Achsabstand der Unterkonstruktion. Durch die Kreuzung von Trag- und Unterkonstruktion entstehen relativ große Aufbauhöhen von ca. 54 mm. Durch niveaugleiche Konstruktionen kann die Höhe zumindest um etwa die Hälfte reduziert werden (Abbildung 131).



**Abbildung 131** Abgehängte Decke mit gekreuzter (links) und niveaugleicher (rechts) Unterkonstruktion (Quelle: Fa. Knauf Gips KG)

#### 5.3.4.3.4 Integration von Leuchten

Ist die Deckenhöhe wegen einer abgehängten Decke für die Lüftungskanäle ohnehin schon niedrig, so ist eine weitere Einschränkung der Kopffreiheit durch Deckenleuchten problematisch. In einem solchen Fall empfehlen sich deckenintegrierte Leuchten. Beliebt ist hier insbesondere die Ausführung mit Halogenlampen. Diese haben allerdings einen hohen Stromverbrauch und können im Betrieb sehr heiß werden. Als Alternative bieten sich deckenintegrierte Leuchten mit effizienten Energiesparlampen an, von denen inzwischen ein breit gefächertes Angebot existiert (siehe Abbildung 133)



**Abbildung 133** Leuchte für die Deckenintegration mit Energiesparlampe (9W) und einer Aufbauhöhe von nur 30 mm (Quelle: IDV GmbH)

#### 5.3.4.3.5 Kanalkreuzungen

Kanalkreuzungen lassen sich gerade im Altbau nicht immer vermeiden. Dadurch erhöht sich in der Regel die Aufbauhöhe. Durch spezielle Formteile für Kreuzungen kann jedoch vermieden werden, dass die abgehängte Decke wegen einer Überkreuzung tiefer gesetzt werden muss. Wenn die Breite der Formstücke entsprechend erhöht wird, hält sich der zusätzliche Druckverlust im Rahmen. Entsprechende Systeme sind allerdings noch kaum auf dem Markt erhältlich.

#### 5.3.4.3.6 Schalldämpfer

Bestimmend für die Aufbauhöhe ist in der Regel nicht der Lüftungskanal sondern der Schalldämpfer. Bei diesem kann Höhe gespart werden, indem eine Rechteckausführung an Stelle von Rundschalldämpfern gewählt wird. Wenn bei der Modernisierung neue Gipskartonwände aufgestellt werden, gibt es die Möglichkeit den Schalldämpfer in den Zwischenraum der Wand zu integrieren. Entsprechende Telefoneschalldämmkästen werden in Kombination mit Schlitzauslässen angeboten. So kann auf Telefoneschalldämpfer in der abgehängten Decke verzichtet werden, wodurch lichte Raumhöhe im Flurbereich gewonnen wird.

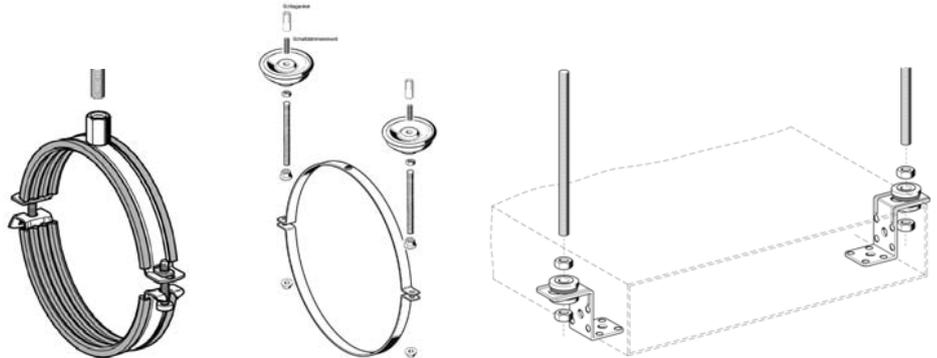
#### 5.3.4.3.7 Kanalbefestigung

Bei der üblichen Befestigung von Rundkanälen mit Lüftungsschellen und mittleren Gewindestäben verbleibt ein Mindestabstand von der Decke, welcher durch die Konstruktion vorgegeben ist. Je nach Ausführung sind dies 10 - 25 mm. Werden dagegen pro Schelle zwei Gewindestäbe seitlich befestigt, so muss lediglich noch ein geringer Abstand zur Decke zum Ausgleich von



**Abbildung 132** Telefonieschalldämmkasten mit Schlitzauslass zur Integration in eine Gipskartonwand. (Quelle: Ferdinand Schad KG)

Toleranzen eingehalten werden. Grundsätzlich sollten alle Befestigungssysteme aus Schallschutzgründen eine Körperschallentkopplung beinhalten.



**Abbildung 134** Schellen für mittige (oben links) und seitliche (oben rechts) Befestigung von Rundkanälen. Die seitliche Befestigung erlaubt einen geringeren Abstand zur Decke und ist auch bei Flachkanälen möglich (unten). (Quelle: Fa. Sikla GmbH, [http://www.sikla.de/service/downloads/publikationen/montagetchnik/mt\\_-03-lueftung/48061](http://www.sikla.de/service/downloads/publikationen/montagetchnik/mt_-03-lueftung/48061))

#### 5.3.4.4 Unverkleidete Kanäle

Wenn dies gestalterisch gewünscht ist, können Lüftungskanäle auch offen geführt werden. Bei Verzicht auf eine abgehängte Decke bleibt zudem die thermische Masse der Massivdecke an die Raumluft gekoppelt und kann so insbesondere im Sommer ausgleichend auf das Raumklima wirken.

#### 5.3.4.5 Lüftungskanäle im Fußbodenaufbau

Wenn im Rahmen der Modernisierung ohnehin ein neuer Fußbodenaufbau hergestellt wird, besteht die Möglichkeit, die Lüftungskanäle hierin zu integrieren. Geeignet sind Flach- und Ovalkanäle mit einer Kanalhöhe von ca. 55 mm aus verzinktem Blech bzw. Kunststoff. Die Kanäle werden in eine dafür dimensionierte Dämmstofflage platziert.

#### 5.3.4.6 Horizontaler Leitungsverzug im Dach- bzw. Kellerbereich

Flachkanäle können im Dachbereich in den Zwischenräumen der Konterlattung der Innenbekleidung geführt werden. Evtl. muss die Konterlattung verstärkt werden. Liegt die Dämmung auf der obersten Geschossdecke auf, so können die Zuluft- und Abluftkanäle auch unter der Dämmung verlegt werden. Auf jeden Fall müssen die nötigen Durchführungen durch die luftdichte Ebene immer sorgfältig abgedichtet werden.

#### 5.3.4.7 Vertikale Kanalführung

##### *Nutzung vorhandener Schächte oder Kamine*

Als erstes sollte immer die Möglichkeit der Nutzung vorhandener Schächte und Kamine für die vertikalen Lüftungskanäle geprüft werden. Wird gleichzeitig mit dem Einbau der Lüftungsanlage auch das Heizungssystem erneuert, so werden

**Unter Umständen können nicht mehr benötigte Kamine für die Kanalführung verwendet werden.**

durch den Ersatz von Einzelöfen oder Etagenheizungen durch eine zentrale Wärmeerzeugung nicht mehr alle Kamine benötigt. Unter Umständen kommt eine Nutzung der Kamine oder auch nur deren Deckendurchbrüche in Frage.

#### *Lüftungskanäle in der Außenwanddämmung*

Eine weitere Möglichkeit kann die Verlegung der vertikalen Lüftungskanäle in die Fassade sein. Eine Kanalführung *vor* der Fassadenfläche wird allerdings aus gestalterischen Gründen und wegen der Dicke der erforderlichen Kanaldämmung eher nicht in Frage kommen. Bei einem beheizten Zuluftkanal für ein Einfamilienhaus (DN 125) ergibt sich beispielsweise mit der erforderlichen Dämmung ein Gesamtdurchmesser von 45 cm. Grundsätzlich ist zu bedenken, dass bei Verlegung der Kanäle in der Fassade mehrfach die luftdichte Hülle durchbrochen wird und deshalb auf einen besonders sorgfältigen Anschluss der Leitungen an diese Ebene zu achten ist. Genaue Vergleiche zwischen verschiedenen Kanalquerschnitten und deren Auswirkungen können in [109] nachgeschlagen werden.

#### *Abkofferungen und Wandschlitz*

Mit relativ geringem Aufwand können Raumecken in Trockenbauweise abgekoffert werden, um darin vertikale Lüftungskanäle unterzubringen. Nachteil ist naturgemäß der Verlust an nutzbarer Wohnfläche durch den Schachtquerschnitt. Als weitere Alternative können kleinere Kanalquerschnitte in Wandschlitz verlegt werden. Lage und Größe der zulässigen Schlitz und Aussparungen in tragenden Wänden sind in DIN 1053-1 [80] geregelt.

#### 5.3.4.8 *Nachträgliche Erstellung von Wand- und Deckendurchbrüchen*

Sowohl in Wand als auch im Deckenbereich bieten sich für die Durchführung von Rundkanälen Kernlochbohrungen an, die zeitsparend sowie staub- und vibrationsarm ausgeführt werden können. Bei massiven Stahlbetonwänden muss ein Bohrgerät mit Wasserkühlung eingesetzt werden. Bei normalem Mauerwerk ist dies nicht erforderlich.



**Abbildung 135** Kernbohrung für die Durchführung des Außenluft- und Fortluftkanals durch die Außenwand (Quelle: faktor10 Darmstadt)

### 5.3.5 Praktische Hinweise für Ausführung, Inbetriebnahme und Wartung

Die größten Einspar- und Optimierungspotentiale liegen in einer frühzeitigen Klärung der Aufgabenstellung und der Auswahl geeigneter und möglichst einfacher Konzepte. Beispiele für in Planung und Ausführung von Lüftungsanlagen immer wieder auftretende Fehler sind [102]:

- unzureichende Randbedingungen für den Betrieb (mangelhafte Luftdichtheit der Gebäudehülle, aufwendige Kanalführungen aufgrund schlechter Zonierung im Gebäude),
- Auswahl von Anlagentypen, die für die Anforderungen im Projekt nicht oder schlecht geeignet sind,
- falsche strömungstechnische Kanaldimensionierungen, wärmetechnisch ungeeignete Kanaltrassen,
- Zuglufterscheinungen im Raum oder schalltechnische Probleme aufgrund ungeeigneter Komponenten oder falscher Planung,
- mangelhafte Ausführung von Installationen,
- Leistungseinbußen aufgrund fehlenden Anlagenabgleichs,
- hoher Stromverbrauch durch falsche Planungsvorgaben, schlechte Komponenten oder mangelhafte Systemabstimmung,
- hygienische Probleme aufgrund mangelhafter Konstruktion oder Wartung.

#### 5.3.5.1 *Planlage und Bauaufnahme*

Im Altbau sind häufig nicht alle als Grundlage für die Lüftungsplanung notwendigen Pläne (Grundrisse, Schnitte, Details) vorhanden, oder sie entsprechen wegen abweichender Ausführung oder Umbauten nicht den tatsächlichen Gegebenheiten. Eine Besichtigung jeder Wohneinheit verbunden mit einer Aufnahme der wichtigsten Maße ist daher dringend zu empfehlen.

#### 5.3.5.2 *Mieterinformation*

Eine umfassende Einbindung und Information der Bewohner ist unbedingt erforderlich, um eine gute Akzeptanz der Maßnahme zu erreichen, insbesondere weil vielen Menschen die Vorteile einer Lüftungsanlage noch nicht bekannt sind. Bei größeren Objekten ist eine Mieterversammlung vor Beginn der Baumaßnahme zu empfehlen, in der alle Maßnahmen ausführlich vorgestellt werden. Während der Ausführung sollte der Bauleiter als fester Ansprechpartner für die Mieter zur Verfügung stehen und sicherstellen, dass unnötige Belastungen für die Mieter vermieden werden.

#### 5.3.5.3 Gewerkekoordination

Eine sorgfältige Koordination aller direkt oder indirekt betroffener Gewerke ist erforderlich. Dazu gehören:

- Rohbau: Wand- und Deckendurchbrüche, Kernbohrungen
- Stuckateur: Wärmedämm-Verbundsystem im Bereich der Außen- und Fortluftöffnungen
- Trockenbau: Verkleidung von Lüftungskanälen und -anlagen
- Fußboden-/Estrichleger: bei Integration von Lüftungskanälen im Bodenaufbau
- Dachdecker: Bei Außen- und Fortluftöffnungen über Dach

Bei sorgfältiger Ausführungs- und Terminplanung werden für Lüftungsinstallation sowie Trockenbau- und Malerarbeiten pro Wohnung jeweils nur etwa zwei Tage benötigt, so dass die direkte Belästigung der Bewohner auf weniger als eine Woche begrenzt werden kann (vgl. [121]).

#### 5.3.5.4 Inbetriebnahme und Einregulierung

Ohne eine Einregulierung der Lüftungsanlage bei Inbetriebnahme ist ein effektiver und effizienter Betrieb nicht zu erwarten. Die Inbetriebnahme beinhaltet in der Regel die folgenden Schritte, die je nach Anlagentyp und eingesetzten Komponenten noch modifiziert werden müssen [228].

##### **Kontrolle vor Inbetriebnahme:**

- Sauberheitskontrolle der Räume und aller installierten Komponenten (z.B. Kanäle und Zentralgerät).
- Entfernen eventueller Verschlüsse.
- Montage der Luftdurchlässe in dafür vorgesehenen Befestigungsrahmen.
- Montage des Außenlufteinlasses mit Filterbox.
- Montage des Fortluftauslasses.
- Einbausituation der zentralen Messblenden überprüfen (siehe Herstellerunterlagen).
- Überprüfung aller Filter in der Anlage (im Zentralgerät, im Außenluftdurchlass etc.) auf korrekten Sitz und Sauberkeit. Gegebenenfalls müssen die Filter gereinigt bzw. durch neue ersetzt werden.
- Kontrolle notwendiger Abdichtungsmaßnahmen am Kanalnetz
- Überprüfung der Wärmedämmung an Kanälen, Zentralgerät und Wanddurchführungen anhand der Werkpläne.

**Inbetriebnahme:**

- Einregulierung der Luftmengenverteilung bei Nennvolumenstrom auf die bei der Einweisung vorgegebenen Werte mit niedrigem Stromverbrauch.
- Die gewünschte Luftmengenverteilung lässt sich durch Verstellen der Zu- und Abluftdurchlässe einregulieren.
- Luftmengen sowie Einstellmaße müssen im Messprotokoll festgehalten werden.
- Einstellen der Gesamtabluft- und Gesamtzuluftmengen sowie der Luftmengenbalance am Zentralgerät gemäß den vom Planer vorgegebenen Betriebsstufen.
- Der Gesamtabluftvolumenstrom bzw. der Gesamtzuluftvolumenstrom wird an den Messblenden im zentralen Abluft- bzw. Zuluftstrang gemessen.
- Die Anpassung der Volumenströme auf die vorgegebenen Werte und die Luftmengenbalance.
- Die End Einstellungen müssen im Messprotokoll festgehalten werden.
- Erstellung eines verbindlichen und nachvollziehbaren Messprotokolls mit den oben beschriebenen Angaben zur Vorlage beim Planungsbüro.

**5.3.5.5           Wartung**

Passivhaus-Lüftungsanlagen sind einfach aufgebaut und wartungsarm. Der Aufwand für Inspektionen während der Nutzungsphase ist gering. Folgende regelmäßige Arbeiten sind nötig:

- Filterwechsel (mindestens einmal pro Jahr)
- Prüfen und gegebenenfalls Reinigen der Kondensatwanne mit Ablauf und Siphon (bei Filterwechsel)
- Deaktivieren bzw. Aktivieren der Wärmerückgewinnung für den Sommer- bzw. Winterbetrieb (falls das Gerät nicht automatisch umschaltet)

Diese einfachen Arbeiten können im Wohneigentum von den Bewohnern selbst durchgeführt werden. Der Abschluss eines Wartungsvertrags mit der ausführenden Firma zumindest für die Dauer der Gewährleistungsfrist kann dennoch sinnvoll sein, weil sich sonst nach § 13 der VOB/B die Verjährungsfrist für Mängelansprüche von 4 auf 2 Jahre verkürzt (vgl. [190]).

Bei Mietwohnungen kann eine zuverlässige Wartung durch die Mieter nicht immer vorausgesetzt werden. Der Abschluss eines Wartungsvertrags ist dann zu empfehlen. Bei der Planung der Anlage sollte schon auf Wartungsfreundlichkeit geachtet werden.

**Tip: Bei Abnahme einer größeren Anzahl (Einkaufsgemeinschaft) können die Ersatzfilter evtl. günstiger erworben werden.**

## 6 Heizung und Warmwasserbereitung

### 6.1 Grundlagen

Es sind zwei Begriffe zu unterscheiden: Heizlast und Heizwärmebedarf.

Der Begriff **Heizlast** beschreibt eine momentan benötigte Leistung, um die gewünschte Temperatur im Raum einzuhalten. Synonym verwendete Begriffe sind Heizleistung, Heizleistungsbedarf (vgl. [50]) „Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast“. Die originäre Einheit der Heizlast ist Watt [W] oder Kilowatt [kW]. Eine griffige Vergleichsgröße ist die Leistung (-saufnahme) einer Glühbirne von z.B. 60 W. Abgeleitete Größe ist z.B. eine auf den Quadratmeter beheizte Fläche bezogene spezifische Heizlast in [W/m<sup>2</sup>].

In analoger Betrachtung wird z.B. eine Heizlast für die Warmwasserbereitung bzw. die Erwärmung von Luft angegeben.

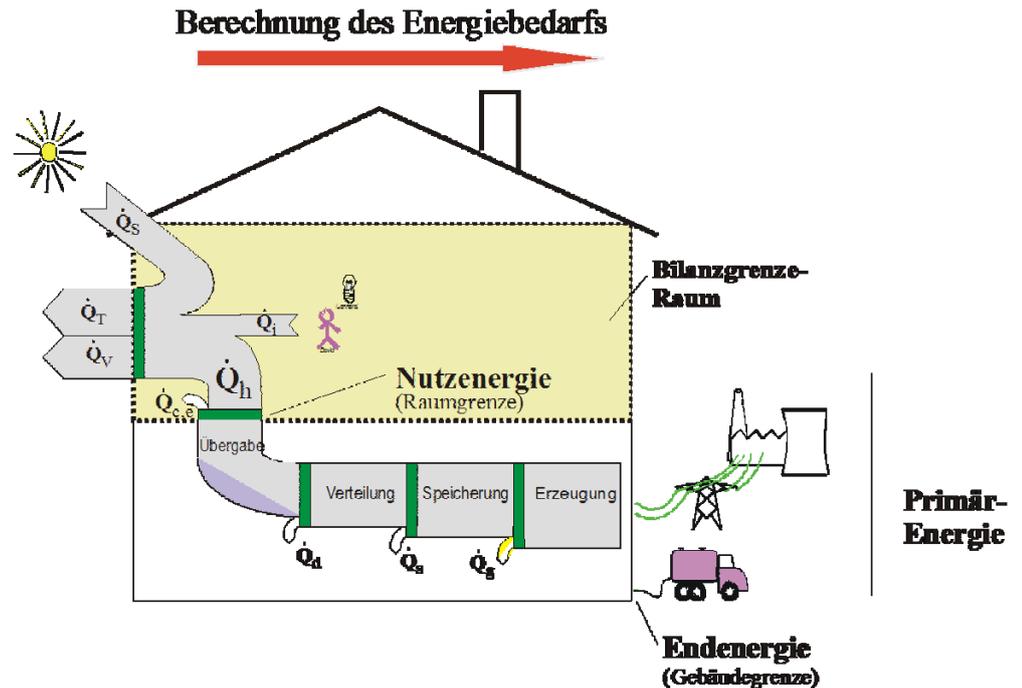
Der **Heizwärmebedarf** hingegen gibt die Wärmemenge an, die z.B. für die Beheizung eines Gebäudes in einer bestimmten zeitlichen Spanne benötigt wird. In der Regel wird hierbei der Betrachtungszeitraum „ein Jahr“ gewählt, d.h. es wird der Jahres-Heizwärmebedarf angegeben. Mit Bedarf wird die Vorausberechnung, die Prognose bezeichnet. Der Heizwärme-Verbrauch hingegen gibt die tatsächlichen, gemessenen und abgerechneten Werte wieder.

Die originäre Einheit des Heizwärmebedarfs ist Wattstunde [Wh] oder Kilowattstunde [kWh], abgeleitete Größe ist z.B. ein auf den Quadratmeter beheizte Fläche bezogener spezifischer Heizwärmebedarf in [Wh/m<sup>2</sup>] oder [kWh/m<sup>2</sup>], und bezogen z.B. auf ein Jahr [kWh/(m<sup>2</sup>a)]. Der Heizwärmebedarf kann direkt in Energiemengen umgerechnet werden. Typische äquivalente Energiemengen sind: 1 l Öl bzw. 1 m<sup>3</sup> Gas mit etwa 10 kWh Heizwert.

Mit einem technischen System muss diese Wärme erzeugt werden – (bzw. Restwärme, sofern der Passivhausstandard erreicht wird). Die Bereitstellung der Leistung bzw. Wärme erfordert eine Umwandlung von Energie z.B. in einem Wärmeerzeuger, es entstehen Umwandlungs- und Bereitschaftsverluste. Die Energie, die zur Deckung des Nutzenergiebedarfs und der Verluste benötigt wird, wird als Endenergie bezeichnet; sie ist in der Regel die bezogene Energie in Form von Heizöl, Erdgas, Holz, Kohle, Fernwärme oder Strom.

Die Warmwasserversorgung wird im Verhältnis umso bedeutender, je energieeffizienter das Gebäude nach der Sanierung ist; sie ist dann eng verknüpft mit der Restwärmeversorgung. Wird der Passivhausstandard erreicht, können sogar die Lüftung, Restheizung und Warmwasser in einem kompakten Gerät integriert werden [224]. Daher ist eine Einzelbetrachtung z.B. nur der Heizwärmeversorgung nicht zweckmäßig, vielmehr sind die genannten Bereiche zur Erreichung einer optimalen Gesamtlösung gemeinsam zu betrachten.

**Warmwasserversorgung,  
Heizung und Lüftung sind  
für eine optimale  
Gesamtlösung gemeinsam  
zu betrachten.**



**Abbildung 136** Berechnung des Energiebedarfs in Richtung der Bedarfsentwicklung, (nach DIN 4701-10, Bild 1.1 [138]). Dabei sind die „Wärmeübergabeverluste“ vernachlässigbar gering, dies wurde systematisch im Rahmen des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser untersucht [229].

Die vorgelagerte Prozesskette wird durch **Primärenergiefaktoren** berücksichtigt (vgl. auch 8.2.2).

Primärenergiefaktoren (nach EnEV 2009 [140], DIN V 4701-10 [138]):

Heizöl, Erdgas, Flüssiggas	1,1
Holz, Pellets	0,2
Nah-/Fernwärme aus Heizwerk (fossiler Brennstoff)	1,3
wie vor, mit KWK	0,7
Strom-Mix	2,6

### 6.1.1 Heizlast für Raum- und Warmwasserwärmung

Die Heizlast ist die rechnerische Grundlage für die Auslegung der Heizflächen / Heizregister, die Rohrnetzrechnung sowie für den hydraulischen Abgleich. Zur Auslegung der Heizung hat die europäische Norm DIN EN 12831:2003-08 Norm-Heizlast die DIN 4701 [50] ersetzt,

Eine sorgfältige, projektangepasste Leistungsermittlung wird insbesondere bei einer **stufigen Sanierung** wichtig, wo z.B. in einer ersten Ausbaustufe die Lüftung, die Kellerdecken- und Dachdämmung realisiert wird, in einer zweiten Stufe dann der Austausch der Fenster sowie Anbringung der Fassadendämmung.

Ein schließlich durchgehend mit Passivhauskomponenten saniertes Gebäude hat eine sehr viel geringere Heizlast, als es dem derzeitigen Neubau-Standard

[140] mit 30 bis 40 W/m<sup>2</sup> entspricht. Entscheidende Systemvereinfachungen ergeben sich, wenn die hygienisch erforderliche Zuluftmenge ausreicht, um die Heizleistung über die Zuluft bereitzustellen; dies ist insbesondere in Passivhäusern der Fall. Die Heizlastberechnung muss dann mit dem PHPP [17] durchgeführt werden, weil die Norm-Heizlastberechnung eine erhebliche Überdimensionierung zur Folge hat, die Systemvereinfachungen nicht mehr erlaubt (vgl. das folgende Beispiel).

Beispiel: Heizlastberechnung eines Bürogebäudes im PH-Standard  
Veränderte Randbedingungen in folgenden Schritten:

- Außentemperatur nicht nach DIN, sondern Berechnungsergebnis PHPP (vgl. [17]) – niedrigste Außentemperatur im Heizlastfall
- Modifikationen: Fenster und Außentüren „dicht“ wie Festverglasung; Luftwechsel raumweise wie in der Lüftungsplanung; äußer Infiltration (bei Gebäudedichtheit 0,6) keine weiteren Lüftungsverluste

**Tabelle 10** *Beispiel Bürohaus Campus Neubau in Mainz*  
**2-geschossig, ca. 16x16 m PH-Standard Heizwärme 14,5 kWh/(m<sup>2</sup>a)**  
**WRG mit 82 % Wärmebereitstellungsgrad**

*Für die Leistungsfestlegung des Wärmeerzeugers wird die mittels PHPP (vgl. [17]) ermittelte Gebäude-Heizlast berücksichtigt.*

*Die Dimensionierung der Heizflächen sowie des Rohrnetzes erfolgt nach der modifizierten DIN 12831-Berechnung.*

Berechnung nach	Heizlast	
DIN EN 12831 (-12 °C)	7.950 W	160 %
DIN EN 12831 (-7,7 °C)	6.870 W	140 %
Modifikation DIN 12831	5.970 W	120 %
PHPP (vgl. [17])	4.900 W	100 %

### 6.1.2 Warmwasser: Wärme- und Leistungsbedarf

Der Warmwasserbedarf ist überwiegend vom Bedarf des Nutzers abhängig und nicht vom Baustandard.

Als typischer Jahres-Nutzwärmebedarf für Warmwasser kann ein Wert von 600 kWh pro Person angesetzt werden, zugrunde gelegt ist je Person ein täglicher Bedarf von 40 l Warmwasser von 45 °C (vgl. [169]). Dieser Wert ist durch zahlreiche Verbrauchsmessungen abgesichert, und kann daher für die Auslegung bei normalen Wohngebäuden verwendet werden.

Aus dem Bedarf berechnet liegt der **Leistungsbedarf** über den Tag gemittelt bei 68 W pro Person bzw. für ein 4-Personen-Haus bei ca. 270 W (ohne Verlustleistung z.B. eines Speichers).

Der momentane Leistungsbedarf von Durchfluss-Systemen hingegen liegt bei ca. 25 kW, durch Verwendung unterschiedlich großer Speicher lässt sich der Leistungsbedarf zwischen diesen beiden Extremwerten variieren.

Bei Speichersystemen für ein **Einfamilienhaus** kann von einem Leistungsbedarf von etwa dem 10-fachen des Tagesmittelwertes, d.h. ca. 3.000 W ausgegangen werden. Dies ist ausreichend, um das übliche Bedarfsprofil abzudecken (Ladung des Warmwasserspeichers nach Vollentnahme innerhalb von 2 Stunden). Bezogen auf eine durchschnittliche Wohnfläche von 120 m<sup>2</sup> bedeutet dies eine spezifische Leistung von 25 W/m<sup>2</sup>.

Bei der Speicherdimensionierung ist zumindest der Spitzenbedarf für eine Badewannenfüllung zu berücksichtigen, diese Wärmeleistung bzw. -menge muss in jedem Fall zur Verfügung gestellt werden (eine Badewannenfüllung innerhalb 10 Minuten). Die Speichergroße sollte daher (je nach Speichertemperatur) bei 120 bis 160 l liegen.

**Tabelle 11** *Warmwasserversorgung Typischer Leistungs- und Wärmebedarf*

#### **Leistungsbedarf**

<b>Warmwasserbereitung Durchlauf</b>	<b>25.000 W</b>
<b>Warmwasserbereitung Speicher EFH</b>	<b>3.000 W</b>
<b>Tagesmittel je Person (ohne Verluste)</b>	<b>68 W</b>
<b>Wärmebedarf je Person, Tag</b>	<b>1,6 kWh/(P*d)</b>

Je größer die Anzahl der gemeinsam von einer Zentrale versorgten Wohneinheiten z.B. in einem Mehrfamilienhaus ist, desto geringer fällt die Gleichzeitigkeit beim Warmwasserverbrauch ins Gewicht: Während bei 5 Wohneinheiten noch eine Gleichzeitigkeit von ca. 50 % anzusetzen ist, sinkt diese bei 20 Wohneinheiten auf unter 20 % ab.

Große Trinkwasserspeicher sollten aus hygienischen Gründen vermieden werden (Legionellen-Problematik), Heizwasser-Pufferspeicher in Verbindung mit thermischen Durchlauferhitzern stellen hier die bessere Lösung dar. Auf die richtige und angemessene Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit des Warmwasserbedarfs ist sorgfältig zu achten, um Unter- und Überdimensionierungen zu vermeiden.

Je nach Sanierungsumfang und vorhandener technischer Gebäudebeschaffenheit empfiehlt sich eine zentrale oder dezentrale Warmwassererzeugung. Soll die vorhandene Heizwärmeverteilung weiter genutzt werden, müsste für die dezentrale Warmwasserbereitung mit thermischen Durchlauferhitzern ein neues Verteilnetz eingebaut werden. In der Regel ist es dann günstiger ein Warmwasser- und Zirkulationsleitungsnetz einzubauen.

Bei günstig / kompakt gelegenen Sanitärräumen in einem Mehrfamilienhaus ist ein zentrales Warmwasserverteilsystem kostengünstiger zu realisieren als eine Anlage mit dezentralen Durchlaufwärmetauschern. Liegen die Sanitärräume der Wohnungen jedoch weit entfernt und versetzt zueinander, ist die dezentrale Lösung zu empfehlen.

### 6.1.3 Thermische Behaglichkeit

Die Bedingungen für thermischen Komfort (nach DIN EN ISO 7730, vgl. auch [13]) werden in Abschnitt 7.1 ausführlich erläutert. Für konventionell errichtete Gebäude sind die Behaglichkeitsanforderungen an das System der Wärmeabgabe in der Norm DIN EN 15251 (vgl. [170]) formuliert und durch den Planer der Heizungsanlage zu beachten. Im Passivhaus spielt durch den umfassend guten Wärmeschutz die Art und Weise der Wärmeeinbringung in den Raum keine Rolle mehr in Bezug auf die Behaglichkeit gem. ISO 7730. Auch bei der Sanierung, die nahezu den PH-Standard erreicht, ist dies der Fall. Je weiter sich jedoch ein konkretes Projekt von den Grundvoraussetzungen des PH entfernt, desto eher müssen „konventionelle“ Betrachtungen zur Wärmeabgabe herangezogen werden.

Ein Luftheizsystem darf nur dann in Betracht gezogen werden, wenn die Heizlast mit der wegen hygienischer Anforderungen erforderlichen Luftmenge zu decken ist. Andernfalls sollte auf ein Heizkörper- oder Flächenheizsystem zurückgegriffen werden. Aus Behaglichkeitsgründen sollte eine Zulufttemperatur von etwa 16 °C nicht unterschritten werden.

### 6.1.4 Hilfsmittel

Standard-Software für Heizung/Lüftung/Sanitär kann verwendet werden bei Gebäudesanierungen im EnEV-Standard.

Wesentliches Hilfsmittel zur energetischen Berechnung von zu sanierenden Gebäuden mit Zielrichtung Passivhausstandard ist das Planungs- und Berechnungstool PHPP (vgl. [17]). Obwohl es für Neubauten entwickelt wurde, werden die Energiebedarfswerte auch für andere Gebäude sehr realitätsnah abgebildet. Damit ist das PHPP besser geeignet als andere Berechnungsverfahren nach EnEV, um die energetische Wirksamkeit der vorgesehenen Sanierungsmaßnahmen zu prüfen. Je näher das sanierte Gebäude am Passivhausstandard liegt, umso mehr hat das Ergebnis der PHPP-Heizlastberechnung Gültigkeit.

Neben den gebäudebezogenen Arbeitsblättern sind einzelne Blätter auch zur Detail-Untersuchung einzelner Fragestellungen geeignet.

So können die Wärmeverluste von mehr oder weniger gut gedämmten Wärmeleitungen berechnet werden, dies ist vor allem dann wichtig wenn ein bestehendes Leitungsnetz im Keller weiter genutzt werden soll. Ebenso können die Versorgungssysteme energetisch bewertet werden. Die Jahres-Arbeitszahl von PH-Kompaktgeräten kann ermittelt werden, z.B. bei dezentralem wohnungsweisen Einsatz im mit Passivhauskomponenten sanierten Mehrfamilienhaus, wenn die Heizlast so gering ist, dass eine Zuluftheizung möglich ist.

## 6.2 Wärmebereitstellung

Mit der Gebäudesanierung erfolgt in der Regel eine Erneuerung des Wärmeerzeugers, da die vorher installierte Leistung den nach der Sanierung vorliegenden Bedarf deutlich übersteigt. Die Erneuerung bietet die Möglichkeit, gegebenenfalls auf einen anderen Brennstoff umzustellen.

Gängige Brennstoffe für Wärmeerzeuger sind Erdgas, Flüssiggas, Öl, Pellets sowie Holz; in Nah- und Fernwärmenetzen werden alle Brennstoffe bis hin zu Abfällen (Müllheizwerk) energetisch genutzt. Der Energieträger Strom steht ohne weitere Einschränkungen zur Verfügung, auch die „Modulation“ des Leistungsbezugs stellt kein Problem dar. Die maximal erforderliche Leistung kann über den Hausanschluss sichergestellt werden, und ist über den Baukostenzuschuss an den Netzbetreiber zu bezahlen.

Die monovalente, rein-direktelektrische Beheizung und Warmwasserversorgung ist mit einem vergleichsweise hohen Primärenergiebedarf verbunden. Auch bei der Reduktion des Heizwärmebedarfs auf Passivhausniveau kann die Primärenergieanforderung für Passivhäuser (120 kWh/(m<sup>2</sup>a) für alle Anwendungen einschl. des Stromverbrauchs) ohne Solarunterstützung i.d.R. nicht erfüllt werden.

Bei der Versorgung mit Nah- oder Fernwärme besteht in der Regel ein Anschluss- und Benutzungszwang. Für Passivhäuser besteht häufig in der Versorgungssatzung eine Ausnahmeregelung, d.h. diese müssen nicht angeschlossen werden.

Bei Sanierungsprojekten, die dem PH-Standard nicht umfänglich genügen, wird daher in der Regel an das Versorgungsnetz anzuschließen sein. Zu beachten sind die durch den Netzbetreiber vorgegebenen maximalen und minimalen Vor- und Rücklauftemperaturen. Häufig steht im Sommer nur eine primärseitige Vorlauftemperatur von maximal 70 °C zur Verfügung, dies ist vor allem bei der Auslegung der Warmwasserbereitung von Bedeutung. Bei außentemperaturabhängiger Vorlauftemperatur des Wärmenetzes ist darauf zu achten, dass der Leistungsbedarf des Gebäudes für Heizung und Warmwasser auch bei moderaten Außentemperaturen gedeckt wird – die Leistungsbereitstellung aus dem Wärmenetz entspricht nicht automatisch bei allen Außentemperaturen dem Leistungsbedarf des Gebäudes!

Ist der Anschluss bereits vorhanden, kann dieser ohne Nachteile weiter genutzt werden, die maximal zu beziehende Leistung sollte auf das tatsächliche Maß begrenzt werden. In der Regel rechnet der Wärmeversorger einen leistungsabhängigen Grundpreis sowie den Verbrauch über einen Arbeitspreis mit monatlichen Abschlägen ab.

Der leitungsgebundene Energieträger Erdgas hat den Vorteil, dass keine weitere Zwischenlagerung erforderlich ist. Das Gas wird in Leistung und Menge so bezogen wie es benötigt wird, bei entsprechender Dimensionierung der Hausanschlussleitung und Baukostenzuschuss an den örtlichen Versorger. Wie bei der Wärmeversorgung erfolgt in der Regel eine Abrechnung nach Leistungs- und Arbeitspreis in monatlichen Abschlägen.

Die weiteren Energieträger Flüssiggas, Öl, Pellets oder auch Holz erfordern eine Lagerung des Brennstoffs. Bei Flüssiggas erfolgt dies durch erdgedeckte oder oberirdische Tanks; die bei niedriger Außentemperatur zur Verfügung stehende Gasmenge ist zu beachten. Für Öl und Pellets besteht ebenso die unterirdische Lagermöglichkeit, bei den geringen Verbräuchen auch im angenäherten PH-Standard wird in der Regel eine Lagerung im Keller in Betracht kommen. Aufgrund der Einlagerung des Brennstoffs entfällt ein Leistungspreis. Der Brennstoff ist mit Anlieferung, d.h. vor dem Verbrauchszyklus, zu bezahlen.

Empfehlenswert ist, den Wärmeerzeuger bzw. die Übergabestation innerhalb der thermischen Gebäudehülle zu installieren. Die unvermeidbaren Wärmeverluste gehen dann nicht verloren, sondern tragen zur Bedarfsdeckung bei. Diese Aufstellungsart setzt bei Feuerungsstätten jedoch die raumluftunabhängige Betriebsart voraus; d.h. die zur Verbrennung nötige Luft wird dem Brennraum direkt von außen, und nicht aus dem Raum, zugeführt.

**Der Wärmeerzeuger sollte innerhalb der thermischen Gebäudehülle installiert werden.**

### 6.2.1 Qualitätsanforderungen

Ziel muss es sein, eine möglichst nahe an dem Gebäude-Leistungsbedarf liegende Nennwärmeleistung des Wärmeerzeugers zu haben. Soweit dies nicht erreicht werden kann, sollte der Wärmeerzeuger eine geringe thermische Trägheit (Kesselkörper, Wasserinhalt) haben, um eine schnelle Aufheizung und geringe Abkühlungsverluste zu ermöglichen. Bei den leistungsmodulierenden Gas-Kombi-Thermen stehen nur hohe Leistungen im unteren Modulationsbereich zur Verfügung (Heizbetrieb z.B. 6-25 kW, Warmwasserbereitung 29 kW), daher ist hier für den Heizbetrieb ein Pufferspeicher erforderlich.

Soweit im Wärmeerzeuger Umwälzpumpen eingesetzt werden, sollten diese (ebenso wie externe Heizkreispumpen) der besten Effizienzklasse A genügen. Zahlreiche Brennwert-Gasthermen, und praktisch alle Elektro-Wärmepumpen werden jedoch nach wie vor nur mit Standard-Pumpen angeboten, wodurch deutlich höhere Stromkosten entstehen. Die bauseitige Auswechslung einer Standard-Pumpe gegen eine Effizienz-Pumpe ist in der Regel nicht zulässig, da mit dem Austausch die Bauteilzulassung für den Wärmeerzeuger erlischt.

Bei Wärmeerzeugern aller Art sind als Mindest-Anforderung die gesetzlichen Anforderungen (EnEV 2009, vgl. [140]) einzuhalten. Höhere Anforderungen z.B. für Wärmepumpen, die eher den Stand der Technik wiedergeben, sind z.B. in den Förderbedingungen des Marktanreizprogramms enthalten.

Einen Überblick über Versorgungsvarianten bei hochenergieeffizienten Gebäuden geben die Protokollbände zum Arbeitskreis Nr. 20 und 38 [236][237].

#### 6.2.1.1 Wärmeerzeuger

Bei Wärmeerzeugern mit Verbrennungsprozess ist eine Leistungsmodulation Stand der Technik, im günstigsten Fall reicht sie von ca. 20 – 100 % der maximalen Leistung. Bei den Brennstoffen Gas und Öl sind Brennwertkessel Stand der Technik. Wärmepumpen mit modulierender Leistungsbereitstellung stehen in dem kleinen Leistungsbereich gegenwärtig nur als Luft-Wasser-

Wärmepumpe mit Leistungsmodulation zwischen ca. 2,5 bis 5,5 kW bzw. 3,5 bis 10 kW zur Verfügung. Bei Wärmepumpen muss der Schallschutz besonders beachtet werden, vgl. [37].

Wenn ein Klein-Blockheizkraftwerk eingesetzt werden soll, kann auf Geräte mit einem Modulationsbereich zwischen ca. 35 bis 100 % zurückgegriffen werden.

#### 6.2.1.2 *Speicher*

Wenn die Leistung der Wärmeerzeuger über dem Leistungsbedarf nach der hochenergieeffizienten Sanierung liegt, kann dem durch Zwischenschaltung eines Leistungs-Puffers Rechnung getragen werden. Die Leistungspufferung erfolgt überwiegend durch Wasser- (Heiz- oder Trinkwasser-) Speicher, ist aber auch durch Latentwärmespeicher möglich.

In beiden Fällen ist es wichtig, die Wärmeverluste an den kälteren Aufstellraum zu minimieren. Zwischen Speichermedium und Aufstellraum beträgt die Temperaturdifferenz ganzjährig mindestens 30 K (Speicher 50 °C, Aufstellraum 20 °C), der U-Wert der Speicherdämmung (Stärke 10 cm) beträgt heute ca. 0,35 W/(m<sup>2</sup>K). U-Werte wie für PH-Außenwände sind anzustreben. Der Speicher sowie die Anschlüsse sollten daher mit einer zusätzlichen Dämmlage versehen werden – weitere 10 cm würden den Speicher-U-Wert auf ca. 0,16 W/(m<sup>2</sup>K) verbessern.

Die Speichergröße ist an dem tatsächlichen Bedarf auszurichten, unnötig große Speicher führen zu ebenso unnötigen Wärmeverlusten. Soll ein Puffer- und ein Trinkwasserspeichervolumen vorgesehen werden, kann mit einem Kombi-Speicher ein geringerer Verlust als bei Verwendung von zwei getrennten Speichern erreicht werden. Große Trinkwasserspeicher sollten aus hygienischen Gründen vermieden werden (Legionellen), Heizwasser-Pufferspeicher in Verbindung mit sogenannten Frischwasserstationen stellen hier die bessere Lösung dar.

**Tabelle 12** *Speicher-Wärmeverlust bzw. Wärmeleistung*

<p><b>Standspeicher 300 l</b></p> <p><b>Bereitschaftswärmeaufwand 2,1 kWh/24 h</b></p> <p><b>entspricht Wärmeleistung von 87 W</b></p> <p><b>---&gt; reicht für den WW-Bedarf von 1,3 Personen</b></p>
--

Vor allem die Rohrleitungsanschlüsse, nicht benutzte Stutzen sowie Temperaturfühler sind in der Regel nicht oder unzureichend gedämmt. Hier hilft nur die bauseitige Nachdämmung um die Verluste tatsächlich auf die herstellerseitigen Angaben zu begrenzen. Nach Möglichkeit sollten Speicher mit Fühlerklemmleisten ausgewählt werden, um die Verluste an Anschlüssen zu vermindern.

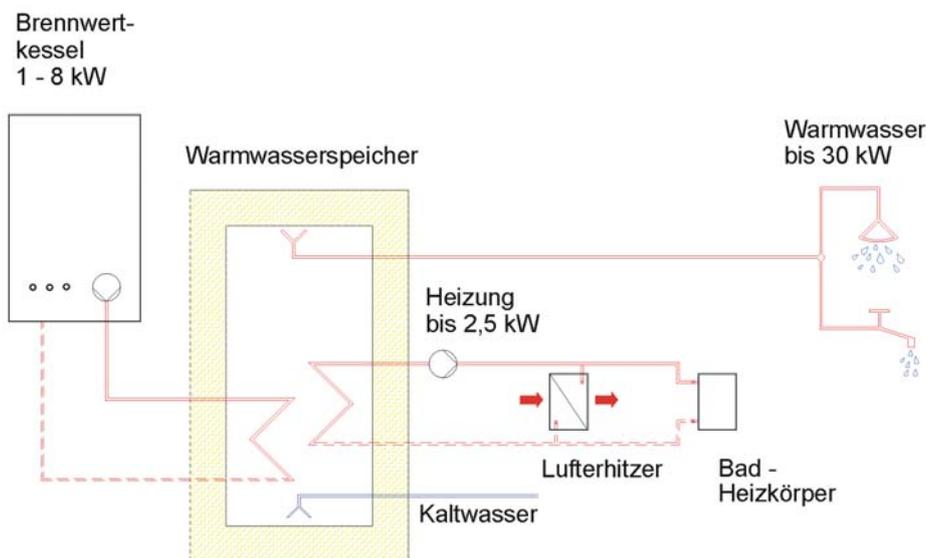
## 6.2.2 Brennstoffbetriebene Wärmeerzeuger

### 6.2.2.1 Brennwert-Wärmeerzeuger

Bei Nutzung von Gas oder Öl stellt ein Brennwertkessel eine Lösung entsprechend dem Stand der Technik dar.

Die kleinsten Gas-Brennwertgeräte in wandhängender Ausführung liegen zur Zeit bei einer Nennleistung von ca. 8 kW, modulierend betrieben beträgt die untere Leistung ca. 1 kW.

Öl-Brennwertkessel mit einer kleinsten Nennleistung von 8-14 kW stehen auch in raumluftunabhängiger Betriebsart, als wandhängende Geräte, zur Verfügung. Auch bodenstehende Kessel mit ähnlich geringer Leistung können eingesetzt werden. Die Verwendung von schwefelarmem Heizöl ist in der Regel ohne besondere Umstellung des Brenners möglich. Aufgrund der technologischen Unterschiede im Verbrennungsprozess sowie in der Zusammensetzung des Abgases erreichen gasbefeuerte Brennwertkessel einen ca. 10 % höheren Wirkungsgrad als ölbefeuerte. Diese Wärmeerzeuger sind auch für sehr geringen Wärmebedarf, selbst kleine Passivhäuser, geeignet, die Wärme sollte jedoch in einen Speicher und nicht direkt in das Heizsystem eingespeist werden, um ein Takten des Wärmeerzeugers und damit hohe Schadstoffemissionen zu vermeiden. Eine Außentemperaturregelung ist nicht erforderlich, lediglich eine Konstanttemperatur-Regelung für den Speicher und eine raumtemperatur- oder nutzerabhängige Steuerung für die Heizkreispumpe sind erforderlich.



**Abbildung 137 Schemabild Wärmeversorgung EFH-PH Bensheim**

Dieser Speicher sollte ebenfalls in der thermischen Hülle positioniert werden, er kann als Warmwasserspeicher oder als Pufferspeicher mit einem Durchlaufwärmetauscher zur Warmwasserbereitung ausgeführt werden. Wird ein Warmwasserspeicher zur heizseitigen Wärmeentnahme wie in vorstehendem Schemabild dargestellt genutzt, sind die Anforderungen des Arbeitsblatt W551 „Legionellen-Richtlinie“ (vgl. [172]) zu beachten. D.h. der

Speicher sollte unabhängig von seiner Größe einmal täglich komplett auf 60 °C aufgeheizt werden.

Eine für Anlagen dieser kleinen Leistung sinnvolle Entwicklung stellt die Integration des Wärmeerzeugers bzw. des Brenners in den Speicher dar. Die Bereitschaftsverluste des Kessels entfallen bzw. kommen direkt der Warmwasserbereitung zugute. Allerdings liegt die Leistung dieser Geräte in der Größenordnung von 5 bis 20 kW. Die Geräte können je nach Hersteller mit Erd- oder Flüssiggas, Öl oder sogar Pellets betrieben werden. Häufig findet sich die Kombinationsmöglichkeit mit solarer Wärmeeinspeisung.

Einige Kesselhersteller haben mittlerweile ihre Geräte für den Betrieb mit Bio-Heizöl freigegeben, diese Freigabe bezieht sich aber in der Regel nur auf eine bis zu 5 - prozentige Beimischung zum Heizöl. Für den ausschließlichen Betrieb mit Bioöl sind nur wenige Kessel, teilweise nach Umrüstmaßnahmen, geeignet. Die kleinste Leistung steht mit einem reinen Bioöl-Brennwertkessel mit ca. 15 kW zur Verfügung.

#### 6.2.2.2 *Blockheizkraftwerk*

Ein Blockheizkraftwerk ist eine Anlage, mit der nicht nur Wärme sondern auch Strom erzeugt wird. Hierzu wird das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt.

Die Möglichkeit des Einsatzes eines BHKW ist insbesondere bei größeren Projekten gegeben. Erforderlich sind zur Erreichung eines wirtschaftlichen Betriebs lange Laufzeiten (größer 4.000 Stunden im Jahr). Mit Verwendung von Pufferspeichern wird eine höhere Deckung des Verbrauchs durch das BHKW erreicht, der so genannte Spitzenkessel wird nur bei niedrigen Außentemperaturen benötigt. Die Auslegung der Gesamtanlage sollte über eine Jahresdauerlinie des Bedarfs für Heizung und Warmwasser erfolgen, mit deren Hilfe der Anteil des BHKW ermittelt werden kann. Bei einer Objektgröße ab ca. 15 Wohneinheiten im PH-Standard ist es sinnvoll, die wirtschaftliche Einsatzmöglichkeit eines BHKW zu prüfen.

Ein monovalenter Betrieb mit einem BHKW wäre zwar jederzeit technisch realisierbar, ist jedoch wirtschaftlich unsinnig. Die kleinsten zur Verfügung stehenden Geräte liegen bei einer thermischen Leistung von ca. 8 kW (elektrische Leistung ca. 4 kW). Bei einem PH-Einfamilienhaus mit einem Jahres-Wärmebedarf für Heizung und Warmwasserversorgung von z.B. 4.500 kWh würde das marktgängig kleinste BHKW nur auf etwa 600 Betriebsstunden kommen. Die Eigennutzung des dabei erzeugten Stroms spielt somit offensichtlich auch nur eine untergeordnete Rolle, der Aufwand für die separate Erfassung des eingespeisten Strom über einen eigenen Zähler ist nicht wirtschaftlich. Ein Gerät mit leistungsmodulierter Wärme- und Stromlieferung zwischen 4-12,5 kW<sub>th</sub> erreicht sicherlich etwas höhere Betriebsstunden, erfordert dazu aber auch einen höheren regelungstechnischen Aufwand. Je nach Hersteller können die Geräte mit Gas, Flüssiggas, Heiz- oder Bioöl betrieben werden.

### 6.2.2.3 Innovative Wärmeerzeugung

#### *Brennstoffzelle und Stirlingmotor*

Brennstoffzellen stehen mit stationären Anlagen, die mit einer elektrischen / thermischen Leistung von 200 / 220 kW serienmäßig angeboten werden, zur Verfügung. Klein-Systeme sind im Fahrzeugbereich in der Erprobung. Aber auch stationäre Kleinst-Brennstoffzellen können zukünftig Passivhäuser mit Wärme und zugleich Strom versorgen: Die Markteinführung von Klein-Anlagen mit 1 kW elektrischer und ca. 6 kW thermischer Leistung wird etwa 2012 erfolgen.

Eine ähnliche Situation ist für Mikro-Blockheizkraftwerke mit Stirlingmotor gegeben, diese befinden sich in der Markterprobungsphase, vor allem für die monovalente Versorgung von Einfamilienhäusern. Etwa für 2010 wird eine allgemeine Markteinführung von Mikro-Stirling-Blockheizkraftwerken erwartet.

### 6.2.2.4 Feuerstätten für Festbrennstoffe

Anders als die Nutzung von Öl, Gas oder Strom ist die Verbrennung von Pellets / Holz CO<sub>2</sub>-neutral, jedenfalls so lange, wie diese Biomasse aus laufenden Erträgen zur Verfügung steht. Der Einsatz von Biobrennstoffen insbesondere für hochenergieeffiziente Gebäude wurde ausführlich im Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser behandelt [234].

Hier ist zunächst die Ofenheizung zu nennen, d.h. die alleinige Abgabe von Wärme an den Aufstellraum (z.B. das Wohnzimmer) über Strahlung und Konvektion.

