

Bericht FO-12/12

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard
Dr.-Ing. Sebastian Tremel
Prof.-Dr. Ing. Andreas H. Holm

Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe

Metastudie Wärmedämmstoffe –
Produkte – Anwendungen – Innovationen



Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe

Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard
Dr.-Ing. Sebastian Treml
Prof.-Dr. Ing. Andreas H. Holm

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) gefördert.

(Aktenzeichen: II 3-F20-12-1-074 / SWD-10.08.18.7-12.39)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.



FIW München

Bericht FO-12/12

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9254-3

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9255-0

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer IRB

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2014

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 9 70-25 00

Telefax +49 7 11 9 70-25 08

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Titel: Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe

Kurztitel: Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen

Gefördert durch: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)
am 28. Oktober 2012
Aktenzeichen: II 3-F20-12-1-074 / SWD-10.08.18.7-12.39

Mitfinanzierende Stellen: Gesamtverband Dämmstoffindustrie GDI – Berlin

Fachverband Wärmedämmverbund-Systeme (FV WDVS) – Baden-Baden

Die Bearbeitung der Kapitel 3, 4 und 5 wurde vom GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e. V. – Berlin unterstützt

Bericht Nr.: FO-12/12

Ausstellungsdatum: 29. November 2013

Seiten: 285

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

der Gebäudebestand ist mit etwas mehr als einem Drittel der größte Energieverbraucher der Volkswirtschaft und damit auch einer der Sektoren, der für den CO₂-Ausstoß besonders verantwortlich ist. Die Bundesregierung hat in ihren Beschlüssen zur Energiewende festgelegt, dass gegenüber dem Jahre 2008 bis 2020 der Primärenergieverbrauch um 20 % und bis 2050 um 50 % sinken und der Anteil erneuerbarer Energien bis 2050 auf 60 % erhöht werden soll. Bereits ab 2020 sollen nur noch sog. „klimaneutrale“ Gebäude errichtet werden. Das deckt sich in etwa mit den Zielen der Novelle der EG-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.



Die Energiewendebeschlüsse der Bundesregierung machten eine Weiterentwicklung der EnEV erforderlich. Die neue EnEV trat am 01. Mai 2014 in Kraft. Als erster Schritt auf dem Weg zur Einführung des Niedrigstenergiegebäude-Standards wird eine Verschärfung um 25 % ab dem 01.01.2016 umgesetzt. Damit ist ein erster Schritt hin zu klimaneutralen Gebäuden getan. Im Gebäudebestand ist keine Verschärfung der Anforderungen vorgesehen. Hier soll mit Augenmaß und finanzieller Förderung agiert werden. Über die EnEV hinausgehende Standards fördert die Bundesregierung auch weiterhin über die bewährten KfW-Programme.

In der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) wird für zukünftige Standards intensiv an der Entwicklung sog. „Effizienz Häuser Plus“ geforscht. Diese Gebäude können mehr Energie erzeugen als sie unter voller Nutzung verbrauchen.

Der Weg zu energieeffizienteren und gar zu „klimaneutralen“ Gebäuden benötigt viele unterschiedliche Maßnahmen. Dazu gehört eine gute energieeffiziente Gebäudehülle, moderne Technik für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung und der Einsatz erneuerbarer Energien. Die vom BMUB, der Wohnungswirtschaft und der Dämmstoffindustrie unterstützte Studie analysiert in umfassender Form und produktneutral den Stand der Technik und die aktuellen Innovationen in Bezug auf die eingesetzten Dämmstoffe einschließlich einer Nachhaltigkeitsbewertung. Dies ist ein wichtiger Beitrag zur Einordnung der Leistungsfähigkeit von Dämmstoffen. Ohne moderne Dämmstoffe wird die Energiewende nicht zu meistern sein. Modern sein heißt aber auch, eine stetige Verbesserung hinsichtlich der Effizienz und Wirtschaftlichkeit im Auge zu haben.

Eine aufschlussreiche und spannende Lektüre wünscht Ihnen

Ministerialrat Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hegner
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Berlin

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	8
2	HINTERGRUND: STEIGERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ DURCH BAULICHEN WÄRMESCHUTZ	10
2.1	Energiepolitische Ziele	10
2.2	Energieverbrauch im Gebäudebereich	12
3	DÄMMSTOFFE IM HOCHBAU	16
3.1	Grundlagen: bauphysikalische und technische Eigenschaften	16
	Wärmeschutz	17
	Wärmespeicherfähigkeit	17
	Diffusionswiderstand	18
	Wasseraufnahmevermögen	18
	Schalldämmung	18
	Brandverhalten	19
	Mechanische Eigenschaften	21
	Elastizität	21
	Temperaturbeständigkeit	22
	Primärenergieverbrauch	22
	Langzeitverhalten	22
3.2	Überblick über Dämmstoffmaterialien und Dämmprodukte	22
	Aerogel	24
	Baumwolle	26
	Flachs und Hanf	27
	Holzfaser (WF)	29
	Holzwole – Platten (WW)/Holzwole-Mehrschichtplatten (WW-C)	31
	Kalziumsilikat	33
	Kork	34
	Mineralschaum	36
	Mineralwolle (MW)	37
	Phenolharz (PF)	39
	Polystyrol, expandiert (EPS)	40
	Polystyrol, extrudiert (XPS)	42
	Polyurethan (PU)	44
	Pyrogene Kieselsäure	45
	Schafwolle	46
	Schaumglas (CG)	48
	Vakuuminisationspaneele (VIP)	50
	Zellulose	52

3.3	Regelung und Normung	54
3.4	Anwendung im Hochbau	60
	Anwendungsbereiche und -eigenschaften	61
	Anwendungsbeispiele	66
3.5	Marktentwicklung	73
3.6	Verfügbarkeit alternativer Dämmstoffe	76
4	INNOVATIONEN	78
4.1	Physikalischer Hintergrund	78
4.2	Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit bei Dämmstoffen	80
	Neue Werte bei der Mineralwolle	80
	Verbesserung bei EPS durch Wärmestrahlungsabsorber (graues EPS)	81
	XPS	82
	Polyurethan-Dämmstoffe	84
4.3	Verbesserung bei der dämmenden Wand	86
	Mauerwerk: Porenbeton	90
	Mauerwerk: Ziegel	91
	Mauerwerk: Leichtbeton	92
4.4	Sonstige Entwicklungen	93
	Vakuum-Isolations-Paneele (VIP)	93
	Aerogele	96
	Phase Change Materials PCM, Phasenwechselmaterialien	98
	Multifunktionalität	99
	Biologische Dämmstoffe	106
4.5	Umstrittene Entwicklungen	106
	Wärmedämmende Anstriche	106
	Foliensysteme mit IR-Reflexion	107
4.6	Problemfelder und Ziele für Weiterentwicklungen	107
	Anforderungen des Marktes	107
	Anforderungen für die Energiewende	109
5	NACHHALTIGKEIT VON DÄMMSTOFFEN	111
5.1	Grundlagen und Bewertungskriterien	112
5.2	Ökologische Qualität	114
	Energetische Amortisation	114
	Erzeugungsbedingungen von Energie und Rohstoffen zur Herstellung	122

	Bewertung von Umweltwirkungen	123
5.3	Ökonomische Qualität	125
	Material- und Verarbeitungskosten	126
	Wartungs- und Pflegekosten	128
	Kosten für den Rückbau	128
	Nutzungsdauer	128
	Kosten und Rentabilität	130
	Wirtschaftlichkeit aus wohnungswirtschaftlicher Sicht	134
5.4	Soziokulturelle Qualität	135
	Möglichkeiten der Interaktion zwischen Mensch und Material	135
	Fasern und Stäube	135
	Raumluftqualität	137
	Flammschutzmittel	142
	Behaglichkeit	146
	Architektur	148
5.5	Aktuell: Rückbau von WDVS	149
5.6	Aktuell: Probleme nach Hochwasser	157
6	BEDEUTUNG DER WÄRMEDÄMMUNG IM KONTEXT DER ENERGIEWENDE: POTENTIALABSCHÄTZUNG	162
6.1	Überblick über den Gebäudebestand	162
	Altersstruktur der Gebäude in Deutschland	163
	Struktur der Gebäudegrößen und Wohneinheiten	167
6.2	Energieverbrauchskennwerte	170
6.3	Energetischer Zustand der Gebäudehülle	176
	Dach und oberste Geschosßdecke	177
	Außenwand	181
	Fußboden bzw. Kellerdecke	186
6.4	Bauteilbezogene Abschätzung des Einsparpotentials	188
	Vorgehensweise	190
	Abschätzung der möglichen Verminderung der Transmissionswärmeverluste	191
	Abschätzung der zur Sanierung benötigten Mengen an Dämmstoff	196
	Effektivitätsvergleich der möglichen Maßnahmen	198
	Zusammenfassung	200
7	MOTIVATION UND HEMMNISSE BEI DER SANIERUNG	202
7.1	Sanierungsgründe	202

7.2	Sanierungshemmnisse	205
8	WÄRMEDÄMMUNG IM VISIER DER MEDIEN	210
8.1	Überblick	210
	Schlagzeilen und Titel von Berichten in Printmedien, Internet und Fernsehen	211
	Verteilung der Vorwürfe	211
	Zahlen zum Marktrückgang	212
8.2	Ressentiments potentieller Anwender	212
	Architektur und Konflikte mit dem Denkmalschutz	212
	Energieeinsparung	216
	Schimmel	217
	Veralgung und Biozide	220
	Dauerhaftigkeit	222
	Schäden nach der Sanierung	224
	Brandgefahr	229
	Entsorgung	235
9	QUALITÄTSSICHERUNG UND VORGESCHRIEBENE BZW. FREIWILLIGE GÜTESIEGEL ODER QUALITÄTSZEICHEN	238
9.1	Kennzeichnung von europäisch harmonisierten Bauprodukten	238
	CE-Kennzeichnung	238
	Übereinstimmungszeichen (Ü-Kennzeichnung)	238
	Freiwillige Qualitätszeichen	239
	Wärmedämmstoffe im Besonderen	239
	Folgen für die Praxis	240
9.2	Freiwillige Produktzertifizierung	242
	Beispiele für freiwillige Qualitätssicherungssysteme	245
10	ZUSAMMENFASSUNG: WÄRMEDÄMMUNG ALS BAUSTEIN DER ENERGIEWENDE	251
11	LITERATUR	262

1 Einleitung

Wärmedämmung ist ein wesentlicher Bestandteil für die Verminderung des Energieverbrauchs und der Energiekosten von Gebäuden und damit ein unverzichtbarer Baustein der Energiewende. Dämmstoffe übernehmen darüber hinaus aber auch viele weitere, für den Nutzer und den Werterhalt des Gebäudes, wichtige Funktionen. Eine ausreichende Wärmedämmung ist die Voraussetzung für ein wohngygienisch einwandfreies und behagliches Raumklima und schützt die Bauteile vor Feuchte- und Frostschäden. Diesen großen Vorteilen steht aber eine Reihe von Anwendungsfragen gegenüber, deren Beantwortung fundiertes Wissen erfordert. Ziel der vorliegenden Metastudie ist die umfassende Zusammenstellung belastbarer Fakten zum Themengebiet des baulichen Wärmeschutzes, zur Ableitung übergeordneter und individueller Handlungsempfehlungen.

Die von der Bundesregierung im Rahmen des Energiekonzeptes 2050 und der Energiewende beschlossenen Zielvorgaben bei der Reduzierung des Primärenergiebedarfes im Gebäudebereich sind nur erreichbar, wenn die Energieverluste über die Hülle der Gebäude sowohl im Neubau als auch im Bestand konsequent reduziert werden. Ohne Reduzierung der Wärmeverluste im Bestand geht die Rechnung zur Energiewende nicht auf. Diese Erkenntnis ist dabei keinesfalls neu. Schon [Hauser 1992] titelt „Wer den Gebäudebestand vergißt, kann alle Einsparziele vergessen“. Eine Reduzierung der Verluste und eine Erhöhung der Effizienz haben einen höheren Stellenwert als der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien, sind aber gleichzeitig dafür die Voraussetzung.

Da der vorhandene Gebäudebestand über die Jahrzehnte der Baupraxis unterschiedlichste Bauweisen und Bautechniken aufweist, können generell keine Pauschalaussagen über die in einem spezifischen und konkreten Fall funktionierenden Dämmstoffe bzw. Dämmstoffsysteme gegeben werden. Die Auswahl der passenden Maßnahmen, und bei begrenzten Investitionskapazitäten auch die sinnvolle Reihenfolge der prinzipiell möglichen Maßnahmen, erfordert eine umfassende Marktkenntnis und ein bauphysikalisches Grundverständnis. Neben physikalischen Grundlagen zum Wärmeschutz wird in dieser Studie deshalb auch detailliert auf die Beiträge der einzelnen Bauteile (Dach, Wand, Fenster, Keller) zum Wärmeverlust der Gebäudehülle eingegangen. Einzelne Dämmmaßnahmen lassen sich damit hinsichtlich ihres Einsparpotentials und ihrer Wirtschaftlichkeit bewerten.

Basis für die Erstellung einer Arbeits- und Argumentationshilfe für Wohnungsunternehmen und Sanierungswillige ist eine Datensammlung mit Fakten zu Dämmstoffen und deren Anwendung. Dabei wird eine differenzierte Zusammenfassung des Sachstandes gegeben, einschließlich der Beantwortung bislang offener Fragen zu:

- Energiebilanz
- Recyclingfähigkeit

- Nachhaltigkeit
- Lebenszyklusbetrachtung
- Risiken für die Umwelt
- Brandschutz
- Schadensvermeidung

Mit den steigenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden sind in den letzten Jahrzehnten leistungsfähige Dämmstoffe entstanden, die Anwendungsbereiche ausgeweitet und neue Verarbeitungstechniken entwickelt worden. Zu nennen sind u. a. die Entwicklung von VIP (Vakuum-Isolations-Paneele), VIG (Vakuum-Isolierglas) oder die stoffliche Einbindung von Nanotechnologien zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeiten (z. B. Aerogele) in herkömmliche Dämmstoffe.



Abbildung 1: Aerogele (hier transluzent) werden als Schüttungen in Hohlräumen von Gebäuden eingesetzt oder verbessern die wärmetechnischen Eigenschaften von herkömmlichen Dämmstoffen, wie z. B. Mineralwolle

Trotzdem sieht sich die Dämm-Branche seit geraumer Zeit dem Vorwurf ausgesetzt, sie sei innovationsresistent. Im Rahmen dieser Studie werden deshalb die Innovationen der letzten Jahre im Dämmstoffsektor zusammengestellt. Die Entwicklungen der letzten Jahre - hin zu deutlich dünneren und effektiveren Dämmungen bei gleichzeitig nur geringen Preissteigerungen – werden beschrieben und bewertet. Die für eine beschleunigte Weiterentwicklung notwendigen flankierenden Maßnahmen von Seiten der Politik werden identifiziert und beschrieben. Vorschläge für an Zielvorgaben der Politik und den Bedürfnissen des Marktes orientierte Rahmenbedingungen für die Vergabe von Fördermitteln werden unterbreitet.

2 Hintergrund: Steigerung der Energieeffizienz durch baulichen Wärmeschutz

Die Begriffe „Klimawandel“ und „Energie“ beherrschen seit Jahren die Medienberichterstattung. Die Dringlichkeit für Maßnahmen zur Minderung von Treibhausgas-Emissionen und die Abhängigkeit von Energielieferanten ist zu einem prioritären Thema geworden. Die oft von Medien und Politik in den Vordergrund gestellte Maßnahme der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien sollte immer in Verbindung mit Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung gesehen werden. Zunächst haben Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung eine wesentlich höhere praktische Bedeutung als die ebenfalls notwendige verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien.

2.1 Energiepolitische Ziele

Das aktuelle Energiekonzept der Bundesregierung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung misst dem Gebäudesektor eine Schlüsselrolle zu: „Die Szenarien belegen, die energetische Sanierung des Gebäudebestands ist der zentrale Schlüssel zur Modernisierung der Energieversorgung und zum Erreichen der Klimaschutzziele.“ [BMWi 2012a] Im Energiekonzept der Bundesregierung werden neun Handlungsfelder definiert:

- Erneuerbare Energien als eine tragende Säule zukünftiger Energieversorgung
- Schlüsselfrage Energieeffizienz
- Kernenergie und fossile Kraftwerke
- Leistungsfähige Netzinfrastruktur für Strom und Integration erneuerbarer Energien
- Energetische Gebäudesanierung und energieeffizientes Bauen
- Herausforderung Mobilität
- Energieforschung für Innovationen und neue Technologien
- Energieversorgung im europäischen und internationalen Kontext
- Akzeptanz und Transparenz



Abbildung 2: Titelseite des Energiekonzepts der Bundesregierung [BMWi 2012a]

Im Energiekonzept der Bundesregierung wird der Weg in das Zeitalter der erneuerbaren Energien beschrieben. Deklariertes Ziel ist für Deutschland auch zukünftig eine sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung zu garantieren. Hierfür werden quantitative Ziele festgelegt:

- Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95% gegenüber 1990 (2020: 40%)
- Verminderung des Primärenergieverbrauchs um 50 % gegenüber 2008
- Absenkung des Stromverbrauchs um ca. 25 % gegenüber 2008
- Ausbau der erneuerbaren Energien auf einen Anteil von 60 % am Bruttoendenergieverbrauch (2020: 18%) bzw. 80 % am Bruttostromverbrauch (2020: mindestens 35%)

Daraus werden Einsparziele für einzelne wichtige Teilmärkte abgeleitet. Der Gebäudebereich muss demnach den Primärenergiebedarf der Bestandsgebäude bis 2050 um 80 % reduzieren. Hierfür müssen die vorhandenen Konzepte und Technologien zur Verminderung der Wärmeverluste der Gebäudehülle weiterentwickelt werden.

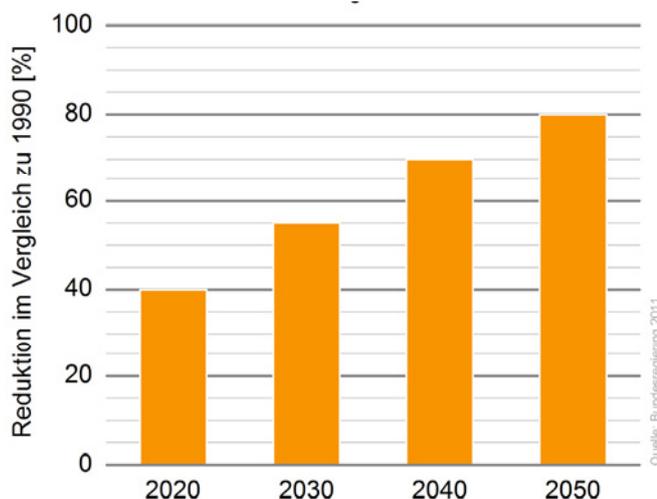


Abbildung 3: Geforderte Reduktion der Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 in Prozent [BMWi 2012a]

2.2 Energieverbrauch im Gebäudebereich

Nachdem der Primärenergieverbrauch in Deutschland ab den 1950er Jahren durch die wirtschaftliche Entwicklung einem starken Anstieg unterworfen war, flacht sich der Verbrauchsverlauf ab den 1980er Jahren ab und stagniert seit ca. 1990 mit leicht fallender Tendenz auf einem Niveau von ca. 4000 TWh [AGEB 2013a]. Zumindest in Deutschland ist der Energieverbrauch nicht mehr direkt mit der wirtschaftlichen Entwicklung verknüpft, was neben einer gesteigerten Energieeffizienz [AGEB 2013c] aufgrund technologischer Weiterentwicklungen im Bereich der Industrie-, Gebäude-, Haushaltstechnik und Verkehr jedoch auch am Rückgang der energieintensiven Montanindustrie liegen könnte.

Der Primärenergieverbrauch lag im Jahr 2012 bei 3815 TWh, was gegenüber 2011 einem Anstieg von 0,9 % entspricht. Diese leichte Erhöhung ist in Anbetracht der schwachen konjunkturellen Entwicklung vor allem auf die kühlere Witterung im Jahr 2012 zurückzuführen (Gradtagszahlen in 2012 lagen 8,4 % höher als 2011) und kann somit durch den hohen temperaturabhängigen Wärmebedarf in den Sektoren Haushalt und Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) erklärt werden.

Der Energieverbrauch wird in Deutschland nach wie vor zum größten Teil durch die klassischen Energieressourcen wie Stein- und Braunkohle, Erdöl und Naturgase bedient. Die genannten Energieträger hatten in Deutschland im Jahr 2012 (vorläufige Werte) einen Anteil am Primärenergieverbrauch von ca. 79 %. Der Rest wird aktuell im Wesentlichen von Kernenergie (ca. 8,0 %) und erneuerbaren Energiequellen (ca. 11,6 %) bereitgestellt. Der Anteil erneuerbarer Energiequellen am Primärenergieverbrauch lag im Jahr 1990 noch bei lediglich ca. 1,3 % und ist in den letzten zwei Jahrzehnten deutlich gestiegen, wobei etwas größere Steigerungen ab 2003 festgestellt werden können, was einerseits auf eine Erweiterung der Erfassungsmethodik in diesem Jahr zurückzuführen ist, andererseits aber auch mit der Förderung

nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz aus dem Jahr 2000 erklärt werden kann. [AGEB 2013a, AGEB 2013b, Tzscheutschler et al. 2009]

Der Verbrauch an Endenergie berechnet sich formal aus dem Primärenergieverbrauch abzüglich des Verbrauchs und der Verluste im Energiesektor und dem nicht-energetischen Verbrauch der stoffherstellenden Industrie. Der Anteil des Endenergieverbrauchs am Primärenergieverbrauch liegt seit 1990 bis heute, relativ konstant bei ca. 64 % [AGEB 2013a]. Üblicherweise wird der Endenergieverbrauch auf die Sektoren Industrie, GHD, private Haushalte und Verkehr aufgeschlüsselt.

Der Endenergieverbrauch ist wie der Primärenergieverbrauch in den letzten zwei Jahrzehnten trotz leicht fallender Tendenz wie beschrieben relativ konstant und liegt aktuell bei ca. 2.500 TWh pro Jahr. Die Einbrüche des Energieverbrauchs in den Jahren 2007 und 2009 sind insbesondere durch einen niedrigeren Verbrauch im Bereich Raumwärme und Warmwasser (ungewöhnlich milder Winter 2007) und im Bereich der Industrieproduktion (wirtschaftliche Krise 2009) zu erklären. Abbildung 4 zeigt den Endenergieverbrauch in Deutschland in den Jahren von 1990 – 2010. Es zeigt sich, dass die Verschiebungen zwischen den prozentualen Anteilen am Endenergieverbrauch der Sektoren über die Jahre verhältnismäßig gering blieben. So werden beispielsweise energetische Einsparungen im Bereich der privaten Haushalte durch die in Deutschland steigende Zahl an Haushalten (mehr Singlehaushalte) und dem gestiegenen Bedarf an Wohnfläche pro Kopf kompensiert [Bayer 2009].

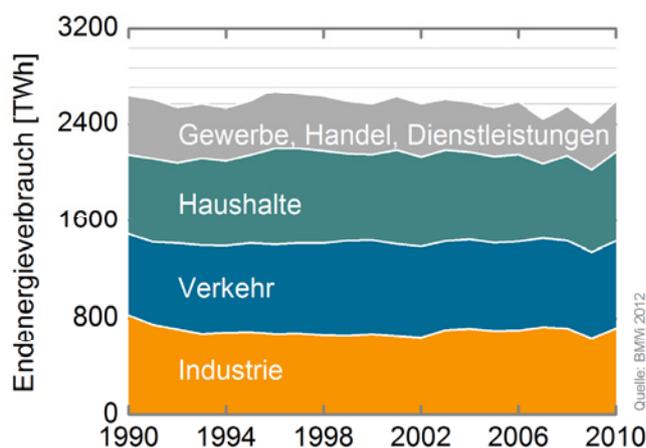


Abbildung 4: Verlauf des Endenergieverbrauchs in Deutschland von 1990 – 2010 [AGEB 2013a]

In Abbildung 5 ist die Struktur des Endenergieverbrauchs nach Sektoren und Anwendungsgebieten für das Jahr 1996 und 2010 abgebildet. Die Anwendungsgebiete werden typischerweise unterschieden in die Bereiche Wärmeanwendungen, Kälteanwendungen, Mechanische Energie, IKT (Informations- /Kommunikationstechnologie) und Beleuchtung, wobei die Bereiche Wärme- und Kälteanwendung typischerweise noch weiter aufgeschlüsselt werden. Im Bereich der Wärmeanwendungen wird der Endenergieverbrauch auf die Aspekte Raumwärme, Warmwasser und sonstige Prozesswärme verteilt.

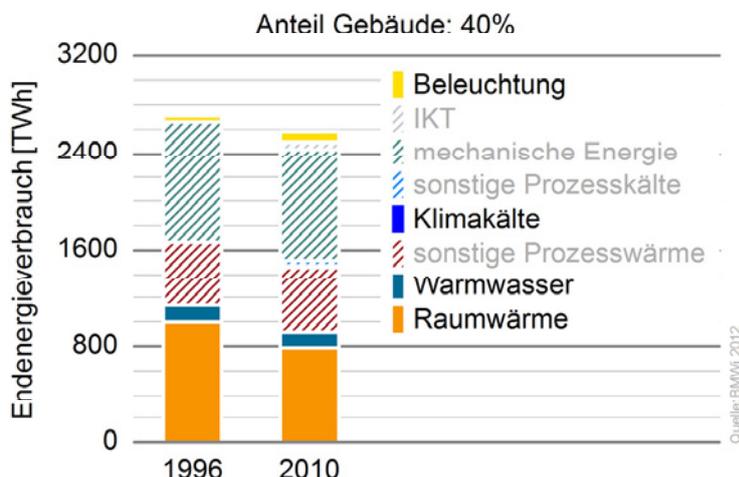


Abbildung 5: Struktur des Endenergieverbrauchs nach Anwendungsbereichen für die Jahre 1996 und 2010. Die Anwendungen außerhalb des Sektors „Gebäude“ sind schraffiert dargestellt [AGEB 2013d]

Der Endenergieverbrauch verteilt sich je nach betrachtetem Verbrauchssektor spezifisch auf die genannten Anwendungsbereiche. Während im Verkehr die anfallende Endenergie fast ausschließlich in mechanische Energie umgesetzt wird, ist im Industriesektor neben der mechanischen Energie vor allem auch die Prozesswärme entscheidend für den Endenergieverbrauch.

Über alle Sektoren summiert hat die mechanische Energie mit ca. 39 % immer noch den mengenmäßig größten Anteil am Endenergieverbrauch, gefolgt von der Raumwärme, die mit ca. 26 % den zweitgrößten Anteil am Endenergieverbrauch aufweist. Teilt man den Gesamtverbrauch an Raumwärme wieder auf die Sektoren auf, so wird deutlich, dass die Haushalte hier mit ca. 64 % den mit Abstand größten Anteil am Raumwärmeverbrauch verursachen. Damit ist allein der Raumwärmebedarf der privaten Haushalte im Jahr 2011 insgesamt für ca. 16,5 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich.

Die für Energieverbrauchsdaten typischerweise vorgenommene Aufteilung in die Sektoren Industrie, GHD, Haushalte und Verkehr ist zur Beurteilung des Energieverbrauchs im Gebäudebereich nur teilweise aussagekräftig, da neben dem zwar dominierenden Energieverbrauch in den Wohngebäuden (Sektor Haushalte) auch etwa 35 % des Energiebedarfs im Gebäudebereich auf Nichtwohngebäude entfallen. Diese sind in den Sektoren GHD und Industrie angesiedelt. Abbildung 6 zeigt den Endenergiebedarf im Gebäudebereich, aufgeschlüsselt nach Wohngebäuden (WG) und Nichtwohngebäuden (NWG).

Endenergieverbrauch nach Anwendung in Deutschland 2010

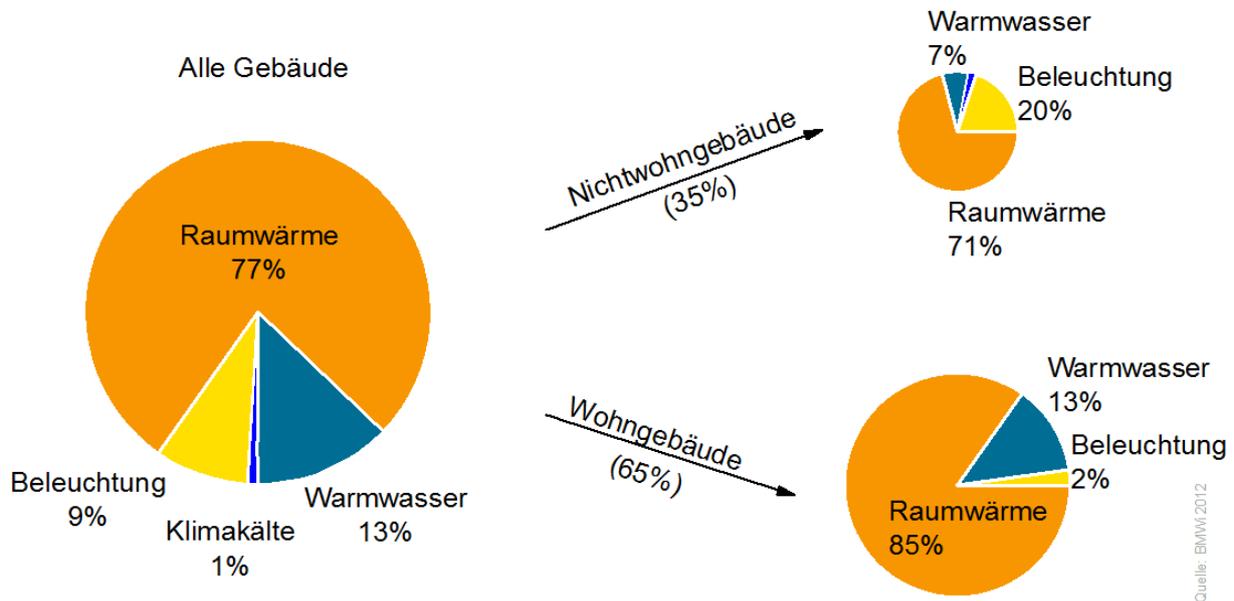


Abbildung 6: Endenergieverbrauch der Gebäude in Deutschland und Aufteilung auf Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude [BMWi 2012b]

Der Anteil an Endenergie für die Raumwärme ist bei den NWG mit ca. 71 % etwas geringer als bei den WG. Auffällig ist aber vor allem der große Anteil an Energie für Beleuchtung bei den NWG (20 %), während diese Position bei den WG (2 %) praktisch vernachlässigbar ist. Die Energie zur Raumheizung ist also bezüglich des Endenergiebedarfs einer der bestimmenden Faktoren und gleichzeitig ein Posten mit verhältnismäßig großem Einsparpotential.

Es existieren zahlreiche Studien über die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs im Gebäudebestand. Die in der Literatur prognostizierten Einsparpotentiale schwanken dabei zwischen moderaten Schätzungen von ca. 20 % bis hin zu 60 %, bezogen auf die erzielten Einsparungen in Zeiträumen zwischen etwa 1995 und 2050 u. a. [Eicke-Hennig 1997], [Buschmann 2003], [Bohenschäfer et al. 2005], [Prognos 2005]. Die Gründe für diese teils stark abweichenden Einschätzungen liegen wie bei allen Modellbildungen in der Definition der Randbedingungen. So können Effizienzsteigerungen im Bereich der Wärmeverluste durch die Gebäudehülle, Verbesserungen in der Anlagentechnik und Änderungen des Energiemix hin zu einem größeren Anteil an erneuerbaren Energien im Bereich der Raumwärmebereitstellung, durch Klimaveränderungen, verändertes Nutzerverhalten und den demographischen Wandel beeinflusst und gegebenenfalls kompensiert werden. Darüber hinaus hat die in Zukunft umsetzbare Sanierungsrate im Bestand großen Einfluss auf die Entwicklung des Raumwärmeenergiebedarfs.

3 Dämmstoffe im Hochbau

Bis zu 85 % der in einem Wohngebäude eingesetzten Energie wird für Raumwärme benötigt. Über eine nicht oder schlecht gedämmte Gebäudehülle geht ein Teil dieser Heizwärme wieder verloren. Durch den Einsatz von Dämmstoffen kann eine wesentliche Minderung dieser Verluste erreicht werden. Dämmstoffe schützen die Bauteile und auch die Behaglichkeit von Gebäuden wird erheblich verbessert. Durch fachgerechte Dämmung wird die Sicherheit vor Bauschäden erhöht und nicht verringert. Mit den heute verfügbaren Dämmstoffen stehen dabei Produkte für alle Detaillösungen zur Wärmedämmung zur Verfügung. Wird detailliert auf die Beiträge der einzelnen Bauteile (Wände, Decken, Dach, Fenster, Boden) zum Wärmeverlust der Gebäudehülle eingegangen, können einzelne Dämmmaßnahmen hinsichtlich ihres Einsparpotentials bewertet werden.

Dämmstoffe finden im Gebäude in vielen Bereichen Anwendung. Deren wichtigste Einsatzbereiche sind vorrangig die Wärmedämmung von Neubauten sowie die energetische Modernisierung von Bestandsgebäuden. Zusätzlich werden Dämmstoffe zur Verbesserung des Schallschutzes, als Trittschalldämmung, für raumakustische Maßnahmen und zur Dämmung technischer Anlagen verwendet.

Zur Wärmedämmung von Bauteilen wie z. B. Außenwänden und Dächern, stehen eine Vielzahl von Dämmstoffen und konstruktiven Möglichkeiten zur Verfügung. Dämmstoffe in Platten- oder Mattenform eignen sich gut zum Dämmen von Dächern, Wänden und Decken/Böden. Als Granulatschüttungen kommen Dämmstoffe vor allem bei Holzbalkendecken, bei bestimmten Kerndämmungen von Außenwänden sowie bei Dämmungen von Flachdächern zum Einsatz. Flockenförmige Dämmstoffe werden in größere Hohlräume von Dächern und Wänden eingeblasen.

Die dem Markt zur Verfügung stehenden vielfältigen Dämmstoffarten und –produkte erlauben dem Architekten, Planer oder Handwerker für das jeweilige Bauvorhaben individuell angepasste und wärmetechnisch optimale Lösungen anzubieten. In geprüfter Qualität produziert, nach den Regeln der Technik (Normen) angewendet und in fachgerechter Ausführung montiert, tragen diese Produkte nicht nur zur Energieeffizienzsteigerung im Neubaubereich und bei der Bestandssanierung bei, sondern helfen Bauschäden zu vermeiden und Behaglichkeit und Wohnkomfort zu verbessern.

3.1 Grundlagen: bauphysikalische und technische Eigenschaften

Folgende bauphysikalische und technische Kriterien sollten bei der Bewertung von Dämmstoffen je nach Einsatzgebiet berücksichtigt werden. Die Auflistung soll überblicksartig die wichtigsten Kennwerte erläutern. Vertiefende Erklärungen finden sich in der umfangreichen Fachliteratur.

Wärmeschutz

Aus energetischer Sicht ist eine möglichst hohe Wärmedämmung anzustreben. Dämmstoffe sind im Hinblick auf das Kriterium Wärmedämmung nach den geltenden harmonisierten europäischen Normen (DIN EN 13162 bis 13171) bewertbar. Die Umsetzung in nationale Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit obliegt den Mitgliedsstaaten. In Deutschland werden nach *DIN 4108-4* Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit (λ) für die Berechnung der U-Werte verwendet. Je niedriger λ ist, umso höher ist der erreichbare Wärmeschutz. Eine niedrige Wärmeleitfähigkeit ist insbesondere dann von Vorteil, wenn die Dicke der Dämmschicht aus baulichen Gründen begrenzt ist.

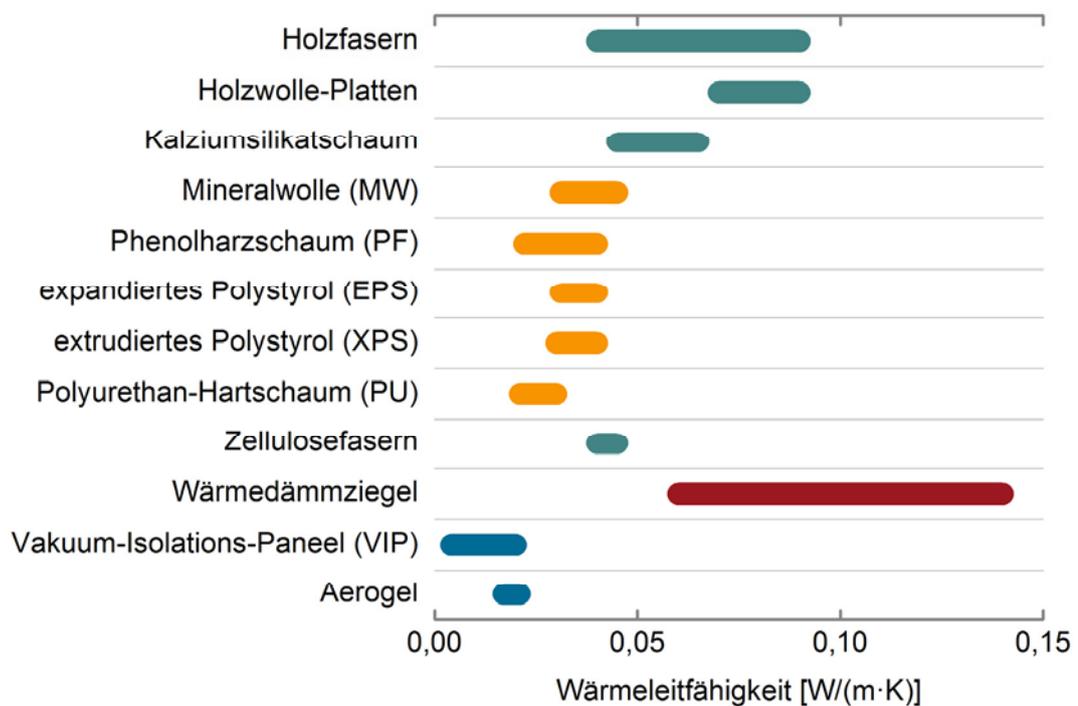


Abbildung 7: Bereich der Wärmeleitfähigkeiten von dämmenden Baustoffen

Wärmespeicherfähigkeit

Die Wärmespeicherfähigkeit von Dämmstoffen wird durch ihre Rohdichte und die spezifische Wärmespeicherkapazität bestimmt. Die Erwärmung der Räume eines Gebäudes im Sommer ist umso geringer, je speicherfähiger die Bauteile, die mit der Raumluft in Verbindung stehen, sind. Wirksam sind nur Bauteilschichten auf der Raumseite von Wärmedämmschichten. Bei Außenbauteilen wirken sich außen liegende Wärmedämmschichten und innen liegende wärmespeicherfähige Schichten günstig auf das Raumklima aus.

Diffusionswiderstand

Anforderungen an den Diffusionswiderstand eines Bauteils ergeben sich u. U. aus der Berechnung der anfallenden Tauwassermengen nach *DIN 4108-3*. Der Diffusionswiderstand kann anhand der Schichtdicke s [m] des Dämmstoffes und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-] nach *DIN 4108-4*, *Tab. 1* beurteilt werden. Je niedriger $\mu \cdot s$ ist, umso kleiner ist der Diffusionswiderstand. Das Produkt $\mu \cdot s$ kennzeichnet den Diffusionsdurchlasswiderstand einer Materialschicht der Dicke s und wird als diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D bezeichnet. Nach *DIN 4108-3* gelten für Bauteilschichten in Abhängigkeit des s_D -Wertes folgende Begriffe:

- diffusionsoffene Schicht: $s_D < 0,5$ m
- diffusionshemmende Schicht: $0,5 \text{ m} < s_D < 1500$ m
- diffusionsdichte Schicht: $s_D > 1500$ m

Im Weiteren gibt es auch diffusionshemmende Schichten mit variablem s_D -Wert, die ihren Diffusionswiderstand in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte von diffusionshemmend nach diffusionsoffen verändern.

Wasseraufnahmevermögen

Für Anwendungsbereiche, bei denen die Gefahr einer Durchfeuchtung besteht, sind Dämmstoffe mit einem geringen Wasseraufnahmevermögen von Vorteil. Generell ist zwischen der Aufnahme von flüssigem Wasser und der Aufnahme von Wasserdampf (Ausgleichsfeuchte) zu unterscheiden.

Der Feuchtegehalt des Materials wirkt sich aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Wasser, auch auf die Wärmeleitfähigkeit des Produkts aus, weshalb sich der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit auf den Ausgleichsfeuchtegehalt bei 23°C und 80 % r. F. (maximale Umgebungsfeuchte bei üblichem Betrieb) bezieht. Typische Ausgleichsfeuchtegehalte bei 23°C und 80 % r. F. sind in Abs. 4.2 der *DIN 4108-4* und in *DIN EN ISO 10456*, *Tab. 4* angegeben. Die Wasseraufnahme von flüssigem Wasser bei kurz- und langfristiger Einwirkung wird durch das (teilweise) Eintauchen von Prüfkörpern nach *EN 1609* oder *EN 12087* bestimmt.

Schalldämmung

Anforderungen an den nötigen Schutz gegen Luft- und Trittschallübertragung sind in der *DIN 4109* formuliert. Die Luftschallübertragung bezeichnet die Übertragung von Geräuschen über die Luft auf die raumbegrenzenden Bauteile und über diese die Weitergabe des Schalls an die Nachbarräume. Mit dem Begriff Trittschallübertragung wird die Weitergabe von durch das Begehen ausgelösten Schwingungen des Fußbodens auf die benachbarten Räume bezeichnet. Luft- und Trittschallübertragung sind bauteilbezogene Größen die durch die Baustoffe und die Bauart beein-

flusst werden. Ein hohes Luftschalldämmmaß R'_w bzw. ein niedriger Normtrittschallpegel $L'_{n,w}$ sind in diesem Zusammenhang positiv zu bewerten.

Einfluss auf den baustoffbezogenen Beitrag zum Schallschutz haben bei Dämmstoffen vor allem die Rohdichte, die dynamische Steifigkeit, der Schallabsorptionsgrad und der Strömungswiderstand. Je nach Bauart ist der Einfluss der genannten Materialcharakteristika unterschiedlich stark ausgeprägt und es können aus technologischen Gründen nicht alle Parameter unabhängig voneinander optimiert werden. Zur Minimierung der Trittschallübertragung sind eine niedrige dynamische Steifigkeit und ein hohes Flächengewicht des Fußbodenaufbaus vorteilhaft. Die Luftschallübertragung wird hingegen eher von der Rohdichte und dem Schallabsorptionsgrad beeinflusst. Letzterer wird durch die Konstruktion und bei Verwendung von faserförmigen Dämmstoffen vor allem auch durch deren Strömungswiderstand (mind. 5 – 10 kNs/m⁴) beeinflusst.

Brandverhalten

Das Verhalten eines Bauteils im Brandfall wird von der Baustoffklasse / Eurobrandklasse der verwendeten Baustoffe und der Bauart beeinflusst. Der Brandschutz eines Gebäudes hängt je nach Gebäudeklasse, Standort und Nutzung auch noch von weiteren Faktoren ab (konstruktiver Brandschutz, Löscheinrichtungen, etc.).

Das Brandverhalten von Baustoffen wird nach europäischen Normen (DIN EN 13501) oder deutschen Normen (DIN 4102) in verschiedene Klassen eingeteilt. Kriterien der dort festgelegten Prüfungen sind die Entzündlichkeit, die Flammenweiterleitung, die Temperaturentwicklung sowie die Rauchgasdichte und das brennende Abtropfen der Materialien.

Die Anforderungen an das Brandverhalten der in einer bestimmten Anwendung eingesetzten Baustoffe regeln die Bauordnungen der Länder. In diesem Zusammenhang sind so genannte bauaufsichtliche Benennungen eingeführt (Tabelle 1), die wiederum den europäischen und deutschen Baustoffklassen zugeordnet werden können. Der Einsatz von Dämmstoffen erfordert dabei mindestens eine Zuordnung zur Benennung „normal entflammbar“. Die Erfüllung höherer Anforderungen („schwer entflammbar“, „nichtbrennbar“) durch ein Produkt, trägt in jedem Fall auch zu einem erhöhten Brandschutz bei und ist je nach Bauart und Gebäudeklasse auch gesetzlich vorgeschrieben. So sind beispielsweise bei Fluchtwegen und in öffentlichen Gebäuden nicht brennbare Baustoffe (A1, A2) zu verwenden.

Bei den europäischen Brandklassen werden die Kurzbezeichnungen (A1 – F) teilweise zusammen mit den Kriterien zum brennenden Abtropfen (d0 – d2) und zur Rauchentwicklung (s1 – s3) angegeben (Tabelle 2). Im Bereich der schwer- / normal- und leicht entflammbaren Baustoffe sind die Klassen A2 – E, jeweils in Kombination mit entsprechenden Anforderungen an d und s definiert.

Tabelle 1: Zuordnung der in den deutschen Bauordnungen verwendeten bauaufsichtlichen Benennungen zu den europäischen Brandklassen nach EN 13501-1

Bauaufsichtliche Benennung	Zusatzanforderung		Baustoffklasse DIN EN 13501-1
	keine Rauchentwicklung	kein brennendes Abtropfen/-fallen	
nichtbrennbar ohne Anteile von brennbaren Baustoffen	x	x	A1
nichtbrennbar mit Anteilen von brennbaren Baustoffen	x	x	A2 - s1 d0
schwerentflammbar	x	x	B, C - s1 d0
		x	A2, B, C - s2 d0
		x	A2, B, C - s3 d0
	x		A2, B, C - s1 d1
	x		A2, B, C - s1 d2
			A2, B, C - s3 d2
normalentflammbar	x	x	D - s1 d0
		x	D - s2 d0
		x	D - s3 d0
	x		D - s1 d2
			D - s2 d2
			D - s3 d2
		x	E
			E - d2
leichtentflammbar			F

Tabelle 2: Kurzbezeichnung der Kriterien zur Rauchentwicklung und zum brennenden Abtropfen nach EN 13501-1

Kurzzeichen	Anforderung
s1	keine / kaum Rauchentwicklung
s2	begrenzte Rauchentwicklung
s3	unbeschränkte Rauchentwicklung
d0	kein Abtropfen / Abfallen
d1	begrenztes Abtropfen / Abfallen
d2	starkes Abtropfen / Abfallen

Die DIN 4102 unterscheidet zwischen nicht brennbaren (A1, A2) und brennbaren Baustoffen (B1 – B3) (Tabelle 3). Die Rauchgasdichte und das brennende Abtropfen

sind zwar Kriterien der zugeordneten Prüfungen, werden jedoch nicht explizit in der Kurzbezeichnung der Baustoffklasse ausgewiesen.

Die europäische Norm EN 13501 ist mit Einschränkungen bei der Brandklasse A1 (vgl. A1, DIN 4102) und der Brandklasse E (vgl. B2, DIN 4102) mit den Abstufungen der DIN 4102 vergleichbar. Eine direkte Zuordnung der europäischen Klassifizierungen zu den Baustoffklassen nach DIN 4102-1 ist aber nicht möglich. Zuordnungen zwischen den Kurzbezeichnungen der beiden Normen können allenfalls über einen Vergleich der zugeordneten bauaufsichtlichen Benennungen erfolgen.

Tabelle 3: Bauaufsichtliche Benennung und Zuordnung der Baustoffklassen nach DIN 4102-1

	Bauaufsichtliche Benennung	Baustoffklasse DIN 4102-1
Nichtbrennbare Baustoffe	nichtbrennbar ohne Anteile von brennbaren Baustoffen	A1
	nichtbrennbar mit Anteilen von brennbaren Baustoffen	A2
Brennbare Baustoffe	schwerentflammbar	B1
	normalentflammbar	B2
	leichtentflammbar	B3

Mechanische Eigenschaften

Aussagen zu Festigkeitskennwerten liefern Normen, Zulassungen und Typenkurzzeichen. Die mechanischen Eigenschaften sind wichtig für die langzeitige Funktionssicherheit der Wärmedämmung. Zum Beispiel die Scherfestigkeit für die Standsicherheit eines WDVS (Wärmedämmverbundsystem) und die Langzeitdruckfestigkeit (Kriechverhalten) für den Wärmedurchlasswiderstand bei druckbelasteten Anwendungen.

Elastizität

Elastizität sollten Dämmstoffe aufweisen, wenn sie im Steildach zwischen den Sparren oder in die Gefache von Holzkonstruktionen eingebaut werden. Ein elastischer Dämmstoff kann dort, sofern er im Übermaß eingebracht wurde, eventuelle Verformungen des Holzes ausgleichen und verhindert dadurch Hohlräume in der Dämmschicht. Elastizität ist keine genormte Eigenschaft.

Temperaturbeständigkeit

Eine ausreichende Temperaturbeständigkeit wird für Dämmstoffe unter Heizestrichen in *DIN 18560-2* (Schwimmende Estriche) gefordert, ist aber auch bei Fassaden und Flachdächern sehr wichtig, bei denen ebenfalls sehr hohe Temperaturen auftreten können. Bei den meisten Anwendungen im Bauwesen ist nur die obere Grenztemperatur von Bedeutung. Im normalen Betrieb sind hier an den Dämmstoffen Temperaturen von ca. 60 – 70°C zu erwarten. Unter ungünstigen Umständen (Südseite) können z. B. während dem Einbau bei noch unverputzten Rollladenkästen aus grauem EPS oder unter dunklen Abdichtungsbahnen bei Flachdächern kurzfristig auch Temperaturen bis zu ca. 80°C erreicht werden.

Primärenergieverbrauch

Der Primärenergieverbrauch (PEV) ist der Energieinhalt (Heizwert), der Brennstoffe, die für die Herstellung eines Dämmstoffes benötigt werden. Dabei ist auch der Energieverbrauch der Rohstoffgewinnung sowie von Transporten und energetischen Vorstufen zu berücksichtigen. Anhand des PEV kann man ermitteln, wie schnell sich Wärmeschutzmaßnahmen energetisch amortisieren. Hierzu wird der PEV den mit dem Dämmstoff erzielbaren Einsparungen an Heizenergie gegenübergestellt.

Häufig wird auch der Primärenergieinhalt (PEI) alternativ zum PEV verwendet. Der PEI beschreibt den zur Herstellung des Produktes notwendigen Energieverbrauch einschließlich des Energieinhalts der dafür benötigten Rohstoffe.

Der PEV/PEI sollte nicht überbewertet werden: Mit Dämmstoffen lässt sich immer mehr Energie einsparen, als bei ihrer Herstellung verbraucht wird (siehe auch Kapitel 5.2, Energetische Amortisation).

Langzeitverhalten

Das Langzeitverhalten beschreibt die physikalische, chemische und biologische Beständigkeit von Dämmstoffen. In den jeweiligen Produktnormen sind Prüfverfahren hinterlegt mit denen z. B. die Änderung der Wärmeleitfähigkeit über der Zeit und für bestimmte Anwendungen auch die Druckfestigkeit und das Kriechverhalten der Materialien nachgewiesen werden kann.

3.2 Überblick über Dämmstoffmaterialien und Dämmprodukte

Dämmstoffe lassen sich aufgrund Ihrer Rohstoffbasis in anorganische (mineralische) und organische Materialien unterteilen. Innerhalb dieser beiden Gruppen kann jeweils weiter zwischen Materialien aus natürlichen und synthetisch hergestellten

Rohstoffen unterschieden werden, wobei sich die Bezeichnungen „natürlich“ und „synthetisch“ auf das Grundmaterial, nicht aber auf zusätzliche Stoffe, die den Dämmstoffen beispielsweise als Stützfasern, Flammschutz- oder Imprägniermittel zugesetzt werden bezieht. Damit ein Dämmstoff als „natürlicher Dämmstoff“ bezeichnet werden kann, sollten synthetische Additive nicht mehr als 25 % des Materialanteils ausmachen [Pfundstein et al. 2007], wobei für die Vergabe bestimmter Qualitätszeichen (z.B. natureplus) in diesem Zusammenhang teilweise auch strengere Anforderungen einzuhalten sind.

Im Weiteren werden für ausgewählte Dämmstoffe wesentliche Informationen zu folgenden Themen dokumentiert:

- Herstellung und Rohstoffe
- Lieferformen und Verarbeitung
- Physikalische und technische Eigenschaften
- Anwendungsbereiche

Die Informationen zu den physikalischen und technischen Eigenschaften sowie den Anwendungsbereichen sind einheitlich in tabellarischer Form entsprechend Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	Rohdichte
λ	[W/(m·K)]	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit
μ	[-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
Brandklasse		Euroklasse (EN 13501-1) Baustoffklasse (DIN 4102-1)
c	[J/(kg·K)]	Spezifische Wärmekapazität
σ_{10}	[kPa]	Druckspannung bei 10% Stauchung
σ_{mt}	[kPa]	Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene
S'	[MN/m ³]	Dynamische Steifigkeit
Dim.Sta.	[%]	Dimensionsstabilität
Temp.best.	[°C]	Temperaturbeständigkeit gemäß Herstellerangabe
EPD		Umweltproduktdeklaration vorhanden?
Anwendung		Anwendungsbereiche nach DIN 4108-10
Produktnorm		Europäische Produktnorm vorhanden?

Da für Produkte verschiedener Hersteller, auch innerhalb einer Materialgruppe je nach Anwendung verschiedene Verwendbarkeitsnachweise existieren, wird im Rahmen der Darstellung der Eigenschaften auf eine detaillierte Aufzählung aller für eine Materialgruppe vorhandenen Verwendbarkeitsnachweise verzichtet. Allgemein ergibt sich die Verwendbarkeit für geregelte Bauprodukte (Bauregelliste) aus der

Übereinstimmung mit den dort bekannt gemachten technischen Regeln und für nicht geregelte Bauprodukte aus der Übereinstimmung mit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ), dem allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnis (abP) oder der Zustimmung im Einzelfall [BRL 2013]. Weiterführende Informationen finden sich auch in Kapitel 3.4 Anwendung im Hochbau.

Alle vorgestellten Materialien haben mehr oder weniger stark begrenzte Anwendungsbereiche und bieten auch innerhalb des jeweils möglichen Anwendungsbereichs, spezifische Vor- oder Nachteile. Bei der Auswahl eines Dämmstoffs für eine bestimmte Anwendung ist daher die Beratung durch einen Fachplaner (Architekt, Handwerker, etc.) sinnvoll. In jedem Fall sind die Herstellerhinweise bezüglich der Verarbeitung, der Anwendung und den eventuellen Randbedingungen der Nutzung zu beachten.

Die Reihenfolge der Vorstellung der Materialien erfolgt alphabetisch und spiegelt nicht deren Marktbedeutung oder Verbreitung wieder.

Aerogel

Herstellung und Rohstoffe

Bei der Herstellung von Aerogelen (auch Nanogel genannt), wird einem gelartigen Stoff unter so genannten überkritischen Bedingungen bei hohen Temperaturen und/oder hohem Druck der Flüssigkeitsanteil entzogen. Durch den Prozess behält das Gel sein Volumen bei, indem sich im Material stabilisierende Poren formen, welche als Ersatz der Flüssigkeit mit Gas gefüllt werden. Bei der Wahl eines geeigneten Feststoffs erhält man mit diesem Verfahren einen sehr leichten Stoff mit sehr großer Oberfläche (über 1000 m²/g) den man als nanoporösen Schwamm bezeichnen kann. Als Basismaterial zur Herstellung von Aerogelen werden häufig Silikat (Kieselsäure) oder auch Metalloxide (Aluminium, Chrom) und Kohlenstoffverbindungen verwendet. Die Wahl des Ausgangsstoffes hat einen großen Einfluss auf die späteren Eigenschaften des Produktes. Die Herstellung des Dämmstoffes ist durch den energieintensiven Herstellungsprozess und die geringen Produktionskapazitäten sehr teuer. Das Material ist nahezu transparent, transluzent und temperaturstabil. Das Aerogel weist im Verhältnis zu seinem Gewicht eine hohe Druckfestigkeit auf, ist aber vergleichsweise spröde.

Lieferformen und Verarbeitung

Der Stoff ist in Form von Granulat und Matten erhältlich. Die Bindung der Matten erfolgt durch aussteifende Faser- oder Vliesstrukturen. Vor allem aufgrund der mechanischen Flexibilität ergeben sich vielfältige Anwendungsgebiete im Bereich des Schall-, Wärme-, und Brandschutz. Matten sind üblicherweise bis zu 12 mm dick und werden gerollt auf der Baustelle angeliefert. Das Material kann u. a. zur Außendämmung von Fassaden (z. B. hinter vorgehängten Fassaden) eingesetzt werden. Inzwischen werden Dämmmatten auch zu bis zu 100 mm dicken Platten verklebt

und in Wärmedämmverbundsystemen eingesetzt. Einige Demonstrationsobjekte wurden bereits ausgeführt. Die geringe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht sehr geringe Materialstärken, was insbesondere für die Verwendung als Innendämmsystem Vorteile bietet.



Abbildung 8: Dämmstoff aus Aerogel

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	75 - 80 (lose) 130 - 350 (Matten)
λ^1	[W/(m·K)]	0,018 - 0,021 (lose) 0,014 - 0,017 (Matten)
μ	[-]	2 - 3 (lose) 11 (Matten)
Brandklasse		A1, E (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	1000 - 1500
σ_{10}	[kPa]	70 (Matten)
σ_{mt}	[kPa]	k. A.
S'	[MN/m ³]	k. A.
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	600
EPD		Nein
Anwendung		WZ
Produktnorm		Nein

¹⁾ Messwerte (noch keine Bemessungswerte vorhanden)

Baumwolle

Herstellung und Rohstoffe

Baumwolldämmstoffe werden aus den Samenhaaren des Baumwollstrauches hergestellt, bestehen also hauptsächlich aus Zellulose. Da unbehandelte Baumwolle nicht schimmelresistent ist muss diese vor Insektenbefall geschützt werden. Deshalb wird das Material bei der Herstellung mit Borsalzen imprägniert, was gleichzeitig auch den Brandschutz verbessert.



Quelle: <http://www.heiz-tipp.de/ratgeber-790-baumwolle.html>

Abbildung 9: Dämmstoff aus Baumwolle

Lieferformen und Verarbeitung

Baumwolle wird als Einblas-/Stopfware sowie in Form von Matten, Rollen und Dämmzöpfen angeboten. Aufgrund der geringen Steifigkeit des Materials findet es ausschließlich in nicht druckbelasteten Bereichen Anwendung.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	25 - 40 (lose) 20 - 60 (Matten)
λ	[W/(m·K)]	0,040
μ	[-]	1 - 2
Brandklasse		B1, B2 (DIN 4102-1)
c	[J/(kg·K)]	840 - 1300
σ_{10}	[kPa]	k. A.
σ_{mt}	[kPa]	k. A.
S'	[MN/m ³]	k. A.
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	100
EPD		Nein
Anwendung		DAD, DZ, DI, WAB, WH, WTR
Produktnorm		Nein

Flachs und Hanf

Herstellung und Rohstoffe

Bei den Flachs- und Hanfpflanzen liegen die Fasern in der äußeren Rindenschicht des Pflanzenstängels. Die Einzelfasern sind außerdem durch Kittsubstanzen zu Faserbündeln verbunden, die vor dem Faseraufschluss durch das so genannte Rösten gelöst werden müssen. Der Faseraufschluss erfolgt überwiegend mittels mechanischer Verfahren. Für Dämmstoffe werden so genannte Kurzfasern eingesetzt, die teilweise auch noch geringe Anteile von Schäben (verholzte Teile der Stängel) enthalten können. Aber auch die bei der Produktion anfallenden Schäben können, überwiegend als Schüttung, aber auch in Form von plattenförmigen Materialien, als Dämmstoff verwendet werden. Die Herstellung von mattenförmigen Dämmstoffen erfolgt durch Vliesbildung und mechanische Verfilzung der Fasern. Teilweise werden auch naturnahe Bindemittel (z. B. Kartoffelstärke) oder synthetische Stützfasern (BiCo-Fasern: Kern aus PES/PP, Mantel aus PP/PE) verwendet; insbesondere um elastische Vliese herzustellen. Der Brandschutz kann bei beiden Fasertypen durch Beimengungen von Borsalz oder Soda verbessert werden.



Abbildung 10: Dämmstoff aus Hanffasern

Lieferformen und Verarbeitung

Hanf-/Flachsdämmstoffe sind lieferbar als Stopfwole, Matten und Rollen zur Trittschalldämmung. Hanfdämmstoffe werden hauptsächlich als Rollen- oder Mattenware in Form von Dämmvliesen angeboten. Daneben sind ungebundene Hanffasern als Einblasdämmung oder Stopfhanf erhältlich sowie Hanfgarn zur Fugenabdichtung. Die Schäben lassen sich direkt für Dämm- und Ausgleichschüttungen verwenden. Der Zuschnitt der gebundenen Produkte ist mit einer Band- oder Kreissäge möglich.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	40 - 50 (Stopfwole) 20 - 40 (Matten) 150 (Schäben)
λ	[W/(m·K)]	0,040 (Fasern) - 0,080 (Schäben)
μ	[-]	1 - 2
Brandklasse		B2 (DIN 4102-1) E (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	1300 - 2200
σ_{10}	[kPa]	k. A.
σ_{mt}	[kPa]	k. A.
S'	[MN/m ³]	20 – 60
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	100
EPD		Nein
Anwendung		DAD, DZ, DI, DES, WAB, WH, WI, WTR
Produktnorm		Nein

Holzfaser (WF)

Herstellung und Rohstoffe

Als Rohstoff werden Schwachholz und Koppelprodukte der Säge- und Hobelwerksindustrie verwendet. Aufgrund der längeren Fasern kommt überwiegend Nadelholz zum Einsatz. Bei der Herstellung von Holzfaserdämmplatten kann grundsätzlich das Nass- und Trockenverfahren unterschieden werden. Beiden Varianten ist zunächst der Faseraufschluss gemein. Hierbei wird der Rohstoff, falls nicht ohnehin als Hackschnitzel vorliegend, zunächst mit geeigneten Hackern zerkleinert. Die Hackschnitzel werden anschließend in einem Kochprozess erweicht und auf großen Mühlen (so genannten Refinern) aufgeschlossen. Die Holzfasern liegen nun in wässriger Dispersion (pulp) vor.

Im Trockenprozess wird das Material anschließend mit Klebstoff (MUF, PMDI) versetzt, getrocknet und anschließend zu Matten geformt und verpresst (feste Platten) oder mit synthetischen Stützfasern aus Polyolefin vermischt, abgestreut und mittels Heißluft erwärmt (flexible Matten). Beim Nassverfahren werden dem Faserbrei geringe Mengen von Additiven (Hydrophobierungsmittel, etc.) beigegeben und die Mattenbildung erfolgt im wässrigen Medium über ein Langsieb mit anschließender Trocknung. Als Brandschutzmittel kommen Borverbindungen oder Ammoniumphosphat zum Einsatz.



Abbildung 11: Dämmstoff aus Holzfaser

Lieferformen und Verarbeitung

Holzfaserdämmstoffe sind in Form von Matten, Stopfwole, Platten und Einblasdämmung lieferbar. Beim Nassverfahren ist die Dicke produktionsbedingt auf ca. 30 mm begrenzt. Größere Produktdicken werden durch Streifenverklebung (z. B. mit PVAC) mehrerer Platten übereinander realisiert. Beim Trockenverfahren sind Produktdicken bis zu 200 mm in einem Produktionsschritt möglich. Lose Holzfasern für Einblasdämmung gibt es in unterschiedlichen Gebinden.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	30 - 60 (lose) 50 - 270 (Matten/Platten)
λ	[W/(m·K)]	0,038 - 0,090
μ	[-]	1 - 2 (lose) 5 - 10 (Matten/Platten)
Brandklasse		B1, B2 (DIN 4102-1) E (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	1600 - 2100
σ_{10}	[kPa]	20 - 200
σ_{mt}	[kPa]	10 - 60
S'	[MN/m ³]	5 - 40
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	110
EPD		Vorhanden
Anwendung		DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAP, WZ, WH, WI, WTR
Produktnorm		DIN EN 13171 (für Gebäude)

Holzwole – Platten (WW)/Holzwole-Mehrschichtplatten (WW-C)

Herstellung und Rohstoffe

Holzwole-Leichtbauplatten bestehen aus langfaseriger Holzwole von Nadelhölzern. Die Holzwole wird aus runden Stammabschnitten mittels spezieller Maschinen längs zur Stammachse gewonnen, mit mineralischen Bindemitteln (Zement) vermischt und in Formen kalt oder mit Temperatur ausgehärtet. Um die Wärmeleitfähigkeit zu verringern, werden häufig auch so genannte Holzwole-Mehrschichtplatten (ML) hergestellt. Diese enthalten einen Kern aus expandiertem Polystyrol (EPS) oder Mineralwole (MW).



Abbildung 12: Holzwole-Leichtbauplatte (HWL)

Lieferformen und Verarbeitung

Die Platten sind handelsüblich in Dicken zwischen 15 und 150 mm erhältlich. Je nach Art und Einsatzort werden die Platten angeklebt, anbetoniert oder mechanisch befestigt. Bei der mechanischen Befestigung mit Hilfe von Nägeln, Schrauben oder Dübeln ist ein entsprechender Wärmebrückeneffekt zu berücksichtigen. Bei Anwendung im Außenbereich ist das Material vor Durchfeuchtung zu schützen. Die Leichtbauplatten können auf unterschiedlichste Art beschichtet werden (Putze, Gipskartonplatten, Fliesen, etc.) oder offen angewendet werden (v. a. bei Schallschutzanwendungen).

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	350 - 600 (WW) 60 - 300 (EPS-Kern) 180 - 300 (MW-Kern)
λ	[W/(m·K)]	0,080 - 0,11 (WW) je nach Kern niedriger
μ	[-]	2 - 5 (WW)
Brandklasse		B1, B2 (DIN 4102-1) B, A2-s1, d0 (Euroklasse, WW/MW) E (Euroklasse, mit EPS)
c	[J/(kg·K)]	2100
σ_{10}	[kPa]	150 - 200 (WW) je nach Kern niedriger
σ_{mt}	[kPa]	>7,5
S'	[MN/m ³]	>150 (MW-Kern)
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	180 (WW und MW-Kern) 100 (EPS-Kern)
EPD		Vorhanden
Anwendung		DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAA, WZ, WTR, WAP, WH, WI
Produktnorm		DIN EN 13168 (für Gebäude)

Kalziumsilikat

Herstellung und Rohstoffe

Kalziumsilikatplatten werden aus Kalziumoxid, Siliziumdioxid, Flugasche und geringen Anteilen an Zellstoff hergestellt. Mit Wasser aufgeschlämmt und vermischt entsteht Kalziumsilikathydrat. Der Zellstoff dient zur Verbesserung der Flexibilität und Kantenstabilität. Das Material wird mittels Wasserdampf ausgehärtet.

Lieferformen und Verarbeitung

Der Stoff ist als Schüttung und Platte erhältlich. Im Handel werden die Platten üblicherweise in Dicken zwischen 20 und 120 mm vertrieben. Bei der Anwendung als Innendämmung ist das Anbringen von Dampfsperren oder Dampfbremsen aufgrund der Fähigkeit des Materials Feuchte zu puffern und bei entsprechenden Bedingungen wieder an die Raumluft abzugeben, nicht notwendig.