Es ist auf einen raumluftunabhängigen Betrieb zu achten, der Ofen sollte nach DIN 18894 (vgl. [175]) geprüft sein. Infolge des gleichzeitigen Betriebs mit der Lüftungsanlage ist eine Differenzdruck-Überwachung erforderlich. Ähnlich wie Rauchwarnmelder kann zur Überwachung des Kohlenmonoxid-Gehaltes in der Raumluft ein Kohlenmonoxid-Warnmelder eingesetzt werden. Insbesondere kleine Pelletsöfen mit einem Leistungsbereich von 2 bis 10 kW, mit automatischer Beschickung und Zündeinrichtung, geregelt über einen Raumthermostat, können im Einfamilienhaus eingesetzt werden.

In der Regel ist die vorhandene Leistung jedoch größer als der momentane Wärmebedarf, so dass die Räume (insbesondere der Aufstellraum) überheizt werden, oder die erzeugte Wärme für eine zeitversetzte Nutzung zwischengespeichert werden muss. Hier findet begrifflich der fließende Übergang zu einem Kessel statt: Ein Kessel gibt idealerweise die erzeugte Wärme komplett an das Heizmedium Wasser ab, er ist gedämmt um die Wärmeabgabe an den Aufstellraum (z.B. Keller) möglichst gering zu halten. Ein Pelletsofen mit teilweiser Abgabe der Wärme (bis zu 90 %) an einen Heizwasserkreis könnte ebenso gut als Pelletskessel mit einem optisch ansprechenden Äußeren bezeichnet werden.

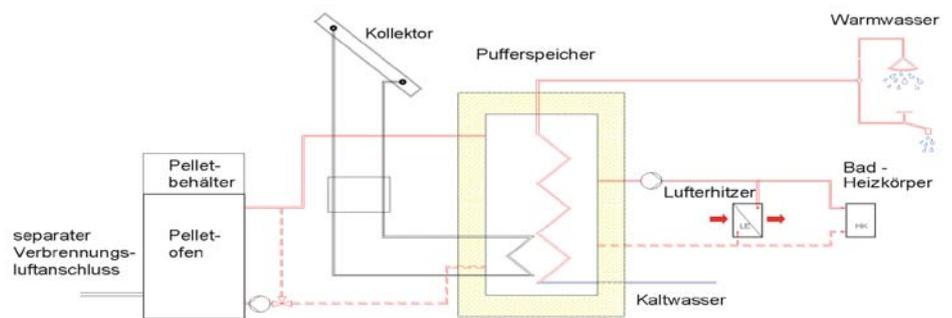
Bei kleinen Pelletsöfen erfolgt die Zwischenlagerung der Pellets direkt in einem Vorratsbehälter (z.B. 40 l) im Ofengehäuse. Der Verbrauch für mehrere Tage kann so gedeckt werden, bis der nächste Sack aus dem Pelletslagerraum eingefüllt werden muss. Bei Kesseln größerer Leistung erfolgt eine automatische Pelletszufuhr aus einem Lager. Die räumliche Nähe zwischen

**Bei gleichzeitigem Betrieb von Lüftungsanlage und Ofen ist eine Differenzdrucküberwachung erforderlich.**

Lager und Kessel ist zu empfehlen, da dann die Pelletsförderung mittels Förderschnecke möglich ist. Bei räumlich getrennter Anordnung ist ein Saugzuggebläse erforderlich, die relativ hohen Geräusche im Betrieb des Gebläses sind zu beachten.

Der Lagerraum für Pellets muss trocken sein, ein nicht abgedichteter Kellerraum mit feuchten Außenwänden ist für die Lagerung nicht geeignet. Bei Sanierungsprojekten im Mehrfamilienhausbereich ist es häufig schwierig, geeignete Kellerräume zu finden, da die Kellerräume den einzelnen Miet- oder Eigentumswohnungen zugeordnet sind. Technisch kann dies durch die Anordnung eines unterirdischen Pellets-Außenlagers (ähnlich einer Zisterne) gelöst werden.

Die Kombination eines Festbrennstoffkessels mit einer thermischen Solaranlage ist zu empfehlen. Dies ermöglicht, im Sommerhalbjahr die Warmwasserbereitung überwiegend mit Solarwärme zu realisieren.



**Abbildung 138** Strukturschema Pelletsöfen

Die Entaschung des Brennraums erfolgt überwiegend automatisch, der Aschebehälter ist regelmäßig zu leeren. Der Ascheanfall hängt stark von der Güte der Pellets ab, um Probleme wie Inkrustierungen und Verbackungen zu vermeiden sollten nur qualitätsgeprüfte Pellets (DIN plus Pellets) verwendet werden.

**Tabelle 13**

<b>Pellets</b>	spez. Gewicht	650 kg/m <sup>3</sup>
	spez. Wärme	4,9 kWh/kg

**Tabelle 14**

	<b>Bsp: Einfamilien-Passivhaus 180 m<sup>2</sup> EBZ*, 4 Personen</b>	<b>spezifisch pro 100 kWh</b>
<b>Wärmebedarf Heizung + WW</b>	5.460 kWh/a	
<b>Pelletsbedarf</b>	ca. 1.400 kg/a ca. 2,0 m <sup>3</sup> /a	ca. 25 kg ca. 37 l
<b>Ascheanfall</b>	ca. 10 l/a	0,2 l

\*EBZ = Energiebezugsfläche (Nettogeschossfläche)

Als erste Abschätzung können die Werte der rechten Spalte zur Ermittlung objektangepasster Bedarfswerte zugrunde gelegt werden.

#### 6.2.2.5 Abgasableitung

Eine Feuerungsstätte erfordert die Ableitung der Abgase über ein zugelassenes System. Bei der Altbauanierung sind häufig Mauerwerksschornsteine vorhanden, die für den Einbau eines Abgasrohres genutzt werden können. Auch die Verbrennungsluftzufuhr kann über den verbleibenden Querschnitt oder den Ringspalt eines eingebrachten Doppelrohres realisiert werden.

Verbleibt der Schornstein im Bestand, ist die luftdichtende Hülle der Dachebene sorgfältig anzuschließen, der in der Regel schadhafte Putz des Mauerwerksschornsteins ist auszubessern bzw. zu erneuern.

Vor Einbau der Abgasleitung sollte der Schornstein durch den Schornsteinfeger oder einen Fachbetrieb auf „Durchgang“ geprüft werden. Verzüge, Einschnitte, in den Querschnitt hereinragende Vermauerungen von nicht mehr benötigten Anschlüssen können das Einbringen des Abgasrohres erschweren bis unmöglich machen.

Bei Schornsteinen, die zur Abgasableitung von Feuerungen für feste Brennstoffe genutzt wurden, ist in der Regel eine gründliche Reinigung oder sogar das sog. „Ausschlagen“ zum Entfernen des abgelagerten Rußes notwendig. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob nicht das komplette Abtragen und Einziehen eines neuen Leichtbauschornsteines der kostengünstigere Weg ist.

Die Außenableitung erfordert lediglich eine Durchdringung der Außenwand, die sichere Befestigung und ggf. noch eine Durchdringung des Dachüberstandes. Das Abgas ist über Dach abzuleiten, dies kann bei kleinen Wärmeerzeugern in mehrgeschossigen Gebäuden im angenäherten PH-Standard dazu führen, dass die maximal zulässige Länge der Abgasleitung überschritten wird. Hier ist eine frühzeitige Abstimmung mit dem zuständigen Bezirksschornsteinfegermeister erforderlich.

### 6.2.3 Wärmerezeuger mit Stromanwendung

Eine direkt-elektrische Versorgung ist aus Gründen des damit verbundenen hohen Primärenergiebedarfs auch für Passivhäuser keine ökologisch günstige Lösung.

#### Leistungszahl

Somit sind hier Systeme angesprochen, die mittels einer Wärmepumpe (WP) die benötigte Wärme bereitstellen. Auf der Primärseite entnimmt die WP Wärme aus der Umgebung, bringt sie durch Verdichtung auf ein höheres Temperaturniveau und stellt sie auf der Sekundärseite der Nutzung zur Verfügung. Das Verhältnis abgegebene Wärme zu eingesetztem Strom wird als Leistungszahl ( $\epsilon$ ) bezeichnet. Für Standard-Randbedingungen auf der Primär- und Sekundärseite finden sich in den Herstellerunterlagen Angaben zur Leistungszahl.

Beispiel Leistungszahl 4: Es werden 4 Wärmeanteile dem Gebäude zur Verfügung gestellt, davon stammen 3 Wärmeanteile aus der Umwelt, es wird ein Anteil Strom eingesetzt.

#### Arbeitszahl

Die Leistungszahl berücksichtigt jedoch noch nicht die zum unmittelbaren WP-Prozess erforderliche Hilfsenergie für primär- und sekundärseitige Pumpen oder Ventilatoren. Sie ist somit eine eher theoretische Größe, für den Betreiber ist hingegen die Arbeitszahl (COP) bzw. die Jahresarbeitszahl (JAZ) von Bedeutung: Diese berücksichtigt die Veränderungen und den zeitlichen Verlauf der primär- und sekundärseitigen Temperaturen sowie die eingesetzte Hilfsenergie.

Die Effizienz einer Wärmepumpe ist umso besser, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Primär- und Sekundärseite ist (Eintrittstemperatur der Wärmequelle in die WP / Austrittstemperatur der WP zum Wärmeabnahmesystem). Auf der Primärseite stehen als Wärmequelle Luft (Außen-, Abluft), Erdwärme und Grundwasserwärme zur Verfügung. Auf der Sekundärseite erfolgt die Wärmeabgabe üblicherweise an ein wassergeführtes System.

Große Wärmepumpen (ab ca. 50 kW thermische Leistung) arbeiten auch mit verbrennungsmotorischen Antrieben, ebenso stehen Gas-Absorptions-Wärmepumpen zur Verfügung.

Einen Überblick über Lösungen für besonders energieeffiziente Gebäude gibt [235].

#### 6.2.3.1 Luft-Wärmepumpe

Die Nutzung der **Außenluft** als primärseitige Wärmequelle ist die kostengünstigste WP-Lösung. Gerade bei hohem Heizwärmebedarf ist jedoch die Außentemperatur niedrig, sodass die Arbeitszahl absinkt. Zudem muss der Verdampfer auf der Quellenseite immer wieder enteist werden, wodurch die Jahresarbeitszahl weiter absinkt. Ein monovalenter Betrieb ist grundsätzlich möglich, jedoch muss die tatsächliche Leistungsbereitstellung der WP unter Berücksichtigung der niedrigen Arbeitszahl bei  $-8\text{ °C}$  Außentemperatur (abhängig auch vom Klima am Gebäudestandort) sowie der Enteisungszyklen ermittelt werden.

Dies führt dazu, dass eine monovalente Außenluft-Wärmepumpe bei den üblicherweise angegebenen Standard-Randbedingungen mehr als doppelt so viel leistet wie im Auslegungsfall nötig. Der scheinbare Investitionskostenvorteil wird damit schnell aufgebraucht. Einige Hersteller versuchen dies durch Umschaltung auf integrierte direktelektrische Heizstäbe bei niedrigen Außentemperaturen zu vermeiden – mit der Folge einer noch schlechteren Jahresarbeitszahl und hohen Stromkosten. Begrifflich wird dies als „monoenergetische Betriebsweise“, d.h. ausschließlich elektrisch, bezeichnet. Außenluft-Wärmepumpen werden deshalb üblicherweise nicht monovalent, sondern als bivalente Systeme mit einem Spitzenlast-Wärmeerzeuger kombiniert.

Um die Nachteile einer ungünstigen Arbeitszahl bei niedriger Außentemperatur auszugleichen, sind **Geräte mit integriertem Gas-Brennwertkessel** auf dem Markt. Bis ca. 0 °C Außentemperatur übernimmt die Wärmepumpe mit ca. 7 kW die Leistungsdeckung, bei tieferen Temperaturen der Brennwertkessel mit einer modulierenden Leistung von ca. 4 bis 25 kW. Damit ist ein solches Gerät für größere Einfamilien-Passivhäuser oder auch Mehrfamilienhäuser geeignet. Allerdings ist die Leistungsfähigkeit der Warmwasserbereitung sorgfältig zu prüfen, da bei diesem Gerät ein Durchlaufwärmetauscher im Pufferspeicher die Versorgung übernimmt, und dadurch die erforderliche Durchlaufleistung in einem Mehrfamilienhaus evt. nicht erreicht wird.

Eine **Abluft-Wärmepumpe** nutzt die Wärme der sowieso abzuführenden Luft aus Ablufträumen, und speist die erzeugte Wärme in einen Speicher z.B. zur Warmwasserbereitung. Hier stehen kleine Geräte nach Herstellerangaben für den Einfamilienhausbereich zur Verfügung, dies ist für den Warmwasserteil auch in der Regel gut gelöst mit zusätzlicher Anschlussmöglichkeit einer Nacherwärmung durch einen Kessel oder eine Solaranlage. Allerdings erfordert die Luftseite der WP häufig hohe Abluftvolumenströme von 200 bis 300 m<sup>3</sup>/h, die deutlich über denen eines typischen Einfamilienhauses liegen. Bei der Auswahl der Geräte ist daher darauf zu achten, dass die Abluftmenge tatsächlich nach dem lufthygienisch erforderlichen Maß dimensioniert wird, und auch nur so für die Abluftwärmepumpe zur Verfügung steht. Bei größeren Mehrfamilienhäusern können die Komponenten in der Regel gut ausgewählt und angepasst werden.

Zu beachten ist die maximal mit der Wärmepumpe erreichbare Warmwassertemperatur: im Ein- und Zweifamilienhaus ist die Erreichung der üblichen 50 oder 55 °C Warmwassertemperatur ausreichend. In Mehrfamilienhäusern muss jedoch eine Temperatur von 60 °C erreicht werden (Großanlage nach DIN-DVGW-Arbeitsblatt W551, [172]), sodass die Wärmepumpe alleine nicht ausreichend ist bzw. nur mit ungünstiger Arbeitszahl betrieben werden kann.

Besonders einfache Lösungen sind möglich, wenn der Passivhausstandard erreicht wird: Dann können in einem kleinen **Kompaktgerät** Wärmerückgewinnung mit einer Fortluft-Wärmepumpe für die Restheizung und Warmwasserbereitung zusammengefasst werden [224], [236].

### 6.2.3.2 Sole- bzw. Wasser-Wärmepumpe

Anders als bei der Außenluft-Wärmepumpe steht hier mit der Erd- bzw. Grundwasserwärme eine über das Jahr bzw. in der Heizperiode überwiegend gleich hohe Wärmequellentemperatur zur Verfügung. Der Betrieb der WP auf der Primärseite unterhalb 0 °C wird durch Einsatz eines frostsicheren Sole-Kreises gelöst, bei üblich dimensionierten Erd-Kollektoren bzw. -sonden kann gegen Ende der Heizperiode die Einfriergrenze unterschritten werden. Grundwasser-Wärmepumpen greifen ganzjährig auf eine frostsichere Wärmequelle zu.

Speziell bei Sanierungsvorhaben ist zu prüfen, ob die Zugänglichkeit für die erforderlichen Bohrgeräte /-fahrzeuge gegeben ist. Ausreichende Abstände zum eigenen Gebäude, zu im Erdreich verlegten Leitungen sowie zum Nachbargrundstück sind einzuhalten. Flächenkollektoren sind oft nicht möglich, da die Gartenfläche nicht neu angelegt werden soll bzw. die Fläche an sich zu gering ist.

#### 6.2.3.2.1 Sole-Wärmepumpe

Die Nutzung von Erdwärme bis 400 m Tiefe wird als oberflächennahe Geothermie bezeichnet (vgl. [176]). Ab einer Tiefe von ca. 15 bis 30 m liegt die Erdreichtemperatur bei ca. 10 °C, darunter nimmt die Temperatur mit ca. 3 K pro 100 m zu. In einer Tiefe von ca. 1,5 bis zu ca. 15 m schwingt die Erdreichtemperatur je nach Jahreszeit zwischen 5 und 15 °C, und ermöglicht damit den Wärmeentzug.

Tatsächlich oberflächennah werden Flächen-Absorber oder Spiralkollektoren eingesetzt, eine Mindest-Überdeckung von 1,5 m sollte nicht unterschritten werden. Sonden werden als Tiefenbohrung realisiert, die Grundlagen des Erlaubnisverfahrens unterliegen dem Wasser- bzw. Bergrecht (vgl. [177]).

Hinweis: Durch entsprechende Auslegung der Erdsonden kann erreicht werden, dass der Solekreislauf sicher oberhalb 0 °C bleibt. Auf die Beimischung eines Frostschutzmittels kann dann verzichtet werden, wodurch die Effizienz der Anlage nochmals verbessert wird. Wasser als alleiniger Wärmeträger (ohne Beimischung von Frostschutzmittel) hat eine höhere Wärmekapazität und einen geringeren Fließwiderstand – die erforderliche primärseitige Pumpenergie wird gegenüber einem Solekreislauf verringert.

#### 6.2.3.2.2 Grundwasser-Wärmepumpe

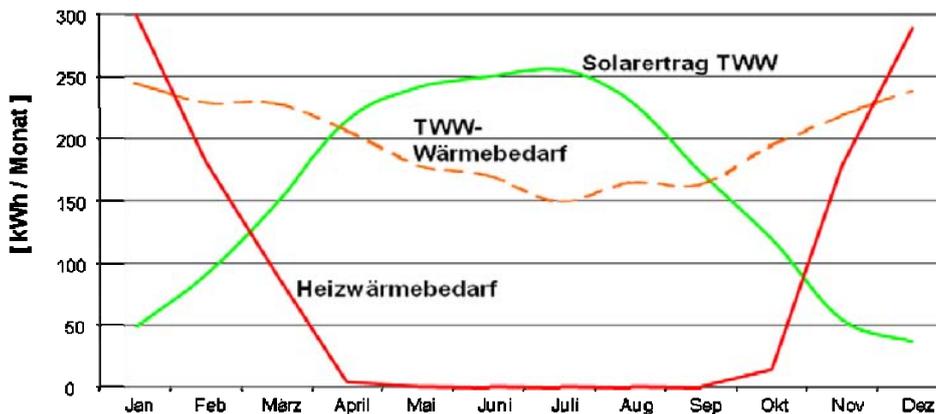
Auch mögliche Grundwasser-Wärmepumpen können aufgrund der wasserrechtlichen Bestimmung nur relativ selten eingesetzt werden. Über einen Förderbrunnen wird Grundwasser der WP zugeführt, die Wärme entnommen, und das Wasser über einen Schluckbrunnen dem Grundwasser wieder zugeführt. Da es sich um ein offenes System handelt, spielt die Beschaffenheit des Grundwassers für die Dauerhaftigkeit der technischen Anlage eine große Rolle.

Mit Grundwasser-Wärmepumpen können aufgrund der guten Wärmenachlieferung im Grundwasserhorizont sehr hohe Jahresarbeitszahlen erreicht werden. Die investiven Kosten sind von den hier beschriebenen für Grundwasser-Wärmepumpe am höchsten anzusetzen.

### 6.2.4 Solarthermie

Der benötigte Endenergiebedarf für Restheizung und Warmwasserbereitung kann durch Einsatz einer thermischen Solaranlage vermindert werden. Die aktive Solarenergienutzung zur Restwärmebedarfsdeckung im Passivhaus ist aufgrund des geringeren Strahlungsangebotes im Winterhalbjahr und des tagsüber an Sonnentagen praktisch nicht gegebenen Heizwärmebedarfs nur mittels Speichersystemen lösbar. Die durchführbaren Systeme reichen von Pufferspeichern mit einigen hundert Litern für den Bedarf mehrerer Tage bis hin zu solaren Nahwärmesystemen mit saisonalen Großspeichern mit mehreren tausend Kubikmeter Inhalt. Allen diesen Speichersystemen sind hohe Nutzwärmekosten zuzuordnen, die geringsten Kosten werden bei den saisonalen Systemen erreicht.

Bei der heutigen Technologie ist auch für das Gebäude im Passivhausstandard keine monovalente Solarwärmeversorgung für Heizung und Warmwasser bei vertretbaren Kosten realisierbar. Somit ist die solare Nutzung immer als zusätzliches, bivalentes System zu sehen.



**Abbildung 139** Jahresgang Warmwasser-/ Heizwärmebedarf, Solarangebot

In obiger Abbildung ist für ein Einfamilienhaus, 4 Personen, der Jahresgang des Warmwasser-Wärmebedarfs, des Wärmeangebotes bei 5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche und der Heizwärmebedarf des Passivhauses aufgetragen. Deutlich erkennbar ist, dass während der Heizzeit des Passivhauses von Oktober bis März die Solaranlage wie erwartet keine ausreichende Warmwasserversorgung mehr sicherstellen kann. Gerade in den Heizmonaten ist das Solarangebot sehr gering, sodass auch eine erhebliche Flächenvergrößerung kaum solare Heizwärmeanteile erwarten lässt, im Sommerhalbjahr jedoch das Überangebot erheblich vergrößert. Sinnvoll ist in jedem Fall eine stärker am winterlichen Solarangebot ausgerichtete Neigung von 60° und mehr.

Die solare Warmwasserbereitung kann hingegen bei heute üblicher Auslegung im Jahr etwa 60 % des Bedarfs decken. Die Auslegung erfolgt standortspezifisch mittels EDV-Bilanzierung, als Faustwert kann eine Auslegung mit ca. 1-1,5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro Person und 50-70 l Speichervolumen pro Quadratmeter Kollektorfläche angenommen werden.

So wie bei Heizanlagen werden auch in Solarsystemen häufig übermäßig leistungsstarke Umwälzpumpen eingesetzt. Moderne Systeme sind in der Lage, den Volumenstrom durch den Kollektor dem Einstrahlungsangebot durch elektronische Ansteuerung der Solarkreispumpe anzupassen. Damit kann der elektrische Strombedarf der Anlage reduziert und der solare Ertrag verbessert werden.

Die nachträgliche Installation ist in der Regel kein Problem, da bei der Sanierung das Dach meistens neu gedeckt wird und somit auch dachflächenintegrierte Kollektoren möglich sind. Über vorhandene, nicht mehr benötigte Schornsteine können die Leitungen nach unten zur zentralen Wärmezeugung verlegt werden. Verlaufen die Solarleitungen innerhalb der thermischen Hülle, sollte auch hier eine verstärkte temperaturfeste Dämmung berücksichtigt werden, da sonst über die Leitungen im Sommerhalbjahr ein unerwünschter Wärmeeintrag in das Gebäude erfolgt.

Ertragsmindernde Randbedingungen wie Verschattung durch Nachbargebäude oder Bäume sind zu beachten.

## **6.3 Wärmeverteilung**

Für den energiesparenden Betrieb der Heizungsanlage ist es erforderlich, das Rohrnetz exakt zu berechnen, um Überdimensionierungen d.h. unnötige Investitionskosten oder Unterdimensionierungen d.h. unnötige Betriebskosten zu vermeiden.

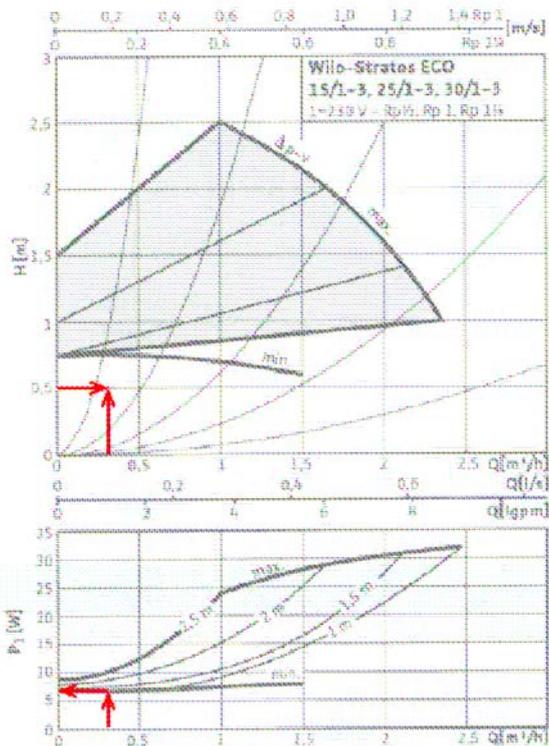
### **6.3.1 Pumpen**

#### *6.3.1.1 Heizkreis*

Eine elektronisch geregelte Heizkreispumpe bester Effizienzklasse gehört zum Standard, und ist selbst bei kleinster Größe häufig im Passivhaus noch überdimensioniert.

So wie seit einiger Zeit bei den hocheffizienten Lüftungsgeräten die Ventilatoren mit elektronisch kommutierten Motoren ausgestattet werden, hat diese Technologie nunmehr auch bei den Förderpumpen Anwendung gefunden.

Auch die kleinsten Effizienzklasse A-Pumpen bieten für kleine hochenergieeffiziente Gebäude, insbesondere das Passiv-Einfamilienhaus noch zu hohe Förderleistungen von bis zu 25.000 Pascal bei einem Kubikmeter Fördervolumen pro Stunde, der Strombedarf liegt bei ca. 30 W. Der tatsächlich benötigte Wert liegt bei ca. 5.000 Pascal (entspricht 0,5 m Förderhöhe) und einem Volumenstrom von ca. 350 l/h; der Strombedarf der Pumpe liegt dann bei ca. 6 W. Eine herkömmliche Standardpumpe benötigt etwa die 5-6-fache Stromaufnahme.



**Abbildung 140** Pumpendiagramm mit Eintrag Soll-Betriebspunkt P-EFH (Quelle: Fa. Wilo)

### 6.3.1.2 Warmwasser-Zirkulation

Ähnlich wie bei Heizungspumpen stehen **Zirkulationspumpen** der Energieeffizienzklasse A zur Verfügung, die Leistungsaufnahme ist kleiner als 8 W. Bei einem gut gedämmten Warmwasser- und Zirkulationssystem ist es auch mit diesen kleinen Leistungen möglich, die Temperaturanforderungen der „Legionellen-Richtlinie“ einzuhalten.

Hinweis Zirkulationssystem „**Rohr in Rohr**“: Bei diesem System wird die Zirkulationsleitung direkt im Warmwasserrohr geführt. Das wärmeführende Leitungssystem kann somit um einen Strang reduziert werden, wodurch die Verluste deutlich reduziert werden können, und gerade bei der Sanierung eine platzsparende Installation ermöglicht wird. Die Verminderung des Leitungsquerschnitts aufgrund des innenliegenden Zirkulationsrohres ist bei der Sanitär-Rohrnetzberechnung zu berücksichtigen.

### 6.3.2 Hydraulischer Abgleich

„Der hydraulische Abgleich ist so vorzunehmen, dass ... alle Wärmeverbraucher entsprechend ihrem Wärmebedarf mit Heizwasser versorgt werden“, so die DIN 18380 unter 3.5 (vgl. [171]). Werden einzelne Heizflächen im Haus nicht ausreichend mit Wärme versorgt, so ist meistens ein fehlender oder fehlerhafter hydraulischer Abgleich die Ursache. Kleine Heizflächen kurz hinter der Pumpe, beispielsweise für ein WC, sind beliebte „Kurzschlussstrecken“. Hier fließt das Heizungswasser ohne sich großartig abzukühlen durch den Heizkörper zurück

zum Kessel. Dann meldet die Regelung, dass es im Haus warm genug sei – der Rücklauf kommt ja warm zurück – und schaltet den Kessel ab.

Es ist nicht die Aufgabe der Heizkörperthermostatventile, diesen Abgleich vorzunehmen. Diese sind nur dazu da, bei eingestellter Raumsolltemperatur auf die Veränderungen des Bedarfs zu reagieren (Sonneneinstrahlung, Personen- und Geräteabwärme). Damit sie dies überhaupt tun können, sind alle Thermostatventil-Unterteile voreinstellbar auszuführen – für den hydraulischen Abgleich.

#### 6.3.2.1 *Vorher rechnen - hinterher einstellen*

Die Einstellung erfordert eine vorausgehende EDV-Berechnung für das Rohrnetz und vor Ort einen gewissen Arbeitsaufwand durch die ausführende Firma. Doch ohne die Voreinstellung ist ein wirtschaftlicher Betrieb nicht möglich. Als Folge der fehlenden Einregulierung werden bestimmte Räume nicht warm oder nur dann, wenn andere erheblich überheizt werden.

Im Rahmen der Abnahmeprüfung hat der Errichter der Anlage gemäß Abschnitt 3.5.1 der DIN 18380 (vgl. [171]) nachzuweisen, dass der hydraulische Abgleich vorgenommen wurde. Der Abgleich ist dabei eine Nebenleistung nach VOB/C, die ohne weitere Kosten zu erbringen ist. Für die Regelung ist eine erste Einstellung vorzunehmen (Schaltzeiten, Drehzahlstufen, Heizkurve etc.). Die endgültige Einstellung ist zum Ende der ersten Heizperiode nach Fertigstellung des Gebäudes durchzuführen. Über beide Einstellungen sind Protokolle anzufertigen.

#### **Schnelltest zum hydraulischen Abgleich**

Heizungskurzschlüsse kann man einfach feststellen: Ist der Heizkörper „gleichmäßig warm“, d.h. hat er oben und unten annähernd die gleiche Temperatur, besteht ein Kurzschluss. Es fließt so viel Wasser durch, dass es zwischen Eingang und Ausgang kaum abkühlt, d.h. diese Anlage wurde nicht einreguliert. Was bei einzelnen Heizkörpern zuviel durchfließt fehlt an anderer Stelle.

#### 6.3.2.2 *Heizkörpersystem*

Für ein Heizkörpersystem gelten die vorherigen grundsätzlichen Ausführungen. Die Regelabweichung der Ventile sollte mit 1 K Temperaturdifferenz in der Auslegung berücksichtigt werden.

Bei vollständiger oder teilweiser Beibehaltung eines vorhandenen Rohrsystems im Rahmen der Sanierung ist dieses möglichst exakt in Rohrverlauf und Nennweiten zu erfassen, die Heizkörper werden in der Berechnung mit der raumweisen Heizlast berücksichtigt. In der Regel ist das Rohrnetz für die geringe Heizlast dann überdimensioniert, sodass der wesentliche Druckabfall zur Erreichung einer guten Regelcharakteristik am Heizkörperventil eingestellt wird.

Anmerkung: Sofern bei entsprechend geringer Heizlast eine Lüftungsheizung möglich ist, ist auch bei dieser ein hydraulischer Abgleich durchzuführen,

sobald mehr als ein Verbraucher (z.B. Luftheizregister und Badheizkörper) angeschlossen ist. In der Regel ist der Strömungswiderstand des Luftheizregisters viel höher als der des Heizkörpers. Ohne hydraulischen Abgleich erhält das Heizregister nur dann den notwendigen Heizwasservolumenstrom, wenn der Badheizkörper hydraulisch durch das Thermostatventil weggeschaltet wird. Werden mehrere Luftheizregister versorgt, ist ebenso durch eine Berechnung und nachfolgenden hydraulischen Abgleich für jedes Heizregister der erforderliche Volumenstrom bei gleichzeitiger Nennlast sicherzustellen.

### 6.3.2.3 *Weg von der Drosselung zu mehr Effizienz*

Die bisherigen hydraulischen Systeme sind mit einer zentralen Pumpe ausgestattet, die Auslegung erfolgt für den ungünstigsten Strang, bevorzugt liegende Stränge bzw. Heizkörper werden mechanisch gedrosselt.

Neu entwickelte Miniatur-Pumpen für den direkten Anschluss am Heizelement können hier eine Alternative sein: eine kleine Pumpe fördert leistungsgeregelt genau die Wassermenge durch den Heizkörper, die zur Raumerwärmung erforderlich ist.

Seitens des Herstellers wird diese Technik in erster Linie für größere Systeme sowie zur Sanierung von älteren Wärmeverteilanlagen mit hydraulischen Problemen (kein hydraulischer Abgleich möglich, Strömungsrauschen an Thermostatventilen etc.) vorgestellt. Vorteile werden in der genaueren Regelbarkeit gegenüber Thermostatventilen gesehen, für Passivhäuser jedoch steht dies nicht so stark im Vordergrund.

Vor allem bei Gebäudesanierungen im PH-Standard mit vorhandenem Heizleitungsnetz und Weiternutzung der Bestands-Heizkörper kann dieses System einen effizienteren Betrieb als ein konventioneller Heiznetzbetrieb mit einer Effizienzklasse A-Pumpe ermöglichen. Zur Zeit fehlen jedoch noch aussagekräftige technische Daten zur Beurteilung.



**Abbildung 141** *Mini-Pumpe Geniax (Quelle: Fa. Wilo)*

### 6.3.3 Zwei-, Drei- und Vierleiter-System

Unter einem **Zweileitersystem** versteht man ein Rohrnetz bestehend aus Vor- und Rücklauf, in der Regel für Heizzwecke. Wird die Warmwasserbereitung z.B. in Mehrfamilienhäusern über thermische Durchlauferhitzer erbracht, sind hierfür höhere Vorlauftemperaturen als für die Heizung erforderlich. Dies kann technisch im **Dreileiter-System** durch zwei separate Vorlaufleitungen und eine gemeinsame Rücklaufleitung gelöst werden. Im **Vierleiter-System** sind dann zwei Vorlauf- und zwei Rücklaufleitungen vorhanden; teilweise werden auch Systeme mit Heizungs-Vor- und Rücklauf und zentraler Warmwasserverteilung (Warmwasser- und Zirkulationsleitung) als Vierleitersystem bezeichnet.

Bei dezentraler Warmwasserbereitung über thermische Durchlauferhitzer ist ein relativ groß dimensioniertes Leitungsnetz zur Sicherstellung der Warmwasserleistung (25-30 kW pro Wohnung) erforderlich, die Heizung wird dann sinnvollerweise aus dem gleichen Netz (Zweileiter-Heiznetz) betrieben.

Aus dem Nachbarland Österreich stammt ein Zweileitersystem, welches nur den (dann größer dimensionierten) Warmwasser- und Zirkulationsstrang nutzt, um damit auch Heizregister mit Wärme für die Lüftungsheizung zu speisen. Eine solche technische Verknüpfung ist in Deutschland aufgrund der Anforderungen an die Trinkwasserhygiene nicht zulässig, da gemäß DVGW-Arbeitsblatt W551 – „Legionellen-Richtlinie“ (vgl. [172]) eine Abkühlung des Zirkulations-Rücklaufs unter 55 °C nicht zulässig ist, und alle Leitungen ständig durchströmt sein müssen. Stichleitungen bis 3 l Wasserinhalt (z.B. Anschlussleitung zum Heizregister, einschl. Wasserinhalt Heizregister) sind zwar zulässig, stellen aber bei langen Stillstandszeiten außerhalb der kurzen Passivhaus-Heizperiode ein hohes wasserhygienisches Risiko dar.

### 6.3.4 Dämmung von Wärmeverteilungen

Die Dämmung von Wärmeverteilungen (Heiz- und Warmwasser-/Zirkulationsleitungen) ist in der EnEV 2007 und geringfügig verändert in der EnEV 2009 gefordert (vgl. [164],[140]), mit Anforderungen für die Nachrüstung im Bestand.

Die geforderten Dämmdicken sind in jedem Fall als Mindest-Anforderung anzusehen. Verschiedene Untersuchungen zeigen auf, dass höhere Dämmdicken z.B. in verdoppelter Stärke wirtschaftlich sind (vgl. [159]).

Bei Trinkwarmwasser- und Zirkulationsleitungen sollte man sogar noch dickere Dämmdicken vorsehen, da dort durch die längere, in der Regel ganzjährige Betriebszeit eine noch bessere Wirtschaftlichkeit erreicht wird.

Ein Beispiel aus der Praxis zeigt die hohe Bedeutung unterschiedlicher Dämmdicken für die Wärmeverluste von Rohrleitungen: Eine Rohrleitung zur Wärmeversorgung (Heiz- und Warmwasserwärme) von 4 Reihenhäusern führt durch unbeheizte Kellerräume ( $t = 15\text{ °C}$  im Jahresdurchschnitt). Die hydraulische Berechnung ergab für die Rohrleitung aus Kupfer Dimensionen von 22 x 1 bis 35 x 1,5 mm. Die Wärmeverluste der Rohrleitungen bei unterschiedlichen Dämmdicken stellen sich wie folgt dar:

**Tabelle 15**      **Wärmedämmung von Heizleitungen**

	Berechnete Rohrleitung mit Wärmedämmung nach HeizAnIV	Berechnete Rohrleitung mit doppelter Wärmedämmung
Material, Verlegelänge:	CU – Rohr 22 * 1,0 mm, 15 m CU – Rohr 28 * 1,0 mm, 30 m CU – Rohr 35 * 1,5 mm, 15 m	
Wärmedämmung:	100 % nach HeizAnIV, WLG 035 (Mineralwolle 20 bzw. 30 mm)	200 %, WLG 035 (Mineralwolle 50 bzw. 60 mm)
Temperaturen:	$t_{\text{Medium,Mittel}} = 60 \text{ °C}$ $t_{\text{Umgebung}} = 15 \text{ °C}$ $\Delta t = 45 \text{ K}$	
Ψ-Wert (Mittelwert):	0,166 W/(m*K)	0,125 W/(m*K)
Verlustleistung pro 1 m Rohrleitung:	7,5 W/m	5,6 W/m
Verlustleistung der gesamten Rohrleitung:	450 W	336 W
Jährlicher Verlust:	3.942 kWh/a	2.943 kWh/a
Minderaufwand:	1.000 kWh/a	

Dieses Beispiel zeigt, dass die Wärmeverluste eines Verteilsystems die gleiche Größenordnung wie der Heizwärmebedarf eines PH-Einfamilienhauses annehmen können.

Durch Verbesserung der Leitungsdämmung lassen sich die Verluste deutlich reduzieren, durch die Energiekosteneinsparung amortisieren sich die Mehrkosten für die stärkere Dämmung innerhalb weniger Jahre, in o.g. Beispiel bereits nach etwa 1/3 der nach VDI 2067 (vgl. [173]) vorgesehenen Nutzungsdauer (30 Jahre).

Voraussetzung ist, dass die stärkere Dämmung in einer Lage zur Verfügung steht, eine zweilagige Dämmung wird dagegen unverhältnismäßig teuer.

Eine noch bessere Wärmedämmung auf 3-fache Stärke des Rohraußendurchmessers (= 300 %, WLG 035) verringert zwar den Energieaufwand nochmals um etwa 450 kWh/a, ist jedoch aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Rohren mit zunehmender Dämmdicke die äußere wärmetauschende Oberfläche immer größer wird, und der Dämmeffekt daher stark abnimmt.

Außerdem birgt der entstehende große Außendurchmesser der Rohre vor allem bei Sanierungen ein baupraktisches Problem, denn der erforderliche Einbauraum muss in Schächten etc. zur Verfügung stehen.



**Abbildung 142** Fernwärmestation und verstärkte Leitungsdämmung der abgehenden Leitungen (Foto: inPlan Ingenieurbüro)

Nicht nur Leitungen, sondern auch Leitungsbauteile sind sorgfältig und durchgängig zu dämmen. Für Armaturen und Rohreinbauteile stehen Dämmschalen zur Verfügung, diese müssen lückenlos anschließen um Luftströmungen zu vermeiden. Auch die weiterführende Leitungsdämmung ist dicht anzuschließen.

**Tabelle 16** Wärmeverlust Cu-Rohr bei unterschiedlichen Dämmdicken, gelb unterlegt: Anforderung nach EnEV (vgl. [164])

Wärmeverlust Cu-Rohr 28 x 1,0 mm $\Delta t = 45 \text{ K}$ , WLG 035 unterlegt: Dämmung nach EnEV 2007	$\Psi$ – Wert	W / m
Ungedämmt	0,523	75
<b>Dämmung 30 mm</b>	<b>0,166</b>	<b>8,2</b>
Dämmung 50 mm	0,134	6,3
Dämmung 70 mm	0,117	5,4
Dämmung 100 mm	0,102	4,4



**Abbildung 143** fehlende Leitungsdämmung / unterbrochen / Stichleitung zu schwach gedämmt (Foto: inPlan Ingenieurbüro)

Abgesehen von der eigentlichen Leitungsdämmung selbst gibt es noch weitere wesentliche Empfehlungen:

- So sollte die Rohrbefestigung außerhalb der Dämmschale angebracht werden, um Wärmebrücken durch die Befestigungsschelle zu vermeiden.
- Leitungsdämmungen sind nach den gültigen Vorschriften immer einzeln und eigenständig auszuführen. Das Anarbeiten von im Aufbau vorhandenen Dämmstofflagen direkt an das Rohr ist als Ersatz für die Rohrdämmung nicht zulässig.
- Werden Rohrleitungsummantelungen montiert, sind die Stirnscheiben häufig nicht fachgerecht eingekürzt, sodass diese direkt am Rohr anliegen. Die gute Wärmeleitung der Alu-Stirnscheiben führt zu sehr hohen Wärmeverlusten, da die gesamte Endmanschette nahezu die Temperatur des Mediums im Rohr aufweist.
- Wärmeführende Leitungen sollten nach Möglichkeit bei der Kellerverlegung auf der „warmen Seite“ verlegt werden, d.h. in der der Raumseite naheliegenden Dämmzone. Damit ist z.B. die Überdämmung mit der unterseitigen Kellerdeckendämmung möglich. Kaltwasserleitungen hingegen sollten auch aus Gründen der Wasserhygiene auf der „kalten Seite“ der Dämmung verlegt werden.



**Abbildung 144** Stirnscheibe am Rohr, Rückschlagventil nicht gedämmt (Foto: inPlan Ingenieurbüro)

## 6.4 Wärmeabgabesysteme

Vielfach ist bei Sanierungsprojekten ein bestehendes Heizkörper- und Rohrleitungssystem vorhanden. Alleine aus Gründen der Investitionskosten-Minderung liegt dann die Überlegung nahe, dieses System weiter zu nutzen.

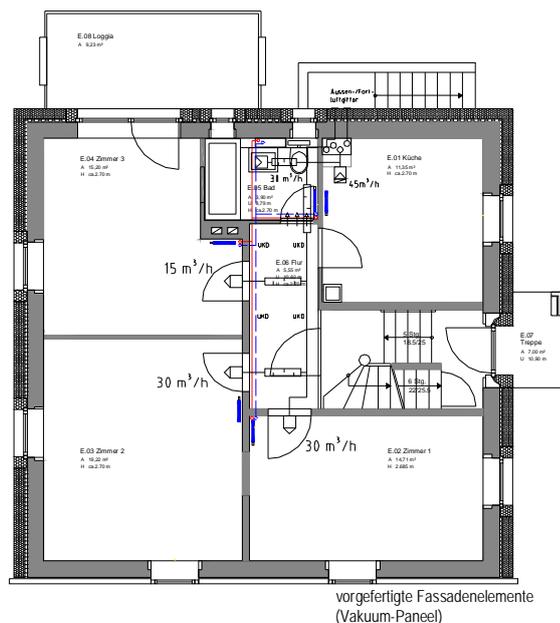
### 6.4.1 Heizkörpersystem

**Unter Passivhaus-Fenstern sind keine Heizkörper nötig. Diese können stattdessen auch an einer Innenwand montiert werden.**

Während bei normal, d.h. schlechter wärmedämmten Häusern die Anordnung der Heizkörper unter den Fensterflächen erforderlich war, ist dies auch bei Sanierungen im PH-Standard nicht mehr nötig: Die hochwertige Wärmedämmung der Wände und Fenster ermöglicht es, die Heizkörper ohne Einbußen in der Behaglichkeit an den innenliegenden Wände zu platzieren. Damit lässt sich das Heizungs-Rohrnetz kürzer und kostengünstiger ausführen.

Die klassische Art der Beheizung über Heizkörper hat auch im Passivhaus durchaus ihre sinnvollen Einsatzmöglichkeiten. In großen Wohnungen bzw. Gebäuden, welche nur von einer vergleichsweise geringen Personenzahl bewohnt werden, ist die nach dem Personen-Kriterium definierte Luftmenge zur Beheizung nicht ausreichend. Heizkörper, zumindest in einigen Räumen, schaffen hier einen Ausgleich. Zudem bietet die Heizkörperbeheizung die Möglichkeit, die Raumlufttemperaturen variabel zu gestalten, einzelne selten benutzte Räume unbeheizt zu belassen. Zudem entspricht diese Art der Wärmeabgabe dem gewohnten Standard und hat eine hohe Akzeptanz bei den Bewohnern.

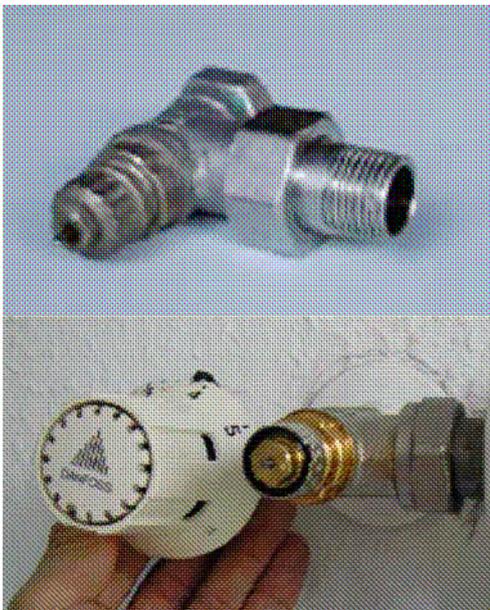
Die Kosten dieser Wärmeeinbringung hängen natürlich stark von der Anordnung der Heizkörper (→ Leitungslänge) und von dem ausgewählten Heizkörpertyp (→ Kompakt / Fertigheizkörper- oder Röhrenheizkörper) ab.



**Abbildung 145 Wohnungsgrundriss mit HK-Eintragung, Einbau neues Heizsystem**

Falls schon ein Heizkörpersystem vorhanden ist, kann dieses weiter genutzt werden um die Investitionskosten gering zu halten. Beachtet werden muss, dass aufgrund der geringeren Heizlast die Heizkörperanzahl reduziert wird. Anstatt wie vor der Sanierung mit zwei Heizkörper reicht für den Raum in der Regel ein Heizkörper, breite Gliederheizkörper können häufig in ihrer Baulänge verkürzt werden.

Der Erhaltungszustand sowie die zu erwartende Restnutzungsdauer ist natürlich zu beurteilen. Bei einer umfassenden, hochwertigen Sanierung werden gelbstichige, 15 Jahre alte Kompaktheizkörper sicher nicht akzeptiert werden – obwohl diese noch einmal 10 Jahre genutzt werden könnten. Die Größenanpassung sowie das Neulackieren von Heizflächen hingegen sind in der Regel teurer als deren Ersatz durch leistungsangepasste Kompaktheizkörper. In der Regel ist der Austausch des Vorlaufventils mit Thermostatkopf sowie der Rücklaufverschraubung erforderlich, um die Einstellung auf den berechneten zulässigen und notwendigen Volumenstrom zu ermöglichen.



**Abbildung 146** HK-Ventil alt – ohne Voreinstellung  
neu – mit Einstellring zur Voreinstellung (Fotos: Inplan Ingenieurbüro)

Die Heizkörper werden in der Regel als Niedertemperatursystem mit einer Vorlauf-/Rücklauftemperatur von 55/45 °C ausgelegt. Eine schnelle Reaktion der Heizflächen ist von Vorteil, daher sollten die Masse und der Wasserinhalt des Heizkörpers in Bezug zu seiner Leistung möglichst gering sein.

#### 6.4.2 Flächenheizsysteme

Flächenheizsysteme werden häufig aufgrund ihres hohen Strahlungsanteils bevorzugt. In konventionellen Gebäuden hat dies seine Berechtigung, nicht mehr jedoch im PH, im Gegenteil: Ein **Fußbodenheizsystem** ist aufgrund der großen Masse sehr träge, und führt daher dazu, dass in der Übergangszeit Räume (durch die solare Einstrahlung über die Fenster) überheizt werden. Diese Überschusswärme wird dann hinausgelüftet, da z.B. der Fußboden als

Wärmespeicher praktisch nicht zur Verfügung steht; letztlich wird der Energieverbrauch dadurch erhöht.

**Wandflächenheizsysteme**, aufbauend auf einem feinen Netz von dünnen Kunststoffrohren mit Putzbelag weisen hingegen eine recht geringe Trägheit auf, und sind damit auch für ein Passivhaus besser geeignet. Eine geringe thermische Trägheit mit möglichst geringen Putzstärken ist anzustreben. Bei der Sanierung ist das Entfernen des vorhandenen Putzes sowie der systemgebundene Neuperputz erforderlich. Die Beschädigungsgefahr (Bildernagel etc.) muss durch entsprechende Bewohner- und Mieterinformation minimiert werden.

Flächenheizsysteme können vor allem in Verbindung mit Wärmepumpen eingesetzt werden, mit einer niedrigen Vorlauftemperatur können dann höhere Arbeitszahlen erreicht werden.

Die Kosten von Flächenheizsystemen liegen im Normalfall über den Kosten eines Heizkörpersystems, da ein relativ hoher Aufwand für die nach EnEV vorgeschriebene Einzelraumregelung entsteht.

Die Fußbodenheizung erreicht auch bei Verlegeabstand 30 cm, Auslegungs-Vorlauftemperatur von 35 °C noch eine Leistung von ca. 20 W/m<sup>2</sup>, sodass in der Regel nur etwa die Hälfte des Raumes mit Heizschlangen ausgestattet werden muss.

Eine Wandflächenheizung erreicht bei ca. 35 °C Vorlauftemperatur eine Leistung von ca. 80-100 W/m<sup>2</sup>, sodass als Faustwert etwa 8-10 m<sup>2</sup> Raumfläche mit einem Quadratmeter Wandfläche beheizt werden können. Aufgrund der relativ hohen Leitungslängen und kleinen Querschnitte ist eine höhere Pumpleistung als bei Heizkörpersystemen erforderlich.

**Heizflächen sollten  
möglichst nicht an  
Außenwänden positioniert  
werden.**

Generell sollte die Anordnung von Heizflächen in bzw. an der thermischen Gebäudehülle vermieden werden: Auch bei Dämmdicken im Passivhausstandard führt dies dazu, dass der entsprechend ausgestattete Wand- oder Fußbodenbereich auf dem Temperaturniveau der Vorlauftemperatur liegt. Die Transmissionsverluste in diesem Bereich liegen dann durch die hohe Temperaturdifferenz nach außen bzw. zum Keller auf einem deutlich höheren Niveau als bei der sonst zugrundegelegten Raumtemperatur. Wandheizflächen oder auch Sockelleistenheizungen sollten daher nur an Innenwänden vorgesehen werden.

Bei einem Außenwand-U-Wert von 0,15 W/(m<sup>2</sup>K) entspricht die in die Wand integrierte Heizflächentemperatur von 35 °C einer U-Wert-Verschlechterung auf 0,23 W/(m<sup>2</sup>K). Zur Kompensation der höheren Wandinnentemperatur müsste der U-Wert auf 0,1 W/(m<sup>2</sup>K) verbessert werden.

Der Einsatz sogenannter Thermoaktiver Bauteile (Betonkernaktivierung o.ä.) in der Form von in den Decken eingebrachten Leitungssystemen zur gleichmäßigen Wärmeverteilung im Gebäude kommt für Bestandsgebäude nicht in Betracht. Für Neubauten im Passivhausstandard gibt es einzelne Beispiele der Anwendung, vor allem in Form von Bürohaus-Neubauten.

### 6.4.3 Zuluftheizung

Eine Zuluftheizung ist nur dann möglich, wenn die Heizlast so gering ist, dass die Restheizung über die ohnehin aus hygienischen Gründen erforderliche Frischluft zugeführt werden kann. Wenn der Passivhausstandard erreicht wird, ist die Lüftungsheizung eine besonders einfache und kostengünstige Lösung der Wärmeeinbringung.

Der Aufwand für **ein Heizregister** im Zulufrohrnetz mit Regelung sowie Wärmedämmung der Luftleitungen ist deutlich geringer als für ein Heizkörpersystem. Einschränkungen in der Möblierung entfallen. Alle Räume werden mit Zuluft gleicher Temperatur versorgt, mit der Menge der eingebrachten Luft wird die raumweise bereitgestellte Wärmeleistung definiert.

Die Wahl des Wärmeerzeugers mit der erreichbaren Vorlauftemperatur ist daher bei der Auslegung von Heizregistern sorgfältig zu berücksichtigen.

Die Kosten für ein Heizregister mit Leitungsanschluss, Regelventil und Raumthermostat liegen etwa in der Größenordnung der Kosten von zwei Standard-Heizkörpern mit Leitungsanschluss und Thermostatventil. Für Räume mit höherer Temperaturanforderung wie z.B. Bäder (24 °C) wird in der Regel ein Heizkörper an zentraler Stelle vorgesehen.

Eine Erhöhung der Luftmenge zur Deckung eines höheren Heizwärmebedarfs ist nicht zulässig, weil einerseits ein zusätzlicher Stromverbrauch für die Ventilatoren entsteht (der spezifische Strombedarf für den Wärmetransport mittels Luft liegt etwa um den Faktor 10 höher als für den Wärmetransport mittels Wasser), vor allem aber, weil der erhöhte Luftaustausch zu trockener Raumluft und zu Beschwerden der Nutzer führt [227].

## 6.5 Vorschriften und allgemeine Planungshinweise

### 6.5.1 Allgemeine Planungshinweise

Die Anlagenteile sind „aufeinander abzustimmen“. Es reicht also nicht, einen guten Ventilator, ein strömungsgünstiges Rohrnetz und ein paar Lüftungsöffnungen miteinander zu kombinieren. Die Anlage muss unter allen Bedingungen die „geforderte Leistung“ erbringen.

Die Heizung muss für den Nutzer sicher zu betreiben sein. So müssen z.B. Festbrennstoffkessel mit wasserseitiger Wärmeauskopplung immer mit einer thermischen Ablaufsicherung ausgestattet werden, um ein Überhitzen auszuschließen.

Die Anlage ist insgesamt so zu planen, dass ein sparsamer und wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Ist eine Lüftungsanlage mit Wärmepumpe, Trinkwasserspeicher und zusätzlichem Elektroheizstab geplant, so sollte die Aufheizung des Trinkwassers nur durch die Wärmepumpe erfolgen. Im Sinne einer möglichst hohen Primärenergieeinsparung ist die Regelung so einzustellen, dass die direkt-elektrische Komponente nicht automatisch, sondern nur nach manueller Freigabe zugeschaltet wird.

## 6.5.2 VOB Teil C und abgeleitete Normen

Der „Dreh- und Angelpunkt“ für die Auslegung und die Abnahme auch von technischen Systemen ist die VOB Teil C, DIN 18299:2006-10 – Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten aller Art (vgl. [171]). Diese Norm ist jedoch sehr allgemein gehalten, Detaillierungen sind in den Einzelschriften für die unterschiedlichen Gewerke enthalten, z.B. DIN 18379:2006-10 – Raumluftechnische Anlagen (vgl. [178]), DIN 18380:2006-10 – Heizungsanlagen und zentrale Wassererwärmungsanlagen (vgl. [171]).



Abbildung 147 VOB Teil C und abgeleitete Normen

## 6.5.3 Warmwassersysteme nach Anforderung Arbeitsblatt W551 Legionellen-Richtlinie sowie EnEV 2007 / 2009

**Legionellen** sind stäbchenförmige Bakterien, sie sind natürlicher Bestandteil aller Süßwässer. Ein Infektionsrisiko steht in direktem Zusammenhang mit der Temperatur des Wassers aus der Trinkwasser-Installation. Die Legionellen wachsen vermehrt im Temperaturbereich zwischen 30 und 45°C. Bei Temperaturen über 60°C sind sie nicht vermehrungsfähig. Die Legionellen-Vermehrung findet vor allem auf der Innenoberfläche im Leitungsnetz oder TWE (Trinkwassererwärmer) statt. Die Vermehrung im fließenden Wasser ist von untergeordneter Bedeutung. Die Infektion erfolgt im Wesentlichen durch Inhalation von kontaminiertem lungengängigem Aerosol, das z.B. beim Duschen entsteht. (vgl. [172] sowie [164] / [140])

### 6.5.3.1 Definition Anlagentyp

#### Kleinanlagen:

Anlagen mit Speicher-Trinkwassererwärmer oder zentralen Durchfluss-Trinkwassererwärmern in:

- Ein- und Zweifamilienhäusern – unabhängig vom Inhalt des Trinkwassererwärmers (TWE) und dem Inhalt der Rohrleitung
- Anlagen (in sonstigen Gebäuden) mit TWE  $\leq$  400 l Inhalt und Rohrinhalt  $\leq$  3 l (einzuhalten für den sog. Fließweg). Eine eventuelle Zirkulationsleitung wird nicht berücksichtigt. Der Fließweg ist definiert ab Abgang TWE bis zur ungünstigsten Entnahmestelle, d.h. die

Rohrstrecken mit dem größten in einer Linie liegenden Wasservolumen werden betrachtet, nicht für die Summe aller Warmwasserleitungen.

- Beispiele:  
TWE 500 l, alle einzelnen Fließwege  $\leq 3$  l: → Großanlage  
TWE 300 l, ein Fließweg  $> 3$  l: → Großanlage

#### Großanlagen:

Anlage mit Speicher-TWE oder zentralem Durchfluss-TWE:

- Alle Anlagen, die nicht den Kriterien „Kleinanlage“ genügen
- in Wohngebäuden, Hotels, Altenheimen, etc.
- Anlagen mit TWE  $> 400$  l Inhalt und/oder Rohrinhalt  $> 3$  l (Zirkulation wird nicht berücksichtigt)

#### 6.5.3.2 Anforderungen an Trinkwassererwärmer (TWE)

Dezentrale Durchfluss-TWE (eigenes Wasservolumen  $\leq 3$  l) - keine weiteren Maßnahmen, wenn nachgeschaltetes Leitungsvolumen ebenfalls  $\leq 3$  l (der Warmwasserleitung, als Fließweg wie zuvor)

#### Speicher-TWE, zentrale Durchfluss-Erwärmer, kombinierte Systeme, Speicher-Ladesysteme.

- Speicher-TWE ist mit Reinigungs- und Wartungsöffnung auszustatten (z.B. Handloch)
- Warmwasseraustritt des TWE: Temperatur  $\geq 60$  °C muss eingehalten werden können, auch bei zentralen Durchlauferhitzer mit Wasservolumen  $> 3$  l
- Speicher  $> 400$  l, Mehrfachspeicher: Wasser ist an allen Stellen gleichmäßig zu erwärmen (z.B. durch Umwälzung)
- Konstruktion des Kaltwassereinflusses in den Trinkwassererwärmer muss so sein, dass bei Entnahme große Mischzonen vermieden werden
- Serielle Schaltung aus hygienischen Gründen von Vorteil

Vorwärmstufe / bivalente Speicher: Speicher so konstruiert, dass einmal am Tag auf  $\geq 60$  °C erwärmt werden kann. Eine Temperaturhaltung über eine bestimmte Zeit ist nicht gefordert, bei Erreichen von 60 °C kann die Abschaltung erfolgen. Achtung: Spreizung der Wassertemperatur max. 5 K ist zu beachten!

#### 6.5.3.3 Anforderungen an Leitungsanlagen

Kaltwasserleitung vor Erwärmung schützen:

- nach DIN 1988-2 Abschnitt 10.2.2: Je nach Einbauort 4 bis 13 mm / WLG 040
- nach EnEV 2009: mind. 6 mm / WLG 035

Rohrleitung für erwärmtes Trinkwasser zur Begrenzung des Wärmeverlustes schützen:

- nach EnEV 2009: mind. 20 mm / WLG 035, Wärmedämmung gleich Innendurchmesser Leitung, maximal 100 mm.
- nach EnEV 2009: Warmwasser-Stichleitungen bis 4 m Länge: keine Anforderungen an Leitungsdämmung.

Zirkulationssysteme sind einzubauen:

- in Kleinanlagen mit Rohrleitungsinhalten  $> 3 \text{ l}$  zwischen Abgang TWE und Entnahmestelle
- in Großanlagen

Bemessung, sodass im zirkulierenden Warmwassersystem nicht mehr als 5 K Unterschreitung gegenüber der Speicheraustrittstemperatur auftritt. Stockwerks- und/oder Einzelzuleitungen  $\leq 3 \text{ l}$  (im Fließweg) können ohne Zirkulation ausgeführt werden. Zirkulationsleitungen sind bis unmittelbar vor Durchgangsmischarmaturen zu führen. Eine Schwerkraftzirkulation ist aus hygienischer Sicht nicht geeignet.

Durchgangsmischarmaturen: der Leitungsinhalt zur weitesten entfernten Entnahmestelle ist auf  $\leq 3 \text{ l}$  zu begrenzen. Hinweis: nach dem Arbeitsblatt gibt es keine direkte Anforderung an die Zapfzeit bis warmes Wasser austritt, sondern es gilt nur der maximaler Leitungsinhalt  $\leq 3 \text{ l}$  als Anforderung für die Installation einer Zirkulation. Nach der gängigen Fachliteratur (z.B. [179], [180]) sollte die Zapfzeit z.B. für einen Waschtisch nicht länger als 8-10 s ([180]: 12 s) sein. Dies entspricht ebenfalls der Anforderung der (höchsten) Komfortstufe III nach VDI 6003 (vgl. [181]).

Die Durchflussmenge einer typischen Duscharmatur liegt bei 15 l/Minute bzw. 0,25 l/s, einer Küchen-Spültischarmatur bei 12 l/Minute, einer Waschtisch-Armatur bei 13 l/Minute bzw. 0,22 l/s. Dadurch erfolgt eine komfortbedingte Begrenzung des maximalen Leitungsinhalts (im Fließweg) auf 1,8 l für einen Waschtisch.

#### 6.5.3.4 *Betrieb*

##### Kleinanlagen

- Temperatur am TWE-Austritt empfohlen  $\geq 60 \text{ °C}$ , Temperatur unter  $50 \text{ °C}$  sollte vermieden werden.
- Der Betreiber ist dann über das eventuelle Gesundheitsrisiko zu informieren.
- Anlagen mit Vorwärmstufen, Speicherinhalt  $\geq 400 \text{ l}$ : gesamter Speicherinhalt mindestens einmal täglich  $\geq 60 \text{ °C}$  erwärmen (wie zuvor als Abschalttemperatur, ohne zeitliche Anforderung)

##### Großanlagen

- Temperatur am TWE-Austritt stets  $\geq 60 \text{ °C}$
- Kurzzeitige Absenkung im Minutenbereich am TWE-Austritt ist tolerierbar.
- Vorwärmstufe mindestens einmal täglich  $\geq 60 \text{ °C}$  erwärmen, wie zuvor als Abschalttemperatur, ohne zeitliche Anforderung.

##### Zirkulationssysteme

- Wassertemperatur im System nicht mehr als 5 K unter Temperatur TWE-Abgang
- Abschalten für max. 8 Stunden in 24 Stunden zur Energieeinsparung

### 6.5.3.5 Bautechnische Maßnahmen

#### Trinkwassererwärmung und Vorwärmstufen

- Speicherdimensionierung nach dem festgestellten Verbrauch dimensionieren, nicht benötigte Speicher sind stillzulegen oder der Speicher muss so umgerüstet werden, dass eine Erwärmung des gesamten Speicherinhaltes gewährleistet ist

#### Leitungsanlagen

- Jede bautechnische Maßnahme an der Leitungsanlage sollte unter Berücksichtigung von Durchströmung, Wärmedämmung usw. dazu führen dass eine Temperatur von 55 °C im System nicht unterschritten wird.
- nicht benötigte Rohrleitungen sind unmittelbar am Abgang abzutrennen
- selten benutzte Entnahmestellen abtrennen und durch dezentrale Trinkwassererwärmung versorgen
- Absperrarmaturen in Entleerungsleitungen sind unmittelbar an der Hauptleitung anzubringen

#### Entnahmearmaturen

- nur mit Einzelsicherungen und Verbrühungsschutz

#### Durchgangsmisch- und Regelarmaturen

- Wasservolumen zwischen Armatur und weitester Entnahmestelle  $\leq 3$  l
- nach der Durchgangsmisch- und Regelarmatur sind hygienisch einwandfreie Verhältnisse nachzuweisen

## 7 Bauphysikalische Grundlagen

### 7.1 Thermische Behaglichkeit

**„Thermal Comfort“ von P.O. Fanger**

Im Jahr 1970 veröffentlichte P.O. Fanger das grundlegende Werk „Thermal Comfort“ in dem er die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit umfassend formulierte. Auf diese Arbeit stützt sich zu großen Teilen die aktuelle Norm DIN EN ISO 7730 zur „Ergonomie der thermischen Umgebung“ (vgl. [11]). Diese Norm befasst sich dabei nicht mit dem maximalen Extrem der Umgebungsbedingungen in denen ein Mensch sich aufhalten kann, bevor Gesundheitsschäden auftreten, sondern ausschließlich mit den optimalen Behaglichkeitsbedingungen in einem gemäßigten Innenraumklima. Eine ausführliche Einführung findet sich im Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Nr. 25 [12].

#### 7.1.1 PMV und PPD

**PMV: „predicted mean vote“ (voraussichtliche, mittlere Nutzerbewertung der Raumklimabedingungen)**

Zur Bewertung des Innenraumklimas spielen die beiden von Fanger eingeführten Begriffe PMV und PPD in der Norm eine zentrale Rolle. Dabei steht PMV (predicted mean vote) für die voraussichtliche, mittlere Nutzerbewertung der Raumklimabedingungen auf einer Skala von +3 bis -3 (+ = warm, - = kalt). Den Bereich der maximalen Behaglichkeit stellt dabei 0 = neutral dar.

**PPD: „predicted percentage of dissatisfied“ (voraussichtlicher Anteil der mit dem Raumklima Unzufriedenen)**

Die Abkürzung PPD (predicted percentage of dissatisfied) steht für den Anteil der Personen, die unter den gegebenen Klimabedingungen voraussichtlich unzufrieden sind, d.h. diese mit der Bewertung „heiß“, „warm“, „kühl“ oder „kalt“ beurteilen.

#### 7.1.2 Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit

Folgende Größen verändern PPD und PMV ohne eine Änderung des Raumklimas:

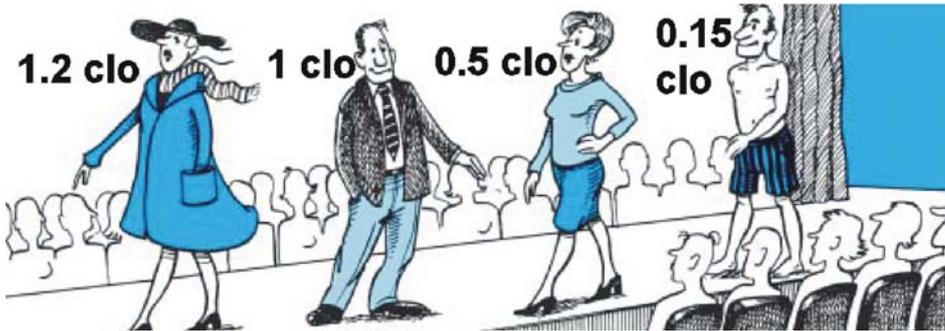
##### 7.1.2.1 Aktivität [met]

Je aktiver ein Mensch ist, desto mehr Energie setzt er um und desto mehr Wärme produziert er. Entsprechend sinkt dann die als behaglich empfundene Umgebungstemperatur. Die Wärmeabgabe einer entspannt sitzenden Person bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Körperoberfläche beträgt 58 W (1 met). Bei stehend ausgeführter, mittelschwerer Tätigkeit beträgt sie 2 met) (vgl. [11]).

##### 7.1.2.2 Kleidung [clo]

**1 clo: normale, westliche Bürokleidung für Männer**

Der Wärmedurchlasswiderstand der Kleidung wird durch den sogenannten cloth-Wert [clo] angegeben. Dabei entspricht 1 clo einem R-Wert von 0,155 m<sup>2</sup>K/W. Dieser Wert trifft zum Beispiel auf die normale westliche Bürokleidung für Männer zu (vgl. [11]).



**Abbildung 148 Beispiele für cloth-Werte verschiedener Bekleidungskombinationen (Quelle: Fa. LumaSense Technologies, [14])**

### 7.1.3 Formen der Wärmeabgabe des Körpers

Eine Person kann die erzeugte Körperwärme über die Haut und die Atmung abführen. Dabei kann zwischen fühlbarer (durch Temperaturunterschied) und latenter (durch Wasserverdunstung) Wärmeabgabe unterschieden werden.

**„Fühlbare“ und „latente“ Wärmeabgabe**

### 7.1.4 Lokale thermische Behaglichkeit

PMV und PPD beziehen sich jeweils auf ein Empfinden des gesamten Körpers. Thermische Unbehaglichkeit kann aber oft auch durch unterschiedliche Umgebungsklimaeinflüsse auf verschiedene Körperteile verursacht werden:

- Der Prozentsatz der Menschen, die sich durch **Zugluft** beeinträchtigt fühlen wird durch den DR-Wert (draft risk) angegeben. (vgl. [13])
- Hohe **Temperaturunterschiede** zwischen Kopf und Füßen ab ca. 3 K können als unbehaglich empfunden werden (vgl. [11]).
- Zu warme oder zu kalte **Fußbodentemperaturen** führen zu einer erhöhten Anzahl Unzufriedener. Das Optimum für Personen mit leichtem Schuhwerk liegt hier bei ca. 24 °C (vgl. [11]).
- **Asymmetrie der Strahlungstemperatur:** Stark unterschiedliche Temperaturen der Raumumfassungsflächen werden als unangenehm empfunden (vgl. [11]).

**DR-Wert: „draft risk“ (Anteil der Menschen die sich durch Zugluft beeinträchtigt fühlen)**

### 7.1.5 Thermischer Schlafkomfort

Beim Schlafen sinkt der Energieumsatz des Körpers, weshalb bei gleichen Raumtemperaturen höhere clo-Werte erforderlich sind. Der clo-Wert wird hierbei durch Nachtkleidung, Matratzen und Bettdecken bestimmt. Diese können clo-Werten von insgesamt 1 bis über 5 entsprechen. Daher kann durch die Wahl unterschiedlicher Decken und Wäsche ein breites Temperaturfeld abgedeckt werden. Für das herkömmliche Bett mit hochwärmendämmender Matratze liegt das dadurch erreichbare Raumtemperaturmaximum, bei dem man sich in warmen Sommernächten noch wohl fühlt, bei ca. 26 °C. Mit langem Schlafanzug und einer leichter Sommerbettdecke liegt die behagliche Raumtemperatur zwischen 20-22 °C [vgl. [13]]. Spezielle Maßnahmen, um im Schlafzimmer niedrigere Temperaturen als in den anderen Wohnräumen zu erreichen, sind daher zum Gewährleisten einer guten thermischen

**Stark unterschiedliche Oberflächentemperaturen werden als unangenehm empfunden.**

Behaglichkeit nicht erforderlich. Eine ausführliche Darstellung findet sich im Protokollband 25 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser [13].

### 7.1.6 Kategorien für die Behaglichkeit des Umgebungsklimas

Die DIN EN ISO 7730 benennt drei Kategorien für die Bewertung der Behaglichkeit des Umgebungsklimas eines Raumes. Dabei entspricht Kategorie A der höchsten Komfortstufe mit PPD < 6 % gefolgt von Kategorie B (PPD < 10 %) und Kategorie C (PPD < 15 %). Um beispielsweise Kategorie A zu erreichen, müssen u. a. folgende Bedingung erfüllt sein [11]:

- Begrenzung des Zugluftrisikos auf DR < 10 %
- Strahlungstemperatur-Asymmetrie (Decke/Boden): < 5 K
- Vertikaler Lufttemperaturunterschied zwischen Kopf und Fußknöchel: < 2 K
- Oberflächentemperaturbereich des Fußbodens: 19 bis 29 °C.

Der thermische Komfort ist auch die Grundlage für die Anforderungen an die Kühlung im Sommer [241] .

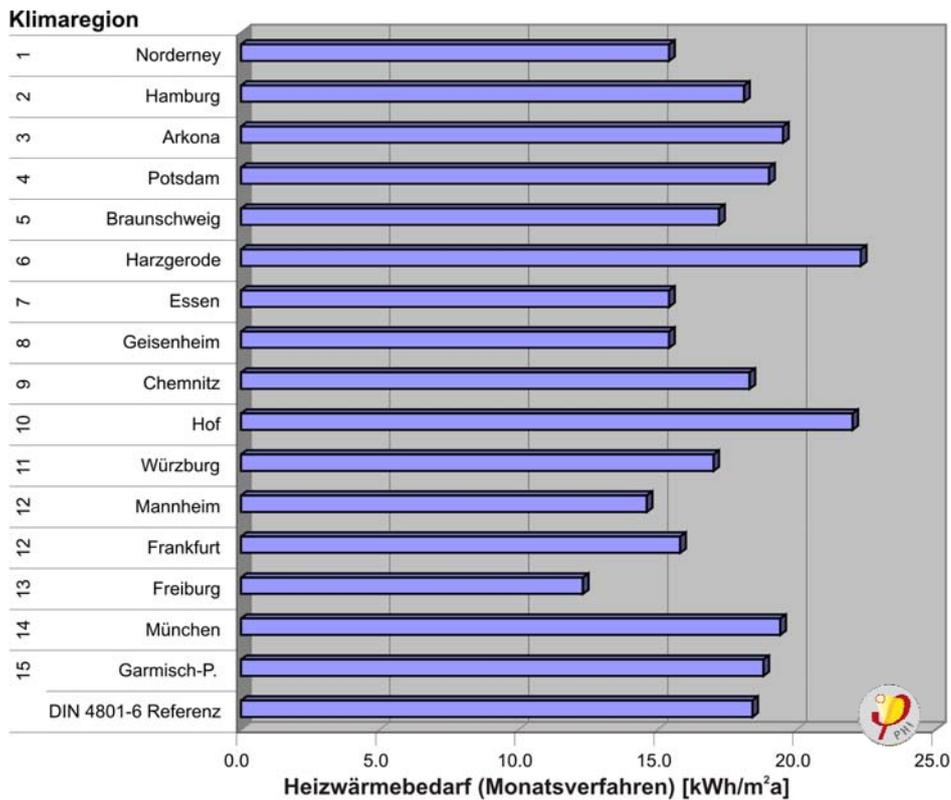
### 7.1.7 Messung der thermischen Behaglichkeit

Die in Abschnitt 7.1.6 genannten Parameter der EN ISO 7730 [11] zur objektiven Bewertung der thermischen Behaglichkeit können mit geeigneten Geräten in Gebäuden gemessen werden:

Gemessener Parameter/ physikalische Größen	Sensor:
Lufttemperatur	Temperaturfühler
Relative Luftfeuchte	Psychrometer
Strahlungstemperatur	Globethermometer
Turbulenzgrad	Thermoelektrischer Strömungssensor
Strahlungstemperatur-Asymmetrie	Pyrgeometer

## 7.2 Klimatische Randbedingungen

In die Berechnung der Heizenergiebilanz und vor allem der Heizlastauslegung eines Gebäudes sollten auch die Klimabedingungen am Gebäudestandort einfließen. Wie Abbildung 149 zeigt, kann sich der Jahresheizwärmebedarf des gleichen Gebäudes an unterschiedlichen Standorten in Deutschland sehr stark unterscheiden.



**Abbildung 149** Jahresheizwärmebedarf eines energetisch sanierten Altbaus (Tevesstr. 36-46, Frankfurt a. M., Architekt: faktor 10 Darmstadt) bei hypothetischer Lage in verschiedenen Klimaregionen (berechnet mit PHPP, vgl. [17]) (Quelle: PHI)

Klimadaten für alle Regionen in Deutschland können aus den beiden Normen DIN 4108-6 (vgl. [49]) und DIN EN 12831 (vgl. [50]) entnommen werden. Die DIN 4108-6 gibt die durchschnittliche monatliche **Strahlungsintensität** auf Flächen mit verschiedenen Neigungswinkeln und die mittlere monatliche **Außentemperatur** an. Diese Daten werden für die Berechnung von Heizenergiebilanzen benötigt (siehe dazu Abbildung 150).

Will man dagegen die maximale **Heizlast** für die Auslegung der Heizungsanlage ermitteln benötigt man die sogenannte **Normaußentemperatur** (tiefstes Zweitagesmittel der Lufttemperatur, das 10 mal in 20 Jahren erreicht oder unterschritten wird). Diese Werte liefert die DIN EN 12831 Bbl. 1 (siehe dazu Abbildung 150). Für die richtige Dimensionierung der Heizung in hochwärmegedämmten Gebäuden ist das Heizlastverfahren im Passivhaus Projektierungspaket adäquat [53] [54]. Die dazu gehörenden Klimadaten sind ebenfalls im PHPP [17] dokumentiert.

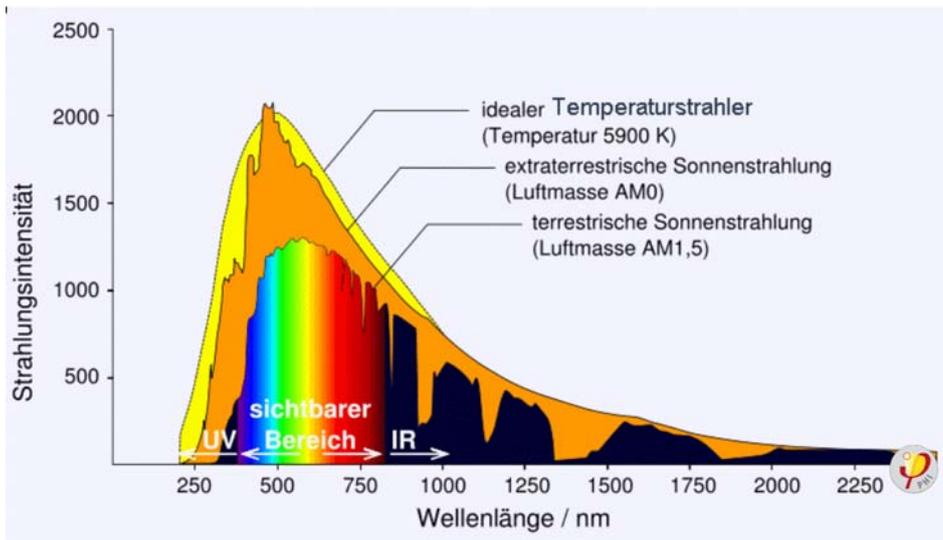


### 7.3.1 Wärmetransportmechanismen: Strahlung, Leitung, Konvektion

#### 7.3.1.1 Strahlung

Jeder Gegenstand gibt Wärmestrahlung ab - gut erkennbar in der Wärmebildaufnahme (das Gesicht und die Hand, beide warm, strahlen am meisten Wärme ab).

Die uns von der Sonne erreichende Strahlung ist im wesentlichen Temperaturstrahlung der heißen Sonnenoberfläche (ca. 5900 K). Bei dieser hohen Temperatur liegt das Maximum der Temperaturstrahlung im sichtbaren Bereich; aber auch UV-Licht und Infrarot-Strahlung werden abgestrahlt.

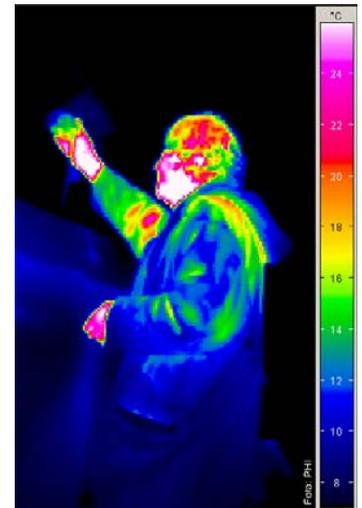


**Abbildung 152** Das Sonnenspektrum am Erdboden (AM 1,5) im Vergleich zum idealen Temperaturstrahler und zur Sonnenstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre (AM0) [47]

Die Erdatmosphäre reflektiert und absorbiert Teile der Sonnenstrahlung; an einem sehr klaren Tag können 70 bis 75 % bis zur Erdoberfläche durchkommen (vgl. "terrestrische Sonnenstrahlung" in der Grafik). Deren Maximum liegt im gelbgrünen Bereich, die meiste Energie kommt im sichtbaren Licht an. Aber auch im nahen Infrarot wird relativ viel Energie von der Sonne empfangen (Wellenlängen zwischen 700 und 1400 nm).

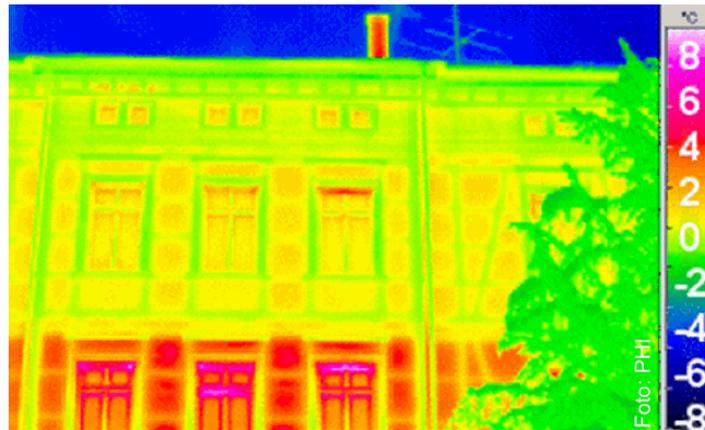
Unsere Augen sind im sichtbaren Bereich empfindlich. Ein gutes Fenster sollte daher das sichtbare Spektrum (380-750 nm) möglichst ungestört hereinlassen. Herkömmliches Glas ist im sichtbaren Spektralbereich "durchsichtig", aber auch im nahen Infrarot.

Die folgende „Thermographieaufnahme“ zeigt mehrere Temperaturstrahler unterschiedlicher Temperatur und daher unterschiedlicher Strahlungsintensität auf einen Blick.



**Abbildung 151** Infrarot-Aufnahme einer Person. Die Hautoberfläche hat die höchste Temperatur und damit die höchste Abstrahlung. Kapuze und Taschenklappe sind am kältesten und strahlen am wenigsten ab. (Quelle: PHI)

**Hinweis:** Wenn Sie sich mit den Hintergründen der Physik der Temperaturstrahlung genauer befassen wollen, empfehlen wir das "Online-Lernmaterial WEBGEO". Hier werden die Ergebnisse nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz anschaulich erläutert.



**Abbildung 153** Auch ein sehr kalter Gegenstand strahlt noch Wärmestrahlung ab: Der Baum im Vordergrund ist bei -1 bis -2 °C noch gut im Wärmebild erkennbar. Und selbst der Himmel strahlt noch, hier bei -6 °C sog. atmosphärische Gegenstrahlung ab. Die Strahlung des oben herausragenden Schornsteins ist schon größer. (Quelle: PHI)

**Wärmestrahlung ist der wichtigste Mechanismus des Wärmetransportes in unserer Umgebung.**

Wärmestrahlung ist der wichtigste Mechanismus des Wärmetransportes in unserer Umgebung - das ist für viele überraschend. In einem Raum mit Zimmertemperatur 21 °C ist mehr thermische Energie als Strahlungswärmeaustausch zwischen den Raumbooberflächen unterwegs als durch Luftströmungen! Auch an der Außenoberfläche von Bauteilen spielt die Wärmestrahlung eine bedeutende Rolle. Die Abstrahlung von thermischer Energie in die Atmosphäre bzw. den Weltraum ist der überwiegende Kühlmechanismus. Dieser Vorgang ist so bedeutend, dass Außenoberflächen in der kalten Jahreszeit von Oktober bis April durchschnittlich sogar eine niedrigere Temperatur aufweisen als die Außenluft (man denke z.B. an Bodenfrost).

#### 7.3.1.1.1 Strahlungsgesetze

Die Grundlage der Physik der Wärmestrahlung ist das Planck'sche Strahlungsgesetz, das die spektrale Energiedichte der Strahlung eines idealen „schwarzen“ Körpers in Abhängigkeit der Temperatur beschreibt. Dabei ist die Lage des Strahlungsmaximums proportional zur Temperatur.

Die gesamte Wärmestrahlung, die von einem idealen Strahler der Temperatur  $T$  ausgestrahlt wird, beträgt

$$P_{\text{ges,rad}} = \sigma A T^4$$

Dabei ist  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann'sche Konstante ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ),  $A$  die strahlende Oberfläche des Körpers und  $T$  die absolute Temperatur dieser Oberfläche.

#### 7.3.1.1.2 Strahlungsaustausch

Reale Oberflächen sind in der Regel keine idealen Wärmestrahler. Sie können zum Teil durchsichtig (transparent) sein bzw. reflektierend. Für die Oberflächeneigenschaften Transmissionsgrad  $\tau$ , Reflexionsgrad  $\rho$  und Absorptionsgrad  $\alpha$  gilt wegen des Energiesatzes für jede Wellenlänge

$$\tau + \rho + \alpha = 1$$

Ein auf den ersten Blick überraschender Zusammenhang ist die Tatsache, dass der thermische Emissionsgrad  $\varepsilon$ , der das Verhältnis der Abstrahlung einer Oberfläche der Temperatur  $T$  zur Abstrahlung eines idealen Strahlers angibt, immer gleich dem Absorptionsgrad  $\alpha$  ist:

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$$

**Der thermische Emissionsgrad einer Oberfläche ist immer gleich dem Absorptionsgrad.**

### 7.3.1.2 Wärmeleitung

Sobald in einem Medium - ob im festen, flüssigen oder gasförmigen Zustand - eine Temperaturdifferenz auftritt, findet ein Wärmetransport statt, der einem Ausgleich dieser Differenz entgegen strebt. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik „fließt“ die Energie dabei immer von wärmeren zu kälteren Bereichen. Bei der Wärmeleitung wird die thermische Energie nicht von einzelnen sich bewegenden Teilchen transportiert, sondern vielmehr durch Schwingungen bzw. Stöße zwischen denselben übertragen. Die Fähigkeit eines bestimmten Stoffs Wärme auf diesem Wege zu übertragen hängt demnach vom Aufbau und der Struktur der Materie ab und wird mit der temperaturabhängigen Konstante „Wärmeleitfähigkeit“  $\lambda$  [W/mK] beschrieben.

Die Wärmeleitfähigkeit von Gasen ist nicht nur temperatur- sondern zusätzlich druckabhängig. Dieser Effekt wird z.B. in Vakuumdämmpanelen genutzt, da hier der Druck und somit die Wärmeleitfähigkeit deutlich reduziert sind.

Mathematisch wird die Wärmeleitung durch das *Fouriersche Gesetz* beschrieben. Ausschlaggebend sind die Geometrie, die Stoffeigenschaften und die Temperaturdifferenzen, wodurch recht komplexe Wärmestromfelder entstehen können. Für den einfachen Fall eines festen Stoffes einer Dicke  $d$  [m] und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK] mit zwei senkrechten Begrenzungen einer kälteren Temperatur  $T_2$  [°C] und einer wärmeren Temperatur  $T_1$  [°C] gilt die folgende Formel zur Berechnung der Wärmeleistung  $\dot{Q}$  [W] durch eine Fläche  $A$  [m<sup>2</sup>]:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} A (T_1 - T_2)$$

Je größer der Temperaturunterschied, desto mehr Wärme wird also durch die gegebene Wand transportiert.

### 7.3.1.3 Konvektion

Die Wärmeübertragung durch Konvektion beschreibt den Transport thermischer Energie mittels Teilchenbewegung. Es wird generell zwischen zwei Arten der Konvektion unterschieden:

- freie Konvektion (Teilchenströmung mit natürlichen Ursachen)
- erzwungene Konvektion (hervorgerufen durch äußere mechanische Einwirkungen)

Indikator für den Wärmeübergang an einer Grenzschicht ist der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  in [W/m<sup>2</sup>K]. Für den Wärmetransport durch Konvektion am Übergang zweier Stoffe sind die Temperatur, die Strömung und die

Stoffeigenschaften ausschlaggebend. Es bildet sich im Allgemeinen eine thermische Grenzschicht, in der sich die Temperaturverhältnisse zwischen den zwei angrenzenden Materialien ‚einpendeln‘. Auf Grund der Zusammenwirkung vieler verschiedener Parameter ist die Ermittlung des tatsächlichen Wärmeübergangs für viele gegebene Randbedingungen sehr komplex und kann daher oft nicht rechnerisch sondern nur messtechnisch erfolgen.

Übrigens: Wie die Wärmeübertragung durch Leitung, ist auch die Wärmeübertragung durch Konvektion im Vakuum stark eingeschränkt bzw. gar nicht vorhanden. Dieser Effekt ist einfach nachzuvollziehen - im Vakuum sind schlicht keine Teilchen vorhanden, die eine thermische Energie mit sich führen könnten. In Vakuumdämmpaneelen hat also ausschließlich die Wärmeübertragung durch Strahlung einen merkbaren Effekt.

### 7.3.2 Stationärer Wärmedurchgang, U-Wert

Zur Berechnung des stationären Wärmedurchgangs durch ein Bauteil wird der sogenannte U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) verwendet. Er hat die Einheit  $[W/(m^2K)]$  und gibt den Energiestrom durch den Aufbau pro Quadratmeter und 1 K Temperaturdifferenz auf der innen- und außenliegenden Seite an. Je höher der U-Wert, desto mehr Wärme kann durch die Materialien hindurchströmen. Eine hohe Dämmwirkung hat also einen niedrigen U-Wert bzw. einen hohen Wärmedurchgangswiderstand R (Kehrwert des U-Wertes).

Der Wärmedurchgangswiderstand einer Materialschicht hängt von ihrer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$   $[W/mK]$  ab sowie von der Schichtdicke  $d$   $[m]$ :  $R = \frac{d}{\lambda}$

Der U-Wert eines gesamten Bauteils ergibt sich aus den Durchgangswiderständen der einzelnen Materialschichten, sowie den Wärmeübergangswiderständen an den Grenzschichten zur Umgebung:

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum_n \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{si}}$$

Dabei ist U der stationäre Wärmedurchgangskoeffizient in  $[W/(m^2K)]$ ,  $R_{se}$  und  $R_{si}$   $[(mK)/W]$  sind die Wärmeübergangswiderstände an der jeweils außen- und innenliegenden Seite des Bauteils und  $d_n$   $[m]$  und  $\lambda_n$   $[W/(mK)]$  ist die Dicke bzw. Wärmeleitfähigkeit der n verschiedenen Bauteilschichten. In Tabelle 17 sind die Wärmeübergangswiderstände nach der europäischen Norm EN ISO 6946 (vgl. [146]) angegeben, in der Berechnungsverfahren für verschiedene Bauteile normativ beschrieben sind.

**Tabelle 17:** Wärmeübergangswiderstände nach EN ISO 6946 (vgl. [146])

Wärmeübergangswiderstände $[m^2W/K]$			
Richtung des Wärmestroms	aufwärts	horizontal	abwärts
$R_{si}$ : innen	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$ : außen	0,04		

Der U-Wert gibt zunächst nur Auskunft über den *stationären* Wärmedurchgang durch ein Bauteil, d.h. unter gegebenen konstanten Temperaturverhältnissen. Bei der Erwärmung oder Abkühlung von Wänden treten auch dynamische Prozesse in Kraft wie z.B. die Wärmespeicherung.

### 7.3.3 Wärmespeicherung

$$\text{Wärmekapazität: } C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

$$\text{Spezifische Wärmekapazität: } c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

$\Delta Q$	Wärme, die gespeichert oder abgegeben wird [J]
$\Delta T$	Temperaturänderung [K]
m	Masse [kg]

Die Möglichkeit thermische Energie, also Wärme, temporär zu speichern, wenn sie nicht benötigt wird und sie dann zu „entladen“ wenn ein Wärmebedarf besteht, kann zur Temperaturstabilisierung im Raum beitragen und somit auch zur Energieeinsparung für die Raumklimatisierung. Sie beeinflusst z.B. die Nutzbarkeit der internen Wärmegewinne dadurch, dass die zu einem gegebenen Zeitpunkt überschüssigen Gewinne bei einer hohen Speicherfähigkeit zeitverzögert entladen werden können, während sie für die Raumbeheizung ohne diesen Speichereffekt verloren gehen würden. Die Fähigkeit Wärme zu speichern ist im Wesentlichen eine Materialeigenschaft.

Bei der sensiblen Wärmespeicherung ändert sich die ‚fühlbare‘ Temperatur des Materials, d.h. die kinetische Energie der einzelnen Atome/Moleküle. Die Wärmekapazität eines Materials gibt an wie viel Wärmeenergie  $\Delta Q$  dem Stoff zugeführt werden muss um die Temperatur um  $\Delta T$  zu erhöhen bzw. wie viel Wärmeenergie das Material pro Temperaturänderung speichern kann. In Tabelle 18 sind beispielhaft die Kennwerte einiger Materialien aufgelistet.

**Tabelle 18: Spezifische Wärmekapazitäten und Rohdichten einiger beispielhaften Materialien nach DIN EN 12524 (vgl. [44])**

Material	Spezifische Wärmekapazität $c$ [kJ/kgK]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Stahl	0,45	7800
Aluminiumlegierungen	0,88	2800
Kalksandstein	1	1600-2600
Beton	1	1800-2400
trockene Luft	1,008	1,23
Mineralwolle	1,03	10-200
OSB-Platte	1,7	650
Wasser (40 °C)	4,19	990

Mit so genannten „Phase Change Materials“ (PCM) kann im Bauwesen auch der Effekt der latenten Wärmespeicherung genutzt werden. Hierbei erfolgt über die bereits beschriebenen sensiblen Speichereffekte bei einer Temperaturänderung hinaus eine Energieaufnahme oder -abgabe bei einer Änderung des Aggregatzustandes bzw. Phasenübergangs.

#### 7.3.4 Dynamische Wärmeleitung: Speichern oder Dämmen?

Langjährige Erfahrung in Passivhäusern und die Ergebnisse detaillierter dynamischer Berechnungen (vgl. [147], [51]) belegen, dass die Reduzierung der Wärmeverluste z.B. durch Transmissions- oder Lüftungsverluste für die Heizenergieeinsparung eine deutlich wichtigere Rolle spielt als die Wärmespeicherkapazität der Bauteile. Die Erklärung hierfür ist bei genauer Betrachtung einleuchtend:

Der dynamische Prozess der Wärmespeicherung kann nur dann effektiv genutzt werden, wenn die gespeicherte Wärme dem Raum zu einem späteren Zeitpunkt – dann wenn sie benötigt wird – wieder zur Verfügung gestellt wird. Eine massive ungedämmte Wand nimmt an einem sonnigen Tag im Winter tagsüber beidseitig Wärme auf und speichert diese. Nachts sinken die Außentemperaturen und die Wand gibt die gespeicherte Wärme wieder an die Umgebung ab, ohne dass der Innenraum von dieser Speicherung profitieren kann. Diese unkontrollierte Entladung der gespeicherten Wärme stellt die Hauptschwierigkeit der Wärmespeicherung dar. Nur durch Wärmedämmung, die verhindert, dass die gespeicherte Wärme nach außen verloren geht, wird das Speichervermögen der Bauteile überhaupt erst wirksam.

Der Beitrag der Wärmespeicherung zur Energieeinsparung ist im mitteleuropäischen Klima kleiner als 0,5 % (vgl. [147]) und somit vernachlässigbar. Eine gute Wärmedämmung hingegen ist ausschlaggebend für die Reduzierung von Wärmeverlusten.

Eine sehr anschauliche Antwort auf die Frage „Speichern oder Dämmen?“ gibt die folgende Beschreibung [147]: „Wer käme bei kaltem Wetter auf die Idee, eine Ritterrüstung (hohe Speicherfähigkeit) anzuziehen, um warm zu bleiben? Bewährt haben sich seit Jahrhunderten gut wärmedämmende Kleidungsstücke aus Wolle, Fellen oder eingeschlossenen Luftschichten. Sie verhindern wirksam eine Auskühlung des Körpers.“

### 7.3.5 Absorption von Strahlungswärme

Ein weiterer dynamischer Effekt, der die Wärmegewinne und -verluste durch die Außenbauteile beeinflusst ist die Absorption von Strahlungswärme. Wenn solare Strahlung auf die Außenflächen auftrifft, so wird ein Teil von ihr als Wärme absorbiert und der Rest an die Umgebung reflektiert. Wie viel Strahlungswärme absorbiert wird hängt von der Beschaffenheit der Oberfläche und deren Absorptionskoeffizient  $\alpha$  ab und kann somit, in einem gewissen Rahmen, vom Planer beeinflusst werden. Dunkle Flächen haben z.B. höhere Absorptionskoeffizienten. Das Einsparpotential für den Heizwärmebedarf durch sehr dunkle Oberflächen befindet sich im Bereich von 13-14 % (vgl. [148]).

### 7.3.6 Wärmebrückenvermeidung

Wärmebrückenfreies Konstruieren – d.h. Optimierung der Details so lange, bis der Wärmebrückenzuschlag in Bezug auf die Außenoberfläche  $\Delta U_{WB}$  kleiner gleich Null wird [150] – hat sich beim Neubau ausgezeichnet bewährt. Die Vorteile liegen auf der Hand: Kein Ärger mit kalten Stellen und Feuchteschäden, keine aufwändige Rechnerei, wenige klar formulierte Prinzipien für die Planung der Details. Dieser Ansatz kann in den meisten Fällen auch auf die Modernisierung von Altbauten übertragen werden. Dies ist insofern wichtig, als gerade bei Altbauten häufig durch Wärmebrücken bedingte Feuchteschäden auftreten.

Im Folgenden soll erläutert werden, was eine Wärmebrücke ist und wie ihre Wirkung auf den Wärmeverlust des Gebäudes berechnet werden kann.

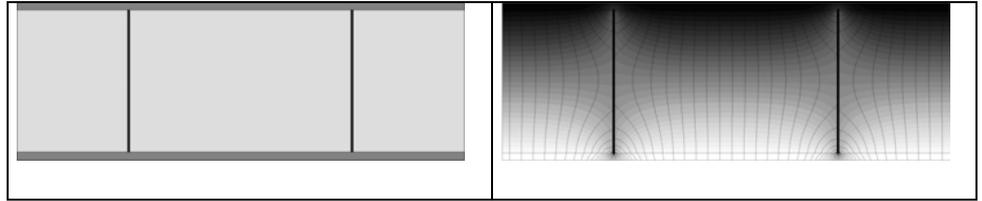
Beim Zusammenfügen zweier Bauteile entsteht normalerweise eine Wärmebrücke. Die Berechnung der Wärmeverluste mit den U-Werten der ungestörten Flächen versagt hier. Der reale Wärmestrom durch die gesamte Geometrie des Anschlusses lässt sich jedoch mit einer zweidimensionalen Wärmestromberechnung ermitteln [151]. Die Differenz aus der zweidimensionalen Wärmestromberechnung und der Berechnung des Wärmestromes der ungestörten Bauteile gibt den sogenannten Wärmebrückenverlustkoeffizienten oder  $\Psi$ -Wert [ $W/(mK)$ ] an. Er beschreibt die Wärmebrückenwirkung des Anschlusses (pro Meter). Ist dieser  $\Psi$ -Wert bekannt, dann kann die Berechnung nach der U-Wert-Methode auf einfache Weise korrigiert werden.

Besonders gravierend sind Wärmebrückeneffekte, wenn die Dämmschicht mit hoch wärmeleitendem Material durchdrungen wird, wie z.B. Stegen oder Befestigungselementen aus Metall. In Abbildung 154 wurde dieser Effekt zur Veranschaulichung für ein hypothetisches Dach mit Metall-„Sparren“ dargestellt. Der Zuschlag zum U-Wert beträgt gegenüber Sparren aus Holz über 100 %,

*Auch bei der Altbau-  
modernisierung ist das  
Ziel die Herstellung einer  
geschlossenen  
thermischen  
Gebäudehülle.*

*Der  $\Psi$ -Wert quantifiziert  
die über die Wärme-  
verluste des Regelbauteils  
hinausgehenden  
Wärmeverluste einer  
linearen Wärmebrücke.*

d.h. die Dämmschicht wird wegen dieser Durchdringungen effektiv etwa halbiert, obwohl die Stege im Beispiel nur etwa 6 mm stark sind.



**Abbildung 154** Zur Veranschaulichung der Wirkung von Durchdringungen aus hoch wärmeleitendem Material: Stege aus Stahl, Stärke 6 mm (!),  $\lambda_{\text{Steg}} = 60 \text{ W/(mK)}$ ; Dämmschicht 400 mm, Zellulose  $\lambda = 0,040 \text{ W/(mK)}$ ,  $U = 0,225 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ , Wärmebrückenzuschlag wegen der Durchdringungen:  $\Delta U_{\text{WB}} = 0,12 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . (Quelle: PHI)

## 7.4 Luftaustausch

### 7.4.1 Verunreinigungen der Innenraumluft

Auf Grund erhöhter Anforderungen an den Komfort werden Gebäude heute immer luftdichter gebaut. Als Folge kann die Schadstoffkonzentration in der Raumluft in diesen Gebäuden ansteigen, wenn nicht Gegenmaßnahmen wie eine verstärkte Fensterlüftung oder der Einbau einer mechanischen Lüftungsanlage ergriffen werden. Wird dies nicht beachtet, kann eine Sanierung außerdem zu Schimmelbildung an kalten Außenbauteilen führen, wenn nicht gleichzeitig der Dämmstandard angepasst wird. Dies belastet zusätzlich die Raumluft.

Unsachgemäße Gebäudesanierung kann also zu einer Verschlechterung der Innenraumluftqualität führen, während eine richtig ausgeführte Sanierung diese verbessert.

#### 7.4.1.1 Gesetze und Normen

Nach §3 der Musterbauordnung sind bauliche Anlagen „so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass [...], insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden.“ [1] Aufbauend auf diesem sehr allgemein gehaltenen Grundsatz gibt es verschiedene Quellen, aus denen der Planer präzisere Angaben über die Zulässigkeit oder Gefährlichkeit verschiedener Stoffe in der Raumluft erhalten kann:

**Die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)** enthält eine Liste von Stoffen, die auf Grund ihrer Gefährlichkeit für bestimmte oder alle Anwendungen nicht zugelassen sind (vgl. [2]). Viele der hier erwähnten Stoffe wurden im Zeitraum von 1950-1980 im Hochbau verwendet und finden sich in zur Sanierung anstehenden Altbauten.

**Die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS)** legen einen Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) für die zeitlich gewichtete durchschnittliche Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz in Bezug auf einen gegebenen Referenzzeitraum fest. (vgl. [3]).

Von einer Arbeitsgruppe (gebildet aus der Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes und der Arbeitsgemeinschaft der Obersten Gesundheitsbehörden der Länder (AOLG)) wurden die **Richtwerte für die Innenraumluft** erarbeitet. Für die Bewertung von Innenraumluftverunreinigungen wurden für verschiedene Stoffe jeweils zwei Richtwerte festgesetzt. Diese Richtwerte können auf der Homepage des Umweltbundesamtes abgerufen werden (siehe auch Tabelle 19).

Richtwert II (RW II) ist ein wirkungsbezogener, begründeter Wert, der sich auf die gegenwärtigen toxikologischen und epidemiologischen Kenntnisse zur Wirkungsschwelle eines Stoffes unter Einführung von Unsicherheitsfaktoren stützt. Er stellt die Konzentration eines Stoffes dar, bei deren Erreichen bzw. Überschreiten unverzüglich Handlungsbedarf besteht.

Richtwert I (RW I) ist die Konzentration eines Stoffes in der Innenraumluft, bei der im Rahmen einer Einzelstoffbetrachtung nach gegenwärtigem Erkenntnisstand auch bei lebenslanger Exposition keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu erwarten sind. Eine Überschreitung ist mit einer über das übliche Maß hinausgehenden, hygienisch unerwünschten Belastung verbunden. Aus Vorsorgegründen besteht auch im Konzentrationsbereich zwischen RW I und RW II Handlungsbedarf.