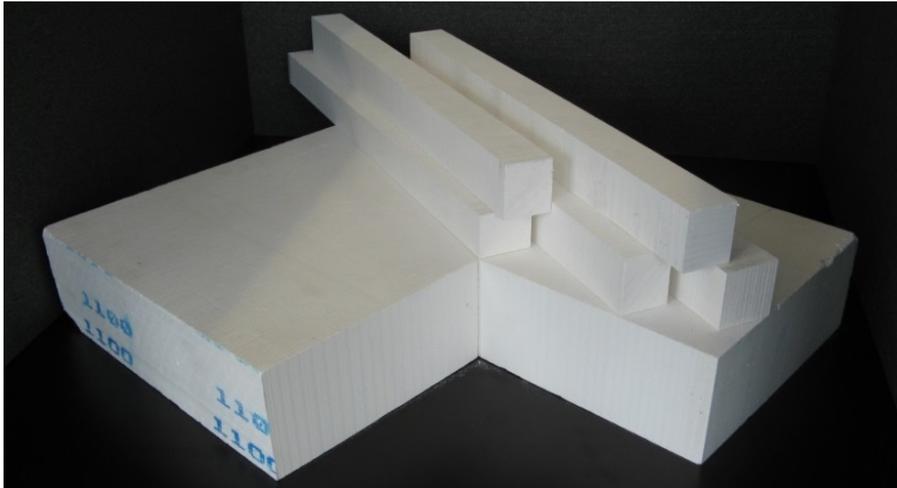


Abbildung 13: Kalziumsilikat Platte

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	115 - 300
λ	[W/(m·K)]	0,045 - 0,10
μ	[-]	3 - 20
Brandklasse		A1, A2 (DIN 4102-1) A1; A2-s1, d0 (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	850 - 1000
σ_{10}	[kPa]	500 - 1500
σ_{mt}	[kPa]	>500
S'	[MN/m ³]	k. A.
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	k.A.
EPD		Vorhanden
Anwendung		DAD, DAA, DEO, DI, WAB, WAP, WI
Produktnorm		Nein

Kork

Herstellung und Rohstoffe

Als Rohstoff dient die Rinde der Korkeiche, teils auch recycelter Kork. In einem Mahlvorgang wird der Kork zunächst zu einem Granulat von 2 – 5 mm Körnung gemahlen und anschließend im Autoklaven mittels Heißdampf bei ca. 350°C zu Korkschorot expandiert. Zur Herstellung von Platten (so genannter Backkork) wird das Granulat während des Expandierens zu Blöcken gepresst, wobei dabei freigesetzte

Harze als Bindemittel fungieren. Zur Imprägnierung wird Bitumen, gelegentlich auch Formaldehydharz verwendet.



Abbildung 14: Kork

Lieferformen und Verarbeitung

Dämmstoffe aus Kork werden als Plattenware (Backkork) mit üblichen Dicken von 10 – 320 mm sowie als Schüttmaterial (Korkschröt) angeboten. Plattenware lässt sich schneiden bzw. sägen. Ein passgenaues Arbeiten ist jedoch wegen der Elastizität des Materials schwierig. Wird Korkschröt in Hohlräume eingebracht, besteht die Gefahr nachträglicher Setzungen. Temperaturen über 120°C sollten langfristig vermieden werden, da sonst ein Nachblähen der Korkzellen möglich ist.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	65 - 150 (lose) 100 - 220 (Platten)
λ	[W/(m·K)]	0,040 - 0,060
μ	[-]	2 - 8 (lose) 5 - 10 (Platten)
Brandklasse		B2 (DIN 4102-1)
c	[J/(kg·K)]	1700 - 2100
σ_{10}	[kPa]	100 - 200
σ_{mt}	[kPa]	40 - 60
S'	[MN/m ³]	1 - 1,3
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	110 - 120
EPD		Nein
Anwendung		DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAP, WZ, WH, WI, WTR
Produktnorm		DIN EN 13170 (für Gebäude)

Mineralschaum

Herstellung und Rohstoffe

Dämmstoffe aus Mineralschaum bestehen aus gemahlenem Quarzsand (25 - 40 M.-%), Portlandzement (25 – 45 M.-%), Kalkhydrat (10 bis 25 M.-%) und Wasser. Die Herstellung erfolgt ähnlich dem Porenbeton. Die Grundstoffe werden mit einem geeigneten Treibmittel (z. B. Natronlauge und Salzsäure) vermischt und in große Formen gegossen. Das aufgeschäumte Material wird unter Temperatur (Dampf) ausgehärtet und zu Blöcken/Platten geschnitten.

Lieferformen und Verarbeitung

Mineralschaumstoff ist in Form von Platten in handelsüblichen Dicken von bis zu 200 mm erhältlich. Typischerweise werden die Platten auf dem möglichst ebenen Untergrund verklebt oder je nach Beanspruchung mittels mechanischer Befestigungsmittel verankert.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	20 - 30 (lose) 115 - 130 (Platten)
λ	[W/(m·K)]	0,040 - 0,045
μ	[-]	3 - 6
Brandklasse		A1 (DIN 4102-1) A1 (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	1300
σ_{10}	[kPa]	>350
σ_{mt}	[kPa]	>70
S'	[MN/m ³]	<125
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	k.A.
EPD		Vorhanden
Anwendung		DI, DEO, DAD, DAA, WAP, WI, WAB, WZ
Produktnorm		Nein



Abbildung 15: Mineralschaum

Mineralwolle (MW)

Herstellung und Rohstoffe

Mineralwolle ist eine übergeordnete Bezeichnung für die anorganischen Faserdämmstoffe aus Steinwolle oder Glaswolle. Seit einigen Jahren ist auch so ge-

nannte Hybridwolle erhältlich, welche die positiven Eigenschaften der Glas- und Steinwolle vereint. Unterschiede bestehen in den Rohstoffen sowie den Eigenschaften der Fasern und der nichtfaserigen Bestandteile. Die wesentlichen Rohstoffe für die Steinwolle-Herstellung sind Dolomit, Scherben und Sand (jeweils ca. 20-30 Masse-%) sowie Eisenoxid und Zement (jeweils ca. 5-15 Masse-%). Zur Herstellung von Glaswolle werden Scherben (50-70 Masse-%), Sand (10-20 Masse-%), Soda (5-15 Masse-%) und Borax (5-10 Masse-%) eingesetzt. Die Rohstoffe werden in Schmelzwannen geschmolzen und mit Hilfe eines so genannten Düsen Schleuderverfahrens zerfasert. Zur Bindung der Fasern wird unmittelbar nach dem Zerfaserungsaggregat Phenol-Formaldehydharz auf die Fasern gesprüht. Die mit Bindemittel beaufschlagten Fasern werden zur Vliesbildung auf einem Transportband abgelegt. In Tunnelöfen wird das Bindemittel mittels Heißluft ausgehärtet.

Glaswolle hat bei gleicher Rohdichte tendenziell eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit. Im Folgenden wird allgemein auf Mineralwolle eingegangen. Mineralwolle besteht aus künstlichen, glasigen (Silikat-) Fasern.

Lieferformen und Verarbeitung

Je nach Lieferform sind die Platten, Rollen oder Matten in handelsüblichen Dicken zwischen 12 und 240 mm erhältlich. Das Material wird kaschiert und unkaschiert angeboten. Ebenfalls gibt es lose Mineralwollefasern, die als Stopfwolle verwendet werden können. Hautkontakt kann zu vorübergehenden, kurzzeitigen Einwirkungen auf die Haut führen (Juckreiz). Eine entsprechende Arbeitskleidung kann sinnvoll sein. Alle namhaften Hersteller haben daher Piktogramme auf den Verpackungen, die dazu entsprechende Empfehlungen geben.

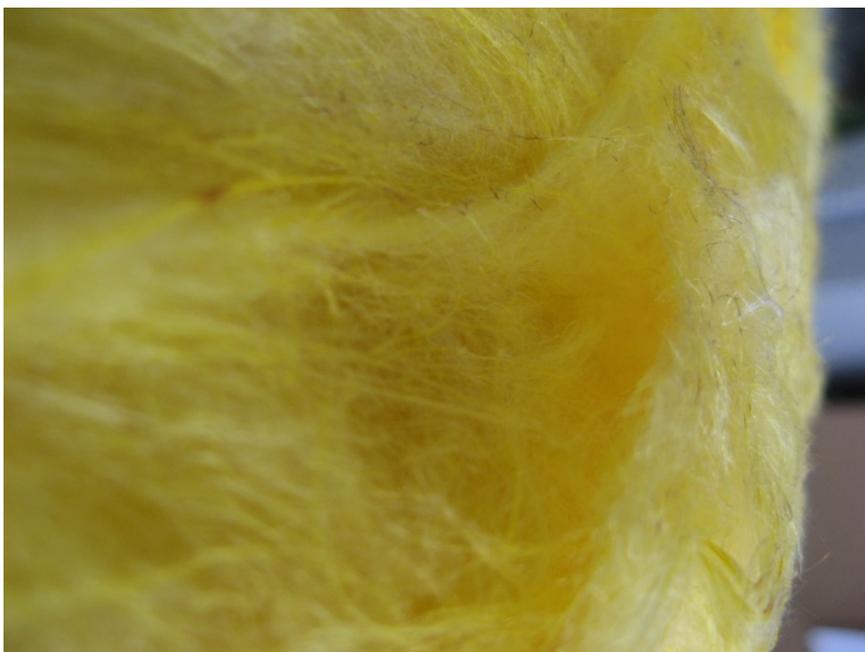


Abbildung 16: Dämmstoff aus Mineralwolle

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	15 - 150 (Glaswolle) 30 - 220 (Steinwolle)
λ	[W/(m·K)]	0,032 - 0,048
μ	[-]	1 - 2
Brandklasse		A1, A2, B1 (DIN 4102-1) A1, A2-s1, d0
c	[J/(kg·K)]	840 - 1000 (Glaswolle) 600 - 840 (Steinwolle)
σ_{10}	[kPa]	0 - 80
σ_{mt}	[kPa]	1 - 80
S'	[MN/m ³]	7 - 35
Dim.Sta.	[%]	< 1
Temp.best.	[°C]	100 - 200 (mit Bindemittel) 500 (ohne Bindem., Glasw.) 600 - 750 (ohne Bindem., Steinw.)
EPD		Vorhanden
Anwendung		DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAP, WZ, WH, WI, WTR, WTH
Produktnorm		DIN EN 13162 (für Gebäude) DIN EN 14303 (für die technische Gebäudeausrüstung)

Phenolharz (PF)

Herstellung und Rohstoffe

Die eingesetzten Rohstoffe sind Phenolharz, Härter und Treibmittel (hauptsächlich Mischungen aus Pentan und Chlorpropan sowie Pentan und Isobutan). Die Herstellung des Phenolharzhartschaums erfolgt vorzugsweise im kontinuierlichen Verfahren als Bandware geschäumt. Zur Fixierung wird der zunächst viskose Schaum mit Glasvliesen kaschiert. Nach dem Aushärten und Trocknen können die Kanten profiliert werden.

Lieferformen und Verarbeitung

Der Dämmstoff ist in Form von Platten in handelsüblichen Dicken von 20 bis 200 mm erhältlich. Wegen ihrer Sprödigkeit ist das Einpassen in Gefache aufwändig. Das Material muss trocken gelagert und gegen Witterungseinflüsse geschützt werden. Die Phenolharzhartschaumplatten sind aufgrund ihres eher spröden Materialverhaltens auf begehbaren Flächen beispielsweise durch Bohlen und Platten zu schützen.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	35 - 45
λ	[W/(m·K)]	0,021 - 0,024
μ	[-]	55
Brandklasse		B2 (DIN 4102-1) C-s1 / s2, d0 (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	1500
σ_{10}	[kPa]	120
σ_{mt}	[kPa]	>60
S'	[MN/m ³]	k. A.
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	150
EPD		Nein
Anwendung		DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WI
Produktnorm		DIN EN 13166 (für Gebäude) DIN EN 14314 (für die technische Gebäudeausrüstung)

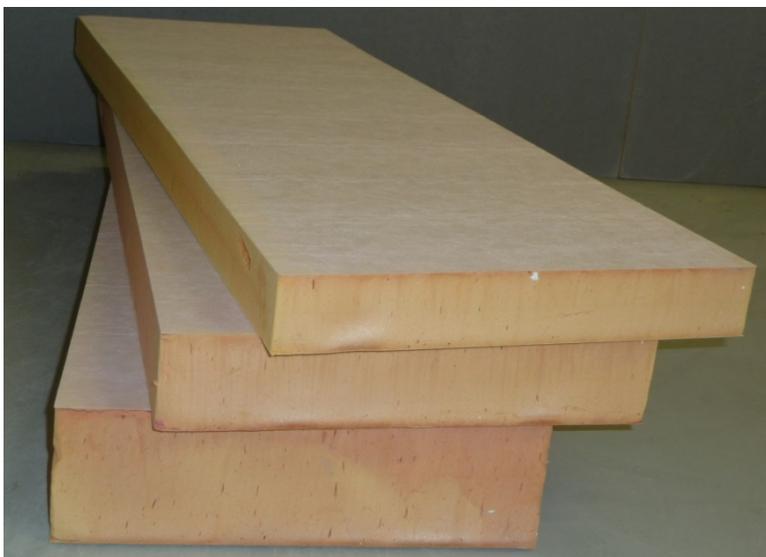


Abbildung 17: Dämmstoff aus Phenolharzschaum

Polystyrol, expandiert (EPS)

Herstellung und Rohstoffe

Polystyrol (PS) gehört zu den thermoplastischen Kunststoffen. Expandiertes Polystyrol, auch bekannt unter dem Namen „Styropor“, besteht aus Polystyrol, Treibmit-

tel (Pentan) und Additiven zum Flammenschutz (aktuell noch: HBCD, in Zukunft ersetzt durch: Polymer-FR). Das durch die Polymerisation entstehende Granulat wird expandiert. In diesem Verfahren bläht das Granulat durch die Behandlung mit Wasserdampf auf das 20- bis 50-fache Volumen auf. Nach dem Abkühlen wird das Granulat ein zweites Mal mit Wasserdampf aufgeschäumt, hier verschweißen die Perlen zu einem homogenen Material. Der hergestellte Dämmstoff wird je nach Rohstofftyp, Rohdichte und Dicke nach der Herstellung noch für eine bestimmte Zeit gelagert, um nachträgliche Schrumpfungen am Einbauort auszuschließen.

Graues EPS ist eine neuere Produktvariante, welche sich bereits optisch durch eine von Graphit verursachte Graufärbung unterscheidet. Die im Material eingelagerten Graphitpartikel reflektieren und absorbieren einen Teil der Wärmeübertragung durch Strahlung im Dämmstoff. Dadurch wird die Wärmeleitfähigkeit bei gleicher Rohdichte um etwa 20 % verringert.



Abbildung 18: Dämmstoffplatten aus expandiertem Polystyrol (EPS)

Lieferformen und Verarbeitung

Der Dämmstoff ist handelsüblich in Form von Platten, Formteilen oder Granulat erhältlich. Es sind Dicken zwischen 10 mm und mehr als 300 mm möglich. Verarbeitung und Einbau sind durch Schneiden, Sägen und Bohren möglich. Speziell „elastifizierte“ Platten werden auch oft als Trittschalldämmung unter schwimmenden Estrichen oder im Trockenbau eingesetzt.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	15 - 30
λ	[W/(m·K)]	0,031 - 0,045
μ	[-]	20 - 100
Brandklasse		B1, B2 (DIN EN 4102-1) E (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	1210 - 1500
σ_{10}	[kPa]	0 - 200
σ_{mt}	[kPa]	50 - 100
S'	[MN/m ³]	5 - 50
Dim.Sta.	[%]	< 0,2
Temp.best.	[°C]	80 - 85
EPD		Vorhanden
Anwendung		DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAA, WAP, WZ, WI, PW, PB
Produktnorm		DIN EN 13163 (für Gebäude) DIN EN 14309 (für die technische Gebäudeausrüstung)

Polystyrol, extrudiert (XPS)

Herstellung und Rohstoffe

Extrudiertes Polystyrol wird aus Polystyrol und einem Treibmittel (zumeist CO₂ in Verbindung mit Additiven z. B. Isobutan), Farbstoffen und Flammschutzmitteln (aktuell noch: HBCD, in Zukunft ersetzt durch: Polymer-FR) hergestellt. Das milchig-opake Polystyrolgranulat wird bei ca. 200°C in einem Extruder aufgeschmolzen und mit den Zusatzstoffen vermengt. Die über eine Breitschlitzdüse kontinuierlich auf ein Fließband aufgetragene Schmelze, bläht sich stark auf. Sie bekommt eine homogene und geschlossenzellige Struktur. Ist der Schaumstoff abgekühlt, kann er zugeschnitten und die Kanten profiliert werden. Extrudiertes Polystyrol wird oft herstellereinspezifisch in verschiedenen Farben produziert.

Lieferformen und Verarbeitung

Der Dämmstoff ist in Form von Platten erhältlich. Diese werden in handelsüblichen Dicken von 20 - 200 mm hergestellt. Größere Dicken sind bis zu 320 mm als verklebte Schichten erhältlich. Der Einbau und die Verarbeitung sind im Allgemeinen unkompliziert und erfordern keine besonderen Sicherheitsmaßnahmen. Die Platten lassen sich gut mit den üblichen Werkzeugen schneiden, fräsen und sägen. Zum Anbetonieren, Verputzen und Verkleben sind vor allem Platten mit rauen oder profilierten Oberflächen geeignet. Wie EPS, versprödet auch XPS bei längerer UV-

Belastung und sollte ebenfalls nicht mit Teerprodukten, Kraftstoffen, Heißkleber oder Klebern die Lösungsmittel enthalten in Kontakt kommen.

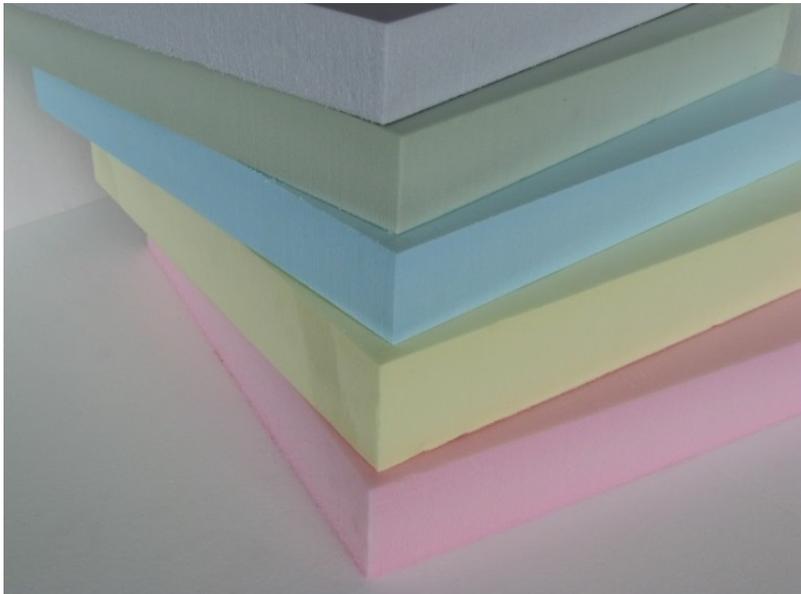


Abbildung 19: Dämmstoffplatten aus extrudiertem Polystyrol (XPS)

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	25 - 50
λ	[W/(m·K)]	0,028 - 0,042
μ	[-]	80 - 200
Brandklasse		B1, B2 (DIN 4102-1) E (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	1300 - 1700
σ_{10}	[kPa]	150 - 700
σ_{mt}	[kPa]	100 - 400
S'	[MN/m ³]	>130
Dim.Sta.	%	< 5
Temp.best.	[°C]	85
EPD		Vorhanden
Anwendung		DAD, DAA, DUK, DI, DEO, WAB, WAP, WZ, WI, PW, PB
Produktnorm		DIN EN 13164 (für Gebäude) DIN EN 14307 (für die technische Gebäudeausrüstung)

Polyurethan (PU)

Herstellung und Rohstoffe

Polyurethan gehört zu den duroplastischen Kunststoffen. Dämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum entstehen durch chemische Reaktion von MDI (ca. 55- 65 %) und Polyol (ca. 20 – 30 %) unter Zusatz von niedrig siedenden Treibmitteln (ca. 4 – 5 %). Dämmplatten mit flexiblen Deckschichten werden ausschließlich mit dem Kohlenwasserstoff Pentan aufgeschäumt. Aufgrund der Geschlossenzelligkeit verbleibt das Treibmittel in den Schaumzellen. Als Hilfsstoffe werden Wasser, Schaumstabilisatoren und phosphorhaltige Flammschutzmittel zugesetzt. MDI und Polyole werden über mehrere Stufen in geschlossenen Herstellungsanlagen synthetisiert.

In der PU-Hartschaumherstellung können zwei Verfahren unterschieden werden, das Doppelbandverfahren und das Blockschaumverfahren. Beim Doppelbandverfahren wird ein 2-Komponentengemisch über Düsen auf eine Doppelbandanlage verteilt. Es schäumt dort auf und wird entsprechend der Anwendung mit einer oberen und unteren Deckschicht aus Vliesen, Bitumenbahnen, Metall- oder Verbundfolien verklebt. Bei dem Blockschaumverfahren strömt das Reaktionsgemisch aus einem Mischkopf in eine Blockform. Nach dem Aufschäumen und Ablagern erfolgt der Zuschnitt in den gewünschten Blöcken, Formteilen oder Platten.



Abbildung 20: Dämmstoff aus Polyurethan (PU)

Lieferformen und Verarbeitung

Der Dämmstoff ist in Form von Platten und Formteilen erhältlich. Handelsübliche Platten können bis zu 300 mm dick gefertigt werden. Als Sonderanfertigung können

auch sehr große Abmessungen geliefert werden. Die Verarbeitung erfolgt durch Schneiden, Sägen, Fräsen oder Bohren.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	30 - 100
λ	[W/(m·K)]	0,023 - 0,029
μ	[-]	40 - 200
Brandklasse		B1, B2 (DIN 4102-1) E, D-s2-d0, C-s3-d0 (Euroklassen)
c	[J/(kg·K)]	1400 - 1500
σ_{10}	[kPa]	100 - 900
σ_{mt}	[kPa]	40 - 200 (Rohdichte 30 – 40 kg/m ³)
S'	[MN/m ³]	k. A.
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	90
EPD		Vorhanden
Anwendung		DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WH, WI, PW, PB
Produktnorm		DIN EN 13165 (für Gebäude) DIN EN 14308 (für die technische Gebäudeausrüstung)

Pyrogene Kieselsäure

Herstellung und Rohstoffe

Als pyrogene Kieselsäure werden SiO₂-Pulver bezeichnet, die mittels Flammenhydrolyse aus Silanen oder SiCl₄ hergestellt werden. Das Material ist ein sehr feines Pulver mit Korngrößen zwischen 5 – 50 nm. Aus flockigen Agglomeraten können unter Beimischung von Mikro(glas-)fasern, die zur Stützung dienen, Dämmplatten mit sehr niedriger Wärmeleitfähigkeit hergestellt werden.

Lieferformen und Verarbeitung

Pyrogene Kieselsäure wird in Form von Platten mit Dicken zwischen 0,3 und 5 cm vertrieben. Durch die verwendeten Verstärkungsfasern sind die Platten stabil und können verarbeitet werden. Der Dämmstoff kommt vor allem dann zur Anwendung, wenn eine besonders hohe Wärmedämmwirkung bei sehr hohen Anwendungstemperaturen gefordert ist. Besondere Anwendung findet pyrogene Kieselsäure als Stützkernmaterial in Vakuumdämmelementen.



Abbildung 21: Dämmstoff aus pyrogener Kieselsäure

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	120 - 350
λ	[W/(m·K)]	0,018 - 0,021
μ	[-]	6
Brandklasse		A1 (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	800 - 1050
σ_{10}	[kPa]	92
σ_{mt}	[kPa]	k. A.
S'	[MN/m ³]	k. A.
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	950 - 1050
EPD		Nein
Anwendung		DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WH, WI
Produktnorm		Nein

Schafwolle

Herstellung und Rohstoffe

Das Rohmaterial ist die Schurwolle von Schafen. Das Material wird gewaschen, entfettet und der pH-Wert neutralisiert. Nach einer abschließenden Reinigung können durch Nadelverfilzung Vliese hergestellt werden, die zu mattenförmigen Dämmstoff-

fen weiterverarbeitet werden. Teilweise werden zur Stabilisierung der Struktur Stützfasern aus Polyester oder Maisstärke beigegeben. Zum Schutz vor Motten wurden bis vor kurzem Borverbindungen eingesetzt. Inzwischen wird das Wollschutzmittel Thorlan IW mit dem Wirkstoff Kaliumfluorotitanat IV verwendet. Die Substanz ist nach dem Aufbringen chemisch an die Wollfaser gebunden. Alternativ werden auch Harnstoffderivate oder Enzyme verwendet.



Abbildung 22: Schafwolle

Lieferformen und Verarbeitung

Das Material wird gebunden in Form von flexiblen Matten und lose als Stopfwolle oder in Form von Dichtungszöpfen verkauft. Die Dicke der Matten beträgt üblicherweise etwa 3 – 10 cm, bei Bahnenbreiten von 60 – 90 cm. Der Zuschnitt kann von Hand mittels Dämmstoffmessern oder Scheren erfolgen.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	25 - 30
λ	[W/(m·K)]	0,040 - 0,045
μ	[-]	1 - 2
Brandklasse		B2 (DIN 4102-1) E (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	1700
σ_{10}	[kPa]	k. A.
σ_{mt}	[kPa]	k. A.
S'	[MN/m ³]	50 - 60
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	130 - 150
EPD		Nein
Anwendung		DZ, DI, WAB, WH, WI, WTR
Produktnorm		Nein

Schaumglas (CG)

Herstellung und Rohstoffe

Schaumglas wird im Wesentlichen aus denselben Rohstoffen hergestellt, die auch zur Glasherstellung benötigt werden. Heute wird auch zu einem großen Teil recyceltes Altglas eingesetzt. Das als Grundstoff eingesetzte Glas besteht zum größten Teil aus Quarzsand (41 M.-%). Weitere Rohstoffe sind Kalifeldspat (22 M.-%), Natriumkarbonat und Kalziumkarbonat mit jeweils 17 M.-% sowie Eisenoxid (3 M.-%). Zusammen werden sie bei etwa 1100°C zu Rohglas geschmolzen und anschließend abgekühlt. Zu dem verpulverten Rohglas werden außer geringen Mengen Kohlenstoffpulver (0,15 M.-%) keine weiteren Treib- oder Bindemittel zugegeben. Das Rohglaspulver mit dem Kohlenstoff wird in Edelstahlformen in einem Aufschäumofen gebacken. Der Schaumglaskuchen wird dann in einem kontrollierten Prozess abgekühlt.



Abbildung 23: Dämmstoffplatten aus Schaumglas (CG)

Lieferformen und Verarbeitung

Der Dämmstoff ist in Form von Platten, Granulat oder Formteilen erhältlich. Handelsüblich sind die Platten zwischen 40-180 mm dick. Erforderliche Zuschnitte können mittels Sägen durchgeführt werden. Wegen seiner Sprödigkeit kann das Produkt keine punktuellen Lasten aufnehmen. Um eine ideal flächige Auflage zu erhalten werden die Schaumglasplatten deshalb in Heißbitumen verlegt. Auf die gleiche Weise wird oft auch ein Deckanstrich aufgebracht.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	100 - 200
λ	[W/(m·K)]	0,037 - 0,060
μ	[-]	∞
Brandklasse		A1 (DIN 4102-1) A1 (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	800 - 900
σ_{10}	[kPa]	450 - 2750
σ_{mt}	[kPa]	>100
S'	[MN/m ³]	k. A.
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[°C]	430
EPD		Vorhanden
Anwendung		DAD, DAA, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WI, WTR, PW, PB
Produktnorm		DIN EN 13167 (für Gebäude) DIN EN 14305 (für die technische Gebäudeausrüstung)

Vakuumisolationspaneele (VIP)

Herstellung und Rohstoffe

Vakuumisolationspaneele bestehen aus einem mikroporösen, druckfesten Stützkern, welcher von einer sogenannten Hochbarrierefolie umhüllt wird. Es werden im Wesentlichen drei verschiedene Folientypen mit herstellereigenen Variationen verwendet. Zum Einsatz kommen typischerweise Aluminium-Verbundfolien, polymere Barrierefolien und metallisierte Polymerfolien. Das durch den Stützkern offen gehaltene Volumen wird im Herstellungsprozess evakuiert und die gasdichte Hülle passgenau verschweißt. Als Stützkern wird in der Regel pyrogene Kieselsäure verwendet, da dieser Stoff aufgrund der sehr kleinen Porendurchmesser gegenüber dem über der Zeit auftretenden Druckanstieg die geringsten Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit zeigt (Knudsen-Effekt). Alternative Stützkernmaterialien sind Mineralwolle und einige offenzellige Dämmstoffe. Um mit diesen Materialien eine dauerhaft niedrige Wärmeleitfähigkeit des Produkts zu ermöglichen, muss die Diffusionsdichtheit der Hüllfolien noch weiter verbessert werden. Die Permeation trockener Gase (Sauerstoff und Stickstoff aus der Luft) und von Wasserdampf geschieht über die Folie in der Fläche der VIPs, aber auch über die Siegelnähte. Eindringene Gase erhöhen die Wärmeleitfähigkeit. Der Einfluss auf und der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit ist umso größer, je größer der Porendurchmesser des Kernmaterials ist.



Abbildung 24: Vakuumisolationspaneele (VIP)

Lieferformen und Verarbeitung

Die Elemente lassen sich abhängig von der Größe der Schweißkammer bis zu einer Abmessung (Länge x Breite) von 3000 x 1250 mm herstellen. Dabei sind ein Großteil der produzierten VIP Anfertigungen nach Maß. Übliche Lieferformate sind 600 x 500 mm, 1200 x 500 mm und 1000 x 600 mm. Lieferbare Dicken liegen im Bereich von 10 bis 50 mm. Zwischendicken sind möglich. Derzeit können ausschließlich rechteckige Plattenformate hergestellt werden.

Bei der Verarbeitung darf die Vakuumphülle nicht beschädigt werden. Um das Material zu schützen werden deshalb auch Produkte mit Ummantelungen aus EPS oder Deckschichten aus einer Vielzahl an Materialien angeboten. Es ist auf einen sorgfältigen und zwängungsfreien Einbau der Paneele zu achten. Da Zuschnitte nicht möglich sind, müssen die Elemente genau auf die zu dämmende Fläche passen. Dies kann im Bereich der Fassadendämmung mittels spezieller Optimierungsalgorithmen unterstützt werden, die eine ideale Belegung bei möglichst geringer Diversität der Plattenformate errechnen. Trotzdem bleiben häufig im Bereich von Anschlusssituationen kleinere Teilflächen übrig, die mit herkömmlichen Dämmstoffen aufgefüllt werden müssen. Bezüglich des mittleren U-Werts des Fassadenaufbaus ist dies jedoch i. d. R. vernachlässigbar.

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	170 - 210
λ	[W/(m·K)]	0,007 - 0,009
μ	[-]	∞
Brandklasse		B2 (DIN 4102-1)
c	[J/(kg·K)]	k. A.
σ_{10}	[kPa]	> 180
σ_{mt}	[kPa]	> 30
S'	[MN/m ³]	k. A.
Dim.Sta.	[%]	< 1 - 3
Temp.best.	[°C]	k. A.
EPD		Vorhanden
Anwendung		DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WH, WI
Produktnorm		Nein

Zellulose

Herstellung und Rohstoffe

Zellulosedämmstoff besteht hauptsächlich aus recyceltem Altpapier. Dieses wird zunächst in einem Hacker mechanisch zerkleinert, anschließend mit pulverförmigen Borsalzen (ca. 5 %) oder Ammoniumphosphat (bis zu 8 %) als Zusatzstoff für einen verbesserten Brandschutz und zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit vermischt. Der Faseraufschluss erfolgt dann mit vorgeschalteten Hammermühlen in Refiner- oder Wirbelstrommühlen. Nach einer Abscheidung des Feinanteils (Staub) kann das Material bei Anwendung als loser Dämmstoff zu Ballen verpresst und ausgeliefert werden.

Alternativ können auch Dämm pellets oder Dämmstoffmatten hergestellt werden. . Unter Einsatz von Bindemitteln oder Stützfasern und unter Einwirkung von Wasserdampf werden die Flocken zu Zellulosematten gepresst. Im trockenen Zustand können diese dann zugeschnitten werden.

Lieferformen und Verarbeitung

Die Zellulose ist in Form von Matten in handelsüblichen Dicken zwischen 25 – 180 mm sowie in Form von Pellets und losen Flocken erhältlich. Der Zuschnitt von Dämmstoffmatten kann durch Schneiden und Sägen erfolgen.

Zelluloseflocken können mittels pneumatischer Fördertechnik in verschiedenen Verfahren (Einblasverfahren; Nassverfahren) verarbeitet werden. Üblich ist die Anwen-

dung lose aufgeblasener Flocken (Schüttung) oder die verdichtete Einbringung in Wand- oder Deckengefache. Beim Nassverfahren wird das Material mittels Feuchtsprühtechnik (im Flockenstrahl wird Wasser verdunstet) auf Wände oder Decken aufgetragen.



Abbildung 25: Dämmstoff aus Zellulose

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	30 - 60 (lose) 60 - 90 (Platten)
λ	[W/(m·K)]	0,039 - 0,045
μ	[-]	1 - 2
Brandklasse		B2 (DIN 4102-1) E (Euroklasse)
c	[J/(kg·K)]	1700 - 2200
σ_{10}	[kPa]	60 (Platten)
σ_{mt}	[kPa]	60 (Platten)
S'	[MN/m ³]	3 - 7
Dim.Sta.	[%]	0 (lose, in senkr. Wand) 10 - 20 (lose, horizontal)
Temp.best.	[°C]	60
EPD		Nein
Anwendung		DAD, DZ, DI, WH, WI, WTR
Produktnorm		Nein

3.3 Regelung und Normung

Basis für die Energieeinsparverordnung (EnEV) ist das „Gesetz der Einsparung von Energie in Gebäuden“, kurz: Energieeinspargesetz – EnEG, in der ab dem 13. Juli 2013 gültigen Fassung. Mit diesem Gesetz wird die Richtlinie 2006/32/EG des EU-Parlaments und –Rates vom 5. April 2006 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in nationales Recht umgesetzt. Die aus dem EnEG abgeleitete Verordnung legt dann detaillierte Mindestanforderungen an Wohngebäude und Nichtwohngebäude bezüglich des Energiebedarfes fest. Als wichtige Maßeinheit dient dabei der Wärmedurchgangskoeffizient („U-Wert“). Mittels des U-Wertes lassen sich verschiedene Bauteilaufbauten wärmetechnisch einfach miteinander vergleichen. Es steht hiermit eine flächen- und temperaturspezifische Variable zur Verfügung, die völlig unabhängig von der Größe des Bauteils oder den tatsächlichen Temperaturdifferenzen Aussagen zum Wärmefluss durch ein Bauteil erlauben. Die Tabelle 5 zeigt zur Veranschaulichung der Größenordnung dieses Wertes eine Reihe von praktischen Werten. Diese hängen stark von der jeweils geltenden Wärmeschutz- oder Energieeinsparverordnung ab.

Tabelle 5: Typische U-Werte für Bauteile nach verschiedenen Wärmestandards [1]

Bauteile U-Werte (W/m ² ·K)	WSchV 1995	EnEV 2002	EnEV 2009 ¹	Passivhaus
Dach	0,22	0,20	0,20	0,15
Außenwände	0,50	0,30	0,28 ²	0,15
Keller	0,50	0,35	0,35	0,15
Fenster	1,8	1,4	1,3	< 0,80

¹Referenzgebäude

²gegen Außenluft.

Die jetzt gültige Fassung der EnEV von 2009 legt in § 3.1 fest: „Zu errichtende Wohngebäude sind so auszuführen, dass der Jahres-Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung den Wert des Jahres- Primärenergiebedarfs eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung mit der in Anlage 1 Tabelle 1 angegebenen technischen Referenzausstattung nicht überschreitet.“

Für die in diesem Rahmen für Dämmstoffe wichtigen Bauteile sind die typischen U-Werte und die entsprechenden Anforderungen seit 1995 in Tabelle 5 zusammengestellt. Wichtig ist hier, dass neben ordnungspolitischen Vorgaben (EnEV 2009) sich der „Stand der Technik“ (Niedrigenergiehaus (NEH), Passivhaus) schon deutlich weiterentwickelt hat – dieser „Herausforderung“ müssen sich die unterschiedlichen Dämmstoffe stellen. Im folgenden Abschnitt wird die Umsetzung dieser Herausforderungen in die entsprechende Sprache für den Fachmann beschrieben – dazu dienen Technische Richtlinien und insbesondere Normen. Die Abbildung 26 verdeutlicht noch einmal bildlich den Aufbau von gesetzgeberischen und ordnungspolitischen Maßnahmen in Deutschland. Die Darstellung in Pyramidenform soll dabei keine hierarchische Einordnung darstellen, sondern orientiert sich vielmehr an dem nach unten hin zunehmend spezifischeren Bezug des jeweils dargestellten Regelwerks zu einer konkreten Anwendung bzw. zu einem konkreten Produkt (Dämmstoff).

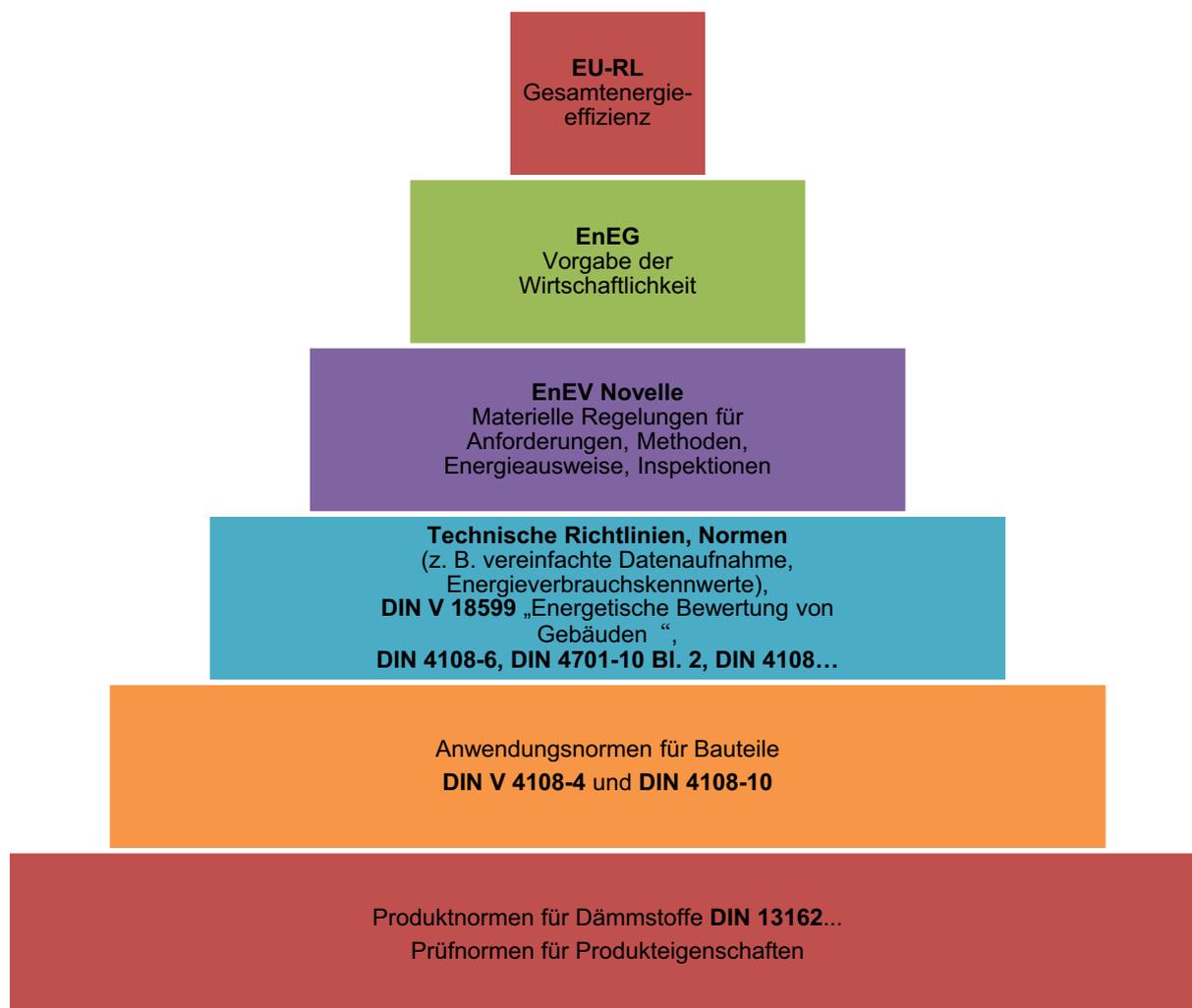


Abbildung 26: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der europäischen Verordnungsgebung im Bereich des energieeffizienten Bauens und deren Umsetzung in Deutschland (schematisch)

Für die jeweiligen Einsatzzwecke sind in der Regel unterschiedliche physikalische und technische Eigenschaften von Bedeutung. Um die Sicherheit im Bauwesen und die Tauglichkeit für den angestrebten Anwendungsfall zu gewährleisten, unterliegen Bauprodukte und somit auch Dämmstoffe rechtlichen Vorgaben und Normen. Unter baupraktischen Gesichtspunkten ist die Einteilung der Dämmstoffe nach ihrem Verhalten bei Brand besonders wichtig, da deren Tauglichkeit für bestimmte Einsatzbereiche im Bauwesen davon abhängt.

Mit der Verabschiedung der zum 01.07.2013 geltenden Bauproduktenverordnung existiert ein für die EU-Mitgliedsstaaten verbindlicher Rechtsakt, der die Verfahren des Nachweises der produktbezogenen Eigenschaften einheitlich regelt. Die Ableitung von Anforderungen an die Produkte anhand der besonderen Gegebenheiten unterschiedlicher Bauwerke bleibt aber in der einzelstaatlichen Zuständigkeit der Mitgliedsländer und wird in Deutschland über die Landesbauordnungen umgesetzt.

Für die meisten Dämmstoffe existieren in diesem Zusammenhang bereits gültige harmonisierte europäische Normen, teils befinden sich diese im Verabschiedungsprozess. Durch Übernahme in das deutsche Regelwerk erhalten sie die DIN EN-Kennzeichnung und mit der Übernahme in die Bauregelliste B des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) oder in die eingeführten technischen Baubestimmungen (ETB) der Länder werden sie amtlich eingeführt. Entsprechendes gilt für die europäische technische Zulassung (ETA) für Dämmstoffe, die (noch) nicht genormt sind.

Unterstützt werden die harmonisierten Produktnormen (hEN) durch die Querschnittsnormen, wie Prüfmethode, Berechnungs- oder Anwendungsnormen. Die harmonisierten Spezifikationsnormen erlauben Dämmstoffherstellern eine weitgehend offene Beschreibung ihrer Produkte anhand von festgelegten Merkmalen; diese werden meistens in Klassen, Stufen oder Nennwerten (z. B. für die Wärmeleitfähigkeit) ausgedrückt. Erklärt der Hersteller die Konformität mit der entsprechenden Norm, kann er sein Produkt mit dem CE-Kennzeichen versehen und in den Markt bringen, was allerdings nichts über die Tauglichkeit des Produkts für eine bestimmte Anwendung aussagt.

Die Tabelle 6 zeigt auf, wie die im vorangegangenen Abschnitt (Grundlagen: bauphysikalische und technische Eigenschaften) beschriebenen Anforderungen an Dämmstoffe in technische Eigenschaften – gekoppelt an europäische Prüfverfahren – umgesetzt werden.

Diese Prüfnormen finden dann Eingang in die entsprechenden (harmonisierten) Produktnormen. Das erste Dämmstoffnormenpaket wurde seit 2003 in Deutschland umgesetzt, gültig ist die Ausgabe von Februar 2009; inzwischen werden durch Bekanntmachungen in den einzelnen Ländern die Neufassungen von Februar 2013 bauaufsichtlich eingeführt.

Diese harmonisierten Normen (von 2013) legen die Anforderungen an werkmäßig hergestellte Produkte aus zehn unterschiedlichen Ausgangsmaterialien fest. Zusätzlich zu diesem Paket sind weitere Dämmstoffnormen auf europäischer Ebene publiziert worden. Tabelle 7 gibt den derzeitigen Stand der Produktnormen wieder.

Da die EnEV 2009 auch Anforderungen an die Wärmedämmung von Wärmeverteilungs- Warmwasserleitungen, Kälteverteilungs- und Kaltwasserleitungen sowie Armaturen stellt, wird an dieser Stelle auf die entsprechenden Dämm- bzw. Isolierstoffe hingewiesen (Tabelle 9), mit denen die Anforderungen erfüllt werden können. Die entsprechenden Normen für diese Produkte sind kürzlich erschienen.

Tabelle 6: Umsetzung der Bewertungskriterien in genormte europäische Prüfverfahren

Eigenschaft	Prüfverfahren	Symbol	Einheit	Abkürzung
Nennwert des Wärmedurchlasswiderstandes/-leitfähigkeit	EN 12667 oder EN 12939	R_D λ_D	$m^2 \cdot K/W$ $W/(m \cdot K)$	R λ
Länge und Breite	EN 822	l und b	mm	L und W
Dicke	EN 823	d	mm	T
Rechtwinkligkeit	EN 824		mm/m	S
Ebenheit	EN 825		mm	P oder S_{max}
Dimensionsstabilität unter normalen Laborbedingungen	EN 1603	$\Delta \epsilon$	%	DS(N)
Biegefestigkeit	EN 12089	σ_B	kPa	BS
Brandverhalten	EN 13501-1		Euroklassen	A, B, C, D, E, F
Rohdichte	EN 1602	ρ_a	kg/m^3	AD
Dimensionsstabilität unter definierten Temperaturbedingungen	EN 1604	$\Delta \epsilon$	%	DS(T)
Dimensionsstabilität unter definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen	EN 1604	$\Delta \epsilon$	%	DS(T, H)
Verformung bei definierter Druck- und Temperaturbeanspruchung	EN 1605	ϵ	%	DLT
Druckspannung bei 10 % Stauchung	EN 826	σ_{10}	kPa	CS(10)
Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene	EN 1607	σ_{mt}	kPa	TR
Zugfestigkeit parallel zur Plattenebene	EN 1608	σ_t	kPa	
Punktlast	EN 12430		N	PL(5)
Langzeit-Kriechverhalten	EN 1606	ϵ_{ct}	%	CC() σ_c
Scherfestigkeit	EN 12090	τ	kPa	SS
Wasseraufnahme bei kurzzeitigem teilweisen Eintauchen	EN 1609		kg/m^2	WS
Wasseraufnahme bei langfristigem teilweisen Eintauchen	EN 12087	W_{Ip}	kg/m^2	WL(P)
Wasserdampfdiffusionswiderstand(szahl)	EN 12086	μ	$m^2 \cdot h \cdot Pa/mg (-)$	Z oder MU
dynamische Steifigkeit	EN 29052-1	s	MN/m^3	SD
Dicke/Dicke unter Belastung; Zusammendrückbarkeit	EN 12431	d_L d_B	mm	
		c	mm	CP
Schallabsorptionskoeffizienten	DIN EN ISO 354:2003-12	α_p α_w	-----	AP/AW
Strömungswiderstand	EN 29053		$kPa \cdot s/m^3$	AF
organische Bestandteile	EN 13820		%	M_{oc}

Tabelle 7: Harmonisierte Normen für werkmäßig hergestellte Dämmstoffe

Normbezeichnung	Titel
DIN EN 13162:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) – Spezifikation; Deutsche Fassung EN13162:2012
DIN EN 13163:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13163:2012
DIN EN 13164:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13164:2012
DIN EN 13165:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyurethan-Hartschaum (PU) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13165:2012
DIN EN 13166:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Phenolharzschaum (PF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13166:2012
DIN EN 13167:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas (CG) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13167:2012
DIN EN 13168:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzwolle (WW) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13168:2012
DIN EN 13169:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Blähperlit (EPB) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13169:2012
DIN EN 13170:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Kork (ICB) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13170:2012
DIN EN 13171:2013-03	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13171:2012

Tabelle 8: Harmonisierte Normen für an der Verwendungsstelle hergestellte Dämmstoffe

Normbezeichnung	Titel (der entsprechenden Norm)
DIN EN 14063-1:2004-11	Wärmedämmstoffe für Gebäude - An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus Blähton-Leichtzuschlagstoffen (LWA) - Teil 1: Spezifikation für die Schüttdämmstoffe vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 14063-1:2004
DIN EN 14064-1:2010-06	Wärmedämmstoffe für Gebäude - An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus Mineralwolle (MW) - Teil 1: Spezifikation für Schüttdämmstoffe vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 14064-1:2010
DIN EN 14316-1:2004-11	Wärmedämmstoffe für Gebäude - An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus Produkten mit expandiertem Perlite (EP) - Teil 1: Spezifikation für gebundene und Schüttdämmstoffe vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 14316-1:2004
DIN EN 14317-1:2004-11	Wärmedämmstoffe für Gebäude - An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung mit Produkten aus expandiertem Vermiculit (EV) - Teil 1: Spezifikation für gebundene und Schüttdämmstoffe vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 14317-1:2004

Tabelle 9: Normen für Dämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung

Normbezeichnung	Titel (der entsprechenden DIN)
DIN EN 14303:2010-04	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14303:2009
DIN EN 14304:2010-03	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus flexiblem Elastomerschaum (FEF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14304:2009
DIN EN 14305:2010-03	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas (CG) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14305:2009
DIN EN 14306:2010-03	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Calciumsilikat (CS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14306:2009
DIN EN 14307:2010-03	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14307:2009
DIN EN 14308:2010-03	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyurethan-Hartschaum (PU) und Polyisocyanurat-Schaum (PIR) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14308:2009
DIN EN 14309:2010-03	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14309:2009
DIN EN 14313:2010-03	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyethylen-schaum (PEF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14313:2009
DIN EN 14314:2010-03	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Phenolharz-schaum (PF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14314:2009

Dämmstoffe, die nicht genormt sind, benötigen entweder eine Europäische Technische Zulassung (ETA), eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) oder eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE), um verwendet zu werden.

3.4 Anwendung im Hochbau

Die Eigenschaften, die ein Dämmstoff für einen bestimmten Einsatzzweck aufweisen muss, sind für werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW), Polystyrol-Hartschaum (EPS), Polystyrol-Extruderschaum (XPS), Polyurethan-Hartschaum (PU), Phenolharz-Hartschaum (PF), Schaumglas (CG), Holzwolle-Platten (WW), Holzwolle-Mehrschichtplatten (WW-C), Expandierte Perlite (EPB), Expandierten Kork (ICB) und Holzfasern (WF) durch die harmonisierten europäischen Produktnormen DIN EN 13162 bis DIN EN 13171 geregelt. Die festgelegten Anforderungen für diese Dämmstoffe sind Stufen, Klassen oder Grenzwerten zugeordnet. Die nationale DIN 4108-10 verknüpft diese anwendungsbezogenen Eigenschaften für Dämmstoffe mit speziellen Anwendungsgebieten und definiert die jeweiligen Mindestanforderungen. Diese sind für die einzelnen Dämmstofftypen in Tabellen zusammengestellt.

Anwendungsbereiche und -eigenschaften

Mit der DIN 4108-4:2013-02 (teilweise ist die bauaufsichtliche Einführung noch nicht erfolgt und es wird noch DIN V 4108-4:2007-06 verwendet) und der DIN 4108-10 (s. u.) hat der Regelssetzer die „nationale“ Verbindung zwischen der Gebäudehülle und den Anwendungsmöglichkeiten der einzelnen Dämmstoffeigenschaften geschaffen:

Tabelle 10: Nationale Anwendungsnormen

Normbezeichnung	Titel
DIN 4108-4:2007-06 (Vornorm)	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchte-schutztechnische Bemessungswerte
DIN 4108-4:2013-02	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchte-schutztechnische Bemessungswerte
DIN 4108-10:2008-06	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezo-gene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärme-dämmstoffe

Die Anwendungsgebiete für Dämmstoffe lassen sich analog zur DIN 4108-10 im Hinblick auf die Verwendung im Gebäude in die 3 Bereiche untergliedern [Pfundstein et al. 2007]:

- Dach / Decke
- Wand und
- Perimeter (erdberührte Bauteile)

Da die Dämmstoffe je nach Anwendung unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt sind und, wie bereits erwähnt, den jeweiligen Anforderungen hinsichtlich Wärme- und Schallschutz für das entsprechende Bauteil unterliegen, differenziert die DIN 4108-10 zwischen den in Tabelle 3.8 der Norm dargestellten Anwendungstypen. Für jedes der genannten Anwendungsgebiete sind in der Norm tabellarisch für die im Dämmstoffpaket (siehe Tabelle 11) genannten zehn Produkttypen die entsprechenden Mindestanforderungen aufgeführt.

Die Kurzzeichen, denen die Norm auch Piktogramme zuordnet, erscheinen auf dem Etikett und signalisieren, dass für das Anwendungsgebiet die Mindestanforderungen gemäß Produktabelle erfüllt sind. Darüber hinaus nimmt die Norm eine zusätzliche Unterscheidung bestimmter Produkteigenschaften vor, die ein Dämmstoff für den jeweiligen Einsatzzweck aufweisen muss. Die Materialeigenschaften, wie in Tabelle 12 dargestellt, werden ebenfalls durch Kurzzeichen gekennzeichnet.

Die für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche einsetzbaren Dämmstoffe sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 11: Anwendungsgebiete von Dämmstoffen nach [DIN 4108-10]

Anwendungsgebiet	Kurzzeichen	Piktogramm	Anwendungstyp
Decke, Dach	DAD		Außendämmung von Dach, Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Deckungen, auch begehbare oberste Geschossdecken
	DAA		Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Abdichtungen
	DUK		Außendämmungen des Daches, der Bewitterung ausgesetzt (Umkehrdach)
	DZ		Zwischensparrendämmung, zweischaliges Dach, nichtbegehbare, aber zugängliche oberste Geschossdecken
	DI		Innendämmung der Decke (unterseitig) oder des Daches, Dämmung unter Sparren/Tragkonstruktion, abgehängte Decke, usw.
	DEO		Innendämmung der Decke o. Bodenplatte (oberseitig) unter Estrich ohne Schallschutzanforderungen
	DES		Innendämmung der Decke o. Bodenplatte (oberseitig) unter Estrich mit Schallschutzanforderungen
Wand	WAB		Außendämmung der Wand hinter Bekleidung
	WAA		Außendämmung der Wand hinter Abdichtung
	WAP		Außendämmung der Wand unter Putz
	WZ		Dämmung von zweischaligen Wänden, Kerndämmung
	WH		Dämmung von Holzrahmen- und Holztafelbauweise
	WI		Innendämmung der Wand
	WTH		Dämmung zwischen Haustrennwänden mit Schallschutzanforderungen
	WTR		Dämmung von Raumtrennwänden
Perimeter	PW		Außenliegende Wärmedämmung von Wänden gegen Erdreich (außerhalb der Abdichtung)
	PB		Außenliegende Wärmedämmung unter Bodenplatte gegen Erdreich (außerhalb der Abdichtung)

Tabelle 12: Differenzierung bestimmter Produkteigenschaften nach [DIN 4108-10]

Produkteigenschaft	Kurzzeichen	Beschreibung	Beispiele
Druckbelastbarkeit	dk	keine Druckbelastbarkeit	Hohlraumdämmung, Zwischensparrendämmung
	dg	geringe Druckbelastbarkeit	Wohn- und Bürobereich unter Estrich
	dm	mittlere Druckbelastbarkeit	nicht genutztes Dach mit Abdichtung
	dh	hohe Druckbelastbarkeit	genutzte Dachflächen, Terrassen
	ds	sehr hohe Druckbelastbarkeit	Industrieböden, Parkdeck
	dx	extrem hohe Druckbelastbarkeit	hoch belastete Industrieböden, Parkdeck
Wasseraufnahme	wk	keine Anforderungen an die Wasseraufnahme	Innendämmung im Wohn- und Bürobereich
	wf	Wasseraufnahme durch flüssiges Wasser	Außendämmung von Außenwänden und Dächern
	wd	Wasseraufnahme durch flüs. Wasser oder Diffusion	Perimeterdämmung, Umkehrdach
Zugfestigkeit	zk	keine Anforderungen an Zugfestigkeit	Hohlraumdämmung, Zwischensparrendämmung
	zg	geringe Zugfestigkeit	Außendämmung der Wand hinter Bekleidung
	zh	hohe Zugfestigkeit	Außendämmung der Wand unter Putz, Dach mit verklebter Abdichtung
Schalltechnische Eigenschaften	sk	keine Anforderungen an schalltechnischen Eigenschaften	alle Anwendungen ohne schalltechnische Anforderungen
	sh	Trittschalldämmung, erhöhte Zusammendrückbarkeit	schwimmender Estrich, Haustrennwände
	sm	mittlere Zusammendrückbarkeit	schwimmender Estrich, Haustrennwände
	sg	Trittschalldämmung, geringe Zusammendrückbarkeit	schwimmender Estrich, Haustrennwände
Perimeter	tk	keine Anforderungen an die Verformung	Innendämmung
	tf	Dimensionsstabilität unter Feuchte und Temperatur	Außendämmung der Wand unter Putz, Dach mit Abdichtung
	tl	Verformung unter Last und Temperatur	Dach mit Abdichtung

Diese Vorgehensweise der Kennzeichnung erleichtert es Architekten und Planern, den geeigneten Dämmstoff für den gewünschten Anwendungsfall zu finden. So lässt sich beispielsweise aus der Angabe „EPS 040 DES sg“ auf dem Produktetikett oder im technischen Datenblatt eines Dämmstoffes erkennen, dass es sich dabei um eine Trittschalldämmplatte aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) mit geringer Zusammendrückbarkeit und der Wärmeleitgruppe 040 (Bemessungswert $\lambda = 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) handelt.

Tabelle 13: Anwendungsbereiche von Dämmstoffen

		Anwendung nach DIN 4108-10							
		DAD	DAA	DUK	DZ	DI	DEO	DES	
anorganisch	synthetisch	Glaswolle (MW)	•	•		•	•	•	•
		Steinwolle (MW)	•			•	•	•	•
		Schaumglas (CG)	•				•	•	
		Blähglas				X		X	
		Kalziumsilikatschaum	X	X			X		
		Keramikfasern, Keramikschaum							
		Aerogel							
		Pyrogene Kieselsäure					O	O	
		Schlackenwolle							
		Gipsschaum					O		
	natürlich	Blähperlit (EPB)							
		Vermiculite, expandiert (EV), Blähglimmer							
		Blähton	X			X		X	
		Bims							
		Wärmedämmziegel							
	synthetisch	Polystyrol, expandiert (EPS)	•	•		•	•	•	•
		Polystyrolschaum, extrudiert (XPS)	•	•	•	X	•	•	
		Polyurethan-Hartschaum (PU)	•	•		•	•	•	
		Polyurethan-Ortschaum (PU)	X	X					
Phenolharzschaum (PF)		•	•		•	•	•		
Melaminharzschaum (MF)					O	O			
Polyethylenschaum (PE)								X	
Harnstoff-Formaldehydharz-Ortschaum (UF)					O	O			
Polyesterfasern					O	O			
natürlich		Holzwolle (WW)				•	•	•	
	Holzfasern (WF)	•	•		•	•	•	•	
	Kork, expandiert (ICB)	•	•		•	•	•		
	Zellulosefasern	X			X	X			
	Hanf	X			X	X	X		
	Schafwolle				X	X	X	X	
	Baumwolle	X			X	X			
	Flachs				X	X			
	Getreidegranulat	X			X	X			
	Schilfrohr	X	X		X	X			
	Kokosfasern	X			X	X	X	X	
	Seegras				O				
	Holzspäne								
	Chinaschilf								
Torf									
Strohballen									

• mit definierten Eigenschaften nach DIN 4108-10
x mit bauaufsichtlicher Zulassung für Produkt oder Anwendung
o selten als Wärmedämmstoff gebräuchlich

		Anwendung nach DIN 4108-10											
		WAB	WAA	WAP	WZ	WH	WM	WTH	WTR	PW	PB		
anorganisch	synthetisch	Glaswolle (MW)	•		•	•	•	•	•	•			
		Steinwolle (MW)	•		•	•	•	•	•	•			
		Schaumglas (CG)	•	•	•	•		•		•	•	•	
		Blähglas				X	X				X	X	
		Kalziumsilikatschaum	X		X			X					
		Keramikfasern, Keramikschaum											
		Aerogel	O	O									
		Pyrogene Kieselsäure		O	O			O					
		Schlackenwolle											
	Gipsschaum						O						
	natürlich	Blähperlit (EPB)											
		Vermiculite, expandiert (EV), Blähglimmer											
		Blähthon					X	X		X			
		Bims	O	O									
		Wärmedämmziegel	X	X	X	X							
	organisch	synthetisch	Polystyrol, expandiert (EPS)	•	•	•	•		•			X	X
			Polystyrolschaum, extrudiert (XPS)	•	•	•	•	•				•	•
			Polyurethan-Hartschaum (PU)	•	•	•	•	•	•			X	X
			Polyurethan-Ortschaum (PU)				X						
Phenolharzschaum (PF)			•	•	•	•		•					
Melaminharzschaum (MF)								O		O			
Polyethylenschaum (PE)													
Harnstoff-Formaldehydharz-Ortschaum (UF)						O							
Polyesterfasern							O		O				
natürlich		Holzwolle (WW)	•		•		•	•					
		Holzfasern (WF)	•		•	•	•	•		•			
		Kork, expandiert (ICB)	•		•	•	•	•		•			
		Zellulosefasern					X	X		X			
		Hanf	X				X	X		X			
		Schafwolle	X				X	X		X			
		Baumwolle	X				X			X			
		Flachs					X	X		X			
		Getreidegranulat					X			X			
		Schilfrohr	X		X		X	X					
organisch	natürlich	Kokosfasern	X			X	X	X	X	X			
		Seegrass					O						
		Holzspäne				O							
		Chinaschilf	O	O									
		Torf											
		Strohballen	O		O		O						

• mit definierten Eigenschaften nach DIN 4108-10
 x mit bauaufsichtlicher Zulassung für Produkt oder Anwendung
 o selten als Wärmedämmstoff gebräuchlich

Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden Anwendungsbeispiele für bestimmte Bauteile, untergliedert in die Bereiche Dach, oberste Geschossdecke, Außenwand und Kellerdecke dargestellt und diskutiert. Dabei werden zunächst geeignete Maßnahmen unterschieden und die wichtigsten Ausführungen mit Besonderheiten der Konstruktionen beschrieben. Techniken und Konstruktionen die ausschließlich im Neubaubereich relevant sind, werden nicht betrachtet. In diesem Zusammenhang finden sich in der einschlägigen Literatur weiterführende Angaben u. a. [Pfundstein et al. 2007], [Hegger 2008], [Königstein 2011], [Hoffmann 2012], [König 2012].

Dach

Im Bereich der energetischen Sanierung von Steildächern können prinzipiell drei unterschiedliche Maßnahmen vorgenommen werden. Eine Zwischensparrendämmung in Dach und Decke wird zwischen den durch die Sparren begrenzten Hohlräumen eingebracht. Dabei können sowohl gebundene, also matten- und plattenförmige Materialien, als auch lose Materialien (Schütt- und Einblasdämmstoffe) zur Anwendung kommen. Generell bieten beide Materialgruppen Vor- und Nachteile. Die Verwendung von Dämmmatten oder –platten erfordert einen sehr exakten Zuschnitt, um insbesondere im Bereich komplexer Anschlüsse oder evtl. Einbauten eine lückenlose Dämmung zu gewährleisten. Je nachdem wie optimal die jeweils lieferbaren Bahnenbreiten ausfallen, fällt mehr oder weniger viel Verschnitt an. Der Einsatz von losen Materialien kann hier Vorteile bieten. Durch die lückenlose Auffüllung auch komplexer Gefachgeometrien ist ein ideal ausgebildeter Anschluss an die Sparren auch im Bereich von Unebenheiten, Wechsell, Leerrohren für Kabel, etc. möglich. Die korrekte Verfüllung der durch die Sparren und einer anzubringenden Beplanung entstehenden Kavitäten erfordert allerdings große Erfahrung und sollte daher ausschließlich von qualifizierten Handwerksbetrieben durchgeführt werden. Insbesondere bei einblasfähigen Dämmstoffen wie Altpapierflocken ist die komplette und lückenlose Auffüllung der Gefachabteilungen mit einer gleichmäßigen, vom Hersteller vorgeschriebenen Mindestdichte, eine anspruchsvolle Aufgabe, welche durch die geschlossenen Gefache zudem nur bedingt in ihrer Ausführungsqualität überwacht werden kann. Die Auswirkung von Fehlstellen auf die wärme- und feuchteschutztechnische Funktion der Bauteile wurde beispielsweise von [Cammerer und Spitzner 2004] untersucht. Ein generelles Problem bei der Zwischensparrendämmung im Bereich der nachträglichen Sanierung stellt die oftmals begrenzte Sparrenhöhe dar. Diese limitiert die Dämmschichtdicke, so dass oftmals eine Kombination mit einer Untersparren- oder Aufsparrendämmung vorgenommen werden muss, um die U-Werte der Konstruktion auf den angestrebten Zielwert zu bringen. Alternativ hierzu können die Sparren aufgedoppelt werden um so eine größere Dämmschichtdicke zu realisieren. Anforderungen an Zwischensparrendämmstoffe bestehen aufgrund der geringen mechanischen Beanspruchung vor allem in der Dimensionsstabilität bei bestimmten Temperatur- und Feuchtebedingungen. Lose Materialien werden zusätzlich auf die Dimensionsstabilität bei stoß- und vibrationsförmiger Anregung sowie unter Aufwechungsbedingungen untersucht.

Eine regensichere Dachdeckung ist die Voraussetzung für einen dauerhaft trockenen Dachaufbau. Bei gedeckten Dächern wird oberhalb der Zwischen- oder Aufsparrendämmung eine Unterdeckung oder Unterspannung angeordnet, um Flugschnee und Schlagregen abzuhalten. Außerdem müssen die inneren Bauteilschichten luftdicht sein. Bei Bestandsgebäuden ist beides meist nicht gegeben, daher sind oft größere Eingriffe in die Bausubstanz nötig. Bei einer Untersparrendämmung werden im Bestand typischerweise plattenförmige Materialien unterhalb der Sparren angebracht. Diese Art der Konstruktion ist die einfachste Maßnahme zur Verbesserung des Wärmeschutzes, setzt jedoch voraus, dass der Dachaufbau intakt und die Dachdeckung regensicher ist. Innenseitige Wärmedämmschichten führen, wie auch die Aufdoppelung der Sparren in Richtung Innenraum, zu einer Verkleinerung des Dachraums. Eine Aufsparrendämmung im Bestand kann nur in Verbindung mit einer Neueindeckung des Daches ausgeführt werden. Eine Erneuerung der Dachdeckung ist meist nicht nur wegen des schlechten Zustands der Dachpfannen notwendig, sondern auch um die Regensicherheit durch den Einbau einer Unterspann- oder Unterdeckbahn herzustellen. Aufsparrendämmplatten mit aufgeklebten Unterdeckbahnen ermöglichen die Herstellung von Regensicherheit und Dämmung in einem Arbeitsgang. Bei der Aufsparrendämmung können alle Baumaßnahmen von der Außenseite ausgeführt werden. Auch die Bahnen zur Herstellung der Luftdichtheit werden von außen verlegt, so dass die Innenseite von ausgebauten Dachgeschossen nicht berührt wird. Gegebenenfalls vorhandene Zwischensparrendämmung kann unter bestimmten Voraussetzungen erhalten werden. Durch die flächige Verlegung ohne Höhengsprünge und mit wenigen Durchdringungen gelingt dies sehr einfach und zuverlässig. Zur Aufsparrendämmung werden Dämmschichtstärken von 50 – 200 mm verwendet (als alleinige Dämmmaßnahme oder in Kombination mit Zwischensparrendämmung), die anschließend über die gesamte Dachfläche hinweg verlegt werden. Um die Dachlast (Eigengewicht der Eindeckung und statisch zu berücksichtigende Wind-/Schneelasten) abzutragen stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. Druckbelastbare Dämmstoffe können die Lasten direkt aufnehmen und über die Dachschalung an die Sparren weiterverteilen. Alternativ gibt es lastabtragende konstruktive Elemente (i. d. R. spezielle Verschraubungen der Konterlattung) die durch die Dämmebene hindurch die Last in die Sparren abtragen. Aus der mechanischen Beanspruchung ergeben sich Anforderungen an die Druck-, Zug- und Scherfestigkeit der Materialien, die produktspezifisch in der DIN 4108-10 geregelt sind.