Der RW I wird vom RW II durch Einführen eines zusätzlichen Faktors (in der Regel 10) abgeleitet. Dieser Faktor ist eine Konvention. Der RW I dient in der Regel auch als Zielwert für Sanierungen. [4]

**„Richtwert I“ ist in der Regel der Zielwert für Sanierungen**

**Tabelle 19 Richtwerte für die Belastung der Innenluft mit gesundheitsgefährdenden Stoffen [4]**

Verbindung	Richtwert II	Richtwert I	Jahr der Festlegung
Toluol	3 mg/m <sup>3</sup>	0,3 mg/m <sup>3</sup>	1996
Dichlormethan	2 (24 h) <sup>1)</sup>	0,2 mg/m <sup>3</sup>	1997
Kohlenstoffmonoxid	60 (1/2 h)	6 (1/2 h)	1997
	15 (8 h)	1,5 (8 h)	
Pentachlorphenol	1 µg/m <sup>3</sup>	0,1 µg/m <sup>3</sup>	1997
Stickstoffdioxid	0,35 (1/2 h)	-	1998
	0,06 (1 Woche)		
Styrol	0,3 mg/m <sup>3</sup>	0,03 mg/m <sup>3</sup>	1998
Quecksilber	0,35 µg/m <sup>3</sup>	0,035 µg/m <sup>3</sup>	
(als metallischer Dampf)			1999
Tris(2-chlorethyl)phosphat	0,05 mg/m <sup>3</sup>	0,005 mg/m <sup>3</sup>	2002
Bicyclische Terpene <sup>3)</sup>	2 mg/m <sup>3</sup>	0,2 mg/m <sup>3</sup>	2003
Naphthalin	0,02 mg/m <sup>3</sup>	0,002 mg/m <sup>3</sup>	2004
Aromatenarme Kohlenwasserstoffgemische (C9-C14)	2 mg/m <sup>3</sup>	0,2 mg/m <sup>3</sup>	2005
TVOC	siehe Erläuterungen im folgenden Text		1999

<sup>1)</sup> In Klammern ist, soweit er ausdrücklich festgelegt wurde, ein Mittelungszeitraum angegeben, z. B. 24 Stunden (h).

**TVOC: „Total Volatile Organic Compounds“ (Summe der flüchtigen organischen Verbindungen)**

Da die Innenraumluft unterschiedlichste organische Verbindungen enthält und Richtwerte nur für relativ wenige Einzelverunreinigungen zur Verfügung stehen, hat die IRK Maßstäbe zur Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (Total Volatile Organic Compounds, TVOC) erarbeitet. Diese TVOC-Werte sind jedoch nicht nach dem Basisschema abgeleitet. Zur Verdeutlichung der Unsicherheiten, die bei der Ableitung entstanden, wurden nicht einzelne Zahlenwerte, sondern Konzentrationsbereiche angegeben. Demzufolge ist in Räumen mit TVOC-Konzentrationen zwischen zehn und 25 Milligramm pro Kubikmeter ein täglicher Aufenthalt allenfalls vorübergehend zumutbar (derartige Konzentrationen können während Renovierungen vorkommen). In Räumen, die für einen längerfristigen Aufenthalt bestimmt sind, sollte auf Dauer ein TVOC-Wert zwischen einem und drei Milligramm pro Kubikmeter nicht überschritten werden. Das Ziel sollte sein, in Innenräumen im langzeitigen Mittel eine TVOC-Konzentration von 0,2 bis 0,3 Milligramm pro Kubikmeter zu erreichen oder nach Möglichkeit zu unterschreiten. [4]<sup>1</sup>

**7.4.1.2 Häufige Schadstoffe**

Zwischen 1950 und 1980 kamen viele heute in der Gefahrstoffverordnung genannte Stoffe zum Einsatz:

- Asbesthaltige Dämm- und Dichtungsmaterialien und Faserzementprodukte
- dauerelastische Fugenmassen mit Polychlorierten Biphenylen (PCB)
- PCB-haltige Lackbeschichtungen
- Formaldehyd-emittierende Holzwerkstoffe
- Polyzyklische Kohlenwasserstoffe (PAK) in bituminösen Materialien
- PAK-haltige Holzschutzmittel
- organische Chlorverbindungen im Holzschutz

Unabhängig davon ob ein Stoff gesundheitsgefährdend ist oder nicht, kann von ihm auch eine Geruchsbelästigung ausgehen. Eine besonders niedrige Geruchsschwelle weisen n-Alkylaldehyde auf. Bei der Auswahl von Baustoffen sollten nicht nur gesundheitsbezogene Kriterien, sondern auch die Geruchsemissionen beachtet werden (vgl. [5]). Eine Übersicht über typische Schadstoffe in der Innenraumluft und ihre Herkunft findet sich in [7].

**Für manche Schadstoffe gibt es technische Baubestimmung für die Sanierungsarbeiten, die eingehalten werden müssen.**

**7.4.1.3 Hinweise für die Sanierung**

Bei der Sanierung sollten im Gebäude vorhandene Schadstoffbelastungen erkannt und sachgerecht beseitigt werden.

Für Asbest, PCB, und Pentachlorphenol gibt es **Richtlinien** als Technische Baubestimmungen, die Hinweise enthalten, wie Bauprodukte, die diese Stoffe enthalten, gesundheitlich zu bewerten sind, wie Sanierungen durchgeführt

<sup>1</sup> In Passivhaus-Neubauten wurden diese Werte deutlich (zumindest in angemessener Zeit nach Baufertigstellung) messtechnisch nachgewiesen unterschritten (vgl.[132] [133]).

werden können, welche Schutzmaßnahmen dabei beachtet werden müssen, wie die Abfälle und das Abwasser zu entsorgen sind und wie sich der Erfolg einer Sanierung kontrollieren lässt (vgl. [6]).

Außerdem ist es wichtig bei der Auswahl neuer Baumaterialien für die Sanierung auf weitgehende Schadstofffreiheit zu achten. In Tabelle 20 sind die Aldehydemissionen verschiedener Fußbodenbeläge aus Prüfkammeruntersuchungen aufgeführt. Es wird deutlich, dass sich auch innerhalb einer Produktgruppe die Emissionswerte extrem stark unterscheiden können (vgl. [5]). Daher ist es sinnvoll, für neu einzubauende Materialien beim Hersteller Angaben bezüglich des Emissionsverhaltens des Baustoffes anzufordern. Die Prüfungen sollten nach der neuen **EN 13419** durchgeführt worden sein.

**Tabelle 20** VOC-Emissionen verschiedener Bodenbeläge aus Prüfkammeruntersuchungen [5]

Material	Alkanale $\Sigma$ C5-C10 + Furfural	Alkanale $\Sigma$ C5-C10 + Furfural (Arith. Mittel)	Hexanal	Furfural	Benz- Aldehyd	$\Sigma$ VOC
Paneele (12 Proben)	1-98	21	2-68	2-7	1-9	5-170
Laminat (3 Proben)	28-41	34	18-30	<1	4-7	43-748
Fertigparkett (14 Proben)	2-38	9	1-30	<1	1-23	1-437
OSB (6 Proben)	64-720	372	23-630	<1-14	<3-50	200-1900

**Tabelle 21** Lösemittel bzw. VOC-Gehalt verschiedener Anstrichstoffe

Anstrichstoff	Lösemittel- bzw. VOC-Gehalt
Nitrolacke	70 %
Alkydharzlacke (auf Lösemittelbasis)	50 %
High-Solid-Lacke (Alkydharzlacke)	25 %
Naturharzlacke	20 %
Dispersionslacke Acryllacke mit Umweltzeichen	<10 %
Dispersionsfarben lösemittelhaltig	<2 %
Dispersionsfarben lösemittelfrei	<0,1 %
Dispersionsfarben emissions- und lösemittelfrei	<0,01 %

Tabelle 21 zeigt den Lösemittel- bzw. VOC-Gehalt verschiedener Anstrichstoffe. Es wird deutlich, dass auch hier durch die Auswahl des richtigen Produkts spätere Emissionen in die Raumluft verhindert werden können.

## Bauleitung

Der Bauleitung kommt eine entscheidende Rolle bei der Verhinderung von späteren Schadstoffemissionen in die Raumluft zu. Bei der Bauausführung muss zum einen darauf geachtet werden, dass die ausgeschriebenen Materialien wirklich eingebaut werden und nicht minderwertigere Baustoffe verwendet werden. Zudem sollte auf eine Verarbeitung gemäß den Herstellerangaben geachtet werden. Der Bauleiter sollte sich bei kritischen Materialien hierzu die Verarbeitungshinweise des Herstellers von der ausführenden Firma aushändigen lassen.

## Nutzer

Viele Luftverunreinigungen haben allerdings keine baulichen Ursachen, sondern werden erst von den Bewohnern verursacht. Eine Übersicht dazu gibt es in [5]. Daher sollte eine Betriebsanweisung für das Gebäude, die dem Nutzer beim Einzug übergeben wird, auch Hinweise zur Luftreinhaltung enthalten.

### 7.4.2 Frischluftbedarf

Wie im letzten Abschnitt gezeigt, wird die Raumluft durch unterschiedliche Verunreinigungen belastet. Das oberste Gebot ist immer die Vermeidung von Raumluftbelastungen indem die Quelle beseitigt wird. Da dies aber, insbesondere für die von den Menschen selbst ausgehenden Verunreinigungen, nicht vollständig möglich ist, müssen Wohnräume grundsätzlich belüftet werden.

#### 7.4.2.1 *DIN 1946-6*

Diese DIN-Norm regelt die Lüftung von Wohnungen. Dabei gibt es für den erforderlichen Luftwechsel zwei Bemessungsverfahren. Zum einen kann die nötige Zuluftmenge an Hand der Personenbelegung ermittelt werden. Dabei wird ein Wert von 30 m<sup>3</sup> Außenluft pro Person und Stunde festgesetzt. Das zweite Kriterium ist die nötige Abluft aus Räumen mit höherer Luftbelastung. Dies sind Küche (40 bzw. 60 m<sup>3</sup>/h), Bad (40 m<sup>3</sup>/h) und WC (20 m<sup>3</sup>/h) (vgl. [9]).

#### 7.4.2.2 *Einflussfaktoren auf den Frischluftbedarf*

##### *Luftfeuchte*

Messungen in einem Vier-Personen-Reihenhaus haben ergeben, dass pro Bewohner ca. 100 g Wasser pro Stunde an die Raumluft abgegeben werden (vgl. [8]). Dieser Wert setzt sich nicht nur aus der Feuchteabgabe des Körpers sondern z.B. auch aus Wäschetrocknen, Kochen und der Verdunstung durch Zimmerpflanzen zusammen.

Zu hohe Raumluftfeuchten können dazu führen, dass die Innenoberflächen von Außenbauteilen kritische Feuchtwerte erreichen und es zu Schimmelwachstum kommt. Dies wird umso wahrscheinlicher, je höher die Raumluftfeuchte und je niedriger die Oberflächentemperatur des Bauteils ist. Bei einer relativen Luftfeuchte von 60 % kann es schon bei Oberflächentemperaturen von 15,5 °C zu Schimmelbildung kommen (vgl. [8]). Solche Temperaturen werden gerade in schlecht gedämmten Altbauten häufig unterschritten. Wird die Luft dagegen zu trocken, so wird dies von vielen Personen als unangenehm empfunden.

Die Fähigkeit von Baustoffen, Feuchte zu speichern, kann genutzt werden um zu verhindern, dass die Raumluft extrem trocken oder extrem feucht wird. Kurzzeitige Schwankungen können durch sogenannte „Sorptions“ in oberflächennahen Bauteilen abgepuffert werden (vgl. [22]).

#### *Schadstoffe und CO<sub>2</sub>*

Für die Schadstoffe Formaldehyd, flüchtige organische Substanzen (VOC), Radon und CO<sub>2</sub> liegen Messungen aus Passivhausneubauten vor, die belegen, dass bei einem durchschnittlichen Luftwechsel nach DIN 1946-6 die zulässigen Grenzwerte in normal genutzten Wohnungen deutlich unterschritten werden. Für CO<sub>2</sub> blieben die Werte fast immer unter der von Max von Pettenkofer formulierten Grenze von 1000ppm (DIN 1946-6: 1500ppm) (vgl. [10]).

#### *Gerüche*

Versuche, den Luftwechsel bei Abwesenheit der Bewohner auf Werte unter den DIN-Vorgaben abzusenken (0,125-facher Luftwechsel pro Stunde), führten zu dem Ergebnis, dass dann die Luft bei der Rückkehr der Bewohner subjektiv als nicht frisch empfunden wird. Bei einem etwa 0,3-fachen Grundluftwechsel gab es dagegen keine störenden Geruchsempfindungen (vgl. [10]).

#### 7.4.2.3 *Fazit*

Der von der DIN 1946-6 festgelegte Auslegungs-Luftwechsel von 30 m<sup>3</sup> / (Person\*h) wurde durch Forschungsergebnisse als sinnvoll bestätigt (vgl. [8]) und sollte auch in der Planung zugrunde gelegt werden. Sollte nach dem Einbau einer Lüftungsanlage die Luft von den Bewohnern als zu trocken empfunden werden, sollte die Möglichkeit bestehen, die Zuluftmenge etwas zu reduzieren. Auf diese Weise kann die Luftfeuchte erhöht werden.

### 7.4.3 **Lüftungswärmeverlust**

Bei der Ermittlung der Lüftungswärmeverluste muss zwischen einer freien Lüftung über Fugen bzw. gekippte oder geöffnete Fenster und kontrollierter Lüftung mit einer Lüftungsanlage unterschieden werden. Bei freier Lüftung ist der Lüftungswärmeverlust grundsätzlich nicht exakt zu bestimmen, da er von vielen Faktoren abhängt, für die meist keine genauen Annahmen getroffen werden können. Dazu gehört vor allem das Lüftungsverhalten des Nutzers. Welchen Anteil hat die Fugenlüftung (Luftdichtigkeit, Windverhältnisse, usw.)? Da bei der freien Lüftung naturgemäß die Wärme der Fortluft nicht wieder genutzt werden kann, verursacht diese bei gleicher Luftwechselrate immer einen höheren Lüftungswärmeverlust als eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.

Um verschiedene Lüftungsarten zu vergleichen, kann außer dem nominalen (tatsächlichen) Luftwechsel noch der Begriff des energieäquivalenten und des schadstoffäquivalenten Luftwechsels verwendet werden (vgl. [16]).

**„Energieäquivalenter“ und  
„schadstoffäquivalenter“  
Luftwechsel**

Im Folgenden werden die Auswirkungen verschiedener Lüftungsarten auf den Lüftungswärmeverlust einzeln dargestellt. In der Realität kommen diese natürlich meist in Kombination vor.

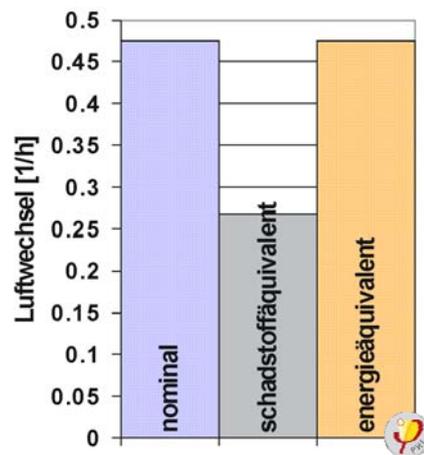
### 7.4.3.1 Wärmeverluste durch verschiedene Lüftungsarten

#### Fugenlüftung

Der schadstoffäquivalente und der energieäquivalente Luftwechsel sind bei reiner Fugenlüftung nahezu gleich dem nominalen Luftwechsel. Allerdings ist hier für einen ausreichenden durchschnittlichen Luftaustausch (der dann allerdings je nach Umgebungsbedingungen temporär stark schwankt) eine sehr schlechte Luftdichtigkeit der Gebäudehülle von  $n_{50} = 5$  1/h nötig. Der Lüftungswärmeverlust ist bei dieser hohen Gebäudeundichtigkeit sehr hoch und liegt bei ca. 22 kWh/m<sup>2</sup>a (vgl. [16]).

#### Lüftung durch gekippte Fenster

Eine relativ ineffiziente Form der Lüftung ist es die Fenster mehrmals täglich für einige Zeit gekippt zu halten (siehe Abbildung 155). Tagsüber wird dann bei noch recht guter Luftqualität erneut gelüftet, während nachts während der acht Stunden ohne Lüftung die Luftqualität immer schlechter wird. Daher ist hier der schadstoffäquivalente Luftwechsel geringer als der nominale Luftwechsel. Dies hat eine durchschnittlich eher mäßige Luftqualität zur Folge. Dennoch steigt der Lüftungswärmeverlust auf Grund des recht hohen nominalen (=energieäquivalenten) Luftwechsels auf 30 kWh/m<sup>2</sup>a (vgl. [16]).



**Abbildung 155 Äquivalente Luftwechsel, wenn dreimal täglich für 2 bis 3 Stunden die Fenster gekippt werden (Quelle: PHI, [16])**

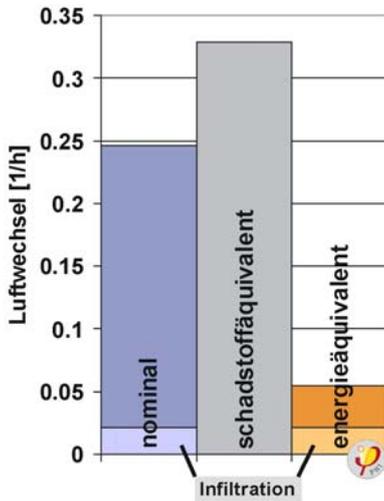
#### Stoßlüftung

Im Vergleich zur Kipplüftung erzielt man durch eine mehrmals täglich vorgenommene, kurze Stoßlüftung bessere Ergebnisse. Um eine ausreichende Luftqualität zu gewährleisten, muss mindestens 4-mal täglich für je ca. 5 Minuten gelüftet werden. Die jährlichen Lüftungswärmeverluste liegen dann bei ca. 22 kWh/m<sup>2</sup>a (vgl. [16]).

#### Kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung (Passivhauslüftung)

Die kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung in Verbindung mit einer sehr dichten Gebäudehülle ist eine sehr effiziente Form der Lüftung, sowohl im Bezug auf die Luftqualität als auch auf den Energieverbrauch (Abbildung 156). Der Schadstoffäquivalente Luftwechsel ist hier höher als der nominale Luftwechsel, da die Luftverunreinigungen vor allem in den Ablufträumen (Küche, Bad, WC) entstehen wo sie bald abgeführt werden und nicht in die

Wohnräume (Zuluftzone) gelangen können. Durch die Wärmerückgewinnung ist der energieäquivalente Luftwechsel wesentlich kleiner als der nominale Luftwechsel. Der Infiltrationsluftwechsel ist allerdings im energieäquivalenten Luftwechsel genauso groß wie im nominalen Luftwechsel weil er an der Wärmerückgewinnung vorbei geht. Die Lüftungsverluste liegen bei dieser Variante nur noch bei 2,56 kWh/(m<sup>2</sup>a) (vgl. [16]).



**Abbildung 156** Äquivalente Luftwechsel bei kontrollierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung 85 % (hier inkl. Infiltrationsluftwechsel zugehörig zu  $n_{50} = 0,3$  1/h) (maschineller Luftwechsel nur 0,225 1/h – diese rel. niedrige Luftwechselrate hat sich bei dem untersuchten Gebäude in der Praxis bewährt) (Quelle: PHI [16])

#### 7.4.3.2 Berechnung der Lüftungswärmeverluste

Die jährlichen Lüftungswärmeverluste eines Gebäudes können mit der folgenden Formel berechnet werden (vgl. [17]):

$$Q_L = V_L \cdot n_L \cdot c_{\text{Luft}} \cdot G_t$$

dabei ist:

- $Q_L$ : Lüftungswärmeverlust
- $V_L$ : wirksames Luftvolumen des Gebäudes
- $n_L$ : energetisch wirksamer (energieäquivalenter) Luftwechsel

$$\text{mit } n_L = n_{L, \text{Anlage}} \cdot (1 - \Phi_{\text{WRG}}) + n_{L, \text{Rest}}$$

- $n_{L, \text{Anlage}}$ : mittlerer Luftwechsel der Lüftungsanlage
- $\Phi_{\text{WRG}}$ : Wärmebereitstellungsgrad des Lüftungssystems
- $n_{L, \text{Rest}}$ : restlicher mittlerer Luftwechsel durch Infiltration etc.

- $c_{\text{Luft}}$ : spezifische Wärmespeicherfähigkeit der Luft: 0,33 Wh/(m<sup>3</sup>K)
- $G_t$ : Heizgradstunden (Zeitintegral der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen): 84 kWh/a (deutsches Standardklima)

## 7.5 Feuchteschutz

### 7.5.1 Problematik hoher Feuchtigkeiten

Eine hohe Luftfeuchtigkeit im Gebäudeinneren bringt verschiedene Problematiken mit sich. Bezüglich der Bauteile treten Probleme vor allem durch Kondensatbildung bei Unterschreitung des Taupunkts an den Oberflächen auf. Niedrige Oberflächentemperaturen kommen bei schlechtem Wärmeschutz oder signifikanten Wärmebrücken besonders leicht zustande. Hohe Feuchtigkeiten und Kondensat gefährden außerdem die Dauerhaftigkeit von Bauteilen z.B. wegen Korrosionsgefahr.

Die häufigste Ursache für Bauschäden ist ein unzureichender Schutz gegen Feuchtigkeit. Die wichtigste Devise zur Gewährleistung eines gesunden und hygienischen Wohnraums und für den Erhalt der Bausubstanz ist daher:

- **Design dry!** (Plane trockene Gebäude!)
- **Build dry!** (Halte das Gebäude während der Errichtung trocken!)
- **Keep the building dry!** (Halte das Gebäude nach der Fertigstellung weiterhin trocken!)

Hohe relative Raumlufffeuchten fördern das Wachstum von Schimmel. Auch aus diesem Gesichtspunkt ist also darauf zu achten, dass an keiner Stelle im Gebäude (besonders an den Oberflächen) für längere Zeiträume hohe Feuchten zustande kommen können.

Alle Baustoffe haben einen gewissen Feuchtegehalt und stehen durch Ad- und Desorption in direktem Austausch sowohl mit der Raum- als auch mit der Außenluft, wodurch eine natürliche periodische Auffeuchtung und Austrocknung im Tages- und Jahresverlauf auftritt (vgl. 7.4.2.2). Durch die Diffusion von der Raumluff durch die Bauteile wird zusätzliche Feuchte in die Aufbauten transportiert, welche bei den kühleren Temperaturen nach außen hin auskondensieren kann. Der Behaglichkeitsbereich für die Raumlufffeuchte ist nicht eindeutig definiert, da er von vielen Faktoren beeinflusst wird. Empfehlenswert sind relative Raumlufffeuchten zwischen 30 und 70 % [72].

### 7.5.2 Feuchtequellen

Als die **Herstellungs- oder Anfangsfeuchte** bezeichnet man die im Baustoff schon zum Zeitpunkt des Einbaus vorhandene Feuchte. Dies kann zum Beispiel Anmachwasser des Innenputzes sein. Erhöhte Materialfeuchte kann auch durch nicht regengeschützte Lagerung auf der Baustelle verursacht werden.



**Abbildung 157** Schwarzwälder Bauernhaus um 1900. Die Holzkonstruktion wurde durch weit auskragende Dachüberstände vor Schlagregen geschützt. [25]

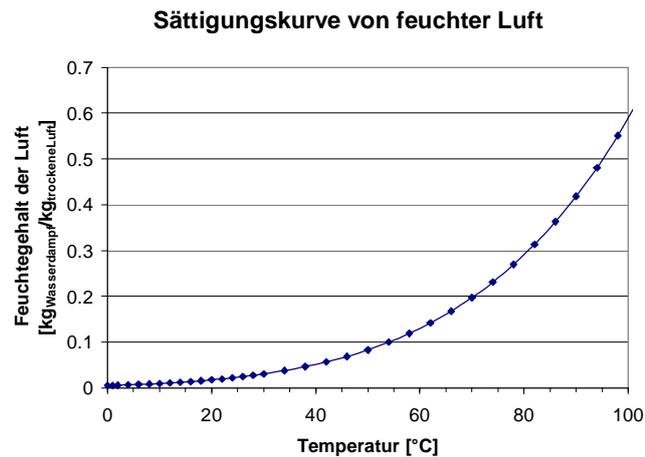
Sehr große Wassermengen können durch **Schlagregenbelastung** in die Außenwand gelangen. Eine schlagregensichere Ausführung der Fassade ist daher eine Grundvoraussetzung für die Verhinderung von Bauschäden. Der Schlagregenschutz von Holzbauten wurde traditionell häufig durch große Dachüberstände gewährleistet (siehe Abbildung 157). An der Fassade selbst muss der Schlagregenschutz durch eine dichte Ausführung sowohl in der Fläche (Putzrisse) als auch an den Anschlüssen an Fenster usw. sichergestellt werden. Putze und Beschichtungen können einen sehr guten Schlagregenschutz darstellen. Nach DIN 4108-3 (vgl. [26]) und DIN 18550 (vgl. [84]) werden Anforderungen für deren Regenschutzwirkung aufgestellt.

Außenwände müssen grundsätzlich vor **aufsteigender Grundfeuchte** geschützt werden. Dies geschieht durch den Einbau einer Horizontalsperre in das Mauerwerk. Im Altbau ist eine solche Horizontalsperre unter Umständen nicht vorhanden. Bei übermäßiger Belastung durch aufsteigende Grundfeuchte gibt es verschiedene Verfahren, mit denen eine solche Horizontalsperre nachgerüstet werden kann.

Weitere wichtige Mechanismen des Feuchteintrags in Bauteile sind die **Wasserdampfdiffusion** (Abschnitt 7.5.5.1) und die **Wasserdampfkonvektion** (Abschnitt 7.5.5.4).

### 7.5.3 Feuchteaufnahme von Luft

Die Luft ist ein Gasgemisch, sie setzt sich zusammen aus u.a. Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid, Argon und Wasserdampf. Der Anteil des Wasserdampfs bestimmt die Luftfeuchte; ist z.B. kein Wasserdampf enthalten, so spricht man von trockener Luft. Verdunstungs- und Kondensationsraten sind von verschiedenen Faktoren abhängig, z.B. von der Temperatur, dem Druck und dem Feuchtegrad der Luft. Der Sättigungsgrad der Luft ist stark temperaturabhängig (siehe Abbildung 158).



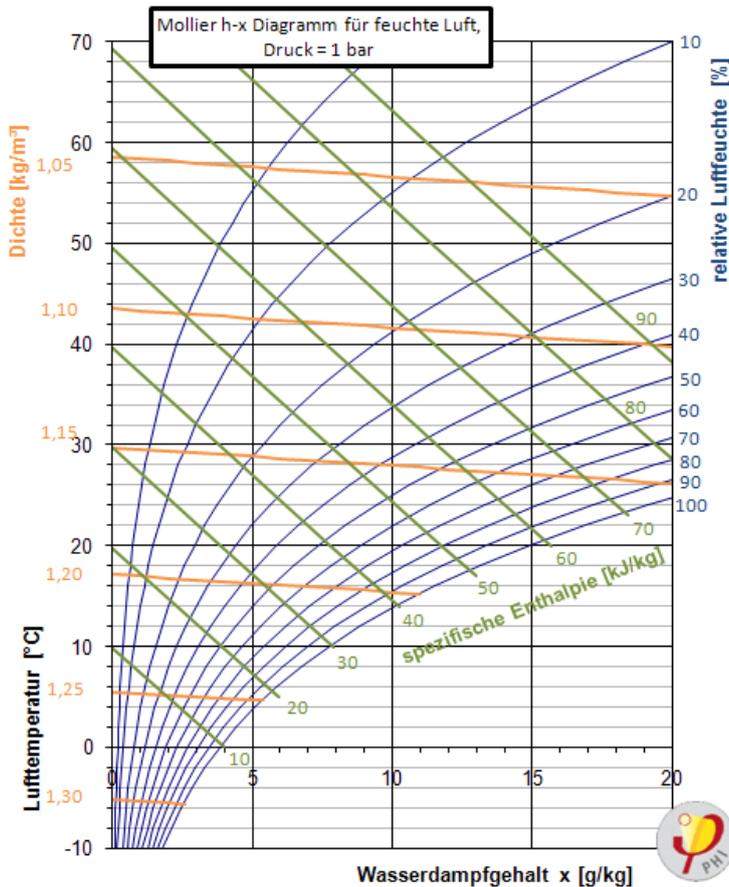
**Abbildung 158: Der maximale Feuchtegehalt von Luft. (Quelle: PHI)**

Im Folgenden sind verschiedene Begriffe aufgelistet, die üblicherweise verwendet werden, um den Feuchtegehalt der Luft zu beschreiben:

- Die relative Feuchte ( $\varphi$ ) beschreibt den momentanen Wasserdampfgehalt der Luft im Verhältnis zur Sättigungswasserdampfmenge von Luft der gleichen Temperatur. Gesättigte Luft hat eine relative Feuchte von 100 %.
- Die absolute Feuchte ( $\rho_w$ ) gibt in [g/m<sup>3</sup>] die tatsächliche Wasserdampfmenge, die in einem gegebenen Volumen von feuchter Luft enthalten ist, an.
- Die spezifische Luftfeuchtigkeit ( $s$ ) ist das Verhältnis der Wasserdampfmenge zur Menge der feuchten Luft.
- Der Dampfdruck ( $p_D$ ) des Wasserdampfes ist ein Maß für die Feuchtigkeit der Luft. Ein hoher Partialdruck spiegelt eine hohe Luftfeuchtigkeit wieder.
- Der Taupunkt ist die Temperatur, bei der Luft mit einem konstanten Feuchtegrad Sättigung erreicht, d.h. beginnt zu kondensieren. Wenn also feuchte Luft mit einem bestimmten Feuchtegrad an eine Oberfläche angrenzt, die eine Temperatur unter dem Taupunkt aufweist, kommt es zum Tauwasserausfall.

Da die Raumluft sich im Allgemeinen in einem ungesättigten Zustand befindet, kann sie aus verschiedenen Feuchtequellen über Verdunstung weiteren Wasserdampf aufnehmen. Die erhöhte absolute Feuchte der Raumluft muss abgeführt werden, um hohe und unbehagliche Raumluftfeuchten zu vermeiden. Dies kann über einen Luftaustausch mit der Außenluft realisiert werden, da diese im Allgemeinen eine absolute Feuchte im geeigneten Bereich aufweist.

Feuchtezustandsänderungen von Luft können bei einem bestimmten Luftdruck mit Hilfe eines Mollier-Diagramms recht einfach nachvollzogen werden (Abbildung 159).



**Abbildung 159:** Mit Hilfe eines Mollier Diagramms lassen sich die Änderungen des Feuchtezustands der Luft leicht nachvollziehen. (Quelle: PHI)

**7.5.4 Feuchteaufnahme von Baustoffen**

Die Feuchte eines Baustoffs kann durch Wägung bestimmt werden, wenn die Dichte im trockenen Zustand bekannt ist. Dabei kann die Feuchte in Prozent der Masse ( $u_M$ ) oder des Volumens ( $u_V$ ) angegeben werden. Eine weitere übliche Angabe ist der Feuchtegehalt in Gramm pro Kubikmeter.

**Tabelle 22 Beispiele für volumenbezogene Baustofffeuchten (vgl. [20])**

Baustoff	Bauübliche Fechtigkeiten		max. möglich Feuchtigkeit
	üblich	maximal	
Ziegel	1 [Vol-%]	10...12 [Vol-%]	20 [Vol-%]
Porenbeton	3...4 [Vol-%]	ca. 30 [Vol-%]	80 [Vol-%]
Normalbeton	ca. 5 [Vol-%]	ca. 10 [Vol-%]	20 [Vol-%]

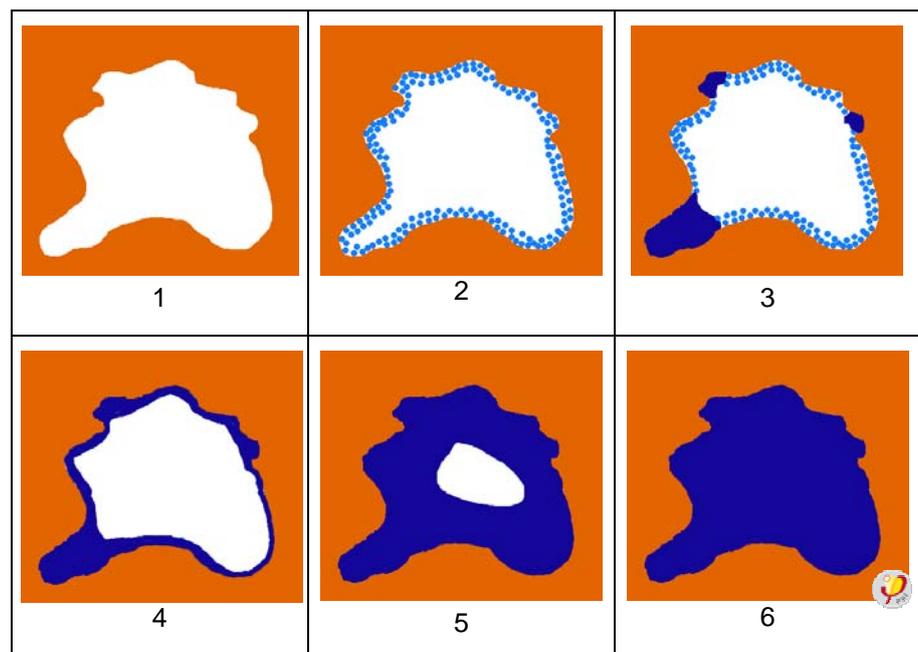
**Tip:**  
Die Internet-Datenbank **MASEA** ist eine umfangreiche Sammlung von Materialdaten für die energetische Altbausanierung. Sie enthält insbesondere auch Kennwerte zum feuchtetechnischen Verhalten historischer Baustoffe ([www.masea-ensan.com](http://www.masea-ensan.com)).

#### 7.5.4.1 Mechanismen der Feuchtespeicherung

Die meisten Baustoffe verfügen über Poren, die sich mit Wasser füllen können. Der Prozess der Wasseraufnahme erfolgt dabei in drei Stufen:

1. Durch die sogenannte **Sorption** können sich Wassermoleküle an der Porenwandung anlagern.
2. In der nächsten Stufe füllen sich kleinere Poren durch sogenannte **Kapillarkondensation** mit flüssigem Wasser. Den so maximal erreichbaren Wassergehalt bezeichnet man als **freien Wassergehalt**.
3. Nur wenn das Material längere Zeit unter Wasser gelagert oder der Taupunkt unterschritten wird, füllen sich alle Poren restlos mit Wasser (**Übersättigungsbereich**).

Mit Ausnahme von Schlagregenbelastung oder aufsteigender Grundfeuchte (Kapillarbereich) ist die wichtigste Feuchtequelle die Sorption von Feuchtigkeit aus der Raumluft (vgl. [20]). Unterschiedliche Materialien erreichen bei gleicher relativer Luftfeuchte verschiedene volumenbezogene Feuchten.



**Tabelle 23** Feuchtespeicherung in einer Baustoffpore: 1) Trockene Pore, 2) Sorbatschicht, 3) Kapillarkondensation, 4) Porenwandung vollständig mit Wasser benetzt, 5) freie Wassersättigung mit eingeschlossener Luftblase, 6) maximale Feuchte (Quelle: PHI, [20])

#### 7.5.4.2 Wasseraktivität ( $a_w$ -Wert)

Die Wasseraktivität eines Baustoffs eignet sich gut als Kriterium für die Wahrscheinlichkeit von Schimmelwachstum (siehe auch Abschnitt 7.5.1.) Der  $a_w$ -Wert gibt Aufschluss über das chemisch nicht gebundene Wasser (vgl. [21]).

### Wahrscheinlichkeit von Schimmelwachstum

## 7.5.5 Feuchtetransport

### 7.5.5.1 Diffusion

Ein wesentlicher Feuchtetransportmechanismus in Baustoffen ist die Wasserdampfdiffusion. Verschiedene Baumaterialien behindern den Diffusionsstrom unterschiedlich stark. Dies wird durch die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  in Relation zum Wasserdampfdiffusionswiderstand von Luft beschrieben. Gebrannter Vollziegel hat einen  $\mu$ -Wert von 10 und besitzt daher einen zehnmal höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand als Luft. Holz hat in Faserrichtung eine geringere Diffusionswiderstandszahl als quer dazu.

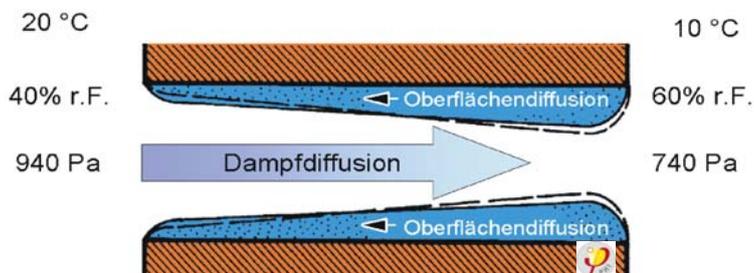
Multipliziert man diese Widerstandszahl mit der Schichtdicke des Bauteils, so erhält man dessen diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$ . Diese ist definiert als die Dicke der ruhenden Luftschicht, die den gleichen Wasserdampf-Diffusionswiderstand besitzt wie die betrachtete Bauteilschicht. Der  $s_d$  - Wert wird z.B. für die Charakterisierung von Dampfbremsschichten benutzt (siehe Abschnitt 7.5.6.). Bauteilschichten werden gemäß der folgenden Einteilung klassifiziert:

diffusionsoffen:	$s_d \leq 1,5 \text{ m}$
diffusionshemmend:	$0,5 \text{ m} < s_d < 1500 \text{ m}$
diffusionsdicht:	$s_d \geq 1500 \text{ m}$

### 7.5.5.2 Flüssigwassertransportmechanismen

#### Oberflächendiffusion

An den Wandungen von Kapillaren findet eine Anlagerung von Wassermolekülen durch Sorption statt. Bei ausreichender Feuchte bildet sich ein Sorbatfilm, der auf der Bauteilseite mit der höheren relativen Feuchte dicker ist. Bei ausreichender Filmdicke werden die Wassermoleküle beweglicher und wandern von Bereichen mit großer Filmdicke zu solchen mit geringer Filmdicke. Diese Bewegung kann abhängig von den Randbedingungen auch in einer der Dampfdiffusion entgegengesetzten Richtung stattfinden (siehe Abbildung 160).



**Abbildung 160** Transportrichtung von Wasserdampfdiffusion und Oberflächen- und Rückflächendiffusion in Abhängigkeit von Wasserdampfpartialdruck und relativer Feuchte (Quelle: PHI, [20])

**$\mu$ -Wert:**  
Wasserdampfdiffusions-  
widerstandszahl

**$s_d$ -Wert:**  
Diffusionsäquivalente  
Luftschichtdicke

### *Kapillarleitung*

Durch die kapillare Saugspannung kann flüssiges Wasser in kapillarporösem Material transportiert werden. Der Durchmesser der Kapillare liegt dabei zwischen 100 nm und 0,1 m. Relevant ist die Kapillarleitung zum Beispiel für den Transport aufsteigender Grundfeuchte.

#### 7.5.5.3 *Oberflächenfeuchteübergang*

An der Oberfläche eines Bauteils kann ein Feuchtetransport vom Bauteil an die Luft oder umgekehrt stattfinden. Der Vorgang des Feuchteübergangs ist dabei auf eine Grenzschicht von wenigen Millimetern Dicke zwischen der Raumluft und der Bauteiloberfläche beschränkt (vgl. [23]).

#### 7.5.5.4 *Dampfkonvektion*

Unter Dampfkonvektion versteht man den Transport von Wasserdampf (mit Luft vermischt) in Folge von Druckunterschieden. Wenn warme Luft durch eine Fuge in einem Außenbauteil nach außen strömt, kann es innerhalb der Konstruktion zu Tauwasseranfall kommen. Die dabei in die Konstruktion eingebrachten Feuchtigkeitsmengen sind sehr viel größer als bei der Wasserdampfdiffusion.

Während der kalten Jahreszeit ist das Dach durch die Thermik im Gebäude besonders tauwassergefährdet.

### 7.5.6 **Dampfbremse und diffusionsoffene Luftdichtheitsebene**

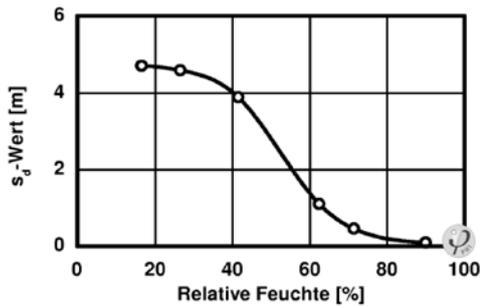
#### 7.5.6.1 *Dampfbremse*

Eine Dampfbremse hat die Funktion die Dampfdiffusion durch oder in ein Bauteil der Gebäudehülle zu verringern. Meist handelt es sich dabei um eine Folie, aber auch andere Materialien, wie zum Beispiel bestimmte Holzwerkstoffplatten, können als Dampfbremse fungieren. Der  $s_d$ -Wert einer Dampfbremse (siehe Abschnitt 7.5.5.1) muss jeweils auf die spezifischen Gegebenheiten der Konstruktion abgestimmt sein. Der Begriff Dampfsperre wurde für Schichten mit einem  $s_d$ -Wert über 100 verwendet.

Seit einigen Jahren sind feuchteadaptive Dampfbremsen erhältlich. Sie haben bei niedriger relativer Materialfeuchte einen sehr viel höheren  $s_d$ -Wert als bei hoher Feuchte (siehe Abbildung 161). Da in Gebäuden im Winter meist eine geringere relative Luftfeuchte als im Sommer vorliegt, kann diese Eigenschaft für Konstruktionen genutzt werden, bei denen im Winter ein Feuchteeintrag verhindert werden soll. Im Sommer wenn der  $s_d$ -Wert auf Grund der höheren Luftfeuchte sinkt kann die Konstruktion dennoch zum Innenraum hin austrocknen.

**Tauwassergefahr besteht, wenn ein Bauteil von der warmen zur kalten Seite von Luft durchströmt wird.**

**Durch die Thermik im Gebäude ist das Dach besonders tauwassergefährdet.**



**Abbildung 161** *Abhängigkeit des s<sub>d</sub>-Werts einer feuchteadaptiven Dampfbremse auf Polyamidbasis von der relativen Materialfeuchte, Messung bei 23 °C (Messwert nach Künzel, H.) [28]*

Dieser Vorteil wird zum Beispiel gerne für Dachkonstruktionen mit nicht unterlüfteter Dachdeckung (Warmdach) mit einer außen liegenden dampfdichten Dichtungsbahn und einer innen liegenden feuchteadaptiven Dampfbremse genutzt. Für diffusionsdichte Innendämmungsaufbauten sind feuchteadaptive Dampfbremsen nur bedingt geeignet, weil der hierfür wünschenswerte s<sub>d</sub>-Wert von  $\geq 15$  nicht erreicht wird. Es kann dadurch zu einer stärkeren Aufwechtlung der Konstruktion im Winter kommen.

**Warmdach mit feuchteadaptiver Dampfbremse**

#### 7.5.6.2 Diffusionsoffene Luftdichtheitsebene

In einigen wenigen Fällen kann es sinnvoll sein, die innenliegende Luftdichtheitsebene eines Gebäudes diffusionsoffen auszuführen. Bei der Altbausanierung ist dies vor allem bei der Anbringung einer Innendämmung an eine nicht ausreichend schlagregengeschützte Fassade nötig. In die Konstruktion eingebrachte Feuchtigkeit kann bei diffusionsoffener Innenbeplankung mit kapillaraktiven Dämmstoffen abgeführt werden (vgl. 4.2.2.1). Es muss aber immer auf eine sehr gute Luftdichtheit zur Raumluft Wert gelegt werden, da sonst zu hohe Feuchtelasten durch Dampfkvektion in die Konstruktion gelangen.

**Auch bei diffusionsoffenem Aufbau sehr gute Luftdichtheit wichtig**

Tabelle 24 zeigt die Luftdurchlässigkeit und den Wasserdampfdiffusionswiderstand verschiedener Baustoffe. Für eine diffusionsoffene Konstruktion, wie sie oben beschrieben wurde, sollte ein Höchstwert der Luftdurchlässigkeit von  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  bei 50 Pa nicht überschritten werden.

Material	Luftdurchlässigkeit [m³/m²] bei 50 Pa	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (trocken) nach DIN 12524	s <sub>d</sub> -Wert [m]	bei Dicke [mm]
Kalk-Zement-Putz	0,002 - 0,05	10	0,1	10
Kalk-Zement-Putz	0,002 - 0,05	10	0,02	20
Ziegel	0,001 - 0,05	16	3,84	240
Kalksandstein	0,001 - 0,05	20	4,8	240
Porenbeton	0,06 - 0,35	10	2,4	240
Gipskartonplatte	0,002 - 0,03	10	0,1	10
Sperrholz	0,004 - 0,02	150-250	2,4-4	16
Spanplatten, MDF	0,05 - 0,22	10	0,16	16
Holzweichfaserplatten	2 - 3,5	5	0,08	16
Holz diverse	- 0,003	50-200	0,8-3,2	16
PE-Folie	0,0015	100 000	50	0,15
Bitumenpappe	0,008 - 0,02	50 000	100	2
Baupappe	0,01 - 3	10 000	2,3	0,23
Mineralwolle	13 - 150	1	0,3	300

**Tabelle 24** *Luftdurchlässigkeit und Wasserdampfdiffusionswiderstand einiger Baustoffe (im nicht eingebauten Zustand, ohne Berücksichtigung von Fugen etc.) (vgl. [43] [44])*

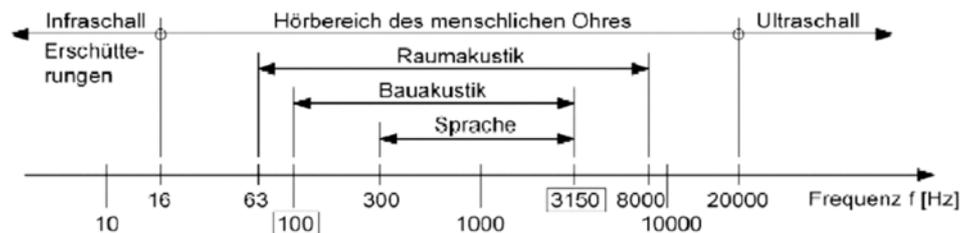
## 7.6 Schallschutz

### 7.6.1 Grundlagen

#### 7.6.1.1 Schall

**Bereich der Bauakustik:  
100 Hz – 3150 Hz**

Als Schall bezeichnet man mechanische Wellen eines elastischen Mediums im Hörbereich (Frequenz ca. 16 Hz bis 16 kHz). In der Bauakustik wurde bislang üblicherweise nur der Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 kHz betrachtet. Obwohl die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres unter 100 Hz mit weiter abnehmender Frequenz immer geringer wird, können in bestimmten Fällen, z.B. beim Einsatz von Wärmepumpen (siehe dazu Abschnitt 7.6.4.2), auch durch den tieffrequenten Bereich Störungen verursacht werden.



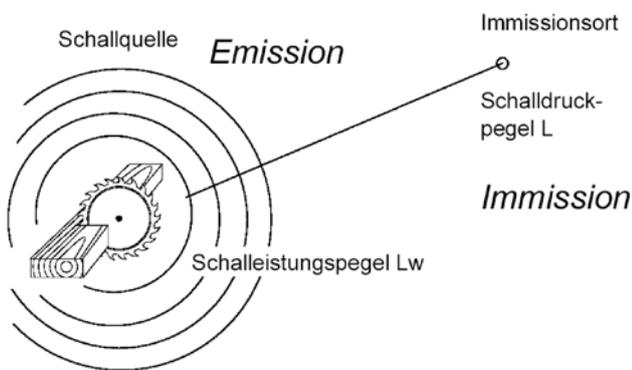
**Abbildung 162** *Frequenzbereiche [38]*

Im Baubereich wird unterschieden zwischen (vgl. [38]):

- **Luftschall:** sich in der Luft ausbreitender Schall
- **Körperschall:** sich in festen Stoffen ausbreitender Schall
- **Trittschall:** der Schall, der z.B. beim Begehen einer Decke als Körperschall entsteht und teilweise als Luftschall in einen darunter liegenden Raum abgestrahlt wird

### 7.6.1.2 Schallpegel

Beim Luftschall handelt es sich um einen Wechseldruck, der den statischen Luftdruck überlagert. Dieser wird als **Schalldruck** [Pa] bezeichnet. Der Schalldruck wird am Immissionsort gemessen und nimmt normalerweise mit der Entfernung zur Schallquelle ab. Die **Schalleistung** [W] bewertet dagegen den gesamten von einer Schallquelle abgestrahlten Schall (Emission).



**Abbildung 163 Begriffserläuterung Emission / Immission sowie Schalleistungs- bzw. Schalldruckpegel [38]**

Aus dem Schalldruck leitet sich der Schalldruckpegel ab. Er bezeichnet die Differenz des Schalldrucks zur menschlichen Hörschwelle welche per Definition bei  $20 \mu\text{Pa}$  entsprechend 0 Dezibel festgelegt wurde. Die Schmerzgrenze liegt bei 120 dB entsprechend 63 Pa Schalldruck. Eine Schallpegelerhöhung um 10 dB entspricht ungefähr einer Verdoppelung der wahrgenommenen Lautstärke.

### 7.6.1.3 Bewertete Schallpegel

Wie oben schon erwähnt, hört der Mensch unterschiedlichen Schallfrequenzen unterschiedlich gut. Um dieser Frequenzabhängigkeit gerecht zu werden, gibt es *bewertete* Schalldruckpegel. Abhängig von der Schallfrequenz wird ein Korrekturwert addiert oder subtrahiert, um der menschlichen Hörweise möglichst nahe zu kommen. Da das Hörempfinden bei unterschiedlichen Frequenzen aber auch von der Lautstärke abhängig ist – tiefe Frequenzen werden bei höheren Lautstärken relativ gesehen besser wahrgenommen als bei niedrigen Lautstärken – gibt es verschiedene Frequenzbewertungskurven für verschiedene Lautstärkepegel. Im Bereich der Bauakustik ist heute vor allem die A-Bewertung in Gebrauch.

**Primäre und sekundäre  
Schallschutzmaßnahmen****7.6.1.4 Schallschutz**

Bei den Schallschutzmaßnahmen unterscheidet man Primär- und Sekundärmaßnahmen. Primärmaßnahmen setzen an der Schallquelle an und versuchen die Schallentstehung zu minimieren, indem zum Beispiel ein besonders leises Lüftungsgerät eingebaut wird. Sekundärmaßnahmen versuchen die Übertragung von schon entstandenem Schall zum Hörer zu minimieren. Befinden sich Schallquelle und Hörer im gleichen Raum, geschieht dies durch Schallabsorption – wenn sie sich in unterschiedlichen Räumen befinden durch Schalldämmung. Primärmaßnahmen sind in den meisten Fällen kostengünstiger als Sekundärmaßnahmen. Der Planer sollte daher immer zumindest auf eine Reduktion der Schallemissionen an der Quelle drängen.

*Schallschutzsimulation (vgl. [40])*

Die DIN EN 12354-1 [41] bietet ein Verfahren zur Berechnung der Luftschalldämmung zwischen Räumen an. Dabei wird nicht nur die Übertragung durch die Wand selbst, sondern auch die Flankenübertragung berücksichtigt.

Die Norm ermöglicht dabei einerseits ein vereinfachtes Verfahren, basierend nur auf Einzelangaben, sowie ein erweitertes Verfahren, welches eine Betrachtung der Terzspektren ermöglicht. Das vereinfachte Verfahren wird von einigen Anbietern kostenlos zur Verfügung gestellt (Bsp.: KS-Schallschutzrechner; <http://www.kalksandstein.de>), allerdings erlaubt nur das detaillierte Verfahren (z. B.: BASTIAN <http://www.datakustik.de>) entsprechende Dimensionierungen für den tieffrequenten Bereich durchzuführen.

**7.6.2 Schallschutz von Außenbauteilen, insbesondere in Verbindung mit Wärmeschutzmaßnahmen****Mindestschalldämmwerte  
für Außenbauteile nach  
DIN 4109**

Bei Wohngebäuden, die in einem lärmbelasteten Gebiet liegen, müssen die Außenbauteile einen ausreichend hohen Schallschutz aufweisen, um eine lärmbedingte Belästigung oder Gesundheitsgefährdung der Bewohner zu verhindern. DIN 4109 [39] legt in Abhängigkeit vom Außenlärmpegel Mindestschalldämmwerte für Außenbauteile fest (siehe Tabelle 25). Je nach Verhältnis von Außenbauteilfläche zur Grundfläche des Raumes kann dabei eine Korrektur um  $-3$  bis  $+5$  dB erfolgen.

**Tabelle 25** Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen von Aufenthaltsräumen in Wohnungen, Auszug aus DIN 4109, Tabelle 8 [39]

Lärmpegelbereich	„Maßgeblicher Außenlärmpegel“ [dB(A)]	erforderlicher $R'_{w,res}$ des Außenbauteils [dB]
I	bis 55	30
II	56-60	30
III	61-65	35
IV	66-70	40
V	71-75	45
VI	76-80	50
VII	>80	Anforderungen aufgrund der örtlichen Gegebenheiten festlegen

#### 7.6.2.1 Außendämmung

Entgegen der verbreiteten Vorstellung werden durch das Aufbringen einer Wärmedämmung auf eine Wand im Zuge einer Gebäudesanierung die Schallschutzeigenschaften dieser Wand nicht zwangsläufig verbessert. Bei der Dämmung mit einem Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) kann abhängig von der jeweiligen Ausführung sogar das Gegenteil der Fall sein. Bei einem WDVS handelt es sich schalltechnisch um einen 2-Massenschwinger (Masse 1: Putz; Masse 2: Massive Wand) mit Kopplung über eine Feder (Wärmedämmmaterial). Bei diesem kann im Bereich um die Resonanzfrequenz die Schalldämmwirkung durch einen Resonanzeffekt herabgesetzt werden. Daher ist es sinnvoll, in Fällen von bestehender oder erwarteter Außenlärmbelastung eines Sanierungsobjekts eine Schallschutzsimulation nach DIN 12354-1 [41] mit einer dafür geeigneten Software durchzuführen. Für die Simulation benötigt man Angaben über die Schallschutzeigenschaften der jeweiligen Bauteile. Diese sind für WDVS der Bauaufsichtlichen Zulassung des verwendeten Systems zu entnehmen.

Wird die Wärmedämmung nicht verputzt, sondern mit einer vorgehängten Fassade bekleidet, so verbessert sich im Gegensatz zu einem WDVS der Schallschutz durch diese Maßnahme in jedem Fall (vgl. [45]).

Folgende Faktoren beeinflussen das schalltechnische Verhalten eines WDVS:

##### *Dynamische Steifigkeit der Dämmschicht*

Je geringer die dynamische Steifigkeit der Dämmung, desto besser der Schallschutz. Mineralfaser hat eine viel geringere dynamische Steifigkeit als EPS-Dämmplatten („Styropor“) und führt daher grundsätzlich zu einer Verbesserung der Schalldämmeigenschaften der Wand. Inzwischen sind auch sogenannte elastifizierte EPS-Dämmstoffe auf dem Markt, deren dynamische Steifigkeit durch Be- und Entlastung in mechanischen Pressen reduziert wurde. Diese können ebenfalls zu einer leichten Verbesserung der Schallschutzeigenschaften der Wand führen. Grundsätzlich wird auch durch

**Nachträgliche Außendämmung mit einem WDVS kann den Schallschutz verschlechtern.**

**Faktoren für den Einfluss des WDVS auf den Schallschutz der Wand**

dickere Dämmstoffstärken die dynamische Steifigkeit verringert und damit der Schallschutz verbessert.

#### *Putzdicke*

Wird anstatt eines relativ dünnen Kunstharzputzes ein dickerer mineralischer Putz auf dem WDVS verwendet, so verbessern sich ebenfalls die Schalldämmeigenschaften der Wand.

#### 7.6.2.2 *Innendämmung*

Bei der Innendämmung ist die Wahrscheinlichkeit für eine Verschlechterung des Schallschutzes durch auftretende Resonanzeffekte höher, da meist nur geringere Dämmdicken und abschließende Massen Verwendung finden. Werden an einer Wand Dämmschichten mit hoher Steifigkeit (Hartschaum) angebracht, die dann durch dünne Schichten wie Putz, Gipskarton o.ä. abgedeckt werden, wird der Schallschutz in der Fläche deutlich verschlechtert. Dagegen kann der Schalldämmwert der Wand verbessert werden, wenn weich federnde Dämmschichten mit einer biegeeweiche Schale (z.B. Gipskartonbeplankung zur Entkopplung von der Wand auf Dämmstreifen befestigt) kombiniert werden (vgl. [45]).

#### 7.6.2.3 *Fenster*

Da Fenster normalerweise eine sehr viel schlechtere Schalldämmung aufweisen als Wände, stellen sie bei den im Wohnbau üblichen Lochfassaden den maßgeblichen Ansatzpunkt für eine Verbesserung der Schalldämmeigenschaften der Außenbauteile dar.

**Evtl. Verschlechterung  
des Schallschutzes durch  
nachträgliche  
Innendämmung**

**Fensterqualität und  
-einbau sind  
entscheidend für den  
Schallschutz**



**Abbildung 164** Mit passivhaustauglicher Schallschutzverglasung (Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit 1xVSG) und einem luftdichten Fenstereinbau konnte in dieser stark durch Verkehrslärm belasteten Altbausituation eine neue Aufenthaltsqualität im Innenraum erreicht werden. (Quelle: PHI)

Das Schalldämmmaß eines Fensters hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab:

- **Masse:** Je dicker die Scheiben, desto höher der Schalldämmwert.
- **unterschiedliche Scheibendicken** mit unterschiedlicher Resonanzfrequenz oder Verwendung einer Verbundglasscheibe.
- **Scheibenabstand:** mindestens 10 mm (vgl. [46]).
- **Luftdichtigkeit**
- **Schallnebenwege** : z.B. durch undichte Rollladenkästen (vgl. [46]).
- **Gasfüllung:** Die Verwendung von Gasen mit höherem spezifischem Gewicht als Luft kann den Schalldämmwert der Scheiben erhöhen.
- Scheibengröße und Format

Nach VDI 2719 (vgl. [134]) werden Fenster nach ihren bewerteten Schalldämmmaßen in Schallschutzklassen von 1 bis 6 eingeteilt.

Hinweis für die Verwendung von Verbund-Sicherheitsglas (VSG) in Dreifachwärmeschutzverglasungen: Es sollte vermieden werden, dass ein Scheibenzwischenraum verringert wird, um die größere Dicke der Scheibe aufzunehmen, da dies zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führt. Eine Alternative ist es, das gesamte Verglasungspaket um die nötige Stärke dicker zu machen. Allerdings können nicht alle Fensterrahmen diese dickere Verglasung aufnehmen. Unabhängig davon wird durch den insgesamt größeren Glasquerschnitt und die Folie des VSG der Energiedurchlassgrad (g-Wert) der Verglasung verringert.

**Schallschutzanforderungen können zu einer Verschlechterung des Wärmeschutzes führen.**

### 7.6.3 Schallschutz zwischen Wohnungen

Die DIN 4109 (vgl. [39]) legt Grenzwerte für den minimalen Schallschutz von Bauteilen zwischen Wohnungen für den Luftschall und den Trittschall fest. So muss z.B. eine Wohnungstrennwand einen Luftschalldämmwert von mindestens 53 dB haben. Es werden Werte für Decken, Wände, Treppen und Türen festgesetzt.

**Minimaler Luft- und Trittschallschutz von Bauteilen nach DIN 4109**

Grundsätzlich gibt es folgende Möglichkeiten der Schallübertragung zwischen Wohneinheiten:

- Luftschallübertragung über das Trennbauteil
- Flankenübertragung (d.h. über durchlaufende Bauteile, die nicht Teil des flächigen Trennbauteils sind, z.B. Wasserrohre)
- Luftschallübertragung über Leckagen
- Kanalschallübertragung
- Schallnebenwege (z.B. über Fenster)

## 7.6.4 Schallschutz betreffend Gebäudetechnik

### 7.6.4.1 Lüftung

Die kontrollierte Wohnungslüftung ist für viele Menschen etwas Neues, und wird dementsprechend kritisch wahrgenommen. Daher muss dem Schallschutz bei der Planung und Ausführung einer Lüftungsanlage besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, um eine gute Bewohnerakzeptanz der Anlage zu gewährleisten [112].

#### 7.6.4.1.1 Normen

Die DIN 4109 regelt in Deutschland den Schallschutz im Hochbau. Danach ist der Schalldruckpegel, der durch eine Lüftungsanlage in einem schutzbedürftigen Raum verursacht werden darf, auf 35 dB(A) begrenzt (vgl. [32]). Für den erhöhten Schallschutz wird ein Maximalwert von 30 dB(A) vorgeschlagen (vgl. [33]).

Des Weiteren wird von der TA-Lärm die durch die Lüftungsanlage verursachte Schallimmission auf benachbarte Wohneinheiten begrenzt. Er darf in reinen Wohngebieten nachts bei maximal 35 dB(A) in 0,5 m Abstand vor dem Fenster des am stärksten betroffenen, schutzbedürftigen Raumes liegen (vgl. [34]).

#### 7.6.4.1.2 Empfohlener Maximalschallpegel

Die Erfahrung hat gezeigt, dass der in der DIN 4109 angegebene Schallpegel von 35 dB(A) bzw. 30 dB(A) von vielen Bewohnern immer noch als störend empfunden wird. Zudem sinkt nach einer Sanierung mit Passivhauskomponenten der in der Wohnung wahrgenommene Außenschallpegel stark ab. Verbleibende Geräusche, wie z.B. die Raumlüftung, werden dann stärker wahrgenommen. Es hat sich gezeigt, dass erst bei einem Maximalschallpegel von 25 dB(A) eine gute Akzeptanz der Lüftungsanlage erreicht wird (vgl. [35]).

#### 7.6.4.1.3 Aufstellort und Schallentkopplung

Um die angestrebten, niedrigen Schallimmissionen von 25 dB(A) in den Wohnräumen zu erreichen, muss eine sehr gute Schallentkopplung der Lüftungsanlage sowohl in Bezug auf Luftschall als auch auf Körperschall erfolgen.

Bei wohnungszentralen Lüftungsgeräten bietet sich eine Aufstellung in Küche, Bad oder in einem nicht direkt von einem Wohnraum erschlossenen Abstellraum an. In Küche und Bad können Schallpegel der Lüftungsanlage bis 30 dB(A) akzeptiert werden.

Bei Mehrfamilienhäusern, die über eine zentrale Lüftungsanlage auf dem Dach verfügen, sollte zum Beispiel kein direkter Zugang vom Treppenhaus zur Lüftungsanlage vorgesehen werden. Bei dezentralen, raumweise installierten Lüftungsanlagen sind die Schallschutzanforderungen schwerer zu erreichen, da hier der Lüftungsventilator direkt im schutzbedürftigen Raum montiert wird. Große zentrale Lüftungsgeräte für mehrere Wohneinheiten können zur Schwingungsentkopplung der Ventilatoren auf eine massereiche Stahlplatte, die auf einer Elastomerschicht ruht, montiert werden.

**empf. max. Schallpegel in  
Wohnräumen: 25 dB(A)**

**keine Aufstellung in  
Wohnräumen**



**Abbildung 165 Körperschallentkopplung an einem zentralen Lüftungsgerät (Lüftungskanäle sind noch nicht installiert):**

- 1) Elastomerplatte als Dämpferelement
- 2) Kanal-Körperschallentkopplung mittels Segeltuchstützen (Quelle: PHI)

Bei allen Anlagen mit Kanalnetz muss zwischen Zentralgerät und Zu- bzw. Abluftdüsen jeweils ein Kanalschalldämpfer vorgesehen werden.

Zwischen Räumen, die an einen gemeinsamen Strang der Lüftungsanlage angeschlossen sind, sollten Telefoneschalldämpfer eingesetzt werden, um eine Schallübertragung von einem Raum in den anderen zu vermeiden. Eine ausführliche Darstellung ist in [37] wiedergegeben.

Raumweise Lüftungsgeräte und Abluftanlagen mit Zuluftöffnungen in den Wohnräumen benötigen Wanddurchbrüche von den Wohnräumen nach außen. Diese führen zu einer Schwächung der Schalldämmeigenschaften der Außenwand. Dies muss vor allem in mit Verkehrslärm belasteten Gebieten beachtet werden.

#### 7.6.4.2 Wärmepumpen (Kompaktaggregate)

Lüftungsanlagen mit einer Wärmepumpe emittieren meist eine zusätzliche tieffrequente Luft- und Körperschallkomponente. Diese erfordert nach derzeitigem Stand der Gerätetechnik je nach Aufstellungsort zusätzliche Schallschutzmaßnahmen. Dieses Thema wurde im Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser aufgegriffen; eine ausführliche Darstellung findet sich in [37]. Wichtig für die Planung ist es insbesondere, vom Hersteller Angaben über das schalltechnische Abstrahlverhalten des Geräts anzufordern:

- vollständige Terzspektren des Schalleistungspegels der Gehäuseabstrahlung auch im tieffrequenten Bereich unter 100 Hz (zur Dimensionierung einer Einhausung o. Ä.)
- Messwerte an den Gerätestutzen (zur Dimensionierung der Schalldämpfer)

**Schalldämmung der Lüftungsanlage zwischen Räumen muss nicht besser sein als das schlechteste trennende Bauteil.**

**Bei Passivhaus-Kompaktaggregaten sind spezielle Schallschutzmaßnahmen erforderlich.**

**Bester Aufstellort ist ein  
Technikraum im Keller.**
**7.6.4.2.1 Aufstellorte (vgl. [40])**

Ist ein **Keller** mit Massivdecke vorhanden, so ist diese Aufstellform des Kompaktaggregats auch aus schalltechnischer Sicht als die wohl unproblematischste anzusehen. Die schwingungsentkoppelte Aufstellung auf dem Kellerboden und der sehr gute Luftschallschutz über eine Massivdecke sowie entsprechende Schalldämpfer im Kellerraum können die Schallübertragung in die Wohnräume fast vollständig eliminieren. Ist das Gebäude nicht unterkellert, kann auch eine Aufstellung im **Technikraum** bzw. **Hauswirtschaftsraum** im Massivbau als unproblematisch angesehen werden, insbesondere dann, wenn sich dieser im EG befindet. Wird das Gerät dagegen nicht auf die Bodenplatte sondern auf eine Zwischendecke gestellt, so ist deren dynamische Masse und die daraus resultierende Schwingungseinleitung in die Gebäudestruktur zu prüfen. Von einer ungeschützten Aufstellung im WC, Badezimmer oder Flur ist abzuraten.

**Innerhalb der Wohneinheit  
Aufstellung nur im  
Technikraum oder in  
eigener Einhausung**
**7.6.4.2.2 Trennwände und Einhausungen**

Eine Aufstellung des Kompaktaggregats innerhalb einer Wohneinheit ist möglich, wenn ein ausreichender Schallschutz in Form von Raumtrennwänden oder einer eigenen Einhausung gegeben ist. Zu beachten ist, dass bei den in DIN 4109 angegebenen Mindestschalldämmwerten von Bauteilen nur der bauakustische Bereich ab 100 Hz betrachtet wird. Prinzipiell beschreibt das Masse-Gesetz, dass das Schalldämm-Maß mit dem spezifischen Flächengewicht einer Konstruktion zunimmt. Zu beachten ist, dass sich die Koinzidenzfrequenz<sup>1</sup>, bei der ein Minimum in der Kurve des Schalldämmwertes entsteht, bei dickeren Wänden zu geringeren Frequenzen verschiebt. Schalldämmmaße typischer Wände finden sich in [40].

Bei der Aufstellung eines Kompaktaggregats in einer Einhausung oder in einem eigenen Aufstellraum innerhalb der Wohneinheit stellt die Tür in schallschutztechnischer Hinsicht oft die Schwachstelle dar. Die Luftschallübertragung über das Türblatt wird vor allem durch dessen Flächengewicht bestimmt. Eine weitere schalltechnische Schwachstelle kann der Anschluss der Zarge an die Wand darstellen. Die Hohlräume zwischen Zarge und Wand sind mit Mineralfaser oder Schaum zu füllen. Lösungen für diese Schwachstellen finden sich im o.g. Arbeitskreis-Protokollband [37].

**Körperschallentkopplung**
**7.6.4.2.3 Kanalinstallationen und Schalldämpfer**

Generell sollten die Geräteschalldämpfer in den Lüftungskanälen möglichst nah am Kompaktgerät platziert werden, um die Schallausbreitung gleich an der Quelle zu minimieren. Neben der Luftschalldämpfung des Schalldämpfers innerhalb des Lüftungskanals muss auch noch dessen Schallabstrahlverhalten nach außen in den Raum berücksichtigt werden. Bei der Lüftungskanalführung in einer abgehängten Decke hat die Vermeidung der Übertragung des Körperschalls allerdings eine sehr viel größere Bedeutung als die Luftschalldämmung.

Weiterführende Literatur: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 34: Schallschutz beim Einsatz von Wärmepumpen und Wärmepumpen-Kompakt-Aggregaten im Passivhaus. PHI 2007

<sup>1</sup> Koinzidenzfrequenz: Frequenz, bei der die Wellenlänge des Luftschalls mit der Länge der freien Biegewelle des Bauteils übereinstimmt (verringert die Luftschalldämmung).

## 7.7 Brandschutz

### 7.7.1 Allgemein

Ziel des Brandschutzes ist, die Entstehung und Ausbreitung von Feuern zu vermeiden, die Rettung von Mensch und Tier zu ermöglichen und Sachschäden möglichst gering zu halten.

Zur **Entstehung eines Brandes** müssen drei Voraussetzungen gegeben sein: Das Vorhandensein eines Brennstoffes, eines Oxidationsmittels (z.B. Sauerstoff) und einer Zündquelle. Brennstoff und Oxidationsmittel müssen in einem zündfähigen Gemisch vorliegen und die Zündquelle muss eine ausreichende Energie und Temperatur liefern können.

Baustoffe werden nach DIN 4102 (vgl. [199]) in die Klassen leicht entflammbar (B3), normal entflammbar (B2), schwerentflammbar (B1) sowie nichtbrennbar (A1) und in wesentlichen Teilen nichtbrennbar (A2) eingeteilt. Leicht entflammbare Baustoffe (B3) dürfen generell nicht eingesetzt werden. In speziellen Fällen können die Anforderungen erhöht werden, so dürfen z.B. für die Wand- und Deckenoberflächen von Rettungswegen nur A-Baustoffe eingesetzt werden.

Das Vorhandensein und die Handhabung potentieller Zündquellen unterliegen strengen Regelungen.

Zur **Eingrenzung des Brandes** werden, je nach Gebäudetyp, Gebäudeklasse und Nutzungsart unterschiedliche Maßnahmen gefordert. Bei kleinen, freistehenden Gebäuden (Gebäudeklasse 1), die nicht unterkellert sind, werden neben der Mindestforderung B2 an die Brennbarkeit der eingesetzten Baustoffe und dem Einhalten bestimmter Abstandsflächen keine weiteren Maßnahmen gefordert. Bei anderen Gebäuden werden Anforderungen hinsichtlich der Feuerwiderstandsdauer an die Bauteile, aus denen das Gebäude besteht, gestellt.

Es wird zwischen feuerhemmenden (F 30), hochfeuerhemmenden (F 60), feuerbeständigen (F 90) und hochfeuerbeständigen (F 120, F 180) Bauteilen unterschieden. Dabei steht die Zahl hinter dem „F“ für die Feuerwiderstandsdauer des Bauteils in Minuten unter Normrandbedingungen. Ein Zusatz der Buchstaben B, BA, AB, oder A hinter der Zahl gibt an ob das Bauteil aus brennbaren (B) brennbaren, durch unbrennbare Bauteile geschützten (BA), im wesentlichen aus nichtbrennbaren (AB) oder komplett aus nichtbrennbaren Baustoffen (A) besteht. Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer werden z.B. auch an Fenster, Türen, Schächte und Leitungen gestellt. Durch die Feuerwiderstandsdauer der Bauteile kann ein Brand für eine bestimmte Zeit auf seinen Entstehungsort begrenzt bleiben und so die Personenrettung und den Angriff der Feuerwehr ermöglichen.

**Rettungswege** ermöglichen die Selbst- oder Fremdrettung ins Freie bzw. in sichere Bereiche. Grundsätzlich werden zwei voneinander unabhängige Rettungswege, der erste und der zweite Rettungsweg, gefordert. Der erste Rettungsweg ist stets baulicher Art. Je nach der Gefährdungsklasse des Gebäudes kann der zweite Rettungsweg über das Rettungsgerät der

Feuerwehr oder über einen zweiten baulichen Rettungsweg sichergestellt werden. Die Rettungswege dienen der Feuerwehr auch als Angriffsweg zur **Brandbekämpfung**. Neben der Bereitstellung der Angriffswege können Anforderungen an das Vorhandensein von Löschmitteln (Löschwasser, Feuerlöscher, Sprinkleranlagen etc.) gestellt werden.

### 7.7.2 Brandschutzanforderungen bei der energetischen Altbauanierung

Bei jedem ordnungsgemäß errichteten Gebäude wurden die zum Zeitpunkt des Baus geltenden Brandschutzbestimmungen beachtet. Bleiben Gebäudenutzung und Gebäudeklasse durch die Sanierung unberührt, bleiben auch die Belange des Brandschutzes unberührt, sofern sich die Anforderungen seit der Erstellung des Gebäudes nicht verändert haben. Durch Veränderungen der Brandschutzbestimmungen oder durch Nutzungsänderungen können jedoch Änderungen der Anforderungen bis hin zum Aufstellen eines (neuen) Brandschutzkonzeptes resultieren. Diese Sachverhalte und Notwendigkeiten sind frühzeitig mit Sachverständigen zu klären.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Belange des Brandschutzes auf die energetische Altbauanierung kurz erläutert, alle Angaben beziehen sich auf den Geltungsbereich der Hessischen Bauordnung (vgl. [162]).

#### 7.7.2.1 Wärmedämmung von Bauteilen

Für Außenwandverkleidungen einschließlich Wärmedämmung und Unterkonstruktion fordert die Hessische Bauordnung [vgl. [162]] bei den Gebäudeklassen 1-3 die Baustoffklasse B2, bei den Gebäudeklassen 4 und 5 B1 (wobei Unterkonstruktionen nur B1 erfüllen müssen, wenn die Brandausbreitung trotzdem lange genug begrenzt bleibt). Um Brandausbreitungen über die Fassade von einem Geschoss auf das andere zu begrenzen und Fluchtwege von brennend abtropfenden Substanzen freizuhalten, werden häufig weitere Anforderungen gestellt. Diese können durch eine Lage A1-Materialien oberhalb im Sturzbereich von Öffnungen oder durch ein umlaufendes Band aus A1-Materialien, die ein Feuerschott bilden, erfüllt werden. Es können Anforderungen an die Schmelztemperatur der Baustoffe gestellt werden. Einige Hersteller bieten jedoch Wärmedämm-Verbundsysteme an, die den oben genannten Anforderungen ohne einen Materialwechsel im Sturzbereich bzw. ohne Schotte genügen.

- Gebäudeabschlusswände sind in den Gebäudeklassen 2-5 als Brandwände auszubilden. Diese werden dann notwendig, wenn ein Gebäude näher als 2,5 m an der Grundstücksgrenze steht. Hier sind nur A-Baustoffe zulässig.
- Gebäudetrennwände unterteilen weitläufige Gebäude in Brandabschnitte. In Gebäudeklasse 5 sind auch hier nur A-Baustoffe zulässig.
- In Decken über Kellergeschossen der Gebäudeklassen 4 und 5 sowie in Decken über (Tief-) Garagen sind nur A-Baustoffe zulässig.
- An Dächern wird lediglich die Anforderung B2 gestellt. Außer wenn sie Teil von Brandwänden sind, dann gilt F90-A.

### 7.7.2.2 Öffnungen

An Außenfenstern und -türen werden zunächst keine Anforderungen hinsichtlich des Brandschutzes gestellt. Für Öffnungen, die dem Wärme- bzw. Rauchabzug dienen, müssen zu diesem Zweck zugelassene Produkte eingesetzt werden, die noch nicht in Passivhaus Qualität verfügbar sind. Entsprechend schlechtere Werte müssen in die Energiebilanz einbezogen werden. Gleiches gilt für Feuerschutztüren zwischen unterschiedlich klimatisierten Gebäudeteilen.

#### *Lüftungsanlagen*

Siehe Abschnitt 5.2.5 auf Seite 169.

## 7.8 Tageslicht

Gutes Tageslicht in Innenräumen ist wichtig für problemlose Farbwiedergabe, Kontrastsehen und exakte Wahrnehmung. Darüber hinaus hat eine ausreichende Tageslichtversorgung aber auch einen großen Einfluss auf das körperliche und seelische Wohlbefinden des Menschen. In der Literatur wird über gesteigerte Leistungsbereitschaft, Erhöhung der Abwehrkräfte, bessere Stressbewältigung und viele weitere positive Effekte berichtet (vgl. [30]).

***Einfluss des Tageslichts  
auf das physische und  
psychische Wohlbefinden***

Dabei kann Tageslicht nicht einfach durch Kunstlicht ersetzt werden, da es durch die permanente Veränderung seiner Eigenschaften wie Intensität, Richtung und spektrale Zusammensetzung eine viel reichhaltigere optische Wahrnehmung ermöglicht. Ein gut mit Tageslicht belichteter Wohnraum besitzt folgende Merkmale ([31]):

- Eine gute und gleichmäßige Lichtverteilung im Raum
- Vermeidung von Blendung und hohen Helligkeitskontrasten
- Natürliche Farbwiedergabe des Lichts
- Keine Überhitzung im Raum

### 7.8.1 Der Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient ist ein Maß dafür, wie gut ein Punkt im Raum durch Tageslicht ausgeleuchtet wird. Nach DIN 5034-1 beschreibt er das „Verhältnis der Beleuchtungsstärke  $E_p$  in einem Punkt einer gegebenen Ebene, die durch direktes und/oder indirektes Himmelslicht bei angenommener oder bekannter Leuchtdichtevertelung des Himmels erzeugt wird, zur gleichzeitig vorhandenen Horizontalbeleuchtungsstärke  $E_a$  im Freien bei unverbauter Himmelshalbkugel“ [24]. Dabei wird von einer gleichmäßigen Leuchtstärke der gesamten Himmelsfläche ausgegangen. Direktes Sonnenlicht wird nicht berücksichtigt. Die Norm verlangt, dass der Tageslichtquotient auf einer angenommenen horizontalen, 0,85 m hohen Ebene in halber Raumtiefe und in je 1 m Abstand von beiden Seitenwänden im Mittel wenigstens 0,9 % und am ungünstigeren Punkt wenigstens 0,75 % beträgt. Wenn zwei Wände mit Fenstern vorhanden sind, soll der Tageslichtquotient am ungünstigeren Punkt mindestens 1 % betragen (vgl. [24]). Folgende Einflussfaktoren können den Tageslichtquotienten verändern:

***Verhältnis zwischen  
Tageslicht außen und im  
Innenraum***

- **Fensterhöhe:** Die Höhe der Oberkante der sichtbaren Verglasung hat einen wesentlichen Einfluss auf den Tageslichtquotienten. Die DIN 5034-1 verlangt für Wohnräume eine Höhe der Oberkante des transparenten Fensteranteils von mindestens 2,2 m über dem Fußboden. Für die Unterkante liegt die vorgegebene Maximalhöhe bei 0,95 m (vgl. [24]).
- **Fensterbreite:** Laut DIN 5034-1 soll die Summe der Breiten aller Fenster mindestens 55 % der Breite des Wohnraums betragen (vgl. [24]).
- **Verschattung** durch Bauteile im Bereich des Fensters (Balkons, Fensterleibung, Sturz etc.)
- **Verbauung** durch Nachbargebäude: bewirkt ebenfalls eine Verschattung
- **$\tau$ -Wert** (Lichttransmissionsgrad, sprich: **Tau-Wert**) der Verglasung: Dieser bezeichnet den prozentualen Anteil des sichtbaren Lichts, der durch die Verglasung ins Rauminnere gelangt.
- **Verschmutzung** der Scheibe
- Verminderung der transparenten Fensterfläche durch den **Rahmenanteil**

### 7.8.2 Einfluss der Modernisierung auf den Tageslichtquotienten

**Energetische Sanierung kann zu schlechterer Tageslichtversorgung der Innenräume führen!**

Bei einer energetischen Sanierung mit Passivhauskomponenten muss bei der Planung auch die Tageslichtversorgung der Wohnräume berücksichtigt werden, denn es kann sonst durchaus zu einer Verschlechterung kommen. Grund für eine geringere Belichtung der Wohnräume nach der Sanierung ist die Addition möglicher Einzelfaktoren bezüglich Verglasung, Rahmenanteil und Verschattung. Zu beachten ist, dass Dreifachverglasungen einen um etwa 10% geringeren Lichttransmissionsgrad ( $\tau$ -Wert) als herkömmliche Zweischeibenwärmeschutzverglasungen haben.

#### 7.8.2.1 Fenster

Einen großen Einfluss auf die Raumbelichtung hat selbstverständlich die Scheibengröße eines Fensters. Computersimulationen zeigen, dass die Belichtungsstärke bei einem 15 m<sup>2</sup> großen Standardraum mit steigender Fenstergröße bis 50 % der Außenwandfläche stark ansteigt. Eine weitere Vergrößerung der Fensterfläche ergibt allerdings nur noch eine geringere Zunahme (vgl. [31]).

Einflussfaktoren auf die Verglasungsgröße eines Fensters:

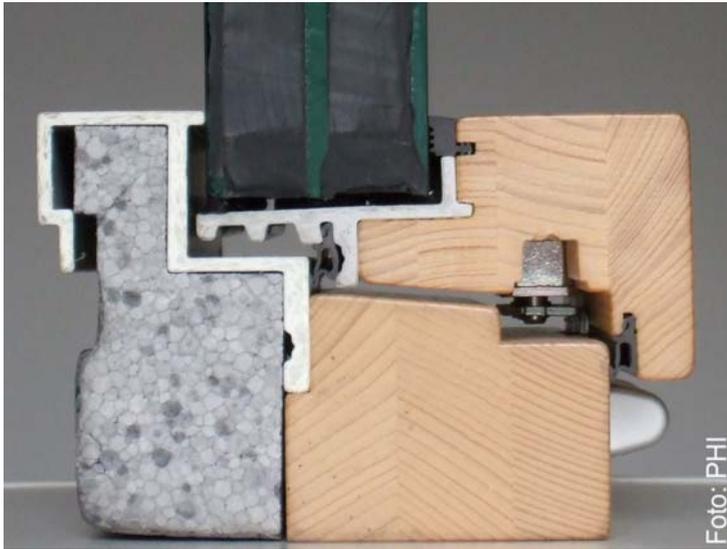
#### Fensterrahmen

**Ziel:  
Maximierung des  
Verglasungsanteils**

Bei vom Passivhaus Institut zertifizierten gedämmten Fensterrahmen gibt es signifikante Unterschiede in der Rahmenbreite, die von 100 mm Ansichtsbreite für ein sehr schmales Profil bis 154 mm (bzw. 169 im Brüstungsbereich) für ein eher breites Profil reichen (beides Lochfenster, Öffnungsflügel)<sup>1</sup>. Eine Reduktion des Rahmenanteils kann auch erreicht werden, wenn für einen Teil der Fenster Festverglasungen verwendet werden, da diese schmalere Profile

<sup>1</sup> Informationen über Bauprodukte, die vom Passivhaus Institut zertifiziert wurden, erhalten Sie unter [www.passiv.de](http://www.passiv.de)

aufweisen. Bei Passivhausfenstern gab es in letzter Zeit eine Entwicklung zu kleineren Rahmenbreiten und damit höheren Verglasungsanteilen (vgl. [223]).



**Abbildung 166** Gedämmter Fensterrahmen mit einer sehr schmalen Profilbreite von nur noch 100 mm. Weil die Scheibe im Flügel verklebt wird und so an der Statik mitwirkt, kann hier die Profilbreite reduziert werden. (Quelle: PHI)

#### *Größe der Rohbauöffnung*

Die Rohbauöffnung kann bei einer Altbausanierung auf zwei Arten vergrößert werden, ohne in das statische Gefüge des Fensters durch eine Veränderung des Fenstersturzes einzugreifen.

- Zum einen kann der alte Putz in der Leibung abgeschlagen werden. Die innere Leibung wird dann mit Dünnputz o.ä. neu erstellt. Auf die Erhaltung der Luftdichtheit ist dabei allerdings sorgfältig zu achten. Einen ähnlichen Effekt hat die Verminderung der Einbaufuge des Fensters.
- Eine weitere noch relativ kostengünstige Maßnahme ist der Abbruch der Fensterbrüstung zur Erstellung eines so genannten Französischen Fensters. Bei einer Sanierung mit Passivhausfenstern und sehr guter Wärmedämmung der Außenwände muss kein Heizkörper vor dem Fenster mehr vorgesehen werden, wodurch dieser Eingriff möglich wird. (vgl. [30]).

#### *Fensteranzahl und Position*

Fenster an der Längsseite eines Zimmers oder kleinere Fenster an zwei Seiten eines Raumes ermöglichen eine sehr gute Lichtverteilung im Raum (vgl. [31]).

#### *7.8.2.2 Innere Einflüsse auf die Belichtung*

Durch helle Innenoberflächen wird das Licht reflektiert und in die Tiefe des Raums weitergeleitet. Dadurch steigt insgesamt die Helligkeit des Raums. Den stärksten Effekt haben dabei helle Fußböden und Wände, während der Einfluss einer hellen Decke weniger stark ist. Besonders sinnvoll ist auch der Einbau einer hellen Fensterbank.

**Möglichst helle  
Oberflächen im Innenraum**

Durch eine Abschrägung der Fensterleibung nach innen wird die Belichtungssituation zwar nicht entscheidend verbessert - da die Leibung aber nun als hellere Oberfläche vom Raum aus sichtbar ist, ergibt sich ein freundlicherer Raumeindruck mit geringeren Kontrasten der Leuchtdichte.

#### 7.8.2.3 *Äußere Einflüsse auf die Belichtung*

Eine helle, stark reflektierende Färbung der äußeren Fensterleibung ist eine einfache, kostenneutrale Möglichkeit, die Belichtung eines Raums zu verbessern. Ein heller Terrassen- bzw. Balkonbelag vor dem Fenster hat ebenfalls einen positiven Effekt.

Die Verschattung durch andere Gebäude, aber auch durch Leibungen und Überstände hat einen oft unterschätzten Einfluss. Verschattungsfaktoren können auch mit dem PHPP berechnet werden.

## 8 Wirtschaftlichkeit und energiewirtschaftliche Aspekte

### 8.1 Wirtschaftlichkeit von Wärmeschutzmaßnahmen

Ein bedeutender Anteil des Energieeinsatzes in Deutschland wird in Gebäuden zu Heizzwecken verwendet. Die Reduzierung dieses Energiebedarfs ist eine wesentliche Voraussetzung, die gesteckten Ziele zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zu erreichen und stellt somit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz dar. Um das vorhandene Energieeinsparpotential erschließen zu können, ist die Kenntnis des verfügbaren Potentials ebenso wichtig wie die Wirtschaftlichkeit der geforderten Maßnahmen.

Der Bau von Gebäuden mit einer hochwertigen Gebäudehülle zur Erreichung einer hohen Energieeffizienz (Passivhäuser) ist bei den derzeitigen wirtschaftlichen Randbedingungen sinnvoll. Die Energiepreise zur Bereitstellung von Heizwärme haben ein Niveau erreicht, bei dem sich die zusätzlichen Maßnahmen zur Einsparung von Heizenergie für Passivhäuser, nämlich der hochwertige Wärmeschutz, die verbesserte Luftdichtheit und die kontrollierte Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, wirtschaftlich rechnen.

Diese Aussage kann zusammengefasst folgendermaßen begründet werden. Ein Passivhaus oder eine Altbauanierung mit Passivhaus-Komponenten erfordert derzeit Mehrkosten von etwa 100 bis 150 €/m<sup>2</sup> Wohnfläche gegenüber einem Gebäude, das nach den aktuellen gesetzlichen Vorschriften (EnEV 2009) errichtet bzw. saniert wird. Dies gilt sowohl für Neubau als auch für die meisten Altbauanierungen. Detaillierte Untersuchungen hierzu finden sich in [184] und [159].

Die im Folgenden referierten Ergebnisse wurden anhand eines großvolumigen Geschosswohnungsbaus mit geringem A/V-Verhältnis ermittelt. Für eine beispielhafte Wohneinheit von 100 m<sup>2</sup> ergeben sich daher Mehrkosten von etwa 10 000 €. Ein großer Teil dieses Betrags wird über die Einsparung von Heizenergie während der Lebensdauer der Maßnahmen erwirtschaftet. Zur Unterstützung der Bauherren werden für die Anfangsinvestitionen staatliche Förderungen zur Verfügung gestellt (vgl. [86]).

**staatliche Förderung für  
PH-Standard**

#### 8.1.1 Motivation, Zusatznutzen und volkswirtschaftliche Aspekte

Es macht deshalb Sinn, Bauherren zu motivieren, gewisse Mehraufwendungen zum Zeitpunkt der Sanierung in Kauf zu nehmen, die sich mittelfristig wirtschaftlich rechnen. Bleibt die Frage, wie die Akteure effektiv überzeugt werden können, diesen zusätzlichen Aufwand zu tätigen. Die Autoren sind grundsätzlich der Auffassung, dass eine nachhaltige Motivation der Akteure (Bauherren, Architekten, Ingenieure und ausführende Firmen) die besseren Resultate zeitigt, anstatt über gesetzliche Vorschriften die Einhaltung eines Baustandards zu fordern. Denn eine Sanierung mit PH-Komponenten ist auch für erfahrene Architekten und Planer eine anspruchsvolle Aufgabe.

Neben dem reinen Energiespareffekt wird durch die Energieeffizienzmaßnahmen auch ein ganz erheblicher, für den Bewohner

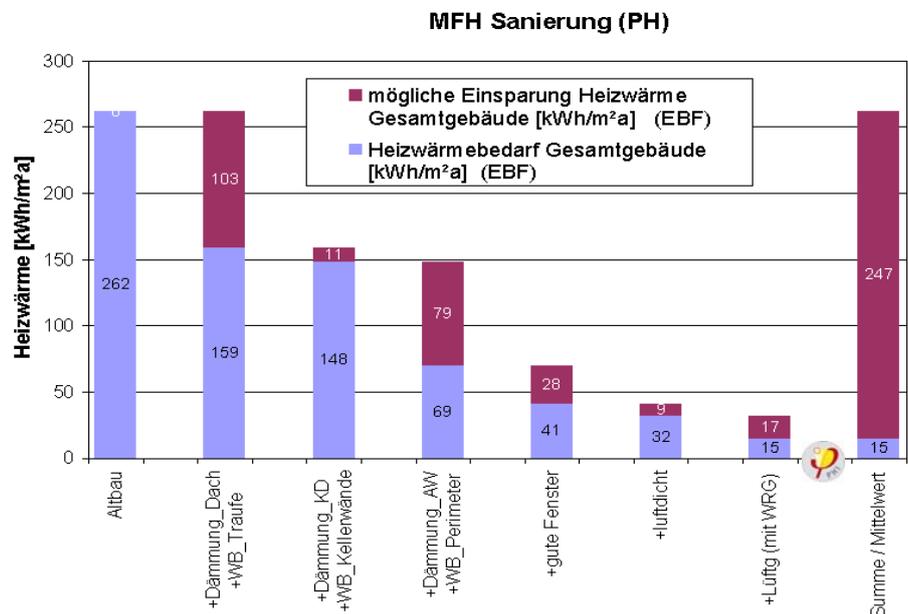
deutlich **fühlbarer Zusatznutzen** erreicht und zwar sowohl bei neu gebauten Häusern als auch bei entsprechend durchgeführten Bestandssanierungen (vgl. [189], [185]). Außerdem findet die Wertschöpfung für die Herstellung der Gebäude in der Region statt, was auch volkswirtschaftlich wünschenswert ist, denn das schafft **Arbeitsplätze bei mittelständischen und regional agierenden Unternehmen**.

Die Methode der dynamischen Kapitalwertberechnung zeigt sehr deutlich, dass nicht nur hohe **Energiepreise** auf der einen Seite die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Energieeffizienz beeinflussen, sondern dass andererseits hohe **Kapitalzinsen** ein Hemmnis für die Umsetzung solcher Maßnahmen wären. Für die in diesem Abschnitt dokumentierten Beispiele wurde mit einem mittleren Preis für Endenergie (Mineralöl bzw. Erdgas) von 0,056 €/kWh (netto) und einem mittleren realen (inflationbereinigten) Zinssatz von 3,3 % p.a. gerechnet. Diese Annahmen wurden in [159] im Einzelnen begründet.

Das derzeitige allgemein niedrige Zinsniveau ist neben jedweder staatlichen Förderung eine große Chance für das energieeffiziente Bauen, die es zu nutzen gilt.

## 8.1.2 Erläuterungen zur Methode der Wirtschaftlichkeitsrechnung

### 8.1.2.1 Energiebilanzberechnung für Wohngebäude nach PHPP



**Abbildung 167: Energiebilanz einer Sanierung eines MFH zum Passivhaus. 'Schritt für Schritt' wurden die Maßnahmen zum Wärmeschutz hinzugefügt, um deren Wirkung im Einzelnen zu veranschaulichen. (Quelle: PHI)**

Alle Energieverbrauchskosten für die folgenden Darstellungen in diesem Kapitel wurden aus dem Energiebedarf eines typischen Geschosswohngebäudes in kompakter Bauform berechnet. Dazu wurde die Energiebilanzberechnung für Wohngebäude nach dem PHPP (Passivhaus-Projektierungs-Paket, vgl. [17]) herangezogen. Das Gebäude hat drei Vollgeschosse, drei Treppenhäuser und

15 Wohneinheiten mit insgesamt etwa 1000 m<sup>2</sup> Wohnfläche bzw. Energiebezugsfläche.

Die Energieeinsparung jeder Maßnahme wird Schritt für Schritt an diesem Beispielgebäude verdeutlicht. Das Gebäude ist im Ausgangszustand als Altbau mit besonders schlechtem Wärmeschutz dargestellt (siehe Abbildung 167). Danach werden die einzelnen Maßnahmen, d.h. verbesserter Wärmeschutz, für Dach, Kellerdecke und Außenwand, neue verbesserte Fenster, verbesserte Luftdichtheit und kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung zum Gebäude 'hinzugefügt', bzw. in der Energiebilanz Schritt für Schritt berücksichtigt, so dass deren Wirkung im einzelnen und später in der Summe transparent dargestellt werden kann.

#### 8.1.2.2 *Dynamische Kapitalwertmethode und grundlegende Annahmen*

Um die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme zur Energieeinsparung beurteilen zu können, müssen die Investitionskosten mit den eingesparten Energieverbrauchskosten verglichen werden. Um diese beiden Größen in adäquater Form vergleichen zu können, wird mit Hilfe der dynamischen Kapitalwertmethode der Barwert oder die Annuität einer Ausgabe berechnet [159], [182], [183].

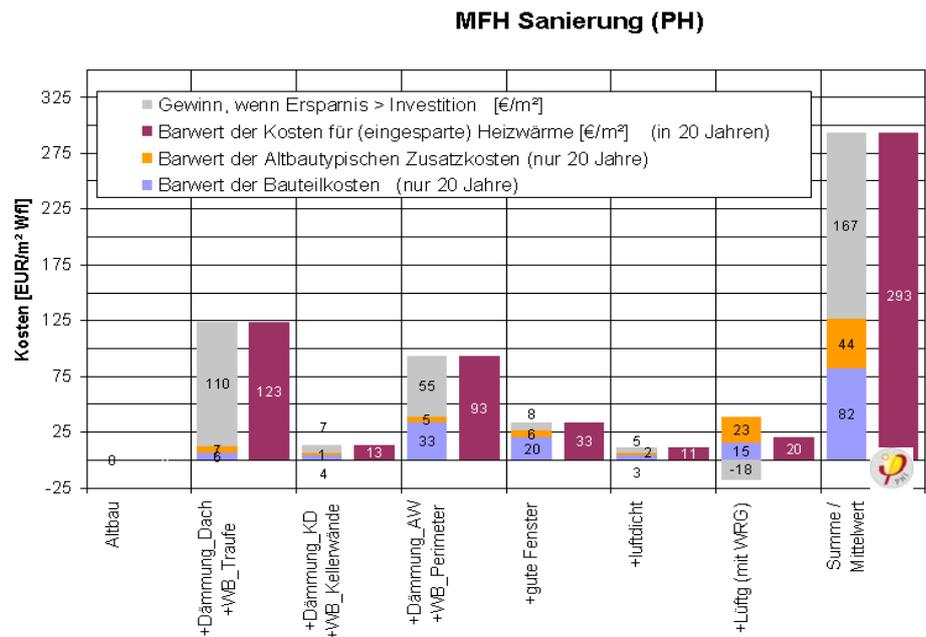
Dabei können einerseits regelmäßig wiederkehrende Ausgaben, wie z.B. die jährlichen Energieverbrauchskosten für Heizung und Warmwasserbereitung auf den gegenwärtigen Zeitpunkt abgezinst werden, d.h. es wird deren Barwert zum Zeitpunkt der Investition errechnet.

Andererseits kann umgekehrt für einmalige Investitionskosten – analog der Berechnung von Zins und Tilgung eines Darlehens – deren Annuität, d.h. eine jährlich wiederkehrende Zahlung berechnet werden, so dass die Investitionskosten über den betrachteten Zeitraum verzinst und zurückgezahlt werden können. Diese Annuität der Investitionskosten kann dann für jede Maßnahme einzeln direkt mit den jährlich anfallenden Energieverbrauchskosten bzw. mit der jährlichen Energieeinsparung verglichen werden. Somit kann mit der Annuitätenmethode ein Preis für eine eingesparte Kilowattstunde Energie bestimmt werden, indem einfach die Annuität [€/a] der jeweiligen Maßnahme durch die pro Jahr eingesparte Energiemenge [kWh/a] dividiert wird. Es ergibt sich so ein Preis für die 'Einsparenergie' [€/kWh] (siehe Abbildung 169).

#### 8.1.3 **Energiekosten**

Der Preis für eine kWh aus Erdgas oder Mineralöl wurde in den folgenden Beispielen zu 0,056 €/kWh angenommen (vgl. Tabelle 26). Dies ist ein langjähriger Mittelwert, der die Preissteigerung in den letzten Jahren berücksichtigt. Weitere Überlegungen zu der Frage, wie hoch die Energiepreise in naher und mittlerer Zukunft voraussichtlich noch steigen werden, finden sich in [183]. Dort wird ausgeführt, dass die Annahme eines Energiepreises von weit mehr als 0,10 €/kWh auch langfristig unrealistisch ist, weil vorher oder spätestens dann eine Substitution von Erdöl und Erdgas z.B. durch regenerative Energieträger wirtschaftlicher dargestellt werden kann.

Aus dem Preis für die Endenergie in Form von Erdöl bzw. Erdgas muss ein Preis für die bereitgestellte Heizwärme berechnet werden. In diese Rechnung geht erstens die Effizienz gängiger Heizsysteme (90 %) bzw. deren Aufwandszahl (1,11) ein (vgl. [183]). Zweitens müssen noch Kosten für elektrische Hilfsenergie (Strom für Umwälzpumpen etc.) hinzugerechnet werden, dies sind 0,0034 €/kWh für jede kWh an bereitgestellter Heizwärme. Dabei wurde ein Preis von 0,17 €/kWh für Elektrizität zugrunde gelegt.



**Abbildung 168: Ökonomie der Energiesparmaßnahmen für eine Sanierung bis zum Passivhaus als MFH: Für die einzelnen Schritte sind jeweils die Baukosten (Barwert) der Maßnahme pro m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche aufgetragen (blau). Altbauspezifische zusätzliche Kosten sind separat dargestellt (orange), siehe Text. Neben den Baukosten ist der Barwert der Kosten für die in 20 Jahren eingesparte Heizwärme (dunkelrot) aufgetragen. Die Differenz (grau) ist formal ein Gewinn, bzw. ein vermiedener Verlust. In Summe über alle Maßnahmen (ganz rechts) ergibt sich ein deutlicher Gewinn. (Quelle: PHI)**

Drittens muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Kosten für ein Heizsystem mit der bereitzustellenden Heizleistung skalieren. Mit sinkender Heizlast können z.B. die Heizkörper kleiner dimensioniert werden oder ganz entfallen, somit sinken auch die einmaligen Systemkosten. Umgekehrt ist eine groß dimensionierte Heizungsanlage für ein weniger gut gedämmtes Gebäude teurer. Analysiert man die Ausstattung von typischen Niedrigenergie- und Passivhäusern (vgl. [183], [221]), so erhält man variable Systemkosten von etwa 400 € pro Kilowatt an zusätzlich bereitzustellender Heizleistung (400 €/kW). Geht man von etwa 1600 Vollbetriebsstunden für die Heizungsanlage pro Jahr aus (1600 h/a) und multipliziert mit dem Annuitätenfaktor von 0,0691 / a bzw. 6,91 % / a für diese Mehrinvestition (bei 3,3 % Realzins und 20 a Laufzeit), so ergibt sich:

$$400 \text{ €/kW} / (1600 \text{ h/a}) * 0,0691 / a = 0,0173 \text{ €/kWh}$$

Systematisch wurde dieser Ansatz in [183] und [159] beschrieben. Die gewählten Annahmen entsprechen dem Preisstand (Baukosten und Energiepreise jeweils netto, d.h. ohne Umsatzsteuer) von 2006 und sind in [159] dokumentiert.

Realzins	3,3 %	Mittelwert ohne Inflationsrate (1,7 %)
Betrachtungszeitraum	20 a	mit konstantem Zinssatz
resultierender Annuitätenfaktor	6,91 %/a	vergleichbar mit 'Zins und Tilgung'
resultierender Barwertfaktor	14,47 a	
Lebensdauer	30 a bzw. 50 a	der einzelnen Komponenten
Restwert nach 20 a	23,3 % bzw. 40,5 %	je nach Lebensdauer
Bezugspreis für Endenergie	0,056 €/kWh	Mineralöl, Erdgas bei Lieferung an Grundstücksgrenze ( <b>netto</b> , d.h. ohne Umsatzsteuer)
Zusatzkosten Hilfsenergie	0,0034 €/kWh	mit Strompreis von 0,17 €/kWh s.u.
zusätzliche variable Systemkosten	0,0173 €/kWh	siehe Text
Heizwärmebereitstellung	0,082 €/kWh	siehe Text
Preis für Elektrizität	0,17 €/kWh	Endenergie
Klimafaktor (PHPP [17])	74 kWh	Heizgradstunden

**Tabelle 26: grundlegende Annahmen für die Kostenberechnung nach der dynamischen Kapitalwertmethode [159]. Energiekosten für Fernwärme weichen hiervon ab, da die Systemkosten des Heizkraftwerks bzw. BHKW anders berechnet werden müssen.**

Mit den variablen Systemkosten sind somit die Kosten der Heizungsanlage in der Vergleichsrechnung enthalten, obwohl diese nicht als direkte Position aufgeführt werden. Insgesamt ergibt sich somit ein Preis für die in einem Wohnraum bereitgestellte Heizwärme von 0,082 €/kWh (vgl. [183]).

Der Preis für Fernwärme kann auf dieselbe Art und Weise berechnet werden. Dafür müssen ggf. andere (niedrigere) variable Systemkosten im Gebäude bestimmt werden, da ein Teil des Wärmeerzeugungssystems in das Heizkraftwerk bzw. Blockheizkraftwerk verlagert ist. Der Wärmebezugspreis des Fernwärmeversorgers ist deshalb höher als die oben angesetzten Brennstoffkosten.