Die Dachdämmung bei Flachdächern unterliegt weiteren Besonderheiten. Der Dämmstoff muss die Last aus der Dachhaut inklusive evtl. Bekiesung und Schneelasten aufnehmen – zudem muss der gesamte Aufbau zumindest für Wartungszwecke begehrbar sein. Hieraus ergeben sich gegenüber der Anwendung im Steildach erweiterte Mindestanforderungen an die Druck- und Zugfestigkeit in Kombination mit Temperaturbelastungen, die je nach konkreter Anwendung auch um Prüfungen zum Langzeit-Kriechverhalten (bspw. bei Parkdecks) und der Punktlast-Tragfähigkeit (bei eher spröden Materialien wie Schaumglas oder Bläherliteplatten) ergänzt werden.

Eine besondere Ausführung des Flachdachs ist das so genannte Umkehrdach, bei dem der Dämmstoff, entgegen der normalen Anwendung im Flachdach, nicht unter, sondern über der Dachabdichtung montiert ist. Der Vorteil der Konstruktion liegt in der weitgehenden Abkoppelung der Dichtungsebene von Temperatureinflüssen, UV-Strahlung und mechanischer Beschädigungen wie diese bei einer normalen Flachdachkonstruktion durch ungewollte Freilegungen der Abdichtung erfolgen können. Da der Dämmstoff nur durch ein Vlies und eine Kies- bzw. Grünschicht von der Umwelt getrennt ist, kann sich bei Niederschlag oder allgemein erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit auch eine höhere Materialfeuchte im Dämmstoff einstellen. Dies ist unkritisch, so lange das von der Wärmedämmung aufgenommene Wasser in Trockenperioden wieder aus dem Material ausdiffundieren kann. Die Dachabdichtung ist die wasserführende Schicht. Wasser kann also auch unter oder hinter den Dämmstoff fließen und reduziert die Wärmedämmwirkung der Dämmschicht. Dieser Effekt wird in Deutschland über einen Zuschlag auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs im Bemessungswert für die Anwendung erfasst. Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs aufgrund der Feuchteaufnahme des Materials ist für geschlossenzellige Dämmstoffe gering. Langzeituntersuchungen an bekiesten Umkehrdächern zeigen, dass die Zunahme der Materialfeuchte hier in einem Bereich $< 1\text{-}2\text{ Vol.-%}$ bleibt. Begrünte- und befahrbare Umkehrdächer (Parkdecks) zeigen maximale Feuchtezunahmen von $0,3\text{ – }4,6\text{ Vol.-%}$, was durch einen Zuschlag in der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt wird. Durch die Verwendung diffusionsoffener, aber wasserableitender Trennschichten zwischen Dämmstoff und Bekiesung können die Zuschläge umgangen werden.

Weiterführende Informationen zu Möglichkeiten der energetischen Sanierung von Dächern finden sich u. a. in [Pfundstein et al. 2007], [Pfeiffer 2008], [Ettrich et al. 2010], [Stempel 2011].

Oberste Geschoßdecke

Die Dämmung der obersten Geschossdecke erfolgt wenn der darüber liegende Dachraum nicht als Wohnraum genutzt wird. Dämmmaßnahmen der obersten Geschossdecke können im Prinzip mit den gleichen Materialien wie die Dämmung des Steildachs durchgeführt werden. Matten- oder plattenförmige Materialien lassen sich ebenso wie Schüttdämmstoffe auf der Decke oder zwischen den Deckenbalken verlegen beziehungsweise einfüllen und anschließend durch die Montage einer oberen Deckenbepunktung schützen, welche auch die Begehbarkeit sicherstellt. Verbunddämmplatten mit Gehbelag ermöglichen die Herstellung einer begehbaren Wärmedämmschicht in einem Arbeitsgang. Bei der Dämmung mit Schüttdämmstoffen werden oft große Dämmstärken realisiert. Offen aufgeblasenes Material muss hierbei nicht vollständig abgedeckt werden – es existieren Systeme zur Verlegung von Gehstreifen zu Inspektions- und Wartungszwecken.

Außenwand

Die Auswahl an Dämmsystemen und eingesetzten Materialien im Bereich der Außenwand ist groß. Zunächst lassen sich drei prinzipiell unterschiedliche Ausführungen unterscheiden.

Bei der Außendämmung wird der Dämmstoff auf der Außenseite des Wandquerschnitts aufgebracht. Die Dämmung liegt also auf der Kaltseite und schützt so das dahinter liegende Mauerwerk vor Temperaturschwankungen.

Im Westen und Norden Deutschlands wird vorwiegend zweischaliges Mauerwerk eingesetzt. Hier schützt eine zweite Schicht aus wetterfesten Baustoffen die dahinterliegende Dämmung und das tragende Mauerwerk. Zweischaliges Mauerwerk wird mit oder ohne Luftschicht zwischen Klinker- oder Verblendschale und Dämmung gebaut. Wird eine Luftschicht hinter der Blendschale vorgesehen, spricht man von „Zweischaligem Mauerwerk mit Hinterlüftung“. Wird - bis auf einen Fingerspalt für den Maurer beim Aufbau der Verblendschale –auf eine Luftschicht verzichtet, spricht man von „Kerndämmung“. Wenn nicht bereits bei der Planung des zweischaligen Mauerwerks eine Dämmschicht beim Schalenabstand mit eingerechnet wurde sind die zur Verfügung stehenden Dämmstoffdicken oft relativ gering. Trotzdem lassen sich durch die Wahl geeigneter Systeme auch in solchen Fällen signifikante Effizienzverbesserungen erreichen.

Als dritte Variante steht die Innendämmung zur Verfügung. Bei der Innendämmung liegt der Dämmstoff auf der Warmseite der ursprünglichen Wand. Weil das Mauerwerk durch den Dämmstoff von der Innenraumtemperatur thermisch getrennt ist, führt diese Anordnung zu einer Temperaturabsenkung der Außenwand. Dies ist nicht weiter problematisch wenn der Wandaufbau insgesamt bauphysikalisch korrekt ausgelegt ist. Wichtig ist hierbei eine zuverlässige Abdichtung gegenüber der Raumlufffeuchtigkeit, was durch raumseitig angebrachte Dampfbremsen oder die Verwendung ausreichend diffusionshemmender Wärmedämmstoffe (EPS, PU) realisiert werden kann. Bei unsachgemäßer oder fehlerhafter Ausführung der Dampfbremse und Verwendung diffusionsoffener Materialien (vor allem faserförmige Dämmstoffe) kann Luftfeuchtigkeit in die Dämmschicht eindiffundieren und insbesondere im Grenzbereich zwischen Innendämmung und der Innenseite der Außenwand als Tauwasser ausfallen. Zu große Tauwasserausfälle können dann zu einer Aufweitung des Dämmstoffs und der Wandbaustoffe führen. Die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs wird dadurch erhöht und es können Bedingungen entstehen, die das Wachstum von Schimmelpilzen ermöglichen. Kritisch für die Stabilität der Bauteile wird es vor allem dann, wenn bei feuchtegesättigten Dämm- und Baustoffen die Frostgrenze unterschritten und dadurch die Struktur geschädigt wird. Vorteile bieten Innendämmsysteme wenn Räume nur temporär genutzt werden. Durch die Innendämmung ist die thermische Masse der tragenden Wand vom Raumklima getrennt, was ein schnelleres Aufheizen des Raumes ermöglicht. Im Gegensatz zur Außendämmung, ist bei der Innendämmung auch das Brandverhalten der Dämmstoffe kritischer einzuschätzen. Neben der Flammenausbreitung und Brandweiterlei-

tung entstehen Gefährdungen vor allem auch durch die bei der Verbrennung entstehenden Rauchgase.

Einen Sonderfall stellt die Holzbauweise dar. Die häufigste Form ist hierbei die Holzrahmen- oder Holztafelbauweise. In beiden Fällen werden aus Stäben (Holzbalken), Rahmen gebildet, die durch entsprechende Beplankungen ausgesteift werden. Die entstandenen Hohlräume (Gefache) können mit Dämmstoff verfüllt werden. Zusätzlich können innen oder außen weitere Dämmstoffe (meist plattenförmige Materialien) aufgebracht werden. Die Dämmstofffüllung innerhalb der Gefache könnte in der oben vorgestellten Systematik am ehesten als Kerndämmung bezeichnet werden – im Gegensatz zu dem bekannten Begriff der Kerndämmung aus dem zweischaligen Mauerwerksbau, liegt die Dämmung hier aber tatsächlich innerhalb der tragenden Rahmenstruktur.

Im Folgenden werden, unterschieden nach typischen Baukonstruktionen, einige prinzipielle Möglichkeiten der Außenwanddämmung vorgestellt.

Möglichkeiten der Außenwanddämmung:

Massive Konstruktionen aus Mauerwerk oder Beton können gut durch aufgeklebte und/oder verdübelte plattenförmige Materialien gedämmt werden. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen der Dämmung unter Putz, die kleinformative Putzträger im Bereich von Wärmebrücken bezeichnet und der Anwendung von Wärmedämmverbundsystemen. Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) bestehen dabei aus einem aufeinander abgestimmten System aus Kleber, Dämmstoff, Putzgewebe und Putz. Der Systemgedanke gewährleistet eine sichere Verarbeitung, in dem Fehler aus der Kombination von nicht aufeinander abgestimmten Bauprodukten vermieden werden. Im Bereich der WDVS werden überwiegend Dämmstoffe aus EPS und Mineralwolle eingesetzt, obwohl inzwischen viele Alternativen auf Basis von Polyurethan, Mineralschaum, expandiertem Kork, Phenolharz, aber auch Systeme auf Basis nachwachsender Rohstoffe wie Holzfasern erhältlich sind. Wärmedämmverbundsysteme sind die am häufigsten eingesetzten Fassadendämmungen, sowohl beim Neubau als auch in der Sanierung [Schild et al. 2010]. Aktuellste Entwicklungen befassen sich mit der Einbindung von Vakuumisulationspaneelen in EPS. Durch ein System mit definierten Zuschnittbereichen und so genannten Riegelementen lässt sich mit einem hierfür entwickelten Optimierungsprogramm eine Belegung beliebiger Fassadenzergliederungen erreichen. Erste Referenzobjekte wurden mit dem System erfolgreich realisiert [Kubina 2011, Kolbe 2011].

Eine interessante Alternative zur Verwendung plattenförmiger, gebundener Materialien ist auch die Anwendung von vorgeständerten und wärmebrückentechnisch optimierten Trägerelementen und die anschließende Verfüllung der so entstandenen Kavitäten mit losen Dämmstoffen [Lignotrend 2013].

Die Konstruktion der Dämmung einer Außenwand hinter einer Bekleidung wird als vorgehängte, hinterlüftete Fassade bezeichnet. Die Fassadenverkleidung schützt

dabei die Dämmschicht vor Witterungseinflüssen wie Nässe und UV-Strahlung. Durch einen Abstand (mind. 20 mm) zwischen Dämmung und vorgehängter Fassadenverkleidung kann Nässe (Spritzwasser, durchdringender Niederschlag, Kondensat) ablüften. Das Material muss dauerhaft dimensionsstabil sein (kein Quellen oder Ausbauchen) um den geforderten Mindestabstand einzuhalten. Da im Sockelbereich ein erhöhter Feuchteeintrag durch Spritzwasser zu erwarten ist, dürfen dort nur feuchteunempfindliche Dämmstoffe (z. B. EPS, XPS, PU, Schaumglas) eingesetzt werden.

Im Bereich der Perimeterdämmung, damit bezeichnet man die außenseitige Dämmung erdberührter Teile, ist die Wahl an geeigneten Dämmstoffen aufgrund sehr hoher Anforderungen an Dauerhaftigkeit, Wasseraufnahme und Druckfestigkeit, insgesamt geringer. Perimeterdämmungen werden typischerweise mit Schaumglas, XPS und EPS Dämmstoffen ausgeführt. Neben der außenseitigen Dämmung der Kellerwand, ist auch die erdseitige Dämmung von Bodenplatten sowohl unter tragenden Bauteilen als auch in nicht lastabtragenden Anwendungen (Frostschürze von Fundamenten) möglich.

Möglichkeiten der Kerndämmung:

Im Bereich der nachträglichen Kerndämmung ist wie eingangs erwähnt meist nur wenig Platz zwischen Trag- und Blendschale vorhanden. Außerdem können oft nur sehr kleine Einfüllöffnungen angebracht werden. Um trotzdem eine gute Hohlräumfüllung zu gewährleisten werden deshalb zumeist ausgeprägt rieselfähige Materialien wie Perlite, Blähglas oder auch EPS-Granulat eingesetzt. Um den Nachteilen geringer Dämmstärken entgegen zu wirken ist der Einsatz von Produkten mit ausgeprägt niedriger Wärmeleitfähigkeit sinnvoll. Im Bereich der Kerndämmung können hier beispielsweise Aerogele eingesetzt werden, die durch eine Wärmeleitfähigkeit von ca. $0,015 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bereits bei geringen Schichtstärken den Wärmedurchgang signifikant reduzieren können. Wird eine Kerndämmung bereits während der Erstellung des Bauwerks geplant, so können auch matten-/plattenförmige Produkte (Hartschäume, Mineralfaser) eingesetzt werden. Da auch im Neubau der Abstand zwischen Trag- und Blendschale gering ist, ist auch hier der Einsatz von Dämmstoffen mit möglichst niedriger Wärmeleitfähigkeit (Aerogele, PU) vorteilhaft.

Möglichkeiten der Innendämmung:

Innendämmsysteme können mit verschiedensten Materialien ausgeführt werden. Um die Dämmschichtdicke und damit auch den Wohnraumverlust möglichst gering zu halten sind auch hier Produkte mit möglichst niedriger Wärmeleitfähigkeit zu bevorzugen. Mehr als 10 cm Dämmstärke werden selten realisiert. EPS, XPS, PU, Schaumglas, Gipskarton-Verbundplatten und VIP können direkt mit der Außenwand verklebt werden. Daneben existieren auch Systeme auf Basis von Holzfaserplatten, vorgeständerte Aufbauten die nachträglich ausgeblasen werden können oder im Nasssprühverfahren aufgetragene Dämmschichten aus Altpapierflocken. Wie beschrieben, sind Innendämmsysteme zwar bauphysikalisch anspruchsvoller, aber bei korrekter Auslegung schadensfrei zu betreiben. Konkrete Wandaufbauten können

heute mittels dynamischer Simulation des Wärme- und Feuchteverhaltens am Rechner nachgewiesen werden, oder Systeme durch Labor- und Praxisversuche verifiziert werden. Eine besondere Bedeutung bei Innendämmanwendungen kommt Kalziumsilikatschaumplatten zu. Durch das hohe Feuchterpuffervermögen und die gute Weiterleitung der Feuchte in der Platte sind Wandaufbauten aus diesem Material in einem gewissen Rahmen fehlertolerant gegenüber Tauwasserausfall. Da hier keine Dampfbremse verbaut wird, sondern die Platten diffusionsoffen verputzt werden, kann z. B. an der Grenzschicht zwischen Dämmstoff und Wand aufgenommenes Wasser in der Platte weitergeleitet werden und in Trockenperioden zum Raum hin ausdiffundieren.

Möglichkeiten der Dämmung im Holzbau:

Viele Dämmstoffe die im Bereich der Zwischensparrendämmung für Steildächer eingesetzt werden, können auch für die Dämmung in Holzrahmen- und Holztafelbauweise eingesetzt werden. Die dort angemerkten Vor- und Nachteile bzgl. Verschnitt und Setzungssicherheit gelten hier entsprechend. Matten- oder plattenförmige Materialien werden mit leichtem Übermaß zugeschnitten und zwischen die Holzständer geklemmt um Setzungen entgegenzuwirken. Bei losen Materialien kann unterschieden werden zwischen der Befüllung der Bauteile im Werk (vorgefertigte Wandelemente) und der Befüllung der Gefachabteilungen auf der Baustelle. Die Befüllung im Werk erfolgt entweder durch Einblasautomaten (pneumatische Einbringung z. B. von Mineralfaser- oder Altpapierflocken) oder durch mechanisches Einrütteln und anschließendes Verdichten (mechanische Einbringung z. B. von Hobelspanndämmstoffen). Auf der Baustelle sind die Gefache üblicherweise vollständig beplankt und können daher nur über entsprechende Einlassöffnungen durch pneumatische Einbringmethoden befüllt werden. Das Setzungsverhalten von Dämmstoffen und die Entwicklung neuer Prüfmethode ist mittlerweile Gegenstand von zahlreichen Untersuchungen geworden (u. a. [Svennerstedt 1986], [Tröger 2001], [Cammerer 2001], [Rasmussen 2002], [Cammerer und Spitzner 2004], [Rasmussen 2005], [Tremml und Engelhardt 2013], [Böck und Tremml 2013]). Bei fachgerechter Einbringung sind die Materialien langzeitstabil. Gleiches gilt für matten- und plattenförmige Materialien, die ebenfalls unkritisch bezüglich Setzungsphänomene unter Eigengewicht sind. Setzungserscheinungen lassen sich prinzipiell auf zwei im Wesentlichen unterschiedliche Mechanismen zurückführen. Einerseits wirken im Schüttgut Kriech- und Relaxationsverhalten, die zu einer langsamen Komprimierung einzelner Partikel und daraus folgender Volumenkomprimierung (Kriechen), beziehungsweise einem Spannungsabbau des komprimiert eingebrachten Materials und damit einhergehender Überwindung der Haftreibung durch Eigengewicht oder durch Lastereignisse von außen führen, andererseits können Volumenänderungen auch durch Umlagerung von Partikeln hin zur kleinsten geometrischen Packung erfolgen. Ein weiteres Phänomen wäre die Zerstörung einzelner poröser Partikel. Bei starren, annähernd kugelförmigen Partikeln wie Blähglas oder Perliten finden durch Umlagerungen und eventueller Zerstörung einzelner Partikel zwar Setzungen statt, diese können aber wirkungsvoll durch eingelegte, vorkomprimierte Mineralfaserstreifen ausgeglichen werden.

Kellerdecke

Die eingesetzten Dämmstoffe können matten- oder plattenförmige Materialien sein, die an der Decke verklebt oder verdübelt werden. Mattenförmige Materialien werden zwischen Decke und Unterkonstruktion montiert, Platten mit ausreichender Eigensteifigkeit können direkt an der Decke montiert werden. Ebenfalls denkbar sind Verbundplatten aus Dämmstoffen und Plattenwerkstoffen. Bei besonderen Anforderungen an die Akustik sind vorzugsweise faserförmige Materialien (ausreichend hoher Strömungswiderstand) zu verwenden.

Einschränkungen der Dämmschichtdicke ergeben sich bei niedrig ausgeführten Kellern oder durch Installationen in Form von Heizungsrohren, u. ä. die oftmals an der Decke installiert sind. Zumindest ist hier gegebenenfalls der Aufwand einer eventuellen Neuverlegung mit größerem Abstand zur Rohdecke einzukalkulieren.

3.5 Marktentwicklung

Im Jahr 2010 wurden in Deutschland ca. 28 Mio. m³ Dämmstoffe verkauft. In der EU wurden im gleichen Jahr ca. 193 Mio. m³ auf den Markt gebracht [GDI 2013]. In Abbildung 27 ist die Entwicklung der Absatzzahlen des Baustoffhandels für Dämmstoffe in Deutschland aufgezeigt und das Aufkommen auf die wichtigsten Materialgruppen verteilt.

Auffällig ist, dass sich die Anteile zwischen den gezeigten Materialgruppen über die Jahre prozentual nicht wesentlich verschoben haben. Wie zu erkennen ist Mineralwolle (ca. 55 %) mengenmäßig das wichtigste Material für Dämmstoffe, gefolgt von EPS-Hartschaum (ca. 32 %).

Die in den Jahren von 1990 bis 1995 deutlich steigenden Absätze sind auf den in dieser Zeit anzusiedelnden starken Aufschwung der Baubranche zurückzuführen. Nach 1995 ist eine Rezession in der Baubranche festzustellen, die sich auch auf die Absätze im Dämmstoffmarkt auswirkt – die Absatzzahlen sinken in dieser Zeit. Ab etwa 2005 wurde die Talsohle durchschritten und die Absätze steigen seitdem wieder.

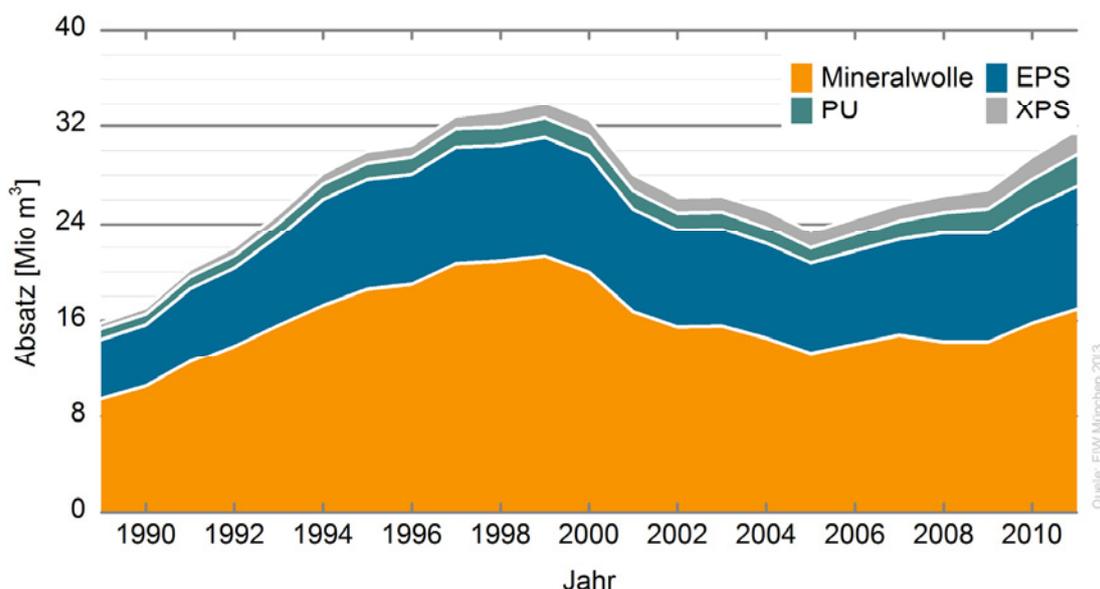


Abbildung 27: Absatz der wichtigsten Dämmstoffe in Deutschland in Mio m³ pro Jahr (1989 – 2011) [GDI 2013]

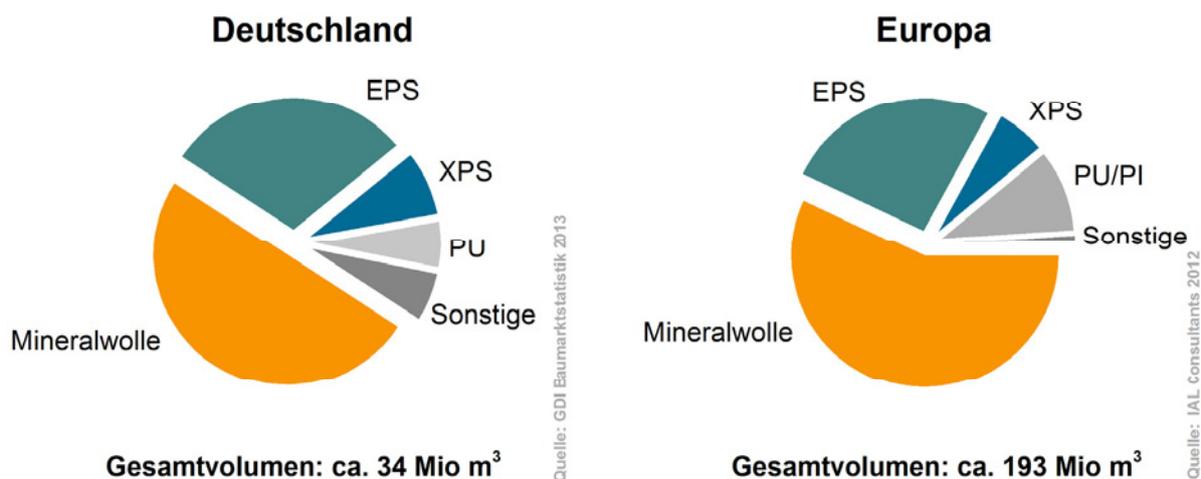


Abbildung 28: Marktanteile der wichtigsten Dämmstoffe in Deutschland nach Daten des Gesamtverbands der Dämmstoffindustrie für das Jahr 2011 im Vergleich zu Europa

Eine Studie der Interconnection Consulting Group (IC) zum Dämmstoffmarkt in Deutschland konstatiert, entgegen der Verbrauchsfortschreibung durch den GDI, eine eher defizitäre Marktentwicklung bis einschließlich 2010 und beobachtet erst ab dem Jahr 2011 wieder leicht steigende Verkaufszahlen. Der Absatz an Dämmstoffen in Deutschland stieg demzufolge von 2010 bis 2011 mengenmäßig um 5,7 %. Wertmäßig wächst der Markt in diesem Zeitraum um 8,2 %, was den Einfluss der Verteuerung von Energie und Rohstoffen in der Produktion auf die Preisentwicklung widerspiegelt. Insgesamt ist der größte Teil der Zuwachsraten mit + 19,3 % auf den Bereich des Wohngebäudebaus zurückzuführen, gegenüber dem Nichtwohngebäudebereich, der lediglich um + 3,3 % wächst. Unterschieden nach Neubau und Sa-

nierungsaktivitäten kann festgestellt werden, dass in beiden Marktsegmenten von 2011 auf 2012 ähnliche Zuwachsraten (ca. + 12 %) verzeichnet werden können, wobei auf den Bereich Neubau mengenmäßig etwas mehr Material entfällt (Neubau 2011 ca. 11,547 Mio. m³, Sanierung 2011 ca. 9,719 Mio. m³). Die Verteilung des Dämmstoffeinsatzes auf die Bereiche Neubau und Sanierung bzw. Wohnungsbau und Nichtwohnungsbau zeigt Abbildung 30. [IC 2013]

Interessant ist auch die Verteilung auf die unterschiedlichen Anwendungen (Abbildung 29). Der Bereich der Außenwände ist mit ca. 53 % die wichtigste Anwendung, gefolgt von Maßnahmen im Dachbereich mit ca. 23 %. Innenwandanwendungen wie zum Beispiel Trennwände sind für ca. 11 % des Marktvolumens verantwortlich, gefolgt von Dämmungen der Böden mit ca. 8 % - diese enthalten auch die Dämmung der obersten Geschossdecke, wenn das Dachgeschoss nicht beheizt wird. Verschiebungen in den Marktanteilen sind relativ gering (alle Produktgruppen weisen ähnliche Zuwachsraten auf), mit Ausnahme des Bereichs Böden, der von 2011 auf 2012 deutlich stärker gewachsen ist als die anderen Anwendungsbereiche [IC 2013]. Dieses Zuwachplus könnte auf stärkere Aktivitäten im Bereich der Dämmung der obersten Geschossdecke zurückzuführen sein, nachdem seit der EnEV 2009 diese Maßnahme auch bei Bestandsgebäuden vorgeschrieben ist.

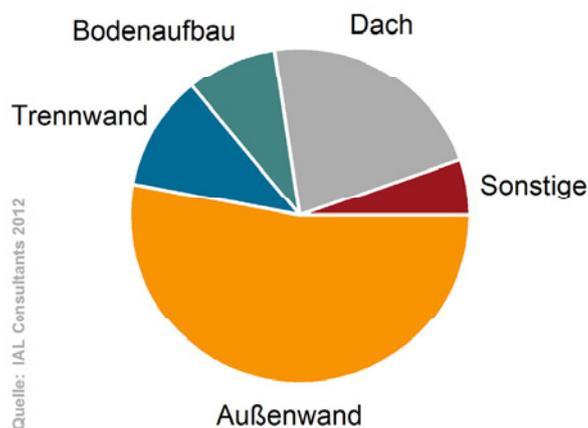


Abbildung 29: Einsatzort der in Deutschland verwendeten Dämmstoffe.

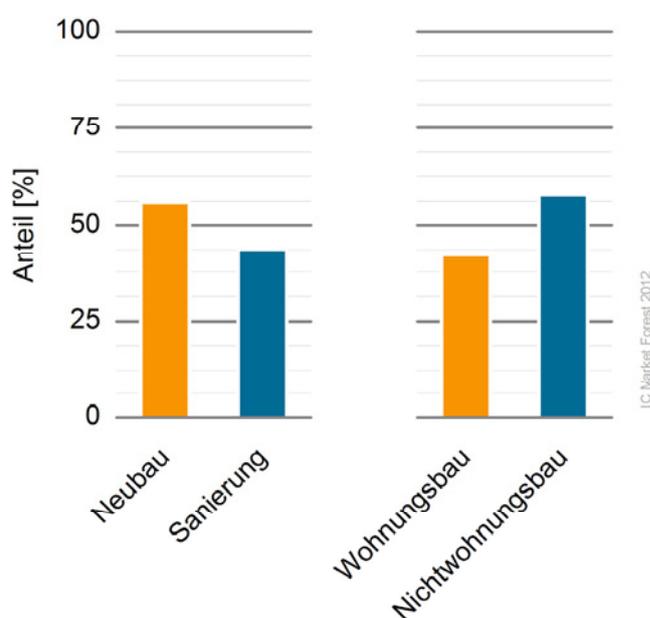


Abbildung 30: Einsatzort der in Deutschland verwendeten Dämmstoffe gegliedert nach Neubau und Sanierung bzw. Gebäudetyp

3.6 Verfügbarkeit alternativer Dämmstoffe

Neben den bekannten Dämmstoffen wie Mineralwolle, EPS, PU und XPS sind in den Statistiken auch „Sonstige“ Materialien erwähnt. Unter diese Bezeichnung fallen in erster Linie die sogenannten „alternativen Dämmstoffe“ auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Innerhalb dieser Untergruppe sind vor allem Holzfaserdämmstoffe und Recyclingfasern aus Altpapier mengenmäßig bedeutsam. Im Bereich der Nutzung von Ein-Jahrespflanzen sind außerdem Produkte aus Flachs- und Hanffasern, bzw. –schäben erwähnenswert. Bei der Nutzung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen besteht das Problem einer begrenzten Flächenverfügbarkeit, das dem Problem der Endlichkeit erdölbasierender Produkte gegenübersteht. Die häufig geforderte verstärkte Verwendung von natürlichen organischen Dämmstoffen hat also, wie schon in [Eicke-Hennig], aufbauend auf [Fischer 1996], erläutert, ökologische und technische Grenzen, die auch heute noch Gültigkeit haben.

„Bereits heute, aber noch mehr für eine erforderliche Verstärkung des Dämmstoffmarktes, reicht die Verfügbarkeit von Pflanzenfasern für Dämmstoffe nicht aus. Ihre Produktion ist auch ohne Marktausweitung bereits vielerorts in der 3. Welt mit dem Umweltproblem Land-Übernutzung, Überdüngung, Erosion, Pestizideinsätzen verbunden. [Eicke-Henning 1996]

Aber auch das Potential zur Nutzung der heimischen Wälder ist endlich [SRU 2012], auch wenn die noch vorhandenen Einschlagpotentiale in Relation zu (aus forstlicher Sicht) „Nischenanwendungen“ wie Holzfaserdämmstoffen immer noch groß sind. Durch die verstärkte energetische Nutzung des Rohstoffs Holz, ist zudem in den

letzten Jahren eine Konkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Nutzung entstanden, die sich weiter zuspitzen wird. In diesem Zusammenhang sollte die sinnvolle Reihenfolge der Rohstoffnutzung hinterfragt werden, wobei eine möglichst langfristige stoffliche Nutzung (z. B. in Bauprodukten wie Dämmstoffen) einer energetischen Nutzung vorausgehen sollte.

In [Eicke-Hennig 1997] wird für das Jahr 1997 für Naturfaserdämmstoffe ein Marktanteil von ca. 5 % festgestellt und der Autor prognostiziert langfristig einen Marktanteil von max. 9 – 13 %. Diese Zahlen scheinen auch jetzt, mehr als 16 Jahre später, immer noch nicht erreicht, was zum Teil aber auch in einem Problem der Erfassungssystematik begründet sein kann. Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe werden oft nicht über den Großhandel an den Endkunden verkauft, sondern entweder direkt über die Hersteller vertrieben, bzw. von spezialisierten Fachbetrieben angeboten, weshalb diese in zentral erfassten Statistiken eventuell unterrepräsentiert sind.

Die Statistiken der FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) beinhalten Absatzzahlen von forstlichen Produkten. Wertet man die Jahresproduktion sowie Import und Export der Produktgruppe „Insulation boards“ für Deutschland aus, so lässt sich eine Verbrauchsentwicklung für Holzfaserdämmplatten über die letzten Jahrzehnte erstellen (Abbildung 31) [FAO 2013].

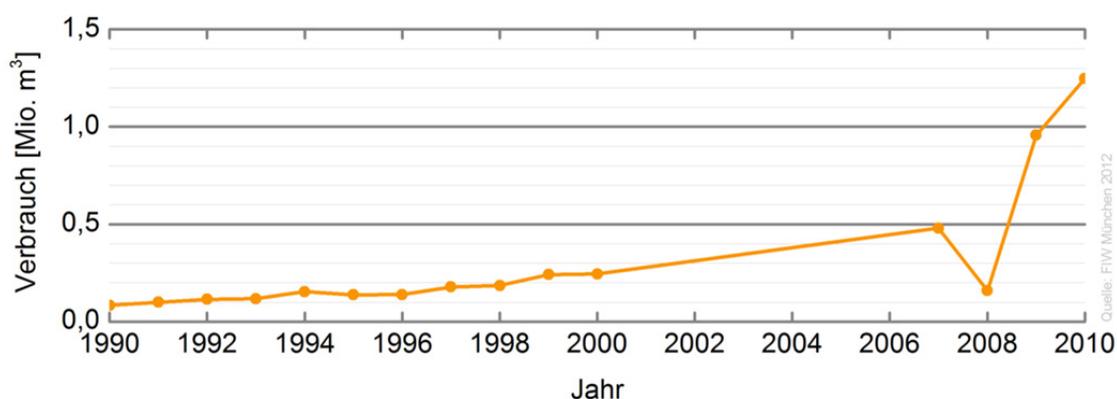


Abbildung 31: Verbrauch an Holzfaserdämmplatten, Daten aus [FAO 2013] und eigene Berechnungen

Wie zu sehen, ist von 2008 bis 2010 ein deutlicher Anstieg im Verbrauch zu erkennen. Im Jahr 2010 werden ca. 1,25 Mio. m³ Holzfaserdämmplatten verbraucht. Dies allein entspräche ca. 4,5 % der Gesamtmenge an Dämmstoffen in Deutschland und liegt damit in einem Bereich der in den Statistiken dieses Jahres für die gesamte Produktgruppe von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen angegeben wird.

4 Innovationen

Mit den steigenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden sind in den letzten Jahrzehnten leistungsfähige Dämmstoffe entstanden, die Anwendungsbereiche ausgeweitet und neue Verarbeitungstechniken entwickelt worden. Gerade in der Gebäudehülle sind in den letzten Jahren zahlreiche Innovationen entstanden, die im Vergleich zu anderen Branchen zu deutlich größeren Steigerungen der Energieeffizienz geführt haben; u. a. die Entwicklung von VIP (Vakuum-Isolations-Paneele), VIG (Vakuum-Isolierglas) oder Nanotechnologien zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeiten (z. B. Aerogele). Diese Innovationen – hin zu deutlich dünneren und effektiveren Dämmungen bei gleichzeitig nur geringen Preissteigerungen – werden bisher allerdings zu wenig herausgestellt.

4.1 Physikalischer Hintergrund

Was hat sich in den vergangenen zehn Jahren geändert, um den gestiegenen Anforderungen an die Energieeinsparung gerecht zu werden? Beispielsweise wurde der maximal zulässige U-Wert für die Außenwanddämmung bei Sanierung im Bestand von $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ in 2002 auf $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ in 2009 um 40 % verändert. Das hat natürlich Folgen: Bei den sogenannten konventionellen Dämmstoffen entsteht bzw. entstand ein erheblicher Optimierungsdruck, der vor allem die Verringerung der Wärmeleitfähigkeit betraf und noch immer betrifft. Durch die Verbesserung der wärmetechnischen Eigenschaften steigen die verbauten Dämmdicken, trotz deutlich gestiegener Anforderungen an die wärmeübertragende Hülle des Gebäudes, nur moderat. Die wärmedämmende Wirkung des Dämmstoffes wird durch dessen Wärmeleitfähigkeit beschrieben. Bei porösen Stoffen ist es – im Gegensatz zur „echten“ Wärmeleitung (z. B. in Metallen) - eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit, die vom Wärmedurchlasswiderstand R der Dämmstoffplatte abgeleitet wird. Sie ist von der Temperatur, der Rohdichte und Struktur des Dämmstoffes abhängig und enthält die folgenden Anteile:

- Wärmeleitung des ruhenden Gases (meistens Luft) in den Zwischenräumen des Materiales
- Wärmestrahlung
 - In den Hohlräumen des Stoffes, bzw. zwischen den Fasern
 - zwischen den äußeren Begrenzungsflächen der gesamten Dämmschicht (bei Dämmstoffen geringer Rohdichte)
- Wärmeleitung über das Feststoffgerüst (die Fasern bzw. die Hohlraumbegrenzungen)
- Konvektion im Dämmstoff (nur bei tiefen Temperaturen und/oder sehr geringen Rohdichten).

Die meisten Dämmstoffe zeigen eine mehr oder weniger ausgeprägte Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte. Diese Abhängigkeit variiert je nach Materialgruppe mitunter beträchtlich; vor allem bei sehr geringen Rohdichten ist der Ein-

fluss ausgeprägt. Viele Dämmstoffe haben im Rohdichtebereich von ca. 30 bis 70 kg/m³ ein Minimum der Wärmeleitfähigkeit. Mit steigender Rohdichte steigt die Wärmeleitfähigkeit dann wieder an. Die Herausforderung bei der Produktentwicklung besteht nun darin, einen Bereich optimaler Wärmeleitfähigkeit mit ausreichenden mechanischen Eigenschaften zu finden. Die mechanischen Eigenschaften verbessern sich mit steigender Rohdichte oft in einem Bereich, in dem das Minimum der Wärmeleitfähigkeit schon wieder überschritten ist. Nicht zuletzt bedeutet eine höhere Rohdichte auch höhere Materialkosten. Die Optimierungen der letzten Jahre bewegen sich in diesem Spannungsfeld aus mechanischen Eigenschaften, Wärmeleitfähigkeit und Materialkosten.

Die prinzipielle Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur und der Rohdichte wird am Beispiel der Mineralwolle aus Abbildung 32 (Rohdichte) sowie Abbildung 33 (Temperatur) ersichtlich. Die Kurvenverläufe sind für geschäumte Dämmstoffe ähnlich, zeigen aber etwas andere Steigungen und aufgrund der Zellstruktur auch bei geringen Rohdichten keine Konvektion. Bei der Optimierung der Wärmedämmstoffe ist zur gezielten Reduktion der Wärmeleitfähigkeit eine genaue Erfassung aller Anteile notwendig. So lässt sich z. B. die Wärmeleitfähigkeit von geschlossenzelligen Schäumen über die Verwendung von Zellgasen mit gegenüber Luft deutlich verminderter Wärmeleitfähigkeit und/oder durch die Verkleinerung der Porengröße (z. B. bis in den nm-Bereich) vermindern.

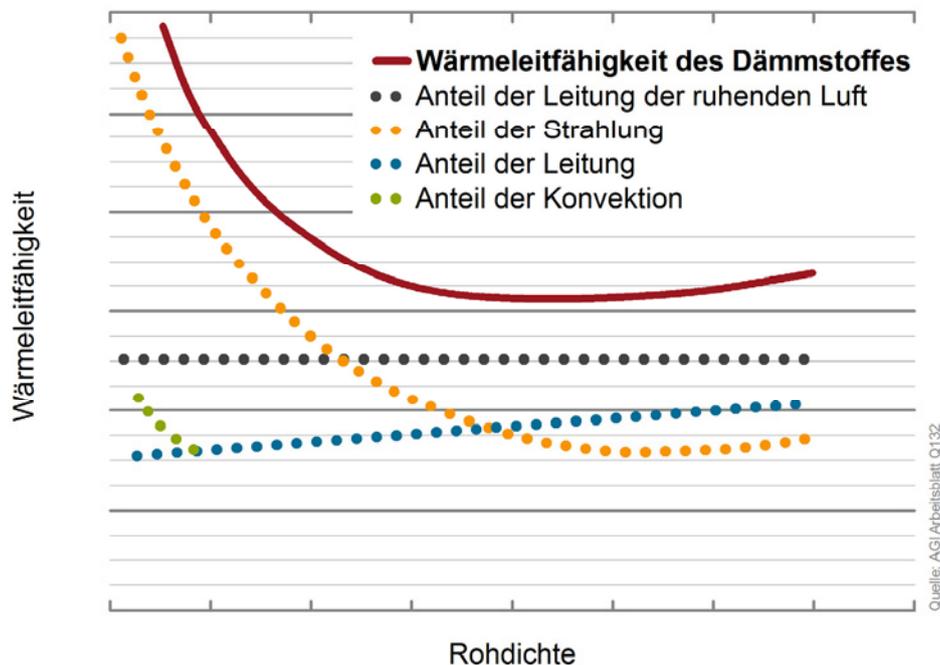


Abbildung 32: Prinzipielle Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte bei einer bestimmten Temperatur am Beispiel von Mineralwolle

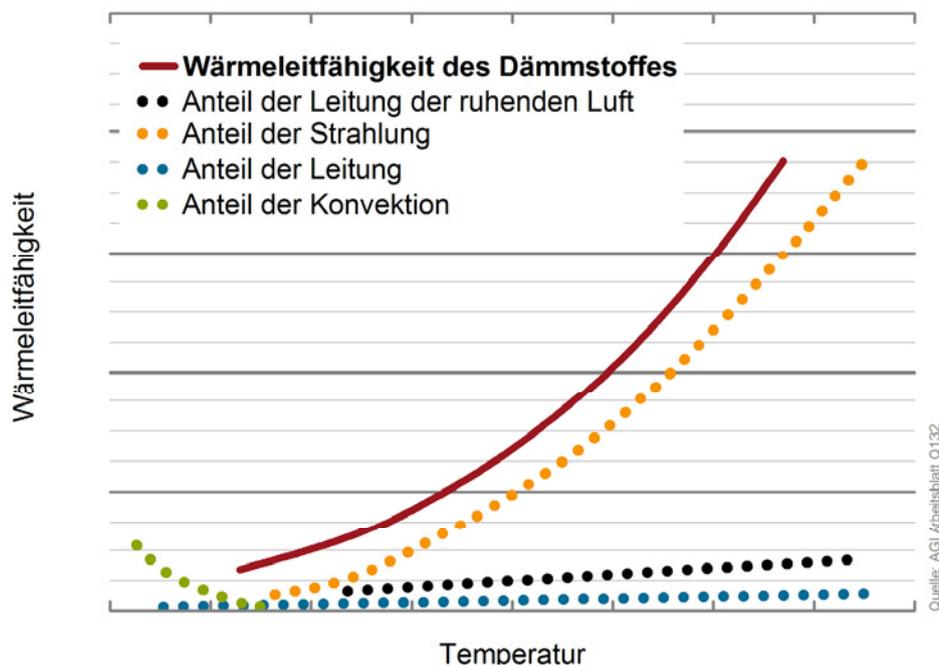


Abbildung 33: Prinzipielle Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur für eine bestimmte Rohdichte am Beispiel von Mineralwolle

4.2 Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit bei Dämmstoffen

Neue Werte bei der Mineralwolle

Nachfolgende Grafik (Abbildung 34) stellt Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für Mineralwolleprodukte seit 1975 dar, die vom FIW München überwacht wurden. Aufgelistet ist der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für das Produkt mit der niedrigsten Wärmeleitfähigkeit in dem betreffenden Jahr. Mineralwolleprodukte der Wärmeleitfähigkeitsstufe 035 sind schon seit 1979/1980 nachweisbar. Zwischen 1980 und 2003 stand die Entwicklung scheinbar still, was vor allem an der nationalen Norm für Dämmstoffe (DIN 18165) lag, die nur Abstufungen in 5 mW-Schritten zuließ. Durch die Freigabe der 1 mW/(m·K) Abstufung im Zusammenhang mit der Einführung der harmonisierten Produktnorm für Mineralwolle in DIN EN 13162 wurde eine Produktoptimierung bei der Wärmeleitfähigkeit angestoßen. Nun waren nach 035 auch andere Stufen wie 034, 033 etc. erreichbar. Die physikalische Grenze ist bei 0,029 W/(m·K) zu sehen. Eine weitere Reduzierung über die physikalische Grenze hinaus ist nur über die Kombination mit einem nanoporösen Dämmstoff wie beispielsweise mit Aerogelen möglich. Hier findet man derzeit auf dem Markt Produkte mit 0,019 W/(m·K) (Abbildung 34). Solche Produkte sind natürlich entsprechend teurer, bieten aber z. B. in der Innendämmung, wo aus Gründen des Raumverlusts die Dämmschichtdicke möglichst begrenzt sein sollte, interessante Anwendungsmöglichkeiten.

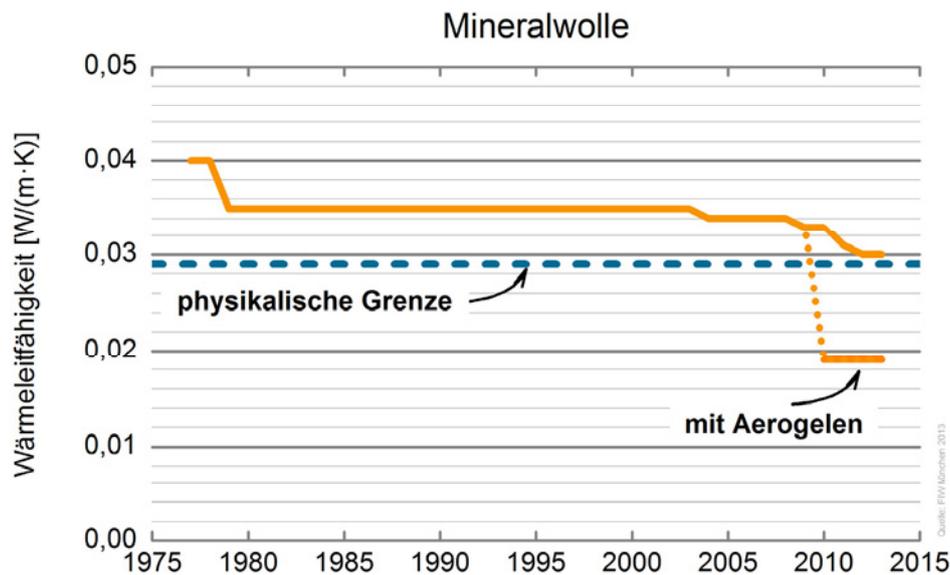


Abbildung 34: Darstellung der Weiterentwicklung von Mineralwolle hinsichtlich der Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit seit 1975 – Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Produkts mit der besten wärmetechnischen Performance im jeweiligen Jahr

Verbesserung bei EPS durch Wärmestrahlungsabsorber (graues EPS)

In Abbildung 35 wird gezeigt, wie der Unterschied der Wärmeleitfähigkeit der beiden verschiedenen Typen von EPS aussieht. Bei weißem EPS ist der Anteil der Strahlung an der Wärmeleitfähigkeit höher als bei grauem EPS. Durch das Einbringen von Infrarot-reflektierenden Partikeln in die Struktur der EPS-Perlen (z. B. fein verteiltes Graphit, Aluminium-Flitter, etc.) kann der durch Infrarot-Strahlung verursachte Wärmetransport deutlich reduziert werden. Die Wärmestrahlung trägt aufgrund der relativ geringen Schaumdichte selbst bei Raumtemperatur noch erheblich zur Gesamt-Wärmeleitfähigkeit bei. Im rechten Teil von Abbildung 35 werden die Komponenten der Wärmeleitfähigkeit gezeigt. Bei weißem EPS-Schaum erfolgt über 25 % des Wärmetransports durch Strahlung.

Die Entwicklung des mit Aluminiumpartikeln Infrarot-getrübbten Schaums erfolgte ursprünglich in einem Projekt mit ganz anderer Zielsetzung: Es sollte ein Schaum entwickelt werden, der die gleichen wärmetechnischen Eigenschaften mit deutlich verringerter Rohdichte erreicht. Erst mit dem Inkrafttreten der harmonisierten europäischen Produktnormen und der Möglichkeit zur feineren Abstufung der Bemessungswerte in 1 mW/(m·K) Schritten, wurde diese Materialentwicklung umgekehrt genutzt: Die Rohdichte wurde nicht verringert, um die Vorteile bei der Wärmeleitfähigkeit ausnutzen zu können. Die Infrarot-Trübung basiert auf der Rück-Streuung von Wärmestrahlung an den Aluminiumpartikeln. Alternativ können dem EPS-Schaum auch Graphitpartikel beigefügt werden, die ebenfalls die Wärmestrahlung reflektieren. In beiden Fällen ergibt sich eine Verbesserung des Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit von 0,040 auf 0,035 W/(m·K) schon ab einer Rohdichte von

ca. 12 kg/m^3 . Für Material mit einer Rohdichte von ca. 22 bis 28 kg/m^3 können mit grauem EPS Bemessungswerte von bis zu $0,031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ erzielt werden.

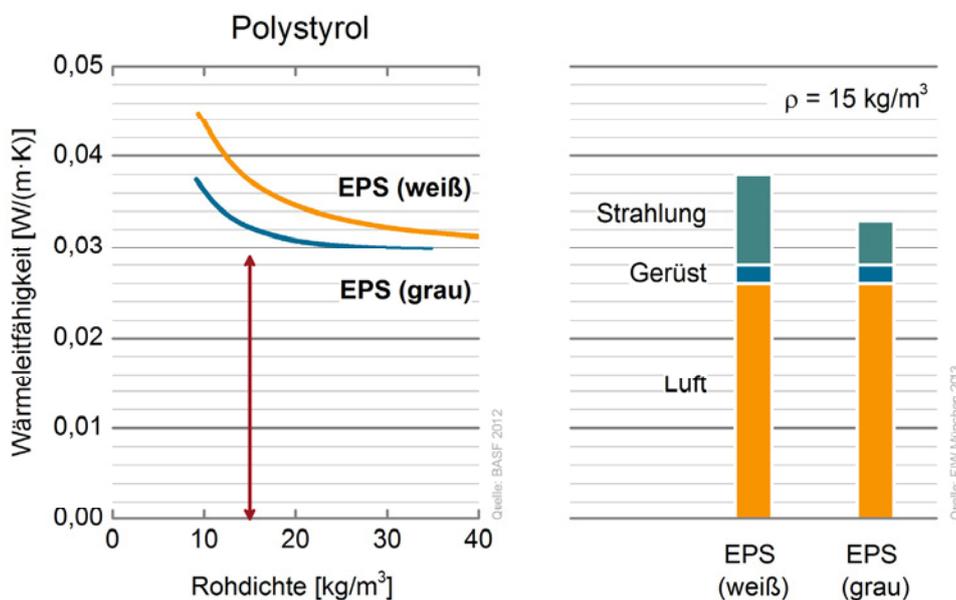


Abbildung 35: Innovationssprung bei Polystyrol - Einführung von grauem EPS

Graue EPS Dämmstoffe bieten eine höhere Dämmleistung und ermöglichen einen bis zu 30 Prozent niedrigeren Rohstoffeinsatz als herkömmliches EPS. Mit grauem EPS werden vor allem bei Dämmstoffen mit sehr niedrigen Rohdichten wesentlich verbesserte Dämmwirkungen erreicht. Aus Abbildung 35 wird ersichtlich, dass Dämmstoffe aus grauem EPS mit der Rohdichte 15 kg/m^3 beispielsweise eine Wärmeleitfähigkeit von $0,032 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ erreichen können. Bei weißem EPS gleicher Rohdichte liegt die Wärmeleitfähigkeit bei $0,035$ bis $0,037 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

XPS

Auch beim extrudierten Polystyrol (XPS) ging die Entwicklung in den letzten Jahren hin zu niedrigeren Wärmeleitfähigkeiten, aber auch zu höheren Dämmdicken, die entweder durch dickere Platten, oder durch mehrlagige Verlegung realisiert wurden.

Durch die Verwendung von Treibmitteln wie HFKW 134a oder HFO 1234ze sind Wärmeleitfähigkeitswerte von $0,028 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bis $0,031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ erreichbar, wobei das Treibhauspotential von 134a sehr hoch ist. HFKW 134a wird zukünftig nicht mehr verwendet werden. HFO 1234ze kann hier eine Alternative sein, wobei die Kosten für dieses Gas deutlich höher sind. Hier werden die gleichen wärmetechnischen Eigenschaften wie bei der Schäumung mit HFKW 134a erreicht, wobei das Treibhauspotential aber deutlich geringer ist.

Durch die Verwendung von Infrarot-reflektierenden Partikeln (z. B. Graphit) kann auch beim XPS – ähnlich wie bei grauem EPS - eine deutliche Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit erreicht werden. Die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit kann bis zu 20 % betragen [Winterling H. und Sonntag N. 2011]. Solche grauen XPS-Produkte wurden in den letzten Jahren von verschiedenen Herstellern auf den Markt gebracht. Durch die höhere Dämmleistung der grauen Platten kann die Dämmdicke bei gleichbleibendem U-Wert reduziert werden, was vor allem für die Anwendung als Innendämmung an Wand, Boden und Decke interessant ist. In der Anwendung als Perimeterdämmung und im Umkehrdach werden üblicherweise aber die gleichen Dämmdicken wie beim farbigen XPS verbaut, was dann zu günstigeren U-Werten für die Konstruktion führt. Graues XPS enthält als Zellgas ausschließlich Luft und besitzt die gleichen Eigenschaften wie das bewährte farbige XPS. Bunge F. und Merkel H. beschreiben eine mögliche Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit von 0,034 W/(m·K) auf 0,031 W/(m·K) durch die Verwendung von feinverteiltem und in die Polymermatrix eingebundenem Grafit [Bunge und Merkel 2011].

Ein ähnlicher Ansatz wird derzeit an der Universität Bayreuth verfolgt. Durch die Beimengung von Graphen (etwa 1 M-%) in Polystyrol-Schäumen können einerseits deutlich kleinere Zellgrößen von ca. 25 µm realisiert werden, andererseits wird auch die Durchlässigkeit für infrarote Strahlung gesenkt. Graphene sind so genannte Riesenmoleküle mit Abmessungen von rund 350 nm x 10 nm, die aus Netzwerken von Kohlenstoffatomen in Form von sechseckigen Waben bestehen. Die Arbeit ist ein Teilprojekt des Forschungsverbunds FUNgraphen, der vom Freiburger Materialforschungszentrum (FMF) koordiniert wird. [Uni Bayreuth 2013]

Die Wärmeleitfähigkeit kann darüber hinaus nur noch durch deutliche Verkleinerung der Porengröße verringert werden. Aktuell kann dies nur mit großem Aufwand und mit hohem Energieeinsatz (z. B. hohe Drücke bei der Herstellung) realisiert werden. Bessere Dämmwerte für Bauteile können aber auch über größere Schichtdicken erreicht werden. Ausgehend von mehrlagigen, vom Hersteller verklebten Systemen, wurden nach und nach auch unverklebte Systeme entwickelt. Wichtig ist hier vor allem die bauaufsichtliche Zulassung für das Umkehrdach, die für mehrere Typen realisiert werden konnte. Damit kann die konstruktiv vorteilhafte Umkehrdachkonstruktion für Flachdächer auch für sehr hoch wärmedämmende Gebäude genutzt werden. Möglich ist die mehrlagige Verlegung bis zu einer Dämmdicke von 400 mm. Andere Weiterentwicklungen betreffen vor allem die mechanischen Eigenschaften und die Temperaturbeständigkeit, die bis auf eine Anwendungsgrenztemperatur von 105°C gesteigert werden konnte, was vor allem für Anwendungen aus der technischen Wärmedämmung (z. B. für solare Brauchwasserspeicher) interessant ist.

Weitere wichtige Weiterentwicklungen betreffen die Auswirkungen von XPS auf die Umwelt. Seit 1995 haben die meisten Hersteller von XPS ihre Produktion auf das Treibmittel CO₂ umgestellt. Die beim Schäumvorgang frei werdende Menge CO₂ wird durch die wärmedämmende Wirkung des Dämmstoffs oft bereits nach kurzer Amortisationszeit am Gebäude wieder eingespart. Aus Sicht des Treibhauspotenti-

als rechnet sich der Einsatz von XPS bereits oft in der ersten Heizperiode. Aktuell vollziehen die Hersteller den Wechsel des brandhemmenden Zusatzstoffes HBCD. Da HBCD ab 2015 nicht mehr verwendet werden darf, wurde ein bromiertes polymeres Flammschutzmittel entwickelt, dass derzeit getestet wird und zukünftig HBCD ersetzen kann.

Polyurethan-Dämmstoffe

Die Weiterentwicklungen bei PU der letzten Jahre sind aus der Entwicklung der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit abzulesen. Systeme ohne Aluminiumkaschierung der Dämmplatten hatten vor einigen Jahren noch typischerweise Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von $0,030 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Diese wurden nach und nach auf $0,029$, $0,027$, $0,026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (Mineralvliesdeckschichten, dickenabhängig) bzw. $0,024$, $0,023 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (bei Aludeckschichten, dickenabhängig) reduziert.

Durch die gezielte Veränderung der Steigzeit und der Gelzeit bei der Herstellung der PU-Schäume kann die Form der Zellen beeinflusst werden. Für eine niedrige Wärmeleitfähigkeit sind linsenförmige Zellen sinnvoll, da hierdurch mehr Zellen (Poren) hintereinander in der Wärmestromrichtung angeordnet werden können. Die Hersteller haben das über optimierte Bandanlagen und Schäumformen realisiert, die den Schaumkuchen etwas höher aufgehen lassen und ihn anschließend auf die End-Dicke zusammendrücken (siehe auch Abbildung 36).



Abbildung 36: Untersuchung der Zellform und der Ausdehnung der Zellen eines PU-Schaums zur Optimierung der Wärmeleitfähigkeit. Der blaue Pfeil zeigt die Band-Vorschubrichtung bei der Herstellung. Der Schaum steigt bei der Herstellung von unten nach oben. Bild: FIW München

Durch die Verwendung von n-Pentan, i-Pentan und c-Pentan und deren Mischungen als Treibmittel konnten die Hersteller die wärmetechnische Qualität in den letzten Jahren noch weiter steigern. Platten mit Aluminiumkaschierung erreichen mittlerweile Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von 0,022 bis 0,023 W/(m·K).

Theoretisch möglich sind Verringerungen der Wärmeleitfähigkeit bis hin zur physikalischen Grenze von etwa 0,012 W/(m·K). An der hierfür notwendigen Verringerung der mittleren Zellgröße in Größenordnungen unter 1 µm wird von den Herstellern aktuell geforscht. Erste wegweisende Ergebnisse wurden z. B. von Chau V. beim „International Symposium on Superinsulating Materials“ in Brüssel vorgestellt [Chau 2012]. Ebenfalls auf der Veranstaltung in Brüssel vorgestellt wurden Entwicklungen zur Herstellung eines leichten Nanoschaum zur Wärmedämmung [Lindner 2012]. Aktuell werden hiermit Zellgrößen von ca. 3 bis 4 µm erreicht; gegenüber herkömmlichen PU-Schäumen mit 100 bis 150 µm mittlerer Zellgröße eine deutliche Verbesserung. Die Reduzierung der Zellgröße wird durch Mikroemulsionen speziell eingestellter PU-Komponenten erreicht, die unter überkritischen Bedingungen zur Reaktion gebracht werden.

Ein Beispiel für eine aktuelle Produktentwicklung in diesem Bereich ist ein neu entwickeltes Polyurethan-Aerogel, das als mechanisch stabile Platte hergestellt werden kann (Abbildung 37). Die Aerogelplatte ist offenzellig, damit wasserdampfdurchlässig und hat eine gemessene Wärmeleitfähigkeit von kleiner 0,016 W/(m K). An der Baustelle kann die Dämmplatte mit herkömmlichen Werkzeugen verarbeitet werden. Ab 2014 werden Mustermengen des neuen Dämmstoffs verfügbar sein. [BASF 2013]



Abbildung 37: Polyurethan-Aerogel als Platte

Das Ziel ist es, eine mittlere Porengröße von ca. $0,5 \mu\text{m}$ zu erreichen, um den Smoluchovsky-Effekt für die Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit des in den Poren eingeschlossenen Gases nutzen zu können. Ab einer bestimmten Porengröße können Gasmoleküle nicht mehr durch Zusammenstöße untereinander Wärme übertragen. Die Gasmoleküle stoßen nur noch an die Zellwände, wenn die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle deutlich größer ist als die Abmessungen der Poren. Das Verhältnis von mittlerer freier Weglänge zum Abstand der Porenwände wird auch als Knudsenzahl Kn bezeichnet. Die Luftwärmeleitung ist dann ausgeschaltet, wenn $Kn \gg 1$ ist. In der Folge reduziert sich der Anteil der Wärmeleitung des ruhenden Gases und die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Stoffes sinkt [Zeitler 2000].

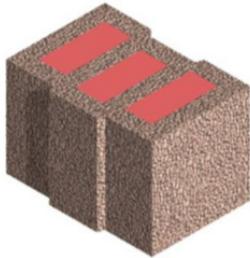
Gerade im Bereich der PU-Dämmstoffe wurde eine ganze Reihe von Produkten entwickelt, die neben günstigen Werten der Wärmeleitfähigkeit vor allem durch den Systemgedanken und die Reduzierung des Aufwands beim Einbau effizienter geworden sind. Beispielsweise hat sich bei der multifunktionalen Aufsparren-Dämmung eine neue Lösung ergeben, die neben der Dämmung auch die Unterdeckung und damit die Abdichtung des Daches in einem Arbeitsschritt herstellt. Weiterhin werden Konstruktionselemente mit Polyurethan-Kern für Dachgauben (Traufbohlen, Dachfensterdämmzargen, Attikaelemente) eingesetzt, die gerade an diesen schadensanfälligen Bauteilen zu größerer Sicherheit gegenüber Bauschäden geführt haben. Die durchdachten Fertigteile und Systemlösungen führen zu einer vollflächigen, wärmebrückenfreien Dämmschicht auf den Sparren, aber auch zwischen und unter den Sparren, sowie bei Einbau- und Anbauteilen. Eine leistungsfähige PU-Aufsparrendämmung und ein wirksamer Sonnenschutz der Dachfenster mit außen liegenden Jalousien, Markisen oder Rollläden reduzieren den Wärmefluss von außen nach innen spürbar. Die in der Norm DIN 4108-2 angegebene Zeit und die Höhe der Temperaturüberschreitung in einem gut gedämmten Dach beträgt „null“ [Holm et al. 2013a].

4.3 Verbesserung bei der dämmenden Wand

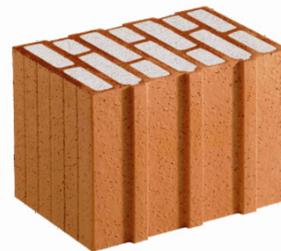
Die wärmetechnische Weiterentwicklung von Mauersteinen in den letzten 12 Jahren hat zu einer weiten Verbreitung gefüllter Steine, insbesondere gefüllter Ziegel geführt. Trotzdem gibt es gelegentlich kritische Stimmen hinsichtlich des bauphysikalischen Zusammenwirkens der beteiligten Materialien, insbesondere aufgrund der teilweise einseitigen Ausrichtung der Steinentwicklungen auf die Verbesserung des Wärmeschutzes. Mit Ausnahme von Porenbeton, der weiterhin ausschließlich homogen angeboten wird, gibt es am Markt eine Vielzahl von Mauersteinen aus Ziegel oder Leichtbeton, die mit unterschiedlichsten Füllmaterialien angeboten werden. Viele Hersteller entwickelten eigens neue Steinbilder, die von Anfang an für eine Füllung mit Dämmstoff vorgesehen waren (Abbildung 38). Nennenswerte Entwicklungen in dieser Richtung lassen sich z. B. bei den Herstellern von Leichtbeton-Hohlblocksteinen bis in die 1980er Jahre zurückverfolgen. Auf breiter Front durch-

setzen konnte sich allerdings erst ein in den späten 1990er Jahren entwickelter Hochlochziegel mit großen Kammern, die mit Perliten gefüllt werden.

Füllung mit Phenolharz-Hartschaum



Füllung mit Perlite



Füllung mit Mineralwolle



Füllung mit Mineralgranulat



Abbildung 38: Abbildungen verschiedener gefüllter Mauersteine

Mit den zunehmend höheren Anforderungen an den Wärmeschutz neu errichteter Gebäude, im Zuge des Ersatzes der Wärmeschutzverordnung 1995 durch die Energieeinsparverordnung EnEV im Jahr 2002 und in den – mittlerweile mehrfach verschärften – Neuauflagen der EnEV, ergab sich in den letzten 12 Jahren zunehmend die Notwendigkeit für Baustoffe mit einer niedrigeren Wärmeleitfähigkeit für die monolithische Bauweise.

Das Prinzip der Füllung eines Mauersteins mit Dämmstoff wurde deswegen von vielen Herstellern aufgegriffen und es erschienen neue, innovative Produkte am Markt, die sich mittlerweile für das Bauen mit monolithischer Außenwand flächendeckend etabliert haben – zumindest im Süden der Republik. Bei gefüllten Ziegeln beschränkten sich die Entwicklungen der ersten Jahre auf die Füllung mit mineralischen Stoffen (Perlite, Mineralwolle). Gefüllte Leichtbetonsteine hingegen gibt es mit Füllung aus Mineralwolle aber auch mit Füllungen aus Schaumkunststoffen. Bei einigen Hochlochziegeln werden die Ziegel nachträglich mit losen Dämmstoffen verfüllt, die ursprünglich als ungefüllte Ziegel angeboten wurden, z. B. mit einer Füllung aus Mineralgranulat.

Alle diese Mauersteine machen sich die physikalische Eigenschaft zunutze, dass die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von stehender Luft in kleinen Hohlräumen niedriger ist als die in großen Kammern. Vor der Entwicklung von gefüllten Steinen war deshalb ein deutlicher Trend zu kleinteiligeren Steinbildern mit schmalen Schlitzern und vielen Lochreihen erkennbar. In Dämmstoffen sind viele kleine Hohlräume enthalten, die mit Luft, oder bei einigen Schaumkunststoffen auch mit einem schweren Zellgas gefüllt sind, was zu einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit - unabhängig von den

Abmessungen der betrachteten Schicht - führt. Mit Dämmstoff-Füllung lässt sich somit auch in einer größeren Kammer eine günstige Wärmeleitfähigkeit realisieren.

Der überwiegende Teil des Wärmedurchgangs durch einen gefüllten Mauerstein mit großen Kammern findet über die Stege statt, wie das folgende Bild der Wärmestromdichten in einem gefüllten Ziegel deutlich zeigt (Abbildung 39). Zu erkennen sind Bereiche höherer Wärmestromdichte im Falschfarbenbild durch grüne, gelbe und rote Farbtöne. Bereiche mit geringer Wärmestromdichte sind blau oder sogar violett dargestellt.

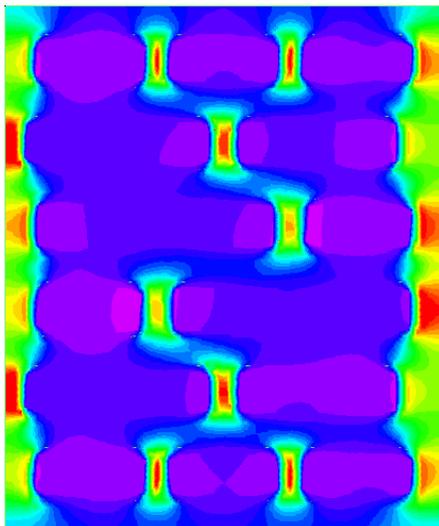


Abbildung 39: Wärmestromdichten in einem mit Dämmstoff gefüllten Mauerstein (Draufsicht)

Im direkten Vergleich zu einem ungefüllten Mauerstein mit vielen Stegen und Kammern fällt auf, dass die Unterschiede bei den Wärmestromdichten in den Stegen und in den Kammern nicht so deutlich ausgeprägt sind wie beim gefüllten Stein (Abbildung 40). Es lassen sich hieraus allerdings noch keine Aussagen über den gesamten Wärmestrom durch die Wand machen, für den die lokale Verteilung im Mauerstein nicht maßgebend ist. Hierfür sind vor allem die Abmessungen der Stege und der dazwischen angeordneten Lochkammern, sowie die Wärmeleitfähigkeit des Materials entscheidend.

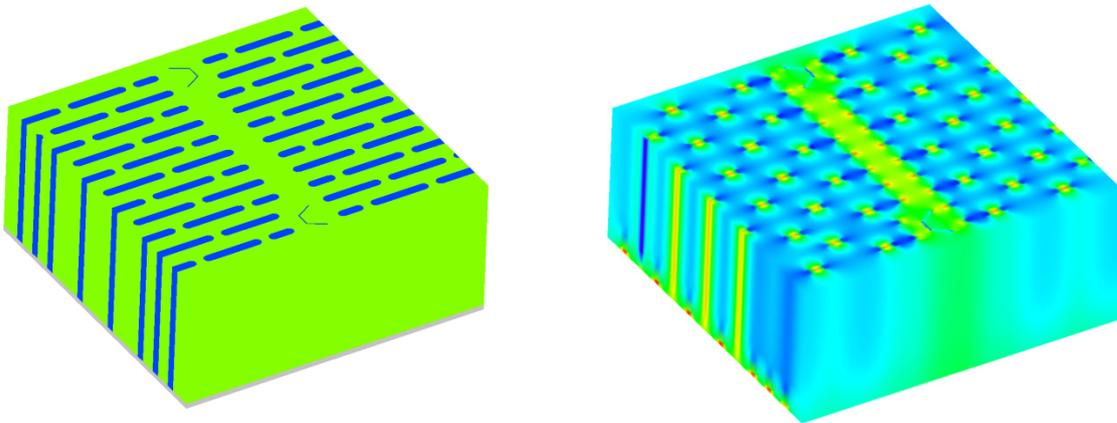


Abbildung 40: Wärmestromdichten in einem ungefüllten Leichtbetonstein mit Luftkammern
links: dreidimensionales Modell
rechts: Wärmestromdichten des ungefüllten Leichtbetonsteins

Schon während der Entwicklung eines Steinbilds lassen sich durch Berechnungen mit der Finiten-Elemente- oder Finiten-Differenzen-Methode zuverlässige Aussagen treffen, wie sich der Stein in wärmetechnischer Hinsicht verhält, bzw. wie man ihn wärmetechnisch optimieren kann. Liegen Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für das Steinmaterial und die Füllung vor, so lassen sich durch dreidimensionale Berechnungen die zeitaufwändigen und vergleichsweise teuren Messungen an ganzen Wänden umgehen. Für gefüllte Ziegel setzt das allerdings zuverlässige Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für den Ziegelscherben voraus. Für die Hersteller von Leichtbetonsteinen ist es, aufgrund der dort üblichen und notwendigen dickeren Stege, deutlich einfacher, Proben für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Steinmaterials aus den Stegen zu sägen. Das macht die numerische Berechnung neuer Steinbilder schon seit geraumer Zeit zum Mittel der Wahl bei der Zulassung wärmetechnisch optimierter Produkte. Mittlerweile setzen alle Hersteller auf die wärmetechnische Optimierung ihrer Produkte durch dreidimensionale numerische Simulation.

Hinsichtlich des klimabedingten Feuchteschutzes stellt sich die Frage, ob und gegebenenfalls wie der zusätzliche Wärmedämmstoff im Steininneren die Diffusion von Wasserdampf aus der Raumluft durch die Wand nach außen beeinflusst. Kommt es zur Tauwasserbildung im Inneren des gefüllten Mauersteins? Verliert der Mauerstein durch die Wärmedämmfüllung seinen geringen Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion?

Günstig ist in diesem Zusammenhang eine Dämmstofffüllung, die selber einen Wasserdampfdiffusionswiderstand hat, der sehr gering ist oder in derselben Größenordnung wie der Diffusionswiderstand des Ziegelscherbens. Bei vereinfachten Berechnungen mittels des Glaser-Verfahrens aus DIN 4108-3 wird man feststellen, dass in einigen Fällen rechnerisch ein Tauwasserausfall zu erwarten ist, und zwar in dem der Außenoberfläche nahen Bereich des gefüllten Mauersteins. Allerdings ist das Glaser-Verfahren zu vereinfacht und liegt zu weit auf der sicheren Sei-

te, um es wirklich für eine solche Baustoffuntersuchung einzusetzen. Realitätsnähere Berechnungsverfahren wie z. B. die Simulation von Diffusion und Kapillarleitung mittels instationären kombinierten Wärme- und Feuchtetransportberechnungen WUFI® erlauben eine viel zutreffendere Beurteilung des realistischen Diffusionsverhaltens gefüllter Mauersteine und belegen, wie groß der Einfluss des eingesetzten Dämmstoffs darauf tatsächlich ist. Die Hersteller hochwärmedämmender Mauerwerksmaterialien haben schon vor vielen Jahren begonnen ihre Produkte und die daraus erstellten Bauteile hinsichtlich des Wärme- und Feuchteschutzes zu optimieren.

Aktuell haben alle maßgeblichen Hersteller von Mauersteinen für monolithische Wände Produkte im Programm, mit denen die Anforderungen an die wärmetechnische Qualität der Außenwände für EnEV und KfW-Gebäude gut eingehalten werden können. Die Spitzenprodukte decken mit Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit von $0,060 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bzw. $0,070 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ einen Bereich ab, der von der Höhe der Wärmeleitfähigkeit her eher den Dämmstoffen zuzuordnen ist. Diese Entwicklung und Optimierung der Produkte war und ist unabhängig vom Mauerwerksmaterial, sie betrifft alle maßgeblichen Wandbaustoffe. Hervorragende Dämmwerte für moderne Mauersteine sind das Ergebnis einer jahrelangen Optimierung von Baustoffen, deren ureigenste Aufgabe weniger die Erfüllung des Wärmeschutzes, sondern die Statik, der Wetterschutz und der Schallschutz waren.

Mauerwerk: Porenbeton

Hochwärmedämmende Steine aus Porenbeton nehmen hier eine Sonderstellung ein. Sie sind die einzigen Wandbaustoffe deren Optimierung – ähnlich wie bei den herkömmlichen Dämmstoffen – fast nur über die Verbesserung der wärmetechnischen Eigenschaften des Materials selber realisiert wurde. Das Material konnte in den letzten 25 Jahren bis auf die Wärmeleitfähigkeit $0,070 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei einer Materialrohddichte von ca. $350 \text{ kg}/\text{m}^3$ verbessert werden. Auch hier kamen moderne Simulationswerkzeuge zur Modellierung des Wärmetransports in der Porenbetonmatrix zum Einsatz. In Parameterstudien wurden die maßgeblichen Einflussfaktoren ermittelt und durch gezielte Beeinflussung der mittleren Porengröße und Reduzierung der Stegdicken in der Produktion umgesetzt.

Bei den Porenbetonsteinen gibt es kaum Mischformen mit eingefüllten oder eingeschäumten Dämmstoffen. Erst in der letzten Zeit sind einige mehrschichtige Produkte auf den Markt gekommen, die eine Trennung der einzelnen Aufgaben der Wand vorsehen und eine tragende Innenschale höherer Rohddichte mit einer tragenden Außenschale verbinden. Innen- und Außenschale werden direkt im Autoklaven mit einer Schicht hochwärmedämmenden Porenbetons zu einem homogenen Mauerstein verbunden (Abbildung 41). Der Stein verfügt bei einer Wanddicke von $41,5 \text{ cm}$ über einen äquivalenten λ -Wert von nur $0,06 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und erreicht einen U-Wert von $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Seine besondere Beschaffenheit verleiht ihm eine hohe

Stabilität und eröffnet damit neue Perspektiven beim Bau von Einfamilienhäusern sowie im mehrgeschossigen Wohnungsbau. Ähnliche Produkte gibt es mit Polyurethan oder Phenolharz als eingebettete Dämmschichten, die mit den tragenden Innen- und Außenschalen aus Porenbeton verklebt werden.



Abbildung 41: Innovationssprung Porenbeton durch Kombination von zwei Schichten Porenbeton mit einem Kern aus hochwärmedämmendem Porenbeton [Quelle: Xella 2013]

Mauerwerk: Ziegel

Der althergebrachte Baustoff Ziegel hat in den letzten 30 Jahren die größten Veränderungen aller Baustoffe durchlaufen. Erste systematische Verbesserungen und Aufbereitungen des in der jeweiligen Tongrube vorgefundenen Materials, die nicht nur einer Verbesserung des Produktionsablaufs dienten, lassen sich bis in die 70er Jahren zurückverfolgen. Untersuchungen zur Wärmedämmwirkung von Ziegelwänden am FIW München und IZF in Essen begleiteten die Entwicklung in der 80er Jahren mit ersten dreidimensionalen numerischen Simulationen zum Wärmedurchgang an Lochbildern [Achtziger und Anton 1985a] und [Achtziger und Anton 1985b].

Einen Überblick über die historischen Entwicklungen der Ziegelherstellung gibt M. Gierga in einer ausführlichen Zusammenstellung [Gierga 2005] für die Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel in Bonn, 2005: „...Porosierte Lochziegel sind ab etwa 1970 auf dem Markt angeboten worden. Durch das gezielte Einarbeiten von Ausbrennstoffen wie z. B. Styropor oder Sägespäne in die Tonstruktur entstehen beim Brennvorgang Mikroporen, die die Wärmeleitung im Ziegelscherben reduzieren und damit die ersten wärmedämmenden Mauerziegel ermöglichten. In Verbindung mit den Steinlochungen waren Rohdichten bis zu 600 kg/m^3 möglich. Eine weitere Absenkung der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmauerwerk resultierte aus der Entwicklung von wärmedämmenden Leichtmörteln (LM) und der mörtellosen Stoßfuge mit Verzahnung. Am vorläufigen Ende der Entwicklungsskala genormter Produkte steht die Einführung der Dünnbettlagerfuge (DM) etwa 1985, die bei in Steinhöhe plangeschliffenen Ziegeln zu einer weiteren Verringerung der Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitiger Verbesserung der Druckfestigkeiten des Mauerwerks und schnellerer Verarbeitbarkeit führte. ...Auf der folgenden Seite ist eine Übersicht der Wärmeleit-

fähigkeiten von Ziegelmauerwerk aus Ziegeln nach der Stoffnorm DIN 105 gegeben. Dabei wird nach Art des verwendeten Mauermörtels unterschieden. Die Bemessungswerte λ_R der Wärmeleitfähigkeit beinhalten den Feuchtezuschlag bei Ausgleichsfeuchte oder auch baupraktischem Feuchtegehalt genannt. Hochwärmedämmende Ziegel nach bauaufsichtlichen Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik erreichen Wärmeleitfähigkeiten bis zu $0,09 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$...“ Aus dieser Aufstellung der Arge Mauerziegel ist die rasante Entwicklung der letzten Jahre abzulesen. War 2005 noch der Bemessungswert $0,09 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ Stand der Technik, so gibt es mittlerweile eine ganze Reihe Produkte mit Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit von $0,070 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und weniger.

Zwischen 2005 und 2011 wurden zahlreiche weitere Entwicklungen mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit, auch in Kombination mit besonderen Schallschutzeigenschaften, vorangetrieben. Allen Entwicklungen gemeinsam ist die Abkehr vom ungefüllten System, hin zu einem hochwertigen, kombinierten Bauprodukt mit Füllung aus unterschiedlichen Dämmstoffen. In der nachfolgenden Grafik ist die beachtliche wärmetechnische Verbesserung bei wärmedämmenden Ziegeln seit 1975 dargestellt (Abbildung 42). Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit beträgt aktuell noch ca. 1/3 des Werts des Jahres 1975.

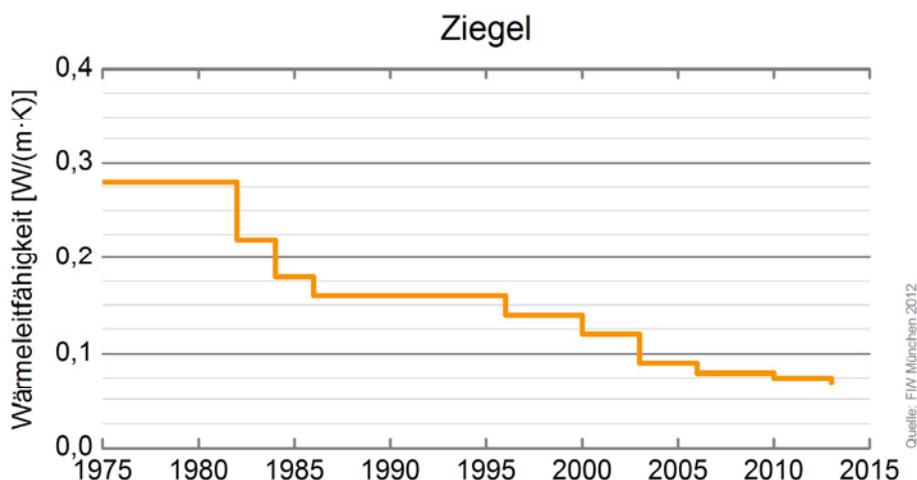


Abbildung 42: Verbesserungen der Wärmeleitfähigkeit von wärmedämmenden Ziegeln seit 1975 - die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks beträgt aktuell nur noch etwa ein Drittel gegenüber 1975

Mauerwerk: Leichtbeton

Die vor allem im Südwesten Deutschlands und in Franken verbreitete Bauweise mit haufwerksporigen Leichtbetonsteinen erfuhr eine ähnlich rasante Entwicklung bei den Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit wie die Ziegelbauweise. Erste Produkte mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $0,09 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ waren als ungefüllte Produkte bereits 2001 nachweisbar. Die Leichtbetonindustrie ging bereits Ende der 1990er Jahre konsequent den Weg der numerischen Optimierung ih-

rer Produkte. Bedingt durch die dickeren Stege, und die im Gegensatz zum Ziegelscherben nicht vorhandene Anisotropie des Materials, ließen sich Bemessungswerte für den Leichtbeton über einen großen Rohdichtebereich leicht durch Messung gewinnen. Mit diesen rohdicteabhängigen Bemessungswerten standen verlässliche Eingangswerte für dreidimensionale Simulationen unterschiedlicher Rohdicteklassen zur Verfügung. Hier konnten bereits vor 12 Jahren erste vollständig auf Berechnungen basierende Zulassungen für hochwärmedämmende Leichtbetonsteine erteilt werden.

In den folgenden Jahren wurden die bereits seit den 1950er Jahren erfolgreich am Markt etablierten Steinbilder der Hohlblöcke Hbl und Hbn als ideale Formen für die Füllung mit Wärmedämmstoffen entdeckt (siehe auch Abbildung 38). Als Plansteine ohne Deckel mit wärmedämmendem Dünnbettmörtel vermauert können mittlerweile Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit bis zu $0,055 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für die Füllung mit Phenolharz-dämmstoff der WLS 022 nachgewiesen werden, was derzeit die Technologieführerschaft bei den bauaufsichtlich zugelassenen Mauersteinen in wärmetechnischer Hinsicht bedeutet (Abbildung 43).



Abbildung 43: Haufwerksporiger Leichtbeton mit Füllung aus Phenolharz-Hartschaum. Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit $0,070$ bis $0,055 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ – dargestellt ist der sog. Objektstein mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $0,065 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

4.4 Sonstige Entwicklungen

Vakuum-Isolations-Panäle (VIP)

Vakuum Isolations Panäle (VIP) sind neuartige Dämmsysteme die im Baubereich erstmals 1999 verwendet wurden (siehe auch Abschnitt 3.2). In den folgenden Jahren wurden VIP stets mit Zustimmungen im Einzelfall der obersten Baubehörden der

Länder im Gebäudebereich eingesetzt. Einen größeren Aufschwung erfuhren die hochwärmedämmenden Paneele erst nach Erteilung der ersten bauaufsichtlichen Zulassungen seit Juni 2007.

Die Wärmedämmwirkung der Paneele ist abhängig von vielen Faktoren, z. B. von

- dem Stützkernmaterial und dessen Rohdichte und Wassergehalt
- der Art der anorganischen Barrierschichten und deren Dicke
- der Größe und der Dicke der Paneele
- dem Niveau des Vakuums in den Paneelen und dessen Dauerhaftigkeit
- der Verwendung zusätzlicher Randstreifen und Deckschichten
- der Art und der Anordnung der Verschweißung der Folie
- den Befestigungselementen und deren Wärmebrückenwirkung

Maßgebliche Innovationen der letzten Jahre sind vor allem auf dem Gebiet der Dauerhaftigkeit der VIP erreicht worden. Durch die wesentliche Verbesserung der Barriereigenschaften der Folien in der Fläche und vor allem an den Siegelnähten, konnte die Permeation trockener Gase (Luft) und vor allem von Wasserdampf deutlich reduziert werden. Der Druckanstieg in den Paneelen fällt dadurch wesentlich kleiner aus, was in der Folge die Wärmeleitfähigkeit weniger stark ansteigen lässt.

Weiterentwicklungen und Optimierungen an VIP für Bauanwendungen konnten bei allen Bestandteilen der Paneele, vielen Schritten der Produktion und fast allen Teiluntersuchungen zur Bestimmung der Bemessungswerte erreicht werden. Viele Innovationen lassen sich nur unter Berücksichtigung der VIP spezifischen Vorgehensweise darstellen. Die Lebensdauer der Paneele wird durch Schnellalterungsuntersuchungen mit Klimawechselbeanspruchungen und Lagerung der Paneele bei erhöhter Temperatur getestet. Während dieser künstlichen Alterung wird mehrmals die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Gemessen wird die Wärmeleitfähigkeit in der durch die Wärmebrückeneffekte des Randbereichs ungestörten Mitte des Paneels. Durch numerische Simulationen der Wärmebrückeneffekte des Randbereichs kann für die unterschiedlichen Paneelgrößen die jeweilige spezifische Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Paneele wird noch mit einem Sicherheitszuschlag versehen in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen verankert. Der nachfolgend dargestellte Ablauf beschreibt die derzeit übliche Vorgehensweise zur Festlegung eines Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit:

- Messung des Wärmedurchlasswiderstands bzw. der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit im Anlieferungszustand mit dem Plattengerät nach DIN EN 12667
- Klimawechselbeanspruchung 7 Tage Wechselklima $-15\text{ °C}/+80\text{ °C}$ mit einem kompletten Zyklus pro Tag
- 90 Tage Lagerung bei 80 °C (Laborluft von $23\text{ °C}/50\text{ % r. F.}$ wird auf 80 °C erwärmt – die relative Feuchte beträgt bei 80 °C ca. 3 % – der absolute Feuchtegehalt der Luft bleibt jedoch konstant)
- Zweite Messung des Wärmedurchlasswiderstands im Plattengerät nach DIN EN 12667
- 90 Tage Lagerung bei $80\text{ °C}/\text{ca. } 3\text{ % r. F.}$

- Dritte Messung des Wärmedurchlasswiderstands im Plattengerät nach DIN EN 12667

Mit dem gealterten Wert der Wärmeleitfähigkeit werden die numerischen Simulationen der Randeffekte durchgeführt. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit eines gealterten Panels inklusive der Randeffekte wird für verschiedene Panelgrößen bestimmt und derzeit mit einem Sicherheitsaufschlag versehen zum Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit gemacht.

Die Verbesserung der Produkte zwischen 2003 und 2009 wurde für das Forschungsprojekt „Optimierung VIP“ aus den Zulassungsuntersuchungen zusammengestellt [Sprengard und Spitzner 2011a]. Im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 44) sind die Messreihen zur Alterung der Wärmeleitfähigkeit in der ungestörten Mitte der Paneele über dem Herstellungsjahr der Produkte aufgetragen. Dargestellt sind die Frischwerte nach der Herstellung („null“), die Werte nach 90, sowie nach 180 Tagen Lagerung bei 80°C als senkrechte Balken. Die Wärmeleitfähigkeit konnte im Betrachtungszeitraum tendenziell weiter verringert werden, sowohl beim Frischwert als auch bei den gealterten Werten. Im Jahr 2008 weicht eine Messreihe vom Trend ab, was jedoch eine herstellereigene Besonderheit ist. Die Messreihe aus dem Jahr 2003 zeigt allerdings, dass es mit einer Folie mit geringer Durchlässigkeit und hohem Aufwand bei der Herstellung schon mit den damaligen Produkten möglich war, günstige Werte bei der Alterung zu erreichen, jedoch nicht für alle Hersteller und für die breite Masse der Produkte.

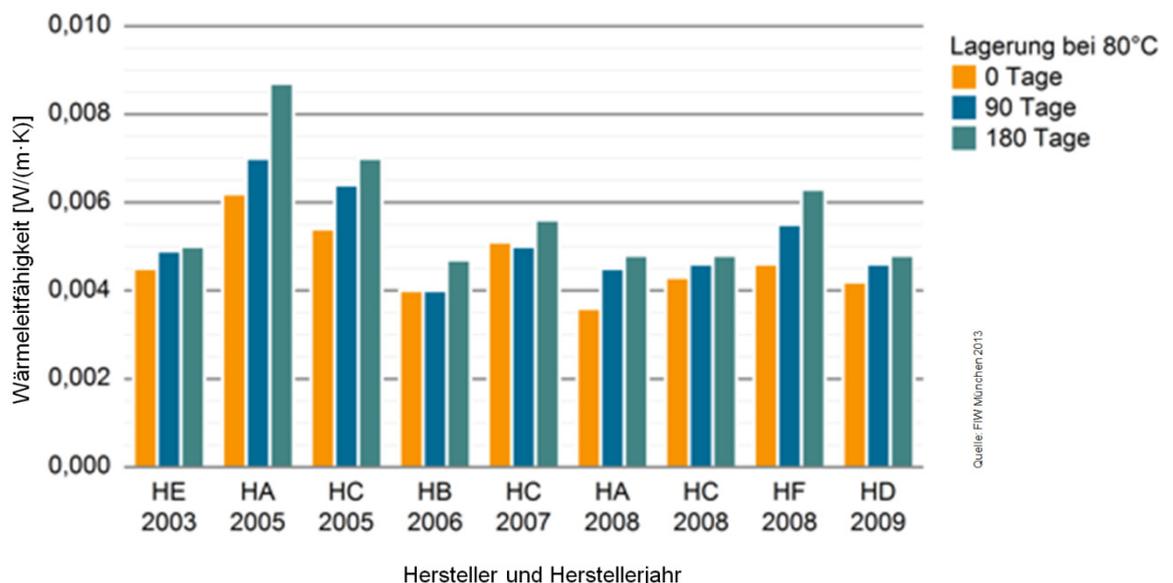


Abbildung 44: Darstellung der Messreihen zur Alterung nach Hersteller und Herstellungsjahr des Produkts

Weitere Innovationssprünge gab es bei der Folientechnik – sowohl in der Erhöhung der Dichtigkeit der Fläche als auch in der Verbesserung der Siegelnähte. Hier galt es unterschiedliche Ansätze zu optimieren: dichtere Folien erreicht man am ein-

fachsten durch die Erhöhung der Dicke der anorganischen Barrierschichten. Dicke Barrierschichten – derzeit wird fast ausschließlich Aluminium als Barriermaterial verwendet – bedingen jedoch sehr große Rand-Wärmebrücken am Paneel. Hier konnten höhere Dichtigkeiten der Folien gegenüber trockenen Gasen und auch Wasserdampf ohne eine signifikante Erhöhung der Wärmebrückeneffekte der Paneelränder erreicht werden.

In einem Beitrag in der Zeitschrift Bauphysik werden umfangreiche Berechnungen zu den Einflussfaktoren der Rand-Wärmebrücken dargestellt [Sprengard und Spitzner 2011b]. Viele Hersteller haben für ihre Produkte die Einflussfaktoren mittlerweile analysiert und ihre Produktion entsprechend angepasst. Optimiert wurden hier z. B. die folgenden Punkte:

- Anordnung der längeren Schweißnähte als Mittelnaht in der Fläche der VIP, damit die mehrlagige Ausführung nur noch an den kürzeren Kanten eingesetzt wird
- Verwendung von Folien mit dünnen anorganischen Barrierschichten (Alu)
- Herstellung möglichst rechtwinkliger und passgenauer VIP, zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Spalten zwischen Paneelen
- Anordnung von Deckschichten aus herkömmlichen Dämmstoffen auf den VIP Oberflächen zur Überdämmung der Stoßstelle

VIP sind aufgrund der sehr geringen Dämmstoffdicken ein interessanter Dämmstoff für sehr energieeffiziente Sanierungen und beengte Verhältnisse. Durch die wesentlich verbesserte Produktqualität und die gesunkenen Preise werden VIP zunehmend auch als Alternative für herkömmliche Dämmstoffe in großvolumigen Anwendungen interessant, z. B. für die Dämmung von Fassaden, Dächern oder obersten Geschossdecken. Durch ihre geringe Dicke und große Dämmwirkung bietet sich auch der Einsatz für Innendämmungen an. Interessant und effizient wird ihr Einsatz bisher vor allem aber,

- wenn durch den Einsatz von VIPs insbesondere bei der wärmetechnischen Sanierung weitere Maßnahmen eingespart werden können, wie z. B. der Versatz von Tür- und Fensteröffnungen oder die Verlängerung eines Dachüberstandes,
- wenn es darum geht, aus einer vorgegebenen Grundfläche möglichst viel Nutzfläche zu erzielen, z. B. bei Innenstädten von Großstädten mit hohen Grundstückspreisen wie London, München etc.
- wenn aus architektonischen Gesichtspunkten, bei Dachterrassen zur Vermeidung von Stufen, bei kleinen Anbauten mit ungünstigem Oberfläche-Volumen-Verhältnis (Dachgauben), bei Fassaden in Element- und Pfosten-Riegel-Konstruktionen nicht genügend Platz zur Verfügung steht.

Aerogele

Aerogele sind hochporöse Festkörper, bei denen bis zu 99,98 % des Volumens aus Poren bestehen. Es gibt verschiedene Arten von Aerogelen, wobei solche auf Sili-

catbasis am häufigsten sind. Die Porengröße liegt im Nanometerbereich und die inneren Oberflächen können mit bis zu 1000 m^2 pro Gramm außergewöhnlich groß werden. Dadurch können Aerogele u. a. als hervorragende Wärmedämmstoffe eingesetzt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, biologisch aktive Moleküle, Proteine oder gar ganze Zellen einzulagern. Ähnlich wie bei der pyrogenen Kieselsäure als Stützkern für VIP und wie in Abschnitt 4.2 für neuartige PU-Schäume beschrieben, ist die Gas-Wärmeleitung in den sehr kleinen Poren reduziert. Die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle ist viel größer als der Abstand der Porenwände ($Kn \gg 1$), weswegen Wärme nicht mehr durch Molekülzusammenstöße übertragen wird. Dadurch reduziert sich der Anteil der Wärmeleitung des ruhenden Zellgases an der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit.

Aerogele werden als lose Dämmstoffe für Hohlräume angeboten, aber auch als Matten. Hier werden zwei Typen unterschieden; Aerogele mit non-woven Vliesen als Trägermaterial (z. B. aus Polyesterfasern) und Aeorgel-Pulver in Vliesbeutel gefüllt. Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für lose Füllmaterialien liegen im Bereich von $0,018 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bis $0,020 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Für Dämmprodukte auf der Basis von Vliesen können Wärmeleitfähigkeitswerte von $0,013 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bis zu $0,017 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ gemessen werden. Aerogele sind somit bei normalem Umgebungsdruck das derzeit beste bekannte Dämmmaterial. Diese neuen, innovativen Entwicklungen ermöglichen den Einsatz in Anwendungen, die eine dünne, hochdämmende Schicht benötigen, welche auf der Baustelle angepasst werden kann, z. B. für thermische Trennungen und als Füllstoff für Spalten.

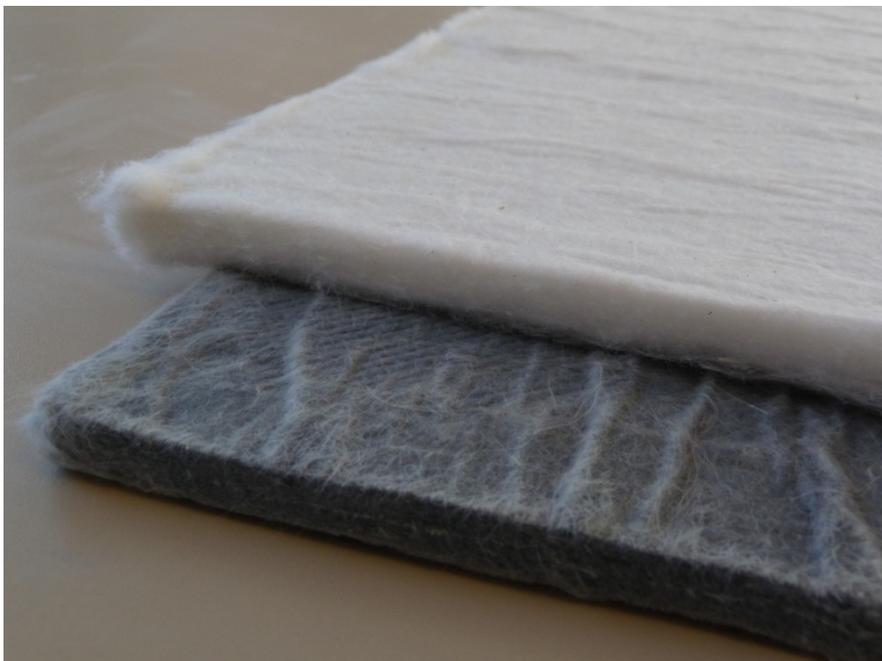


Abbildung 45: Aerogel Pulver in Polyestervlies-Hüllen als Wärmedämmstoff für Gebäude

Mit Aerogelen als Zuschlagsstoffe wurde ein Hochleistungsdämmputz entwickelt, der wesentlich besser dämmt als ein herkömmlicher Dämmputz. Der neue Verputz

bietet eine elegante Möglichkeit, historische Bauten energetisch zu sanieren, ohne deren Erscheinungsbild zu verändern. Die winzigen Luftporen machen Aerogele zu einem hervorragenden Bestandteil des neuen Isolationsmaterials, dessen Wärmeleitfähigkeit von weniger als $30 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zwei- bis dreimal niedriger ist als die Wärmeleitfähigkeit üblicher Verputze.

Bisher wurde meist mit Aerogelen auf Silikatbasis experimentiert. Prinzipiell funktioniert die Technik auch bei Kunststoffen, wie z. B. bei Kunststoffen auf Polymer- oder Polyurethanbasis. Auf dem *International Symposium on Superinsulating Materials* am 26. April 2012 in Brüssel wurden erste Ansätze dargestellt. Es wurde aber auch klar, dass die Entwicklung dieser Produkte bis zur Marktreife noch Jahre dauern wird.

Phase Change Materials PCM, Phasenwechselmaterialien

Phasenwechselmaterialien sind kein Dämmstoff und sie wirken auch nicht dämmend. Trotzdem soll diese Entwicklung der letzten Jahre für den Baubereich nicht unerwähnt bleiben. Der Phasenwechsel der anorganischen Salzlösungen oder organischen Paraffine von fest zu flüssig und umgekehrt findet bei den PCMs für Bauteile Verwendung, um kurzzeitige Temperaturspitzen abzupuffern. In den letzten Jahren ist es gelungen, mikroverkapselte Paraffine direkt in Putzschichten, Gips- und Gips-Faserplatten oder Baustoffe einzubringen, um deren Pufferwirkung bei sommerlichen Temperaturspitzen zu erhöhen. Um als PCM für Bauanwendungen geeignet zu sein, müssen die Materialien folgende Eigenschaftskriterien erfüllen [Tryfonidou et al. 2013]:

- geeignete Schmelztemperatur
- hohe Phasenübergangsenthalpie und spezifische Wärmekapazität
- geeignetes Schmelz- und Erstarrungsverhalten, Zyklenstabilität
- beherrschbare Volumenänderung
- geringe bzw. beherrschbare Unterkühlung
- chemische Stabilität
- geringe Korrosivität gegenüber Konstruktionswerkstoffen
- Umweltverträglichkeit, geringe Toxizität

In Latentwärmespeichern werden am häufigsten Eis, Salzhydrate und Paraffine eingesetzt. Die Phasenwechseltemperatur ist das wichtigste Kriterium bei der Auswahl eines PCM für eine bestimmte Anwendung. Oft ist die Wärmeleitfähigkeit der PCM ein Problem bei der Auslegung von Latentwärmespeichern. Neue Entwicklungen am ZAE Bayern verbinden PCM und Graphit, das eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit hat, um die Ausbreitung der Latentwärme zu beschleunigen.

Multifunktionalität

Neue Entwicklungen gibt es auch bei intelligenten Systemen und multifunktionalen Bauteilen. Kerngedanke solcher Weiterentwicklungen ist die stoffliche und konstruktive *Integration* von Funktionen in Bauteilen und Bausystemen zur Regulierung von z. B. Luftqualität, Akustik und thermischen/hygrischen Klima im Raum. Durch diese Regulierung wird auf *direktem* und *indirektem* Wege die Energieeffizienz von Innenräumen unterschiedlicher Nutzung erhöht. Die Lösung des Widerspruchs Energieeffizienz, Raumfunktion und Gestaltung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Ansprüche ist hierbei entscheidend. Effizienzsteigerungen lassen sich in der Summe nicht nur durch Optimierung einzelner Aufgaben, sondern auch durch Schaffung von Mehrwert über Multifunktionalität erreichen. Einige Beispiele mit unterschiedlichen Ansätzen werden nachfolgend vorgestellt.

Modulares Wandbausystem mit Mineralwolleplatten

Das Wandbausystem besteht aus verschraubbaren Metallprofilen zur statischen Lastabtragung, aussteifenden Steinwolle-Elementen in 250 mm Dicke, Holzelementen als Unterkonstruktion für unterschiedliche Außenwandbekleidungen und OSB-Platten als innere Wandscheibe und Luftdichtigkeitsebene. In Verbindung mit Sturzelementen für Fenster und Türen können so rationell Leichtbaukonstruktionen aufgebaut werden, die insbesondere bei der Nachverdichtung (Aufstockung, Anbau) in urbanen Infrastrukturen Vorteile bieten. Aber auch ein- und mehrgeschossige (bis zu 3 Geschossen) Gebäude können mit dem System realisiert werden.

Die Wände aus Mineralwolleplatten werden zwischen einem Boden- und Kopfprofil, das mittels statisch wirksamer vertikaler Verstreben auf Abstand gehalten wird eingebaut. Die lasttragenden vertikalen Streben bilden auch die seitliche Begrenzung beim Einbau von Fenstern und Türen. Geschossdecken können als Leichtbaukonstruktion ausgeführt werden und werden über die Kopfprofile als aussteifendes Element angeschlossen. Die Dachkonstruktion ist nicht Teil des Systembaukastens, kann deshalb unterschiedlich ausgeführt werden und wird auf dem oberen Abschluss des Wandbausystems aufgelegt.



Abbildung 46: Modulares Wandbausystem mit Mineralwolleplatten (RockShell, Rockwool)

Vorgehängte hinterlüftete Fassade mit grauem EPS

Das hier vorgestellte Fassadensystem ist eine vorgehängte hinterlüftete Fassade mit Dämmplatten aus grauem EPS, bietet eine sehr gute Wärmedämmung und lässt einen großen gestalterischen Freiraum für individuelle, hochwertige und gleichzeitig witterungsbeständige Fassadenbekleidungen (Abbildung 47). Die mehrschichtige Außenwandkonstruktion besteht aus Dämmstoffplatten, Holzunterkonstruktion für die Fassadenbekleidung mit Hinterlüftung und den Fassadenplatten selbst. Das System kann einfach und schnell montiert, aber ebenso schnell wieder abgebaut werden, da die Dämmplatten mit dem Untergrund nicht verklebt werden. Es ist somit vollständig rückbaubar und kann in beliebiger Form wieder verwendet oder auch verwertet werden [Winterling und Sonntag 2011].



Abbildung 47: Graues EPS in vorgehängten hinterlüfteten Fassaden bis zur Hochhausgrenze. Bild: BASF Pressemitteilung

FreshAirWall

Einen innovativen Sanierungsansatz mit Mehrfachnutzen bietet das Lüftungssystem Fresh-Air Wall, das vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) gemeinsam mit einem Kooperationspartner entwickelt wurde. Um die energetische Qualität eines Gebäudes entscheidend zu verbessern und auf das Niveau eines Niedrigenergiehauses zu bringen, empfiehlt es sich, neben baulichen Maßnahmen, auch eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung vorzusehen. Speziell im Bestand ist der notwendige Aufwand für die Installation bislang meist das größte Hindernis. Eine Nachrüstung im Innenraum ist unmittelbar mit Lärm und Schmutz und folglich mit einer Beeinträchtigung für die Bewohner verbunden. Auch bauliche Gegebenheiten wie Raumhöhe oder Raumaufteilung erschweren oder verhindern gar die Nachrüstung einer Lüftungsanlage. Gebäudedämmung und Gebäudelüftung werden in diesem Verfahren effizient miteinander kombiniert. Die Anbringung der Lüftungskanäle in die Wärmedämmverbundplatten erfolgt bereits im Werk, so dass der Montageaufwand vor Ort dem eines üblichen Wärmedämmsystems entspricht. Bohrungen von innen ermöglichen die Anbindung der Lüftungsanlage an die Räume. Durch entfallene Rohrleitungen entstehen mit FreshAirWall deutliche Kostenvorteile. Für den Einsatz im Altbau sprechen bauliche Gegebenheiten wie Raumhöhe oder Raumaufteilung sowie die Minimierung von Schmutz und Lärm. Das System ist bislang für die Anwendung in Gebäuden mit bis zwei Geschossen vorgesehen. [Schwab 2010].



Abbildung 48: FAW: Anschluss der EPS Dämmplatte mit den integrierten Lüftungskanälen an die Luftzuführung in das Gebäude.

Modernisierungsfassade

Auf der „BAU 2011“ in München wurde ein Fassadensanierungselement vorgestellt, welches die rationelle und effiziente Sanierung von Bestandsgebäuden mit Modulfassaden oder vorgehängten hinterlüfteten Fassaden ermöglicht. Eine Aluminium-Systemkonstruktion übernimmt alle Aufgaben der Gebäudehülle, wie z. B. Sonnenschutz, Bereitstellung einer dezentralen Lüftung, transparenter Gebäudeabschluss über integrierte Fenstersysteme, bis hin zur Energiegewinnung durch in die Fassade integrierte Solarmodule. Die Modernisierungsfassade ermöglicht die energetische Sanierung von Fassaden mit einzelnen Fenstern und Fensterbändern. Der Modernisierungsprozess an der Fassade erfolgt dabei über ein äußeres Tragwerk, so dass die Innenräume während der Arbeiten weiterhin genutzt werden können [Baulinks 2011]. Die Modernisierungsfassade ist für Bestandsgebäude geeignet, die energetische Qualität mittels einer zweiten Haut bis hin zur Passivhausqualität aufzuwerten. Hierfür wird ein äußeres Tragwerk mit Befestigungskonsolen von Decke zu Decke auf das Fassadenraster des Baukörpers gelegt. So können Brüstungsbereiche umgangen werden, die nicht ausreichend tragfähig sind.

Vorgefertigte Bauteilkomponenten

Krause M. stellt in „Forschung kompakt“ des Fraunhofer Instituts für Bauphysik ein Element vor, welches neben Fenster und Fensterzarge aus einer Technikbox und einem Dämmstoffrand besteht, der beispielsweise als Wärmedämmverbundsystem aus Polystyrol gefertigt sein kann [Krause 2012]. Dieses selbsttragende Modul wird von außen in die alte Fensterlücke geschoben und überdämmt die alte Fassade im Fensterbereich. Alternativ zum Wärmedämmverbundsystem können Architekten auch eine Holzrahmenkonstruktion mit mineralischen Dämmstoffen wie Glas- oder Steinwolle verwenden. Die herausnehmbare Technikbox befindet sich unter der Fensterbank. In die Box lassen sich Komponenten wie Wärmetauscher, dezentrale Heizungspumpen und Lüftungsfiler einbauen, aber auch Stromanschlüsse, Lüftungskanäle oder Internetkabel. Stromleitungen und Wasserrohre werden unter dem Dämmstoff über die Fassade erschlossen und über Einlässe durch die Technikbox ins Haus geführt. Zahlreiche Arbeiten im Gebäude wie das Verlegen von Rohren und Leitungen entfallen auf diese Weise. Der Fensterbauer liefert die Elemente inklusive Technikbox vorgefertigt an, dadurch beschleunigt sich der Installationsprozess am Gebäude deutlich. Ein weiterer Vorteil: Da man die Fensterbank öffnen kann, lassen sich sämtliche Komponenten einfach warten, nachrüsten oder austauschen, etwa wenn eine Reparatur erforderlich ist.

VIP in EPS Formteilen

Das System mit einem Kern aus VIP in EPS Formteilen ermöglicht hocheffiziente Sanierungen von Fassaden in einer schlanken Ausführung. Ein U-Wert nach der Sanierung von $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ist auf Bestandswänden aus üblichen Mauerwerksmaterialien bereits in der Dämmdicke 10 cm möglich. Das System erlaubt hierbei eine Bearbeitung der EPS-Ränder in zwei Dimensionen. Über eine zugehörige Software lassen sich Wände mit beliebigen Fensterrastern ohne nennenswerte Restflächen mit den VIP-gedämmten Platten belegen. Die Software übernimmt hierbei die Dimensionierung der Platten und gibt dem Verarbeiter die berechnete Breite für den Zuschnitt vor, den er am Heißdraht nur noch einstellen muss.

Durch die VIP-gedämmte Überdeckung der Befestigung der ersten Lage kann das System wärmebrückenfrei an der Fassade befestigt werden. Durch die modulare Bauweise mit überdeckten Bearbeitungsrändern kommt das System mit nur wenigen Elementgrößen aus, was sich bereits in einer halbautomatisierten Fertigung der VIPs bezahlt macht. L. Kubina beschreibt in seinem Beitrag für das International Vacuum Insulation Symposium 2011 die Vorteile des Systems vor allem hinsichtlich der Flexibilität bei Fensterrastern und in der sicheren Befestigung mittels zugelassener Dämmstoffdübel [Kubina 2011]. Ein Innovationssprung ist die Reduzierung auf 3 Elementgrößen mit den Vorteilen einer günstigeren Herstellung über größere Stückzahlen.



Abbildung 49: Erste Lage des Systems. Die Befestigung der ersten Lage erfolgt in den Plattenstößen mittels üblicher Dämmstoffdübel. Die Befestigungen werden durch eine zweite VIP-gedämmte Lage, den sog. LockPlates, überdämmt.

Schaltbare Wärmedämmung

Als schaltbare Wärmedämmung bezeichnet man eine Dämmung die beim Anlegen einer Spannung oder beim Auslösen eines Schaltsignals ihre Wärmeleitfähigkeit ändert. Die Gebäudehülle hat mehrere energetische Aufgaben, so z. B. schützt sie das Gebäudeinnere im Sommer vor zu hohen solaren Einträgen, die zu einer Überhitzung der Raumluft bzw. zu hohen Kühllasten führen können. Im Winter soll die Fassade das Gebäude effizient vor Wärmeverlusten über die Hüllfläche schützen ohne jedoch die an strahlungsreichen Wintertagen anfallenden Solargewinne auszublenken. Besonders im Bereich von transparenten und transluzenten Bauteilen sind hier hohe Anforderungen an die Verglasungen, die Verschattungssysteme und deren Steuerungen gestellt. Vor der Fassade montierte Sonnenschutzsysteme haben häufig den Nachteil, dass sie bei hohen Windstärken und bei Frostgefahr zeitweise nicht angewandt werden können. Innenliegende Systeme sind zwar vollkommen außenklimaunabhängig und daher immer einsetzbar, sie reduzieren jedoch die solar eingestrahlte Energiemenge deutlich geringer als ein außenliegender Sonnenschutz. Besonders bei einem hohen Verglasungsanteil in Kombination mit erhöhten internen Wärmelasten kann hier während der Sommermonate häufig auf eine energie- und kostenintensive Kühlung nicht verzichtet werden.

An diesem Spannungsfeld setzt die schaltbare Wärmedämmung an: Durch eine „schaltbare“ Dämmung in Kombination mit transparenten bzw. transluzenten Bauteilen könnte die eingestrahlte Sonnenenergie besser als bisher genutzt und der Gesamtenergieverbrauch von Gebäuden deutlich reduziert werden. Im Rahmen einer Konzeptstudie entwickelte das Fraunhofer Institut für chemische Technologie in Pfinztal ICT einen Dämmschaum, dessen Eigenschaften hinsichtlich Wärmedurchgang und Energiedurchlassgrad reversibel variabel geschaltet werden können. Im

geschlossenen Zustand ist der Dämmstoff nahezu undurchlässig für Solarstrahlung, sein U-Wert liegt bei ca. $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und ist damit mit hochgedämmten Außenwänden vergleichbar. Die besten derzeit am Markt verfügbaren 3-Scheiben-Verglasungen erreichen in etwa U-Werte von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und verursachen damit 2,5-fach höhere Transmissionswärmeverluste als der schaltbare Dämmstoff im geschlossenen Zustand. Wird dieses neuartige System auf „transparent“ geschaltet, erhöht sich sein U-Wert auf ca. $2,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und der Energiedurchlassgrad für Solarstrahlung steigt auf ca. 0,56. In diesem Fall kann die Sonnenenergie durch den Dämmstoff in das Gebäude einstrahlen und so zur Heizungsunterstützung beitragen.

Im Winter könnte ein mit dieser Dämmung ausgestattetes Gebäude tagsüber an strahlungsreichen Tagen Solarenergie zur Heizungsunterstützung aufnehmen. Das System wäre in diesem Fall auf „transparent“ geschaltet. Während der Nachtstunden sowie an strahlungsarmen Tagen reduziert das System im geschlossenen Zustand durch seinen geringen U-Wert von $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ wirkungsvoll den Wärmeverlust über die Fassade.

Im Sommer sollte das System an strahlungsreichen Tagen auf „geschlossen“ geschaltet sein. In diesem Zustand wäre es mit einem hocheffizienten außenliegenden Sonnenschutz vergleichbar. Während der kühleren Nachtstunden kann sich das Gebäude bei „transparent“ geschalteter Dämmung aufgrund des hohen U-Wertes wieder wirkungsvoll abkühlen.

Erste Simulationsrechnungen zu einem schaltbaren Dämmsystem zeigen hohe Einsparpotentiale. In Anlehnung an das Beispielgebäude der DIN 4108-6 (Einfamilienhaus) bei dem ein südorientierter Glasvorbau integriert wurde, sind getrennte Berechnungen für den Heizfall im Winter und für den Sommerfall durchgeführt worden. Als Referenzfall dient im Bereich der transparenten Bauteile eine konventionelle Wärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und einem Energiedurchlassgrad von 0,62. In der Simulationsvariante mit schaltbarer Dämmung sind 80 Prozent der Vorbauverglasung mit schaltbarem Dämmsystem ausgestattet.

Im Winter zeigt sich ein Energieeinsparpotential in Hinblick auf den Jahresheizwärmebedarf (Nutzenergie) von ca. 11 Prozent. Würde man dieses Gebäude im Sommer auf 26°C klimatisieren, errechnet sich bei der Variante mit schaltbarer Dämmung sogar eine Reduzierung der Nutzenergie für die Kühlung um ca. 75 Prozent. Besonders im Verwaltungsbau, in dem häufig der Kühlenergiebedarf die Aufwendungen für die Beheizung überwiegt, scheint dieses System sehr hohe Energieeinsparpotentiale zu bieten.

Ein anderer Ansatz für eine (opake) schaltbare Wärmedämmung wird von J. Fricke, A. Beck und Binder M. 2007 beschrieben [Fricke et al. 2007]. Am ZAE Bayern ist eine schaltbare Vakuum-Dämmung entwickelt worden, deren Wärmeleitfähigkeit sich etwa um den Faktor 50 ändern lässt. Dies wird über ein Wasserstoff-Reservoir reali-

siert, d. h. über einen beheizbaren Getter, der reversibel Wasserstoff beim Abkühlen aufnehmen und beim Heizen wieder abgeben kann. Die Wärmeleitfähigkeit des als Stützkern eingesetzten Glaswolle-Faserkerns beträgt $0,002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ im evakuierten Zustand (ohne Wasserstoff) und steigt auf mehr als $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ wenn ein Innendruck von mehr als 50 mbar (nach dem Heizen) vorliegt.

Biologische Dämmstoffe

Schaumkunststoffe aus polymerisierter Milchsäure PLA, sind artverwandt mit EPS, was die Zellstruktur, Dämmleistung und Druckfestigkeit angeht. Dahinter verbirgt sich ein Compound (Rezeptur) von links und rechtsdrehenden Milchsäuren. Gewonnen werden kann dieser Stoff aus Zucker oder Mais. Als Treibmittel wird CO_2 eingesetzt. Das Material ist vollständig kompostierbar. Momentan finden Feldversuche für den Einsatz im Baubereich statt. [IsoBow 2012]

4.5 Umstrittene Entwicklungen

Wärmedämmende Anstriche

„Wärmedämmende“ Anstriche werden weltweit vertrieben. Ihre Dämmwirkung soll auf hohlen Mikrokügelchen basieren, angeblich eine Entwicklung der NASA. Ein Untersuchungsergebnis von U. Hammerschmidt und W. Sabuga (Physikalisch – Technische Bundesanstalt Braunschweig) ergab: Messtechnisch konnte keine Wirkung der Beschichtung hinsichtlich des Wärmeschutzes nachgewiesen werden [Hammerschmidt und Sabuga 2000]. Infrarot reflektierende Anstriche erlauben theoretisch eine geringe Absenkung der Oberflächentemperatur von Außenwänden ohne Behaglichkeitseinbuße. Aber als Folge ist ein größeres Schimmelpilzrisiko zu erwarten. Die Wirkungsweise im Sommer ist umgekehrt: Ist es draußen wärmer wird durch die reduzierte Wärmeabgabe der inneren Außenwandoberfläche theoretisch die Aufheizung der Räume langsamer erfolgen. Der Anteil der opaken Außenbauteile auf das sommerliche Temperaturverhalten eines Raumes ist bei gut gedämmten Bauteilen jedoch annähernd vernachlässigbar. Die Haupt-Wärmeeintragswege sind Sonneneinstrahlung durch Fenster und Glasflächen, interne Wärmegewinne und eindringende warme Außenluft.

Diverse Untersuchungen des FIW München in Hot-Box und Plattengerät zeigen ähnliche Ergebnisse. Eine nennenswerte Wärmedämmwirkung ist mit etablierten Messmethoden nicht nachweisbar.

Foliensysteme mit IR-Reflexion

Durch mehrere Lagen von Folien mit dazwischen liegenden Vliesen oder Luftpolstern wird eine ruhende Luftschicht erzeugt. Der langwellige Strahlungsaustausch wird durch Infrarot-reflektierende Beschichtungen reduziert. Da die Dicke der Foliensysteme vom Einbauzustand abhängt, wird meist der R-Wert angegeben. Leider sind die Herstellerangaben häufig irreführend bzw. es wird behauptet, dass die „wahre“ Dämmwirkung wegen der IR-Reflexion sehr viel besser sei.

Die energetischen Vorteile der IR-Reflexion hängen von verschiedenen Faktoren (z. B. Temperaturniveau, Einbausituation, R-Wert des Bauteils) ab und sind bislang nicht allgemeingültig quantifizierbar. Als Alternative nur sehr bedingt zu empfehlen, da angegebene Dämmwerte oft nicht erreicht werden und die Dampfdichtheit häufig als problematisch anzusehen ist. Für die Festlegung der wärmetechnischen Eigenschaften ist seit April 2012 eine europäische Norm verfügbar, die auf stationäre, etablierte Messmethoden in Verbindung mit der Bestimmung des Reflexionsgrades im langwelligen Infrarot-Bereich zurückgreift [DIN EN 16012]. Von einigen Herstellern dieser mehrschichtigen Foliensysteme wird die Norm abgelehnt und parallel eine messtechnische Alternative über Bauteilversuche und In-Situ-Messungen erarbeitet. Der Messfehler einer solchen Methode ist jedoch für eine eindeutige Spezifikation der Produkte viel zu groß und damit ungeeignet.

4.6 Problemfelder und Ziele für Weiterentwicklungen

Anforderungen des Marktes

Anforderungen, die aus dem Markt an Dämmstoffe gestellt werden, betreffen vor allem die Effizienz und die Sicherheit. Der Markt verlangt nach Dämmstoffen, die eine hohe Energieeffizienz aufweisen und dabei eine ganze Reihe weiterer Eigenschaften möglichst umfassend erfüllen. Weiter- und Neuentwicklungen zielen auf die Verbesserung der bauphysikalischen Eigenschaften, insbesondere die Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit, die Eliminierung indizierter Inhaltsstoffe und die Optimierung der Ökobilanz (z. B. durch den Einsatz von Vorprodukten oder Rohstoffen aus einem Recyclingverfahren, aus nachwachsenden Rohstoffen oder durch Minimierung der zur Herstellung, dem Transport oder dem Einsatz notwendigen Energie). Damit einher geht die Verbesserung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses der Dämmmaßnahmen [Holm und Sprengard 2013].

Der ideale Dämmstoff sollte demnach dünn sein und effizient dämmen, dabei preiswert sein und langfristig verfügbar. Der Markt braucht einen dauerhaft funktionstüchtigen Dämmstoff, der einfach verarbeitbar und in allen erdenklichen Lieferformen erhältlich ist. Zudem sollte er ökologisch unbedenklich sein und die damit errichteten Konstruktionen müssen bauschadensfrei bleiben. Der Dämmstoff sollte qualitativ

hochwertig sein und seine Eigenschaften sollten in gleichbleibender Qualität nachgewiesen werden. Ein solcher Stoff ist nicht verfügbar und wird in absehbarer Zeit auch nicht am Markt angeboten werden. Innovationen aus dem Dämmstoffbereich der letzten Jahre betreffen jedoch bereits eine Vielzahl dieser gewünschten Eigenschaften. Neueste Entwicklungen zielen auf die Verbesserung mehrerer Eigenschaften gleichzeitig durch Integration in Bauteile oder Multifunktionalität.

Bei der Auswertung diverser Forschungsberichte der letzten Jahre wurden für die in Kapitel 3 dargestellten Dämmstoffe die folgenden Handlungsfelder für weitere Forschung und Entwicklung identifiziert:

Aerogele

Die Aerogele haben sehr gute wärmetechnische Eigenschaften und sind ein Dämmstoff mit großem Potential, wenn es gelingt die derzeit noch sehr hohen Kosten zu senken. Die Kosten sind vor allem bedingt durch den sehr energieintensiven Herstellprozess und die bisher unverzichtbare überkritische Trocknung der Gele aus dem Sol-Gel-Prozess. Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Anwendung der bereits am Markt verfügbaren Dämmstoffe auf Aerogelbasis. Hier muss vor allem das Verhalten bei dauerhafter Exposition mit Feuchte und erhöhter Temperatur untersucht werden, um Anwendern einen dauerhaft funktionstüchtigen und dauerhaft effizienten Dämmstoff für die Gebäudehülle zur Verfügung zu stellen. Forschungsbedarf besteht auch bei der Handhabung und der Verarbeitung der Aerogele auf dem Bau. Die gesundheitlichen Aspekte sind hier nicht ausreichend und eindeutig geklärt.

VIP

Weiterer Forschungsbedarf bei den Vakuum-Isolations-Paneelen wurde bereits in vielen Veröffentlichungen identifiziert, z. B. in [Sprengard und Spitzner 2011a]. Einige dieser Punkte werden in aktuell laufenden Vorhaben bereits erforscht. Neue Forschungsschwerpunkte der nächsten Jahre betreffen die Weiterentwicklung der Folien, die für organische Leuchtdioden entwickelt werden, und für die Reduzierung der Permeation bei VIP genutzt werden können. Hier sollte besonders auch die Dichtigkeit der Siegelnähte und die Qualität der Verschweißung untersucht werden. Alternative Thermoplaste für die Siegelschicht, mit gegenüber Polyethylen deutlich erhöhter Dichtheit für trockene Gase und Wasserdampf müssen für die Tauglichkeit in der VIP Herstellung untersucht werden. Ein wichtiges Betätigungsfeld für die Forscher ist auch die Qualitätssicherung der Produkte, für die teilweise erst neue Prüfverfahren gefunden werden müssen. In den nächsten Jahren wird der Anteil der Innendämmung an sanierten Objekten zunehmen. Hier haben VIP aufgrund ihrer hervorragenden Dämmwerte ein großes Potential. Probleme in der Anwendung (Dampfdiffusion durch Fugen, eingeschlossene Feuchte, Definition der Einsatzrandbedingungen für VIP als Innendämmung) müssen in den nächsten Jahren ausgeräumt werden.

PU

Bei der Weiterentwicklung organischer Schäume wie PU werden parallel zwei Konzepte verfolgt: Die Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit über alternative Zellgase unter Beimischung von Additiven, sowie die Entwicklung eines neuen Schaumsystems mit deutlich kleineren Poren. Erste Produkte mit Additiven sind am Markt verfügbar. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Anwendung am Gebäude und bei der Dauerhaftigkeit der Produkte in Bauanwendungen.

In absehbarer Zeit werden Produkte mit kleineren Poren, sog. „Nanoschäume“, auf den Markt kommen, die sich in ihrer Struktur von den derzeit angebotenen Systemen unterscheiden. Auch hier muss die Einführung am Markt durch Forschung zur Anwendung, bauphysikalischen Kennwerten und Dauerhaftigkeit begleitet werden.

XPS/EPS

Derzeit wird im Herstellungsprozess das Flammschutzmittel von HBCD auf ein polymeres Flammschutzmittel umgestellt. Erste Forschungsergebnisse zeigen, dass alle geprüften Produkte die Anforderungen an das Brandverhalten erfüllen. Alle deklarierten Eigenschaften der Druckspannung/-festigkeit, der Wärmeleitfähigkeit und der Wasseraufnahme werden ebenso erreicht.

Mineralwolle

Die ersten Mineralwolleprodukte sind mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $0,030 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf der letzten Baumesse vorgestellt worden. Die physikalische Grenze bei ca. $0,029 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ist damit fast erreicht. Innovationen sind zukünftig vor allem durch die Kombination hochwärmedämmender Stoffe in Mineralwolle oder bei Materialentwicklungen mit einem Bezug zu einer konkreten Anwendung, z. B. als Innendämmplatten im System mit Dampfbremse, Kleber und Bauplatten, zu erwarten.

Organische Dämmstoffe auf Basis natürlicher Rohstoffe

Die Produktqualität organischer Dämmstoffe, wie z. B. Holzfaserdämmstoffe und Zellulose hängt sehr stark von den Rohstoffen, der Fasergeometrie und der Verarbeitung ab. Viele Hersteller arbeiten mit Erfahrungswerten bei der Einstellung ihrer Produktionsmaschinen. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Vorhersage der Dämmstoffeigenschaften aus der Analyse der Ausgangsstoffe und Zwischenprodukte für die Verbesserung der Steuerung des Herstellprozesses.

Anforderungen für die Energiewende

Aus der Bedeutung der Dämmstoffe für die Energiewende und dem Potential für Einsparung (siehe Kapitel 6) können Anforderungen an Dämmstoffe, Hersteller von Dämmstoffen und alle Bauschaffenden abgeleitet werden, damit die Energiewende gelingen kann. Derzeit ist die positive Grundhaltung zum Energiesparen, die in den

letzten Jahren in den Köpfen der Bauschaffenden verankert wurde, durch eine negative Berichterstattung in Gefahr geraten. Umso mehr haben Wissenschaft und Hersteller von Dämmstoffen die wichtige Aufgabe, die Akzeptanz bei Planern, Bauherren und Architekten für Dämmung und Dämmstoffe zu verbessern. Die Akzeptanz kann aber nur gesteigert werden, wenn die Wirksamkeit der Maßnahmen bekannt und gegeben ist. Hier muss auch die Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen besser erforscht werden. Aus den Brandereignissen und der damit zusammenhängenden negativen Berichterstattung wird Handlungsbedarf bei der normativen Regelung des Brandschutzes und bei den Nachweismethoden für Baustoffe und Bauteile abgeleitet.

Die Energiewende ist eine gesamtheitliche Aufgabe, die u. a. Gebäude, Anlagentechnik und regenerative Energien betrifft. Eine gesamtheitliche Aufgabe sollte aber auch gesamtheitlich bilanziert werden: Der Energiebedarf/Verbrauch nach der kompletten Sanierungsmaßnahme ist entscheidend, nicht die prozentual höchstmögliche Einsparung bei jedem Schritt. Eine sinnvolle Reihung der Maßnahmen beginnt stets mit der Dämmung des Gebäudes. Im Anschluss daran kann dann eine kleinere, effizientere Anlage eingebaut werden, die mit regenerativen Energien gespeist werden kann. Wird im ersten Schritt die Anlage gegen eine neue, effiziente Anlage getauscht, ergibt sich oftmals eine prozentual größere Einsparung gegenüber dem Verbrauch vor der Sanierung als bei der Dämmung der Außenbauteile. Werden anschließend jedoch Dämmmaßnahmen durchgeführt, ist die neue Anlage womöglich überdimensioniert und läuft nicht in einem effizienten Auslastungsbereich. Hier herrscht Aufklärungs- und Informationsbedarf bei den Architekten, Energieberatern und Planern. Sanierungsfahrpläne mit Vorschlägen zu einer sinnvollen Reihenfolge der Maßnahmen können dabei helfen die Herausforderungen der Energiewende möglichst effizient zu bewältigen.

5 Nachhaltigkeit von Dämmstoffen

Im Zuge der energieeffizienten und nachhaltigen Planung und Nutzung von Gebäuden spielt die lebenszyklusorientierte Betrachtung eine wesentliche Rolle. Bei der Auswahl des geeigneten Baustoffes hat neben den rein funktionalen und ökonomischen Aspekten also auch die ökologische Bewertung einen großen Stellenwert.

Die Bauproduktenverordnung verlangt eine den gesamten Lebenszyklus umfassende Betrachtung von Baustoffen. Als Informationsgrundlage für die ökologische Bewertung sollen gemäß BauPVO verstärkt Umwelt-Produktdeklarationen, kurz EPDs (Environmental Product Declaration), basierend auf überprüften Angaben der Hersteller, dienen.

Das Thema der Nachhaltigkeit von Dämmstoffen ist ein wichtiger Aspekt für die ganzheitliche Bewertung von Sanierungsmaßnahmen. Fragen der Entsorgung, des Energieaufwands zur Herstellung oder der Wirkung von Zusatzstoffen wie Brandschutzmittel oder Biozide während der Nutzung und nach der Entsorgung, auf die Umwelt, können im Zuge von Nachhaltigkeitsanalysen beantwortet werden. Verschiedene Produkte werden so nicht nur im Hinblick auf die technische Leistungsfähigkeit vergleichbar. Trotzdem müssen natürlich auch technische Eigenschaften im Rahmen von Nachhaltigkeitsbetrachtungen berücksichtigt werden, um durch die Bestimmung von funktionalen Einheiten vergleichbare Bezugsgrößen zu erhalten.

Der Begriff Nachhaltigkeit kommt ursprünglich aus der Forstwirtschaft und bedeutet in diesem Zusammenhang, dass in einem bestimmten Zeitraum nur so viel Holz aus dem Forst entnommen werden darf, wie im gleichen Zeitraum nachwachsen kann. Durch diese Form der Bewirtschaftung steht die Funktionalität des Waldes als Wirtschafts-, Kultur- und Sozialgut auch zukünftigen Generationen zur Verfügung. Die Notwendigkeit einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung wurde dabei erst ab Mitte des 18. Jahrhunderts erkannt, als in Deutschland aus Gründen des damals praktizierten Raubbaus praktisch keine relevanten Waldflächen mehr vorhanden waren.

Die Entwicklung der Ausweitung des Begriffs der Nachhaltigkeit auf andere Wirtschaftszweige – bis hin zu der inzwischen inflationären Nutzung – ist ähnlich der Einführung dieses Wirtschaftsprinzips in der Forstwirtschaft, an die Erkenntnis der voranschreitenden Verknappung nicht regenerativer Energie- und Stoffressourcen in den 1970er – 1980er Jahren gebunden. Insbesondere die Verknappung und die damit verbundene Verteuerung von Erdöl und aller daraus abgeleiteter petrochemischer Stoffe, war hier ein treibender Faktor.

Wie kann nun der Begriff der Nachhaltigkeit auf den Bereich der Dämmstoffe angewendet werden? Im Gegensatz zu vielen anderen Konsumgütern liegt der Nutzen von Dämmstoffen in der Verbesserung der Energieeffizienz einer der für das elementare Bedürfnis der Menschen wichtigsten Funktion; nämlich der Herstellung eines wohnhygienisch einwandfreien und behaglichen Raumklimas. Dies betrifft so-

wohl den Fall des winterlichen als auch des sommerlichen Wärmeschutzes. Einem Herstellungsaufwand (energetisch, stofflich) für die Produktion von Dämmstoffen ist also der Nutzen, die eingesparte Heiz- oder Kühlenergie, gegenüberzustellen. Es kann also neben wirtschaftlichen Amortisationszeiten auch eine energetische Amortisation berechnet und unter verschiedenen Materialien verglichen werden.

Die Beschränkung auf eine Aufwand/Nutzen Betrachtung unter wirtschaftlichen und energetischen Aspekten wäre aufgrund der komplexen Wechselbeziehungen der Wirkungen der Dämmstoffe auf den das Produkt nutzenden Menschen und die Umwelt allerdings zu kurz gefasst. Die möglichen Wechselwirkungen können kategorisiert und auf drei wesentliche Schutzziele herunter gebrochen werden, die in ausführlicher Form erstmals in [Anonymus 1998] beschrieben sind und hinsichtlich der Dämmstoffe wie folgt spezifiziert werden können:

- Ökologische Ziele
 - Schutz der natürlichen Ressourcen
 - Schutz des Ökosystems
- Ökonomische Ziele
 - Minimierung der Lebenszykluskosten
 - Verbesserung der Wirtschaftlichkeit
 - Erhalt von Kapital und Werten
- Soziokulturelle Ziele
 - Bewahrung von Gesundheit, Sicherheit und Behaglichkeit
 - Gewährleistung von Funktionalität
 - Sicherung der gestalterischen und städtebaulichen Qualität

(in Anlehnung an [BMVBS 2013])

Die den einzelnen Schutzziele zugeordneten Bereiche können mit Hilfe unterschiedlicher Bewertungskriterien beschrieben werden. Voraussetzung hierfür sind einheitliche und klar abgrenzbare Definitionen, von denen einige wichtige in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Für weitergehende Informationen sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen z. B. [BMVBS 2013]. Zudem bestehen thematische Überschneidungen mit Diskussionsbeiträgen, die in Kapitel 8.2, Ressentiments potentieller Anwender, behandelt werden.