#### 8.1.4 Korrekter Ansatz für Investitionskosten (Restwertabzug)

Der Betrachtungszeitraum, über den die Berechnungen nach der dynamischen Kapitalwertmethode eine Aussage machen können, ist auf etwa 20 Jahre begrenzt. Dies liegt hauptsächlich daran, dass über längere zukünftige

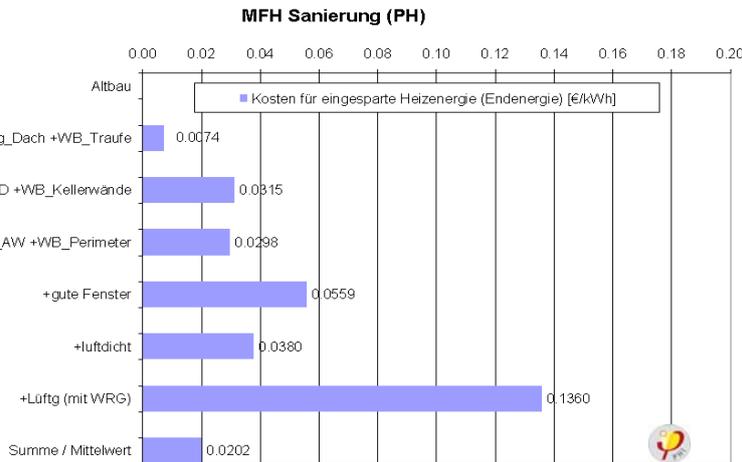
Zeiträume keine gesicherten Aussagen bezüglich des zu erwartenden Zinsniveaus für Hypothekenkredite gemacht werden können. Der Realzins für diesen Zeitraum wurde als langjähriger Mittelwert zu 3,3 % angenommen. Aus dieser Zahl ist die Inflationsrate von etwa 1,7 % schon herausgerechnet, daher die Bezeichnung 'Realzins' im Gegensatz zu dem für den Kreditnehmer relevanten Nominalzins wie er von der Bank berechnet wird.

Der Betrachtungs- oder Kalkulationszeitraum für entsprechende Berechnungen wird außerdem oft entsprechend der Lebensdauer der kurzlebigsten Komponente eines Wirtschaftsgutes festgelegt. Für Gebäude sind dies bewegliche Komponenten der Haustechnik wie z.B. Heizungsanlagen. Die Lebensdauern der meisten Komponenten der Gebäudehülle, nämlich die Wärmedämmung (50 a), die Fenster (30 a), die luftdichtenden Teile der Gebäudehülle (50 a) und die nicht beweglichen Teile der Lüftungsanlage (30 a) sind jedoch deutlich länger als 20 Jahre. Das bedeutet jedoch, dass das Gebäude im Allgemeinen, insbesondere aber die hier auf ihre Wirtschaftlichkeit zu beurteilenden Komponenten nach 20 Jahren noch nicht als abgeschrieben betrachtet werden dürfen. Denn sie können noch mindestens bis zum Ende ihrer Lebensdauer benutzt werden, bzw. sie dienen weiterhin ihrem ursprünglichen Zweck: einen hochwertigen Wärmeschutz für das Gebäude bereitzustellen – sie sparen also noch immer Energie.

Um diese Diskrepanz in der Berechnung adäquat berücksichtigen zu können, wird wieder mit Hilfe der Kapitalwertmethode der so genannte Restwert für jede Komponente nach Ablauf von 20 Jahren berechnet (vgl. [187]). Dieser beträgt nach 20 Jahren für eine Lebensdauer von 30 Jahren noch 23 % der ursprünglichen Investitionssumme: Für eine Lebensdauer von 50 Jahren ergeben sich noch 41 % Restwert nach 20 Jahren. Dieser Restwert nach Ablauf von 20 Jahren wird von der ursprünglichen Investitionssumme (100 %) abgezogen, und nur die um den Restwert verminderte Investition geht in die Berechnung über den Berechnungszeitraum (20 Jahre) ein.

Die Differenz zwischen dem Barwert der eingesparten Energiekosten aus 20 Jahren und den Investitionskosten ist formal ein 'Gewinn' bzw. ein vermiedener Verlust. In Abbildung 168 ist dies jeweils als grauer Stapelbalken über (bzw. wenn in einzelnen Fällen negativ unter) den Investitionskosten dargestellt, daneben sind die eingesparten Energiekosten dargestellt. Sind die Einsparungen für eine einzelne Maßnahme z. B. der Lüftungsanlage geringer als die Investition, so ist der Eintrag negativ. In der Summe aller Wärmeschutzmaßnahmen für ein Gebäude ergeben sich jedoch immer positive 'Gewinne', da insbesondere die Wärmedämmung der Außenwand über die Nutzungszeit deutlich mehr Einsparung bringt als sie anfänglich kostet.

Alle Daten für Investitionskosten in den Abbildungen verstehen sich abzüglich des Restwerts der Maßnahme nach 20 Jahren. Würde der Restwertabzug nicht gemacht, so wären die Investitionskosten im Vergleich zu den eingesparten Energiekosten unrealistisch hoch, so dass die tatsächlichen Verhältnisse verschleiert würden. Andererseits wäre der Wert des Gebäudes bzw. der betrachteten Komponenten nach 20 Jahren formal gleich Null. Sie tragen dann aber immer noch zum Wärmeschutz und damit zur Energieeinsparung bei. Die so entstehenden Gewinne könnten im Betrachtungszeitraum von 20 Jahren nicht berücksichtigt werden.



**Abbildung 169: Sanierung eines MFH mit Passivhauskomponenten bis auf Passivhausstandard: Die Annuität der Baukosten jeder Maßnahme wird verglichen mit der jährlichen Energieeinsparung. Damit ergibt sich formal ein Preis für die eingesparte Energie €/kWh für jede einzelne Maßnahme bzw. ein gewichteter Mittelwert für die Summe aller Maßnahmen. Diese Werte können jeweils mit dem aktuellen Energiebezugspreis (0,056 €/kWh, siehe Tabelle 26) verglichen werden. (Quelle: PHI)**

### 8.1.5 Kombination von Maßnahmen – vom Altbau zum Passivhaus

Die Wirkung einer Maßnahme zum Wärmeschutz lässt sich am besten an ihrer Auswirkung auf die Energiebilanz eines Gebäudes darstellen. Um die verschiedenen Maßnahmen beurteilen zu können, wird deshalb ein Gebäude Schritt für Schritt mit der jeweiligen Maßnahme ausgestattet, d.h. die verschiedenen Maßnahmen – Wärmedämmung Dach, Kellerdecke und Außenwand, Fenster, Luftdichtheit und Lüftung werden nacheinander in die Energiebilanz aufgenommen, so dass deren Wirkung veranschaulicht werden kann.

	Wand, Dach, Boden (Mittelwert) $U_{opak}$ [W/(m <sup>2</sup> K)] (Dämmstärke *)	Fenster/Türen (Mittelwert) $U_w$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	Lüftung $\eta$ (WRG)[%]	Luftdichtheit $n_{50}$ [1/h]
Altbau	0,6 bis 1,4 (70 mm)	2,9	über Fenster 0%	5,0
EnEV 2009	0,25 (145 mm)	1,3	Abluftanlage 0 %	1,5
Passivhaus	0,1 bis 0,15 (300 mm)	0,85	75 bis 92 %	≤ 0,6

**Tabelle 27: Bauteilkennwerte (vgl. [186])**

\*) mittlere Dämmstärke der verschiedenen Bauteile mit  $\lambda = 0,0350$  W/mK

In Tabelle 27 sind die verschiedenen Bauteilkennwerte vergleichend dargestellt. Die Werte für Bestandsgebäude (Altbau) stammen aus der Literatur und sind typische Mittelwerte, die selbstverständlich je nach Baualtersklasse eines

Gebäudes etwas schwanken (vgl. Anhang). Bei der Energiebilanzberechnung für die verschiedenen Standards wurden jeweils verschiedene typische Dämmstärken bzw. die daraus resultierenden U-Werte für Wände, Dach und Bodenplatte bzw. Kellerdecke angesetzt. Die in Tabelle 27 angegebene Dämmstärke ist ein Mittelwert über alle Außenbauteile eines Gebäudes.

In Abbildung 169 sind die so gewonnenen Werte und damit die Wirkung jeder zusätzlichen Maßnahme auf die Energiebilanz – Wärmedämmung, gute Fenster, verbesserte Luftdichtheit, Lüftung mit WRG – im Vergleich zur jeweils vorhergehenden Maßnahme dargestellt.

	Wand Dach Boden + Wärmebrücken €/m <sup>2</sup>	Fenster €/m <sup>2</sup>	Lüftung €/m <sup>2</sup> (Wfl.)	Luftdichtheit €/m <sup>2</sup>
EnEV 2009	38	240 Standardfenster	30 Abluftanlage	2
Passivhaus	42	130	20	3
Altbautypische Zusatzkosten	13	40	30	2
Ohnehinkosten	(24)	(240)	(30)	(2)

**Tabelle 28: Kosten der Energiesparmaßnahmen pro m<sup>2</sup> Bauteilfläche bzw. pro m<sup>2</sup> Wohnfläche. Altbautypische Zusatzkosten für eine Sanierung mit Passivhauskomponenten sind separat aufgeführt und müssen mit berücksichtigt werden. Die genannten 'Ohnehinkosten' der Maßnahmen dürfen bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ausgeklammert werden.**

In Tabelle 28 sind die Kosten, welche jede Energiesparmaßnahme verursacht, dargestellt. Dies geschieht in der Form, dass – ausgehend vom Altbauzustand mit sehr schlechten Bauteilkennwerten, die in Zeile 'Altbau' genannt sind, die zusätzlichen Kosten, welche eine Energiesparmaßnahme verursacht, beim jeweiligen Baustandard aufgeführt werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass damit sowohl die verschiedenen Maßnahmen einer energetischen Altbau Sanierung, als auch deren Wirkung bei einem Neubau beschrieben werden können, es müssen lediglich die bei der Sanierung in der Regel etwas höheren Bauteilkosten angesetzt werden.

Die Kostenansätze für die Sanierung mit Passivhauskomponenten in Tabelle 28 seien im Folgenden noch näher erläutert. Die genannten Kosten für die Wärmedämmung der opaken Bauteile sind ein mit den Bauteilflächen gewichteter Mittelwert über das ganze Gebäude (55 €/m<sup>2</sup> Bauteilfläche). Im Einzelnen wurden ermittelt: für die Außenwand 80 €/m<sup>2</sup> (Außenwandfläche), für Dach bzw. oberste Geschossdecke 40 €/m<sup>2</sup> (Dachfläche) und für die Kellerdecke 21 €/m<sup>2</sup> (Kellerdeckenfläche). Die Zahlen in der Zeile 'Passivhaus' geben wie oben erläutert nur die direkt auf die jeweilige Energieeinsparmaßnahme bezogenen Kosten wieder.

Zusätzlich sind in Tabelle 28 **'Altbautypische Zusatzkosten'** separat dargestellt. Diese Zusatzkosten müssen zu den Kosten der Energiesparmaßnahme hinzugerechnet werden. Dies sind vor allem notwendige Maßnahmen zur Entschärfung von Wärmebrücken, die beim Altbau

einerseits einen erhöhten konstruktiven Aufwand erfordern, um die geforderte bauphysikalische Funktion (Tauwasserfreiheit) sicherzustellen. Andererseits aber in der Energiebilanz keine nennenswerten zusätzlichen Einsparungen bringen.

Bei der **Außenwand** muss die Dämmung über die Erdgeschossdecke nach unten bis mindestens zum Erdreich verlängert werden, so dass der Sockel am Perimeter des Gebäudes auch gedämmt ist (+10 €/m<sup>2</sup> Außenwandfläche; siehe auch Abbildung 61 auf S. 92). Zusätzlich zur Dämmung der **Kellerdecke** muss an den Kellerinnenwänden und an der Innenseite der Kelleraußenwände eine Begleitdämmung vorgesehen werden (+4 €/m<sup>2</sup> Kellerdeckenfläche; siehe auch Abbildung 64 auf S. 94). An der **Traufe** müssen bei Satteldächern z.B. so genannte Aufschieblinge für die Dachsparren angebracht werden, um die Dämmung der obersten Geschossdecke an die Außenwanddämmung möglichst lückenlos anschließen zu können (+25 €/m<sup>2</sup> Dachfläche; Abbildung 170).



**Abbildung 170** Montage eines „Aufschieblings“ als Zusatzmaßnahme für die Herstellung einer durchgehenden Wärmedämmung (Quelle: Architekt Schulze Darup, Sanierungsprojekt Jean-Paul-Platz, WBG Nürnberg)

Um die **Fenster** in Passivhausqualität in ihrer optimalen Position in der Dämmebene einbauen zu können, muss in der Regel die Fensterleibung nachgearbeitet werden. Hierfür wurden Extrakosten von +40 €/m<sup>2</sup> Fensterfläche bzw. etwa 100 €/Fenster angesetzt. Wenn ein ggf. vorhandener alter Mauerwerksanschlag ausgebrochen werden muss, können diese Kosten durchaus höher werden.

Die Kosten für die **Lüftungsanlage** sind grobe Richtwerte und beinhalten das Zentralgerät und die Lüftungskanäle. Die altbautypischen Zusatzkosten resultieren aus evtl. notwendigen Einhausungen für die Lüftungsgeräte für einen erhöhten Schallschutz, wenn die Geräte in Küche oder Badezimmer statt in einem separaten Technikraum platziert werden (siehe 5.3.4.2).

Die Kosten für die verbesserte **Luftdichtheit** können bei intaktem Innenputz und luftdichten Betondecken sehr gering sein. Der angegebene Wert beinhaltet besondere Maßnahmen auf Teilflächen, stellt jedoch nur einen groben Richtwert dar.

Die ohnehin anfallenden Kosten, z.B. für einen neuen Außenputz sind in der letzten Zeile in Tabelle 28 in Klammern aufgeführt. Die 'Ohnehin' - Referenzkosten für Fenster wurden zu 240 €/m<sup>2</sup> angesetzt, das ist der Preis für ein nach EnEV minimal zulässiges Fenster. Diese 'Ohnehinkosten' der Maßnahmen werden bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht der Energiesparmaßnahme zugerechnet, wenn die Energiesparmaßnahme gekoppelt mit einer sowieso notwendigen Sanierungsmaßnahme durchgeführt wird (Kopplungsprinzip s.u.).

Die in Tabelle 28 genannten Bauteilkosten für die einzelnen Maßnahmen führen insgesamt zu folgenden spezifischen Gesamtkosten (€/m<sup>2</sup> Wohnfläche) für alle Sanierungsmaßnahmen:

Kosten der Sanierung Altbau zum PH	etwa 188 €/m <sup>2</sup> Wfl.
Kosten der Sanierung Altbau zu EnEV 2009	etwa 73 €/m <sup>2</sup> Wfl.
Resultierende Mehrkosten	etwa 115 €/m <sup>2</sup> Wfl.

### 8.1.6 Das Kopplungsprinzip

Wichtig ist noch einmal festzustellen, dass nur die jeweils maßnahmenbezogenen Kosten, d.h. nur die für die Energieeinsparung wirksamen Aufwendungen angegeben sind. Die schon erwähnten so genannten 'Ohnehin'-Kosten sind in der Wirtschaftlichkeitsrechnung ganz bewusst herausgerechnet worden. Das sind z.B. der Putz bei einem WDVS, der ja auch erforderlich wäre, wenn keine Dämmung realisiert würde, oder die Basiskosten eines Fensters mit schlechtem Wärmeschutz.

Dieser Ansatz führt auf das **Kopplungsprinzip**, ohne das eine Wirtschaftlichkeit von Wärmeschutzmaßnahmen, insbesondere bei der Altbausanierung nicht zu erreichen ist. Die Erfahrung zeigt, dass Maßnahmen zum Wärmeschutz nur dann wirtschaftlich realisierbar sind, wenn sie gekoppelt mit den sowieso notwendigen baulichen Maßnahmen durchgeführt werden (vgl. [182], [184], [173]). Das ist beim Neubau selbstverständlich. Ein WDVS wird mit einem Putz versehen, genau wie eine Mauerwerkswand ohne Wärmedämmung. Die maßnahmenbezogenen Kosten sind lediglich die Materialkosten für die Verklebung und die Arbeitskosten für das Anbringen der Dämmplatten. Bei einem Fenster in PH-Qualität werden lediglich die Mehrkosten gegenüber einem Standardfenster in Ansatz gebracht.

Bei der Sanierung von Bestandsgebäuden ergibt sich daher zwingend, dass eine Maßnahme zum Wärmeschutz nur dann sinnvollerweise durchgeführt werden sollte, wenn sie gekoppelt mit einer sowieso notwendigen Sanierungsmaßnahme realisiert wird. D.h. ein WDVS wird im Zuge einer anstehenden Putzerneuerung durchgeführt. Anders ausgedrückt: nur wenn die zum Austausch vorgesehenen Bauteile (Wand, Fenster, Dach, etc.) ihre Lebensdauer erreicht haben, lohnt sich ein Austausch gegen ein besseres energieeffizientes Bauteil auch wirtschaftlich. Ein fünf Jahre altes intaktes Fenster auszutauschen oder eine zwei Jahre vorher verputzte Wand mit Wärmedämmung zu versehen bedeutet Kapitalvernichtung, denn die Energieeinsparung alleine kann nicht den Wertverlust der vorzeitig weggeworfenen Komponente kompensieren. Von dieser Regel gibt es einige wenige Ausnahmen: die Dämmung auf der obersten Geschossdecke oder die

Dämmung der Kellerdecke von unten sind in den meisten Fällen sehr kostengünstig und daher meistens ohne Kopplung an eine andere Maßnahme wirtschaftlich.

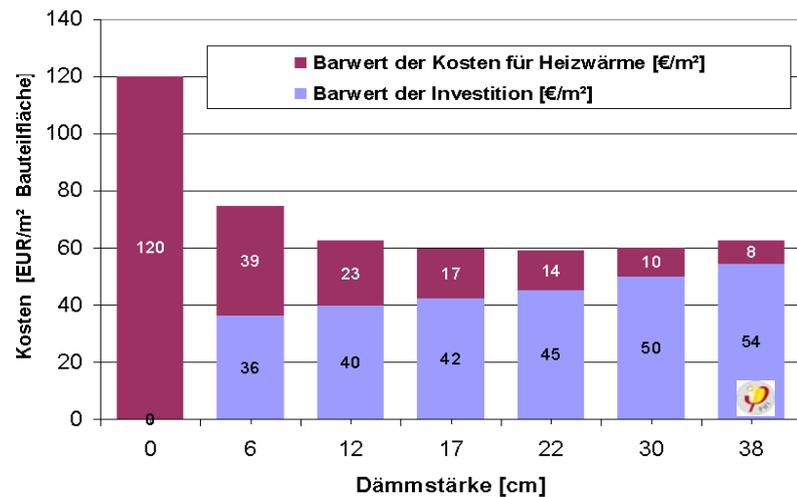
Diese Erkenntnisse sind sowohl bei Neubau aber insbesondere bei der Altbauanierung wichtig, denn sie beeinflussen die Entscheidung zur Wahl einer Gebäudekomponente stark. **Gebäude sind langlebige Wirtschaftsgüter:** Der Bauherr ist aufgrund der hohen Lebensdauer von Bauteilen von 30 bis 50 Jahren und mehr an eine einmal getroffenen Wahl für diese gesamte Zeitspanne gebunden, weil sich ein Austausch aus den genannten Gründen vorher nicht lohnt. D.h. **ein Niedrigenergiehaus oder ein auf das Niveau EnEV 200X saniertes Gebäude kann – allein aus wirtschaftlichen Gründen – nach 10 Jahren nicht zu einem Passivhaus umgebaut werden.** Es macht deshalb durchaus Sinn, einen 'zukunftsweisenden' Wärmeschutz mit derzeit etwas höheren Investitionskosten zu realisieren, um damit unabhängig zu sein von den zu erwartenden steigenden Energiepreisen.

#### 8.1.7 Zukunftsweisender Wärmeschutz ist sinnvoll

Die Differenz der Investitionskosten zu den Energieeinsparkosten in Abbildung 168 gibt für jede Maßnahme an, ob sich die jeweilige Komponente gegenüber dem Ausgangszustand 'Altbau' lohnt. Ein 'Gewinn' bzw. ein vermiedener (Energie-) Verlust, der ohne die Maßnahme entstanden wäre, ergibt sich, wenn der Barwert der Energieeinsparung höher ist als die Investitionskosten.

Man erkennt aus Abbildung 168 unschwer, dass sich alle Maßnahmen zusammengenommen lohnen, da insgesamt der Gewinn bzw. der vermiedene Verlust die zusätzlichen Investitionskosten deutlich übersteigt. Lediglich die Lüftungsanlage ist einzeln betrachtet noch teurer als die bei ihr anrechenbaren Energieeinsparungen, sie wird aber von den restlichen Maßnahmen mitfinanziert.

Eine weitere besonders instruktive Darstellung für diese Tatsache ist in Abbildung 171 gezeigt. Dort ist zum einen der Barwert der Energieverbrauchskosten (dunkelrot) über einen Zeitraum von 20 Jahren für eine Außenwand dargestellt ( $\text{€}/\text{m}^2$  Außenwandfläche). Andererseits sind die Investitionskosten (Barwert ohne Restwert nach 20 Jahren) für ein Wärmedämm-Verbundsystem mit verschiedenen Dämmstoffstärken angegeben. Werden beide Kostenarten aufaddiert, so ergeben sich die 'Vollkosten' für dieses Bauteil. Man erkennt, dass eine Wärmedämmung je nach Dämmstärke unterschiedliche Baukosten bedingt, aber es wird auch deutlich, dass die Heizkosten mit zunehmender Dämmstärke deutlich abnehmen: nichts zu tun, bedeutet daher sehr hohe Energiekosten für die kommenden Jahre in Kauf zu nehmen. Die Vollkosten nehmen links im Diagramm stark ab und steigen erst bei sehr großen Dämmstärken wieder leicht an. Das derzeitige Optimum bzw. Minimum der Kosten liegt bei etwa 22 cm Dämmstärke (Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,040 \text{ W}/(\text{mK})$ ,  $U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) [159], also noch über dem von der EnEV 2009 geforderten Wert von etwa 12 cm ( $U = 0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) (vgl. [140]).



**Abbildung 171: Vollkostenanalyse am Beispiel der Wärmedämmung einer Außenwand mit einem Wärmedämmverbundsystem. Aufgetragen sind die Kosten für Heizwärme in 20 Jahren (dunkelrot) und die Investitionskosten für die Wärmedämmung (blau). Beides ist bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Bauteilfläche und über der zunehmenden Dämmstärke aufgetragen. (Quelle: PHI)**

Andererseits wird deutlich, dass es mit Blick auf die Vollkosten unerheblich ist, ob eine Wärmedämmung mit etwa 17 cm oder eine mit 30 cm realisiert wird. Die Baukosten sind für die stärkere Dämmung zwar etwas höher, die Energieverbrauchskosten nehmen aber entsprechend ab, so dass die Summe für beide Fälle etwa gleich ist. Die Zahlen in Abbildung 171 wurden mit den gleichen Randbedingungen, wie weiter oben erläutert, berechnet. Werden jedoch höhere Energiepreise angenommen, so verschiebt sich das Minimum der Kurve nach rechts zu höheren Dämmstärken. **Das bedeutet: eine Investition in "zukunftsweisenden" Wärmeschutz ist heute schon vernünftig und wird sich bei voraussichtlich steigenden Energiepreisen auch finanziell lohnen.**

### 8.1.8 Vergleich mit dem gesetzlichen Standard (EnEV 2009)

Die Mehrkosten für Maßnahmen, die für eine Sanierung mit PH-Komponenten im Vergleich zu einer konventionellen Sanierung nach EnEV 2009 ausgegeben werden müssen, sind etwa 115 €/m<sup>2</sup> Wohnfläche. Die Mehrkosten für die Passivhauskomponenten ergeben sich zum größten Teil aus der Anschaffung der kontrollierten Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung und den besseren Fenstern mit wärmeisolierten Fensterrahmen.

Die verbesserte Luftdichtheit und Wärmebrückenfreies Konstruieren sind beim Neubau im Wesentlichen zusätzliche Planungsleistungen, die keine merklichen zusätzlichen Baukosten verursachen. Hier besteht bei der Altbausanierung jedoch eine sehr große Bandbreite: Die Kosten für die bauphysikalische Ertüchtigung von Wärmebrücken z.B. am Perimeter und die Verbesserung der Luftdichtheit können je nach Zustand des Gebäudes deutlich höher ausfallen. Die wesentlichen baulichen Mehrkosten für Energieeffizienz-Maßnahmen entstehen jedoch auch bei der Altbausanierung vor allem bei der Lüftung mit Wärmerückgewinnung, bei der Wärmedämmung und den besseren Fenstern.

Kurz zusammengefasst lässt sich ein Vergleich zwischen einer hochwertigen Sanierung mit Passivhauskomponenten und einer Sanierung nur nach dem derzeitigen gesetzlichen Standard (EnEV 2009) so formulieren: Bei den hier angenommenen Energiepreisen und Baukosten (Stand 2006) ist der 'Gewinn' aus der Energieeinsparung gemäß Abbildung 168 für beide Sanierungskonzepte etwa gleich, mit einem leichten Vorteil für die gesetzlich vorgeschriebene Variante. Dies liegt vor allem daran, dass für diese Variante keine Lüftung mit Wärmerückgewinnung vorgeschrieben ist, sondern allenfalls eine reine Abluftanlage. In den Kostenrechnungen wurden daher die Kosten einer reinen Abluftanlage als 'Ohnehinmaßnahme' angesetzt (30 €/m<sup>2</sup> Wfl.) (vgl. Tabelle 28).

### **8.1.9 Ist reine Fensterlüftung eine zeitgemäße Methode für gute Luftqualität?**

Eine hochwertige Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ist jedoch auch aus anderen Gründen als der reinen Energieeinsparung sinnvoll: Aus den Erfahrungen der Passivhausentwicklung und von verschiedenen Messungen zur Luftqualität in Sanierungsprojekten, in denen die Bewohner nur über die Fenster lüften können (vgl. [155]), ist bekannt, dass dort der mittlere Luftwechsel sehr gering und die resultierende Luftqualität deshalb sehr schlecht ist. Andererseits ist die Akzeptanz von reinen Abluftanlagen aus verschiedenen Gründen (Zuglufterscheinungen, hohe Schallemissionen in Wohnräumen) oft ebenfalls gering, d.h. die Bewohner neigen dazu, solche Systeme zu deaktivieren, so dass die Luftqualität in solchen Wohnungen wieder entsprechend schlecht wird.

Diese Fragen der Luftqualität bzw. die entsprechenden Vorteile einer Lüftung mit WRG wurden bei der Erhebung der Zahlen in Abbildung 168, [159] ausdrücklich nicht berücksichtigt. Eine Lüftungsanlage mit WRG wird daher in dieser Hinsicht leider unterbewertet. Die derzeitige KfW-Förderung<sup>1</sup> für entsprechende Bauvorhaben stellt jedoch genügend Mittel bereit, so dass die Sanierung mit Passivhaus-Komponenten in Summe durchaus einen finanziellen Vorteil bedeutet.

### **8.1.10 Preissteigerung und Zinsentwicklung Unsicherheit der Annahmen**

In der vorgestellten Berechnungsmethode ist eine Energiepreissteigerung in der Höhe der Inflationsrate per se berücksichtigt, da mit einem 'realen' Zinssatz gerechnet wird (derzeit 3,3 %), aus dem die langjährige Inflationsrate herausgerechnet wurde (derzeit etwa 1,7 %). Weitere Energiepreissteigerungen wurden absichtlich aus den oben genannten Gründen nicht angenommen (vgl. [183]).

Der Effekt von stark steigenden Zinsen bzw. einer hohen Energiepreissteigerung kann mittels sogenannter 'Sensitivitätsanalysen' verdeutlicht werden: Ein hoher Energiepreis, z.B. 0,10 €/kWh verbessert die Rentabilität jeder Energieeffizienzmaßnahme stark. Ein verdoppelter Zinssatz (z.B. real 7,0 %) bei gleich bleibenden Energiepreisen stellt die beschriebenen

Maßnahmen weitgehend in Frage. Wird für beides eine starke Steigerung angenommen so ergibt sich wie zu erwarten, wieder etwa dieselbe Gewinn-Differenz, wie sie in Abbildung 168 dargestellt ist.

Über die zukünftige Entwicklung des Zinsniveaus bzw. der Energiepreise kann weitgehend nur spekuliert werden. Es darf jedoch aufgrund der derzeitigen Zinspolitik der Notenbanken vermutet werden, dass bei steigenden Energiepreisen die finanzpolitischen Entscheidungen eher in Richtung gleich bleibend niedriger Zinsen ausfallen werden. Denn beide Belastungen wird sich eine Volkswirtschaft voraussichtlich nicht leisten können: hohe Zinsen und hohe Energiepreise. Das bedeutet jedoch, dass eine Investition in eine hochwertig wärmegeämmte Gebäudehülle sich aller Voraussicht nach lohnen wird.

#### **8.1.11 Schrittweise Modernisierung wegen Kapitalmangels**

Die Erfahrung zeigt, dass eine Sanierung nach einem Gesamtkonzept das beste Ergebnis bringt. Können alle Maßnahmen in einem Zuge durchgeführt werden, wie das bei Wohnungsbaugesellschaften gängige Praxis ist, dann bedeutet das auch finanziell die kostengünstigste Vorgehensweise. Insbesondere gilt: die oben genannten Kosten konnten nur realisiert werden, weil die Projekte gut konzipiert und rationell durchgeführt wurden.

Oft werden Sanierungsmaßnahmen jedoch zurückgestellt oder es werden nur einzelne Maßnahmen, Fenstertausch oder Wärmedämmung der Außenwand, durchgeführt, weil insbesondere private Bauherren diese Maßnahmen nicht mit einem Kredit finanzieren wollen. Dieses 'schrittweise' Vorgehen kann in bestimmten Fällen sinnvoll sein, wenn z.B. die Fenster erst wenige Jahre alt sind und eine Außenwanddämmung durchgeführt werden soll. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass dies in aller Regel zusätzlichen Aufwand erzwingt, der auch mit nicht unerheblichen zusätzlichen Kosten verbunden ist. Im Einzelnen wurde dies in [189] ausgeführt.

Die Folgerung lautet daher: Auch eine Altbausanierung, insbesondere ein hochwertiger Wärmeschutz mit PH-Komponenten, rechnet sich auch finanziell und sollte daher ggf. über einen Kredit finanziert werden, um alle notwendigen Einzelmaßnahmen in einem Zuge durchführen zu können. Hier gilt es, die bislang noch vorhandenen Bedenken der Kreditinstitute auszuräumen: auch eine Altbausanierung – wenn sie mit entsprechend hochwertigen, d.h. energieeffizienten Komponenten durchgeführt wird – vermindert das Risiko des Eigentümers bzw. Investors vor steigenden Energiepreisen. Dies schafft neben höherem Wohn- und damit Wiederverkaufswert ein finanzielles Polster, das auch als Alterssicherung betrachtet werden kann.

#### **8.1.12 Fazit**

Es zeigt sich, dass bei den hier angenommenen Energiepreisen (0,066 €/kWh brutto, d.h. 0,056 €/kWh netto) eine Gebäudehülle bzw. die Komponenten gemäß EnEV in der Gesamtwirtschaftlichkeit in etwa gleich auf liegen wie die Sanierung mit Passivhaus-Komponenten. Bei Energiepreisen (Endenergie) ab etwa 0,08 €/kWh wird jedoch die Passivhausvariante vorteilhafter. D.h. der

---

<sup>1</sup> aktuelle Förderbedingungen sind veröffentlicht bei der KfW-Bank: [www.kfw.de](http://www.kfw.de)

bessere Wärmeschutz wird sich mittelfristig bezahlt machen. Es ist deshalb sinnvoll, das energetisch bessere Passivhaus oder eine entsprechend hochwertige Sanierungsmaßnahme auch heute schon zu realisieren.

Neben dem rein energetischen bzw. finanziellen Aspekt muss hervorgehoben werden, dass zu einem Gebäude auf dem neuesten technischen Stand in jedem Fall eine kontrollierte Lüftung gehört. Dies ist aus bauphysikalischer Sicht sowieso anzuraten, um eine Schimmelbildung aufgrund zu hoher Feuchtigkeit sicher zu vermeiden. Wird diese Lüftung als reine Abluftanlage realisiert (etwa 30 €/m<sup>2</sup> Wfl.), so erhöht dies den Heizwärmebedarf genauso wie bei der reinen Fensterlüftung. Dies ist aus rein energetischer Sicht zwar nicht zu empfehlen, aus den genannten bauphysikalischen Überlegungen heraus ist es jedoch notwendig, um eine ausreichende Luftqualität zu gewährleisten.

Wird die Lüftungsanlage mit einer hocheffizienten Wärmerückgewinnung ausgestattet (etwa 80 €/m<sup>2</sup> Wohnfläche), so sind die Mehrkosten zwar signifikant höher und können nicht durch den Energieeinspareffekt der Lüftungsanlage alleine aufgefangen werden, können jedoch im Rahmen des Gesamtkonzeptes getragen werden (vgl. Abbildung 168). In der Summe aller Wärmeschutzmaßnahmen für ein Gebäude ergeben sich auch für die Sanierung mit Passivhaus-Komponenten immer positive 'Gewinne'. Denn insbesondere die Wärmedämmung bringt deutlich mehr Einsparung als sie kostet und ergibt daher einen besonders hohen 'Gewinn', der in der Summe über alle Kosten der verschiedenen Maßnahmen die höheren Kosten der Lüftungsanlage überkompensiert, so dass sich für die Variante 'Passivhaus' insgesamt eine höhere Einsparung als die Investitionskosten errechnet.

Neben dem reinen Energieeffizienzeffekt wird mit den Energieeffizienzmaßnahmen auch ein ganz erheblicher für den Bewohner fühlbarer Zusatznutzen erreicht und zwar sowohl für neu gebaute Häuser als auch für Bestandssanierungen (vgl. [188], [185]). Außerdem findet die Wertschöpfung bei der Modernisierung der Gebäude in der jeweiligen Region statt, was auch volkswirtschaftlich wünschenswert ist, denn es schafft Arbeitsplätze bei mittelständischen und regional agierenden Unternehmen.

Vor dem Hintergrund der dargestellten Sachverhalte gilt eindeutig: stabil niedrige Zinsen fördern investive Maßnahmen wie die Energieeffizienz von Gebäuden am nachhaltigsten, d.h. das derzeitige allgemein niedrige Zinsniveau ist neben jedweder staatlicher Förderung eine große Chance für das energieeffiziente Bauen, die es zu nutzen gilt.

## **8.2 Energieträger, Primärenergiebedarf**

### **8.2.1 Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie, Nutzenergie**

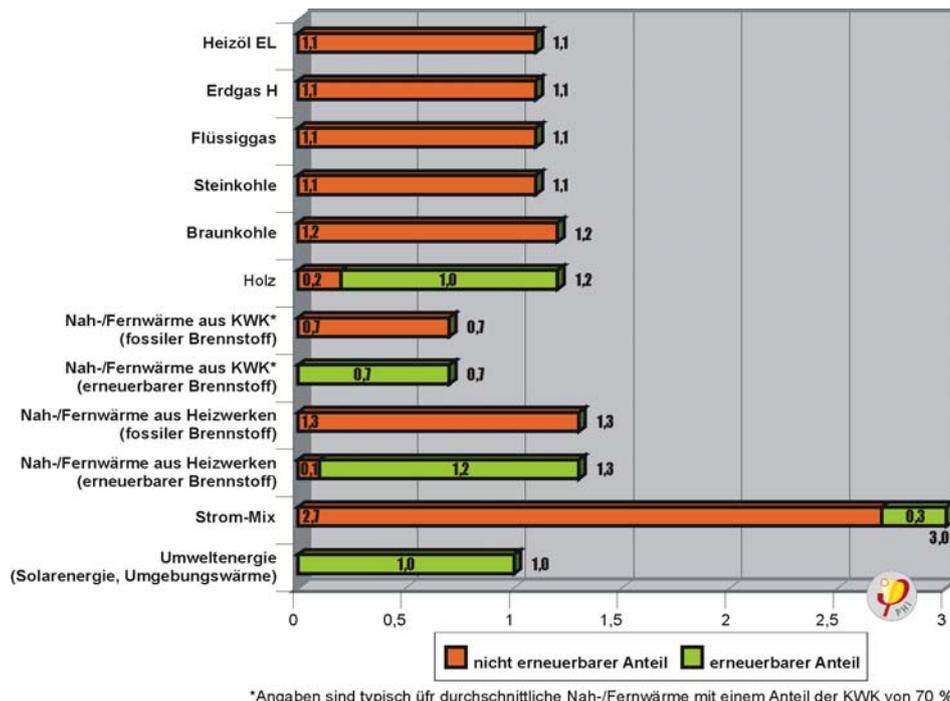
Zwischen dem natürlich vorhandenen Energieträger wie zum Beispiel dem unterirdisch vorhandenen Rohöl, dem Uran oder der Sonnenenergie und der Energiedienstleistung im Gebäude, wie Heizwärme oder Licht liegt eine lange Prozesskette. Diese führt dazu, dass nur ein mehr oder wenig geringer Anteil des ursprünglichen Energiegehalts als Nutzenergie beim Verbraucher zur Verfügung steht. Der Rest wird für den Abbau, die Umwandlung und den

Transport des Energieträgers gebraucht. Für die Energieformen an den einzelnen Stationen der Prozesskette werden die folgenden Begriffe verwendet:

- **Primärenergie** ist die Energie wie sie ursprünglich in der Natur vorliegt. Bei fossilen Energieträgern sind dies das in den unterirdischen Lagerstätten vorkommende Erdöl und Erdgas und die Kohle. Bei erneuerbaren Energien sind dies die Sonnenenergie, Windenergie oder die potentielle Energie des Wassers in einem Stausee.
- Durch Abbau und Umwandlung wird aus der Primärenergie die **Sekundärenergie**. Dies ist die für den gewünschten Zweck nutzbare Energieform. Also zum Beispiel das Heizöl für die Heizung und das Warmwasser oder der Strom für die Lampe. Für den Abbau fossiler oder nuklearer Brennstoffe muss Energie aufgewendet werden. Außerdem treten Umwandlungsverluste in der Raffinerie oder dem Kohlekraftwerk auf, so dass der ursprüngliche Energiegehalt verringert wird.
- Die Energie, wie sie in das Gebäude geliefert wird, bezeichnet man als **Endenergie**. Da die Energieträger noch zum Gebäude transportiert werden müssen, entstehen Transportverluste, wie zum Beispiel der Benzinverbrauch des Heizöllasters oder Leitungs- und Umspannverluste beim Strom, so dass beim Schritt von der Sekundär- zur Endenergie nochmals Energie verbraucht wird.
- Die **Nutzenergie** ist die tatsächlich für die Energiedienstleistung verwendete Energie. Mögliche Formen der Nutzenergie sind u.a. Wärme, Kälte, Licht, mechanische Arbeit und Schall. Bei der Umwandlung von Endenergie geht je nach Effizienz der jeweiligen Prozesse ein Anteil nicht nutzbarer Energie verloren. Eine Glühbirne wandelt nur einen sehr geringen Anteil des elektrischen Stroms in sichtbares Licht um. Der Rest geht zumindest außerhalb der Heizperiode als ungenutzte Wärme in den Raum. Die Heizungsanlage hat Energieverluste in Form von Hilfsstrom für Pumpen, Leitungs- und Speicherverlusten.

### 8.2.2 Primärenergiefaktor

Die vorgelagerte Prozesskette für die Bereitstellung eines Endenergieträgers (Öl, Gas, Fernwärme, Strom) wird durch den Primärenergiefaktor abgebildet. Dieser berücksichtigt also auch den nicht erneuerbaren Energieverbrauch für die Energiegewinnung, alle Umwandlungs-, Transport- und Speicherverluste (vgl. z.B. GEMIS [208]). Auch für die Berechnung des Primärenergiebedarfs im PHPP [17] und in der EnEV werden Primärenergiefaktoren [138] verwendet. Der Faktor ist für Erdgas, Heizöl und Kohle nur wenig größer als „1“. Aufgrund der hohen Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung ist der Primärenergiefaktor für den Anteil des deutschen Strom-Mix' „2,6“ In anderen Ländern, mit zum Beispiel einem hohen Anteil an Wasserkraft, kann dieser Faktor niedriger liegen. Für Holz sieht die Energiesparverordnung nur „0,2“ vor, weil hier nur der nicht-regenerative Anteil berücksichtigt wird, also bei Holzpellets zum Beispiel nur die Herstellungs- und Transportenergie. Diese Bewertung ist umstritten, da Holz nur in begrenztem Ausmaß zur Verfügung steht und keine unerschöpfliche Ressource ist.



**Abbildung 172 Primärenergiefaktoren verschiedener Energieträger nach DIN V 4701-10/A1, Tabelle C.4-1 (Stand 09.2009, vgl. [138]) (Grafik: PHI)**

### 8.2.3 Energiedienstleistung

Der Energieverbrauch ist kein Maß für den Nutzen, der durch den Energieeinsatz erbracht wird, sondern ein Maß für den Aufwand, der für diesen Nutzen getrieben wird. Der Nutzen – das sind die Dienstleistungen, die mit dem Einsatz von Energie erbracht werden, z.B. das Warmhalten von Räumen, warmes Wasser zum Baden oder Duschen, Licht, Kühlen oder die Reinigung von Geschirr oder Wäsche. Für diesen gewünschten Nutzen wurde der Begriff „Energiedienstleistung“ geprägt [209]. Ein klassisches Beispiel hierfür ist der Wunsch über einen längeren Zeitraum heißen Kaffee zur Verfügung zu haben. Dies wird in der Regel dadurch erreicht, dass die Kaffeekanne auf einer in der Kaffeemaschine integrierten Warmhalteplatte steht, welche unter Verbrauch von elektrischem Strom dem Kaffee die an die Umgebung abgegebene Wärme wieder zuführt. Die Energiedienstleistung „warmer Kaffee“ kann aber auch über einen gewissen Zeitraum ganz ohne Zuführung von Energie erbracht werden, wenn die Wärmeverluste des Kaffees durch die Benutzung einer Thermoskanne stark reduziert werden. Dieselbe Dienstleistung kann mit viel Energie oder viel effizienter mit minimalem Energieaufwand bereitgestellt werden. Bei fast allen Energiedienstleistungen verhält es sich ähnlich: Der Aufwand ist extrem hoch, auch bedingt durch jahrelang billige Energie. Entsprechend hoch sind die Effizienzpotentiale.

## 8.3 Erneuerbare Energiequellen

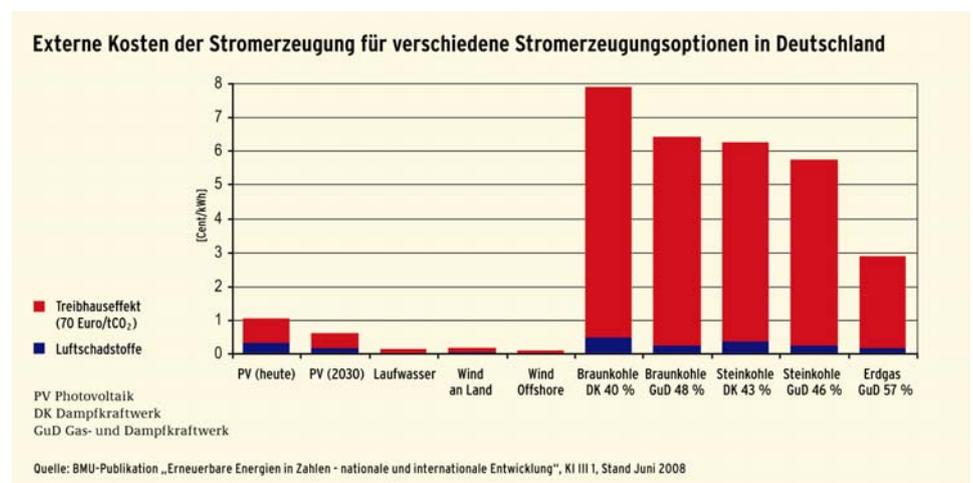
Neben der sparsameren und effizienteren Wandlung und Nutzung von Energie kann auch durch die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energiequellen der Klimawandel verlangsamt werden. Bei ihrer Nutzung wird im Gegensatz zur Verbrennung fossiler Energieträger im Normalfall kein oder nur sehr wenig

zusätzliches CO<sub>2</sub> ausgestoßen. Um die im März 2007 von den Staats- und Regierungschefs der Europäischen Union gefassten Beschlüsse zum Klimaschutz zu verwirklichen, soll daher der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch in der EU bis 2020 auf dann 20 % verdreifacht werden. Für Deutschland bedeutet dies ebenfalls eine Verdreifachung von 5,3 % auf 16 % (vgl. [19])

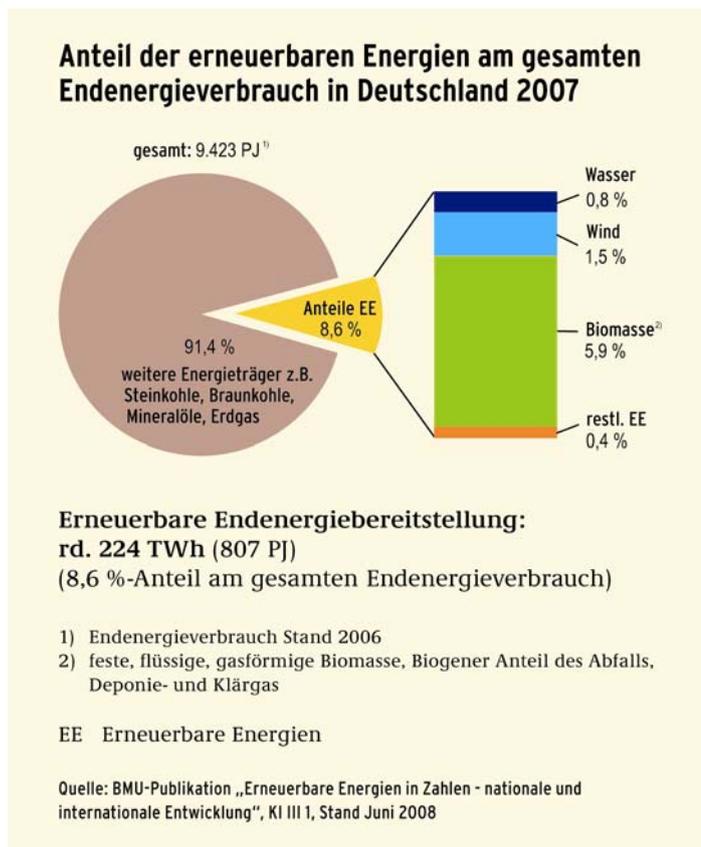
Neben der Verringerung des CO<sub>2</sub>-Austoßes weisen erneuerbaren Energien aber noch weitere Vorteile gegenüber den fossilen Brennstoffen auf:

- Sie können die Abhängigkeit von den Importen fossiler Energieträger aus instabilen oder undemokratischen Regionen vermindern und somit langfristig auch mehr Versorgungssicherheit gewährleisten.
- Mit ihrer Nutzung können die Kostensteigerungen, die bei fossilen und nuklearen Energieträgern auf Grund der begrenzten Ressourcen in Zukunft unvermeidlich sein werden, umgangen werden.
- Erneuerbare Energien hinterlassen kaum Altlasten, wie zum Beispiel strahlenden Atom Müll.
- Erneuerbare Energien schaffen Arbeitsplätze, da die Wertschöpfung meist regional erfolgt. Im Jahr 2005 waren 170 000 Menschen in diesem Sektor beschäftigt – Tendenz stark steigend [18].

Bei der Bewertung unterschiedlicher Energieträger ist es sinnvoll, auch die externen Kosten zu beurteilen. Dies sind die durch die Nutzung eines Energieträgers entstandenen volkswirtschaftlichen Kosten, die nicht vom Verursacher getragen werden. Vor allem sind dies die Kosten für durch den Klimawandel verursachte Schäden. Abbildung 173 zeigt, dass erneuerbare Energien sehr viel geringere externe Kosten erzeugen als fossile Brennstoffe.



**Abbildung 173 Externe Kosten verschiedener Energieträger [18]**



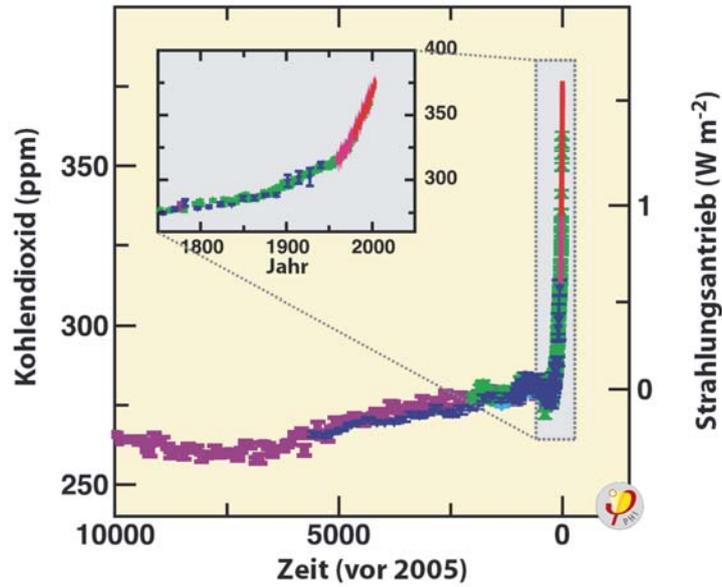
**Abbildung 174** Anteile der Endenergie aus erneuerbaren Energien in Deutschland (2007) [18]

Allerdings sind auch bei erneuerbaren Energien die dauerhaften Nutzungspotentiale begrenzt. Es stehen zum Beispiel nicht unbegrenzt Standorte für Windkraftanlagen zur Verfügung und bei einer Ausweitung der Anbauflächen für Biomasse tritt diese in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion oder zu Lebensräumen für Wildtiere und -pflanzen (vgl. [18], [234]). Daraus wird deutlich, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien Hand in Hand mit einer Steigerung der Energieeffizienz gehen muss, um einen wirksamen Klimaschutz zu erreichen.

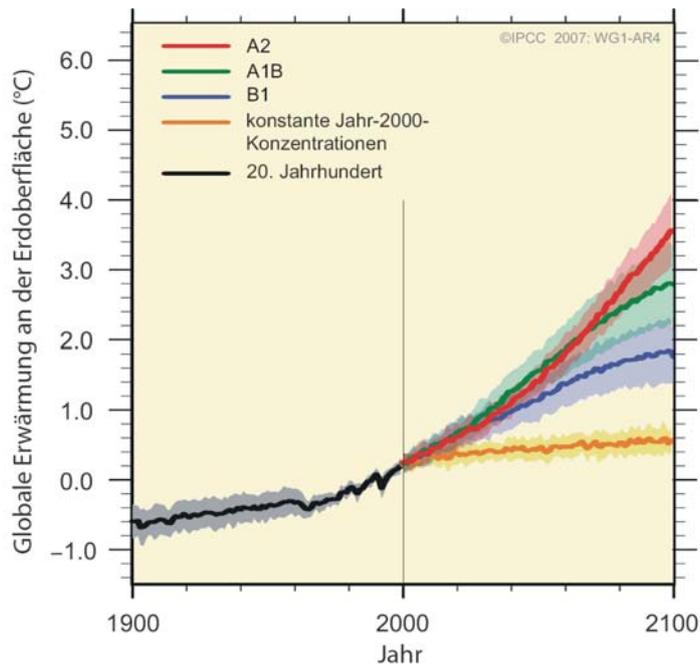
**Das nutzbare Potential erneuerbarer Energien ist begrenzt.**

## 8.4 Treibhauseffekt und Klimaschutz

Seit dem Anfang der Industrialisierung ist die atmosphärische Konzentration des wichtigsten Treibhausgases Kohlendioxid von 280 ppm auf 379 ppm (2005) gestiegen. Im gleichen Zeitraum haben sich auch die Konzentrationen der Treibhausgase Methan und Lachgas deutlich erhöht. Dabei wurde die natürliche Bandbreite der letzten 650.000 Jahre bei Weitem übertroffen. Hauptquellen der erhöhten Treibhausgaskonzentrationen sind der Verbrauch fossiler Brennstoffe sowie die Landwirtschaft (vgl. [128]).