5.1 Grundlagen und Bewertungskriterien

Der Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauprodukten liegt letztlich nichts anders als eine Modellierung möglicher Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemen (Umwelt, Mensch, Betriebs- und Volkswirtschaft, Klimasysteme, etc.) zugrunde, die von der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts entweder profitieren oder daran Schaden nehmen können. Wie bei allen Modellierungen ist auch hier zunächst die Wahl der Systemgrenzen und der Betrachtungszeitraum entscheidend. Übliche Betrachtungszeiträume werden als „cradle to gate“ (von der Herstellung bis zum Fabrikator) oder „cradle to grave“ (von der Herstellung bis zur Entsorgung oder Deponierung) bezeichnet.

Das Prinzip „cradle to cradle“ (C2C) verfolgt eine noch weiter reichende Betrachtung des Produktlebenszyklus und fordert die Entwicklung von Produkten, die in vollständig geschlossenen Nutzungskreisläufen am Ende der Produktlebensdauer wiederverwendet werden können. Das `Cradle to cradle Products Innovation Institute` erteilt Zertifizierungen nach den Prinzipien von C2C und bewertet in diesem Zusammenhang Produkte nach fünf Kriterien (Gesundheitliche Aspekte, Kreislauffähigkeit, Einsatz erneuerbarer Energien, Gewässerschutz, Soziale Fairness). Es können verschiedene Zertifizierungsstufen erreicht werden. Einige Dämmstoffe sind bereits nach den Kriterien von C2C zertifiziert. Die höchste Auszeichnung (Gold-Standard) haben bisher ein biobasierter Schaumstoff und ein loser Dämmstoff auf Basis von Hobelspänen, der zur Dämmung von Fertighäusern in Holzrahmenbauweise eingesetzt wird, erhalten [C2C 2013].

Im Folgenden sind die Prozessschritte der üblichen Betrachtungsvariante „cradle to grave“ aufgeschlüsselt, bei der alle durch das Produkt induzierten Wirkungen, ausgehend von seiner Herstellung bis zur Entsorgung, erfasst werden:

- Rohstoffentnahme
- Rohstofftransport
- Herstellungsprozess (Energieaufwand, Emissionen)
- Lieferung, Lagerung
- Einbau
- Nutzung
- Ausbau/Abriss
- (Wiederverwendung, Recycling)
- Entsorgung (Energiegewinne, -verluste bei thermischer Entsorgung, Emissionen, Deponierung)

Werden verschiedene Produktoptionen verglichen, so müssen diese in der geplanten Anwendung auch vergleichbare technische Anforderungen erfüllen. Bei Dämmstoffen also insbesondere die gewünschten Anforderungen an den Wärmeschutz. Da sich die technischen Spezifikationen aber oft signifikant unterscheiden, ist es zunächst wichtig, eine vergleichbare Bezugsgröße zu schaffen. Bei Wärmedämmstoffen bietet sich hierfür beispielsweise ein Bezug auf einen bestimmten Wärmedurchgangswiderstand an. Produkte mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit benötigen für den gleichen Wärmedurchgangswiderstand eine geringere Schichtdicke als Produkte mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit. Liegt also ein Ökobilanzdatensatz auf kg-Basis vor, so müssen die dort enthaltenen Angaben unter Berücksichtigung der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit umgerechnet werden, um für den konkreten Anwendungsfall unterschiedliche Produkte vergleichen zu können.

Die Normenreihe ISO 14000 beinhaltet Richtlinien für die Erstellung und Verwendung von Umweltzeichen. So genannte Typ III Umweltzeichen sind dabei in der ISO 14025 geregelt und sollen gegenüber Typ I - und Typ II Umweltzeichen auch quantitative Angaben zu bestimmten Produkteigenschaften enthalten. Für Bauprodukte in Deutschland werden diese Typ III Umweltzeichen beispielsweise auf der Basis von

Umweltdeklarationen (EPD = Environmental Product Declaration) des Institut Bauen und Umwelt vergeben. Die Berechnungsmethoden für die ökologischen Kennzahlen zu den betrachtenden Szenarien (Herstellung, Bauprozess, Nutzungsphase, Entsorgung/Recycling) sind in der seit 2012 geltenden EN 15804 beschrieben, so dass die Ergebnisse unterschiedlicher EPDs europaweit einheitlich ermittelt werden und damit vergleichbar sind. Eine EPD enthält dabei eine Sachbilanz, eine Wirkungsabschätzung und weitere Indikatoren. Die Sachbilanz enthält Angaben zum Ressourceneinsatz (Primärenergieinhalt erneuerbar /nicht erneuerbar, Wasserverbrauch) und den Emissionen. Aus diesen und weiteren Angaben zum Herstellungsprozess, werden in der Wirkungsabschätzung Auswirkungen auf die Umwelt abgeleitet. Die wichtigsten Umweltwirkungen sind:

- Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO₂ eq.]
- Ozonabbaupotential (ODP) [kg C₂H₂]
- Versauerungspotential (AP) [kg SO₂ eq]
- Eutrophierungspotential (EP) (Überdüngungspotential) [kg PO₄ eq]

(Datensätze zu EPDs können u. a. online abgerufen werden unter <http://www.nachhaltigesbauen.de/oekobaudat/>)

5.2 Ökologische Qualität

Die ökologische Qualität beschreibt die Auswirkung des Materials auf den Schutz der natürlichen Ressourcen und des Ökosystems.

Energetische Amortisation

Der Schutz natürlicher Ressourcen wird hier natürlich in erster Linie durch eine Minimierung des Energiebedarfs der Gebäude erzielt. Dem Energieaufwand der Herstellung kann also das Energieeinsparpotential der Anwendung gegenübergestellt werden. Letzteres ist neben der Dämmschichtdicke und den wärmeschutztechnischen Eigenschaften des Materials auch abhängig von dem energetischen Ausgangszustand der Konstruktion und der Art der Nutzung (Temperaturgradient der zu trennenden Bereiche). Bei Neubauten wird der energetische Zustand im Wesentlichen von der Wahl des Wandaufbaus (Vollsteine, Hochlochsteine, Leichtbauweise, etc.) bestimmt, während bei der Sanierung von Bestandsgebäuden darüber hinaus auch ältere Dämmmaßnahmen vorhanden sein können, die gegebenenfalls verstärkt werden sollen. Das Temperaturgefälle der thermisch zu trennenden Bereiche ist dann verantwortlich für den Wärmestrom im späteren Bauteil. Geringe Wärmeströme (z. B. Kelleraußenwand zum Erdreich bei nicht geheiztem Keller) führen zu geringeren absoluten Einsparmöglichkeiten, während hohe Wärmeströme (z. B. beheizter Wohnraum an/unter Fassade oder Dach) auch größere absolute Energieeinsparungen ermöglichen.

Auch die Dämmschichtdicke beeinflusst natürlich die realisierte Energieeinsparung. Hierbei ist aber zu beachten, dass der Wärmedurchgangskoeffizient U als Funktion der Dämmstoffdicke einen Hyperbelast darstellt ($U \sim \lambda/d$ [$W/(m^2 \cdot K)$]; λ = Wärmeleitfähigkeit, d = Dämmschichtdicke) (Abbildung 50). Der Einfluss der Dämmschichtdicke auf die Höhe der Wärmeverluste ist also nicht linear, sondern regressiv ausgebildet.

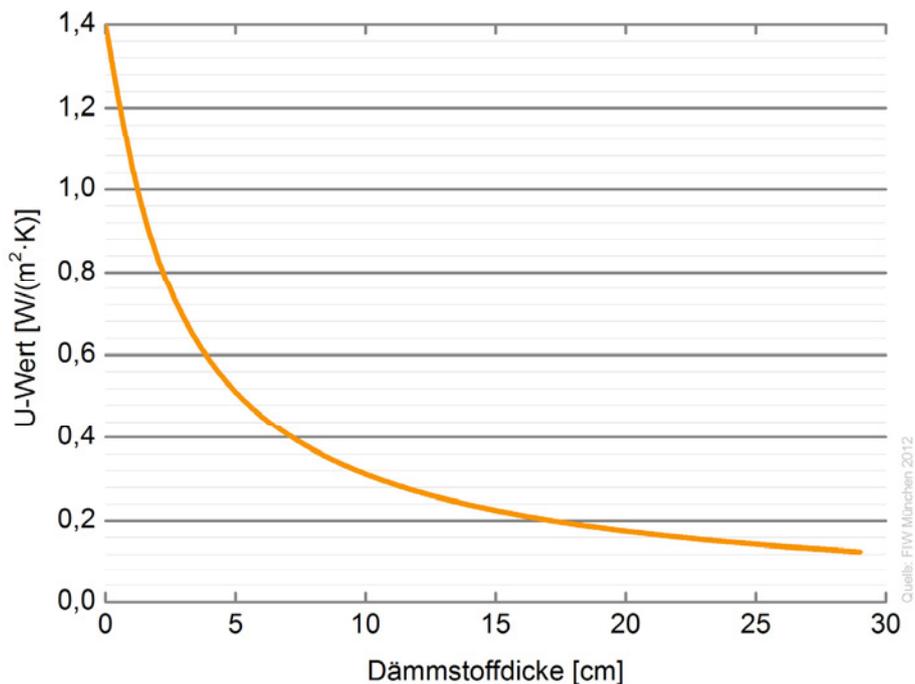


Abbildung 50: Einfluss der Dicke des Dämmstoffs ($\lambda = 0,04$ $W/(m \cdot K)$) auf den U-Wert eines Wandbauteils mit einem U-Wert des Rohbauteils von $1,4$ $W/(m^2 \cdot K)$

Während der energetische und stoffliche Aufwand für die Herstellung des Dämmstoffs annähernd linear mit der Dämmstoffdicke anwachsen, werden die zusätzlich erzielbaren Energieeinsparungen also mit jedem zusätzlichen Zentimeter Dämmung kleiner. Dieser Zusammenhang wirkt sich natürlich auch auf die energetische Amortisation aus, die umso länger dauert, je dicker die Dämmschicht ist.

In Tabelle 15 bis Tabelle 17 ist die energetische Amortisation ausgewählter Dämmstoffe bei Annahme unterschiedlicher U-Werte des Rohbauteils von $1,4$ $W/(m^2 \cdot K)$ (Tabelle 15), $1,0$ $W/(m^2 \cdot K)$ (Tabelle 16) und $0,6$ $W/(m^2 \cdot K)$ (Tabelle 17) und Ziel-U-Werten von $0,24$ - $0,10$ $W/(m^2 \cdot K)$ dargestellt. Die Annahme unterschiedlicher U-Werte der Rohbauteile berücksichtigt unterschiedliche energetische Ausgangszustände wie diese sich bei Bauteilen unterschiedlicher Gebäudealtersklassen oder auch nach bereits erfolgten früheren Sanierungsmaßnahmen einstellen. Die Annahmen zu Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und nicht erneuerbarem Primärenergieeinsatz sind in Tabelle 14 angegeben.

Tabelle 14: Annahmen zu Rohdichte (ρ), Wärmeleitfähigkeit (λ) und nicht erneuerbaren Primärenergieeinsatz (PEI) nach [Pfundstein et al. 2007] und Angaben der Hersteller-EPD

Dämmstoff	Quelle	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]	PEI (n. ern.) [MJ/kg]
Zellulosematten	Pfundstein et al. 2007	75	0,040	15,4
Zelluloseflocken	Pfundstein et al. 2007	50	0,040	4,20
Hanf (mit Stützfaser)	Pfundstein et al. 2007	30	0,040	14,9
WF (Trockenverfahren)	EPD-GTX-2011111-D	110	0,040	9,10
WF (Nassverfahren)	EPD-GTX-2011211-D	160	0,040	9,30
Schaumglas I	EPD-PCE-2008111-D (v.2)	100	0,040	15,3
Schaumglas II	EPD-PCE-2008111-D (v.2)	200	0,055	15,3
Glaswolle I	EPD-GHI-2011212-D	13	0,040	28,8
Glaswolle II	EPD-GHI-2011212-D	20	0,035	28,8
Glaswolle III	EPD-GHI-2011212-D	30	0,032	28,8
Steinwolle I	EPD-GHI-2011112-D	30	0,040	25,3
Steinwolle II	EPD-GHI-2011112-D	70	0,035	25,3
Steinwolle III	EPD-GHI-2011112-D	160	0,040	25,3
XPS	EPD-FPX-2010111-D	33	0,033	101
EPS grau	EPD-IVH-2009211-D	15	0,032	51,5
EPS weiß I	EPD-IVH-2009311-D	15	0,040	51,1
EPS weiß II	EPD-IVH-2009311-D	23	0,035	49,8
PU I	EPD-IVPU-2010112-D	30	0,028	92,3
PU II	EPD-IVPU-2010112-D	30	0,023	97,6
VIP	EPD-PDG-2011111-D	190	0,007	25,8

Tabelle 15: Dämmstoffdicke und energetische Amortisation ausgewählter Dämmstoffe bei Annahme eines U-Wertes des Bestandauteiles von 1,4 W/(m²·K) und Ziel-U-Werten von 0,24 – 0,10 W/(m²·K)

Dämmstoff	U= 1,4 W/(m ² ·K) auf...					
	... U = 0,24 W/(m ² ·K) (EnEV 09)		... U = 0,18 W/(m ² ·K) (NEH)		... U = 0,10 W/(m ² ·K) (Potential)	
	d _{Dämmstoff}	Amorti- sations- zeit	d _{Dämmstof}	Amorti- sations- zeit	d _{Dämmstof}	Amorti- sations- zeit
Zellulosematten	14	0,5	20	0,7	38	1,3
Zelluloseflocken	14	0,1	20	0,1	38	0,2
Hanf (mit Stützfaser)	14	0,2	20	0,3	38	0,5
WF (Trockenverfahren)	14	0,5	20	0,6	38	1,1
WF (Nassverfahren)	14	0,7	20	0,9	38	1,6
Schaumglas I	14	0,7	20	0,9	38	1,7
Schaumglas II	19	1,9	27	2,6	52	4,7
Glaswolle I	14	0,2	20	0,2	38	0,4
Glaswolle II	13	0,2	17	0,3	33	0,6
Glaswolle III	12	0,3	16	0,4	30	0,8
Steinwolle I	14	0,4	20	0,5	38	0,8
Steinwolle II	13	0,7	17	1,0	33	1,7
Steinwolle III	14	1,9	20	2,5	38	4,5
XPS	12	0,3	16	1,7	31	3,0
EPS grau	11	0,3	16	0,4	30	0,7
EPS weiß I	14	0,4	20	0,5	38	0,9
EPS weiß II	13	0,5	17	0,6	33	1,1
PU I	10	0,9	14	1,2	26	2,1
PU II	8	0,8	12	1,0	22	1,9
VIP	2,5	0,4	3,5	0,5	6,5	1,0

Je nach eingesetztem Material bewegen sich die energetischen Amortisationszeiten bei einem Ausgangs-U-Wert von 1,4 W/(m²·K) (typischer Wert für Wände im Altbau) und einem Sanierungsziel von 0,24 W/(m²·K) zwischen 1,2 Monaten (0,1 Jahre) (Zelluloseflocken) und knapp 2 Jahren (Steinwolle III, Schaumglas II). Zwischen diesen Extremen weisen die meisten Dämmstoffe energetische Amortisationszeiten

von wenigen Monaten auf. Je niedriger der angestrebte U-Wert des Bauteils wird, umso länger werden auch die Zeiten zur energetischen Amortisation.

Tabelle 16: Dämmstoffdicke und energetische Amortisation ausgewählter Dämmstoffe bei Annahme eines U-Wertes des Bestandbauteiles von 1,0 W/(m²·K) und Ziel-U-Werten von 0,24 – 0,10 W/(m²·K)

Dämmstoff	U= 1,0 W/(m ² ·K) auf...					
	... U = 0,24 W/(m ² ·K) (EnEV 09)		... U = 0,18 W/(m ² ·K) (NEH)		... U = 0,10 W/(m ² ·K) (Potential)	
	d _{Dämmstoff}	Amorti- sations- zeit	d _{Dämmstof}	Amorti- sations- zeit	d _{Dämmstof}	Amorti- sations- zeit
Zellulosematten	13	0,7	19	1,0	36	1,8
Zelluloseflocken	13	0,1	19	0,2	36	0,3
Hanf (mit Stützfaser)	13	0,3	19	0,4	36	0,7
WF (Trockenverfahren)	13	0,7	19	0,9	36	1,6
WF (Nassverfahren)	13	1,0	19	1,3	36	2,3
Schaumglas I	13	1,0	19	1,3	36	2,4
Schaumglas II	18	2,7	26	3,6	50	6,5
Glaswolle I	13	0,2	19	0,3	37	0,6
Glaswolle II	12	0,3	16	0,4	32	0,8
Glaswolle III	11	0,5	15	0,6	29	1,1
Steinwolle I	13	0,5	19	0,7	36	1,2
Steinwolle II	12	1,0	16	1,3	32	2,4
Steinwolle III	13	2,6	19	3,5	36	6,3
XPS	11	1,8	15	2,4	30	4,3
EPS grau	11	0,4	15	0,5	29	1,0
EPS weiß I	13	0,5	19	0,7	36	1,2
EPS weiß II	12	0,7	16	0,9	32	1,6
PU I	9	1,3	13	1,7	26	3,0
PU II	8	1,1	11	1,5	21	2,6
VIP	2,5	0,6	3,5	0,7	6,5	1,3

Tabelle 17: Dämmstoffdicke und energetische Amortisation ausgewählter Dämmstoffe bei Annahme eines U-Wertes des Bestandbauteiles von 0,6 W/(m²·K) und Ziel-U-Werten von 0,24 – 0,10 W/(m²·K)

Dämmstoff	U= 0,6 W/(m ² ·K) auf...					
	... U = 0,24 W/(m ² ·K) (EnEV 09)		... U = 0,18 W/(m ² ·K) (NEH)		... U = 0,10 W/(m ² ·K) (Potential)	
	d _{Dämmstoff}	Amortisationszeit	d _{Dämmstoff}	Amortisationszeit	d _{Dämmstoff}	Amortisationszeit
Zellulosematten	10	1,2	16	1,7	34	3,0
Zelluloseflocken	10	0,2	16	0,3	34	0,5
Hanf (mit Stützfaser)	10	0,5	16	0,6	34	1,2
WF (Trockenverfahren)	10	1,1	16	1,4	34	2,6
WF (Nassverfahren)	10	1,6	16	2,1	34	3,8
Schaumglas I	10	1,6	16	2,2	34	4,0
Schaumglas II	14	4,5	22	6,0	46	10,9
Glaswolle I	10	0,4	16	0,5	34	1,0
Glaswolle II	9	0,5	14	0,7	30	1,3
Glaswolle III	8	0,7	13	1,0	27	1,8
Steinwolle I	10	0,8	16	1,1	34	2,0
Steinwolle II	9	1,7	14	2,2	30	4,0
Steinwolle III	10	4,4	16	5,8	34	10,4
XPS	9	3,0	13	3,9	28	7,1
EPS grau	9	0,7	13	0,9	27	1,6
EPS weiß I	10	0,8	16	1,1	34	2,0
EPS weiß II	9	1,1	14	1,4	30	2,6
PU I	7	2,1	11	2,8	24	5,0
PU II	6	1,8	9	2,4	20	4,3
VIP	2,0	0,9	3,0	1,2	6,0	2,2

Tabelle 16 und Tabelle 17 zeigen die energetische Amortisation für Bauteile mit einem Ausgangs-U-Wert von 1,0 W/(m²·K) und 0,6 W/(m²·K). Je besser der energetische Ausgangszustand (also je niedriger der Ausgangs-U-Wert) des zu dämmenden Bauteils ist, umso länger sind auch die energetischen Amortisationszeiten. Bei einem Ausgangs-U-Wert von 0,6 W/(m²·K) und einem angestrebten U-Wert von 0,1 W/m²·K verlängert sich die energetische Amortisationszeit je nach Material deutlich.

Trotzdem gibt es auch unter diesen Randbedingungen Dämmstoffe die innerhalb des ersten Jahres mehr Energie einsparen als zur Herstellung benötigt wurde (Zelluloseflocken, Glaswolle I).

Die längsten Amortisationszeiträume betragen zwar knapp 11 Jahre (Schaumglas II), liegen damit aber immer noch deutlich unter den üblichen Sanierungszeiträumen. Der Großteil der Materialien erreicht auch unter den ungünstigsten Randbedingungen in einem Zeitfenster von < 5 Jahren die energetische Amortisation.

Ausgeprägten Einfluss auf die Amortisationszeit haben die Dämmstoffdicke und äquivalent hierzu die Rohdichte sowie der Primärenergieinhalt des verwendeten Materials. Eine Einflussnahme durch Anpassungen der Wärmeleitfähigkeit ist innerhalb des hier möglichen Wertespektrums nur mit wenigen Materialien möglich.

Dies wird deutlich bei einem Vergleich der energetischen Amortisationszeiten von Steinwolle I und Steinwolle III, bzw. Schaumglas I und Schaumglas II. Hier führt die Erhöhung der Rohdichte, bei sonst gleichen Stoffdaten zu einer signifikanten Erhöhung der Amortisationszeit. Bei den zumeist geringeren Unterschieden in der Wärmeleitfähigkeit, z. B. zwischen EPS grau ($\lambda = 0,032$) und EPS weiß ($\lambda = 0,04$) bei ansonsten gleicher Rohdichte und Primärenergieinhalt, können keine großen Unterschiede in den energetischen Amortisationszeiten festgestellt werden.

Der Einfluss des Primärenergieinhalts auf die energetische Amortisationszeit ist zwar offensichtlich. Interessant ist aber, dass die zwischen den Produkten bestehenden Unterschiede im Primärenergieinhalt durch die zugeordneten Rohdichten und durch die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit kompensiert werden können. Ein Beispiel hierzu ist der Vergleich zwischen EPS weiß II ($\rho = 23 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$, PEI = 49,8 MJ/kg) und WF Trockenverfahren ($\rho = 110 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,040 \text{ W/(mK)}$, PEI = 9,10 MJ/kg) die insgesamt ähnliche Amortisationszeiten erreichen.

Um die beschriebenen Zusammenhänge zwischen PEI, Rohdichte/Dicke und Amortisationszeit allgemein darzustellen, ist in Abbildung 51 die Amortisationszeit als Funktion des PEI und der Rohdichte aufgetragen. Die Dicke ist konstant mit $d = 16 \text{ cm}$ angesetzt und die Wärmeleitfähigkeit wird mit $\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ berücksichtigt. Bei einer Variation der Dicke, statt der Rohdichte ist der Funktionsverlauf qualitativ gleich.

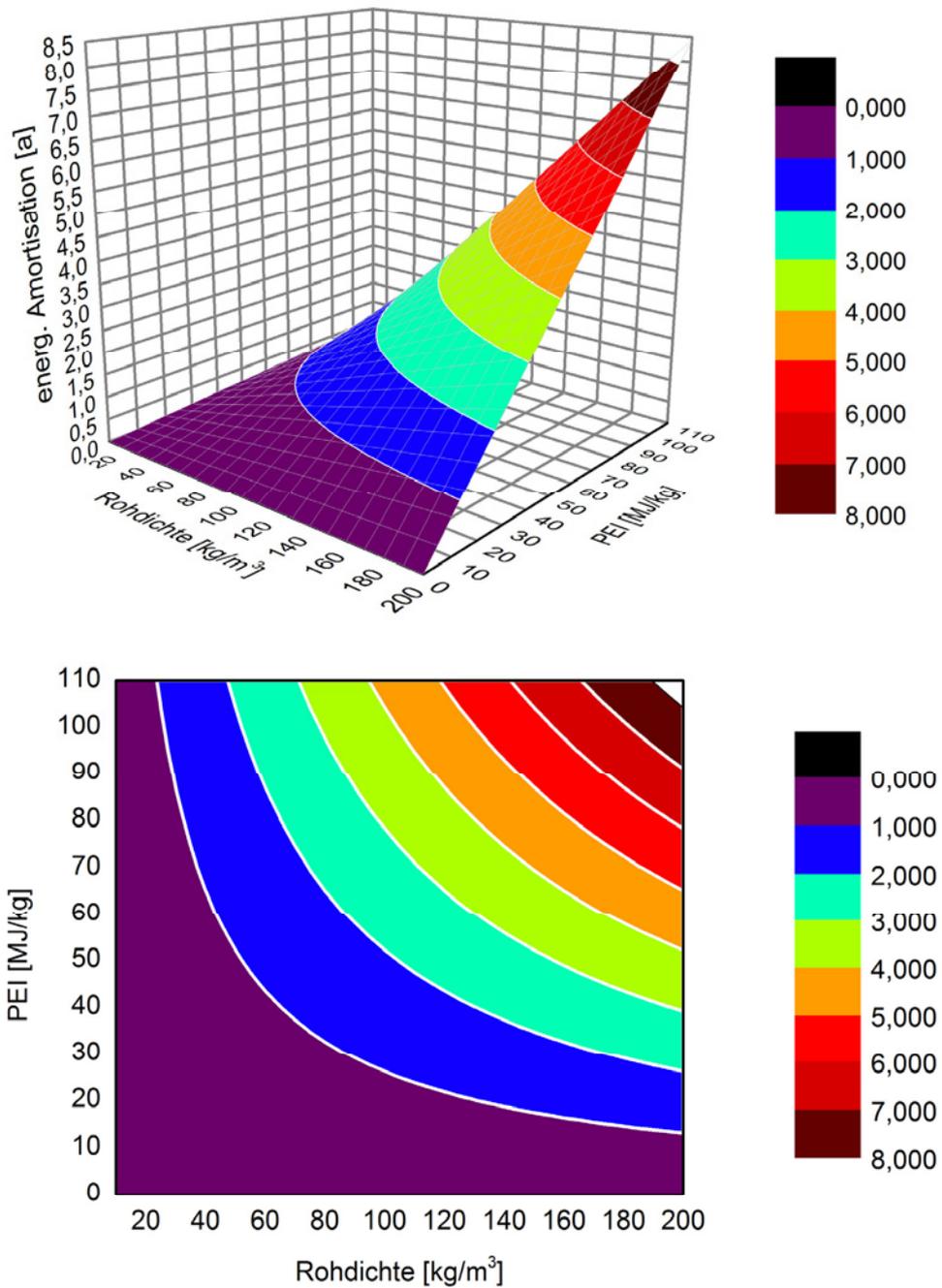


Abbildung 51: Energetische Amortisationszeit [a] als Funktion des Primärenergieinhalts [MJ/kg] und der Rohdichte [kg/m³] bei konstanter Wärmeleitfähigkeit = 0,04 W/(m·K) und Dicke = 16 cm; als 3D-Plot (oben) und Darstellung der Isolinien (unten)

Abbildung 51 enthält oben einen 3D-Plot, während im unteren Teil zur Verdeutlichung des Werteverlaufs die zugehörigen Isolinien der Amortisationszeit im Achsenkreuz von PEI und Rohdichte abgebildet sind. Es ist deutlich zu erkennen, dass Rohdichte und PEI einen ähnlichen Einfluss auf die energetische Amortisationszeit haben und sich deshalb gegenseitig kompensieren können. Eine Verdoppelung des PEI kann durch eine Halbierung der Rohdichte kompensiert werden.

Um die durch den möglichen Wertebereich beschränkere Einflussnahme der Wärmeleitfähigkeit auf die energetische Amortisationszeit zu verdeutlichen sind in Abbildung 52 wieder die Isolinien der Amortisationszeit als Funktion des PEI und der Wärmeleitfähigkeit abgebildet. Eine Verdoppelung des PEI erfordert auch hier zur Kompensation der energetischen Amortisation eine Halbierung der Wärmeleitfähigkeit, ein derart großes Differenzierungspotential ist aber nur zwischen wenigen Materialien gegeben.

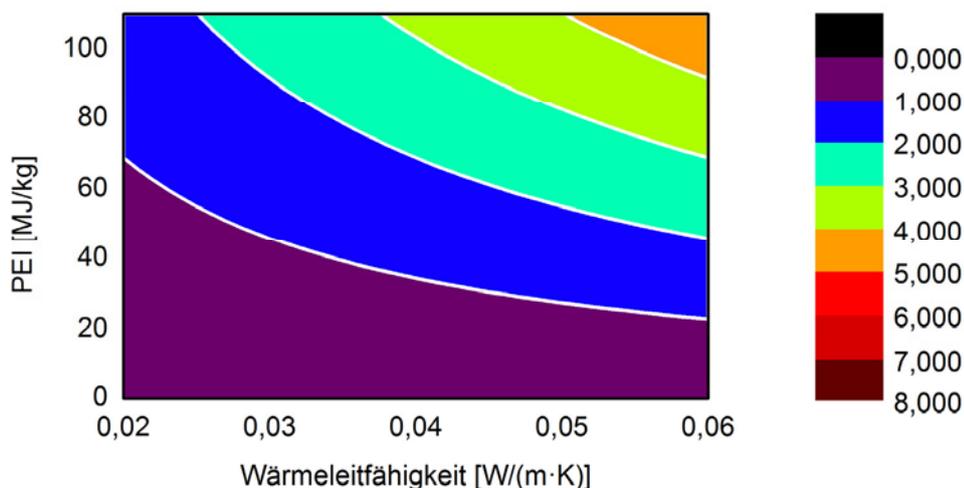


Abbildung 52: Isolinien der energetischen Amortisationszeit [a] als Funktion des Primärenergieinhalts [MJ/kg] und der Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] bei konstanter Rohdichte = 40 kg/m³ und konstantem U-Wert des Bauteils (Dämmschichtdicke nimmt mit geringerer Wärmeleitfähigkeit ab)

Erzeugungsbedingungen von Energie und Rohstoffen zur Herstellung

Für die in Tabelle 15 dargestellte Berechnung der energetischen Amortisationszeit wurde nur der Anteil des nicht erneuerbaren PEI herangezogen. Aber auch die Erzeugung erneuerbarer Energie ist mit Eingriffen in das Ökosystem verbunden. So sind mit der Aufstellung von Wind- und Wasserkraftanlagen bauliche Eingriffe in unterschiedliche Ökosysteme (Wald, Fluss) nötig und die verwendeten Generatoren und Hilfskonstruktionen müssen unter Energie- und Ressourceneinsatz hergestellt werden. Auch die Nutzung nachwachsender Rohstoffe erfordert zunächst deren Erzeugung, d. h. die Bewirtschaftung geeigneter Flächen mit den Begleitproblemen von Monokulturen, evtl. Maßnahmen zur Schädlingsbekämpfung und dem Energieeinsatz zur Ernte/Transport. All diese Faktoren müssten eigentlich auch bei der Beurteilung des Einsatzes erneuerbarer Energien berücksichtigt werden – was aber aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge schwierig ist und deshalb oft nicht in umfassender Art und Weise umgesetzt werden kann.

Trotzdem sollten Einzelaspekte (z. B. die Erzeugungsbedingungen), insofern die Wirkzusammenhänge abschätzbar sind, bei der Beurteilung der eingesetzten Roh-

stoffe in die Betrachtung mit einbezogen werden. Dies betrifft nicht nur die petrochemischen Produkte bei denen die Umweltauswirkungen der Erdölförderung und des –transports (Pipelineleckagen, Tankerhavarien) sowie die Produktion und Entsorgung daraus hergestellter Produkte immer wieder für Umweltskandale sorgen, sondern auch viele nachwachsende Rohstoffe. So ist beispielsweise der Anbau von Baumwolle mit großem Wasser-, Pestizid- und Düngemittleinsatz verbunden und die günstigen Rohstoffpreise sind zu einem Teil auch den schlechten Arbeitsbedingungen in den Herstellländern zuzuschreiben. Grundsätzlich ist eine der Leistungsfähigkeit der Erzeugung angepasste Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen anzustreben, wobei eine kontrollierte Flächenbewirtschaftung auch aus Natur- und Umweltschutzinteressen heraus sinnvoll ist. Dies erfordert aber eine wirtschaftlich tragfähige Basis, die nur mit Hilfe der Herstellung und dem Vertrieb von, aus den angebauten Rohstoffen hergestellten, technisch ausgereiften Produkten erreicht werden kann.

Bewertung von Umweltwirkungen

Neben den Fragen der energetischen Amortisation müssen auch die angesprochenen Auswirkungen des Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO₂ eq.], Ozonabbaupotential (ODP) [kg C₂H₂], Versauerungspotential (AP) [kg SO₂ eq] und Eutrophierungspotential (EP) (Überdüngungspotential) [kg PO₄ eq] berücksichtigt werden. Ein Vergleich unterschiedlicher Materialien führt dabei aber nicht immer zu eindeutigen Ergebnissen, vor allem dann wenn bei den genannten Umweltwirkungen gegenläufige Tendenzen zu beobachten sind.

Tabelle 18 enthält ausgewählte Ökobilanzdaten zu drei Dämmstoffen für eine Dämmung der Außenwand (vereinfachend wird nur der Dämmstoff betrachtet, ohne Montage, Putz, Anstrich, etc.) bezogen auf eine Fläche von 1 m² zur energetischen Ertüchtigung eines Rohbauteils mit U = 1,4 W/(m²·K) auf einen sanierten Zustand mit U = 0,18 W/(m²·K).

Tabelle 18: Ökobilanzdaten zu drei Materialalternativen für die Dämmung eines Wandbauteils, bezogen auf 1 m² Fläche bei der Dämmung eines Rohbauteils mit U = 1,4 W/(m²·K) auf U = 0,18 W/(m²·K) (eigene Berechnungen, Daten aus Hersteller EPDs)

	Energetische Amortisationszeit [a]	Treibhauspotential GWP 100 [kg CO ₂ eq. / m ²]	Versauerungspotential AP [kg SO ₂ eq / m ²]
Holzfaser (ρ = 110 kg/m ³) (EPD-GTX-2011111-D)	0,6	-20,0	0,0161
Glaswolle (ρ = 20 kg/m ³) (EPD-GHI-2011212-D)	0,3	6,02	0,0228
EPS (ρ = 25 kg/m ³) (EPD-IVH-2009311-D)	0,6	15,1	0,0152

Es ist zu erkennen, dass die energetischen Amortisationszeiten von Holzfaser und EPS mit ca. 0,6 Jahren vergleichbar ausfallen. Die ausgewählte Glaswolle erreicht

nach 0,3 Jahren deutlich am schnellsten die energetische Amortisation. Trotz der Unterschiede zwischen Holzfaser/EPS und Glaswolle liegen die energetischen Amortisationszeiten aber insgesamt auf einem so niedrigen Niveau, dass dieser Parameter im Vergleich vernachlässigbar ausfällt.

Bezüglich des GWP hat die Holzfaser mit einem negativen Treibhauspotential von $-20,0 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. / m}^2$ Vorteile gegenüber den Varianten aus Glaswolle und EPS, während beim Versauerungspotential die Variante mit EPS die niedrigsten Werte zeigt, gefolgt von Holzfaser und Glaswolle.

Aufgrund der großen Unterschiede beim GWP und den insgesamt niedrigen energetischen Amortisationszeiten, könnte ein Vergleich unter ökologischen Gesichtspunkten momentan zu Gunsten der Holzfaserdämmung entschieden werden. Bei einer anderen Gewichtung und unter Einbeziehung weiterer (evtl. zurzeit noch nicht genutzter) Ökobilanzdaten sind aber theoretisch durchaus auch andere Entscheidungsszenarien denkbar. Auch eine Erweiterung der Betrachtung auf die anzuwendenden Hilfsstoffe, benötigtes Konstruktionsmaterial und den Montageaufwand einschließlich des Transports zur Baustelle kann die Ergebnisse im Einzelfall signifikant beeinflussen.

Hinzu kommt natürlich auch die technologische Seite der Anwendung. Wie beschrieben müssen bei Vergleichen auf Basis von Ökobilanzen alle betrachteten Materialien die geforderten Eigenschaften technologisch sicher abbilden können. Bei Perimeterdämmungen können beispielsweise aufgrund der hohen Anforderung an die Feuchte- und Druckbeständigkeit überhaupt nur einige wenige Materialien verwendet werden.

Der Betrachtungsansatz „cradle to grave“ bezeichnet den Bilanzierungszeitraum von der Herstellung bis zur Entsorgung des Materials in Form einer thermischen Verwertung oder der Deponierung. Dabei ist zu beachten, dass für die verschiedenen Materialien unterschiedliche Arten der Weiter- oder Wiederverwendung (Recycling) existieren, die eine Verlängerung der Nutzung (Wiederverwendung z. B. bei Schüttdämmstoffen) oder eine Umnutzung (Weiterverwendung von geschredderten EPS-Resten als Granulat zur Dämmung) ermöglichen.

Möglichkeiten der Weiter- und Wiederverwendung können durch eventuell in den Produkten enthaltene Flammschutzmittel und Biozide erschwert oder verhindert werden. Angaben zur Umweltbeeinflussung durch die Auswaschung von Bioziden aus Fassadenbeschichtungen finden sich in Kapitel 8.2, Veralgung von Fassaden. Toxikologische Probleme durch den Einsatz von Flammschutzmitteln werden im Kapitel zur Soziokulturellen Qualität, exemplarisch aufgegriffen.

Die beschriebenen Abhängigkeiten und Vergleiche sollen ein Gefühl dafür vermitteln, dass die Einbeziehung von ökologischen Parametern zur Entscheidungsfindung bei der Material- und Konstruktionsauswahl einen vielschichtigen Themen-

komplex darstellt. Richtig angewendet lassen sich ökologisch günstige Entwicklungen trotzdem gut indizieren und es können nachprüfbare Kriterien für die Förderung dieser Technologien entwickelt werden.

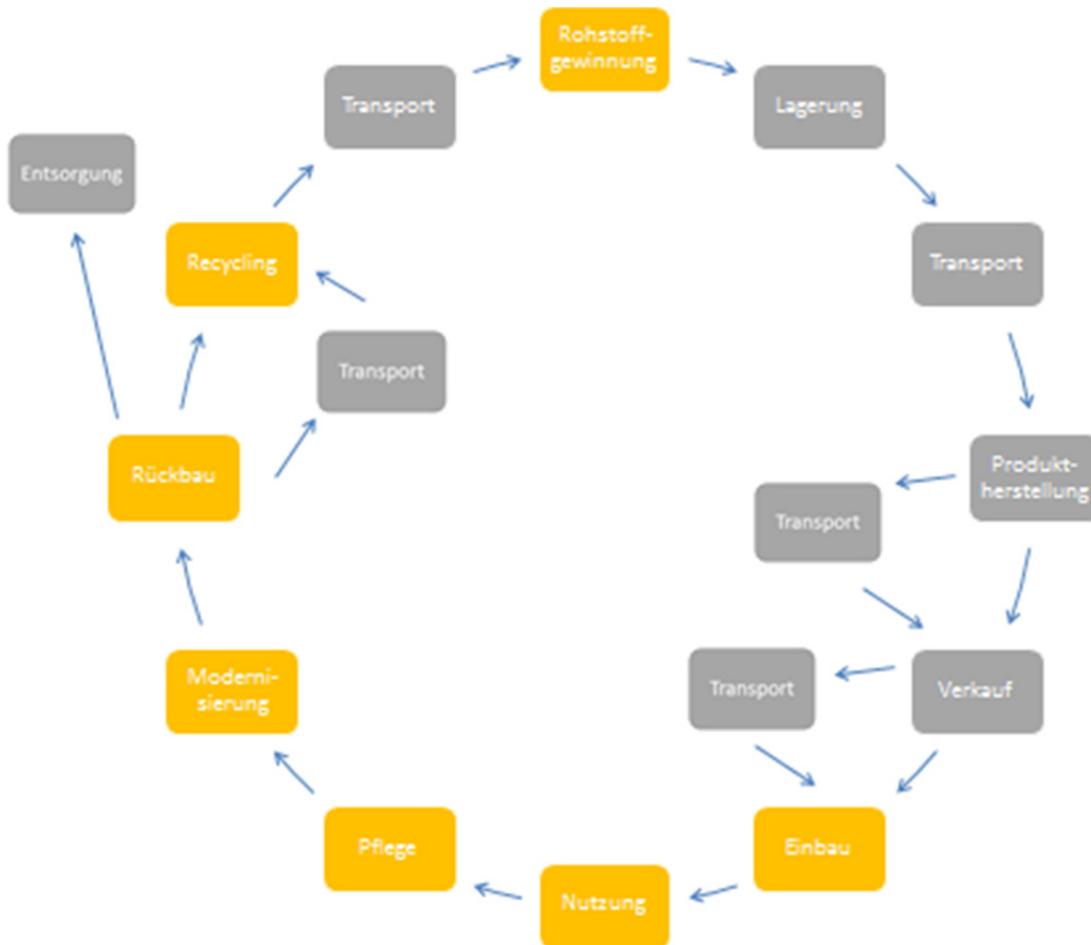


Abbildung 53: Lebenszyklus eines Dämmstoffes von der Rohstoffgewinnung, über die Herstellung bis hin zum Rückbau / Recycling

5.3 Ökonomische Qualität

Die ökonomische Qualität beschreibt die Effektivität und Sicherheit des eingesetzten Kapitals in Bezug auf eine Minimierung der Lebenszykluskosten, einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und den Erhalt von Kapital und Werten. Die getätigten Aufwendungen für eine bestimmte Maßnahme können unter ökonomischen Aspekten auf den Zeitraum der Nutzung der Investition verteilt werden. Unter diesen Gesichtspunkten ist naturgemäß eine möglichst lange Nutzung anzustreben. Dies wird z. B. durch die Umsetzung von Maßnahmen unterstützt, die im Rahmen der aktuellen Möglichkeiten auch zukünftigen Anforderungen gerecht werden können. Bezogen auf die Dämmung ist dies z. B. die Realisierung ausreichend großer Dämmstärken. Im Vergleich zu einer Sanierungsmaßnahme am geforderten Mindeststandard der EnEV sind beispielsweise die Zusatzkosten für größere Dämmstoffdicken gering, der Eigentümer berücksichtigt so aber sowohl die zukünftigen U-Wert-

Entwicklungen der gesetzlichen Vorschriften, was den Werterhalt der Immobilie sichert und koppelt sich andererseits von den kommenden Preissteigerungen für Energie ab.

Um auf diesem Ansatz verschiedene Optionen miteinander zu vergleichen, muss zunächst geklärt werden, welche Kosten in die Betrachtung mit einbezogen werden. Dabei müssen sich alle Angaben, wie schon bei den ökologischen Betrachtungen, auf eine vergleichbare technische Funktionalität beziehen. Dies berücksichtigt die Verwendbarkeit in Hinsicht auf den fraglichen Feuchte- und Temperaturbereich sowie den Bezug auf einen vergleichbaren U-Wert. Direkt mit dem Produkt verknüpft sind zunächst die Material und Verarbeitungskosten.

Material- und Verarbeitungskosten

Die Materialkosten beziehen sich auf den Abgabepreis des verarbeiteten Produkts einschließlich des Transports zur Baustelle, während die Verarbeitungskosten den Aufwand für den Einbau, einschließlich der nötigen Hilfskonstruktionen (Gerüst, etc.) beschreiben. Je nachdem, welche Materialgruppe betrachtet wird, haben insbesondere auch die Verarbeitungskosten einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten.

In [Paschko et al. 2013] sind Kosten verschiedener Dämmstoffe [€/m²] für einen Dämmwert von $U = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angegeben. Die dort genannten Preise sind als orientierende Richtwerte zu verstehen und unterliegen erheblichen regionalen und zeitlichen Schwankungen. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur qualitative Aussagen getroffen. Zudem muss beachtet werden, dass nicht alle Materialien für alle Anwendungsfälle oder die individuell in einer Anwendung gegebenen Konstruktionen geeignet sind.

Im Bereich der plattenförmigen Dämmstoffe sind Produkte aus EPS und PU am günstigsten. Plattenförmige Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe (z. B. Hanfplatten oder Holzweichfaserplatten) liegen im mittleren Preissegment. Vergleichsweise teuer sind mineralische Plattenmaterialien (Perlite, Calciumsilikat) und High-Tech-Materialien wie Vakuumdämmung und pyrogene Kieselsäure. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass diese Materialien auch besondere Eigenschaften und meist einen Zusatznutzen gegenüber herkömmlichen Produkten aufweisen, so dass der Einsatz zurzeit auch eher in Spezialanwendungen erfolgt. So werden Platten aus Calciumsilikat bei besonderen Anwendungsrandbedingungen im Bereich der Innendämmung verwendet und Vakuumdämmungen ermöglichen aufgrund der extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeit derzeit konkurrenzlos schlanke Wandaufbauten.

Sind keine besonderen Anforderungen an die Druckfestigkeit der Dämmstoffe gegeben (z. B. Zwischensparrendämmung, Dämmung der obersten Geschossdecke), so lassen sich die niedrigsten Kosten aktuell mit Mattendämmstoffen aus Glas- oder Steinwolle und mit Einblasdämmungen aus Zellulose- oder Holzfasern erreichen.

Bei diesen Materialien wirken sich vor allem die geringen Verarbeitungskosten preissenkend aus, die durch den Einsatz von pneumatischen Fördermitteln (Einblasverfahren) erreicht werden. Da das lose Material direkt in die Wandgefache einblasen wird, entfällt ein Zuschnitt der Materialien. Darüber hinaus müssen keine zusätzlichen Hilfsstoffe wie Kleber oder Mörtel verarbeitet werden, was neben der Kosteneinsparung auch eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit mit sich bringt. Einblasdämmungen können also eine kostengünstige Lösung sein, wenn die notwendigen konstruktiven Voraussetzungen bestehen.

Ein detaillierter Vergleich zu den Kosten unterschiedlicher Wärmedämm-Maßnahmen findet sich auch in [Hauser et al. 2011]. Aufgrund der Problematik eines direkten Kostenvergleichs bei unterschiedlichen Eigenschaften der ausgewählten Dämmstoffe, beziehen sich die Autoren auf ausgewählte Sanierungsszenarien. Verglichen werden die Kosten für die nachträgliche Dämmung einer Außenwand mit Wärmedämmverbundsystemen, der oberseitigen Dämmung einer begehbaren/nicht begehbaren obersten Geschossdecke, der unterseitigen Dämmung einer Kellerdecke und der Dämmung eines nicht belüfteten Flachdaches mit Dämmschicht unterhalb der Abdichtung.

Aufgrund der konkreten Sanierungssituation mit detaillierten Anforderungen an die Materialeigenschaften der benötigten Dämmstoffe ist ein realitätsnaher Preisvergleich möglich.

Bei der Dämmung der Außenwand mittels WDVS können die günstigsten m²-Preise mit EPS und Mineralwolle realisiert werden. Dämmstoffe aus Mineralschaum und Holzfaserplatten schneiden im Vergleich teurer ab.

Die oberseitige Dämmung einer zugänglichen aber nicht begehbaren obersten Geschossdecke kann am günstigsten mit Mineralwolleplatten oder einer Zellulose-Einblasdämmung umgesetzt werden. Etwas teurer sind Varianten mit EPS.

Eine begehbare Dämmung der obersten Geschossdecke erfolgt am günstigsten mit EPS und Mineralwolle-Dämmstoffen. Die Kosten liegen aber insgesamt dicht zusammen. Etwas teurer sind Lösungen aus PU oder Holzweichfaserplatten. Die Unterschiede sind aber verglichen mit den Abständen bei der Dämmung der Außenwand insgesamt geringer.

Bei der betrachteten Kellerdeckendämmung hat die Maßnahme mit Mineralwolle die günstigsten m²-Kosten. Vergleichsvarianten aus EPS und PU kommen nur wenig teurer. Mineralische Platten (Porenbeton, Mineralschaum) sind hier im Vergleich das teuerste Material.

Die Sanierung des nicht belüfteten Flachdachs mit Dämmschicht unterhalb der Abdichtung kann am günstigsten mit EPS umgesetzt werden, wobei hier auch die unterschiedlichen Konstruktionsvarianten größeren Einfluss auf den Gesamtaufwand

haben. Die vorgestellten Lösungen mit Mineralwolle und PU sind etwas teurer.
[Hauser et al. 2011]

Auch die eben vorgestellten Aussagen zu den Kosten für die genannten Sanierungsbeispiele sind exemplarisch zu verstehen und können je nach konkreter Sanierungssituation variieren.

Wartungs- und Pflegekosten

Dämmungen erfordern im Allgemeinen keine besonderen Wartungs- und Pflegemaßnahmen. Es muss jedoch gewährleistet sein, dass Dämmstoffe und Tragkonstruktion dauerhaft trocken bleiben. Eindeckungen, Abdichtungen, Putze, Anstriche usw. müssen daher instand gehalten und in regelmäßigen Abständen erneuert werden. Diese Wartungsmaßnahmen sind aber auch bei nicht gedämmten Gebäuden notwendig, um Feuchteschäden zu verhindern. Sie können daher nicht der Wärmedämmung zugerechnet werden.

Kosten für den Rückbau

Zuletzt sind am Ende der Nutzungsdauer noch die Kosten für den Rückbau/Abriss zu berücksichtigen. Auch hier gibt es signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Systemen. Während z. B. lose Materialien abgepumpt und nach einer Reinigung der Wiederverwendung zugeführt werden können, sind insbesondere Verbundprodukte (z. B. WDVS) die aus verschiedenen Schichten mit einer für die Anwendung notwendigen, hohen Verbundfestigkeit bestehen, schwieriger zu entfernen und zu trennen. Trotzdem können auch hier vorteilhafte Effekte genutzt werden, etwa wenn die alte Dämmschicht nicht entfernt werden muss, sondern z. B. als Trägergrund für eine Aufdoppelung weiterverwendet werden kann.

Nutzungsdauer

Für die Entwicklung der oben beschriebenen Kosten über der Nutzungsdauer, ist im Hinblick auf eine hohe ökonomische Qualität vor allem auch die Schadensfreiheit des Systems entscheidend. Diese beeinflusst wie vorab beschrieben in erster Linie die Baunutzungskosten in Form von Reparaturen und Nachbesserungen. Im schlimmsten Fall kann auch eine Verkürzung der Lebensdauer eintreten, was einen vorzeitigen Austausch des Dämmsystems nach sich zieht. Falls Bauschäden (meist durch Feuchteprobleme) auch andere Bauteile betreffen, sind auch weiter gehende Schäden möglich. Um Schadensfällen vorzugreifen und damit verbundene Kosten zu vermeiden, sind geeignete qualitätssichernde Maßnahmen zu ergreifen.

Diese beginnen in der Regel bereits in der Planungsphase, welche die konstruktiven und bauphysikalischen Besonderheiten des Objekts und der konkreten Anwendung berücksichtigen sollte. Hier empfiehlt es sich frühzeitig einen geeigneten Fachplaner einzusetzen, und dessen Verantwortlichkeiten für die Durchführung der Maßnahme klar zu definieren. Wichtige Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit der Maßnahme und damit auf die ökonomische Qualität haben nach [Pfundstein et al. 2007] vor allem:

- die Gütesicherung und Nachhaltigkeit der technischen Funktionen
- die Instandsetzungs- und Reparaturfreundlichkeit
- die Nutzungsflexibilität der Konstruktionen
- die Einschränkung der Materialvielfalt
- der Einsatz lösbarer Verbindungen
- die Sicherstellung der Wieder- oder Weiterverwendbarkeit (Recyclingfähigkeit)

Im Weiteren ist auch die Produktqualität des eingesetzten Dämmstoffs, die durch entsprechende Kontrollmaßnahmen der Eigen- und Fremdüberwachung in den Herstellwerken gesichert sein sollte entscheidend.

Bei Beachtung der genannten qualitätssichernden Maßnahmen lässt sich bei allen gängigen Anwendungen eine Nutzungsdauer erreichen, die im Bereich der üblichen Sanierungszyklen von ca. 30 – 60 Jahren liegt (Tabelle 19). Auf Basis der durchschnittlichen Nutzung können die ermöglichten Energieeinsparungen aufgrund der Effizienzsteigerung berechnet werden. Mit Hilfe von Abschätzungen zur Energiepreisentwicklung können diese Energieeinsparungen dann in Kosteneinsparungen umgerechnet werden, wobei die sehr langen Betrachtungszeiträume hier eine große Unsicherheit bezüglich der Energiepreisentwicklungen mit sich bringen. Die voraussichtlich eingesparten Kosten können schließlich in Form einer Rentabilitätsbetrachtung den diskutierten Kosten für die Maßnahme gegenübergestellt werden.

Tabelle 19: Nutzungsdauer von Dämmmaßnahmen an bestimmten Bauteilen nach [Albrecht und Koppold 2010] und [BMVBS 2011]

Bauteil	[Albrecht und Koppold 2010]		[BMVBS 2011]
	Bereich [a]	Durchschnitt [a]	Bereich [a]
Wärmedämmung (im Flachdach/Warmdach)	30-60	45	k. A.
Steildach	40-60	50	50+
Umkehrdach	40-60	50	k. A.
Decke, Fußboden	30-100	65	50+
Außenwand hinter Bekleidung	30-60	45	30 – 50+
Wärmedämmverbundsystem	30-50	40	40
Kerndämmung	30-60	45	50+
Unter der tragenden Gründungsplatte	50-100	75	50+
Perimeterdämmung	30-100	65	40 – 50+
Technische Gebäudeausrüstung	5-25	15	k. A.

Kosten und Rentabilität

Die Begriffe Kosten und Rentabilität sind zunächst voneinander abzugrenzen und die jeweils damit verbundenen Probleme getrennt zu betrachten.

Kosten werden zum Hindernis für eine energetische Sanierung wenn den Eigentümern oder Investoren die finanziellen Möglichkeiten zur Umsetzung der Maßnahmen fehlen. Im Jahr 2010 schätzen immerhin über 70 % der Eigentümer die finanzielle Belastung durch die Wohnkosten als „gewisse-„ oder „große Belastung“ ein [Destatis 2012]. Die Gründe hierfür können vielfältig sein. Häufig schränkt der für den Bau des Hauses oder der Wohnung aufgenommene Kredit über lange Jahre die liquiden Mittel ein, so dass wenig Raum für Sparraten zur Umsetzung zukünftiger Sanierungsmaßnahmen bleibt. Sind nach entsprechenden Laufzeiten der Finanzierung die Belastungen geringer, haben sich oftmals die privaten Lebensumstände der Bewohner verändert. In Familien können beispielsweise die Kinder ausgezogen sein und das Gebäude wird ohnehin nur noch in Teilen genutzt, so dass die Bereitschaft in die Sanierung zu investieren wieder sinkt.

Sind prinzipiell Mittel zur Realisierung der Sanierungsvorhaben vorhanden, steht die Frage nach der Rentabilität im Vordergrund. Außerhalb des regulären Sanierungszyklus und ohne politische Fördermaßnahmen sind die meisten Sanierungsvorhaben innerhalb üblicher Amortisationszeiträumen unter rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten wenig rentabel. Wird eine Vollkostenbetrachtung angesetzt, so sind

laut [Henger und Voigtländer 2012] für die dort diskutierten Beispiele innerhalb eines Amortisationszeitraums von 14 Jahren weniger als 50 % der Vollkosten durch die eingesparten Energiekosten abbildbar. Die Autoren konstatieren, dass die Finanzierungslücke so groß ist, dass auch durch Förderprogramme keine wirtschaftliche Tragfähigkeit hergestellt wird. Um die Attraktivität zu verbessern, sind deshalb unterstützende Maßnahmenpakete durch die Politik nötig.

In der Studie von [Pfnür und Müller 2013] werden detaillierte Prognosen zu den Kosten unterschiedlicher Sanierungsfahrpläne und den daraus abgeleiteten finanziellen Belastungen für Eigentümer und Mieter aufgestellt. Für den Mieter führen energetische Sanierungen zu höheren Kosten für das Wohnen. In der Studie werden für Vollsanierungen in exemplarischen Berechnungen Steigerungen der Kosten für das Wohnen in Höhe von 1,70 – 2,90 [Euro/(m²_{Wohnfläche} Monat)] errechnet. Die Kosten sind als durchschnittliche, inflationsbereinigte Steigerung der Kosten des Wohnens ohne separate Mietpreissteigerungen im Zeitraum von 2015 – 2050 gegenüber 2012 zu verstehen und ergeben sich aus der Annahme einer Mietpreiserhöhung im Rahmen der gesetzlich zulässigen Grenzen zur Umlage von energetischen Sanierungsmaßnahmen und Gegenrechnung der eingesparten Energiekosten. Unter der Annahme einer Mieterhöhung im gesetzlich zulässigen Rahmen lassen sich für den Vermieter bei der schrittweisen Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen je nach Gebäudetyp und Technologie, Eigenkapitalrenditen von 3,35 – 4,75 % erzielen. Sollten sich Mietumlagen allerdings nicht in rechtlich vorgesehener Höhe umsetzen lassen, kann die Eigenkapitalrendite geringer ausfallen. Deutlich höhere Renditen lassen sich nach [Pfnür und Müller 2013] für Selbstnutzer erzielen. In der Studie werden je nach Gebäudetyp und Technologie, Eigenkapitalrenditen von 5,06 – 5,83 % errechnet, die damit auch über der im Wohnungsbereich üblichen Zielrendite von 5 % liegen.

Steuerliche Anreize, wie die im Gesetz zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungsmaßnahmen geplante, aber inzwischen im Vermittlungsausschuss abgelehnte, Abschreibung von 10 %, könnten gerade auch im Bereich der Eigentümer, die ihre Immobilie nicht selbst nutzen, zu einer erhöhten Investitionsbereitschaft führen, da auf diese Weise der private Investor direkter an den getätigten Aufwendungen partizipieren würde. Dies ist insbesondere in Gebieten wichtig, in denen die Möglichkeiten zur Mietpreissteigerung entweder strukturbedingt (ländlicher Raum) oder durch Mieten die sich bereits an der Obergrenze der örtlichen Vergleichsmieten befinden, begrenzt sind. Aus dem bereits diskutierten Rebound-Effekt leitet sich zudem für den Mieter ab, dass eventuelle finanzielle Vorteile aufgrund von Minderverbräuchen sowieso gering ausfallen und damit u. U. zunächst durch die Mietpreiserhöhungen überkompensiert werden können. Ein Vorteil gegenüber der Mietsituation in energetisch nicht modernisierten Gebäuden stellt sich u. U. erst nach langer Zeit ein.

Allen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten geführten Rentabilitätsbetrachtungen muss zunächst die Frage nach der richtigen Bezugsgröße zu Grunde gelegt wer-

den. Regelmäßige Sanierungen und Wartungen von Bauteilen (Fenster, Türen, Fassadenanstriche, etc.) sind in bestimmten Abständen ohnehin nötig, um den Wert einer Immobilie langfristig zu sichern und bei einer Anpassung der Mietpreise die Vermietbarkeit zu gewährleisten. Wird eine energetische Sanierung dann innerhalb der regulären Sanierungszyklen durchgeführt, so sind nicht die Vollkosten in die Rentabilitätsberechnung der Maßnahme einzubeziehen, sondern nur der Anteil, der tatsächlich der verbesserten energetischen Performance zurechenbar ist.

Tabelle 20: Energiebedingte Mehrkosten, Zusammenstellung von Werten aktueller Studien

% - Anteil energiebedingter Mehrkosten (Min – Mittelwert – Max) [Henger und Voigtländer 2012]	EFH	MFH
	34 – <u>38</u> - 54	29 – <u>43</u> - 61
% - Anteil energiebedingter Mehrkosten [Hinz 2012]	WDVS	Steildach mit Zwischen- sparren.-Dämmung
	41	26

In [Henger und Voigtländer 2012] sind die Anteile der in sieben anderen Studien ermittelten „energiebedingten Mehrkosten“ ausgewählter Sanierungsvorhaben zusammengefasst dargestellt (Tabelle 20). Die energiebedingten Mehrkosten liegen demnach im Mittel bei ca. 40 % der Vollkosten, was bei einer Berechnung der Amortisationszyklen zu berücksichtigen ist. Unter dem ausschließlichen Ansatz der energiebedingten Mehrkosten wird rund ein Drittel der Maßnahmen wirtschaftlich rentabel, im Zusammenspiel mit Förderprogrammen können schließlich zwei Drittel die wirtschaftliche Rentabilität erreichen. In [Hinz 2012] sind energiebedingte Mehrkosten für unterschiedliche Maßnahmen bei der energetische Modernisierung von Wohngebäuden erfasst. Für die Aufbringung eines WDVS werden ebenfalls ca. 40 % der Kosten (Vollkosten 123 €/m², energiebedingte Mehrkosten 51 €/m²) als energiebedingte Mehrkosten veranschlagt. Bei energetischen Maßnahmen am Dach werden für die betrachteten Beispiele ca. 26 % der Vollkosten als energiebedingte Mehrkosten angerechnet (Vollkosten 224 €/m², energiebedingte Mehrkosten 59 €/m²).

Abbildung 54 zeigt darüber hinaus die Entwicklung des Anteils der energetisch bedingten Mehrkosten bei unterschiedlichen Sanierungszielen (moderate vs. ambitionierte Sanierung). Dabei ist interessant, dass die Unterschiede im Anteil der energiebedingten Mehrkosten zwischen einer moderaten und ambitionierten Sanierung, im Verhältnis zu den Gesamtkosten gering sind. Eine ambitionierte energetische Sanierung (größere Dämmstoffdicke) ist also nur unwesentlich teurer, ermöglicht aber langfristig höhere Einsparpotentiale.

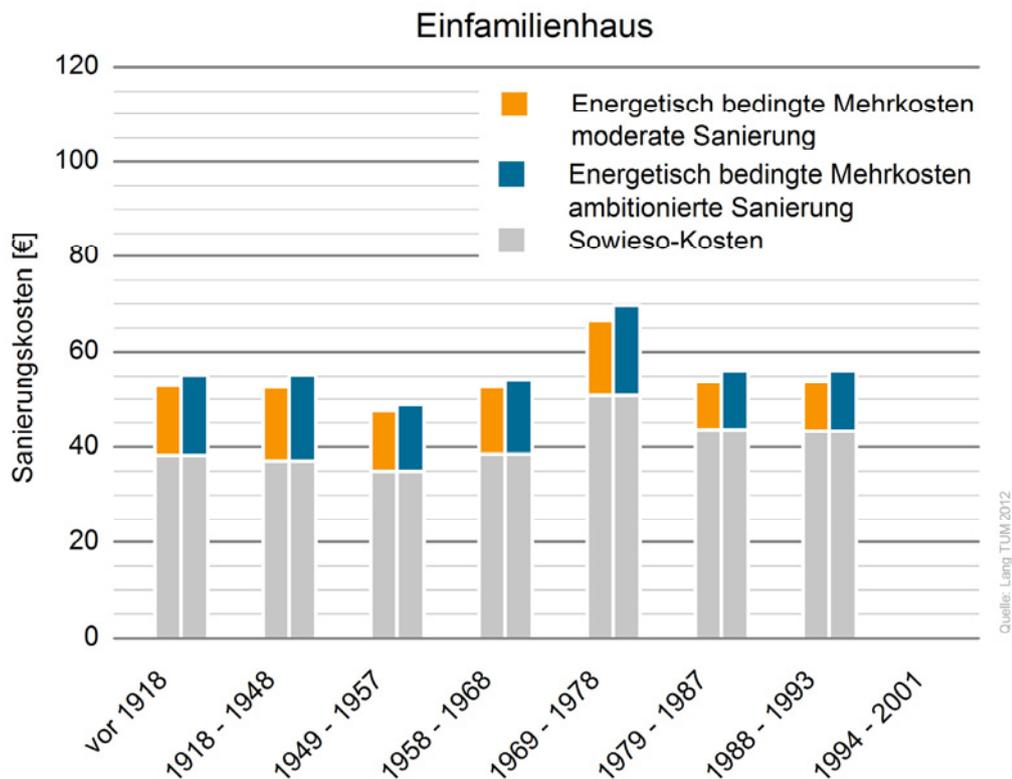


Abbildung 54: Energetisch bedingte Mehrkosten von Sanierungen

Trotz zahlreicher Beispiele in der Literatur (Gerüstkosten, Putz, Anstrich, etc.) ist die Abgrenzung von energiebedingten Mehrkosten zu den „Sowieso-Kosten“ nicht einfach und wirft je nach konkretem Fall zahlreiche Fragen auf. Kellerdeckendämmungen sind ein Beispiel für Bauteile die in der Regel keiner Sanierung bedürfen, aus energetischer Sicht aber trotzdem relevante thermische Verluste verursachen, weshalb eine energetische Ertüchtigung sinnvoll ist. Die hierbei anfallenden Kosten müssten bei einer Rentabilitätsbetrachtung also vollständig angesetzt werden.

Im Weiteren ist unklar wie vorgezogene Maßnahmen bewertet werden können, die aus Gründen der sinnvollen Koppelung von Maßnahmen durchgeführt werden. Zudem könnte man auch argumentieren dass bei Ansatz der Sowieso-Kosten auch eine Berücksichtigung des Sowieso-Nutzen erfolgen müsste. Ein Beispiel hierfür wäre der Austausch eines alten Fensters mit altersbedingt undichter Falzausbildung gegen ein neues Fenster mit einem besseren U-Wert. Betrachtet man in diesem Fall den tatsächlichen Energieverbrauch als Grundlage für die Amortisationsberechnung, so dürfte dann auch nur die Verbrauchsminderung durch die bessere Verglasung und den Rahmen mit einfließen und nicht die Energieeinsparung aufgrund der dichten Ausbildung des Fensterfalzes, da dieser bei einem Austausch gegen ein gleichwertiges Fenster mit altem U-Wert, aber dicht schließender Falzausbildung sowieso einen positiven Nutzen in Richtung einer Verringerung der Wärmeverluste gebracht hätte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass energetische Maßnahmen unter wirtschaftlichen Bedingungen nur innerhalb der regulären Instandhaltungszyklen wirtschaftlich sinnvoll realisiert werden können. Bei einer Berechnung der Rentabilität sind wenn möglich und abgrenzbar, nur die energiebedingten Mehrkosten in Ansatz zu bringen. Trotzdem sind förderpolitische Maßnahmen unabdingbar, um in der Breite energetische Maßnahmen finanzierbar und wirtschaftlich rentabel umsetzbar zu machen.

Natürlich müssen auch die nicht direkt wirtschaftlich messbaren Vorteile, wie eine Erhöhung des Wohnkomforts, mehr nutzbare Wohnfläche durch die Beheizung früher unbeheizter Bereiche und eine Erhöhung des Immobilienwerts bei der Entscheidungsfindung mit berücksichtigt werden. Da Preisentwicklungen und die Verfügbarkeit von Energie auch von Experten nur sehr grob abgeschätzt werden können, bietet eine energetische Sanierung zudem eine Absicherung vor zukünftigen Versorgungslücken. Auch diese Vorteile müssen mit Hilfe von Informationsinstrumenten kommuniziert werden.

Wirtschaftlichkeit aus wohnungswirtschaftlicher Sicht

Die Wohnungswirtschaft verweist darauf, dass der Ansatz sog. energiebedingter Mehrkosten sowie eine Wirtschaftlichkeitsberechnung, die nur für die Bauteildämmung durchgeführt wird, wohnungswirtschaftlich nicht investitionsentscheidend sein können. Dies ist wie folgt begründet:

In der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung wird unter dem Begriff „Investition“ die Kapitalverwendung verstanden, also die Umwandlung von Kapital in Vermögen. Die Investition in eine Wohnimmobilie umfasst damit alle mit der Investition im Zusammenhang stehenden Zahlungen. Üblicherweise wird die Wirtschaftlichkeit einer Investition mit Hilfe des vollständigen Finanzplanes, kurz VoFi-Methode genannt, nachgewiesen. Wesentliche Kriterien in die VoFi-Berechnung sind die Vollkosten der Maßnahme einerseits, die erzielbare Mieterhöhung, die Leerstandsreduzierung und ggf. verringerte Instandhaltungskosten andererseits [GdW 2010]. Aus wohnungswirtschaftlicher Sicht stehen die sog. Sowieso-Kosten für einen Kostenblock, dem keine in der Praxis umsetzbare Maßnahme gegenüber steht, weswegen Sowieso-Kosten aus wohnungswirtschaftlicher Sicht bei der Investitionsrechnung mit in Ansatz gebracht werden müssen [Neitzel und Schulze Darup 2011]. Neben der VoFi-Berechnung (Rentabilitätssicht) bestehen als weitere Entscheidungskriterien die finanzwirtschaftliche Sicht (positive operative Cashflows) und die erfolgswirtschaftliche Sicht (positive Jahresergebnisse in der Gewinn- und Verlustrechnung) [GdW 2010].

5.4 Soziokulturelle Qualität

Die soziokulturelle Qualität beschreibt Aspekte der Bewahrung der Gesundheit der mit dem Produkt in Kontakt tretenden Personen, die Gewährleistung der Funktionalität unter den Aspekten eines behaglichen Raumklimas und nicht zuletzt auch die Sicherung der gestalterischen und städtebaulichen Qualität.

Ein Kontakt zwischen Personen und Material findet während verschiedener Phasen des Produktlebenszyklus und auf unterschiedlichen Ebenen statt.

Möglichkeiten der Interaktion zwischen Mensch und Material

Am Beginn aller produktbezogenen Wirkungen steht die Produktion der Rohstoffe. Hier sind neben den im Kapitel 5.2 beschriebenen Auswirkungen auf die Umwelt auch die Arbeitsbedingungen der beteiligten Mitarbeiter zu beachten. Gleiches gilt für die Produktion der Materialien in den Herstellerwerken. Geeignete Arbeitsschutzvorschriften und hoch automatisierte Prozesse, die den händischen Eingriff in die Produktion minimieren, gewährleisten ein für die Mitarbeiter sicheres Arbeitsumfeld. Beim Einbau der Materialien ist ein intensiver Kontakt zwischen Mensch und Material nicht zu vermeiden. Eventuellen Belastungen durch Fasern und Stäuben, aber auch flüchtiger Inhaltsstoffe während dem Zuschnitt und der Montage kann durch die Wahl entsprechender Schutzmaßnahmen begegnet werden. In diesem Zusammenhang geben die Herstellerangaben Auskunft. Im eingebauten Zustand ist das Material üblicherweise hinter luftdichten Schichten zum Innenraum hin abgeschlossen. Trotzdem kann über Gasdiffusion oder durch Fehlstellen in der Dampfsperre ein Austausch zwischen Partikeln oder Inhaltsstoffen und dem Innenraum stattfinden. Nicht zuletzt findet auf der Ebene der Ästhetik eine Interaktion zwischen Nutzer und Material statt, wenn die Verwendung des Materials sich auf bestehende oder neu zu errichtende Architektur und das städtebauliche Bild auswirkt.

Fasern und Stäube

Risiken durch Fasern und Stäube können nur dann entstehen, wenn die Fasern lungengängig sind und nicht biolöslich sind. Dafür müssen die Partikel bestimmte Abmessungen der Länge und Breite und darüber hinaus einen großen Schlankheitsgrad aufweisen. Neben den Kriterien der Lungengängigkeit ist die so genannte Biolöslichkeit der Fasern ein weiteres entscheidendes Kriterium. Die Biolöslichkeit beschreibt die Verweildauer der Fasern in der Lunge. Laut Definition der WHO werden folgende Abmessungen als lungengängig eingestuft:

- Länge > 5 µm
- Durchmesser < 3 µm
- Schlankheitsgrad (Länge / Durchmesser) > 3:1

Eine Bewertung anorganischer Faserstäube (außer Asbest) hinsichtlich krebserzeugender Wirkungen wird entweder auf Basis des Kanzerogenitätsindex KI, oder überwiegend anhand der Biolöslichkeit vorgenommen. Bereits seit Mitte der 90er Jahre haben die Hersteller von Mineralwolle den gesetzlich/wissenschaftlichen Kriterien folgend ihre Produkte auf die hoch biolöslichen und damit gesundheitlich unbedenklichen Fasern umgestellt.

1994 trat eine Regelung, die TRGS 905, in Kraft, in der die gesundheitliche Bewertung von Mineralwollefasern festgelegt wurde. Die Kriterien basierten auf den Erkenntnissen und Festlegungen des zuständigen wissenschaftlichen Arbeitskreises beim Bundesarbeitsministerium. Darin vertreten waren alle namhaften und führenden Arbeitsmediziner und Toxikologen, die sich intensiv mit der Erforschung von Mineralfasern beschäftigt haben. Diese Kriterien wurden später ergänzt und sowohl in der Gefahrstoffverordnung als auch der Chemikalienverbotsverordnung verankert, sie gelten bis heute unverändert fort und sind weltweit die strengsten Anforderungen. 1997 wurden sie in etwas abgeschwächter Form auch von der Europäischen Union in der EU Direktive 97/69 Nota Q übernommen. Auf europäischer Ebene ist diese Regelung in der CLP-Verordnung 1272/2008/EC übernommen worden.

Zur Überwachung der Produktion wurde die RAL Gütegemeinschaft „Erzeugnisse aus Mineralwolle“ gegründet. Die Produkte aller namhaften Hersteller sind mit dem entsprechenden RAL-Gütezeichen gekennzeichnet. Bei Produkten ohne dieses Gütesiegel muss der Hersteller auf Anfrage einen Einzelnachweis der hohen Biolöslichkeit erbringen – kann er das nicht, ist die Verwendung in Deutschland verboten. Es ist daher empfehlenswert, auf das RAL-Gütezeichen Mineralwolle zu achten, um als Anwender und Nutzer auf der sicheren Seite zu sein. <http://www.ral-mineralwolle.de/home.html>

Während die Auswirkungen anorganischer Fasern (künstliche Mineralfasern) auf den Menschen inzwischen gut untersucht sind und die potentiellen Risiken durch Weiterentwicklungen des Materials nachweislich minimiert werden konnten, ist die gesundheitliche Auswirkung von lungengängigen organischen Fasern vergleichsweise wenig dokumentiert. Während beispielsweise Eichen- und Buchenholzstaub nach dem IFA Report 1/2012, Gefahrstoffliste, kategorisiert ist und in die Kategorie I (krebserzeugend beim Menschen) eingeordnet wurde, existieren entsprechende Untersuchungen für viele Naturfasern nicht. Ansätze zur Bewertung der Arbeitssicherheit beim Umgang mit Dämmstoffen aus organischen Fasern (Naturfasern) sind allgemein rar. In der Arbeit von [Fuehres und Faul 2000] werden beispielsweise die Faserstaubkonzentrationen beim Einbau von unterschiedlichen organischen Faserdämmstoffen gemessen und die erhaltenen Faserproben mikroskopisch untersucht. Die Untersuchung von [Creutzenberg et al. 2005] konstatiert weiteren Forschungsbedarf zum toxischen Verhalten von faseriger Cellulose. Natürlich muss auch hier das eingangs erwähnte Kriterium der Lungengängigkeit als erste Voraussetzung für ein gesundheitliches Risiko beachtet werden. So liegt der Median der Faserdicke von Baumwolle, Flachs und Hanf nach einer Untersuchung von [Müssig

et al. 2006] in einem Bereich von ca. 10 – 20 µm und damit deutlich über der WHO-Grenze $\leq 3 \mu\text{m}$. Gleiches gilt für die Zelldurchmesser der meisten Holzarten. Nadelholztracheiden weisen beispielsweise einen mittleren Durchmesser von 10 – 65 µm auf [Fengel und Wegener 1989]. Nichtsdestotrotz muss beachtet werden, dass die Dimensionen aller natürlichen Fasern stets statistischen Verteilungen unterliegen und damit, wenn auch in geringen Anteilen, immer auch dünnere Partikel enthalten können. Gleiches gilt für Faserfragmente oder Fibrillen. Grundsätzlich wären eine genauere Beschreibung der auftretenden Faserstaubkonzentrationen bei Produktion, Einbau und Nutzung und eine Klärung der Risikopotentiale für den Menschen, auch für organische Fasern wünschenswert.

Abschließend muss angemerkt werden, dass bei fachgerechter Montage faserbasierter Dämmstoffe ein Austausch von Fasern und Stäuben mit der Raumluft in der Regel ausgeschlossen (hinter luftdichten Schichten) oder stark minimiert (abgehängte Decken, Tiefgaragendämmung) ist. Entsprechend bestehen auch keine Risiken für den Nutzer. Beim Umgang mit älterer Mineralwolle, vor 1995 verbaut, ist für den professionellen Verarbeiter (z. B. beim Rückbau) die TRGS 521 zu beachten bzw. gibt die Handlungsanleitung der BG Bau Auskunft:
http://www.bgbau.de/gisbau/publikationen/brosch/downloads/Handlungsanleitung_Mineralwolle.pdf

Raumluftqualität

Die empfundene Raumluftqualität wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Für die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen beim Aufenthalt in Gebäuden sind neben den raumklimatischen Verhältnissen (Temperatur, Luftfeuchte, Luftwechselrate) auch mögliche Verunreinigungen der Innenraumluft mit Schadstoffen von Bedeutung. Das Bayerische Landesamt für Umwelt unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen Primär- und Sekundärquellen sowie Verunreinigungen aus der Außenluft.

Als Primärquellen werden Baumaterialien und Einrichtungsgegenstände, aber auch elektrische Geräte, offene Feuerstellen oder Emissionen durch die Bewohner (Rauchen) bezeichnet. Sekundärquellen stellen Oberflächen und Partikel dar, an denen Schadstoffe (meist schwerflüchtige organische Verbindungen) adsorbiert sind. Dies kann neben Teppichen, Vorhängen und Möbeln auch Hausstaub sein. Verunreinigungen aus der Außenluft resultieren aus dem Straßenverkehr, Emissionen aus Industrie/Gewerbe und dem Eindringen von Gasen aus dem Boden (Radon). [LFU 2013a]

Schadstoffe können in verschiedene Stoffgruppen unterteilt werden. Belastungen für die Innenraumluft ergeben sich insbesondere durch gasförmige anorganische und organische Stoffe, anorganische und organische Partikel (siehe Fasern und Stäube), radioaktive Stoffe (Radon) und biologische Belastungen (Hausstaubmilbe,

Schimmelpilze). Im Fokus stehen dabei vor allem leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC = volatile organic compounds) mit denen üblicherweise Substanzen mit einer Siedetemperatur von ca. 50 – 260°C (Retentionsbereich C₆ – C₁₆) bezeichnet werden.

Je nach Emissionsquelle weisen VOC eine typische Emissionscharakteristik auf. Eine kontinuierliche Emission wird dabei oft von Baumaterialien und Möbelstücken ausgelöst. Unregelmäßige Emissionsspitzen mit abklingenden Peaks werden beispielsweise durch den Einsatz von Farben und Klebern bei Renovierungsarbeiten verursacht. Daneben gibt es auch kurzzeitig wirksame Emissionsspitzen die regelmäßig (Tabakrauch, Gasherd, etc.) oder unregelmäßig (Haushalts-, Hobbyprodukte) anfallen können.

Die Überprüfung der Raumluftqualität kann durch unterschiedliche Fragestellungen motiviert sein. Beispielsweise können durch die Nutzer Belästigungen in Form von Gerüchen oder gesundheitliche Beeinträchtigungen festgestellt werden, die in Zusammenhang mit dem Aufenthalt in bestimmten Räumen oder Gebäuden stehen. Ist aufgrund von Voruntersuchungen oder der Kenntnis über die verwendeten Baustoffe eine Schadstoffbelastung offensichtlich, so kann auch die Quellensuche und nach der Beseitigung gefundener Quellen, auch die Überprüfung des Erfolgs der Renovierungsmaßnahme im Vordergrund stehen. Alle genannten Szenarien erfordern eine angepasste Probennahme- und Messstrategie, die sich für die Messung von VOC auf eine aktive Probennahme (Kurzzeitmessung), den Einsatz von Passivsammlern (Langzeitmessungen über Tage bis Wochen) oder auch ein personal-air-sampling, hierbei wird die Luft in der unmittelbaren Umgebung einer Person gesammelt, stützen können. Zur Messung schwerflüchtiger Substanzen werden die potentiellen Adsorbentien (Hausstaub, Fasern von Teppichen, Gardinen, etc.) gesammelt. Hierfür stehen Hausstaubanalysen und Probennahmen aus der Luft mittels Filtergeräten zur Verfügung. Sollen Emissionsquellen nachgewiesen werden, kann auch direkt das Emissionsverhalten von Proben der verwendeten Baustoffe im Labor untersucht werden. [LfU 2013b]

Der Bewertung von Schadstoffen in der Raumluft (also der Bewertung der Messergebnisse an aus der Raumluft gewonnen Proben) liegt ein Basisschema zu Grunde [Bundesgesundheitsblatt 1996], das ausgehend von der Wirkungsschwelle (nachgewiesen in Versuchen an Menschen oder Tieren) eines Stoffs, durch eine Reihe von Sicherheitsfaktoren den so genannten Richtwert II (RW II) ableitet. Als Wirkungsschwelle können der LO(A)EL (Niedrigste Dosis eines Wirkstoffs bei der noch Wirkungen beobachtet werden können) oder der NO(A)EL (Höchste Dosis bei der keine Wirkungen beobachtet werden können) verwendet werden. Die Sicherheitsfaktoren summieren sich bei der Grundlage von LO(A)EL Werten aus Humanversuchen auf einen Wert von 100. Wenn die Wirkungsschwelle im Tierversuch ermittelt wurde, erhöht sich der Sicherheitsfaktor zur Abdeckung der Interspezies-Unterschiede insgesamt auf den Faktor 3000. Der RW II ist damit ein wirkungsbe-

zogener, begründeter Wert, bei dessen Erreichen besonders empfindliche Personen bei Dauorexposition gesundheitliche Gefährdungen zu erwarten haben.

Durch einen nochmaligen Sicherheitsfaktor von 10 wird aus dem RW II der RW I bestimmt. Der RW I ist die Konzentration eines Stoffes, bis zu deren Erreichen nach derzeitigem Kenntnisstand auch bei lebenslanger Exposition keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu erwarten sind. Bei Sanierungen kann der RW I z. B. als Sanierungsziel definiert werden, wobei auch der RW I nach Möglichkeit unterschritten werden sollte, weil im Grenzbereich zwischen RW I und RW II aus Vorsorgegründen ebenfalls Handlungsbedarf abgeleitet wird. [Bundesgesundheitsblatt 1996]

Die Emissionen aus Bauprodukten sind wie gezeigt also nur ein Faktor von vielen möglichen Einwirkungen auf die Raumluftqualität.

Die Tauglichkeit von Bauprodukten für die Innenraumanwendung wird nach den Anforderungen des allgemeinen Ausschusses für die gesundheitliche Bewertung von Baustoffen (AgBB) [AgBB 2012] bewertet.

Das Bewertungsverfahren basiert auf der Untersuchung der Emissionen von Bauprodukten in kontrolliert belüfteten und klimatisierten Prüfkammern. Im Gegensatz zur weiter oben beschriebenen Messung der Raumluftkonzentration von Schadstoffen an Proben die in einem konkreten Objekt gewonnen wurden, wird hier die Emission des Bauprodukts unter definierten Randbedingungen und innerhalb eines abgegrenzten Zeitraums ermittelt.

Die so ermittelten flächenspezifischen Emissionsraten E_{fl} [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] eines Bauproduktes werden auf eine Konzentration C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] umgerechnet, welche die Raumdimensionierung V [m^3], den zu erwartenden Luftaustausch n [1/h] und die emittierende Oberfläche des in den Raum eingebrachten Bauproduktes F [m^2] berücksichtigt.

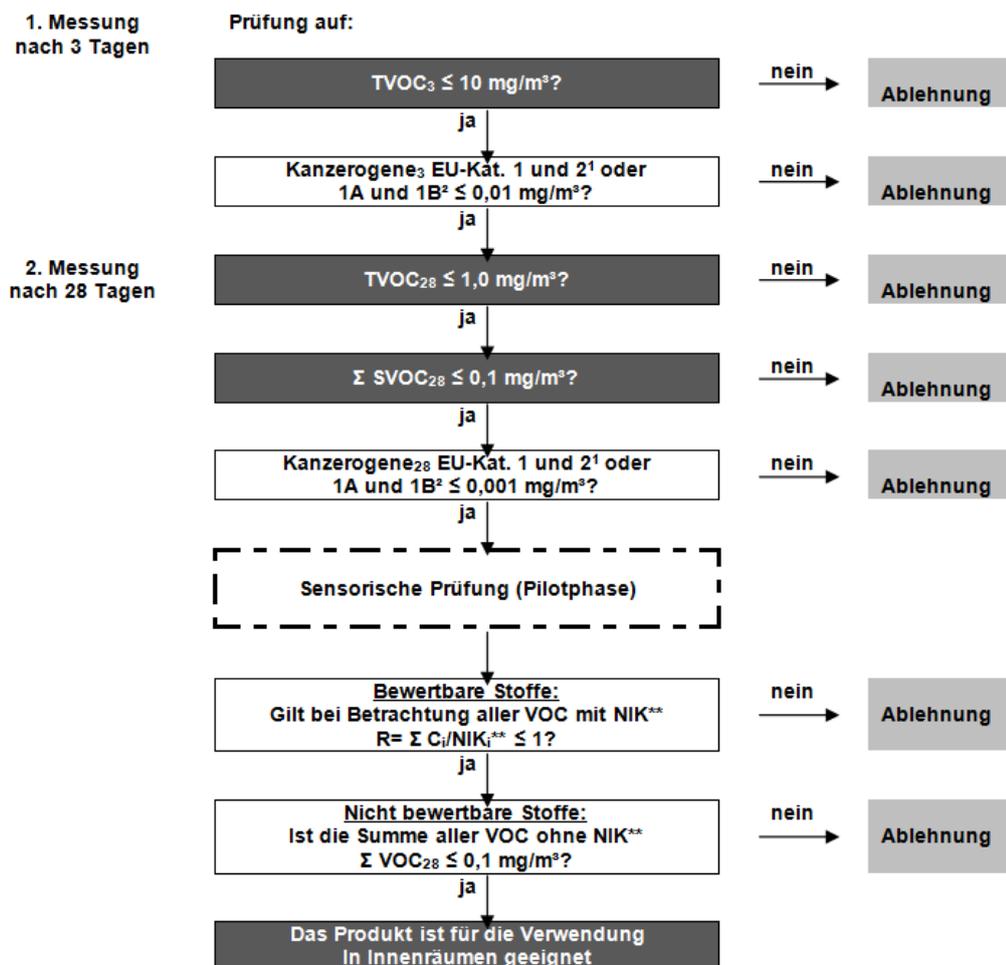
$$C = \frac{E_{fl} \times F}{n \times V}$$

Der Modellraum wird mit den Maßen $3 \times 4 \times 2,5$ [m^3] und der Luftwechsel wird mit $0,5$ [1/h] angenommen. Die Prüfung startet mit dem Einbringen des bis dahin luftdicht verpackten Produktes in die Prüfkammer. Jeweils nach 3 und 28 Tagen werden die Konzentrationen der Stoffe die über der Nachweisgrenze von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen erfasst. Bewertet werden Stoffe die eine Mindestkonzentration von $\geq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreichen.

Entsprechend dem Ablaufschema in Abbildung 55 werden dabei folgende Stoffgruppen bewertet:

- TVOC (total volatile organic compounds): Summe aller Einzelstoffe $\geq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Retentionsbereich $C_6 - C_{16}$

- Σ SVOC (total semi volatile organic compounds): Summe aller Einzelstoffe ≥ 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Retentionsbereich $> C_{16} - C_{22}$
- Kanzerogene Stoffe (Einzelstoff)
- Bewertbare Stoffe (mit NIK-Werten) (Einzelstoff)
- Nicht bewertbare Stoffe (ohne NIK) (Bewertung der Summe)



*VOC, TVOC: Retentionsbereich C6 – C166, SVOC: Retentionsbereich $> C_{16} - C_{22}$

**NIK: Niedrigste interessierende Konzentration

1 Einstufung gemäß Richtlinie 67/548/EWG Anh. I bzw. Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 Anh. VI Tab. 3.2

2 Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 Anh. VI Tab. 3.1

Abbildung 55: Schema zur gesundheitlichen Bewertung von VOC- und SVOC-Emissionen aus Bauprodukten [AgBB 2012]

Die Bewertung der Summen an VOC und SVOC erfolgen, weil für die meisten VOC keine oder nur unzureichende toxikologische Daten vorhanden sind und darüber hinaus erwiesenermaßen mit steigender Konzentration an VOC auch die Wahrscheinlichkeit negativer gesundheitlicher Wirkungen zunimmt. Grenzwerte für TVOC liegen nach 3 Tagen bei $\leq 10 \text{ mg}/\text{m}^3$ und nach 28 Tagen bei $\leq 1 \text{ mg}/\text{m}^3$. Es wird also eine abklingende Konzentration unterstellt, die jedoch auch im Anfangsstadium der Ausgasung bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten darf. Gleiches gilt für die

Konzentration der kanzerogenen Stoffe (Einzelstoffbewertung) die nach 3 Tagen $\leq 0,01 \text{ mg/m}^3$ und nach 28 Tagen $\leq 0,001 \text{ mg/m}^3$ nicht überschreiten dürfen. Nach 28 Tagen werden außerdem die Σ SVOC bewertet, die $\leq 0,1 \text{ mg/m}^3$ sein muss.

Neben der Summe an VOC und der Einzelbetrachtung bekanntermaßen kanzerogener Stoffe, werden auch die inzwischen für eine Vielzahl von Stoffen gelisteten NIK-Werte zur Bewertung herangezogen. NIK steht dabei für „Niedrigste Interessierende Konzentration“ und ist ein Grenzwert, der auf Basis stoffbezogener Beurteilungswerte für den Arbeitsplatz (z. B. MAK-Werte, maximale Arbeitsplatzkonzentration) abgeleitet wird. Da die Arbeitsplatzgrenzwerte unter Annahme einer begrenzten Expositionsdauer aufgestellt wurden, müssen die dort hinterlegten maximalen Konzentrationen noch auf die für Innenräume relevanten Randbedingungen umgerechnet werden. Berücksichtigt werden hierbei die in Innenräumen anzunehmende Dauerexposition, die Anwesenheit von besonders schützenswerten Risikogruppen (Kinder) und die gegenüber Arbeitsstätten insgesamt undefinierte Gesamtexposition. Die genannten Einflüsse werden durch einen pauschalen Sicherheitsfaktor von 100 auf die Arbeitsplatzkonzentrationen berücksichtigt. In Ausnahmefällen können zusätzliche Faktoren zur Anwendung kommen.

Zur Bewertung von Stoffen mit NIK-Werten nach dem AgBB-Schema werden die errechneten Raumlufkonzentrationen C_i ins Verhältnis zum jeweiligen NIK_i gesetzt. Der Quotient muss unter dem Wert 1 bleiben. Werden mehrere Verbindungen mit Konzentrationen $\geq 5 \mu\text{g/m}^3$ festgestellt, darf auch die Summe aller Quotienten aus C_i und NIK_i den Wert 1 nicht überschreiten.

Im Sinne einer vorsorgenden Berücksichtigung ist auch die Summe aller VOC ohne NIK begrenzt und muss $\leq 0,1 \text{ mg/m}^3$ bleiben.

Erfüllt ein Bauprodukt das vorgestellte Bewertungsschema vollständig, so ist es für die Verwendung in Innenräumen von Gebäuden geeignet. Die Ergebnisse der Prüfung der Eignung für die Innenraumanwendung nach AgBB-Schema findet sich üblicherweise in den EPD der Hersteller.

(<http://bau-umwelt.de/hp545/Daemmstoffe.htm>)

Aufgrund eines EU-Mandats [Mandate M/366] werden aktuell Anforderungen an die Freisetzung von gefährlichen Stoffen an die Innenraumluf sowie an Boden und Grundwasser definiert, die auch in Normen hinterlegt werden sollen.

Mikrobielle Belastungen z. B. durch Schimmelpilzsporen können immer dann auftreten, wenn durch eine mangelhafte Ausführung der Dämmmaßnahme partielle Auffeuchtungen des Dämmstoffs oder der angrenzenden Bauteile auftreten (siehe Kapitel Schimmelpilzbelastungen). Schimmelpilzsporen können bei entsprechend sensibilisierten Personen zu allergischen Reaktionen führen.

Ein versteckter Schimmelpilzbefall wird dabei in der Regel über den Geruch wahrgenommen. Durch einfache Messungen können Rückschlüsse auf die Raumluftbelastung mit Sporen getroffen werden. Dabei wird die Raumluft für einen bestimmten Zeitraum möglichst definiert über einen entsprechenden Nährboden geführt und nach einer Anzüchtung unter günstigen klimatischen Bedingungen die Zahl der keimbildenden Einheiten bestimmt.

Flammschutzmittel

Alle organischen Materialien sind brennbar. Um die Entflammungseigenschaften und das Brandverhalten von Dämmstoffen aus organischen Rohstoffen oder mit Anteilen organischer Stoffe zu begrenzen, sind den Produkten Flammschutzmittel beigesetzt. Das Ziel ist dabei einerseits die Verzögerung oder Verhinderung der Brandentstehung und andererseits bei einer bereits erfolgten Brandentwicklung nach Möglichkeit eine Selbstverlöschung des Materials bei Wegfall der Zündquelle. Flammschutzmittel können dabei nie alleine einen unter Gesichtspunkten des Brandschutzes sicheren Betrieb der Bauteile garantieren und sind daher immer als ein Element unter anderen, vorbeugenden (z. B. konstruktiven) Maßnahmen zu sehen.

Das Wirkungsprinzip von Flammschutzmitteln ist entweder physikalisch oder chemisch. Eine physikalische Wirkungsweise kann auf einer Kühlung (z. B. endotherme Reaktionen, Abgabe von Wasser), einem Abschirmeffekt (z. B. verkohlte Schicht) oder einem Verdünnungseffekt der brennbaren Gase (z. B. durch Wasserdampf) beruhen. Die chemische Wirkungsweise führt im Wesentlichen zu denselben Effekten, beruht aber v. a. auf einer Unterbindung der Bildung freier Radikale – einer stark exothermen Reaktion, die sonst zu einem zusätzlichen Aufheizen während des Verbrennungsvorgangs führt.

Es existiert eine ganze Reihe von Flammschutzmitteln, die sich durch Zuordnung zu bestimmten Stoffgruppen kategorisieren lassen. Stoffe der gleichen Stoffgruppe weisen dabei meist ähnliche Wirkprinzipien und Eigenschaften auf.

Zum Einfluss von Flammschutzmitteln auf die soziokulturelle (Wahrung der Gesundheit) und ökologische Qualität muss festgestellt werden, dass Flammschutzmittel, wie alle Additive, grundsätzlich umweltrelevant sind. Je nach Flüchtigkeit und Bindung des Flammschutzmittels (reaktiv = chem. gebunden, additiv = nur beigegeben) an das Substrat ist eine Freisetzung während der Nutzung oder Entsorgung möglich. Angaben zur Freisetzung von Inhaltsstoffen an die Innenraumluft entsprechend dem AgBB Schema (siehe Kapitel 5.4, Raumluftqualität) liefern z. B. die EPD's der Hersteller. Für TCPP aus PU Schaum und HBCD aus EPS liegen diese unter der Nachweisgrenze von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Eintragswege werden entweder als punktförmige- (Herstell-/Entsorgungsbetriebe) oder diffuse Quellen (Ausdünstung bei Gebrauch, etc.) bezeichnet. Bei der Bewertung der Umweltrelevanz sind folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen [Leisewitz et al. 2000]:

- Schutz vor Schädigung von Organismen
- Schutz vor Beeinträchtigung der Naturhaushaltspotenziale
- Erhalt der Biodiversität
- Erhalt des atmosphärischen Systems
- Kein „Auffüllen“ der Umweltmedien
- Minderung der Belastung mit persistenten Verbindungen
- Arbeitsschutz
- Verbraucherschutz
- Ressourcenschonung (Materialintensität, Kreislauffähigkeit)

Aus den genannten Schutzziele und Anforderungen werden Bewertungskriterien abgeleitet, die stets in Verbindung mit dem Produkt (Bindung FSM/Substrat) und der Anwendung (z. B. Innen/Außen) gesehen und dem entsprechend spezifisch angewendet werden müssen. D. h. nicht allein die toxischen oder ökotoxikologischen Eigenschaften des Flammschutzmittels selbst sind entscheidend, sondern darüber hinaus die Frage wie stabil der Stoff gebunden ist und welche Interaktionen zwischen der Umwelt (Innenraumluft, Gewässer, etc.) und dem Stoff tatsächlich entstehen können. Da ungewollte Wirkungen von Chemikalien und Stoffen natürlichen Ursprungs auf die Umwelt und den Menschen häufig erst nach langjähriger Verwendung erkannt werden (z. B. Asbest, DDT, FCKW) besteht zudem auch eine „Nicht-Wissens-Problematik“ der durch den Gedanken der „Umweltvorsorge“ begegnet wird. Hieraus ergibt sich, dass nicht mehr ausschließlich das bekannte oder erwiesene Schadpotenzial (erwiesene Ursache-Wirkungs-Mechanismen) zur Bewertung herangezogen wird, sondern im Sinne der Umweltvorsorge Bewertungskriterien entwickelt wurden, die eine vorsorgliche Risikoreduktion ermöglichen. Diese sind:

- Persistenz (Eigenschaft eines Stoffes dauerhaft in der Umwelt zu verbleiben)
- Bioakkumulierung (Eigenschaft eines Stoffes sich in Organismen anzureichern)
- Toxizität (Giftigkeit für Lebewesen)

Für die Bewertung von Flammschutzmitteln werden diese, auch PBT-Kriterien genannten, Eigenschaften noch ergänzt durch die Frage nach allergisierenden Eigenschaften (wenn der Stoff mit der Innenraumluft in Kontakt kommt), den Eigenschaften der Brandfolgeprodukte in Bezug auf den Personenschutz (Rauchentwicklung) und Sachschutz (korrosive Rauchgase, Entsorgungskosten durch toxische Brandfolgeprodukte) und einer eventuellen Recycling-Behinderung.

In der europäischen Union werden Chemikalien durch die Chemikalienverordnung REACH [Amtsblatt 2007] bewertet. Die Pflicht zur Dokumentation und Risikobewertung ist hierbei zunächst auf Seite der Unternehmen und Hersteller, wenn diese ihre Produkte handeln möchten – [„...„Ohne Daten kein Markt“...] [Amtsblatt 2007]. Im Wesentlichen müssen Stoffe registriert werden, die in Mengen ab 1 Jahrestonne hergestellt oder importiert werden. Ausnahmen bestehen für Stoffe, die bereits

durch andere Verfahren kontrolliert werden (z. B. radioaktive Stoffe). Je nach Menge des hergestellten Stoffes sind die Anforderungen an die nötigen Angaben zur Erstellung des Registrierungsdossiers in den Anhängen VI – XI der REACH-Verordnung geregelt. Werden hierin besonders besorgniserregende Eigenschaften dokumentiert, so können die europäische Chemikalienagentur (ECHA) oder ein Mitgliedsstaat der EU diese Eigenschaften in einem Dossier nach Anhang XV zusammenstellen und den Stoff damit für die Aufnahme in die so genannte „Kandidatenliste“, d.h. die Liste für eine Aufnahme in Anhang XIV (Verzeichnis der besonders besorgniserregenden Stoffe = SVHC), vorschlagen. Nach Prüfung durch einen Ausschuss der Mitgliedsstaaten kann der Stoff schließlich in die Kandidatenliste aufgenommen werden.

Die Aufnahme in die Kandidatenliste hat noch keine Zulassungspflicht zur Folge, es entstehen daraus aber Informationspflichten des Herstellers gegenüber seinen gewerblichen Kunden. Die Entscheidung, ob ein Stoff aus der Kandidatenliste schließlich in den Anhang XIV aufgenommen wird und damit zulassungspflichtig wird, entscheidet die europäische Chemikalienagentur (ECHA), wenn der Stoff Eigenschaften entsprechend Artikel 57 der REACH-Verordnung aufweist. Das Ziel des gesamten Registrierungsprozesses und der Erteilung von Zulassungspflichten für bestimmte Stoffe ist es, [„...ein hohes Schutzniveau für die menschliche Gesundheit und für die Umwelt sicherzustellen...“] [Amtsblatt 2007], weshalb neben der Begrenzung direkter Risiken (CMR), auch langfristige und indirekte Risiken (PBT, vPvB) vorsorglich minimiert werden sollen. Nach REACH ist deshalb der Einsatz von Stoffen mit folgenden Eigenschaften aus Vorsorgegründen zulassungspflichtig:

- PBT (persistent, bioakkumulierend und toxisch)
- vPvB (sehr persistent und sehr bioakkumulierend)
- CMR (cancerogene, mutagene oder reproduktionstoxische Stoffe)
- Stoffe mit ähnlich gefährdenden Eigenschaften

Für die genannten Kriterien sind in Anhang XIII der REACH-Verordnung Grenzwerte zur Beurteilung oben genannter Eigenschaften hinterlegt und geeignete Verfahren zum Nachweis genannt [Amtsblatt 2011].

Nach Ansicht des Umweltbundesamts sind in einer erweiterten Auffassung auch der Eintrag von Stoffen mit persistenten und/oder bioakkumulierenden Eigenschaften (unabhängig von deren Giftigkeit) zu vermeiden und der Eintrag von Stoffen mit unbekanntem Wirkungen generell zu minimieren, wenn diese nicht aus der Umwelt rückholbar sind. Ein Umweltrisiko besteht dabei nicht nur durch den Einsatz von Xenobiotika. Auch für in der Natur vorkommende Verbindungen (z. B. den Einsatz von Borax) gilt ein Verminderungs- und Optimierungsgebot um die natürliche Hintergrundbelastung durch diese Stoffe nicht zu erhöhen [UBA 1999].

Für Stoffe die im Anhang XIV (Verzeichnis der besonders besorgniserregenden Stoffe = SVHC) von REACH gelistet werden, muss eine Zulassung für die Verwendung beantragt werden. Ohne Zulassung gilt ein Verbot der Herstellung, Vermarktung und Verwendung. Zulassungen werden durch die ECHA erteilt. Kriterien für die

Erteilung einer Zulassung sind entweder der Nachweis einer angemessenen Beherrschung der Risiken (dieser Weg ist für bestimmte Stoffe, z. B. CMR, PBT, vPvB Stoffe ausgenommen) oder wenn nachgewiesen wird, dass der sozioökonomische Nutzen die zu erwartenden Nachteile überwiegt. In letztem Fall gilt dann trotzdem noch ein Minimierungsgebot. Mit dem Verfahren der Zulassung soll erreicht werden, dass die Risiken von besonders besorgniserregenden Stoffen (PBT-Kriterien) ausreichend beherrscht werden und diese Stoffe schrittweise durch Alternativstoffe ersetzt werden.

Um einen Überblick über die Eigenschaften und Umweltwirkungen von Flammschutzmitteln zu geben, sind in Tabelle 21 die Eigenschaften und Umweltwirkungen einiger häufig eingesetzter Flammschutzmittel zusammengestellt. Dabei wurde aus den wichtigsten Stoffgruppen jeweils ein typisches Flammschutzmittel ausgewählt.

Tabelle 21: Eigenschaften und Umweltwirkungen ausgewählter Flammschutzmittel (Quelle: [Leisewitz et al. 2000], Aktualisierungen entsprechend Herstellerangaben)

Flammschutzmittel	HBCD Hexabromcyclodecan	TCPP Tris(chlorpropyl)phosphat	APP Ammoniumpolyphosphat	ATH Aluminiumtrihydroxid	Borax Natriumborat-decahydrat
Stoffgruppe	Halogenbasiert	Organisch phosphorbasiert	Anorganisch phosphorbasiert	Mineralisch	Andere
Wirkprinzip	Chemisch	Chemisch Physikalisch	Physikalisch	Physikalisch	Physikalisch
Bindung an das Substrat	Additiv	Additiv	Additiv	Additiv	Additiv
Anwendungsgebiet	EPS, XPS	PU	Holzfasern	Allgemein Kunststoffe	Zellulose, Holzfasern
Persistenz	Persistent	Persistent	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Ubiquitär vorhanden
Bioakkumulierend	Stark bioakkumulierend	Nicht bioakkumulierend	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Ubiquitär vorhanden
CMR ¹⁾	Nicht nachgewiesen	Nein	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Reproduktionstoxisch
Ökotoxizität	Für aquatische Lebewesen	Gering	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Für aquatische Lebewesen
Besondere Brandfolgeprodukte	Bromverbindungen Dioxin-/Furan (gering)	Phosphorverbindungen Salzsäure	Phosphorverbindungen Stickoxide Ammoniak	-	Boroxide

¹⁾ CMR = cancerogen, mutagen, reproduktionstoxisch

Eine Bewertung nach der REACH-Verordnung stellt sich für die in Tabelle 21 gelisteten Flammschutzmittel wie folgt dar.

Zu den Stoffen, die derzeit als „besonders besorgniserregend“ im Anhang XIV gelistet sind, gehört das bromierte Flammschutzmittel HBCD. Der globale Umsatz von HBCD betrug im Jahr 1999 ca. 16000 Tonnen. Aufgrund der PBT-Eigenschaften von HBCD wurde der Stoff im Februar 2011 in den Anhang XIV der REACH-Verordnung aufgenommen. Ab dem 21.08.2015 tritt die Zulassungspflicht in Kraft. Seit Mai 2013 ist HBCD darüber hinaus durch die 6. Vertragsstaatenkonferenz des Stockholmer Übereinkommens über persistente organische Schadstoffe in den Anhang A der Liste der persistenten organischen Schadstoffe (POP = persistent organic pollutants) aufgenommen [Königstein 2013]. Mit einer Übergangsfrist von einem Jahr tritt damit ein weltweites Herstellungs- und Verwendungsverbot in Kraft. Die Stockholmer Konvention verabschiedete aber gleichzeitig eine bis zu 5 Jahre reichende Ausnahmeklausel für die Verwendung von HBCD als Flammschutzmittel in expandiertem Polystyrolhartschaum (EPS) und extrudiertem Polystyrolhartschaum (XPS) als Dämmstoffe für Gebäude. Die Vertragsstaaten können auf dieser Basis zeitlich begrenzt Ausnahmen für die Produktion und Verwendung von HBCD in Dämmstoffen erlassen. Ein Ersatzstoff der nicht REACH gelistet ist, steht als Ersatzstoff bereits zur Verfügung. Zukünftig kommt „Polymer-FR“ (CAS Nummer 11959 78-93-8) zum Einsatz. Mit der Umstellung der Produktion wurde bereits begonnen.

TCPP wurde nach REACH registriert und darf ohne Einschränkungen verwendet werden. Für TCPP wurde im Jahr 2008 im Auftrag der Europäischen Kommission eine Riskobewertung durchgeführt [EU Risk Assessment TCPP 2008]. Die Bewertung kommt zu dem Ergebnis, dass derzeit keine weiteren Maßnahmen zur Risikobegrenzung für Mensch und Umwelt erforderlich sind, die über die bereits praktizierten hinausgehen.

Für APP liegt derzeit keine Einordnung nach REACH vor. ATH wurde nach REACH registriert. Zu beiden Stoffen liegen keine weiterführenden Risikobewertungen vor.

Borate, d. h. Salze der Borsäure kommen auch in natürlichen Mineralien vor, sind also ubiquitär. Borax und Borsäure werden in verschiedenen Dämmstoffen (z.B. Zellulose, Baumwolle) als Flammschutzmittel eingesetzt. Borsäure wurde von der ECHA im Jahr 2010 wegen seiner reproduktionstoxischen Wirkung auf die Kandidatenliste der besonders besorgniserregenden Stoffe gesetzt.

Behaglichkeit

Neben den beschriebenen Anforderungen an die Raumlufthygiene in Bezug auf die Schadstoffbelastung durch VOC und Schimmelpilzsporen können auch die Voraus-

setzungen zur Herstellung eines behaglichen Wohnraumklimas unter dem Aspekt der soziokulturellen Qualität betrachtet werden.

Ein angenehmes, behagliches Raumklima wird von dem thermischen Klima und der Raumlufthqualität beeinflusst. Daneben sind auch akustische und visuelle Aspekte zu berücksichtigen. Die Qualität des Raumklimas hat dabei direkten Einfluss auf die Produktivität und Zufriedenheit der in dem Raum anwesenden Personen. Da der Mensch in der modernen Industriegesellschaft den weitaus größeren Teil seines Lebens in geschlossenen Räumen (Wohnung, Büro, Verkehrsmittel) verbringt, kommt dem Raumklima eine große Bedeutung für das individuelle Wohlempfinden und die gesundheitliche Unversehrtheit zu.

Die energetische Sanierung eines Gebäudes kann das thermische Raumklima und auch die akustischen Aspekte, positiv beeinflussen. Wichtigstes Kriterium für die thermische Behaglichkeit ist dabei die Raumlufthtemperatur, die Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen und die Luftfeuchtigkeit sowie die Luftbewegung. Die Luftfeuchtigkeit hat beispielsweise einen Einfluss auf die Transpiration und beeinflusst damit den Wärmeverlust des Menschen, was sich, wenn auch mit geringer Ausprägung, auf die Behaglichkeit auswirkt. Allgemein ist das thermische Empfinden des Menschen sehr individuell und von Geschlecht, Alter, Bekleidung, Art und Schwere der Aktivität sowie der Tages- und Jahreszeit abhängig. Trotzdem können bestimmte Bereiche definiert werden, die im Allgemeinen als behaglich empfunden werden (Abbildung 56).

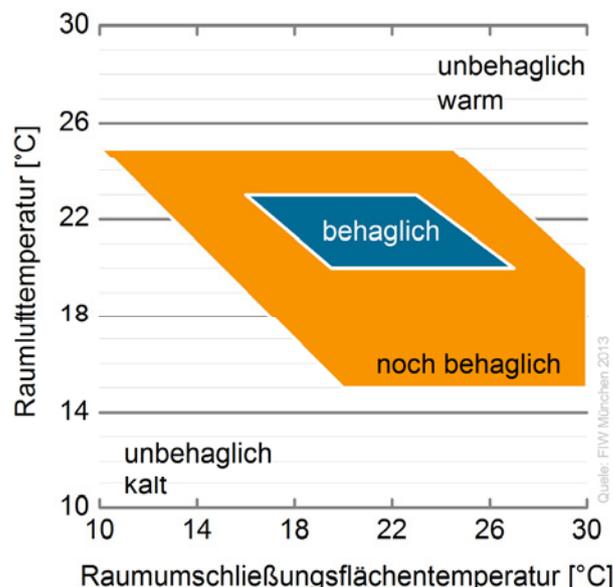


Abbildung 56: Behaglichkeitsfeld im Achsenkreuz von Raumlufthtemperatur (Ordinate) und Temperatur der raumumschließenden Flächen (Abszisse) [Pistohl 1998]

Voraussetzung hierfür ist, dass sich der Mensch thermisch neutral fühlt, also weder eine kältere noch eine wärmere Umgebung wünscht. Dieser als behaglich empfundene Bereich liegt beispielsweise für Menschen mit sitzender Tätigkeit und leichter

Bekleidung bei einer Raumlufthtemperatur von ca. 18°C – 24°C und einer Temperatur der raumumschließenden Flächen von ca. 20°C – 23°C [Pistohl 1998]. Wie zu erkennen kann in gewissen Grenzen bei einer Erhöhung der Temperatur der raumumschließenden Flächen die Raumlufthtemperatur abgesenkt werden, ohne Einbußen in der thermischen Behaglichkeit hinnehmen zu müssen. Eine angepasste Dämmung und ein optimierter Wärmeschutz der Außenwände kann also nicht nur durch eine Minimierung der Wärmeverluste über die Fassade, sondern auch durch eine passive Erhöhung der raumseitigen Oberflächentemperaturen und der damit verbundenen Möglichkeit einer Absenkung der Raumlufthtemperatur ohne Beeinflussung der thermischen Behaglichkeit des Wohnraumes zur Energieeinsparung beitragen.

Architektur

Nicht zuletzt ist bei einer Nachhaltigkeitsbetrachtung von Dämmstoffen unter soziokulturellen Gesichtspunkten auch die Wahrung der gestalterischen und städtebaulichen Qualität sicherzustellen. Ein Beispiel für eine moderne Architektur im Neubau, mit einer farblich akzentuierten Fassadengestaltung aus unterschiedlichen Materialien zeigt Abbildung 57.



Abbildung 57: Anspruchsvolle zeitgenössische Architektur mit WDVS und unterschiedlich gestalteten Oberflächen (Bildnachweis: Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme E.V.)

Zudem sollten bei Sanierungen schützenswerte Fassadengestaltungen, die für bestimmte Bauepochen charakteristisch sind, auch aus städtebaulicher Sicht bei einer energetischen Sanierung erhalten bleiben. In diesem Fall stehen mittlerweile leistungsfähige Innendämmmaßnahmen zur Verfügung, bei deren Anwendung die Außenfassade vollständig erhalten bleibt (Abbildung 58, links).

Aber auch mit Außendämmsystemen, z.B. mit WDVS lässt sich eine architektonisch schützend erhaltende Sanierung realisieren, die den ursprünglichen Quartiereindruck oder den individuellen Stil der Epoche nicht verändert (Abbildung 58, rechts).



Abbildung 58: Mittels Innendämmsystem sanierte Jugendstilfassade (links), Mittels WDVS saniertes Stadthaus (rechts) (Bildnachweis: Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme E.V.)

5.5 Aktuell: Rückbau von WDVS [Albrecht 2013]

Betrachtet man die Menge an m^2 WDVS, die in Deutschland verbaut wurden, wann diese eingebaut wurden, die mittlere Lebensdauer und die Renovierungsrate, dann kann man ungefähr abschätzen, welche Menge an WDVS zum Rückbau in den nächsten Jahren ansteht.

Entsprechend der Statistik des WDVS-Verbandes wurden in den letzten 35 Jahren ca. 900 Mio. m^2 WDVS in Deutschland eingebaut. Etwa 80 % davon sind WDVS mit EPS als Dämmstoff. Der Rest sind hauptsächlich Mineralwolle Dämmstoffe, aber auch Kork, Holzfasern, mineralische Dämmstoffe, Polyurethan usw. (Abbildung 59).

Verlegte Dämmstoffart im WDVS

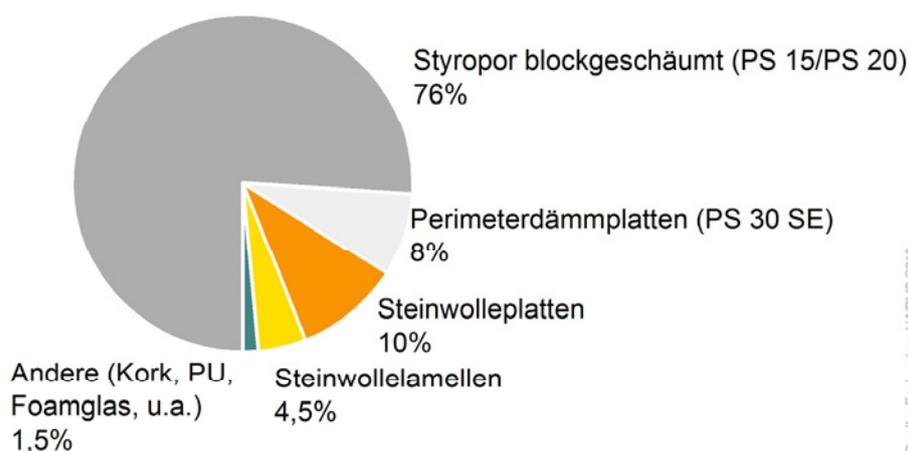


Abbildung 59: Verteilung des verwendeten Dämmstoffes in den verlegten WDVS

Nach 30 oder 40 Jahren Einsatz (Gebäude aus den Jahren 1970-1985) wird das WDVS normalerweise nicht abgerissen, sondern meist repariert, instandgesetzt oder mit einer 2. Lage Dämmschicht und Putz versehen und bleibt weiter am Gebäude. Das älteste WDVS-Bauobjekt, mit EPS-Dämmstoff, wurde 1957 in Berlin Dahlem [Setzler 2012] ausgeführt und ist mittlerweile 56 Jahre im Einsatz.

Rückbau von WDVS heute

Betrachtet man zusätzlich den IBP-Bericht zur Langzeitbewährung von Wärmedämmverbundsystemen [Künzel et al. 2005], bei dem 12 Gebäude zwischen 19 und 35 Jahren Einsatz beobachtet wurden und bei denen praktisch keine größeren Mängel (außer den üblichen Renovierungsarbeiten), auftraten, so liegt der Schluss nahe, dass WDVS bei sachkundiger Ausführung und üblicher Pflege und Renovierung deutlich länger als 50 Jahre halten.

Das heißt, die WDVS mit relativ großer Dämmschichtdicke, die in den letzten Jahren und aktuell verbaut wurden, werden voraussichtlich erst in ca. 50 Jahren wieder rückgebaut und stehen dann zum Recycling an. Weniger als 900.000 m² WDVS werden heute pro Jahr nach Angaben des WDVS-Verbands [Setzler 2012] zurückgebaut. Genaue Zahlen sind nicht bekannt. Das entspricht weniger als 1 % der 900 Mio. m² verbautem WDVS in den letzten 35 Jahren.

Der größte Anteil der Dämmstoffe und der anhaftenden Putze und Kleber, die heute zurückgebaut werden, wird mit dem Restmüll in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet. Dadurch wird das Volumen enorm verkleinert (Faktor 50-150) und die im EPS und im organischen Teil der Kleber und Putze steckende Energie wird etwa zur Hälfte zurückgewonnen.

Gesetzliche Forderungen und Umsetzung

Seit dem 01.06.2012 gilt in Deutschland das Kreislaufwirtschaftsgesetz –KrWG, das die EU-Richtlinie 2008/98 (Abfallrahmenrichtlinie) umsetzt. Danach sollen bis 1. Januar 2020 70 Gewichtsprozent der nichtgefährlichen Bau- und Abbruchabfälle wiederverwertet werden (Vorbereitung zum Recycling, stoffliche Wiederverwertung). Nach Angaben des Bundesumweltministeriums (BMU) wird diese Quote beim Abbruch von Gebäuden bereits heute erreicht, da die mineralischen Bestandteile von Gebäuden, aber auch Metalle, Holz, Glas, Kunststoffe usw. bereits heute getrennt gesammelt und wieder verwertet werden. Die Verwertungsquote bei den Bau- und Abbruchabfällen betrug 2008: 89,4 % [BMU 2011]. Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz gilt folgende Abfallhierarchie:

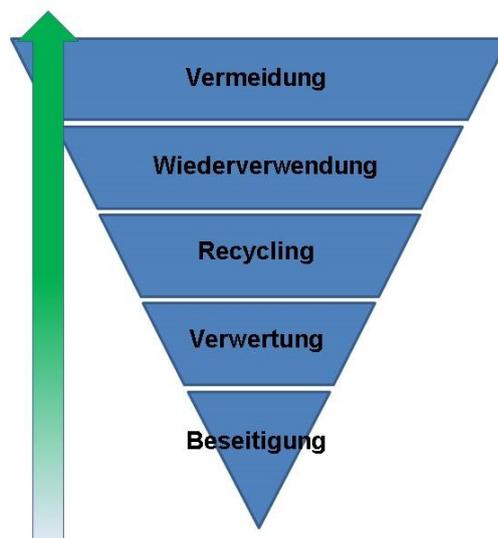


Abbildung 60: Abfallhierarchie nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz

Auf WDVS umgesetzt ergibt sich folgende Abfallhierarchie:

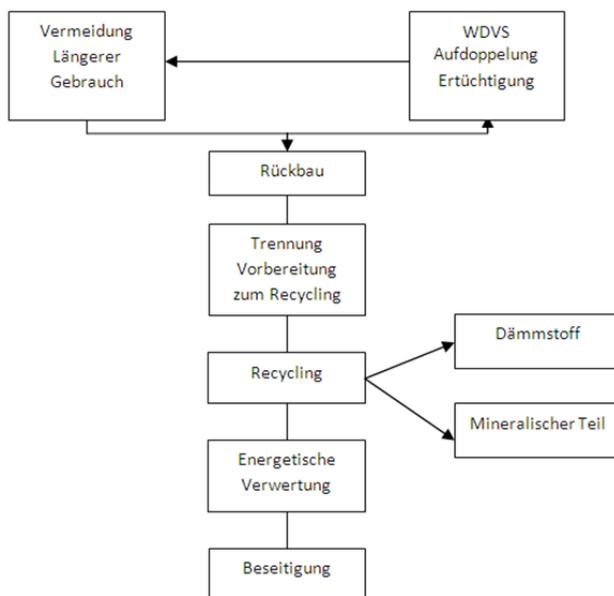


Abbildung 61: Abfallhierarchie auf WDVS umgesetzt Quelle: IBP und FIW

Rückbau von WDVS in der Praxis

Einer der wesentlichen Merkmale des WDVS ist der innige Verbund und die hohe Querszugfestigkeit der einzelnen Komponenten während der Nutzungsphase, die aus Sicherheitsgründen am Bauwerk auch unerlässlich ist. Gerade dieser innige Verbund macht aber die Trennung der einzelnen Komponenten schwierig.



Abbildung 62: Abbruch Übergangwohnheim Dortmund 2009 Quelle: Carsten Hördemann <http://forum.bauforum24.biz>

Im Moment gibt es nur Erfahrungen mit dem Abschälen oder Abschaben mit einem Bagger oder Eisschaber, da bisher noch vergleichsweise wenig Quadratmeter WDVS zurückgebaut werden. Das Abschaben mit einem Bagger funktioniert weitgehend. Einiges vom Dämmstoff verbleibt am Mauerwerk.

Wenn das Mauerwerk stehen bleiben soll oder bei kleineren Flächen, wird die Putzschicht mit einem Eisschaber gelockert und von Hand bahnenweise abgezogen (Abbildung 63). Anschließend werden die EPS-Platten ebenfalls mit einem Eisschaber komplett vom Mauerwerk entfernt. Die Dübelschäfte werden mit einem Bohrhämmer mit Meißel gelockert und von Hand herausgezogen (Abbildung 64)



Abbildung 63: Abschalen der Putzschicht mit einem Eisschaber, Gräfelfing 2013 (Quelle: FIW München)



Abbildung 64: Entfernen der EPS-Platten mit einem Eisschaber. Die Dübelschäfte werden mit einem Bohrhämmer mit Meißel gelockert und von Hand herausgezogen (Quelle: FIW München)

Das Forschungsvorhaben mit dem Titel: „Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des Wärmedämmverbundsystems nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktkreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur thermischen Verwertung“ wird vom Fachverband WDVS, vom Industrieverband Hartschaum und vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) finanziert. Wissenschaftliche Projektpartner sind das

Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, FIW sowie das Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung in Freising. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens sollen verschiedene Techniken erprobt werden. Unter anderem sollen mechanische Trennmethode weiterentwickelt werden.

Recycling des EPS-Teils

Auch heute gibt es schon einige Verfahren zur Aufarbeitung der WDVS-Komponenten. Zum Beispiel werden alle EPS-Produktionsabfälle direkt im Herstellwerk zerkleinert und als Flocken wieder dem Produktionsprozess beigegeben. Liegt der EPS-Dämmstoff als getrennte Fraktion vor, gibt es bereits folgende Möglichkeiten zum Recycling:

- Recycling EPS-Platten (gering verschmutzt)
 - Mechanische Zerkleinerung
 - Aussortieren von Verschmutzungen
 - Aufschäumen von Recycling EPS-Platten mit 100 % Recycling-Anteil, WLS 035 und eine Druckspannung von 60 kPa sind möglich
 - Geschlossener Kreislauf
 - Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung existiert bereits
- Creasolv Prozess (hoher Verschmutzungsgrad)
 - Auflösen des EPS-Abfalls in Lösemittel
 - Abfiltern von Verschmutzungen, bis zu 99 % Abtrennung des HBCD sind möglich
 - Polymer Upgrading
 - Umkristallisierung des EPS
 - Extrusion von neuem EPS Granulat
- Styromull
- EPS-Perlen als Bodenverbesserer
- Zukunft wegen des Flammschutzmittels ungewiss
- Porosieren von Ziegeln
- Recycling und Wiederverarbeitung zu neuen Produkten
- Kleiderbügel
- CD-Behälter

Recycling der innig verbundenen Kleber, Dämmstoff, Putzfraktion

Nach dem Abschälen und Abschaben des WDVS mit dem Eisschaber oder einem Bagger entstehen heute größere Mengen an stark mit Kleber, Putz, Gewebe und Dübeln versetztem Dämmstoff. Diese Mischung kann geschreddert und mit dem normalen Restmüll (Hausmüll) in Müllverbrennungsanlagen kontrolliert verbrannt und thermisch verwertet werden. Mit Kunststoffresten versetzter Restmüll wird wegen des hohen Heizwertes normalerweise problemlos in Müllverbrennungsanlagen angenommen. Kontrollierte Verbrennungsversuche in der Müllverbrennungsanlage in Karlsruhe in den 1990er Jahren haben gezeigt, dass auch Flammschutzmittel haltige Dämmstoffe problemlos mit dem normalen Restmüll verbrannt werden können.

Dazu müssen allerdings die Verbrennungstemperaturen gesteuert und überwacht und eine Rauchgaswaschanlage nachgeschaltet sein, was in Deutschland schon lange Stand der Technik ist.

In diesem Jahr sollen weitere Versuche in der Müllverbrennungsanlage Würzburg stattfinden, bei denen das Verbrennen von HBCD-haltigen EPS-Dämmstoffen untersucht werden soll. Das wäre eine Möglichkeit, das unter Verdacht stehende HBCD aus der Umwelt zu entfernen. Übrigens ein Weg, den auch das Umweltbundesamt begrüßen würde.

Ob es auch noch andere Wege gibt, z. B. EPS-Dämmstoffe sinnvoll von den Putz- und Kleberresten zu trennen und einer stofflichen Verwertung zuzuführen, soll im Rahmen des Forschungsvorhabens geklärt werden.

Recycling von Mineralwolle Dämmstoffen und Mineralschaum Dämmstoffen

WDVS mit Mineralwolle- und Mineralschaum-Dämmstoffen können mit den gleichen Techniken (abschälen und abschaben) von der Gebäudewand entfernt werden. Weitgehend sortenreine Mineralwolle-Dämmstoffe werden meist in speziell gekennzeichneten Kunststoff-Säcken (nach TRGS 521) gesammelt und deponiert oder zu Briketts gepresst. Diese Briketts können bei der Mineralwolleherstellung wieder dem Herstellprozess zugegeben und damit recycelt werden.

Stark verschmutzte Mineralwolle-, Kleber- und Gewebeabfallstoffe können üblicherweise bisher nicht sinnvoll getrennt werden und werden deshalb wie verschmutzte EPS-Abfälle in Müllverbrennungsanlagen entsorgt. Die Rückbaubarkeit und Verwertung von mineralischen Schaum- und Mineralwolle-Dämmstoffen soll in einem weiteren Teil des oben genannten Forschungsvorhabens weiter untersucht und bewertet werden.

Recycling der mineralischen Bestandteile des Bauschutts

Ist das WDVS vom Gebäude entfernt, kann das Gebäude mit herkömmlichen Methoden wie Abrisssbirne, Bagger usw. rückgebaut werden. Bauschutt wird üblicherweise in Bauschuttrecyclinganlagen mit sogenannten Backenbrechern zerkleinert, mit verfahrenstechnischen Anlagen gereinigt, Metalle, Holz und Kunststoffe abgetrennt und dann in verschiedene Fraktionen getrennt.

Zerkleinerter Bauschutt mit einem organischen Anteil < 10 % wird beispielsweise als

- Betonsand Korngröße 0-10 mm
- Ziegelsplitt
- Betonschotter Korngröße 0-100 mm

verkauft und weiterverwertet. Diese Komponenten werden als Zuschlagsstoff für Beton, für den Untergrund im Straßen- und Wegebau oder zur Geländeauffüllung verwendet.

Rückbaubarkeit und Recyclingfreundlichkeit

Auch wenn bereits Lösungen für den Rückbau von WDVS aufgezeigt wurden, steht doch der Rückbau der größten Mengen WDVS durch die größeren Dämmschichtdicken und die Zeit des Einbaus erst bevor. Deshalb sind die betroffene Industrie und die Industrieverbände weiter gefordert, an einem größeren Anteil der stofflichen Verwertung der EPS-Abfälle (heute ca. 25 %) als Alternative zur energetischen Verwertung (heute ca. 70 %) zu arbeiten [Consultic 2012].

Seit dem Ende der 1990er Jahre wird vor allem in Österreich die Diskussion geführt, an WDVS Sollbruchstellen einzubauen, um diese beim Rückbau leichter trennen zu können. Z. B. sind Systeme denkbar, bei denen mit Entfernen einiger Schraubverbindungen das WDVS so geschwächt wird, dass sich die Klebverbindungen relativ leicht lösen lassen. Auch sind mit der Wulst-Punkt-Methode verklebte WDVS leichter rückbaubar als geklebte und verdübelte WDVS. Dazu muss in den nächsten Jahren eine breite technische und offensive gesellschaftliche Diskussion geführt werden, zum Thema Rückbaubarkeit, Recyclingfreundlichkeit, stoffliche oder energetische Verwertbarkeit von WDVS.

Zusammenfassung

Heute gibt es bereits technisch erprobte Methoden WDVS zurückzubauen, das Dämmstoffvolumen nach dem Rückbau deutlich zu verkleinern und die WDVS-Komponenten stofflich oder energetisch zu verwerten. Trotzdem besteht noch Optimierungspotential beim Anteil der stofflichen Verwertung und bei der besseren Rückbaubarkeit von WDVS mit Sollbruchstellen, angesichts dessen, dass der größte Anteil an WDVS erst in den nächsten 20-50 Jahren zum Rückbau ansteht. Aber auch wenn deutlich größere Mengen an Dämmstoffen zur Entsorgung anstehen würden, ist nicht mit einem Entsorgungsengpass zu rechnen, da mehrere Wege zur Entsorgung offen stehen.

Ausblick

Viele organische Dämmstoffe (auf Erdölbasis aber auch aus nachwachsenden Rohstoffen) werden heute aus Sicherheitsgründen mit Flammschutzmitteln ausgerüstet, übrigens auch viele Heimtextilien, Autositze, Flugzeugsitze, usw. Das bei EPS und XPS übliche Flammschutzmittel HBCD (Hexabromcyclododecan) wurde mit der Publizierung vom 18. Februar 2011 in den Anhang XVI der europäischen REACH-

Verordnung [REACH 2006] aufgenommen und mit Wirkung vom 21.08.2015 ist die Anwendung und das Inverkehrbringen in der Europäischen Union verboten. Deshalb läuft die Umstellung bereits. Es muss aber auch überlegt werden, wie man mit den bereits eingebauten und später rückgebauten EPS- und XPS-Dämmstoffen umgeht.

5.6 **Aktuell: Probleme nach Hochwasser [Holm et al. 2013b]**

Nachdem in überfluteten Gebieten das Hochwasser zurück gegangen ist, stehen viele Hausbesitzer vor der Frage, ob ihre gedämmten Kellerwände, Kellerdecken, Fassaden und Außenwände durch das Hochwasser nachhaltig geschädigt wurden. Die nachfolgend dargestellten Überlegungen und Untersuchungen zeigen: Für die meisten betroffenen Dämmstoffe sind keine Probleme zu erwarten. Für einige Dämmstoffe führt das Wasser zu einer deutlichen Veränderung der mechanischen Eigenschaften, die nicht reversibel sind und eines Neuaufbaus der Dämmschicht bedürfen. Für andere Materialien werden die mechanischen Eigenschaften nur gering durch das Hochwasser beeinflusst. Diese Dämmstoffe könnten an den durchnässten Bauteilen verbleiben, wenn eine Austrocknung der Dämmung und vor allem der tragenden Bauteile möglich ist.

Überflutungen betreffen bei einem Großteil der Gebäude Keller, Erdgeschoß und erstes Obergeschoß. Demnach können Außenwände beheizter und unbeheizter Räume, gedämmte Kellerdecken und Fußbodendämmungen unter Estrichen betroffen sein. Stand ein Gebäude auch mit dem Dachstuhl im Wasser, ist davon auszugehen, dass nicht nur die Dämmung sondern auch viele Holzbauteile vollständig durchnässt sind. Hier muss die Konstruktion ohnehin geöffnet werden, damit sie ohne dauerhafte Holzschädigung austrocknen kann. Zudem sind gedämmte Installationsleitungen und Heizungsrohre betroffen.

Wie lange sind die Bauteile unter Wasser?

Die Dauer der Überschwemmung variiert vor allem mit geographischer Lage und Neigung des überfluteten Geländes. Sie kann regional sehr unterschiedlich sein und schwankt zwischen wenigen Stunden und Wochen. Vielerorts stehen Gebäude tagelang meterhoch unter Wasser das teilweise mit Schlamm durchsetzt und stark verunreinigt ist.

Welche Bauteilaufbauten sind betroffen?

Betroffen sein können alle üblichen Außenwandkonstruktionen mit Außen-, Innen- und Kerndämmung, gedämmte Kellerdecken und Fußbodendämmungen mit Trittschalldämmung unter dem Estrich. Da davon auszugehen ist, dass das Wasser in der Mehrzahl der Fälle innen und außen gleich hoch steht, ist die Schädigung bei Außenwänden unabhängig von der Lage der Dämmschicht. Bei den durchnässten Schichten und Bauteilaufbauten bestehen jedoch große Unterschiede hinsichtlich des Austrocknungsverhaltens. Der Grad der Beschädigung der Dämmstoff-Struktur und der Verunreinigung des Bauteils, die nach der Austrocknung verbleibt, ist in die

Entscheidung, die zu einer vollständigen Sanierung des Bauteils führen kann, mit einzubeziehen.

Was passiert mit Bau- und Dämmstoffen unter Wasser?

Die meisten Bau- und Dämmstoffe haben in ihrer Struktur große und kleine Hohlräume - Poren oder Zellen - die mit Luft oder Zellgas gefüllt sind. Zudem gibt es bei vielen Stoffen – vor allem bei Mauerwerksmaterialien - auch feine Kanäle, sog. Kapillaren, in denen Wasser besonders gut transportiert wird und sogar nach oben steigen kann. Beim Untertauchen dringt Wasser in diese Materialien ein und verdrängt die Luft aus den Hohlräumen. Je nach der Größe der Poren und Kapillaren geht das unterschiedlich schnell. Große Hohlräume füllen sich deutlich schneller mit Wasser als kleine Hohlräume. Allgemein gilt, je poröser ein Material ist, desto mehr Wasser kann es in seinem Porenraum aufnehmen. Materialien mit dichter Struktur (z. B. Beton) nehmen nur wenig Wasser auf. Einige Dämmstoffe (extrudiertes Polystyrol (XPS), Polyurethan (PU) und Schaumglas (CG)), weisen überwiegend geschlossene Zellen auf, in denen sich Zellgas zur Verbesserung der Dämmeigenschaften befindet. Diese Stoffe nehmen trotz großen Porenraums kein oder nur sehr wenig Wasser auf, da die geschlossenen Zellwände das Ausdiffundieren der Zellgase verhindern und umgekehrt dann natürlich auch kein Wasser hineinlassen.

Welche Schäden sind an der Dämmung zu erwarten?

Für alle feuchten oder nassen Dämmstoffe gilt, dass die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Feuchtegehalt steigt und damit der Wärmedurchlasswiderstand der Bauteile sinkt. Das bedeutet, durchfeuchtete Bauteile haben einen schlechteren Wärmeschutz als trockene Bauteile. Nehmen harte Dämmplatten Feuchte auf, können sie quellen und es kann zu Rissbildung bei angrenzenden Baustoffschichten kommen. Bei der Beurteilung möglicher Schäden an den Dämmschichten muss nach Material und Lieferform der Dämmstoffe unterschieden werden. Oft gibt auch der Anwendungsbereich der Dämmstoffe einen ersten Hinweis auf das Verhalten bei Durchfeuchtung. Dämmstoffe, die für Anwendungen im Erdreich und am Sockel von Gebäuden konstruiert wurden, sogenannte Perimeterdämmungen, werden im Zulassungsverfahren auf Wasseraufnahme bei teilweisem oder vollständigem Eintauchen getestet. Nur wenn sie kein – oder nur sehr wenig – Wasser aufnehmen, bekommen sie eine bauaufsichtliche Zulassung für diesen Einsatzbereich. Bei solchen Dämmstoffen sind keine Schäden an der Dämmung durch das Hochwasser zu erwarten. Als Perimeterdämmung werden üblicherweise extrudiertes Polystyrol (XPS), Schaumglas (CG) und in den letzten Jahren auch expandiertes Polystyrol (EPS) mit hoher Rohdichte und guter Verschweißung der Perlen eingesetzt [Pfundstein et al. 2007]. Auch Polyurethan (PU) mit bauaufsichtlicher Zulassung ist als Perimeterdämmung geeignet.