**Abbildung 175** Atmosphärische Konzentration von Kohlendioxid in den letzten 10.000 Jahren und seit 1750 (vergrößerter Ausschnitt)(Quelle: IPCC 2007, [128])



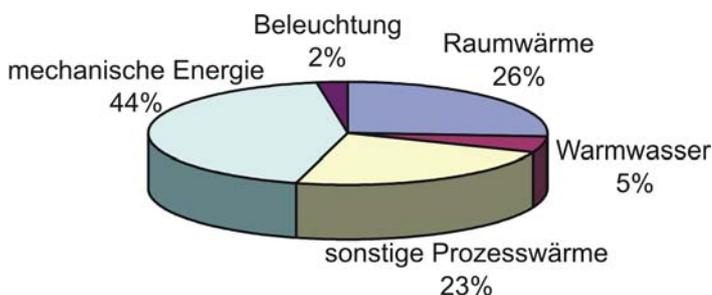
**Abbildung 176** Mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche für verschiedene Emissionsszenarien (Quelle: IPCC 2007 [128])

Der größte Teil des Anstiegs der globalen Erdoberflächentemperatur um 0,76 °C seit Beginn der Industrialisierung ist sehr wahrscheinlich durch die menschengemachten Treibhausgasemissionen verursacht. Diese haben allein zwischen 1970 und 2004 um 70 % zugenommen (vgl. [130]). Werden die Treibhausgasemissionen nicht verringert oder steigen sie sogar weiter an, so wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein weiterer Temperaturanstieg zwischen 1,8 und 4 °C erwartet (vgl. [128]).

Dieser globale Temperaturanstieg wird neben vereinzelt positiven Effekten (in Nordeuropa z.B. verringerte Heizkosten, erhöhte Ernteerträge) überwiegend nachteilige Auswirkungen haben (vgl. [129]):

- Höheres Risiko für Dürre und Wasserknappheit aber auch für Überschwemmungen
- Störung von Ökosystemen und damit verbundener Rückgang der Artenvielfalt
- Rückgang der Ernteerträge, insbesondere bei einem Temperaturanstieg über 3 °C
- Zunahme der Küstenerosion und von Überschwemmungen in küstennahen Gebieten
- wachsende Unterernährung und erhöhte Sterblichkeit

Die Staats- und Regierungschefs der Europäischen Union haben daher im Jahr 2007 beschlossen, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 um 20 % zu senken. Wenn sich andere Länder ebenfalls zu weitgehenden Emissionsreduzierungen verpflichten, ist sogar eine Verminderung um 30 % vorgesehen. Für Deutschland ist in der 2007 im Rahmen einer Regierungserklärung vorgelegten „Klimaagenda 2020“ eine Verminderung der Treibhausgasemissionen um 40 % (gegenüber 1990) angestrebt.



**Abbildung 177** Anteile am Endenergieverbrauch in Deutschland 2007. Der Sektor „mechanische Energie“ enthält auch den Verkehrssektor (vgl. [131])

Abbildung 177 zeigt, dass die Raumwärmeerzeugung im Gebäudebestand für 26 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich ist. Gleichzeitig besteht hier schon heute ein großes Einsparpotential von je nach Gebäudetyp bis zu 90 % (vgl. Abbildung 29 auf Seite 65). Die Gebäudemodernisierung kann daher einen wichtigen Beitrag zur Senkung des deutschen Energieverbrauchs und damit zum Erreichen der deutschen Klimaschutzziele leisten.

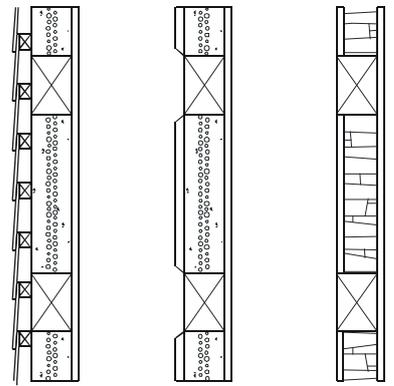
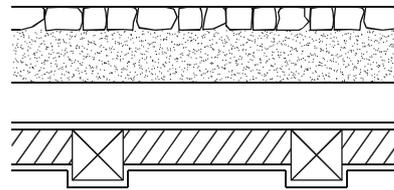
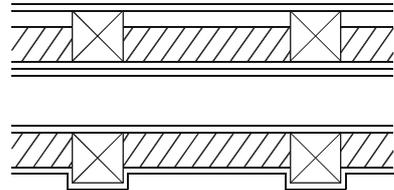
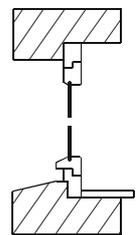
## 9 Anhang

### 9.1 Zeittypische Bauteilaufbauten und U-Werte im Bestand (Deutschland, Alte Bundesländer)

#### 9.1.1 Einfamilienhäuser

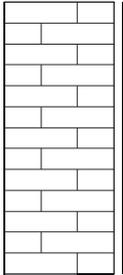
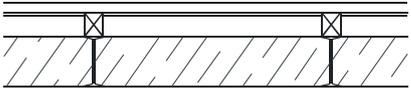
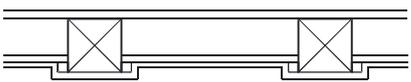
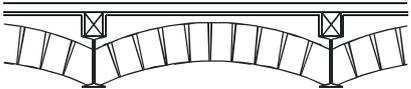
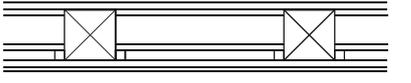
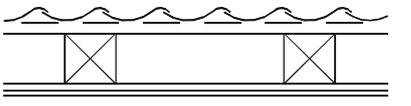
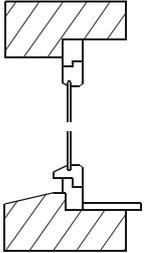
##### 9.1.1.1 bis 1918, Einfamilienhaus (Fachwerk)

Fachwerkbauten bis zum Ende des 1. Weltkriegs

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b> 12 - 18 cm Eichenfachwerk  mit Lehmausfachung, außen verschindelt  innen vollflächig, außen nur Gefache verputzt  mit Feldsteinausmauerung, innen vollflächig, außen nur Gefache verputzt	1,90  1,90  2,48	
<b>Kellerdecke</b>  Feldsteine, in Sand (nicht unterkellert)  Holzbalkendecke mit Strohlhmwickel, unterseitig verputzt	2,88  1,04	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Strohlhmwickel, oberseitig Dielung (Eiche oder Fichte), unterseitig Putz auf Spalierlatten  dito, unterseitig verputzt	1,03  1,22	
<b>Dachschräge</b>  Putz auf Spalierlatten	3,08	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

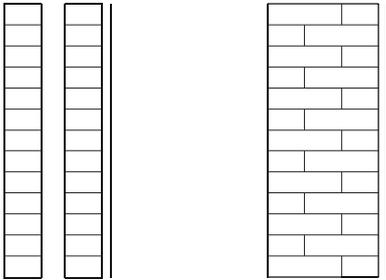
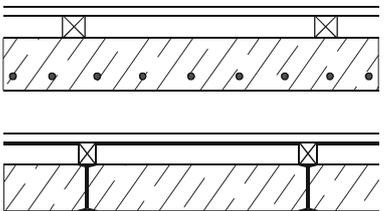
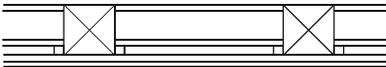
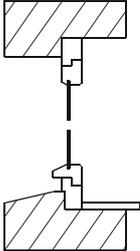
## 9.1.1.2 bis 1918, Einfamilienhaus (massiv)

Massivbauten bis zum Ende des 1. Weltkriegs

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  38 cm Vollziegel	1,70	
<b>Kellerdecke</b>  scheidrechte Kappendecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung  gemauertes Kappen- gewölbe, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern	1,11   0,91   1,37	    
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blind- boden und Lehmschlag, 2 - 3 cm Schlackenschüttung, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten	0,78	
<b>Dachschräge</b>  Putz auf Spalierlatten	3,08	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

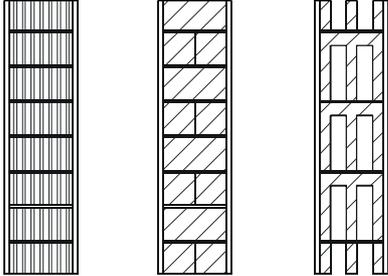
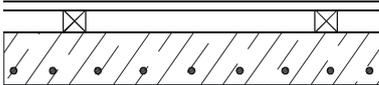
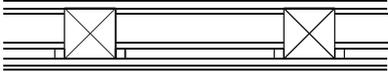
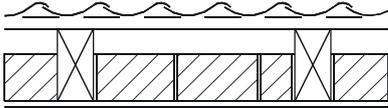
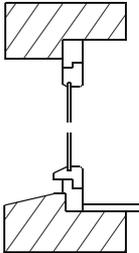
## 9.1.1.3 1919-1948, Einfamilienhaus

Bauten zwischen 1. und 2. Weltkrieg

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  2 x 12 cm Vollziegel mit 6 cm stehender Luftschicht, innen verputzt  38 cm Vollziegel	1,64   1,70	
<b>Kellerdecke</b>  18 cm Ortbetondecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern  scheidrechte Kappendecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern	1,11   1,13	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten	0,78	
<b>Dachschräge</b>  Putz auf Spalierlatten	3,08	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

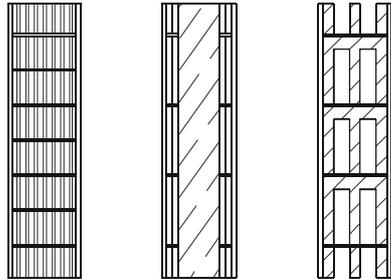
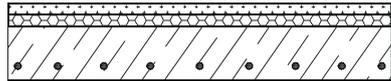
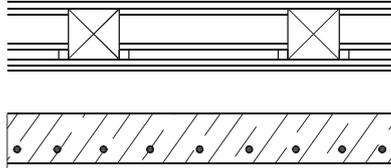
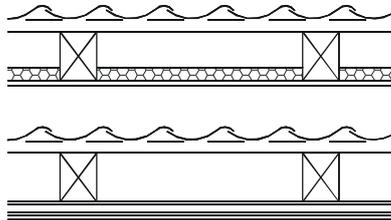
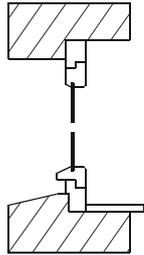
### 9.1.1.4 1949-1957, Einfamilienhaus

In Nachkriegsjahren aufgrund angespannter Materialmärkte, niedriger Anforderungen in Bauvorschriften und des hohen Wohnungsbedarfs qualitativ einfache Baukonstruktionen mit geringen Materialstärken; Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz nach der DIN 4108 nicht immer eingehalten

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 cm Gitterziegel, verputzt  24 cm Bimsvollsteine, verputzt  24 cm Ziegelsplitt- oder Bimshohlblocksteine, verputzt	1,21  0,93  1,44	
<b>Kellerdecke</b>  12 cm Stahlbetondecke, oberseitig 6 – 8 cm Schlackenschüttung Dielung auf Lagerhölzern	1,01	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten	0,78	
<b>Dachschräge</b>  11,5 cm Bimssteine, unterseitig verputzt	1,41	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

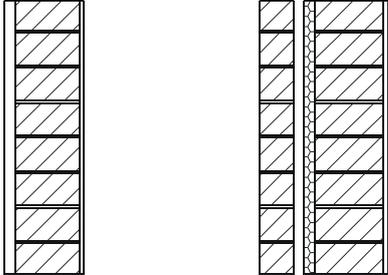
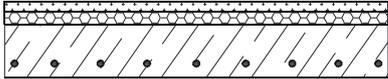
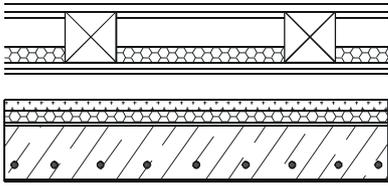
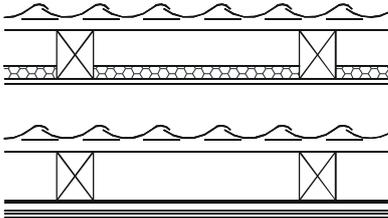
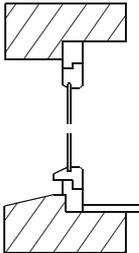
## 9.1.1.5 1958-1968, Einfamilienhaus

Mindestanforderungen nach der DIN 4108 meist eingehalten und gelegentlich übererfüllt

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<p><b>Außenwand</b></p> <p>24 – 30 cm Gitterziegel, verputzt</p> <p>24 - 30 cm Holzspansteine mit Beton gefüllt, verputzt</p> <p>24 - 30 cm Ziegelsplitt- oder Bimshohlblocksteine, verputzt</p>	<p>1,21</p> <p>1,16</p> <p>1,44</p>	
<p><b>Kellerdecke</b></p> <p>12 - 16 cm Stahlbetondecke, 2 – 3 cm Trittschall- dämmung aus Polystyrol, 4 cm Estrich</p>	0,84	
<p><b>Oberste Geschossdecke</b></p> <p>Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten</p> <p>12 – 16 cm Stahlbetondecke (ohne Dämmung)</p>	<p>0,78</p> <p>3,25</p>	
<p><b>Dachschräge - ausgebaut</b></p> <p>4 cm Mineralwolle, Gipskartonplatten</p> <p>5 cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt</p>	<p>0,81</p> <p>1,11</p>	
<p><b>Fenster</b></p> <p>Holzfenster, einfachverglast</p>	5,20	

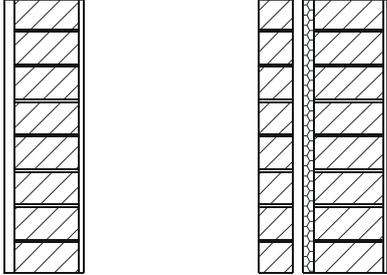
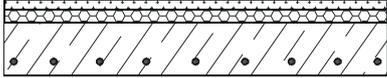
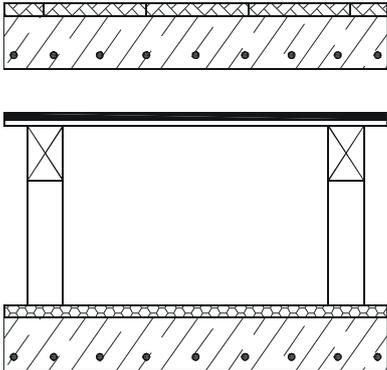
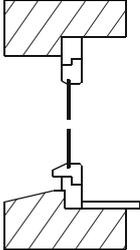
## 9.1.1.6 1969-1978, Einfamilienhaus (Schrägdach)

ergänzende Bestimmungen zur DIN 4108; erste Ölpreiskrise → erforderlicher Mindestwärmeschutz nach der DIN 4108 meist übertroffen

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 cm Kalksandlochsteine mit 3 – 4 cm Dämmputz  24 cm Kalksandlochsteine, 4 cm Dämmung, Hinterlüftung 11,5 cm Verblendung	1,36  0,64	
<b>Kellerdecke</b>  12 - 16 cm Stahlbeton- decke, 2 – 3 cm Dämmung, 4 cm Estrich	0,84	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und 5 cm Mineralwolle, oberseitig Dielung, unterseitig Gipskarton- platten  12 – 16 cm Stahlbeton- decke, 5 cm Dämmung, 5 cm Estrich	0,52  0,63	
<b>Dachschräge</b>  5 cm Mineralwolle, Gipskartonplatten  5 cm Holzwole- Leichtbauplatten, verputzt	0,65  1,11	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

## 9.1.1.7 1969-1978, Einfamilienhaus (Flachdach)

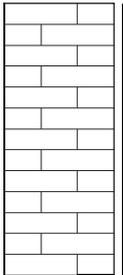
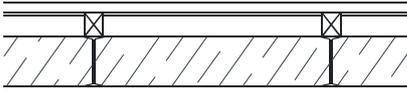
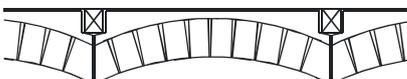
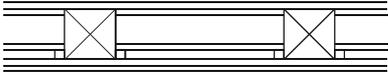
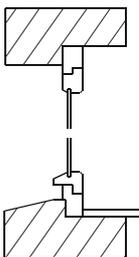
ergänzende Bestimmungen zur DIN 4108; erste Ölpreiskrise → erforderlicher Mindestwärmeschutz nach der DIN 4108 meist übertroffen

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Bauteilzeichnung
<p><b>Außenwand</b></p> <p>24 cm Kalksandlochsteine mit 3 – 4 cm Dämmputz</p> <p>24 cm Kalksandlochsteine, 4 cm Dämmung, Hinterlüftung 11,5 cm Verblendung</p>	<p>1,36</p> <p>0,64</p>	
<p><b>Kellerdecke</b></p> <p>12 - 16 cm Stahlbetondecke, 2 – 3 cm Trittschall- dämmung, 4 cm Estrich</p>	0,84	
<p><b>Flachdach</b></p> <p>16 cm Stahlbetondecke 6 cm Schaumglas Dachhaut</p> <p>16 cm Stahlbetondecke 5 cm Dämmung, 60 cm Belüftung Dachhaut</p>	<p>0,62</p> <p>0,59</p>	
<p><b>Fenster</b></p> <p>Holzfenster, einfachverglast</p>	5,20	

## 9.1.2 Reihenhäuser

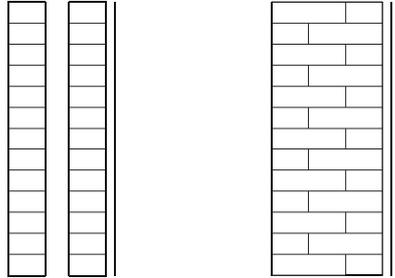
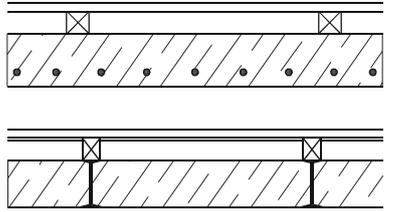
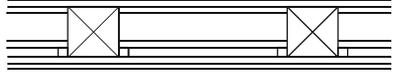
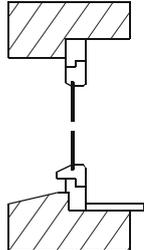
### 9.1.2.1 bis 1918, Reihenhauser

Massivbauten bis zum Ende des 1. Weltkriegs

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 - 38 cm Vollziegel	1,70	
<b>Kellerdecke</b>  scheidrechte Kappendecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung  gemauertes Kappen- gewölbe, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern	1,11   0,91   1,37	    
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, 2 - 3 cm Schlacken- schüttung, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten	0,78	
<b>Dachschräge</b>  Putz auf Spalierlatten	3,08	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

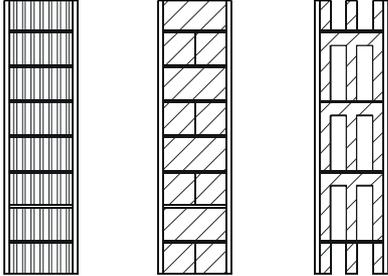
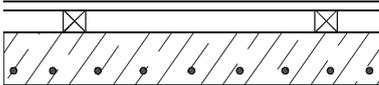
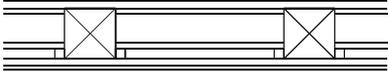
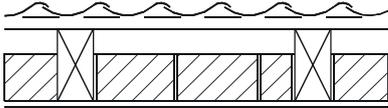
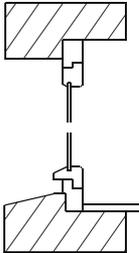
## 9.1.2.2 1919-1948, Reihenhaus

Bauten zwischen 1. und 2. Weltkrieg

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  2 x 12 cm Vollziegel mit 6 cm stehender Luftschicht, innen verputzt  24 - 38 cm Vollziegel	1,64   1,70	
<b>Kellerdecke</b>  18 cm Ortbetondecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern  scheidrechte Kappendecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern	1,13   1,11	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten	0,78	
<b>Dachschräge</b>  Putz auf Spalierlatten	3,08	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

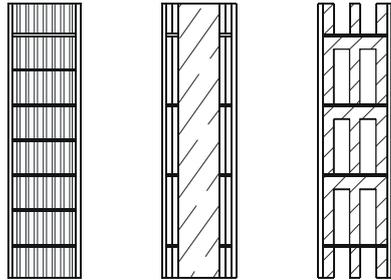
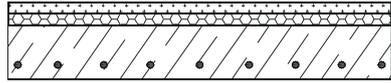
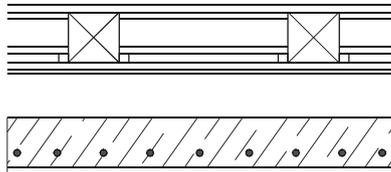
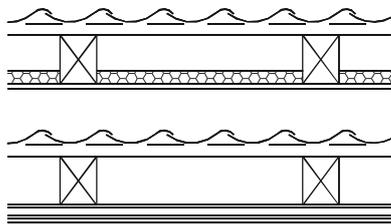
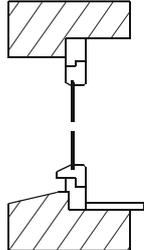
### 9.1.2.3 1949-1957, Reihenhauser

In Nachkriegsjahren aufgrund angespannter Materialmärkte, niedriger Anforderungen in Bauvorschriften und des hohen Wohnungsbedarfs qualitativ einfache Baukonstruktionen mit geringen Materialstärken; Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz nach der DIN 4108 nicht immer eingehalten

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 cm Gitterziegel, verputzt  24 cm Bimsvollsteine, verputzt  24 cm Ziegelsplitt- oder Bimshohlblocksteine, verputzt	1,21  0,93  1,44	
<b>Kellerdecke</b>  12 cm Stahlbetondecke, oberseitig 6 – 8 cm Schlackenschüttung Dielung auf Lagerhölzern	1,01	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten	0,78	
<b>Dachschräge</b>  11,5 cm Bimssteine, unterseitig verputzt	1,41	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

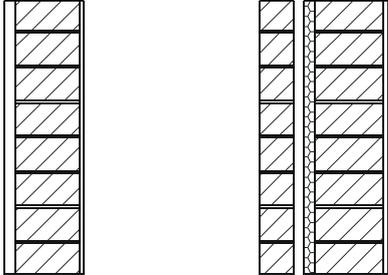
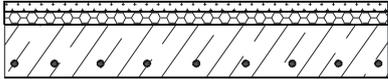
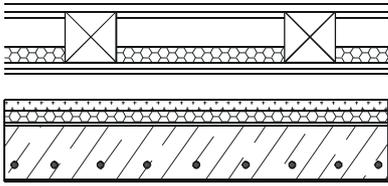
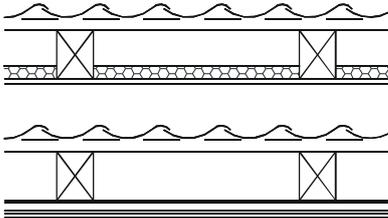
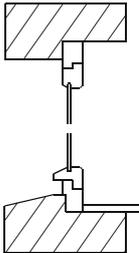
## 9.1.2.4 1958-1968, Reihenhäuser

Mindestanforderungen nach der DIN 4108 meist eingehalten und gelegentlich übererfüllt

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Bauteilzeichnung
<p><b>Außenwand</b></p> <p>24 – 30 cm Gitterziegel, verputzt</p> <p>24 - 30 cm Holzspansteine mit Beton gefüllt, verputzt</p> <p>24 - 30 cm Ziegelsplitt- oder Bimshohlblocksteine, verputzt</p>	<p>1,21</p> <p>1,16</p> <p>1,44</p>	
<p><b>Kellerdecke</b></p> <p>12 - 16 cm Stahlbetondecke, 2 – 3 cm Trittschall- dämmung aus Polystyrol, 4 cm Estrich</p>	0,84	
<p><b>Oberste Geschossdecke</b></p> <p>Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten</p> <p>12 – 16 cm Stahlbeton- decke (ohne Dämmung )</p>	<p>0,78</p> <p>3,25</p>	
<p><b>Dachschräge</b></p> <p>4 cm Mineralwolle, Gipskartonplatten</p> <p>5 cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt</p>	<p>0,81</p> <p>1,11</p>	
<p><b>Fenster</b></p> <p>Holzfenster, einfachverglast</p>	5,20	

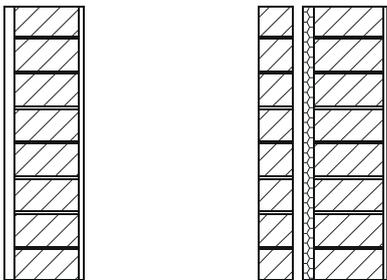
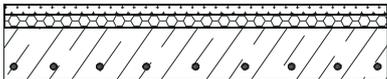
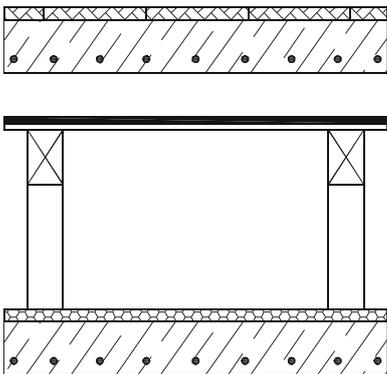
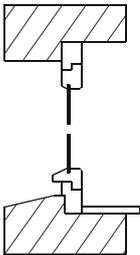
**9.1.2.5 1969-1978 Reihenhäuser (Schrägdach)**

ergänzende Bestimmungen zur DIN 4108; erste Ölpreiskrise → erforderlicher Mindestwärmeschutz nach der DIN 4108 meist übertroffen

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 cm Kalksandlochsteine mit 3 – 4 cm Dämmputz  24 cm Kalksandlochsteine, 4 cm Dämmung, Hinterlüftung 11,5 cm Verblendung	1,36  0,64	
<b>Kellerdecke</b>  12 - 16 cm Stahlbetondecke, 2 – 3 cm Dämmung, 4 cm Estrich	0,84	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und 5 cm Mineralwolle, oberseitig Dielung, unterseitig Gipskartonplatten  12 – 16 cm Stahlbetondecke, 5 cm Dämmung, 5 cm Estrich	0,52  0,63	
<b>Dachschräge</b>  5 cm Mineralwolle, Gipskartonplatten  5 cm Holzwole- Leichtbauplatten, verputzt	0,65  1,11	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

## 9.1.2.6 1969-1978 Reihenhaushaus (Flachdach)

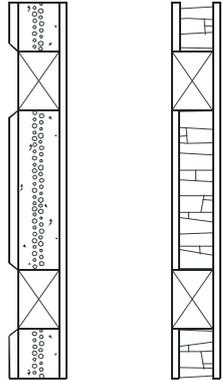
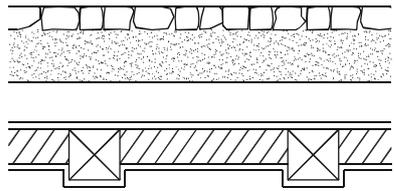
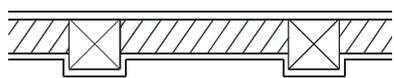
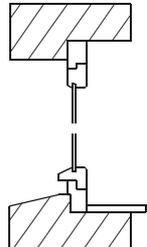
ergänzende Bestimmungen zur DIN 4108; erste Ölpreiskrise → erforderlicher Mindestwärmeschutz nach der DIN 4108 meist übertroffen

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Bauteilzeichnung
<p><b>Außenwand</b></p> <p>24 cm Kalksandlochsteine mit 3 – 4 cm Dämmputz</p> <p>24 cm Kalksandlochsteine, 4 cm Dämmung, Hinterlüftung 11,5 cm Verblendung</p>	<p>1,36</p> <p>0,64</p>	
<p><b>Kellerdecke</b></p> <p>12 - 16 cm Stahlbetondecke, 2 – 3 cm Trittschall- dämmung, 4 cm Estrich</p>	0,84	
<p><b>Flachdach</b></p> <p>16 cm Stahlbetondecke 6 cm Schaumglas Dachhaut</p> <p>16 cm Stahlbetondecke 5 cm Dämmung, 60 cm Belüftung Dachhaut</p>	<p>0,62</p> <p>0,59</p>	
<p><b>Fenster</b></p> <p>Holzfenster, einfachverglast</p>	5,20	

### 9.1.3 Kleine Mehrfamilienhäuser

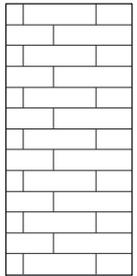
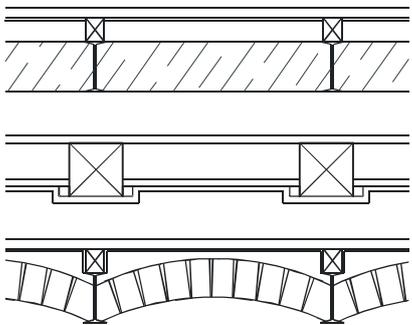
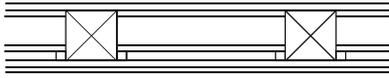
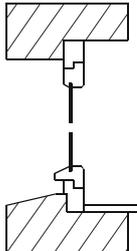
#### 9.1.3.1 bis 1918, kleines Mehrfamilienhaus (Fachwerk)

Fachwerkbauten bis zum Ende des 1. Weltkriegs

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<p><b>Außenwand</b></p> <p>12 - 18 cm Eichenfachwerk mit Lehmausfachungen, innen vollflächig, außen nur Gefache verputzt</p> <p>12 - 18 cm Eichenfachwerk mit Feldsteinausmauerung</p>	<p>1,90</p> <p>2,48</p>	
<p><b>Kellerdecke</b></p> <p>Feldsteine, in Sand (nicht unterkellert)</p> <p>Holzbalkendecke mit Strohlehmwickel, unterseitig verputzt</p>	<p>2,88</p> <p>1,04</p>	
<p><b>Oberste Geschossdecke</b></p> <p>Holzbalkendecke mit Strohlehmwickel, oberseitig Dielung (Eiche oder Fichte), unterseitig verputzt</p>	<p>1,22</p>	
<p><b>Dachschräge</b></p> <p>Putz auf Spalierlatten</p>	<p>3,08</p>	
<p><b>Fenster</b></p> <p>Holzfenster, einfachverglast</p>	<p>5,20</p>	

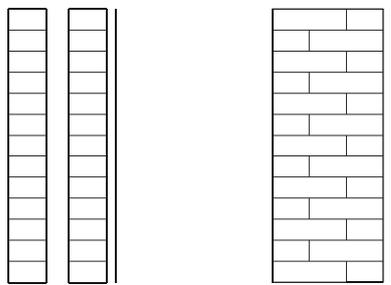
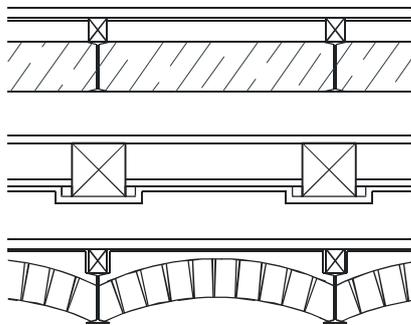
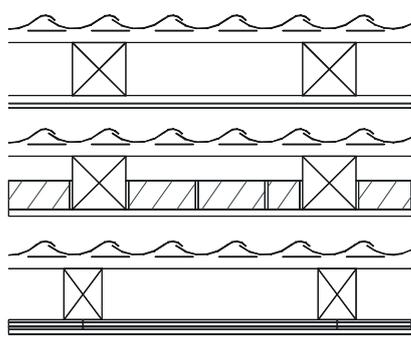
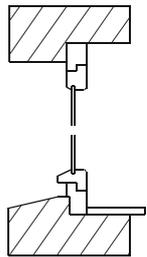
## 9.1.3.2 bis 1918, kleines Mehrfamilienhaus (massiv)

Massivbauten bis zum Ende des 1. Weltkriegs

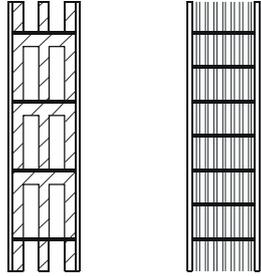
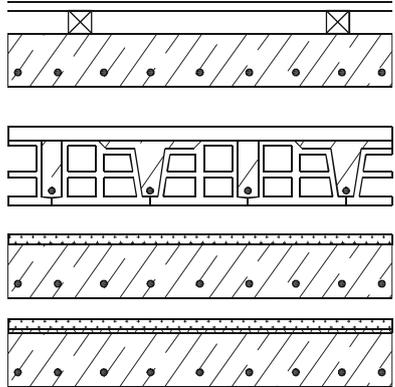
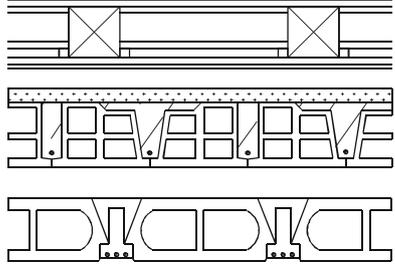
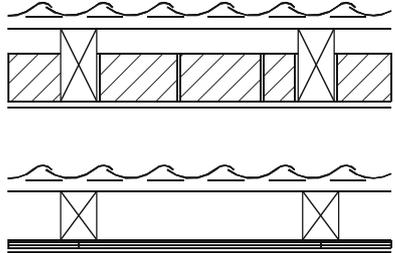
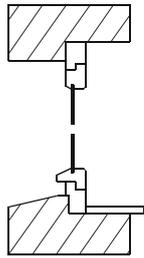
Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  38 - 51 cm Vollziegel	1,38	
<b>Kellerdecke</b>  scheidrechte Kappendecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung  gemauertes Kappen- gewölbe, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern	1,11  0,91  1,37	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten	0,78	
<b>Dachschräge</b>  Putz auf Spalierlatten	3,08	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

## 9.1.3.3 1919-1948, kleines Mehrfamilienhaus

Bauten zwischen 1. und 2. Weltkrieg

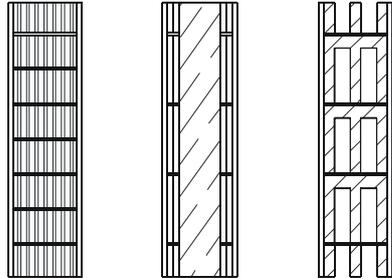
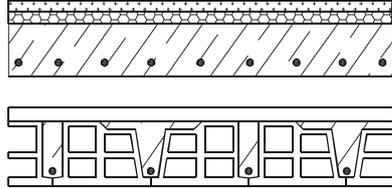
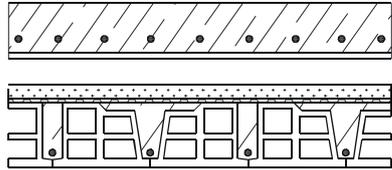
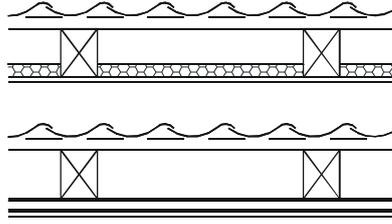
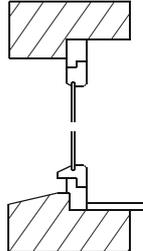
Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  2 x 12 cm Vollziegel mit 6 cm stehender Luftschicht, zum Teil außen verputzt  38 cm Vollziegel, zum Teil außen verputzt	1,64  1,70	
<b>Kellerdecke</b>  scheidrechte Kappendecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, 2 - 3 cm Schlacken- schüttung, oberseitig Dielung  gemauerte Kappendecke	1,11  0,91  1,47	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag oberseitig Dielung, unter- seitig Putz auf Spalierlatten	0,78	
<b>Dachschräge</b>  3,5 cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt  10 cm Schwemmsteine + Putz auf Schilfrohrträger  Putz auf Spalierlatten	1,42  1,41  3,08	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

## 9.1.3.4 1949-1957, kleines Mehrfamilienhaus

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 cm Gitterziegel verputzt  24 cm Ziegelsplitt- oder Bimshohlblocksteine, verputzt	1,21  1,44	
<b>Kellerdecke</b>  12 cm Stahlbetondecke, oberseitig 6 – 8 cm Schlackenschüttung Dielung auf Lagerhölzern  18 cm Gitterträgerdecke mit Gussasphaltestrich  16 cm Stahlbetondeck mit Estrich  16 cm Stahlbetondecke mit 1 cm Kokosfaser- dämmung und Estrich	1,01  2,25  2,25  1,55	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehm- schlag, oberseitig Dielung  18 cm Stahlsteindecke mit Gussasphaltestrich  20 cm Rippendecke	0,78  2,08  2,22	
<b>Dachschräge</b>  11,5 cm Bimssteine, unterseitig verputzt  2 cm Holzwolle- Leichtbauplatten verputzt	1,41  1,98	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

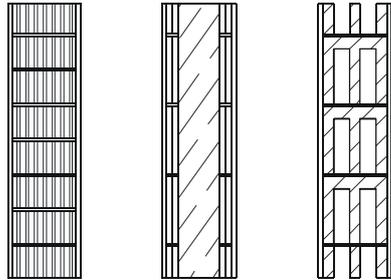
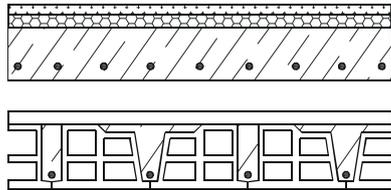
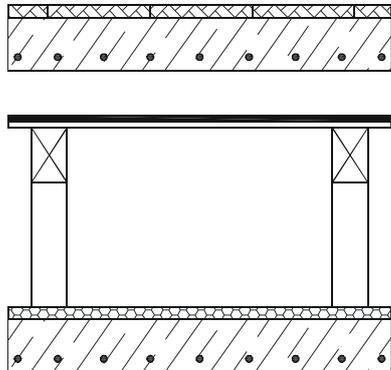
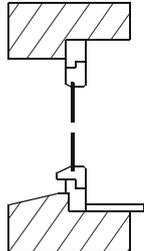
**9.1.3.5** 1958-1968, kleines Mehrfamilienhaus (Schrägdach)

Mindestanforderungen nach der DIN 4108 meist eingehalten und gelegentlich übererfüllt

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 cm Gitterziegel, verputzt  24 - 30 cm Holzspansteine mit Beton gefüllt, verputzt  24 cm Ziegelsplitt- oder Bimshohlblocksteine, verputzt	1,21  1,16  1,44	
<b>Kellerdecke</b>  12 - 16 cm Stahlbetondecke, 2 - 3 cm Dämmung, 4 cm Estrich  18 cm Gitterträgerdecke mit Gussasphaltestrich	0,84  1,65	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  12 - 16 cm Stahlbeton- decke ohne Dämmung)  18 cm Stahlsteindecke, 1 cm Dämmung und schwimmender Estrich	3,25  1,37	
<b>Dachschräge</b>  4 cm Mineralwolle, Gipskartonplatten  5 cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt	0,81  1,11	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

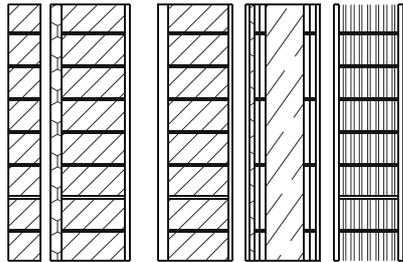
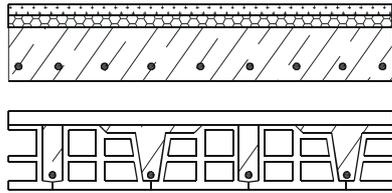
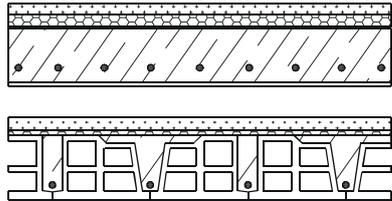
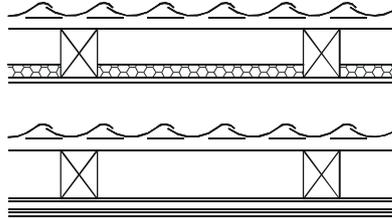
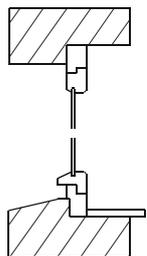
## 9.1.3.6 1958-1968, kleines Mehrfamilienhaus (Flachdach)

Mindestanforderungen nach der DIN 4108 meist eingehalten und gelegentlich übererfüllt

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	Bauteilzeichnung
<p><b>Außenwand</b></p> <p>24 cm Gitterziegel, verputzt</p> <p>24 - 30 cm Holzspansteine mit Beton gefüllt, verputzt</p> <p>24 cm Ziegelsplitt- oder Bimshohlblocksteine, verputzt</p>	<p>1,21</p> <p>1,16</p> <p>1,44</p>	
<p><b>Kellerdecke</b></p> <p>12 - 16 cm Stahlbetondecke, 2 - 3 cm Dämmung, 4 cm Estrich</p> <p>18 cm Gitterträgerdecke mit Gussasphaltestrich</p>	<p>0,84</p> <p>1,65</p>	
<p><b>Flachdach</b></p> <p>16 cm Stahlbetondecke 6 cm Schaumglas Dachhaut</p> <p>16 cm Stahlbetondecke 5 cm Dämmung, 60 cm Belüftung Dachhaut</p>	<p>0,62</p> <p>0,59</p>	
<p><b>Fenster</b></p> <p>Holzfenster, einfachverglast</p>	<p>5,20</p>	

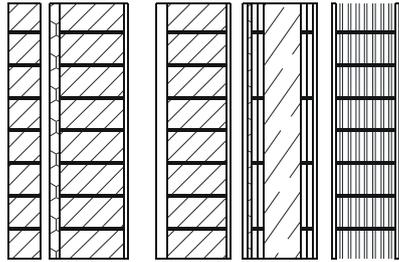
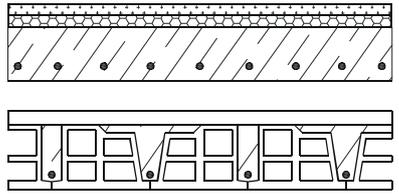
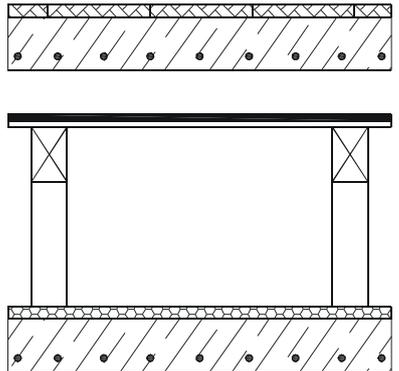
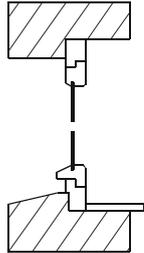
**9.1.3.7 1969-1978, kleines Mehrfamilienhaus (Schrägdach)**

ergänzende Bestimmungen zur DIN 4108; erste Ölpreiskrise → erforderlicher Mindestwärmeschutz nach der DIN 4108 meist übertroffen

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 cm Kalksandlochsteine, 4 cm Dämmung, Hinterlüftg. 11,5 cm Verblendung  24 cm Kalksandlochsteine mit 3 - 4 cm Dämmputz  24 cm Holzspansteine mit Beton gefüllt, außenseitig 2 cm Polystyrol, verputzt  30 cm Gitterziegel, verputzt	0,64   1,36   0,74   1,02	
<b>Kellerdecke</b>  12 - 16 cm Stahlbeton- decke, 2 – 3 cm Dämmung, 4 cm Estrich  18 cm Gitterträgerdecke mit Gussasphaltestrich	0,84   1,65	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  12 – 16 cm Stahlbeton- decke, 5 cm Dämmung, 5 cm Estrich  18 cm Stahlsteindecke, 1 cm Dämmung und schwimmender Estrich	0,63   1,37	
<b>Dachschräge</b>  5 cm Mineralwolle, Gipskartonplatten  5 cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt	0,65   1,11	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

## 9.1.3.8 1969-1978, kleines Mehrfamilienhaus (Flachdach)

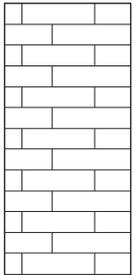
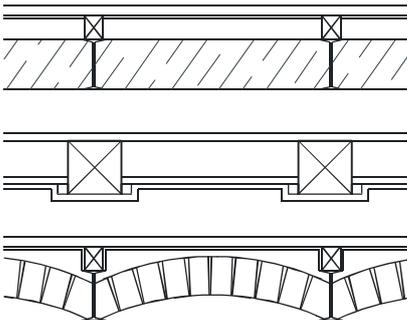
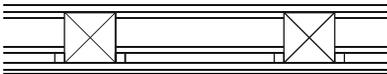
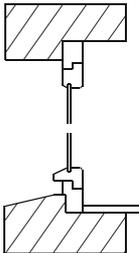
ergänzende Bestimmungen zur DIN 4108; erste Ölpreiskrise → erforderlicher Mindestwärmeschutz nach der DIN 4108 meist übertroffen

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<p><b>Außenwand</b></p> <p>24 cm Kalksandlochsteine, 4 cm Dämmung, Hinterlüftung 11,5 cm Verblendung</p> <p>24 cm Kalksandlochsteine mit 3 - 4 cm Dämmputz</p> <p>24 cm Holzspansteine mit Beton gefüllt, außenseitig 2 cm Polystyrol, verputzt</p> <p>30 cm Gitterziegel, verputzt</p>	<p>0,64</p> <p>1,36</p> <p>0,74</p> <p>1,02</p>	
<p><b>Kellerdecke</b></p> <p>12 - 16 cm Stahlbetondecke, 2 - 3 cm Dämmung, 4 cm Estrich</p> <p>18 cm Gitterträgerdecke mit Gussasphaltestrich</p>	<p>0,84</p> <p>1,65</p>	
<p><b>Flachdach</b></p> <p>16 cm Stahlbetondecke 6 cm Dämmung Dachhaut</p> <p>16 cm Stahlbetondecke 5 cm Dämmung, 60 cm Belüftung Dachhaut</p>	<p>0,62</p> <p>0,59</p>	
<p><b>Fenster</b></p> <p>Holzfenster, einfachverglast</p>	<p>5,20</p>	

## 9.1.4 Große Mehrfamilienhäuser

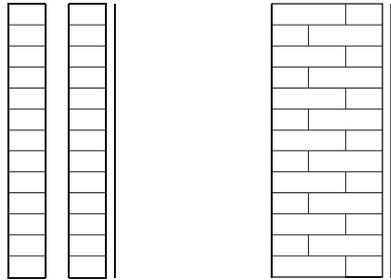
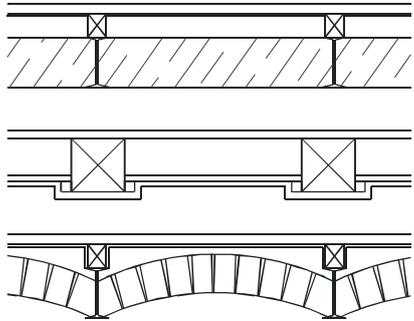
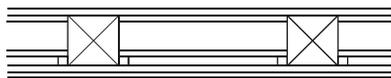
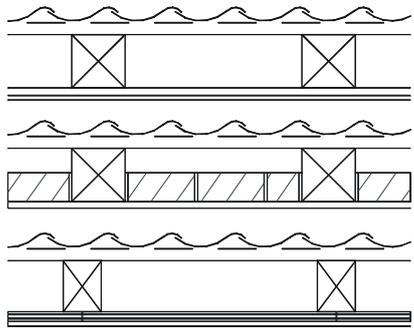
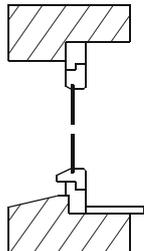
### 9.1.4.1 bis 1918, großes Mehrfamilienhaus

Massivbauten bis zum Ende des 1. Weltkriegs

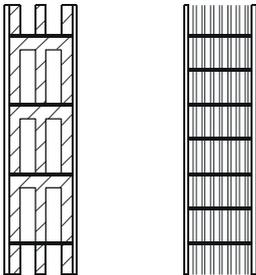
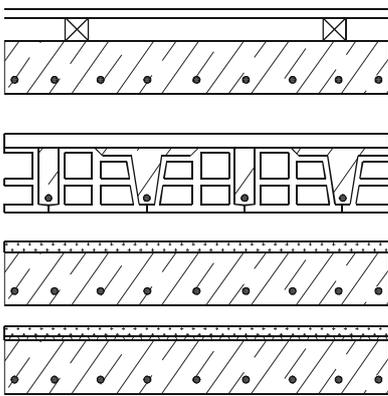
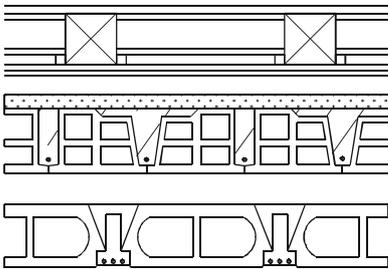
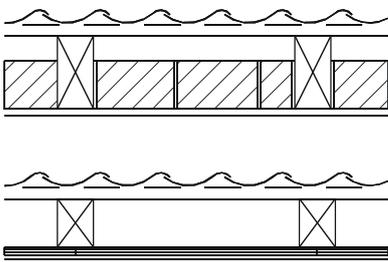
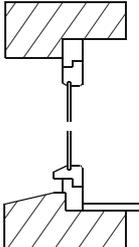
Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  38 - 51 cm Vollziegel, meist außen verputzt	1,38	
<b>Kellerdecke</b>  schieftrechte Kappendecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, 2 - 3 cm Schlacken- schüttung, oberseitig Dielung  gemauertes Kappen- gewölbe, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern	1,11   0,91   1,37	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten	0,78	
<b>Dachschräge</b>  Putz auf Spalierlatten	3,08	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

## 9.1.4.2 1919-1948, großes Mehrfamilienhaus

Bauten zwischen 1. und 2. Weltkrieg

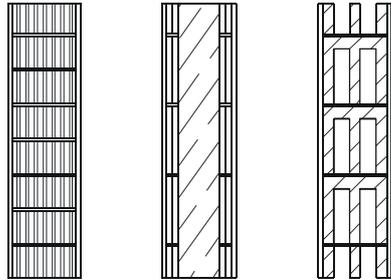
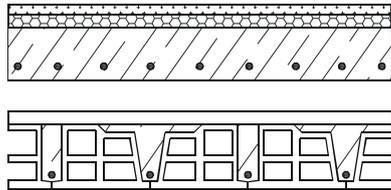
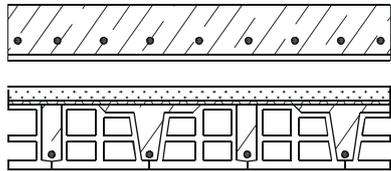
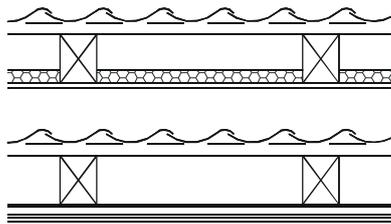
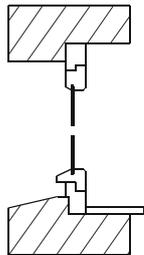
Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<p><b>Außenwand</b></p> <p>2 x 12 cm Vollziegel mit 6 cm stehender Luftschicht, zum Teil außen verputzt</p> <p>38 cm Vollziegel, zum Teil außen verputzt</p>	<p>1,64</p> <p>1,70</p>	
<p><b>Kellerdecke</b></p> <p>scheitrechte Kappendecke, oberseitig Sandschüttung, Dielung auf Lagerhölzern</p> <p>Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehm- schlag, 2 - 3 cm Schlacken- schüttung, oberseitig Dielung</p> <p>gemauerte Kappendecke</p>	<p>1,11</p> <p>0,91</p> <p>1,47</p>	
<p><b>Oberste Geschossdecke</b></p> <p>Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung, unterseitig Putz auf Spalierlatten</p>	<p>0,78</p>	
<p><b>Dachschräge</b></p> <p>3,5 cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt</p> <p>10 cm Schwemmsteine Putz auf Schilfrohrträger</p> <p>Putz auf Spalierlatten</p>	<p>1,42</p> <p>1,41</p> <p>3,08</p>	
<p><b>Fenster</b></p> <p>Holzfenster, einfachverglast</p>	<p>5,20</p>	

## 9.1.4.3 1949-1957, großes Mehrfamilienhaus

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 cm Gitterziegel, verputzt  24 cm Ziegelsplitt- oder Bimshohlblocksteine, verputzt	1,21  1,44	
<b>Kellerdecke</b>  -12 cm Stahlbetondecke, oberseitig 6 – 8 cm Schlackenschüttung Dielung auf Lagerhölzern -18 cm Gitterträgerdecke mit Gussasphaltestrich -16 cm Stahlbetondecke mit Estrich -16 cm Stahlbetondecke mit 1 cm Kokosfaser- dämmung und Estrich	1,01  2,25  2,25  1,55	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag, oberseitig Dielung  18 cm Stahlsteindecke mit Gussasphaltestrich  20 cm Rippendecke	0,78  2,08  2,22	
<b>Dachschräge</b>  11,5 cm Bimssteine, unterseitig verputzt  2 cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt	1,41  1,98	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

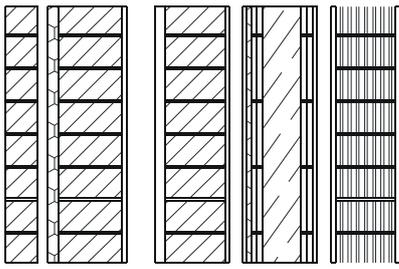
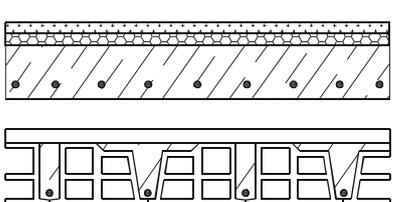
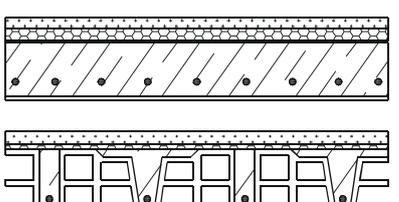
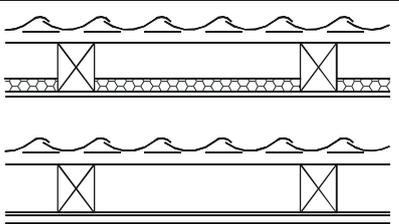
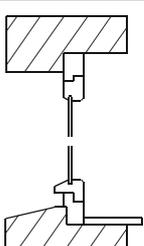
## 9.1.4.4 1658-1968, großes Mehrfamilienhaus

Mindestanforderungen nach der DIN 4108 meist eingehalten und gelegentlich übererfüllt

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  24 cm Gitterziegel, verputzt  24 - 30 cm Holzspansteine mit Beton gefüllt, verputzt  24 cm Ziegelsplitt- oder Bimshohlblocksteine, verputzt	1,21  1,16  1,44	
<b>Kellerdecke</b>  12 - 16 cm Stahlbetondecke, 2 - 3 cm Dämmung, 4 cm Estrich  18 cm Gitterträgerdecke mit Gussasphaltestrich	0,84  1,65	
<b>Oberste Geschossdecke</b>  12 - 16 cm Stahlbetondecke (ohne Dämmung)  18 cm Stahlsteindecke, 1 cm Dämmung und schwimmender Estrich	3,25  1,37	
<b>Dachschräge</b>  4 cm Mineralwolle, Gipskartonplatten  5 cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt	0,81  1,11	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, einfachverglast	5,20	

## 9.1.4.5 1969-1978, großes Mehrfamilienhaus

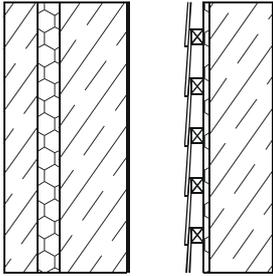
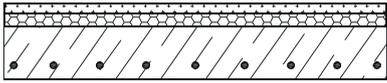
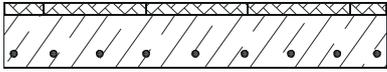
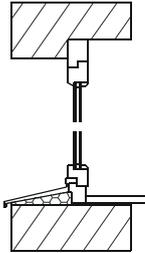
ergänzende Bestimmungen zur DIN 4108; erste Ölpreiskrise → erforderlicher Mindestwärmeschutz nach der DIN 4108 meist übertroffen

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<p><b>Außenwand</b></p> <p>24 cm Kalksandlochsteine, 4 cm Dämmung, Hinterlüftg. 11,5 cm Verblendung</p> <p>24 cm Kalksandlochsteine mit 3-4 cm Dämmputz</p> <p>24 cm Holzspansteine mit Beton gefüllt, außenseitig 2 cm Polystyrol, verputzt</p> <p>30 cm Gitterziegel, verputzt</p>	<p>0,64</p> <p>1,36</p> <p>0,74</p> <p>1,02</p>	
<p><b>Kellerdecke</b></p> <p>12 - 16 cm Stahlbetondecke 2 - 3 cm Dämmung, 4 cm Estrich</p> <p>18 cm Gitterträgerdecke mit Gussasphaltestrich</p>	<p>0,84</p> <p>1,65</p>	
<p><b>Oberste Geschossdecke</b></p> <p>12 - 16 cm Stb.-Decke 5 cm Dämmung, 5 cm Estrich</p> <p>18 cm Stahlsteindecke, 1 cm Dämmung und schwimmender Estrich</p>	<p>0,63</p> <p>1,37</p>	
<p><b>Dachschräge</b></p> <p>5 cm Mineralwolle, Gipskartonplatten</p> <p>5 cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt</p>	<p>0,65</p> <p>1,11</p>	
<p><b>Fenster</b></p> <p>Holzfenster, einfachverglast</p>	<p>5,20</p>	

### 9.1.5 Hochhäuser

#### 9.1.5.1 1969-1978, Hochhaus

ergänzende Bestimmungen zur DIN 4108; erste Ölpreiskrise → erforderlicher Mindestwärmeschutz nach der DIN 4108 meist übertroffen

Beschreibung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]	Bauteilzeichnung
<b>Außenwand</b>  Beton-Sandwich-Elemente mit 5 - 6 cm Kerndämmung  tragende Betonschotten mit Vorhangfassade und 2 cm Dämmung	1,11  1,11- 1,34	
<b>Kellerdecke</b>  14 – 16 cm Stahlbetondecke, 2 – 4 cm Dämmung, 4 cm Estrich	0,78-1,0	
<b>Flachdach</b>  16 cm Stahlbetondecke 6 cm Dämmung Dachbahn	0,63	
<b>Fenster</b>  Holzfenster, isolierverglast	2,60	

Quellen und Literatur: [213], [212], [124], [125], [211], [215], [216]

Grafiken: PHI

## 9.2 Weiterführende Literatur und Hilfsmittel

Am Passivhaus Institut stehen zahlreiche Fachinformationen zur Verfügung, die das Thema Energieeffiziente Modernisierung vertiefen. Eine Auswahl ist hier aufgeführt. Weitere Informationen und Bezug unter [www.passiv.de](http://www.passiv.de).