Andere geschlossenzellige Dämmstoffe auf Kunststoffbasis (z. B. Phenolharz (PF), synthetischer Kautschuk oder Polyethylen (PE)) verhalten sich ähnlich. Sie werden im Zulassungsverfahren zwar i. d. R. nicht auf Wasseraufnahme untersucht, neh-

men aber schon aufgrund ihrer Porenstruktur mit geschlossenen Hohlräumen kaum Wasser auf.

Expandiertes Polystyrol (EPS) gilt zwar als offenzelliger Dämmstoff, nimmt aber bei Lagerung unter Wasser ebenfalls nur geringe Mengen Feuchtigkeit auf. Das gilt auch für EPS geringer Rohdichte, wie es häufig in Wärmedämmverbund-Systemen eingesetzt wird. EPS wird auch häufig als Trittschalldämmung eingesetzt. Hier existieren langjährige Erfahrungen mit Wasserschäden aus Wasch- und Spülmaschinen. Mit der richtigen Trocknungstechnik werden die Trittschalldämmung und der Estrich wieder trocken. Für die Dämmung entsteht aus einem solchen Wasserschaden keine dauerhafte Schädigung.

Offenzellige anorganische Dämmstoffe (z. B. Mineralwolle (MW), expandierte Perlite (EP) und andere Schütt-Dämmstoffe nehmen beim Untertauchen bis zu einem gewissen Grad (abhängig von der Hydrophobierung des Materials) Wasser auf. Sie können es aufgrund ihrer offenen Struktur aber auch relativ rasch wieder abgeben. Für viele Dämmstoffe bedeutet eine einmalige Durchnässung nicht automatisch, dass sie dauerhaft geschädigt werden. Mineralwolleplatten für den Einsatz in Wärmedämmverbund-Systemen (WDVS) werden bei der Herstellung mit einem Spezialöl behandelt. Dabei werden die Fasern wasserabweisend eingestellt. Kommen während der Durchfeuchtung keine weiteren Belastungen aus mechanischer Beanspruchung und Verunreinigung der Dämmschicht und erhöhter Temperatur hinzu, haben die Mineralwolleplatten nach der Trocknung wieder ähnliche Eigenschaften wie vor dem Hochwasserereignis. Sind nasse Mineralwolldämmungen über einen längeren Zeitraum (mehrere Monate) einer erhöhten Temperatur oder starken Temperaturschwankungen ausgesetzt, können sich Druckbelastbarkeit und Zugfestigkeit reduzieren. [Oswald et al. 2012]. Kann viel Wasser in die Konstruktion eindringen, erhöht sich das Eigengewicht der Dämmung. Befestigungen (Dübel, Schienen, Schrauben, Nägel) sind einer deutlich höheren Belastung ausgesetzt. Zudem kann die Haft- und Querkzugfestigkeit direkt angebrachter Schichten (z. B. Putzschichten) beeinflusst sein. Werden hier Verformungen oder Risse festgestellt, sollte die Konstruktion komplett erneuert werden.

Bei losen Dämmungen, z. B. im zweischaligen Mauerwerk und bei Holzständerbauweise, (Mineralwolleflocken, expandierte Perlite (EP), etc.) besteht nach dem Abfließen des Wassers die Gefahr von Setzungen und die Bildung von Hohlräumen, die zu Wärmebrücken nach der Austrocknungszeit führen. Erkennen kann man solche Stellen durch thermografische Aufnahmen oder durch Untersuchungen mit einem Endoskop. Zu beachten ist hier, dass die Thermografie nur bei ausreichend großer Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen aussagekräftige Ergebnisse liefert – also vor allem während der Heizperiode im Winter. Perlite und Mineralwolle werden auch zur Verbesserung der Dämmeigenschaften in hochwärmedämmenden Mauersteinen eingesetzt. Üblicherweise haben diese Dämmstoffe für die Verwendung in den Kammern von Mauersteinen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (als Dämmstoff für das zweischalige Mauerwerk) und sind vollständig hydro-

phobiert. Sie nehmen daher nur langsam Wasser auf. Die Austrocknung dauert bei solchen gefüllten Mauersteinen jedoch länger als bei ungefüllten Steinen mit Luftkammern.

Leichte Faserdämmstoffe für den Einsatz in Steildächern oder Holzbauwänden reagieren meist empfindlich auf Durchfeuchtung. Zudem sind hier meistens auch Holzbauteile betroffen, die offengelegt werden müssen um schnell und gut austrocknen zu können. Viele organische Dämmstoffe wie z. B. Holzfasern (WF), Zellulose, Hanf, Flachs etc. können große Mengen Wasser aufnehmen. Hier ist ein Ausbau der Dämmschichten ratsam, um eventuelle Fäulnis oder Schimmelpilzschäden zu vermeiden.

Wann droht Schimmel?

Schimmelpilze brauchen für ihr Wachstum einen Nährboden, ausreichend Feuchtigkeit und passende Temperaturen. Viele Stoffe in und auf Bauteilen, wie organische Stoffe, Tapeten oder Staub, dienen Schimmelpilzen als Nährstoffe. Hierzu gehören auch die eingeschwemmten organischen Verunreinigungen des Hochwassers. Temperaturen zwischen 5 °C und 40 °C werden in Gebäuden praktisch immer erreicht. Schimmelpilze wachsen, wenn in Bauteilen die relative Feuchte in Poren und Hohlräumen bei 80 % bis 100 % liegt. Sie wachsen jedoch nicht in flüssigem Wasser und auf trockenen Bauteilen. Bei einer einmaligen und zeitlich begrenzten Durchnässung ist dann nicht mit Schimmelpilzbildung zu rechnen, wenn es gelingt, durch rasche Trocknung die Feuchte unter 80 % zu bringen.

Können die Konstruktionen wieder austrocknen?

Untersuchungen von [Zirkelbach und Holm 2001] zeigen, dass monolithisches Mauerwerk mit üblichen Putzschichten langsamer austrocknet als monolithisches Mauerwerk ohne Putz. Der Grund ist ein verringerter Kapillartransport über die Grenzschicht zwischen Mauerwerksbaustoff und Putz. Befindet sich an einer solchen Wand zusätzlich noch eine Dämmschicht, kann die Austrocknung nur noch durch Wasserdampfdiffusion stattfinden, die bei diffusionshemmenden Dämmstoffen entsprechend langsam verläuft. Die Austrocknungsgeschwindigkeit hängt hier direkt von den Wasserdampfdiffusionswiderständen des Putzes und der Dämmschicht ab.

Genauere Aussagen über das Austrocknungsverhalten eines Gebäudes nach einem Hochwasserereignis können nur instationäre hygrothermische Bauteil- und Gebäudesimulationen mit Programmen wie WUFI® oder WUFI Plus® liefern. Dabei werden unter realistischen Randbedingungen Trocknungsraten, Dauer, Energieaufwand und mögliche Risiken wie Schimmelpilzwachstum errechnet. Diese Art von Berechnungen zeigen, dass beispielsweise eine Außenwand mit WDVS, bei der direkt Wasser in die Dämmebene eingedrungen ist, sowohl im System mit EPS als auch im System mit Mineralwolle, innerhalb eines Jahres wieder austrocknet. Das massive Mauerwerk dahinter ist unabhängig von den untersuchten Baustoffen nach ca. 2 bis 3 Jahren wieder bei dem Ausgleichsfeuchtegehalt angelangt, den es vor dem Hochwasserereignis hatte. Für eine detaillierte Aussage, die auch die Verunreini-

gungen bis hin zu verbleibenden Kontaminierungen betreffen, sollte aber in jedem Fall ein kompetenter Sachverständiger und/oder ein Untersuchungslabor herangezogen werden, der die vorgefundene Situation am Gebäude beurteilt und das Austrocknungspotential der Aufbauten für das jeweilige Gebäude untersucht. Hier bieten sich instationäre feuchtetechnische Berechnungen zur Vorhersage des Schadenspotentials an. Wenn Räume während der Austrocknung voll genutzt werden, sollten Raumluftproben analysiert werden, um flüchtige Stoffe aus der Diffusion zur Raumseite zu identifizieren, welche die Gesundheit der Bewohner beeinträchtigen können.

6 Bedeutung der Wärmedämmung im Kontext der Energiewende: Potentialabschätzung

Der Gebäudebestand besitzt ein sehr großes Potential zur Senkung des Energieverbrauchs. Von den gut 2.500 Terawattstunden Endenergie, die jedes Jahr bundesweit verbraucht werden, entfallen etwa 40 % auf Raumwärme, Warmwasserbereitung und Beleuchtung in Gebäuden allgemein. Auf Raumwärme und Warmwasserbereitung in Wohngebäuden entfallen ca. 25 %. Ausgehend von einem durchschnittlichen Sparpotential von 50 Prozent, ergäbe sich im gesamten Gebäudebereich ein möglicher Minderverbrauch von ca. 500 Terawattstunden pro Jahr. Natürlich nur, wenn bei allen Gebäuden sämtliche Möglichkeiten, wie eine effiziente Dämmung der Gebäudehülle, Fenstermodernisierung und der Einsatz moderner Technik, vollständig genutzt würden. Für eine genauere Analyse und um die Bedeutung des Gebäudes im Kontext der Energiewende näher zu verstehen soll im folgenden Kapitel eine Potentialabschätzung durchgeführt werden.

Der Gebäudebestand in Deutschland beträgt derzeit in etwa 20 Millionen Gebäude. Davon entfallen 75,5 % auf Ein- und Zweifamilienhäuser, 15,5 % auf Mehrfamilienhäuser und 9 % auf Nichtwohngebäude. Zur Abschätzung des tatsächlichen Potentials der energetischen Gebäudesanierung ist es wichtig, detaillierte Informationen über die Art und Anzahl der Gebäude, unterteilt nach Baualtersklassen und derzeitigem Sanierungszustand, zu kennen. Die bauliche Praxis unterliegt einem ständigen Wandel. Dementsprechend groß ist die Vielfalt an verwendeten Materialien und konstruktiven Details. Um Berechnungen zum Energieverbrauch durchzuführen, müssen deshalb sinnvolle Klassen jeweils repräsentativer Bauarten für die verschiedenen Gebäudetypen und den entsprechenden energetischen Zustand der Bauteile erstellt werden.

6.1 Überblick über den Gebäudebestand

In Deutschland gibt es ca. 18,2 Mio Wohngebäude (WG). Diese enthalten ca. 39,7 Mio Wohneinheiten (WE). Inclusive der Wohnungen in Nichtwohngebäuden (NWG), erhöht sich die Zahl der WE auf insgesamt 40,5 Mio. Dies entspricht einer Wohnfläche von 3,45 Mrd. m² [Bigalke et al. 2012].

Wie in 2.2 überblicksartig gezeigt, ist neben der mechanischen Energie, der Energieverbrauch in Gebäuden, und hier vor allem die Energie für Raumwärme, für den Gesamtenergieverbrauch in Deutschland von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der breit gefächerten Altersklassenstruktur der Bestandsgebäude und damit verbundenen, unterschiedlichen technischen Standards der Ausführung, ist die energetische Qualität der Gebäude sehr heterogen, was sich auch im Energieverbrauch

zeigt. Der Mittelwert des spezifischen Endenergieverbrauchs von Wohngebäuden in Deutschland, bezogen auf die Wohnfläche liegt aktuell bei ca. $177 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl.}} \cdot \text{a})$. Etwa 25 % der Gebäude weisen einen spez. Endenergieverbrauch von über $250 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl.}} \cdot \text{a})$ auf. [Bigalke et al. 2012]

Die nachträgliche Wärmedämmung von Außenbauteilen ist ein wichtiger Baustein zur Erschließung von Energieeinsparpotentialen, da alle anderen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der Energieerzeugung, –umwandlung und -bereitstellung konkurrenzfähig werden, wenn die Transmissionswärmeverluste über die Gebäudehülle einen Großteil der effizient erzeugten und umgewandelten Raumwärme ungenutzt in die Atmosphäre abfließen lassen.

Um die in den späteren Kapiteln gezeigten Maßnahmenpakete der potentiell für die Umsetzung dieser Maßnahmen geeigneten Anzahl an Gebäuden gegenüberzustellen, werden zunächst detaillierte Informationen über die Altersstruktur und den energetischen Zustand der Bestandsgebäude in Deutschland zusammengefasst.

Altersstruktur der Gebäude in Deutschland

Abbildung 65 zeigt die Entwicklung der Neubautätigkeit in Deutschland seit 1960 in Millionen m^3 umbauter Raum. Die Daten stammen vom Statistischen Bundesamt. Die Neubauaktivitäten vor der Wiedervereinigung wurden zusammengezählt. Einen großen Anstieg bei der Anzahl der neu errichteten Gebäude erfolgte Anfang der 1990er Jahre. In erster Linie fehlten zu diesem Zeitpunkt vor allem im Gebiet der ehemaligen DDR große moderne Wohnungen, Einfamilienhäuser und Altbauwohnungen mit entsprechendem Komfort. Nach der Wende wurde deutlich, dass selbst unter optimistischen Annahmen über die zukünftige, wirtschaftliche Entwicklung der neuen Länder, die benötigten Investitionen in die Bestandssanierung und den Neubau nicht aus den Einnahmepotentialen der Nettomieten erwirtschaftet werden können und erhebliche öffentliche Subventionen erforderlich sind. Nach 1995 fiel die Zahl der neuen Wohngebäude kontinuierlich ab. Die Zahl der Wohnungsneubauten in Deutschland hat im vergangenen Jahr einen neuen Tiefstand erreicht: gerade einmal 159 000 Einheiten wurden noch fertiggestellt, 9,6 Prozent weniger Wohnungen als im Jahr zuvor.

Der Fokus dieser Studie liegt auf Maßnahmen zur energetischen Verbesserung der Gebäude im Bestand. Der Vollständigkeit halber wird im Folgenden trotzdem kurz auf die Baufertigstellungen im Neubau eingegangen. Nach den Einbrüchen während der Wirtschaftskrise 2009 ist die Zahl der errichteten Gebäude seit 2010 wieder leicht gestiegen und erreichte im Jahr 2011 mit 125 022 Gebäuden (WG und NWG) wieder das Niveau von 2008. Etwa 77 % der errichteten Gebäude im Jahr 2011 waren Wohngebäude. Diese repräsentieren insgesamt 161 186 Wohnungen mit einer Wohnfläche von insgesamt $18,6 \text{ Mio m}^2$. Der Anteil der in 2011 neu gebauten Wohnfläche an der Gesamtwohnfläche beträgt damit ca. 0,5 %. [Destatis 2012]

Der überwiegende Teil der neu errichteten Gebäude sind Ein-/Zweifamilienhäuser (EZFH) (92,2 %). Im Durchschnitt weisen neu errichtete Einfamilienhäuser eine Wohnfläche von ca. 145 m²/WE; Zweifamilienhäuser eine Wohnfläche von ca. 109 m²/WE auf. Über alle Gebäudetypen gemittelt beträgt die durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung 116 m²/WE. Dieser hohe Wert ist dem großen prozentualen Anteil an EZFH zuzuordnen. [Destatis 2012]

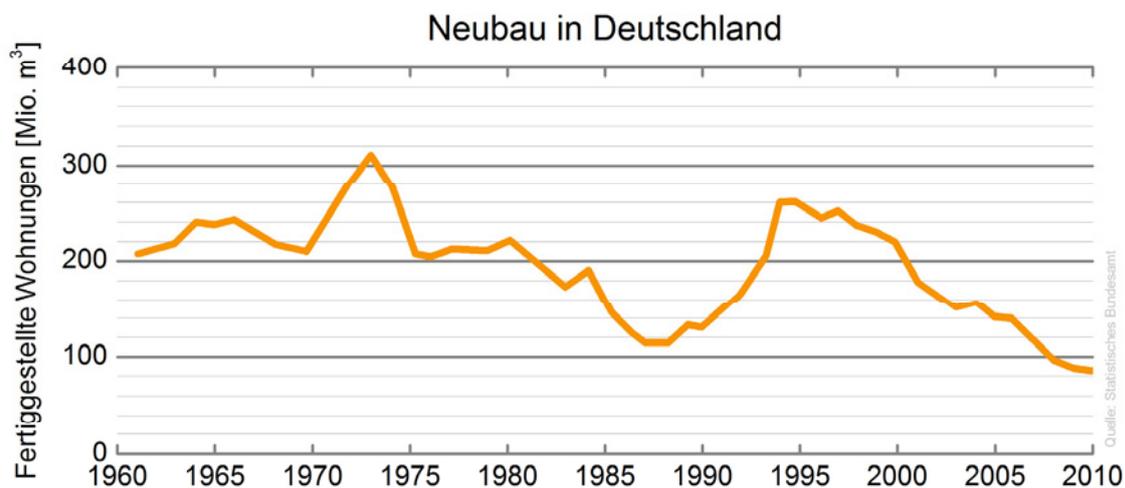


Abbildung 65: Entwicklung der Neubautätigkeit für den Wohnungsbau in Deutschland seit 1960. Die Daten vor der Wiedervereinigung wurden zusammengezählt.

In der Studie von [Walberg et al. 2011] liegt eine detaillierte Erhebung zum energetischen Zustand des so genannten „kleinen Wohnungsbau“ in Deutschland vor. Die Erhebung umfasst damit die überwiegend selbst genutzten Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH) und kleinere Mehrfamilienhäuser mit 3 – 12 Wohnungen im vermieteten Wohnungsbau. Der betrachtete Bestandsausschnitt deckt ca. 93 % der gesamten Wohnfläche in Deutschland ab [Bigalke et al. 2012]. Die Verteilung der in [Walberg et al. 2011] untersuchten Gebäudetypen (EZFH und MFH) auf die Bundesländer zeigt überdies eine gute Übereinstimmung mit Daten aus der Mikrozensus-Zusatzerhebung, was die Repräsentanz der Stichprobe unterstreicht. Im Folgenden wird immer auf den „kleinen Wohnungsbau“ eingegangen.

Die Altersstruktur der Gebäude in Deutschland zeigt Abbildung 67. Erkennbar ist ein deutlicher Anstieg in den Gebäudealtersklassen zwischen 1949 und 1968, was auf die hohe Bauaktivität beim Wiederaufbau des nach dem Krieg in den Städten weitgehend zerstörten Gebäudebestands zurückzuführen ist, und allgemein die in diesen Jahren gute wirtschaftliche Konjunktur widerspiegelt. Betrachtet man ausgehend von ca. 1949 bis heute die Verteilung der Gebäudealtersklassen, so ist über die Jahre die Zahl an neu errichteten Gebäuden tendenziell rückläufig und liegt im Jahr 2011 wie einleitend beschrieben bei 96 549 Wohngebäude.

Abbildung 66 zeigt die Verteilung der Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH) und MFH auf die Baualtersklassen. Es ist zu erkennen, dass der überwiegende Anteil der Gebäude im Bestand EFH sind. Der Anteil an MFH nimmt mit jünger werdenden Baualtersklassen tendenziell ab. Dies lässt sich mit dem Abbau sozialer Wohnungsbauprogramme ab Beginn der 80er Jahre erklären, mit denen zuvor ein Großteil des Mehrfamilienhausbaus finanziert wurde.

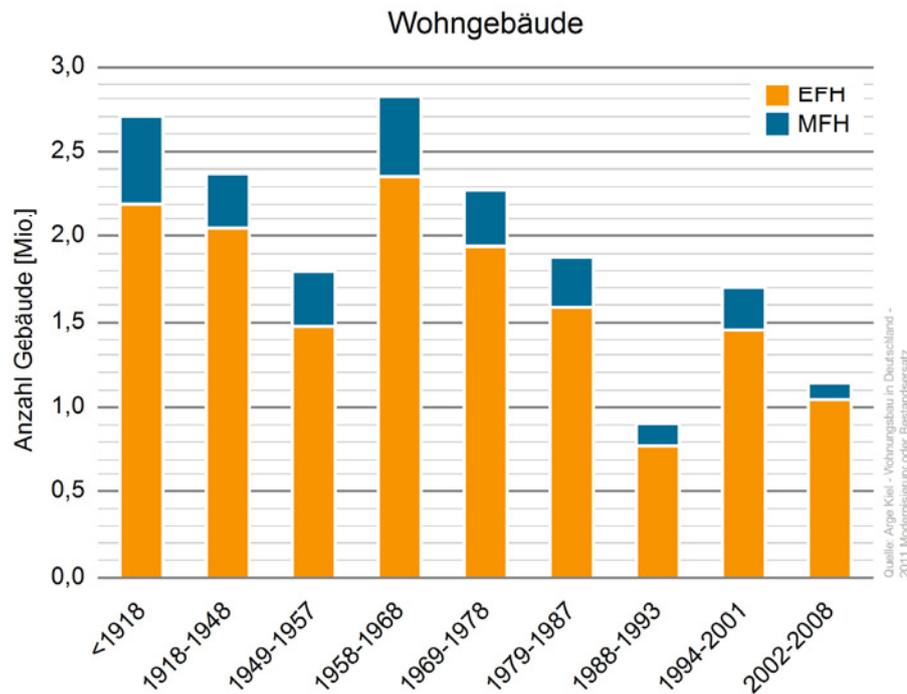


Abbildung 66: Anzahl der Einfamilien- und Mehrfamilien-Wohngebäude in Deutschland - Aufteilung nach Baualtersklassen

Abbildung 67 zeigt in Ergänzung zu Abbildung 66 auch den Sanierungszustand innerhalb jeder Gebäudealtersklasse. Die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen werden unterschieden in die Kategorien „mittel/größtenteils modernisiert“, „teils modernisiert“ und „nicht modernisiert“. Auch wenn in den älteren Gebäudealtersklassen bereits insgesamt viele Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden, so entfallen die meisten Maßnahmen hier auf die Kategorie „teils modernisiert“. In der zugrunde liegenden Studie [Walberg et al. 2011] sind die Kategorien zu den Modernisierungszuständen wie folgt definiert:

- „Nicht modernisiert: Seit der Erbauung gab es keine wesentlichen Modernisierungen, [..].“
- „(Teils) modernisiert: An wesentlichen Bauteilen oder Komponenten wurden teilweise Modernisierungen durchgeführt, [..].“
- „Mittel/größtenteils modernisiert: An wesentlichen Bauteilen oder Komponenten wurden größtenteils Modernisierungen durchgeführt, [..].“

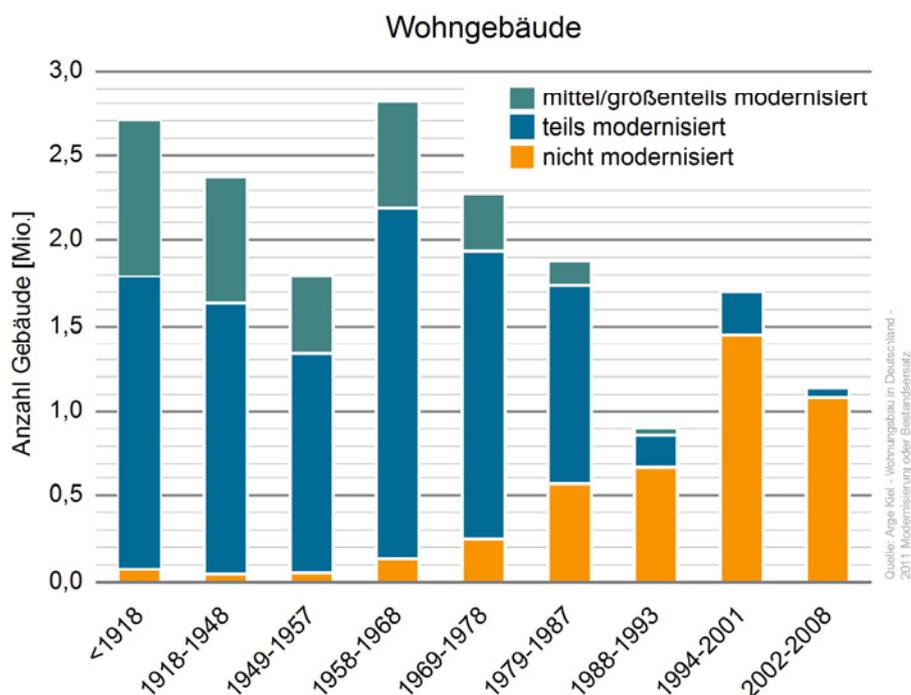


Abbildung 67: Anzahl der Gebäude in Deutschland, unterteilt nach Baualtersklassen und derzeitigem Sanierungszustand

Eine genauere Betrachtung der Sanierungszustände in den betrachteten Baualtersklassen zeigt, dass bei den Baualtersklassen vor 1969 der Anteil an nicht modernisierten Gebäuden sehr gering ist und ab der Baualtersklasse 1979 – 1987 deutlich ansteigt. Dieser Umstand ist nicht überraschend, geht man davon aus, dass in den jüngeren Baualtersklassen bereits beim Bau ein deutlich höherer energetischer Standard umgesetzt wurde. Im Gegenlauf hierzu wird der Anteil der Kategorie mittel/größtenteils modernisiert in Richtung der jüngeren Baualtersklassen immer geringer und fällt schließlich in den Baualtersklassen ab 1994 komplett weg.

Die meisten der realisierten Modernisierungsmaßnahmen fallen in die Kategorie „teils modernisiert“, in die Baualtersklassen bis 1987. Dieser Modernisierungszustand wird in [Walberg et al. 2011] durch „...maximal zwei Maßnahmen an der Gebäudehülle und/oder der Anlagentechnik im Standard nach WSchV 1977/1984 bzw. maximal eine Maßnahme an der Gebäudehülle und/oder der Anlagentechnik im Standard nach WSchV 1995.“ charakterisiert. Die mit den Modernisierungsmaßnahmen verknüpften mittleren Energieverbrauchsdaten werden im Abschnitt 6.2, Energieverbrauchskennwerte diskutiert.

Die energetische Qualität der Gebäude hat seit der Wärmeschutzverordnung 1979 deutlich zugenommen und ist inzwischen etwa viermal so gut wie die von Vorkriegsaltbauten. Fasst man die Baualtersklassen entsprechend den wichtigsten Novellierungen der Wärmeschutzverordnung bzw. der Energieeinsparverordnung zusammen, so ergibt sich eine Verteilung der Modernisierungszustände auf die Bau-

jahre „vor WSchV 1977“, „vor WSchV 1995“ und „vor EnEV 2002“ entsprechend Abbildung 68. Erkennbar ist, dass der Anteil der gering- und größtenteils modernisierten Gebäude in den drei gebildeten Klassen nahezu konstant ist. Lediglich der Anteil an nicht modernisierten Gebäuden nimmt bei den jüngeren Baujahren zu. Vergleicht man die Gebäudebestandsverteilung mit dem entsprechenden energetischen Zustand der Gebäude, so stellt man fest, dass über 80 % der Gebäude vor der Einführung der Wärmeschutzverordnung von 1995 gebaut wurden. Berücksichtigt man nur die Gebäude, die gering bzw. nicht modernisiert sind, bedeutet das, dass derzeit 65 % der Gebäude in Deutschland sanierungsbedürftig sind.

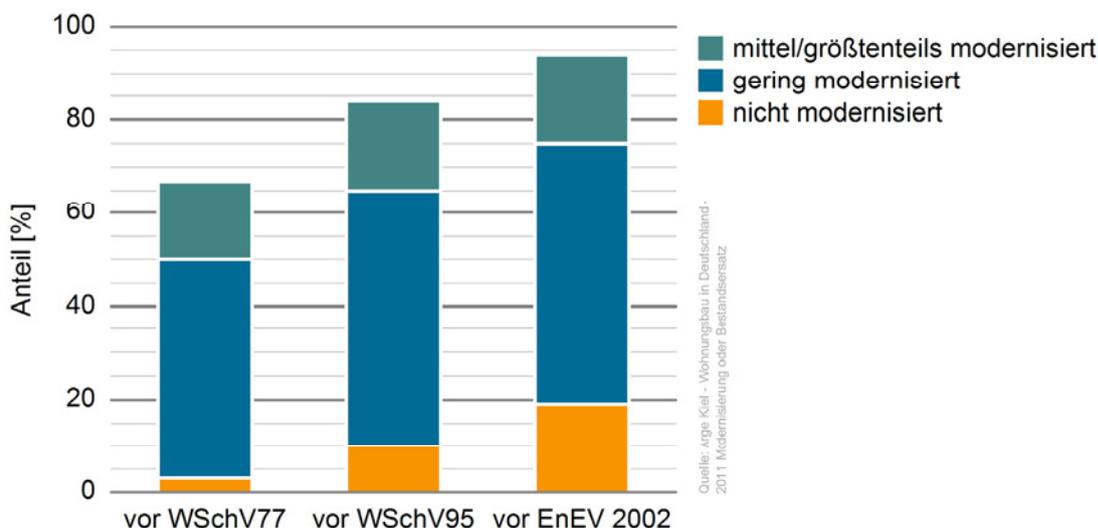


Abbildung 68: Gesamtzustand der Gebäude in Deutschland seit der Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung – gering modernisierte Gebäude sind in der Mehrzahl – der Anteil der größtenteils modernisierten Gebäude ist nahezu konstant

Struktur der Gebäudegrößen und Wohneinheiten

Neben der Verteilung der Baualterklassen und den realisierten Modernisierungszuständen ist die Verteilung der Wohngebäude auf die Gebäudetypen Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) interessant. MFH weisen in der Regel ein, unter energetischen Gesichtspunkten, günstigeres Verhältnis von umbautem Raum zur Hüllfläche auf. Der Effekt beruht darauf, dass mit steigender Objektgröße bei vereinfacht quaderförmigen Gebäudeformen, die Hüllflächen im Quadrat, das Volumen jedoch in der dritten Potenz wächst [Bahr 2008]. Während in einem EFH 1 m³ Wohnraum im Schnitt von ca. 0,7 m² Gebäudehüllfläche umbaut werden kann, werden in MFH hierfür nur etwa 0,4 m² Gebäudehülle je m³ benötigt. Die wärmeübertragende Fläche zwischen Wohnraum und Außenklima ist bei MFH also signifikant geringer, was sich in entsprechend verminderten Transmissionswärmeverlusten niederschlägt. [Bigalke et al. 2012]

Nur rund 17 % der WG in Deutschland sind MFH – diese enthalten allerdings 53 % der Wohneinheiten (WE) (Abbildung 69). Die restlichen 47 % der WE befinden sich in EZFH, die jedoch durch die gegenüber WE in MFH deutlich größeren m²-Zahlen je WE dennoch den größeren Anteil an der Gesamtwohnfläche in Deutschland aufweisen [Bigalke et al. 2012]. Die durchschnittliche Wohnfläche je WE beträgt in EZFH ca. 117 m² und in MFH ab drei WE/WG noch ca. 70 m² [Destatis 2012].

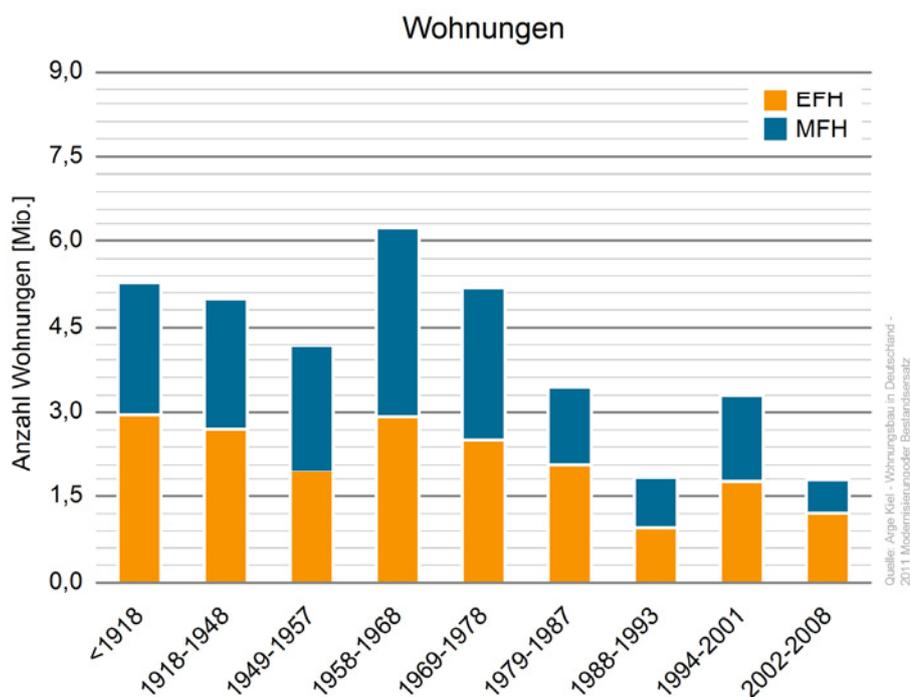


Abbildung 69: Gesamtzahl der Wohnungen in Deutschland nach Baualtersklassen und Aufteilung in Einfamilien- und Mehrfamilien-Wohngebäude

Für eine spätere Beurteilung der Investitionsmöglichkeiten und –bereitschaft der Eigentümer in energetische Maßnahmen, ist auch die Eigentumsquote ein wichtiger Indikator. Die Eigentumsquote ist definiert als der Anteil der Haushalte in selbst genutztem Wohneigentum, bezogen auf alle Haushalte. Die Eigentumsquote in den neuen Bundesländern ist seit 1991 von ursprünglich ca. 26 %, durch diverse Maßnahmen zur Wohneigentumsförderung auf aktuell ca. 32 % deutlich gestiegen. Dem gegenüber ist die Eigentumsquote in den alten Bundesländern im gleichen Zeitraum von ca. 41 % auf aktuell ca. 43 % gestiegen und liegt damit trotz geringeren Anstieg, immer noch deutlich über den Werten in den neuen Bundesländern. Gründe hierfür sind in den sozialistischen Strukturen der ehemaligen DDR zu finden, in denen der überwiegende Teil der Bevölkerung in volkseigenen Mietwohnungen untergebracht war, aber können auch auf die immer noch deutlichen Unterschiede in den Haushaltsnettoeinkommen der Bewohner in alten und neuen Bundesländern zurückgeführt werden. [Frick und Droß 2011]

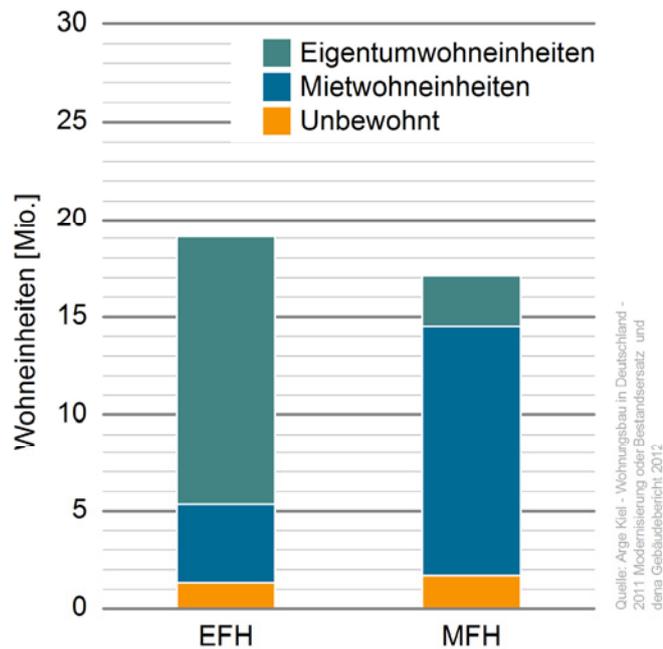


Abbildung 70: Eigentumsverhältnisse der Wohngebäude in Deutschland

Abbildung 70 zeigt die Anteile an WE in Deutschland (alle Bundesländer) die von Eigentümern selbst genutzt, bzw. von Mietern bewohnt werden und differenziert außerdem zwischen EZFH und MFH. Während der Großteil der EZFH von Eigentümern bewohnt wird, ist der Anteil an den vom Eigentümer selbst genutzten WE in MFH deutlich geringer. Dies ist in erster Linie mit der großen Zahl an Wohnungsbau-gesellschaften und privaten Eigentümern zu erklären, die WE in MFH als Kapitalanlage halten [Walberg et al. 2011].

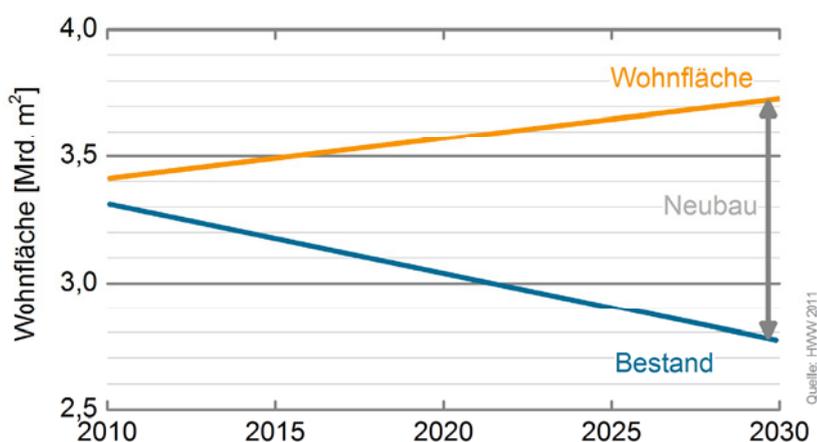


Abbildung 71: Gesamte Wohnfläche in Deutschland - Neubau und Bestand

Der aktuelle Bestand an Wohnfläche würde bedingt durch die begrenzte Nutzungsdauer von Gebäuden und damit verbundenen Abriss oder auch der Umwidmung von Wohnflächen (beispielsweise der Nutzung von ehemaligen Wohngebäuden als

Büro-/Gewerbeflächen nach einer Sanierung) im Laufe der Jahre kontinuierlich abnehmen. Dem gegenüber nimmt der Bedarf an Wohnfläche über die Jahre anhaltend zu, obwohl die Gesamtbevölkerungszahl in Deutschland aufgrund des demografischen Wandels sinkt. Die Gründe hierfür liegen einerseits in dem prozentual immer größer werdenden Anteil an Single-Haushalten und einem allgemeinen Trend zu mehr Wohnraum aufgrund gestiegener Ansprüche an das persönliche Wohnumfeld.

Die zwangsläufig entstehende Lücke zwischen Bestand und nachgefragter Wohnfläche muss durch den Neubau gedeckt werden. Abbildung 71 extrapoliert die durch Neubau zu erstellende Wohnfläche bis zum Jahr 2030. Es wird deutlich, dass der prozentuale Anteil an Neubauten – auf einem energetisch hohen Standard – zunehmen wird.

6.2 Energieverbrauchskennwerte

Die Frage welche Menge an Energie ein Gebäude zur Deckung der aus seiner Nutzung abgeleiteten Funktionen (Raumwärme, Warmwasser, Beleuchtung, IKT) benötigt, kann durch zwei ähnlich klingende, in ihrer Aussage aber sehr verschiedene Kennwerte beschrieben werden. Unterschieden werden muss hierbei zwischen dem *Energiebedarf* auf der einen Seite und dem *Energieverbrauch* auf der anderen.

Wo liegen nun die Unterschiede? Aus einem bestimmten energetischen Standard der Bauausführung (dieser korreliert i. d. R. mit der Baualtersklasse), der Größe des Gebäudes und der Anzahl der darin wohnenden Personen lässt sich ein für diese spezifische Konstellation typischer *Energiebedarf* des Gebäudes berechnen. Dieser Kennwert ist zunächst, bezogen auf die angesetzten Randbedingungen (U-Wert der Konstruktion, Art und technischer Standard der Heizungs- und ggf. Kühlanlage, angenommenes Nutzungsverhalten, etc.) korrekt und aussagekräftig um z. B. unterschiedliche energetische Standards der Gebäudehülle und Anlagentechnik, den Einfluss der Wohnfläche oder der Anzahl der im Haushalt lebenden Personen auf den Energiebedarf, unabhängig von individuellen Einflüssen der Nutzer, zu vergleichen.

Der Energiebedarf berücksichtigt also ausschließlich den technischen Standard des Gebäudes und eine angenommene Nutzungsintensität und nicht das individuelle Verbrauchsverhalten der Bewohner. Dem gegenüber beschreibt der *Energieverbrauch* den tatsächlichen Verbrauch an Endenergie in einem konkreten Haushalt. Unterschiede zum Energiebedarf ergeben sich dann beispielsweise aus dem persönlichen Komfortempfinden bzgl. Raumtemperatur, Raumluftqualität (Lüftungsverhalten), Beleuchtung und der tatsächlich genutzten m^2 an Wohnfläche. Die Auswirkung des individuellen Komfortbedürfnisses auf den Energieverbrauch wird anschaulich, wenn man den durchschnittlichen Energieverbrauch von Wohngebäuden ab dem Jahr 1850 bis heute vergleicht. Bis etwa zum Jahr 1900, lag der Energieverbrauch noch bei lediglich ca. $40 \text{ kWh}/(m^2_{\text{Wfl.}} \cdot a)$. Dieser Wert wird von Bestands-

gebäuden heute (Energieverbrauch im Mittel ca. $177 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl.}} \cdot \text{a})$) bei weitem übertroffen. Der niedrige Energieverbrauch Ende des 19. Jahrhunderts hat jedoch nichts mit dem baulichen Standard zu tun, sondern ist mit einem von Verzicht geprägten Lebensstil der Bewohner zu erklären, in welchem oftmals die Küche als einziger Raum in Doppelfunktion zum Kochen, beheizt wurde [Eicke-Hennig 2013]. Mit Aufkommen der Zentralheizung und dem allgemein gestiegenem Wohlstand in der Bevölkerung, stiegen die Energieverbräuche in Wohngebäuden zwischen 1950 und 1970 auf Spitzenwerte von über $300 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl.}} \cdot \text{a})$.

Der Zusammenhang zwischen Energiebedarf und –verbrauch wurde bisher in nur wenigen Studien systematisch und an einer ausreichend großen Fallzahl untersucht. In [Loga et al. 2011] wird auf Basis der Daten von [Knissel et al. 2006] ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Energiebedarf und –verbrauch abgeleitet (Abbildung 72). Der Untersuchung liegt eine Analyse von 1700 Bestandgebäuden zu Grunde. Wie in Abbildung 72 zu erkennen, entwickelt sich der Energieverbrauch bei steigenden Energiebedarfswerten degressiv und folgt damit dem weiter oben erklärten Verhalten einer angepassten Nutzung bei einem schlechten energetischen Zustand des Gebäudes.

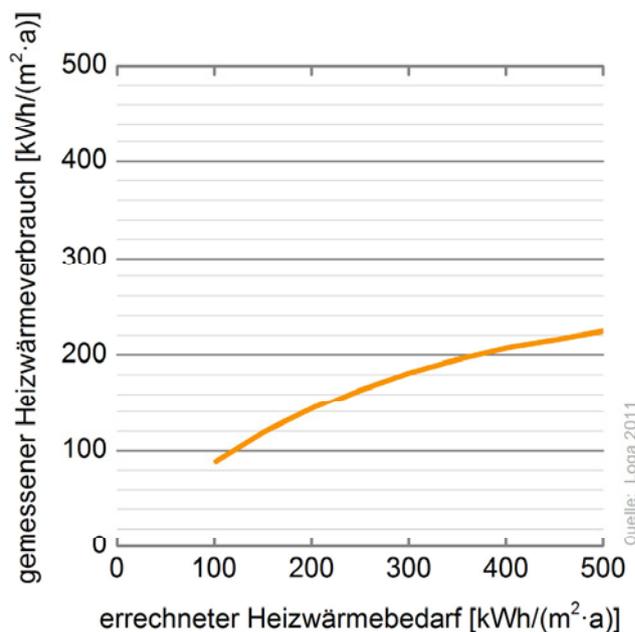


Abbildung 72: Mittlerer Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Energiebedarf, Abbildung aus [Loga et al. 2011]

Der in Abbildung 72 dargestellte Zusammenhang zwischen Heizwärmeverbrauch und –bedarf führt dazu, dass nach einer Sanierung die für den Nutzer tatsächlich erzielbaren Verbrauchseinsparungen oft deutlich geringer ausfallen als die errechneten Bedarfseinsparungen. Dieser so genannte „Rebound-Effekt“ wird derzeit in einem laufenden Forschungsvorhaben der RWTH Aachen mit dem Titel „Quartiers-

konzept Energieeffizientes Rintheim“ in der Forschungsinitiative „EnEff:Stadt“ näher untersucht. (siehe auch Kapitel 8.2, Energieeinsparung)

Nachdem die Motivation der im Jahr 1952 eingeführten DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau noch hauptsächlich in einem Mindestwärmeschutz zur Herstellung eines wohngygienisch ausreichenden Raumklimas lag, so wurde die erstmals im November 1977 in Kraft gesetzte Wärmeschutzverordnung mit dem Ziel verfasst, den Energiebedarf von Gebäuden durch geeignete bauliche Mindeststandards zu senken. Mit den Novellierungen der Wärmeschutzverordnung in den Jahren 1982 und 1995 bzw. der ab 2002 eingeführten Energieeinsparverordnung EnEV steigen die Anforderungen an die energetische Qualität der Gebäude weiter an.

Abbildung 73 zeigt die Entwicklung des Jahresprimärenergiebedarfs für die Heizung von Gebäuden ab 1970 bis heute und unterscheidet hierbei zwischen den Mindestanforderungen (WSchV, EnEV) und der baulichen Praxis. Wie zu erkennen, hängt der gesetzlich vorgeschriebene Energiebedarf gegenüber dem durchschnittlichen Energiebedarf einer bestimmten Baualtersklasse ca. 10 Jahre zurück. Werden exemplarisch umgesetzte Forschungs- und Demovorhaben (entspricht dem energie-technischen Optimum einer bestimmten Periode) zum Vergleich herangezogen, werden die Abstände noch größer. So wurden beispielsweise die Mindeststandards der EnEV 2002, in Forschungsvorhaben und Demoprojekten schon ca. 20 Jahre früher verwirklicht [Erhorn et al. 2001].

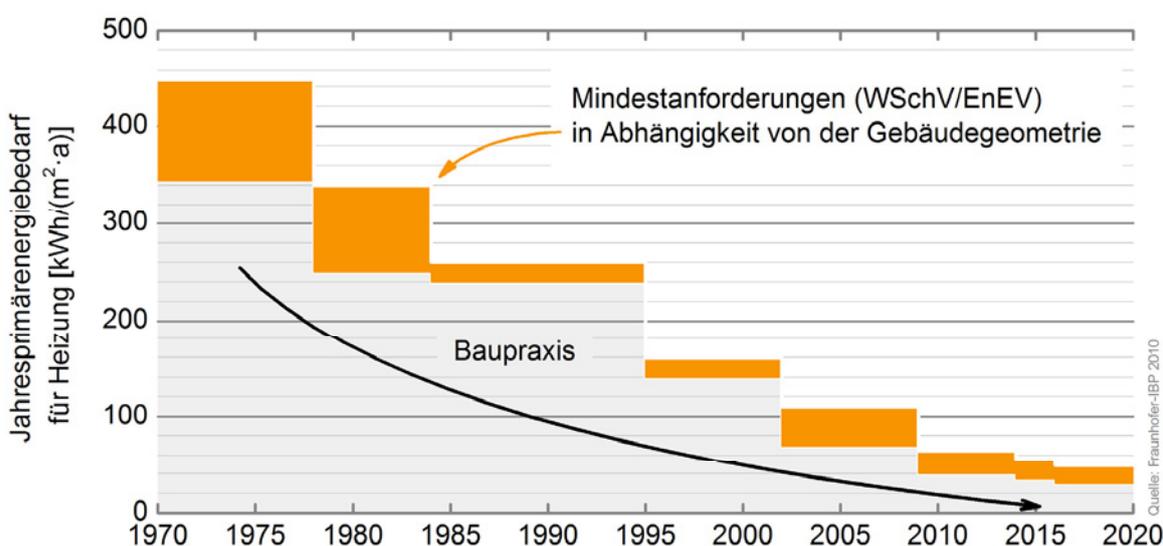


Abbildung 73: Entwicklung der energetischen Anforderungen an Gebäude seit 1970 und Vergleich mit der Baupraxis

Die Energieverbrauchskennwerte der oben gezeigten Baualtersklassen (Abbildung 69), wieder aufgeschlüsselt nach den Kategorien „nicht-, gering-, mittel/größtenteils modernisiert“, zeigt. Abbildung 74. Es wird deutlich, dass die größten Einsparpotentiale (absolute Differenz zwischen nicht- und mittel/größtenteils modernisiert) in den Baualtersklassen bis 1978 angesiedelt sind. Mit Inkrafttreten der 1. Wärmeschutzverordnung im Jahr 1977 (Baualtersklassen ab 1978) sinkt der Energieverbrauch

der unsanierten und sanierten Gebäude kontinuierlich ab. Einsparpotentiale jüngerer Baualterklassen durch Sanierungen fallen durch den ohnehin energetisch besseren Standard der Bauausführung insgesamt geringer aus.

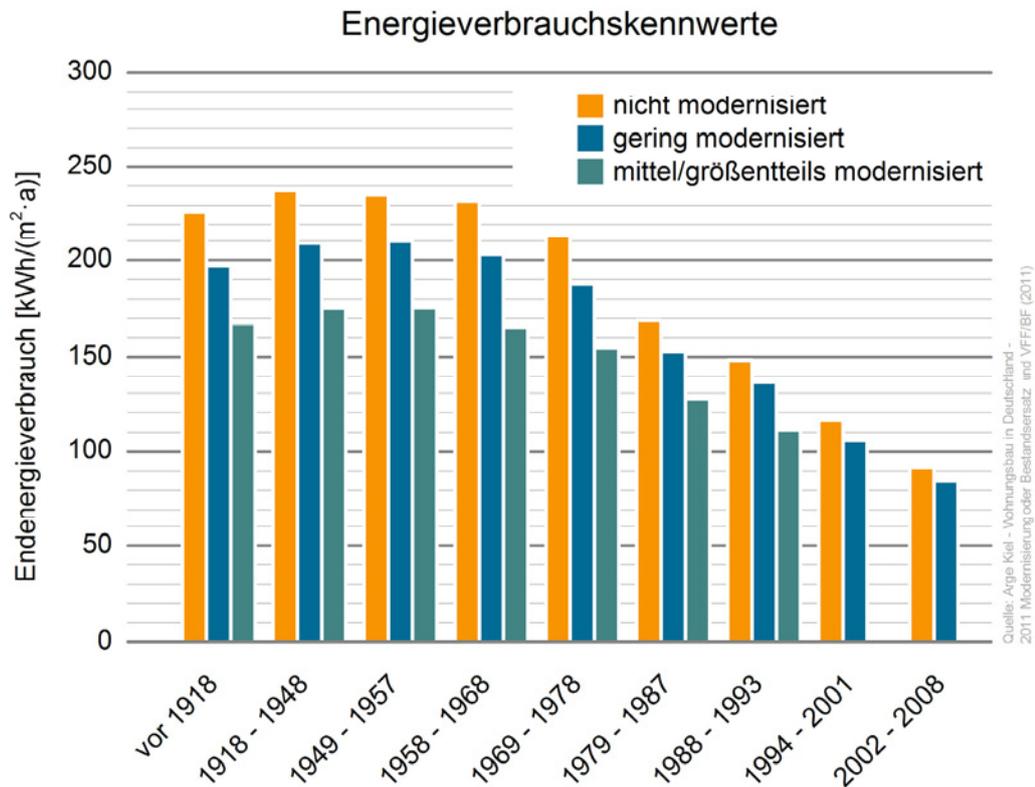


Abbildung 74: Energieverbrauchskennwerte nach Baualterklassen mit Unterscheidung nach dem Sanierungsgrad

Durch Maßnahmen an der Gebäudehülle kann der Transmissionswärmeverlust des Gebäudes wirkungsvoll verringert werden. Andere Energieverbräuche, z. B. der Energiebedarf zur Erwärmung des Trinkwassers oder der Lüftungswärmebedarf haben prozentual geringere Einsparpotentiale. In Abbildung 75 ist der Endenergiebedarf des Gebäudebestands in Deutschland für die Teilbedarfe „Trinkwassererwärmung“, „Transmissionswärmebedarf“ und „Lüftungswärmebedarf“ aufgeschlüsselt. Während der Transmissionswärmebedarf in Gebäuden ab 1984 bis heute deutlich reduziert werden konnte, bleibt der Trinkwasserwärmebedarf auf einem verhältnismäßig konstanten Niveau. Effizienzsteigerungen im Bereich der Trinkwassererwärmung durch die entsprechende Anlagentechnik werden durch Mehrverbräuche aufgrund gestiegener Komfortansprüche ausgeglichen. Der Lüftungswärmebedarf ist erst in der Gebäudegruppe „Passivhaus“ deutlich reduziert, da hier durch die automatisiert geregelte Lüftung verbunden mit Wärmerückgewinnungssystemen gegenüber der manuellen Lüftung bei den anderen Gebäudestandards signifikante Effizienzsteigerungen erreicht werden.

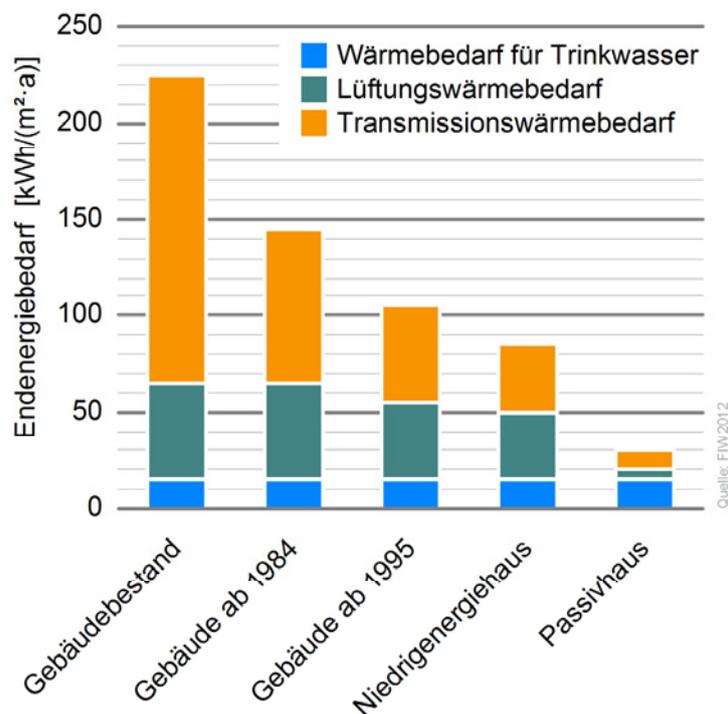


Abbildung 75: Endenergiebedarf des Gebäudebestands in Deutschland mit Unterscheidung nach Art des Wärmebedarfs

Die bislang vorgenommene Einteilung der Energiekennwerte nach Gebäudealtersklassen, gibt einen Eindruck über den energetischen Zustand bestimmter Baualtersklassen. Bezieht man die die prozentualen Anteile dieser Gebäudealtersklassen am Gesamtbestand der Gebäude in Deutschland mit ein, so lässt sich eine statistische Verteilung entwickeln, welche die Häufigkeit bestimmter Energiekennwerte enthält.

Die Verteilung des Endenergieverbrauchs der Gebäude in Deutschland zeigt Abbildung 76. Wie zu sehen ist die Verteilungsfunktion leicht rechtsschief. Der Modalwert liegt aus diesem Grund bei ca. $125 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl}} \cdot \text{a})$ und ist damit deutlich niedriger als der Mittelwert von ca. $177 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl}} \cdot \text{a})$, der wohl auch zu einem Teil durch die wenigen sehr hohen Verbrauchswerte beeinflusst ist. Die Schiefe der Verteilung erklärt sich einerseits aus der Begrenzung der niedrigen Energieverbrauchswerte in Richtung des physikalisch erreichbaren Grenzwerts (Nullverbrauch an Heizenergie), zeigt andererseits aber auch den Erfolg der bereits großen Zahl an durchgeführten Einzelmaßnahmen der energetischen Ertüchtigung.

Der energetisch hohe Standard neu errichteter Gebäude zeigt sich bei einem Vergleich der Energieverbrauchswerte. So liegt beispielsweise der Verbrauch eines durchschnittlichen, nicht modernisierten Ein-/Zweifamilienhauses, erbaut nach der EnEV 2001 (Altersklasse 2002 – 2008), mit einem Verbrauchskennwert von ca. $92 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl}} \cdot \text{a})$ deutlich unter der Hälfte des Verbrauchs eines entsprechenden Altbaus der Altersklasse 1969 – 1978, der nicht modernisiert ca. $214 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wfl}} \cdot \text{a})$ verbraucht. [Bigalke et al. 2012, Walberg et al. 2011].

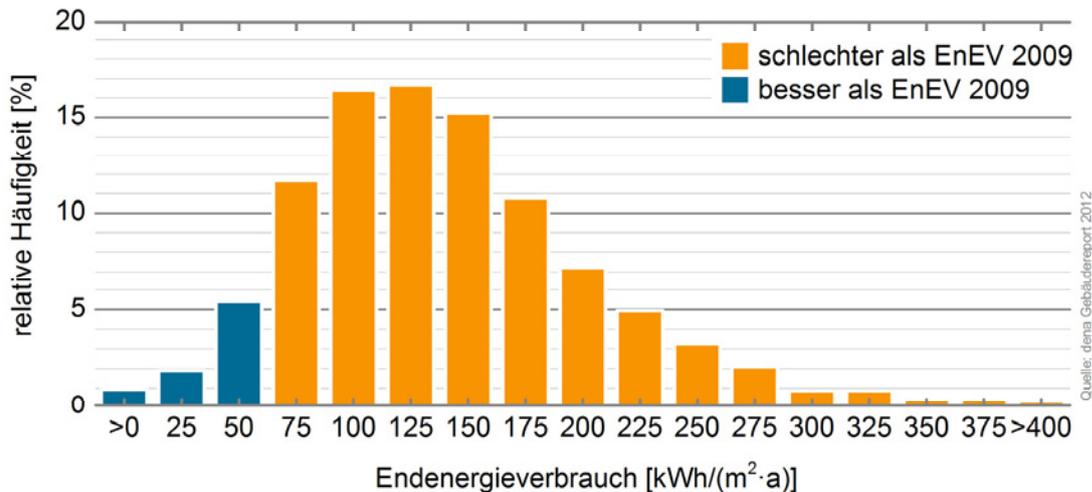
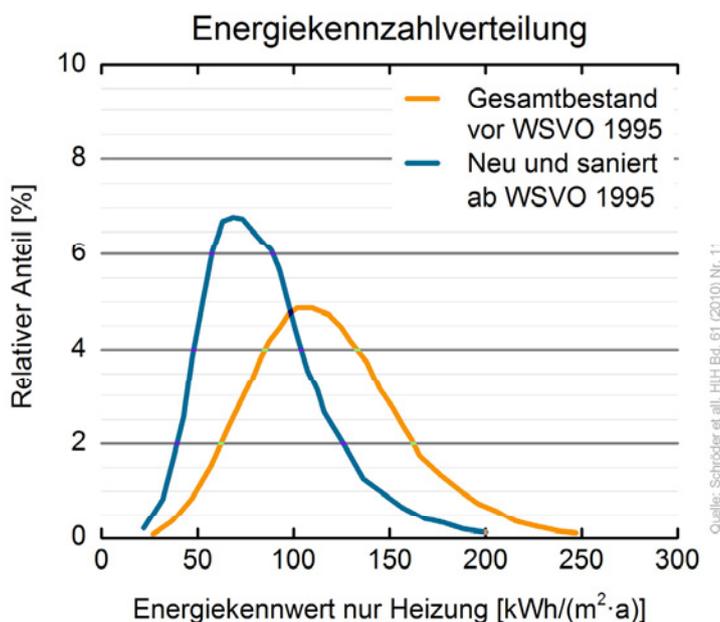


Abbildung 76: Energetischer Zustand der Gebäude in Deutschland: Darstellung des Endenergieverbrauchs nach der Häufigkeit des Vorkommens im Gebäudebestand

[Schröder et al. 2010] hat die durch direkte Messung ermittelte Verteilung des Verbrauchs für Heizung im deutschen Mietwohnungsbestand während einer Winterperiode untersucht. Dabei hatte er eine Korrelation zwischen dem internen technischen Zustand vor und nach der WSchV 1995 herausgearbeitet. In Abbildung 77 ist als weitere Aufschlüsselung die Energiekennzahlverteilung der Heizung des Gebäudebestands und als Teilmenge auch die der sanierten Gebäude aufgetragen. Wie bei der Verteilung des gesamten Endenergieverbrauchs der Gebäude ergibt sich auch hier in beiden Fällen eine leicht rechtsschiefe Verteilung. Die Erklärung folgt den bei der Diskussion der Verteilung des Endenergieverbrauchs angesprochenen Faktoren.

Bei einem Vergleich der beiden Kurven fällt auf, dass der auf einem Mindeststandard ab WSchVO 1995 sanierte Bestand gegenüber dem Gesamtbestand vor der WSchVO 1995 einen niedrigeren Modalwert bei ca. 70 kWh/(m²_{Wfl.}·a) zeigt, aber auch eine deutlich schlankere Verteilung der Energiekennwerte aufweist. Die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen im Bereich der Gebäudehülle und der Anlagentechnik bewirken also auch eine Homogenisierung der energetischen Standards in den Gebäuden. Die rechtsschiefe Verteilung beider Häufigkeitsverteilungen zeigt auch, dass die Mittelwerte des Heizenergieverbrauchs ebenfalls zu einem gewissen Grad durch wenige sehr hohe Bedarfswerte beeinflusst werden.



Quelle: Schröder et al. HfH Bd. 61 (2010) Nr. 11

Abbildung 77: Energiekennzahlverteilung des Gebäudebestands und der sanierten Gebäude

6.3 Energetischer Zustand der Gebäudehülle

Zur Abschätzung des Potentials muss der energetische Zustand der Gebäudetechnik berücksichtigt werden. Allgemein gültige Aussagen über den derzeitigen energetischen Zustand der Gebäudehülle für den deutschen Wohngebäudebestand zu treffen ist schwierig. Die Angaben diesbezüglich schwanken stark. Dabei ist zu beachten, dass Investitionen für eine Sanierung meistens im bewohnten Zustand und damit Schritt für Schritt und bauteilbezogen und nur in seltenen Fällen gesamthaft vorgenommen werden.

Die umfangreichste Studie hierzu hat die ARGE Kiel [Walberg et al. 2011] durchgeführt. Dabei wurden im Vorfeld verschiedene energetische Standards festgelegt, denen die verschiedenen Ausführungen zugeordnet wurden. Die verwendeten energetischen Standards orientieren sich an der Entwicklung von energetischen Anforderungen an Wohngebäude und wurden auf Grund ihrer Eindeutigkeit über die Standards von Wärmeschutzverordnungen definiert. Die folgenden drei energetischen Standards fanden im Rahmen dieser Ermittlung Anwendung:

- Standard vor Wärmeschutzverordnung 1977 (vor WSchV 1977)
- Standard nach Wärmeschutzverordnung 1977/1984 (nach WSchV 1977/1984)
- Standard nach Wärmeschutzverordnung 1995 (nach WSchV 1995)

Hier werden nur die wesentlichen Bauteile der Gebäudehülle (Außenwände, Dach/oberste Geschossdecke, Kellerdecke/Sohle) dargestellt. Daten über den Zustand der Fenster und der Anlagentechnik liegen in der Studie ebenfalls vor. Die Ergebnisse für die jeweiligen Baualtersklassen entsprechend der beschriebenen energetischen Standards werden im Folgenden zur besseren Verständlichkeit grafisch

dargestellt. Für Klassen “von 1994 bis 2001“ und “von 2002 bis 2008“ sind keine Daten vorhanden. Man kann davon ausgehen, dass auf Grund des noch nicht allzu weit zurückliegenden Baujahres der Gebäude ein relativ guter Energiestandard vorliegt.

Tabelle 22 zeigt aufgrund der oben beschriebene Datengrundlage die aufsummierten Gesamtflächen für die Bauteile Dach bzw. oberste Geschosßdecke, Wand, Fenster und Keller bzw. unterer Gebäudeabschluss. Insgesamt stehen auf Basis dieser Daten in den nächsten Jahren rund 2 Mrd. m² Dach und rund 3,2 Mrd. m² Fassadenfläche im Wohngebäudebestand zur Sanierung an.

Tabelle 22: Zusammenstellung der geschätzten Flächen der Gebäudehülle in einem bestimmten energetischen Zustand, für den Gebäudebestand bis GAK 1993 in Deutschland

		Vor WSchV 1977 [Mrd. m ²]	WSchV 77/84 [Mrd. m ²]	Nach WSchV 1995 [Mrd. m ²]	Summe [Mrd. m ²]
EFH	Dach	0,55	0,77	0,25	1,57
	Wand	1,30	0,39	0,16	1,85
	Fenster	0,24	0,10	0,05	0,39
	Keller	0,42	0,13	0,69	1,24
MFH	Dach	0,36	0,38	0,12	0,86
	Wand	1,18	0,34	0,12	1,64
	Fenster	0,25	0,09	0,05	0,39
	Keller	0,11	0,70	0,03	0,84
Summe	Dach	0,91	1,15	0,36	2,43
	Wand	2,49	0,72	0,28	3,49
	Fenster	0,49	0,19	0,10	0,78
	Keller	0,53	0,83	0,72	2,08

Dach und oberste Geschosßdecke

Für die Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses gibt es prinzipiell zwei Varianten: die Dämmung der oberen Geschosßdecke oder die Dämmung des Daches selbst. Die Dämmung der oberen Geschosßdecke ist deutlich günstiger als die Dämmung des Daches. Letztere erlaubt aber einen eventuell auch erst später geplanten Ausbau des Dachgeschosses. Ein Überblick über die Beheizung von Dachgeschossen und Dachtypen wird in Abbildung 78 wiedergegeben. Flachdächer (bzw. sehr flach geneigte Dächer) spielen gegenüber geneigten Dächern (z. B. Sattel- oder Pultdächern) eine untergeordnete Rolle. Das Verhältnis unbeheizte zu beheizte Dachgeschosse im gesamten Wohngebäudebestand beträgt 2:3, im Altbau

gibt es ein leichtes Übergewicht bei den unbeheizten Dachgeschossen. Dies gilt auch im Fall von beheizten Dachgeschossen, wenn also das Dach selbst (ohne zusätzliche Geschossdecke) die thermische Hülle des Gebäudes bildet.