### Ausgewählte Protokollbände des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser

- Nr. 39: **Schrittweise Modernisierung** mit Passivhaus-Komponenten
- Nr. 36: Heizung mit **Biobrennstoffen** für Passivhäuser
- Nr. 35: **Wärmebrücken und Tragwerksplanung** - die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens
- Nr. 32: **Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten:**  
Passivhauskomponenten + Innendämmung
- Nr. 30: **Lüftung bei Bestandssanierung**
- Nr. 29: **Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen**
- Nr. 27: **Wärmeverluste durch das Erdreich**
- Nr. 24: Einsatz von **Passivhaustechnologien bei der Altbau-Modernisierung**
- Nr. 20: Passivhaus-**Versorgungstechnik**
- Nr. 18: **Qualitätssicherung** beim Bau von Passivhäusern
- Nr. 14 **Passivhaus-Fenster**

Der Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser wurde unterstützt durch:  
*Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit*  
*Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung*  
*Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)*  
*Ministerium für Bauen und Wohnen des Landes Nordrhein-Westfalen; LEG Nordrhein-Westfalen; Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL); Klimaschutzfonds proKlima der Stadtwerke Hannover AG; E.ON Energie AG (München); LUWOGÉ Wohnungsunternehmen der BASF GmbH (Ludwigshafen); VEBA Immobilien AG; PreussenElektra AG; Stadtwerke Hannover AG*

### Tagungsbände der Internationalen Passivhaustagungen

Die Tagungsbände enthalten in komprimierter Form eine Vielzahl von Fachbeiträgen zum Thema Passivhaus und energetische Altbausanierung.

- 13. Internationale Passivhaustagung in Frankfurt/M. 2009
- 12. Internationale Passivhaustagung in Nürnberg 2008
- 11. Internationale Passivhaustagung in Bregenz 2007
- 10. Internationale Passivhaustagung in Hannover 2006
- 9. Internationale Passivhaustagung in Ludwigshafen 2005
- Im Mai 2010 findet die 14. Passivhaustagung in Dresden statt.

### **Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten, Projektberichte**

- Untersuchungen zu den Bestandsgebäuden Tevesstraße Frankfurt a.M.
- Sanierung mit Passivhauskomponenten, Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung Tevesstraße Frankfurt a.M.
- Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a.M.
- Gebäudesanierung „Passivhaus im Bestand“ in Ludwigshafen / Mundenheim, Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge
- Passivhaustechnik im Gebäudebestand - Qualitätssicherung für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg, Endbericht
- Messtechnische Untersuchungen zum thermischen und hygrischen Verhalten der Innendämmung im Modernisierungsprojekt Sodastraße 40 / Ludwigshafen (erhältlich ab Frühjahr 2010)
- International Energy Agency: Task 37 “Advanced Housing Renovation with Solar and Conservation”; Projektberichte erhältlich unter [www.iea-shc.org/task37](http://www.iea-shc.org/task37)

### **Weitere Forschungsberichte**

- Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung
- Konstruktionshandbuch für Passivhäuser
- Nutzerhandbuch für den Geschosswohnungsbau im Passivhaus-Standard

### **Tools**

- **Passivhaus-Projektierungspaket**

#### **PHPP 2007**

Unverzichtbares Planungswerkzeug für die Projektierung von Passivhäusern und von Modernisierungen mit Passivhaus-Komponenten.

- PH-Luft  
Ein Programm zur Unterstützung von Planern von Passivhaus-Lüftungsanlagen,
- Exceltool für die Berechnung des Druckverlustes von unterschiedlichen Bauteilen eines Lüftungskanalnetzes

### 9.3 Literaturverzeichnis

- [1] Musterbauordnung (MBO) §3 Absatz 1, Fassung 2002.
- [2] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung, GefStoffV) vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S 3758).
- [3] Technische Regeln für Gefahrstoffe, Arbeitsplatzgrenzwerte, TRGS 900, Ausgabe: Januar 2006.
- [4] Umweltbundesamt: Richtwerte für die Innenraumluft - [www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/richtwerte-irluft.htm](http://www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/richtwerte-irluft.htm) (22.03.2007).
- [5] Grün, Dr. Lothar: Innenraumluftverunreinigungen, Ursachen und Bewertung, In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und –ausbreitung im Raum, Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 23, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- [6] z.B.: Technische Baubestimmungen; Richtlinie für die Bewertung und Sanierung PCB-belasteter Baustoffe und Bauteile in Gebäuden (PCB-Richtlinie), Beuth Verlag, Berlin 1995.
- [7] Tappler, Peter DI (Zentrum für Bauen und Umwelt, Donauuniversität Krems; IBO): Wegweiser für eine gesunde Raumluft, Die Chemie des Wohnens, Hg. von Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien 2003  
Kostenloser Download der gesamten Broschüre unter: [www.lebensministerium.at/umwelt](http://www.lebensministerium.at/umwelt).
- [8] Feist, Dr. Wolfgang: Einführung – Lüftung bei Bestandssanierung unverzichtbar, In: Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 30, Hg. Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [9] DIN 1946-6, Raumlufttechnik, Teil 6: Lüftung von Wohnungen, Anforderungen, Ausführung, Abnahme (VDI-Lüftungsregeln), Beuth Verlag, Berlin, 1998.
- [10] Feist, Wolfgang: Konsequenzen für die Wohnungslüftung, In: Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 30, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [11] DIN EN ISO 7730, Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit, Beuth Verlag, Berlin 2006.
- [12] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 25: Temperaturdifferenzierung in der Wohnung, Hg. Von Wolfgang Feist, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [13] Feist, Wolfgang: Anforderungen zur thermischen Behaglichkeit in Passivhäusern, In: Temperaturdifferenzierung in der Wohnung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 25, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.

- [14] Thermal-Comfort-Booklet, Firma Innova AirTech Instruments, Energivej 30, DK-2750 Ballerup, Denmark, <http://www.innova.dk>, Dez. 2002.
- [15] Abbildung, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [16] Schnieders, Jürgen: Lüftungsstrategien und Planungshinweise, In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und –ausbreitung im Raum, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 23, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- [17] Passivhaus Projektierungs Paket 2007 (PHPP), Copyright: Passivhaus Institut, Darmstadt 1998-2007.
- [18] Staiß, Dr. Frithjof / Linkohr, Dipl.-Ing. (FH) Christel / Zimmer, Dipl.-Kffr. Ulrike: Umweltpolitik, Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung, Stand: Juni 2008, Internet-Update, Hg. von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin 2008.
- [19] Bundesumweltministerium: Klimaagenda 2020: Der Umbau der Industriegesellschaft, Berlin 2007. <http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/39238.php> .
- [20] Pfluger, Rainer: Feuchtetransportvorgänge in Außenbauteilen mit Innendämmung, In: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 32, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [21] DIN 4108-2, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Beuth Verlag, Berlin 2003.
- [22] Pfluger, Rainer: Technologien zur energieeffizienten Raumkühlung: passiv – hybrid – aktiv, In: Energieeffiziente Raumkühlung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 31, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [23] Hörenbaum, W.: Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk, Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Abt. Baustofftechnologie, Heft Nr. 54, Karlsruhe 2005.
- [24] DIN 5034-1, Tageslicht in Innenräumen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Beuth Verlag, Berlin 1999.
- [25] Wikipedia public domain [http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Schwarzwaelder\\_Bauernhaus\\_um\\_1900.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Schwarzwaelder_Bauernhaus_um_1900.jpg)
- [26] DIN 4108-3, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, Beuth Verlag, Berlin 2001.
- [27] Borsch-Laaks, Robert: Risiko Dampfkondensation, Wann gibt es wirklich Schäden?, In: HOLZBAU die neue quadrige, Nr. 3, 2006, Verlagshaus Kastner, Wolnzach.

- [28] Pfluger, Rainer: Lösungen für den Feuchteschutz, In: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 32, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [29] Pfluger, Dr. Ing. Rainer: Tageslicht im Passivhaus, Messung und Simulation, MS PowerPoint Vortrag, Darmstadt 2003.
- [30] Schneider, U.; Birnbauer, G.; Brakhan; F. et. al.: Grünes Licht, Licht, Luft, Freiraum und Gebäudebegrünung im großvolumigen Passivhauswohnbau, Hg. vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2006. Download des Berichts unter: <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>
- [31] Junghans, Lars; Hastings, Robert: Gutes Tageslicht in Passivhäusern, In: Tagungsband 12. Schweizerisches Status-Seminar 2002 „Energie- und Umweltforschung im Bauwesen“, BFE Bundesamt für Energie, Bern 2002.
- [32] DIN 4109/A1, Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise, Änderung A1, Beuth Verlag, Berlin 2001.
- [33] DIN 4109 Beiblatt 2, Schallschutz im Hochbau, Hinweise für Planung und Ausführung, Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz, Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- oder Arbeitsbereich, Beuth Verlag, Berlin 1989.
- [34] TA Lärm, Technische Anleitung Lärm 1998
- [35] Laidig, Matthias; Werner, Johannes: Zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung für ein Mehrfamilienhaus – Schwerpunkte Brandschutz, Schallschutz und Regelung, In: Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 30, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [36] Pfluger, Rainer: Lösungen für die Kanalführung in der Bestandssanierung, In: Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 30, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [37] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Nr. 34: Schallschutz beim Einsatz von Wärmepumpen und Wärmepumpen-Kompaktaggregate im Passivhaus. Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [38] Pfluger, Rainer: Einführung und Grundlagen zum Schallschutz im Passivhaus mit Wärmepumpen und WP-Kompaktgeräten, In: Schallschutz beim Einsatz von Wärmepumpen und Wärmepumpen-Kompaktgeräten im Passivhaus, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 34, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [39] DIN 4109, Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise, Beuth Verlag, Berlin 1989.
- [40] Pfluger, Rainer: Baulicher Schallschutz für gebäudetechnische Systeme – Lösungsvorschläge für Planer und Architekten, In: Schallschutz beim Einsatz von Wärmepumpen und Wärmepumpen-Kompaktgeräten im Passivhaus, Arbeitskreis kostengünstige

- Passivhäuser, Protokollband Nr. 34, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [41] DIN EN 12354-1, Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen, Beuth Verlag, Berlin 2000.
- [42] Feist, Wolfgang: Hochwärmegegedämmte Dächer – Einführung, In: Hochwärmegegedämmte Dachkonstruktionen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 34, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [43] Feist, Wolfgang; Peper, Søren; Sariri, Vahid: Luftdichte Projektierung von Passivhäusern, Eine Planungshilfe, Cepheus-Projektinformation Nr. 7, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999/ 10. Auflage 2009
- [44] DIN EN 12524, Wärme- und feuchtschutztechnische Eigenschaften, Tabellierte Bemessungswerte, Beuth Verlag, Berlin 2000.
- [45] Feltl, Dr. Helmut: Wärmeschutz – Schallschutz, In: Hinweise zum Energiesparen, Hg. von Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie; Bayerisches Staatsministerium des Innern (Oberste Baubehörde).
- [46] Kötz, Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich: Baulicher Schallschutz gegen Verkehrslärm, Wissenswertes über die Schalldämmung von Fenstern, Hg. vom Umweltbundesamt, <http://www.umweltbundesamt.de/laermprobleme/publikationen.html>, Aug. 2007.
- [47] Deutsche Wikipedia:  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Sonne\\_Strahlungsintensitaet.svg](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Sonne_Strahlungsintensitaet.svg)  
Aug. 2007. Lizenz: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de/deed.de>
- [48] WEBGEO:  
[http://www.webgeo.de/beispiele/rahmen.php?string=1;k\\_304;3](http://www.webgeo.de/beispiele/rahmen.php?string=1;k_304;3)  
August 2007.
- [49] DIN V 4108-6, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Vornorm, Beuth Verlag, Berlin 2003.
- [50] DIN EN 12831 Beiblatt 1, Heizungssysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Normheizlast – Nationaler Anhang NA, Beuth Verlag, Berlin 2004
- [51] W. Feist: Thermische Gebäudesimulation. C.F.Müller, Heidelberg 1994
- [52] Christoffer, Jürgen; Deutschländer, Thomas; Webs, Monika: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY, Hg. von Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. Main, 2004.
- [53] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 13: Energiebilanzen mit dem Passivhaus Projektierungs Paket. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998

- [54] Bisanz, Carsten: Heizlastauslegung im Niedrigenergie- und Passivhaus. Fachinformation PHI 1999/2. Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [55] Künzel, Hartwig M.: Tauwasserschäden im Dach aufgrund von Dampfdiffusion durch angrenzendes Mauerwerk, Wksb. Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz 41 (1996), Nr. 37.
- [56] Künzel, Hartwig M.: Kann bei voll gedämmten, nach außen diffusionsoffenen Steildachkonstruktionen auf eine Dampfsperre verzichtet werden? Bauphysik 18 (1996), H.1.
- [57] Künzel, Helmut: Dachdeckung und Dachbelüftung: 1. Auflage, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 1996.
- [58] Peper, S; Kaufmann, B.: Luftdichte und wärmebrückenfreie Bauteilanschlüsse am Dach, In: Dachkonstruktionen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 29, Passivhaus Institut Darmstadt, 2005.
- [59] Balkowski, Michael et. al.: RWE Bau-Handbuch, Hg. von VWEW Energieverlag GmbH, Frankfurt am Main, 2004.
- [60] Cziesielski, E.; Fechner, O.: Experimentelle Untersuchungen zum  $\Delta U$ -Wert bekiester Umkehrdächer mit wasserableitender Trennlage, in Bauphysik Okt. 2001, Heft 5. Ernst & Sohn, Berlin 2001.
- [61] Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt: Untersuchung an Umkehrdachsystemen mit verschiedenen Wärmedämm-Materialien, in: Bericht EMPA Nr. 10804, 1980.
- [62] Feist, Wolfgang: Dämmung oberhalb von Bodenplatte oder Kellerdecke: Was ist zu beachten?, In: Wärmeverluste durch das Erdreich, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 27, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2005.
- [63] Peper, Søren: Messtechnische Untersuchung zum thermischen Verhalten des Mehrgeschoss-Passivhauses „Parkhaus“ Hamburg, Pinnasberg 24, im Auftrag der Hamburger Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Energieabteilung, Darmstadt, 2005.
- [64] Hasper, Wolfgang: Treppenhäuser, Aussteifung - Lastabtragung - thermische Grenze, In: Wärmebrücken und Tragwerksplanung - die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 35, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2005.
- [65] Feist, Wolfgang: Wärmebrücken und Verbesserung der Luftdichtheit im Altbau, In: Einsatz von Passivhaustechnologien bei der Altbau-Modernisierung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 24, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2003.
- [66] Schnieders, Jürgen: Konsequenzen für die Planung, In: Wärmeverluste durch das Erdreich, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 27, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2004.

- [67] EN ISO 13370, Wärmeübertragung über das Erdreich, Berechnungsverfahren, Beuth Verlag, Berlin 1998.
- [68] DIN 18195, Bauwerksabdichtungen, Beuth Verlag, Berlin 2000.
- [69] Dahlem, Dr.-Ing. Karl-Heinz: Die Bedeutung des Grundwassers, In: Wärmeverluste durch das Erdreich, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 27, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2004.
- [70] Waltjen, Tobias, et al.: Passivhaus Bauteilkatalog, Ökologisch bewertete Konstruktionen, Hg. von Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, Springer Verlag, Wien, 2008.
- [71] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung -EnEV) vom 16. November 2001.
- [72] Schnieders, Jürgen: Passive Houses in South West Europe, 2nd corrected edition. Passivhaus Institut, Darmstadt 2009.
- [73] John, Markus; Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer: Bauphysikalische Betreuung: Wärmebrückenberechnung, Diffusionsberechnung, Beratung zum Luftdichtheitskonzept und Qualitätssicherung PHPP für das Bauvorhaben Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg, im Auftrag der Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Nürnberg mbH, Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2002.
- [74] Feist, Dr. Wolfgang: Integrale Planung: Grundstein jedes Passivhaus-Projektes, In: Qualitätssicherung beim Bau von Passivhäusern, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 18, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 1999.
- [75] DIN 55699, Verarbeitung von Wärmedämm-Verbundsystemen, Beuth Verlag, Berlin 2005.
- [76] Schnieders, Jürgen: Fassaden - Gestalterische Freiräume bei minimiertem Wärmeverlust, In: Wärmebrücken und Tragwerksplanung - die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 35, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2007.
- [77] Lude, Dipl.-Phys. Gerhard; Werner, Dipl.-Phys. Johannes; Kirtschig, Dipl.-Phys. Thomas: Wärmebrücken am Fuß des Gebäudes - Neue Lösungsmöglichkeiten für Sockelanschluss und erdberührte Flächen bei Neubau und Sanierung, In: Tagungsband der 7. Internationalen Passivhaustagung in Hamburg, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2003.
- [78] Kerschberger, A.: Modellhafte Sanierung von Typenbauten, ein Informationspaket, Hg. vom Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, TÜV-Verlag, Köln, 1998.
- [79] Kaufmann, Berthold: Wärmedämmung im Gebäudebestand, In: Einsatz von Passivhaustechnologien bei der Altbau-Modernisierung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 24, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2003.

- [80] DIN 1053 Teil 1, Mauerwerk; Rezeptmauerwerk; Berechnung und Ausführung; Beuth Verlag, Berlin, 1996
- [81] Schulz, Tanja Balkonanschlüsse - Wärmebrückenoptimierte Lösungen. In: Wärmebrücken und Tragwerksplanung - Die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 35, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2007.
- [82] Feist, Wolfgang: Zusammenfassung: Innendämmung in Verbindung mit Passivhaus-Komponenten. In: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 32, Passivhaus Institut Darmstadt, 2005.
- [83] Schnieders, Jürgen: Innendämmung - Potenziale und Grenzen. In: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 32, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2005.
- [84] DIN V 18550, Putz und Putzsysteme - Ausführung, Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [85] Wild, Uwe: Bauen im Bestand: Fassadenschutz, Hydrophobierende Imprägnierungen. In: DAB Deutsches Architektenblatt, Ausgabe Baden-Württemberg, Jg. 38, Nr. 12.2006, corps-Verlag, Düsseldorf, 2006.
- [86] Hinz, Eberhard; Eicke-Hennig, Werner; Feist, Wolfgang; Jäkel, Michael: Wärmedämmung von Außenwänden mit der Innendämmung, Materialien für Energieberater, Hg. von Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1997.
- [87] Vitruv: Zehn Bücher über Architektur, Übersetzt von Dr. Curt Fensterbusch. Primus Verlag, Darmstadt, 1996.
- [88] Dangelmeyer, Dipl.-Ing. Peter: Fachwerksanierung in Kaufungen - Dämmkonzept, Dichtheitskonzept, Umsetzung, Kosten, Messergebnisse, In: „Heizenergieeinsparung in Fachwerkgebäuden“ Protokollband zur Veranstaltung des 38. Workshops am 26. Februar 2002, Hg. von Knissel, Dipl.-Ing. Jens, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, 2002.
- [89] Wärmedämmung von Außenwänden mit nachträglicher Kerndämmung, Hg. von Investitionsbank Schleswig-Holstein, Energieagentur und Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., Kiel / Darmstadt, 2000.
- [90] Kaufmann, Berthold; Feist, Wolfgang u.a.: Passivhäuser erfolgreich planen und Bauen, Hg. von Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung und Bauwesen des Landes Nordrhein-Westfalen (ILS NRW), Aachen, 2004.
- [91] EN 1279-3, Glas im Bauwesen, Mehrscheiben-Isolierglas, Teil 3: Langzeitprüfverfahren und Anforderungen bezüglich Gasverluste und Grenzabweichungen für die Gaskonzentration, Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [92] Kaufmann, Berthold; John, Markus; Feist, Wolfgang: Optimierungsstrategien für das hoch wärmegeämmte Fenster. In:

- Optimierungsstrategien für Fensterbauart und Solarapertur unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Tageslicht, Solargewinnen und Sommerklima, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser. 37, Passivhaus Institut Darmstadt, 2008.
- [93] Schnieders, Jürgen: Der Einfluß von Randverbund und Glaseinstand. In: Passivhaus-Fenster, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 14, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 1998.
- [94] Schnieders, Jürgen; Feist, Wolfgang: Für das Passivhaus geeignete Fenster, Cepheus-Projektinformation Nr. 9, Hg. von Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999.
- [95] Leitfaden zur Planung und Ausführung der Montage von Fenstern und Haustüren, Hg. von RAL-Gütegemeinschaft Fenster und Haustüren e.V., Frankfurt, Ausgabe Dezember 2006.
- [96] DIN EN 10077, Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten, Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [97] Website des Passivhaus Instituts: [http://www.passiv.de/01\\_dph/UntBH/HerstLi/01Bauw/Fenst/Fenst\\_F.htm](http://www.passiv.de/01_dph/UntBH/HerstLi/01Bauw/Fenst/Fenst_F.htm), Januar 2009.
- [98] DIN EN 1627, Fenster-Türen, Abschlüsse - Einbruchhemmung - Anforderungen und Klassifizierung, Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [99] Schnieders, Jürgen; Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer; Kah, Oliver: Cepheus - Projektinformation Nr. 22, Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht. Fachinformation PHI 2001/9. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2001.
- [100] Froelich, Dipl.-Ing. (FH) Hans; Hartmann, Dipl.-Ing. (FH) Hans-Jürgen; Huber, Dipl.-Ing. (FH) Konrad; Weimann, Dipl.-Ing. (FH) Waldemar; Sack, Dipl.-Phys. Norbert; Krause, Dr. rer. nat. Harald: Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Sprossenkonstruktionen auf den Wärmedurchgang von Fenstern, Abschlussbericht, Hg. von ift Rosenheim, Rosenheim, 2001.
- [101] Schulze Darup, Dipl.-Ing. Burkhard: Energetische Wohngebäudesanierung mit Faktor 10, Dissertation bei Prof. Dr. Margrit Kennedy, Universität Hannover, Hannover, 2003.
- [102] Werner, Johannes; Laidig, Matthias: Grundlagen der Wohnungslüftung im Passivhaus. In: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 17, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999.
- [103] Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer; Kaufmann, Berthold; Schnieders, Jürgen; Kah, Oliver: Handbuch für das „Passivhaus Projektierungs Paket 2007“, Fachinformation PHI-2007-1, Hg. von Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist, Darmstadt, 2007.
- [104] Pfluger, Rainer: Integration von Lüftungsanlagen im Bestand - Planungsempfehlungen für Geräte, Anlagen und Systeme. In: Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 30, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.

- [105] PHLuft, Die Software kann kostenlos auf der Homepage des Passivhaus Instituts ([www.passiv.de](http://www.passiv.de)) heruntergeladen werden.
- [106] Schulz, Tanja; Baumgärtner, Cornelia: Werkstattbericht Messungen Winter 2007/2008, CONCERTO - ACT 2, WP 2 Monitoring and Evaluation, Hg. v. Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist, Darmstadt, 2008.
- [107] Peper, Søren; Feist, Wolfgang: Gebäudesanierung „Passivhaus im Bestand“ in Ludwigshafen / Mundenheim, Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge, Hg. von Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist, Darmstadt, 2009.
- [108] DIN 18181, Gipsplatten im Hochbau - Verarbeitung, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [109] Pfluger, Rainer: Wärmeverteilverluste im Passivhaus: Berechnungen, Verbrauchsmessungen und Planungshinweise. In: Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 28, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2004.
- [110] Schwarz, Michael: Numerische Simulation von Luftströmungen in Wohnräumen mit mechanischer Lüftungsanlage. In: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 17, Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999.
- [111] Schnieders, Jürgen: Wirkung von Position und Art der Lüftungsöffnungen auf den Schadstoffabtransport. In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 23, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [112] Feist, Wolfgang: Anforderungen an die Wohnungslüftung im Passivhaus. In: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 17. Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999.
- [113] Werner, Johannes; Rochard, Ulrich; Laidig, Matthias: Vorbereitende Untersuchungen zu Lüftungsanlagen in Passivhäusern, ebök, Tübingen, 1998.
- [114] DIN EN 13779, Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen, Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [115] Pfluger, Rainer: Lufthygiene im Passivhaus. In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 23, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [116] Passivhaus Institut: Passivhaustechniken im Bestand: Qualitätssicherung Jean-Paul-Platz 4. Passivhaus Institut, Darmstadt 2003
- [117] Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg - energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10, Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitforschung. Hg. von Schulze Darup, Dr. Burkhard, im Auftrag der WBG Nürnberg GmbH, Nürnberg, 2005.

- [118] Feist, Wolfgang: Qualitätssicherung am Fallbeispiel Nürnberg: Thermografie, Drucktest und Tracergasmessung. In: Einsatz von Passivhaus Technologien bei der Altbau-Modernisierung. Passivhaus Institut, Darmstadt 2003
- [119] VDI 6022, Hygiene-Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2005.
- [120] Schnieders, Jürgen: Der Einfluss verschiedener Lüftungsstrategien auf das Sommerklima - vergleichende Untersuchung mittels dynamischer Gebäudesimulation. In: Lüftungsstrategien für den Sommer, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 22, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [121] Schleevoigt, Peter: Erfahrungen mit Planung und Ausführung bei der Integration von Wohnungslüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung in Bestandsgebäuden. In: Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 30, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [122] DIN EN 779, Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik, Bestimmung der Filterleistung, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [123] Feist, Wolfgang: Empfehlungen zur Lüftungsstrategie. In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 23, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [124] Ebel, Witta; Eicke, Werner; Feist, Wolfgang; Hildebrandt, Olaf; Hilpert, Hans-Peter; Klien, Jobst; Kröning, Wolfgang; Schmidt, Helmut; Siepe, Benedikt; Wullkopf, Uwe: Energiesparpotentiale im Gebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt. Herausgeber: Hessisches Ministerium für Wirtschaft und Technik, Wiesbaden 1990.
- [125] Ebel, Witta; Eicke-Hennig, Werner; Feist, Wolfgang; Groscurth, Helmut-Michael: Energieeinsparung bei Alt- und Neubauten, C.F. Müller Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg, 2000.
- [126] „PHI Rechentool Druckverlust“, Copyright: Passivhaus Institut Darmstadt 2009; Download unter: [www.passiv.de](http://www.passiv.de)
- [127] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: RICHTLINIE 2006/32/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 5. April 2006 über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen und zur Aufhebung der Richtlinie 93/76/ EWG des Rates
- [128] IPCC 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor und H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.
- [129] IPCC 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Auswirkungen, Anpassung,

Verwundbarkeiten. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, C.E. Hanson and P.J. van der Linden, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCCKoordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.

- [130] IPCC 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Verminderung des Klimawandels. Beitrag der Arbeitsgruppe III zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.
- [131] Zahlen und Fakten, Energiedaten, Nationale und Internationale Entwicklung, Hg. von Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat III C 3, <http://www.bmwi.de/Navigation/Technologie-und-Energie/Energiepolitik/energiedaten.html>, Februar 2009.
- [132] W. Feist: Ergebnisse der Luftqualitätsmessung im Passivhaus Darmstadt Kranichstein. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 8 Materialwahl, Ökologie und Raumlufthygiene. Passivhaus Institut, Darmstadt 1997
- [133] Münzenberg, Uwe; Thumulla, Jörg: Raumlufthqualität in Passivhäusern. In: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 23, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [134] VDI 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen. Hg. von VDI-Kommission Lärminderung, Ausschuss Schalldämmung von Fenstern, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1987.
- [135] Kaufmann, Berthold; Peper, Søren; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Sanierung mit Passivhauskomponenten, Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung Tevesstraße Frankfurt a.M., Bericht im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009. Download unter: [www.passiv.de](http://www.passiv.de)
- [136] Peper, Søren; Grove-Smith, Jessica; Feist, Prof. Dr. Wolfgang: Sanierung mit Passivhauskomponenten, Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a.M., Bericht im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009. Download unter: [www.passiv.de](http://www.passiv.de)
- [137] Kaufmann, Berthold; Peper, Søren; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Sanierung mit Passivhauskomponenten, Untersuchungen zu den Bestandsgebäuden Tevesstraße Frankfurt a.M., Bericht im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009. Download unter: [www.passiv.de](http://www.passiv.de)

- [138] DIN V 4701-10/A1, Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Änderung von DIN V 4701-10:2003-08, Beuth Verlag, Berlin.
- [139] Schnieders, Jürgen: Einflussgrößen auf die Temperaturunterschiede in der Wohnung. In: Temperaturdifferenzierung in der Wohnung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 25, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2004.
- [140] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV 2009) vom 30. April 2009.
- [141] Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI 2009)
- [142] Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
- [143] BKI Baukosten 2008, Teil 1 – Statistische Kostenkennwerte für Gebäude. – Baukosteninformationszentrum der Deutschen Architektenkammern Stuttgart 2008.
- [144] Raisch, E.: Die Luftdurchlässigkeit von Baustoffen und Baukonstruktionsteilen, In: Gesundheits-Ingenieur, 30. Heft, München, 1928.
- [145] DIN V 4108-4, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [146] DIN EN ISO 6946:2008-04 (D), Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [147] Feist, Wolfgang: Ist Wärmespeichern wichtiger als Wärmedämmen? Fachinformation PHI-2000/4, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2000.
- [148] Schnieders, J.; Feist, Dr. Wolfgang: Passivhaus-Reihenhäuser: Über die Zuluft beheizbar?, Cepheus Projektinformation Nr. 5, Passivhaus-Institut, Darmstadt, 1998.
- [149] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 16: Wärmebrückenfreies Konstruieren. Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [150] W. Feist: Wärmebrücken,  $\psi$ -Werte, Grundprinzipien des wärmebrückenfreien Konstruierens. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 16, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [151] J. Schnieders: Bestimmung von Wärmebrückenverlustkoeffizienten: Modelle, Diskretisierung, Randbedingungen, Programme. Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 16, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [152] Wichmann, H.-E.: Radon-Lungenkrebsrisiko, nach Ärzte-Zeitung vom 4.4.2004.
- [153] Kemski, J.; Siehl, A.; Stegemann, R.; Valida-Manchego, M.: Geogene Faktoren der Strahlenexposition unter besonderer

- Berücksichtigung des Radonpotentials, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1999-534, Bonn, 1999.
- [154] Hasper, Wolfgang: Verbrennungswärme im Passivhaus, In: Heizung mit Biobrennstoffen für Passivhäuser, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 36, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2007.
- [155] Peper, Søren; Feist, Wolfgang: Gebäudesanierung „Passivhaus im Bestand“ in Ludwigshafen / Mundenheim, Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge, Darmstadt, 2009. Download unter: [www.passiv.de](http://www.passiv.de)
- [156] Feist, Wolfgang: Passivhäuser in der Praxis. In: Fouad, Nabil A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2007. Ernst & Sohn, Berlin, 2007.
- [157] Zeller, J.: Luftdichtigkeit von Wohngebäuden - Messungen, Bewertungen, Ausführungsdetails, Fachberatung Energiesparendes Bauen, RWE Energie AG Anwendungstechnik, 2. Auflage, Essen 1996.
- [158] Peper, Søren: Überprüfung der luftdichten Bauweise bei Passivhäusern, In: Qualitätssicherung beim Bau von Passivhäusern, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 18, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999.
- [159] Kah, Oliver; Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer; Schnieders, Jürgen; Kaufmann, Berthold, Schulz, Tanja; Bastian, Zeno: Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung, Hg. von BMVBS / BBR, BBR-Online-Publikation 18/2008. urn:nbn:de:0093-ON1808R222. Download unter [www.passiv.de](http://www.passiv.de)
- [160] Münzenberg, Uwe: Der natürliche Luftwechsel in Gebäuden und seine Bedeutung bei der Beurteilung von Schimmelpilzschäden, In: Umwelt, Gebäude und Gesundheit : Innenraumhygiene, Raumluftqualität und Energieeinsparung; Tagungsband des 7. AGÖF-Fachkongresses 2004, Hg. von AGÖF - Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e.V., Springe, 2004.
- [161] Schulz, Tanja: Verglaste Balkone - eine Option für die Altbaumodernisierung?, In: Optimierungsstrategien für Fensterbauart und Solarapertur, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 37. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2008.
- [162] Hessische Bauordnung (HBO) vom 18. Juni 2002, Hg. von Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, 2008.
- [163] Feist, Wolfgang: Das Passivhaus-Konzept für den Sommerfall, In: Passivhaus-Sommerfall, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 15, Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999.
- [164] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) vom 24. Juli 2007.

- [165] DIN EN 12056-2, Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden, Teil 2: Schmutzwasseranlagen, Planung und Berechnung, Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [166] DIN 1986-100, Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke - Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [167] DIN EN 12380, Belüftungsventile für Entwässerungssysteme - Anforderungen, Prüfverfahren und Konformitätsbewertung, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [168] Stärz, Dipl.-Ing. Norbert: Planung und Abnahme von Heizung und Lüftung, In: Tagungsband der 12. Internationalen Passivhaustagung in Nürnberg, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2008.
- [169] Stärz, Dipl.-Ing. Norbert; Kreuz, Dipl.-Ing. Witold; Feith, Dipl.-Ing. Josef: Effiziente Warmwasserbereitung beim Passivhaus, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Fachinformation PHI-1997/3, Hg. von Feist, Dr. Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 1997.
- [170] DIN EN 15251, Eingangparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [171] DIN 18380, VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Heizanlagen und zentrale Wassererwärmungsanlagen, Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [172] DVGW Arbeitsblatt W 551, Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen, Hg. von DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn, 2004.
- [173] VDI 2067, Wirtschaftlichkeit Gebäudetechnischer Anlagen, Hg. von Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- [174] DIN 18894, Feuerstätten für feste Brennstoffe - Pelletöfen - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung, Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [175] Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Überblick der Versorgungsvarianten im Passivhaus: Angepasste Systeme für Passivhaus Ein- und Mehrfamilienhäuser, In: Heizsysteme im Passivhaus - Statistische Auswertung und Systemvergleich, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 38. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2008.
- [176] ...Thafer, M., ...et. al.: VBI-Leitfaden « Oberflächennahe Geothermie » Verband Beratender Ingenieure VBI, Berlin, 2008.
- [177] Rumohr, Dr. Sven; Fritsche, Dr. Johann-Gerhard: Erdwärmenutzung in Hessen, Leitfaden für Wärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30 kW, Hg. von Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden, 2007.

- [178] DIN 18379, VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Raumluftechnische Anlagen, Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [179] Feurich, H.; u.a.: Sanitärtechnik. Grundlagen der Sanitärtechnik, Krammer Verlag, Düsseldorf, 2005.
- [180] SIA 385/3 Warmwasserversorgungen für Trinkwasser in Gebäuden, Hg. vom Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1991.
- [181] VDI 6003, Trinkwassererwärmungsanlagen - Komfortkriterien und Anforderungsstufen für Planung, Bewertung und Einsatz, Hg. von VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [182] Feist, Wolfgang: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ausgewählter Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand, Studie im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998.
- [183] Feist, Wolfgang: Zur Wirtschaftlichkeit der Wärmedämmung bei Dächern, In: Hochwärmedämmte Dachkonstruktionen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 29, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2005.
- [184] Kah, Oliver; Feist, Wolfgang: Zur Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm-Maßnahmen im Gebäudebestand, Studie im Auftrag des Gesamtverbands der Dämmstoffindustrie GDI, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2005
- [185] Kaufmann, Berthold; Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer: Technische Innovationstrends und Potenziale der Effizienzverbesserung im Bereich Raumwärme, Studie des Passivhaus Instituts im Auftrag des Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin, April 2003.
- [186] Ladener, Heinz, Hrsg., Vom Altbau zum Niedrigenergiehaus, Energietechnische Gebäudesanierung in der Praxis, Ökobuchverlag Staufen bei Freiburg, 1997.
- [187] Steinmüller, Bernd: Passivhaustechnologie im Bestand - von der Vision in die breite Umsetzung, In: Tagungsband der 9. Internationalen Passivhaustagung in Ludwigshafen, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2005.
- [188] Feist, Wolfgang: Perspektiven für die Modernisierung des Bestandes mit hocheffizienten Komponenten, In: Einsatz von Passivhaustechnologien bei der Altbau-Modernisierung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 24. Passivhaus Institut Darmstadt, 2003.
- [189] Bastian, Zeno: Fallstudie: Schrittweise durchgeführte Modernisierung bei wirtschaftlicher Optimierung der Energiesparmaßnahmen, In: Schrittweise Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 39, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2009.

- [190] DIN 1961, VOB Vergabe und Vertragsordnung für Bauleistungen, Teil B, Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen, Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [191] Bundesausschuss für Farbe und Sachwertschutz (Hg.): Merkblatt Nr. 21, Technische Richtlinien für die Planung und Verarbeitung von Wärmedämm-Verbundsystemen, Frankfurt am Main, 2005.
- [192] Ost, Karl Ludwig; Buecher, Dr. Bodo: Technische Systeminfo Wärmdämm-Verbundsysteme 3, zum Thema Systemvielfalt, Hg. von Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V., Baden Baden, 2007.
- [193] WDVS-Verarbeitung, Hg. von CAPAROL Farben Lacke Bautenschutz GmbH, Ober-Ramstadt, 2006.
- [194] Sicherheit im System, Die Verdübelung von Wärmedämm-Verbundsystemen, ein zentraler Baustein für dauerhafte Qualität und Sicherheit, Hg. von Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V., Baden Baden.
- [195] Pätzold, Helmut: WDVS-Atlas, Planung und Ausführung von Wärmdämm-Verbundsystemen, Hg. von CAPAROL Farben Lacke Bautenschutz GmbH, Ober-Ramstadt, 2007.
- [196] DIN 18555-6, Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel; Bestimmung der Haftzugfestigkeit, Beuth Verlag, Berlin, 1987.
- [197] Bausteine, Sicher arbeiten - gesund bleiben, Hg. von Arbeitsgemeinschaft der Bau-Berufsgenossenschaften, Frankfurt, 2002.
- [198] Neumann, Prof. Dipl.-Ing. Dietrich; Weinbrenner, Prof. Ulrich: Baukonstruktionslehre Teil 2, B. G. Teubner, Stuttgart, 1993.
- [199] DIN 4102-1, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [200] Künzel, Dr.-Ing. Helmut: Technische Systeminfo Wärmdämm-Verbundsysteme 5, zum Thema Langzeitbewährung, Hg. von Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V., Baden Baden, 2007.
- [201] DIN 5033-3, Farbmessung; Farbmaßzahlen, Beuth Verlag, Berlin, 1992.
- [202] Sanierungsprojekt Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg, wissenschaftliche Begleitforschung des PHI im Auftrag der WGB Nürnberg
- [203] Sanierungsprojekt Tevesstraße, Frankfurt am Main; Bauherr: ABG Frankfurt Holding GmbH; Architekten: Büro faktor10 GmbH; Forschungsprojekt des PHI im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden: „Wissenschaftliche Begleitung und messtechnische Untersuchung zur Demonstration von Passivhaus Gebäudetechnik in der Altbaumodernisierung am Beispiel Tevesstraße 36-54, Friedrich Ebert-Siedlung, Frankfurt/M.“

- [204] Neubau Grundschule und Kindertagesstätte in Frankfurt am Main / Riedberg in Passivhaus-Qualität, Forschungsprojekt des PHI im Auftrag der Stadt Frankfurt a.M. / Hochbauamt mit Fördermitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Az 20708
- [205] Sanierungsprojekt Sodastr. 40, Ludwigshafen, Forschungsprojekt des PHI im Auftrag der LuWoGe Ludwigshafen.
- [206] Wolfgang Feist: Einführung: Passivhauskomponenten und Innendämmung, In: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 32, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [207] Kaufmann, Berthold; Peper, Søren: Optimierte Anschlussdetails bei Innendämmung - Wärmebrückenreduktion und Luftdichtheit, In: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 32, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [208] Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.5. Öko Institut, <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm>
- [209] C. Dreyer, W. Ebel, W. Feist: Energiepolitik von unten. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt/M. 1982.
- [210] H. Bossel: Energy supply submodel. In: Mesarovic, E. Pestel (eds): Multilevel Computer Model of World Development Systems. IIASA Symposium Proceedings, 1974, Laxenburg.
- [211] Bargmann, H.: Historische Bautabellen. Düsseldorf 1993.
- [212] Feist, W. Überprüfung der bedingten energetischen Anforderungen im Gebäudebestand. Im Auftrag des Bundesbauministeriums. Passivhaus Institut, Darmstadt, 1997.
- [213] Ebel, W., W. Feist, B. Siepe: Die Gebäudetypologie des Gebäudebestands. Teilbericht zu „Stoffströme und Kosten im Bereich des Bauen und Wohnen“. Im Auftrag der Enquete Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“. IWU, Darmstadt 1996.
- [214] Ebel, W., W. Eicke, W. Feist: Hohe Energiesparpotentiale bei bestehenden Gebäuden. In: Bauphysik 3/1992
- [215] Eicke-Hennig, W., B. Siepe: Die Heizenergie-Einsparmöglichkeiten durch Verbesserung des Wärmeschutzes typischer hessischer Wohngebäude. IWU, Darmstadt 1997.
- [216] Ebel, W., Eicke, W., Feist, W. et al: Altbaumodernisierung und Sanierung von Wohngebäuden. Studie für den Deutschen Bundestag. In: Energie und Klima, Economica Verlag, Bonn 1990.
- [217] Kah, Oliver: Die Strahlungsbilanz an der Dachoberfläche und weitere Einflussgrößen der Dachkonstruktion auf das sommerliche und winterliche Verhalten, In: Hochwärme gedämmte Dachkonstruktionen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 29, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [218] Kaufmann, Berthold: Wärmedämm-Maßnahmen an der Außenhülle, In: Schrittweise Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten,

- Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 39, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2009.
- [219] Kaufmann, Berthold; Pfluger, Rainer; Kah, Oliver: Das hoch wärmedämmte Fenster im Überblick, In: Optimierungsstrategien für Fensterbauart und Solarapertur, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 37, Passivhaus Institut, Darmstadt 2008.
- [220] Sanierungsprojekt Hohelooogstr., Ludwigshafen, Wissenschaftliche Begleitung und messtechnische Untersuchung zum Projekt „Passivhaus im Bestand“ Mundenheim Süd-Ost / Ludwigshafen. Forschungsprojekt des PHI im Auftrag der GAG Ludwigshafen mit Fördermitteln des Programms Experimenteller Wohnungs- und Städtebau (ExWoSt) vom Ministerium der Finanzen des Landes Rheinland Pfalz.
- [221] Pfluger, Rainer: Möglichkeiten und Potentiale unterschiedlicher Wärmequellen und Wärmesenken für Wärmepumpen und Kompaktgeräte, In: Neue Passivhaus-Gebäudetechnik mit Wärmepumpen, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 26, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [222] Schnieders, Jürgen: Erdreichwärmeverluste im Passivhaus, In: Wärmeverluste durch das Erdreich, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 27, Passivhaus Institut Darmstadt, 2004.
- [223] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 37: Optimierungsstrategien für Fensterbauart und Solarapertur unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Tageslicht, Solargewinnen und Sommerklima. Passivhaus Institut Darmstadt, 2008.
- [224] W. Feist: Innovative Haustechnik für das Passivhaus. Fachinformation PHI 1998/4. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [225] W. Feist: Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser. Darmstadt, 2001
- [226] R. Pfluger, W. Feist: Kostengünstiger Passivhaus-Geschoßwohnungsbau in Kassel Marbachshöhe. Fachinformation PHI 2001/3. Passivhaus Institut, Darmstadt 2001
- [227] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 17: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern, Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999.
- [228] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 30: Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [229] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 28, Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2004.
- [230] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 32: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [231] J. Schnieders: Sanierung eines Wohnblocks zum „Passivhaus im Bestand“. In: Tagungsband zur 4. Passivhaustagung in Kassel. Passivhaus Institut, Darmstadt 2000

- [232] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 27: Wärmeverluste durch das Erdreich. Passivhaus Institut, Darmstadt 2004
- [233] Schulz, Tanja: Erfordernisse der Statik – vermeidbare Wärmebrücken, In: Wärmebrücken und Tragwerksplanung - die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 35, Hg. von Feist, Wolfgang, Passivhaus Institut Darmstadt, 2007.
- [234] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Nr. 36: Heizung mit Biobrennstoffen für Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [235] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Nr. 38: Heizsysteme im Passivhaus - Statistische Auswertung und Systemvergleich. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2008.
- [236] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Nr. 20: Passivhaus – Versorgungstechnik. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2000.
- [237] W. Feist: Varianten für die Wärmeversorgung von Passivhäusern im Vergleich. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Nr. 20: Passivhaus – Versorgungstechnik. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2000.
- [238] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 29: Hochwärme gedämmte Dachkonstruktionen. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2005.
- [239] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 23: Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2003.
- [240] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 30: Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten. Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [241] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 31: Energieeffiziente Raumkühlung, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.