Dämmung von Obergeschossdecke bzw. Dach nach Dachgeschosstypen

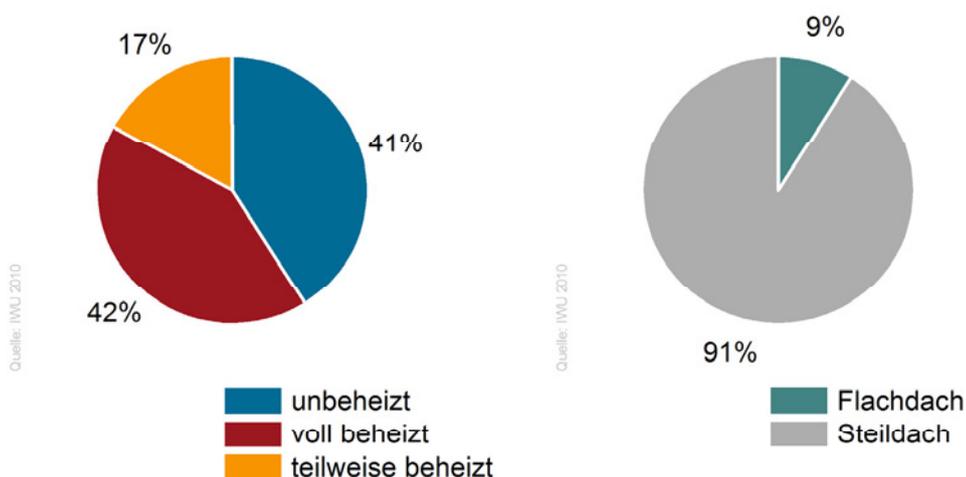


Abbildung 78: Energetisches Niveau der Dächer deutscher Gebäude - Grundlage für die Berechnung des Energieeinsparpotentials für Sanierungen im Dach

Die Dämmung der obere Geschossdecke oder des Daches der älteren deutschen Wohngebäude ist mit über 60 % bereits weit fortgeschritten. Abbildung 79 zeigt den energetischen Zustand der Dächer deutscher Bestandsgebäude, gegliedert nach Baualtersklassen und unterschieden in drei definierte Standards bezogen auf die Novellierungen der Wärmeschutzverordnung zwischen 1977 und 1995. Es zeigt sich dabei, dass insbesondere in den Baualtersklassen bis 1978 noch ein großer Teil des Bestands Dächer mit einem energetischen Standard vor der Wärmeschutzverordnung 1977 aufweist.

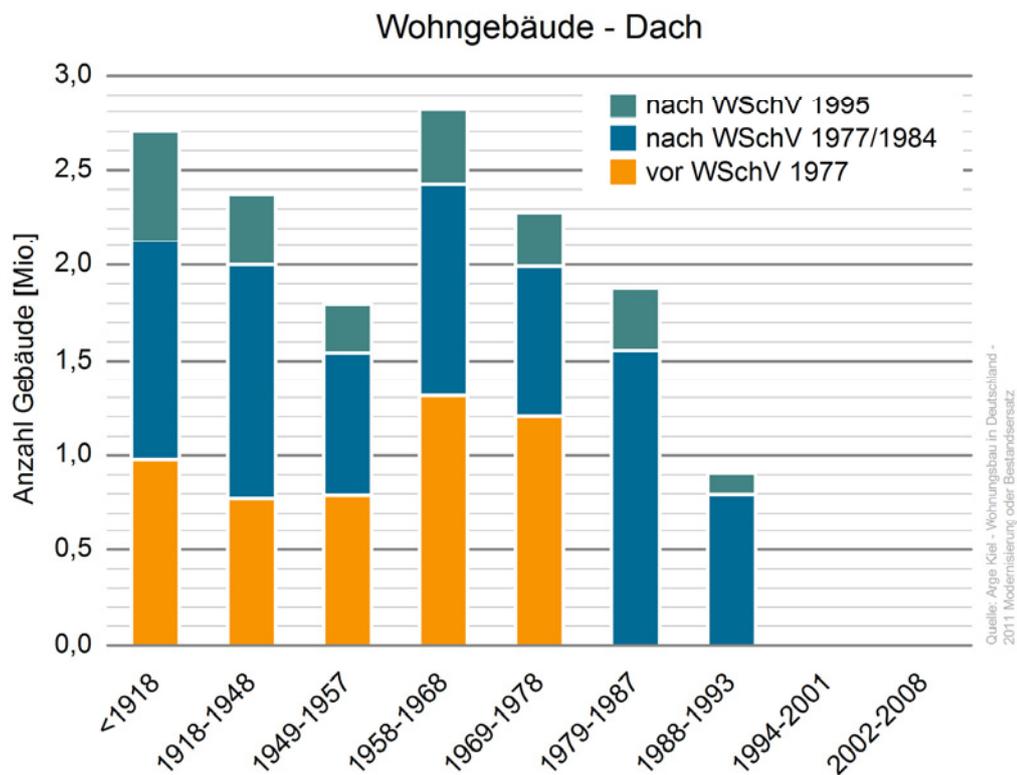


Abbildung 79: Energetisches Niveau der Dächer deutscher Gebäude

Mit Ausnahme der jüngeren Altbauten mit Baujahr 1969 -1978 ist diese hohe Quote überwiegend durch die nachträgliche Dämmung erreicht worden. Erst bei den jüngeren Altbauten überwiegt dann die Dämmung bei Errichtung. Abbildung 80 zeigt den energetischen Zustand der Dächer deutscher Bestandsgebäude, gegliedert nach Baualtersklassen und unterschieden in die Zustände „ungedämmt“, „Dämmung bei Errichtung“ und „Dämmung nachträglich“. Es zeigt sich, dass in den Baualtersklassen bis 1978 bereits ein großer Teil der obersten Geschossdecken nachträglich gedämmt wurde, eine Maßnahme die in der EnEV 2009 verpflichtend vorgeschrieben wurde, jedoch ebenfalls noch ein großes Potential an ungedämmten obersten Geschossdecken besteht. Der Anteil der bei Errichtung gedämmter oberster Geschossdecken ist in den Baualtersklassen vor 1958 gering und steigt mit jünger werdenden Gebäudealtersklassen sukzessive an.

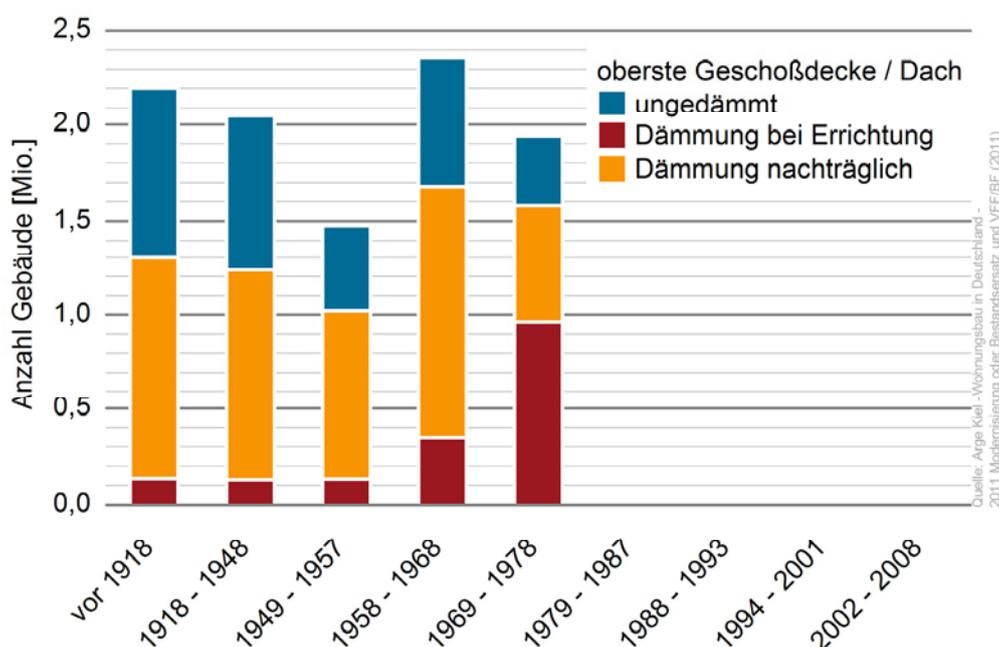


Abbildung 80: Energetisches Niveau der obersten Geschosdecke (bzw. des Daches) der Gebäude in Deutschland

Aktuelle Entwicklung

Im Zeitraum zwischen 2010 – 2012 wurden in etwa 11,3 % der Fälle in denen Renovierungsmaßnahmen an Wohngebäuden durchgeführt wurden (einschließlich nicht energetisch orientierter Maßnahmen) auch Maßnahmen zur Verbesserung der Dachdämmung vorgenommen. Gegenüber dem Zeitraum von 2008 – 2010 stellt dies einen Einbruch dar – hier waren noch 21,5 % der abgefragten Sanierungsprojekte auch mit Maßnahmen zur Verbesserung der Dachdämmung verbunden, was auch auf die in diesem Zeitraum eingeführte EnEV 09 zurückzuführen sein könnte, in der eine Dämmung der obersten Geschosdecke für Bestandsbauten verpflichtend vorgeschrieben ist. Die meisten in jüngerer Zeit durchgeführten Dachdämmungen wurden an Gebäuden der Altersklasse 1949 – 1976 vorgenommen. Die häufigste Form der Dachdämmung bei Sanierungen war die Zwischen-/Untersparrendämmung (38,9 %), gefolgt von Dämmmaßnahmen der obersten Geschosdecke (33,3 %) und Aufsparrendämmungen (21,3 %). Flachdachdämmungen wurden als Sanierungsmaßnahmen eher selten umgesetzt (2,8 %). [B+L 2013]

[Simons 2012] nennt als Ursachen für die vergleichsweise hohe Quote, insbesondere der nachträglich eingebrachten Dämmung, zum ersten den Wunsch der Eigentümer nach Komforterhöhung. Der Wunsch nach größeren Wohnflächen wurde vielfach durch den (nachträglichen) Ausbau der Dachböden erreicht. In diesem Fall wurde in der Regel auch das Dach gedämmt, allein schon, da ohne Dachdämmung die Räume nur eingeschränkt nutzbar wären. Die Ausnutzung der natürlichen Sanierungszyklen dürfte hingegen nur wenig bzw. nur indirekt zu diesem guten Ergebnis

beitragen haben. Zum einen beträgt die Nutzungsdauer von Dächern mit Dachziegeleindeckung mindestens 50 Jahre, so dass nur vergleichsweise selten eine Erneuerung notwendig wird. Zum zweiten ist bei der Dämmung der oberen Geschossdecke kein Anlass denkbar, da eine obere Geschossdecke praktisch niemals erneuerungsbedürftig ist.

Außenwand

Neben dem Dach hat die Außenwand den größten Anteil an den Transmissionswärmeverlusten eines Gebäudes. Dementsprechend wichtig ist eine adäquate wärmeschutztechnische Ausstattung der Außenwände bei bisher unsanierten Bestandsgebäuden. Trotzdem ist die Sanierungsquote gering.

In Abbildung 81 sind die Anteile der verschiedenen Wandtypen im deutschen Wohngebäudebestand grafisch dargestellt [Diefenbach et al. 2010]. Etwa 90 % der Außenwände sind Mauerwerkswände, unter diesen sind rund zwei Drittel einschalige und ein Drittel zweischalige Wände. Dabei ist zu beachten dass große regionale Unterschiede vorhanden sind. Im Süden dominiert mit etwa 85 % das einschalige, im Norden mit mehr als 60 % das zweischalige Mauerwerk. Diese Verhältnisse sind bei Betrachtung der Baualtersklassen und der Gebäudetypen (EZFH gegenüber MFH) vergleichbar. Das Fachwerk ist erwartungsgemäß nur im Altbau vorzufinden. Holz-Fertigbauteile und sonstiger Holzbau haben in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Beim Neubau liegt deren Anteil derzeit bei in etwa 13 %. Betonfertigteile, Großtafelbau- und Plattenbauweise kommen nur im Mehrfamilienhausbestand bzw. in den neuen Bundesländern vor.

Wandtypen im Wohngebäudebestand

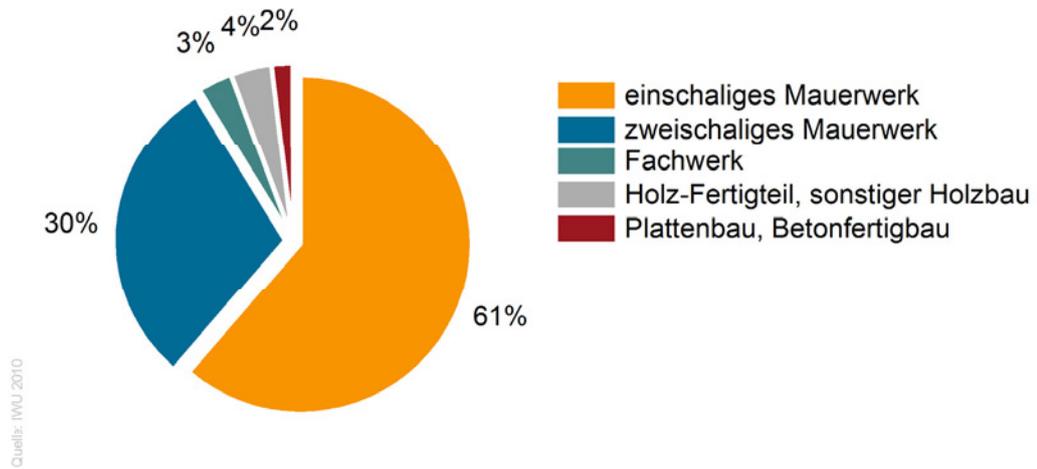


Abbildung 81: Wandtypen im deutschen Wohngebäudebestand

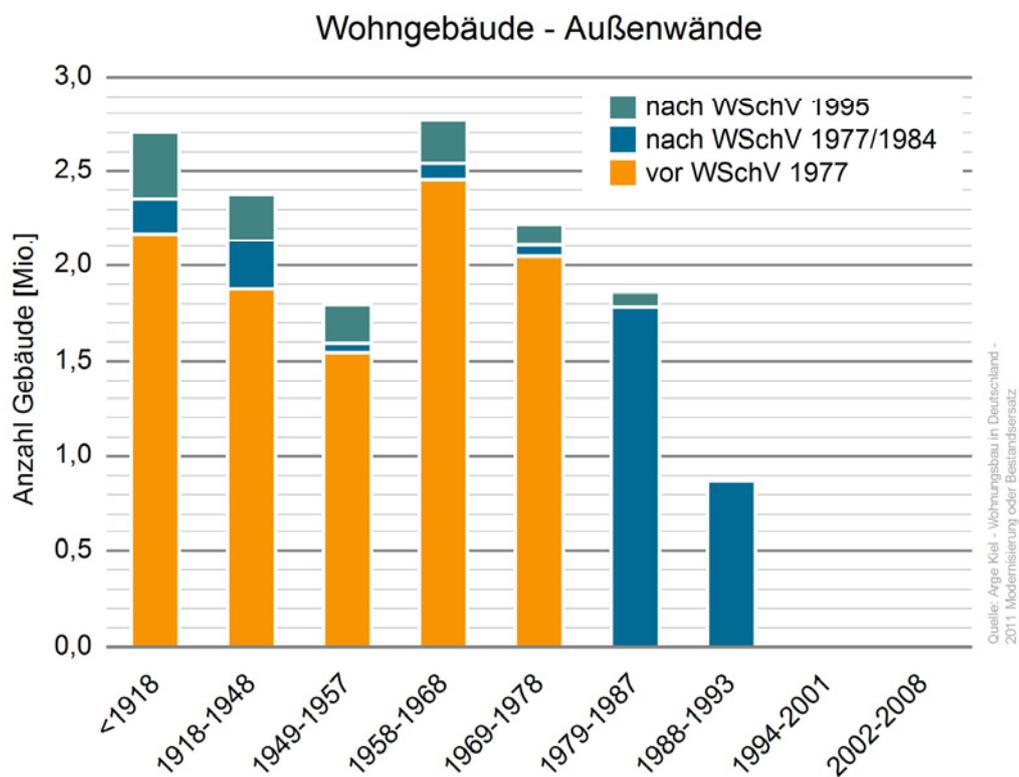


Abbildung 82: Energetisches Niveau der Außenwände der Gebäude in Deutschland

In Abbildung 82 ist das energetische Niveau der Außenwände der Gebäude in Deutschland nach Gebäudealtersklassen aufgezeichnet. Der überwiegende Teil der Gebäudealtersklassen vor 1979 zeigt einen energetischen Standard auf einem Niveau vor der Wärmeschutzverordnung 1977. Sanierungen die einen besseren energetischen Standard aufweisen sind in diesen Altersklassen selten. Die Gebäudealtersklassen ab 1979 haben zwar größtenteils einen Standard welcher der Wärmeschutzverordnung nach 1977 oder 1984 entspricht, Modernisierungen die eine bessere energetische Effizienz erreichen sind in diesen Gebäudealtersklassen aber selten.

Da in Abbildung 82 das energetische Niveau nach unten hin durch den Standard „vor Wärmeschutzverordnung 1977“ zusammengefasst wird, zeigt Abbildung 83 noch einmal die Gebäudealtersklassen bis 1978 in der Unterscheidung nach den Kategorien „Außenwand gedämmt“ oder „Außenwand ungedämmt“. Es wird deutlich, dass in allen betrachteten Gebäudealtersklassen weit mehr als 50 % der Außenwandbauteile ungedämmt sind, d. h. ab dem Erstellungsjahr keine energetischen, sondern ausschließlich optische oder mängelbeseitigende Maßnahmen (Anstrich, Putz) vorgenommen wurden, was das Potential von energetischen Sanierungsmaßnahmen in diesen Gebäudealtersklassen unterstreicht.

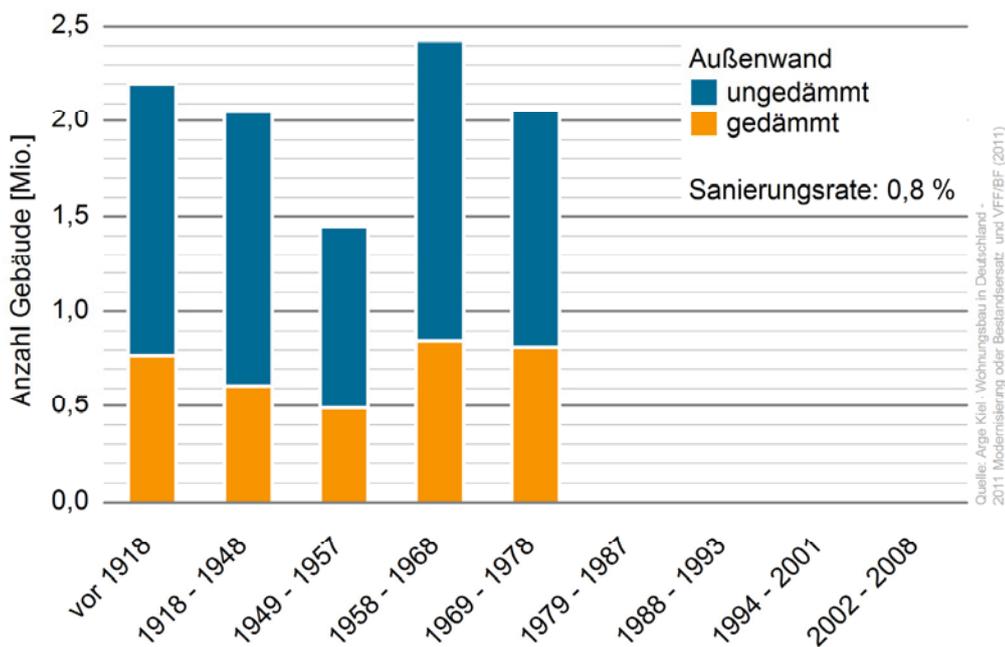


Abbildung 83: Gedämmte und ungedämmte Außenwände bei Gebäuden in Deutschland

In Tabelle 23 wird die Art der Wanddämmung analysiert. Dargestellt ist die Dämmquote für alle Gebäude. Eine Dämmung erfolgte entweder bei Errichtung oder nachträglich. Unterschieden wird zwischen der Außendämmung, der Innendämmung, der Dämmung im Zwischenraum zwischen zwei Mauerwerksschalen und der Dämmung im Bauteil selbst. Insgesamt dominiert die Außendämmung im Gesamtbestand (mit

einem Anteil von etwa 55 %). Vor allem beim einschaligen Mauerwerk ist dies mit rund 85 % die dominierende Variante zur Verbesserung des Wärmeschutzes. Auch bei der Modernisierung des zweischaligen Mauerwerks im Altbau spielt die Außendämmung eine vornehmliche Rolle, sie liegt hier noch vor der Kerndämmung im Zwischenraum. Die bevorzugte Dämmvariante bei der Erneuerung von Fachwerk-wänden ist die Innendämmung. Gemittelt über alle Wandtypen hat sie einen Anteil von etwa 12 % bei der Altbau-Modernisierung.

Nachdem der Holzbau erst Mitte der 80er Jahre populär geworden ist sind die meis-ten Wände bereits im Bauteil selbst – also schon bei der Errichtung gedämmt wor-den. Auch im Bereich Betonfertigteile/Großtafelbauweise/Plattenbau liegen die Bau-jahre ebenfalls zu meist nach 1978. Hier wird bei einer nachträglichen Modernisie-rung zu 85 % eine Außendämmung aufgebracht.

Tabelle 23: Art der Wärmedämmung im Überblick und nach Wandtypen

Wandtyp	Anteil [%]	Dämmquote [%]	Art der Dämmung	Anteil [%]
Einschaliges Mauerwerk	61	24	Außendämmung	85
			Innendämmung	15
Zweischaliges Mauerwerk	30	51	Außendämmung	30
			Innendämmung	6
			Dämmung im Zwischenraum	64
Fachwerk	3	32	Außendämmung	37
			Innendämmung	53
			Dämmung im Bauteil selbst	10
Holz-Fertigteile, sonstiger Holzbau	4	84	Außendämmung	22
			Innendämmung	9
			Dämmung im Bauteil selbst	69
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau	2	65	Außendämmung	85
			Innendämmung	4
			Dämmung im Bauteil selbst	11
Gesamtbestand		36	Außendämmung	55
			Innendämmung	12
			Dämmung im Zwischenraum	28
			Dämmung im Bauteil selbst	5

Aktuelle Entwicklung

In [B+L 2013] werden für die Jahre 2008 – 2012 durchschnittliche Sanierungsquoten von 0,87 – 0,88 % für die Fassadendämmung angegeben. Würde man diese Quote als konstant annehmen, benötigt der Austausch der gesamten Fassadenfläche in

Deutschland 114 Jahre. Nach Angaben des Fachverbandes WDVS (Abbildung 84) werden derzeit im Durchschnitt ca. 40 Millionen Quadratmeter Außenwand jährlich in Deutschland mit einem WDVS gedämmt. Das bedeutet, dass bei einem Anteil von 55 % Außendämmung insgesamt jährlich etwa 73 Millionen m² Fassadenfläche gedämmt werden.

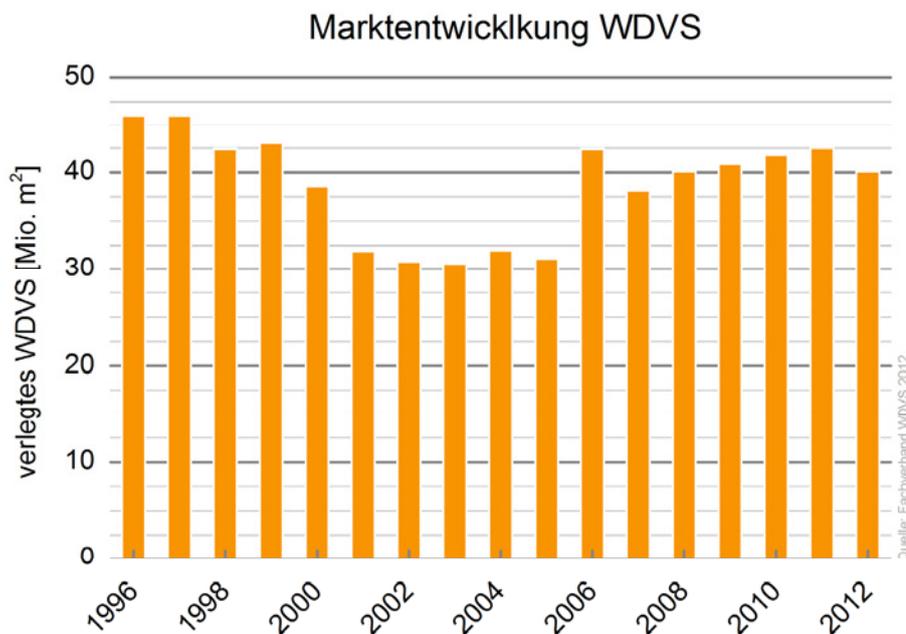


Abbildung 84: Entwicklung der verlegten Fläche WDVS seit 1996. Im Durchschnitt werden derzeit ca. 40 Millionen Quadratmeter Außenwand jährlich in Deutschland gedämmt.

Die Zunahme der mittleren Dämmstoffdicken von WDVS bei Sanierungen zeigt Abbildung 85. Nach einem deutlichen Anstieg der Dämmstoffdicke ab den Jahren 2004/2005 zeigt sich ein Wendepunkt der Steigung in etwa ab den Jahren 2009/2010. Obwohl Dämmstoffdicken von 14 – 20 – (30) cm im Neubaubereich durchaus üblich und sinnvoll sind, werden vom Verbraucher aktuell im Mittel nur etwas mehr als 12 cm Dämmstoffdicke eingesetzt, was wohl vor allem auf Bedenken bezüglich optischer Nachteile in der Fassade (Verschattung von Fenstern, etc.) zurückzuführen ist und weniger im Preis begründet liegt, da der Mehrpreis aufgrund höherer Dämmschichtdicken gegenüber den Gesamtinvestitionen verhältnismäßig gering ausfällt. Weitere Gründe für stagnierende Dickenzuwächse bei WDVS können in der vermehrten Anwendung von Produkten niedrigerer Wärmeleitfähigkeit (z. B. graues EPS) liegen und den insgesamt aufwändigeren Detailausbildungen im Bereich der Anschlusskonstruktionen an Fensterleibungen bei größeren Dämmschichtstärken geschuldet sein, deren größerer Aufwand bei Planung und Umsetzung vom Verbraucher vermieden werden.

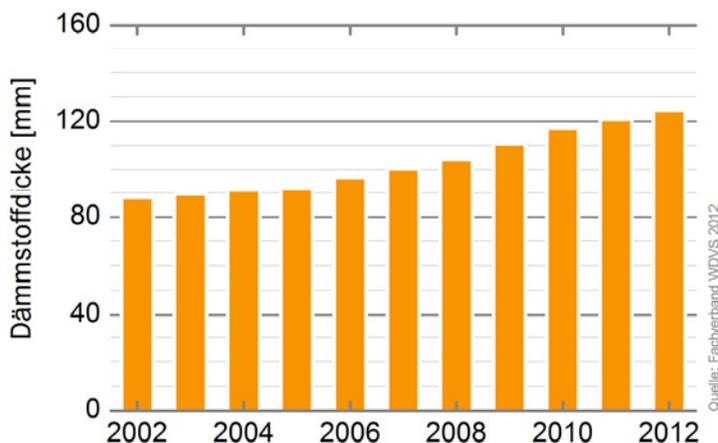


Abbildung 85: Zunahme der mittleren Dämmstoffdicke von WDVS bei Sanierungen in Deutschland seit 2002

Fußboden bzw. Kellerdecke

Durch den Temperaturunterschied zwischen Erdgeschoss und dem meist ungeheizten Keller geht Wärmeenergie verloren. Die Wärmedämmung der Kellerdecke stellt eine preiswerte und meist einfach durchzuführende Maßnahme zur Verbesserung der Energieeffizienz von Wohngebäuden dar.

Die Datengrundlage zum energetischen Zustand der Kellerdecke ist insgesamt relativ schlecht. [Diefenbach et al. 2010] enthält nur Angaben über Keller im Altbau. Im Neubau kann man aber davon ausgehen, dass die meisten Gebäude unterkellert sind. Im Altbau sind 87 % der Gebäude unterkellert, wobei die unbeheizten Keller mit einem Anteil von mehr als 60 % den mit Abstand häufigsten Fall im Altbau darstellen (Abbildung 86).

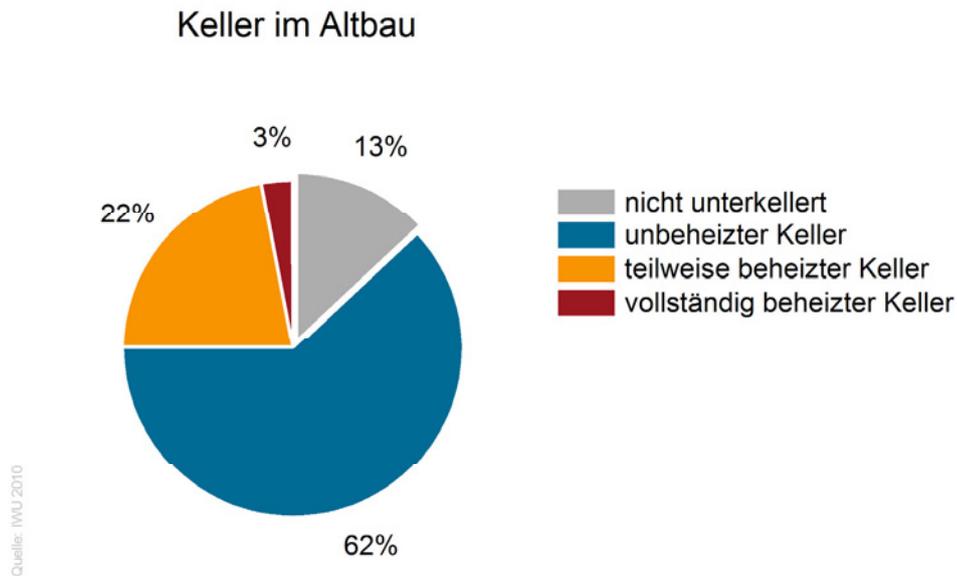


Abbildung 86: Keller im Altbau: Anteile der verschiedenen Fälle

Die Dämmung der Gebäude nach unten, zum Fußboden oder der Kellerdecke, ist erst bei knapp einem Viertel (24 %) der älteren Wohngebäudehäuser durchgeführt worden. Wie bei der Dämmung der obersten Geschoßdecke bzw. des Daches ist die Dämmquote nur in den jüngeren Altbauten (Baujahr 1969-1878) erhöht, was wiederum an der höheren Dämmquote bei Errichtung liegt.

Abbildung 87 zeigt den energetischen Zustand der Kellerdecke unterteilt in drei wesentliche Standards. Der überwiegende Teil der Gebäude in den Altersklassen bis 1978 zeigt ein niedriges Niveau der energetischen Qualität auf einem Standard vor der Wärmeschutzverordnung 1977. Aktuelle Ausführungen auf einem Niveau nach der Wärmeschutzverordnung 1995 sind selten oder nicht vorhanden. Das Potential zur energetischen Effizienzoptimierung im Bestand durch die Verbesserung der Kellerdeckendämmung ist relevant.

Aktuelle Entwicklung

Gegenüber anderen energetischen Sanierungsmaßnahmen werden Verbesserungen der Kellerdämmung eher selten durchgeführt – konkret in 8,5 % aller Fälle in denen Renovierungsmaßnahmen an WG durchgeführt wurden (einschließlich nicht energetisch orientierter Maßnahmen). Die meisten der in den Jahren 2010 – 2012 im Bereich Kellerdämmung umgesetzten Maßnahmen wurden in der Gebäudealtersklasse 1949-1976 realisiert, wobei oft auch jüngere Gebäude saniert werden.

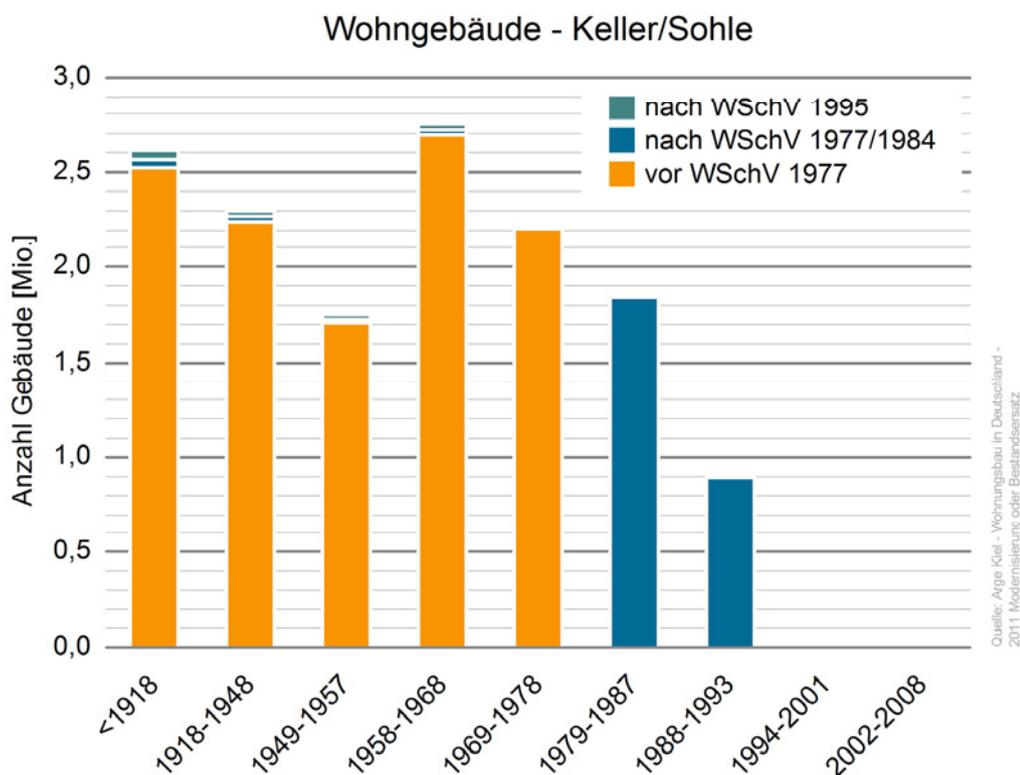


Abbildung 87: Energetischer Zustand der Kellerdecke der Gebäude in Deutschland

6.4 Bauteilbezogene Abschätzung des Einsparpotentials

Nachdem für die Gebäudealtersklassen und innerhalb dieser Altersklassen hinsichtlich des erreichten Modernisierungszustandes der Bauteile (Außenwände, Dach, Fenster, Kellerdecke) Informationen über den energetischen Standard vorliegen können den Bauteilen nun typische U-Werte zugeordnet werden. Dies repräsentiert den energetischen IST-Zustand der Gebäude.

Aus der detaillierten Aufschlüsselung des Gebäudebestands auf Basis der Daten aus [Loga et al. 2011] und [Walberg et al. 2011] werden im folgenden Kapitel Abschätzungen zum Energieeinsparpotential durch die energetische Sanierung vorgenommen. Dabei werden unterschiedliche Sanierungsszenarien verglichen und die Ergebnisse nach Einzelmaßnahmen an Baualtersklassen oder an bestimmten Bauteilen aufgeschlüsselt.

Da der bestmögliche Sanierungserfolg aber nicht nur von den umgesetzten Einzelmaßnahmen abhängt, sondern auch von der richtigen Reihenfolge ihrer Realisierung, werden zunächst allgemeine Überlegungen zu einer sinnvollen zeitlichen Reihung des möglichen Maßnahmenkatalogs angestellt.

„Das ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ (Aristoteles). Dieses bekannte Zitat beschreibt gut die Situation bei einem sinnvoll getakteten Sanierungskonzept.

Eine Expertenbefragung zu den häufigsten Folgen einer nicht eingehaltenen Sanierungsreihenfolge listet folgende Begriffskategorien (nach unten hin absteigende Häufigkeit):

- Heizungsüberdimensionierung
- Mehrkosten
- Wärmebrücken
- Anschlussprobleme
- Schimmel
- Lüftungsprobleme

(Eigene Darstellung in Anlehnung an [Amecke et al. 2012])

Die Studie von [Amecke et al. 2012] enthält eine Befragung zu Vor- und Nachteilen der Förderung von „Einzelmaßnahmen“ gegenüber „umfassenden Sanierungen“. Die befragten Experten bewerten dabei die „umfassenden Sanierungsmaßnahmen“ als positiver, hinsichtlich der erzielbaren Energieeinsparung, einer effizienten Abstimmung der Maßnahmen untereinander und dem Komfort nach Abschluss der Sanierung.

Die Vorteile von Einzelmaßnahmen liegen dem gegenüber vor allem in der leichteren Finanzierbarkeit und einem geringeren Aufwand während der Sanierung. Auch können Einzelmaßnahmen leichter im Zuge regulärer Instandhaltungszyklen umgesetzt werden. Bezogen auf die Gesamtkosten aller Maßnahmen, erhöht eine schrittweise Sanierung die Gesamtsanierungskosten aber trotzdem um immerhin ca. 15 %. [Amecke et al. 2012]

Während die energetischen Beiträge einzelner Maßnahmen wie der Dachdämmung, der Dämmung der Außenwand, der Kellerdeckendämmung, dem Einbau neuer Fenster oder einer verbesserten Heizungsanlage relativ gut bestimmt werden können – und diese Beiträge auch für sich genommen in jedem Fall gültig bleiben – so ist unter Beachtung der Rentabilität und im Zuge einer möglichst guten Ausnutzung der Synergieeffekte bei der Koppelung bestimmter Maßnahmen ein differenziertes Vorgehen nötig. Besonders wenn sich durch erst später angesetzte Maßnahmen Verbräuche am Gesamtsystem ändern, ist Vorsicht bei der Dimensionierung der Anlagentechnik geboten, wenn diese beispielsweise aufgrund der zeitlichen Reihung ohnehin anstehender Sanierungszyklen zuerst verändert wird. Der Austausch einer Heizungsanlage gegen eine moderne, verbrauchsoptimierte Anlage mit Brennwertkessel, in einem ansonsten unsanierten Haus, ist an sich eine unstrittig vorteilhafte Maßnahme die zu entsprechenden Einsparungen im Energieverbrauch führen wird. Steht nun jedoch einige Jahre später der nächste Sanierungszyklus, beispielsweise für die Fassadendämmung, an, so sinkt durch diese nachgeschaltete Maßnahme plötzlich der Energiebedarf des Hauses. Ist die vorher ausgetauschte Heizungsanlage nun noch auf den alten (höheren) Bedarf ausgelegt, so wird das System nach

der energetischen Ertüchtigung der Fassade weitgehend in Unterlast betrieben, was Effizienzeinbußen mit sich bringt. In diesem Fall wäre also die Koppelung der Maßnahme „Heizungsaustausch“ mit der Maßnahme „Fassadendämmung“ vorteilhaft, insofern die Sanierungszyklen für diese Einzelereignisse nicht zu weit auseinanderliegen. Eine Bündelung bestimmter Maßnahmen kann also positivere Effekte erzielen, als die zeitlich nicht abgestimmte Ausführung der Einzelmaßnahmen.

Ähnliche Überlegungen gelten auch für Maßnahmen, welche die gleichen Hilfskonstruktionen (z. B. Gerüstbau) erfordern. Durch eine Koppelung der Maßnahmen Dachdämmung und Fassadendämmung verteilen sich beispielsweise die Kosten für die Einrüstung des Gebäudes und eventuelle Eingriffe in die an das Haus angrenzenden Flächen (Schäden an Gartenanlagen, Beeten, etc.) fallen nur einmal an.

Vorgehensweise

Für die in diesem Kapitel entwickelte bauteilbezogene Abschätzung des Energieeinsparpotentials wird die Gebäudetypologie des Institut Wohnen und Umwelt (IWU) verwendet, die erstmals 1990 publiziert, seitdem kontinuierlich weiterentwickelt und inzwischen auch auf andere europäische Länder ausgeweitet wurde [Loga et al. 2011]. Die verwendete Gebäudetypologie enthält, unterteilt in die Gebäudetypen Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser (RH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) sowie Große Mehrfamilienhäuser (GMFH) Daten zur Wohnfläche, der Anzahl der Stockwerke, Anzahl der Gebäude in den Gebäudealtersklassen (GAK), Anzahl der Wohneinheiten (WE) je Wohngebäude (WG) sowie die Flächen der wichtigsten Bauteile (Dach, oberste Geschossdecke, Fassade, Fenster, unterer Gebäudeabschluss) und Angaben zum energetischen Zustand (U-Werte) dieser Bauteile. Für die vorgenommene Auswertung werden die Gebäudetypen EFH (zusammengefasst mit den RH) und MFH in den GAK bis 1993 inklusive der Angaben zur Anzahl der WG in diesen GAK, herangezogen. Die Flächen der Bauteile werden zusammengefasst zu den Bauteilen Dach/oberste Geschossdecke, Außenwand, Fenster und dem unteren Gebäudeabschluss.

Für den untersuchten Bestandsausschnitt (bis GAK 1993) liegen in der Veröffentlichung von [Walberg et al. 2011] detaillierte Informationen zum energetischen Zustand der Bauteile vor. Je nach dem erreichten Modernisierungszustand werden die Bauteile in drei Kategorien unterteilt. Unterschieden werden dabei energetische Standards nach der Wärmeschutzverordnung 1995 (nach WSchV 1995), nach der Wärmeschutzverordnung 1977/1984 (WSchV 1977/1984) bzw. einem schlechteren energetischen Standard (vor WSchV 1977) [Walberg et al. 2011].

Den Ist-Zuständen der Bauteile nach [Walberg et al. 2011] können nun typische U-Werte (entsprechend den Mindeststandards der betrachteten Novellierungen der einschlägigen Verordnungen und typische Werte für unsanierte Bestandsbauteile) zugeordnet werden.

Tabelle 24 zeigt die angesetzten U-Werte der betrachteten Bauteile entsprechend den energetischen Zuständen. Die Kategorien 1 – 3 dienen der Definition der Ausgangszustände. Die U-Werte der Kategorie 1, vor WSchV 77 wurden aus den Angaben zu den Bauteilen der Beispielgebäude aus der IWU Gebäudetypologie flächenanteilig gemittelt. Die Kategorien 4 – 6 beschreiben ausgehend von den Anforderungen der aktuellen EnEV 09, mögliche Sanierungsschritte auf den Standard eines Niedrigenergiehauses (NEH) und auf U-Werte die etwas besser als der aktuelle Passivhausstandard (Potential) sind.

Tabelle 24: Typische Mindest-U-Werte [$W/(m^2 \cdot K)$] der Bauteile entsprechend dem energetischen Zustand

Kategorie	1	2	3	4	5	6
Bauteil	vor WSchV 77	WSchV 77 bis 84	WSchV 95	EnEV09	NEH	Potential
Dach/ob.GeDe	0,90	0,35	0,30	0,24	0,18	0,10
Wand	1,40	0,60	0,40	0,24	0,18	0,10
Fenster	3,50	2,00	1,80	1,30	0,95	0,65
U.Geb.abschl.	1,30	0,55	0,50	0,30	0,20	0,20

Zur Berechnung des Energieverbrauchs der verschiedenen Sanierungsszenarien werden jeweils für die aus der Gebäudetypologie ermittelten Bauteilflächen, der Transmissionswärmeverlust H_T mit Hilfe des Heizperiodenverfahrens berechnet und die Ergebnisse aufsummiert. Die Differenz zwischen dem sanierten und unsanierten Szenario kann als prozentuale Einsparung (mit unterschiedlichen Bezugsgrößen) ausgedrückt werden.

Abschätzung der möglichen Verminderung der Transmissionswärmeverluste

Im Folgenden werden die durch eine energetische Optimierung der Gebäudehülle erzielbaren Einsparungen dargestellt und diskutiert. Betrachtet werden jeweils Maßnahmen am Wohngebäudebestand bis einschließlich der GAK 1993. Dabei werden zwei unterschiedliche Sanierungsszenarien aufgestellt und miteinander verglichen.

Szenario 1: Sanierung der Bauteile mit einem Zustand „vor WSchV 77“ und „WSchV 77/84“ in den GAK bis 1993

Szenario 2: Sanierung der Bauteile mit einem Zustand „vor WSchV 77“ in den GAK bis 1993

Einleitend zeigt Tabelle 25 prozentual das energetische Verbesserungspotential der einzelnen Bauteile bei einer Sanierung aller Wohngebäude in den GAK bis 1993 bei einer Sanierung entsprechend dem Sanierungsszenario 1 und 2. Die dargestellten

Prozentzahlen drücken das Verhältnis zwischen der Differenz des Energieverlustes über ein bestimmtes Bauteil vor und nach der Sanierung dieser Bauteile auf ein bestimmtes energetisches Niveau, bezogen auf den Energieverlust über diese Bauteile vor der Sanierung aus. Bei einer Sanierung entsprechend Szenario 2 (rechter Teil der Tabelle) sind die erzielbaren Einsparungen insgesamt geringer, weil hier nur die Bauteile mit einem Zustand vor der WSchV 77 saniert werden, der Bezug – also die Verluste über die Fläche der bestimmten Bauteile vor der Sanierung – insgesamt aber gleich bleibt.

Tabelle 25: Anteil der Energieeinsparung bestimmter Bauteile in den GAK bis 1993 bei einer Sanierung entsprechend Szenario 1 und Szenario 2 bezogen auf den Transmissionswärmeverlust dieser Bauteile im Ist-Zustand

Gebäudetyp	Bauteil	%Einsparung der Bauteile (in den GAK bis 1993) bezogen auf den Energiebedarf dieser Bauteile vor einer Sanierung (Ist-Zustand) entsprechend ...					
		Szenario 1 auf			Szenario 2 auf		
		...EnEV 09	...NEH	...Potential	...EnEV 09	...NEH	...Potential
EFH	<i>Dach/ob. GeDe</i>	53,5	62,9	75,5	43,4	47,3	52,6
	<i>Wand</i>	77,9	82,7	89,1	71,3	75,0	79,9
	<i>Fenster</i>	41,8	54,6	65,7	23,6	27,3	30,5
	<i>U.Geb.abschl.</i>	31,5	38,8	38,8	17,4	19,1	19,1
MFH	<i>Dach/ob. GeDe</i>	56,9	65,9	77,9	48,5	52,9	58,7
	<i>Wand</i>	78,4	83,2	89,6	72,1	75,8	80,8
	<i>Fenster</i>	41,4	54,4	65,6	22,4	25,9	29,0
	<i>U.Geb.abschl.</i>	74,0	82,2	82,2	71,1	78,2	78,2
Gesamt (Mittel)	<i>Dach/ob. GeDe</i>	54,7	64,0	76,4	45,3	49,4	54,9
	<i>Wand</i>	78,1	82,9	89,3	71,7	75,4	80,3
	<i>Fenster</i>	41,6	54,5	65,6	23,0	26,6	29,8
	<i>U.Geb.abschl.</i>	55,7	63,6	63,6	48,1	52,9	52,9

Es wird deutlich, dass im Prinzip alle Bauteile relevante Verbesserungspotentiale beinhalten. Tendenziell die höchsten Einsparungen bewirken aber Maßnahmen an der Wand und am Dach. Auffällig ist außerdem der deutliche Unterschied zwischen den Einsparpotentialen des unteren Gebäudeabschlusses im Vergleich zwischen EFH und MFH. Hier können im Bereich der MFH noch sehr hohe Einsparpotentiale realisiert werden, die vergleichbar oder sogar noch über den Werten bei Dach und Wand liegen, während im Bereich der EFH im unteren Gebäudeabschluss die niedrigsten Werte zu finden sind. Dies ist in erster Linie über die Bauteilflächen und die Verteilung der energetischen Ausgangszustände erklärbar. So entfallen bei den EFH in den GAK bis 1993, ca. 55 % der Kellerdeckenflächen auf einen Zustand

„nach WSchV 95“, während nur ca. 3 % der Kellerdeckenflächen der MFH diesen guten energetischen Ausgangszustand aufweisen. Im Gegensatz dazu sind bei den MFH ca. 84 % der Bauteilflächen des unteren Gebäudeabschlusses in einem Zustand „vor WSchV 77“, während nur ca. 10 % der Kellerdeckenflächen bei den EFH noch diesen schlechten energetischen Ausgangszustand aufweisen. Da bei den Sanierungsszenarien 1 und 2 jeweils die Bauteile mit einem Zustand ab der WSchV 95 unberücksichtigt bleiben, ist das bauteilbezogene Einsparpotential des unteren Gebäudeabschlusses bei den MFH gegenüber den EFH noch sehr hoch.

Tabelle 26: Anteil der Energieeinsparung bestimmter Bauteile in den GAK bis 1993 bei einer Sanierung entsprechend Szenario 1 und Szenario 2 bezogen auf den Gesamtenergiebedarf (Ist-Zustand) aller WG in den GAK bis 1993

Gebäudetyp	Bauteil	%Einsparung der Bauteile bezogen auf den Gesamtenergiebedarf aller Wohngebäude in den GAK bis 1993 bei Sanierung entsprechend ...					
		Szenario 1 auf			Szenario 2 auf		
		...EnEV 09	...NEH	...Potential	...EnEV 09	...NEH	...Potential
EFH	<i>Dach/ob.GeDe</i>	5,56	6,54	7,85	4,51	4,92	5,47
	<i>Wand</i>	20,5	21,7	23,4	18,8	19,7	21,0
	<i>Fenster</i>	4,75	6,21	7,46	2,68	3,10	3,47
	<i>U.Geb.abschl.</i>	1,45	1,79	1,79	0,80	0,88	0,88
	Summe	32,2	36,3	40,5	26,8	28,6	30,8
MFH	<i>Dach/ob.GeDe</i>	3,49	4,04	4,78	2,97	3,24	3,60
	<i>Wand</i>	18,5	19,7	21,2	17,0	17,9	19,1
	<i>Fenster</i>	4,71	6,20	7,47	2,55	2,95	3,30
	<i>U.Geb.abschl.</i>	4,54	5,05	5,05	4,37	4,80	4,80
	Summe	31,3	35,0	38,5	26,9	28,9	30,8
Summe	<i>Dach/ob.GeDe</i>	9,05	10,6	12,6	7,49	8,17	9,07
	<i>Wand</i>	39,0	41,4	44,6	35,8	37,7	40,1
	<i>Fenster</i>	9,46	12,4	14,9	5,22	6,06	6,77
	<i>U.Geb.abschl.</i>	5,99	6,84	6,84	5,17	5,68	5,68
	Summe	63,5	71,3	79,0	53,7	57,6	61,7

Tabelle 26 zeigt wieder das energetische Verbesserungspotential der einzelnen Bauteile bei einer Sanierung aller Wohngebäude in den GAK bis 1993 bei einer Sanierung entsprechen dem Sanierungsszenario 1 und 2. Die dargestellten Prozentzahlen drücken aber nun in Erweiterung zu Tabelle 25 das Verhältnis der Differenz des Energieverlustes über ein bestimmtes Bauteil vor und nach der Sanierung die-

ser Bauteile auf ein bestimmtes energetisches Niveau, bezogen auf den Gesamtenergiebedarf für Raumwärme aller Wohngebäude (berechnet mit 532 TWh/a) in den GAK bis 1993 aus.

Auch hier sind die erzielbaren Einsparungen bei Anwendung des Sanierungsszenarios 2 geringer. Die Gründe folgen der weiter oben geführten Diskussion. Es wird deutlich dass in Summe bei den Gebäudetypen EFH und MFH jeweils ähnliche Einsparpotentiale zu realisieren sind. Bezogen auf die Bauteile sind bei beiden Gebäudetypen die größten Einzelbeiträge im Bereich der Wand zu finden. Allein die Einsparpotentiale der Wand bei MFH und EFH sind beim Sanierungsziel „EnEV 09“ je nach Sanierungsszenario für 61 % (Szenario 1), bzw. 67 % (Szenario 2) der möglichen prozentualen Gesamteinsparung verantwortlich (Tabelle 27). Die Einsparpotentiale von Dach und Fenster liefern insgesamt ähnliche Beiträge zur Gesamteinsparung. Je nach Gebäudetyp und Sanierungsziel können ca. 3 – 8 % der Transmissionswärmeverluste in den GAK bis 1993 eingespart werden (Tabelle 26). Dies entspricht einem Anteil von ca. 10 – 15 % an der prozentualen Gesamteinsparung (Tabelle 27). Die Beiträge des unteren Gebäudeabschlusses sind vergleichsweise geringer. Obwohl das Verbesserungspotential der Maßnahmen am Keller, bezogen auf die Verluste über diese Bauteilflächen groß ist (Tabelle 25), ist das Einsparpotential an Transmissionswärmeverlusten in der GAK mit jeweils ca. 1 – 5 % gering (Tabelle 26). Bezogen auf die prozentuale Gesamteinsparung trägt der untere Gebäudeabschluss damit, im Mittel aus EFH und MFH, noch knapp 10 % zur Gesamteinsparung bei (Tabelle 27).

Tabelle 27: Anteil der Energieeinsparung bestimmter Bauteile in den GAK bis 1993 bei einer Sanierung entsprechend Szenario 1 und Szenario 2 an der erzielbaren Gesamteinsparung

Gebäudetyp	Bauteil	% -Anteil der Einsparung durch die Bauteile (in den GAK bis 1993) an der Gesamteinsparung bei einer Sanierung entsprechend ...					
		Szenario 1 auf			Szenario 2 auf		
		...EnEV 09	...NEH	...Potential	...EnEV 09	...NEH	...Potential
EFH	<i>Dach/ob.GeDe</i>	17,3	18,0	19,4	16,9	17,2	17,7
	<i>Wand</i>	63,5	59,9	57,8	70,1	68,9	68,2
	<i>Fenster</i>	14,7	17,1	18,4	10,0	10,8	11,3
	<i>U.Geb.abschl.</i>	4,50	4,93	4,42	2,99	3,08	2,86
	<i>Summe</i>	100	100	100	100	100	100
MFH	<i>Dach/ob.GeDe</i>	11,2	11,6	12,4	11,0	11,2	11,7
	<i>Wand</i>	59,3	56,3	55,1	63,3	62,0	62,0
	<i>Fenster</i>	15,1	17,7	19,4	9,5	10,2	10,7
	<i>U.Geb.abschl.</i>	14,5	14,4	13,1	16,2	16,6	15,6
	<i>Summe</i>	100	100	100	100	100	100
Gesamt (Mittel)	<i>Dach/ob.GeDe</i>	14,3	14,9	16,0	13,9	14,2	14,7
	<i>Wand</i>	61,4	58,1	56,5	66,7	65,4	65,1
	<i>Fenster</i>	14,9	17,4	18,9	9,73	10,5	11,0
	<i>U.Geb.abschl.</i>	9,43	9,60	8,66	9,63	9,87	9,22
	<i>Summe</i>	100	100	100	100	100	100

Der große Einfluss der Sanierung der Wandflächen gegenüber dem Dach kann über die Ausgangs-U-Werte erklärt werden. Der angenommene durchschnittliche energetische Zustand der Wände ist in der Bauteilkategorie „vor WSchV 77“ mit einem U-Wert von 1,4 deutlich schlechter als die Werte im Dach mit einem durchschnittlichen U-Wert von 0,9. Je schlechter der Ausgangs-U-Wert und je größer die Differenz zum Sanierungsziel, umso größer ist der Einfluss auf die prozentuale Energieeinsparung.

Tabelle 28 zeigt abschließend den prozentualen Anteil des Energieverlustes über die opake Gebäudehülle (=Dach + Wand + Keller) am Gesamtenergiebedarf für Transmissionswärmeverluste in den GAK bis 1993. Im unsanierten Zustand (Ist-Zustand) beträgt der Anteil der Energieverluste über die opake Hülle ca. 78 % (EFH) bis 76 % (MFH). Durch eine Sanierung auf die Zustände EnEV 09, NEH oder Potential lässt sich der Anteil je nach Gebäudetyp im Mittel auf ca. 58 % bis 64 % reduzieren.

Im rechten Teil der Tabelle 28 ist abschließend noch einmal explizit die bei Anwendung der Sanierungsszenarien 1 und 2 erzielbare Gesamteinsparung unterteilt nach Gebäudetypen (EFH, MFH) dargestellt. Das erzielbare Einsparpotential bei einer Sanierung der Wohngebäude in den GAK bis 1993 entsprechend Szenario 1 liegt bei einer Sanierung auf den Zustand der EnEV 09 im Mittel bei ca. 64 % und erhöht

sich bei entsprechend ambitionierten Sanierungszielen auf ca. 71 % (NEH) und 79 % (Potential).

Tabelle 28: Anteil der Energieverluste durch die opake Hülle im Ist-Zustand und bei einer Sanierung entsprechend Szenario 1 und Szenario 2 (links) sowie die prozentuale Gesamteinsparung bei einer Sanierung entsprechend Szenario 1 und Szenario 2 (rechts)

Gebäudetyp		% - Anteil der Energieverluste durch die opake Hülle (Ist-Zustand und Szenario 1 und 2)			% - Einsparung bezogen auf den Ist-Zustand bei Sanierung auf...		
		...EnEV 09	...NEH	...Potential	...EnEV 09	...NEH	...Potential
EFH	<i>Ist-Zustand</i>	78,4			-	-	-
	<i>Szenario 1</i>	67,6	68,6	67,9	61,2	68,9	76,9
	<i>Szenario 2</i>	66,5	65,7	63,9	50,8	54,4	58,6
MFH	<i>Ist-Zustand</i>	75,9			-	-	-
	<i>Szenario 1</i>	58,4	58,0	55,7	66,1	73,9	81,3
	<i>Szenario 2</i>	56,6	54,1	51,0	56,9	61,1	65,1
Gesamt (Mittel)	<i>Ist-Zustand</i>	77,3			-	-	-
	<i>Szenario 1</i>	63,6	64,0	62,8	63,5	71,3	79,0
	<i>Szenario 2</i>	62,2	60,7	58,3	53,7	57,6	61,7

Abschätzung der zur Sanierung benötigten Mengen an Dämmstoff

Aus den U-Werten des Ist-Zustands und den U-Werten der angestrebten Sanierungsziele kann unter Annahme einer bestimmten Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Dämmstoffs, die zum Erreichen des Sanierungszieles benötigte Dämmstoffdicke berechnet werden. Da $U \sim \lambda/d$ (λ = Wärmeleitfähigkeit, d = Dämmschichtdicke), ist der Einfluss der Dicke auf den U-Wert nicht linear ausgeprägt, sondern verläuft regressiv. Äquidistante Abstufungen bei den U-Werten führen innerhalb einer Schrittweite bei sinkenden U-Werten also zu überproportionalen Zuwächsen der hierfür benötigten Dämmstoffdicken. Je niedriger die Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Dämmstoffs angesetzt wird, umso geringere Dämmstoffdicken und geringere Volumina müssen zum Erreichen des angestrebten Sanierungsziels eingesetzt werden, bzw. umso niedrigere U-Werte lassen sich mit dem gleichen Volumen an Dämmstoffen erreichen.

In Verbindung mit den Bauteilflächen können mit den Dämmstoffdicken auch die benötigten Volumen an Dämmstoff bestimmt werden. Tabelle 29 listet für zwei Wärmeleitfähigkeitsstufen, $\lambda = 0,040$ und $\lambda = 0,030$ W/(m·K) die notwendige zusätzliche Dämmstoffdicke zum Erreichen eines bestimmten energetischen Ziels auf.

Tabelle 29: Benötigte Dämmstoffdicke [cm] bei Sanierung der Bauteile bezogen auf eine Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/(m·K) und 0,030 W/(m·K)

		notwendige Dämmstoffdicke [cm]					
		bei $\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$			bei $\lambda = 0,030 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
		<i>EnEV</i>	<i>NEH</i>	<i>Po-tential</i>	<i>EnEV</i>	<i>NEH</i>	<i>Po-tential</i>
Bauteile vor WSchV 77	Dach bzw. oberste Geschoßdecke	13	18	36	10	14	27
	Wand	14	20	38	11	15	28
	Keller bzw. unterer Gebäudeabschluss	11	17	17	8	13	13
Bauteile zwischen WSchV 77 - 84	Dach bzw. Oberste Geschoßdecke	6	11	29	4	9	22
	Wand	10	16	34	8	12	25
	Keller bzw. Unterer Gebäudeabschluss	7	13	13	5	10	10

In Tabelle 30 und Tabelle 31 sind die Abschätzungen des zur Sanierung für die Sanierungsszenarien 1 und 2 veranschlagten Volumens an Dämmstoff, bezogen auf eine Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/(m·K) und 0,030 W/(m·K) wiedergegeben.

Tabelle 30: Abschätzung des benötigten Volumens [Mio. m³] an Dämmstoff für das Sanierungsszenario 1, bezogen auf eine Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/(m·K) und 0,030 W/(m·K)

Gebäude-typ		Dämmstoffvolumen [Mio. m ³]					
		bei $\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$			bei $\lambda = 0,030 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
		<i>EnEV</i>	<i>NEH</i>	<i>Poten-tial</i>	<i>EnEV</i>	<i>NEH</i>	<i>Poten-tial</i>
<i>EFH</i>	Dach / oberste Geschoßdecke	118	184	421	70	107	240
	Wand	221	323	627	199	291	564
	Keller / unterer Gebäudeabschluss ⁵⁴	55	88	88	62	111	111
	<i>Summe EFH</i>	394	595	1136	331	509	915
<i>MFH</i>	Dach / oberste Geschoßdecke	86	146	318	51	85	181
	Wand	174	242	462	157	218	416
	Keller / unterer Gebäudeabschluss	40	67	67	44	85	85
	<i>Summe MFH</i>	300	455	847	252	388	682
Gesamt	<i>EFH + MFH</i>	694	1050	1983	583	897	1597

Tabelle 31: Abschätzung des benötigten Volumens [Mio. m³] an Dämmstoff für das Sanierungsszenario 2, bezogen auf eine Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/(m·K) und 0,030 W/(m·K)

Gebäude- typ		Dämmstoffvolumen [Mio. m ³]					
		bei $\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$			bei $\lambda = 0,030 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
		<i>EnEV</i>	<i>NEH</i>	<i>Poten- tial</i>	<i>EnEV</i>	<i>NEH</i>	<i>Poten- tial</i>
<i>EFH</i>	Dach / oberste Geschoßdecke	72	99	199	55	77	149
	Wand	183	261	496	143	196	365
	Keller / unterer Gebäudeabschluss	46	71	71	34	54	54
	<i>Summe EFH</i>	301	431	766	232	327	568
<i>MFH</i>	Dach / oberste Geschoßdecke	47	65	131	36	51	98
	Wand	166	237	450	130	178	332
	Keller / unterer Gebäudeabschluss	12	19	19	9	15	15
	<i>Summe MFH</i>	225	321	600	175	244	445
Gesamt	<i>EFH + MFH</i>	526	752	1366	407	571	1013

Für das Sanierungsszenario 1 (Sanierung aller Bauteile mit einem energetischen Standard „vor WSchV 77“ und „WSchV 77/84“) werden bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/(m·K) insgesamt 694 Mio. m³ Dämmstoffe benötigt. Dies entspricht ca. dem 25 fachen des aktuellen Jahresabsatzes an Dämmstoffen. Eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs um 25 %, auf 0,030 W/(m·K) reduziert das nötige Volumen auf 583 Mio. m³. Dies entspricht einer Einsparung an Material um 16 %.

Effektivitätsvergleich der möglichen Maßnahmen

Eine Optimierungsstrategie im Bereich der Bestandssanierung ist von vielen Variablen abhängig. Je nachdem, welcher Dämmstoff verwendet wird und welche Konstruktion vorliegt, entstehen ein bestimmter Primärenergieeinsatz und Kosten, die in einer Amortisationsrechnung der eingesparten Energie und den eingesparten Kosten gegenübergestellt werden können. Da sich in den mittelfristigen Betrachtungszeiträumen von 20 – 40 Jahren der Nutzung, aber aufgrund von Technologie- und Preisanpassungen sowohl der Energiemix (Anteil regenerativer Energien), als auch das Preisniveau signifikant ändern werden, sind Prognosen generell schwierig und mit einer großen Unsicherheit behaftet.

Tabelle 32: Benötigtes Dämmstoffvolumen [Mio. m³] je prozentualer Einsparung an Transmissionswärmeverlusten [%] bezogen auf den betrachteten Bestandsausschnitt, für das Sanierungsszenario 1, bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/(m·K) und 0,030 W/(m·K)

Gebäudetyp	Bauteil	Mio.m ³ / %-Einsparung					
		bei $\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$			bei $\lambda = 0,030 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$		
		EnEV	NEH	Potential	EnEV	NEH	Potential
EFH	Dach / oberste Geschoßdecke	21	28	54	13	16	31
	Wand	11	15	27	10	13	24
	Keller / unterer Gebäudeabschluss	38	49	49	43	62	62
	Nach Volumen gewichteter Mittelwert	18	24	38	17	25	30
MFH	Dach / oberste Geschoßdecke	25	36	67	15	21	38
	Wand	9	12	22	8	11	20
	Keller / unterer Gebäudeabschluss	9	13	13	10	17	17
	Nach Volumen gewichteter Mittelwert	14	20	38	10	15	24

Tabelle 32 enthält für das Sanierungsszenario 1, eine Aufstellung des Verhältnisses von eingesetztem Materialvolumen (Mio m³ Dämmstoff, Tabelle 30) zum Einsparpotential an Endenergie für Transmissionswärmeverluste (Tabelle 26, links) bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/(m·K) und 0,030 W/(m·K). Ohne Berücksichtigung bestimmter Materialbesonderheiten und ohne Differenzierung der vorhandenen Konstruktionen ist ein möglichst geringer Materialeinsatz je eingespartem Prozentpunkt an Transmissionswärmeverlusten anzustreben. Günstige (niedrige) Werte stellen sich dabei ein, wenn der energetische Zustand des Bauteils vor der Sanierung schlecht war. Die Begründung liegt in der einleitend beschriebenen Abhängigkeit von $U \sim \lambda/d$.

Der effektivste Materialeinsatz mit ca. 8 – 15 Mio. m³/%-Einsparung ist damit bei einer Sanierung der Wände im unsanierten Bestand („vor WSchV 77“) auf die Zustände EnEV 09 und NEH gegeben. Sanierungsmaßnahmen am Dach benötigen in der gleichen Gruppe einen Materialeinsatz von ca. 13 – 25 Mio. m³/%-Einsparung. Je besser der Ausgangszustand der Bauteile vor der Sanierung ist und je niedriger der angestrebte U-Wert gewählt wird, umso größer ist der erforderliche Materialeinsatz.

Die zur Einsparung von 1 % der Endenergie für Transmissionswärmeverluste benötigten Mengen an Dämmstoff erscheinen hoch. Um die Zahlen besser einordnen zu können, sind die Zusammenhänge aus Kapitel 5.2, Energetische Amortisation noch einmal in Erinnerung zu rufen. Bei einer Bezugsgröße von 532 TWh/a (Gesamtenergiebedarf aller WG in der GAK bis 1993, berechnet mit dem Heizperiodenverfahren) entspricht eine Einsparung von 1 % also einer Energieeinsparung von 5,32 TWh/a. Werden für diese Einsparung nun beispielsweise 11 Mio. m³ Dämmstoff (EFH, Wand, $\lambda = 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, Sanierungsszenario 1 auf EnEV 09) benötigt, so sind z. B. zur Herstellung dieser Menge an EPS insgesamt ca. $51 \text{ MJ}/\text{kg} \times 15 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 11 \times 10^6 \text{ m}^3 = 8,415 \times 10^9 \text{ [MJ]}$ nicht erneuerbarer Primärenergieeinsatz nötig. Dies entspricht umgerechnet 2,34 TWh – der Aufwand an nicht erneuerbarer Energie für die Herstellung der nötigen Dämmstoffe ist also innerhalb von $2,34 / 5,32 = 0,44$ Jahren energetisch amortisiert.

Zusammenfassung

Praktisch alle Bauteile weisen aus energetischer Sicht lohnenswerte Verbesserungspotentiale auf. Die in den GAK bis 1993 ermittelten, bauteilbezogenen, prozentualen Einsparungen sind je nach der Verteilung des energetischen Ausgangszustands und des gewählten Sanierungsszenarios, also dem zur Sanierung angesetzten Bestandsausschnitt, unterschiedlich. Bei den opaken Bauteilen sind insbesondere Maßnahmen an Dach und Wand lohnenswert. Eine Sanierung auf den Zustand der EnEV 09 bringt bauteilbezogene Einsparpotentiale von ca. 50 – 80 % (Sanierungsszenario 1), sowohl bei EFH als auch bei MFH. Bei den Kellerdecken sind die Verhältnisse differenzierter. Durch die Verteilung der energetischen Ausgangszustände auf die Bauteilflächen sind hier im Bereich der MFH deutlich höhere bauteilbezogene Einsparpotentiale (ca. 70 – 75 %) zu realisieren als bei den EFH (ca. 20 – 30 %). (Tabelle 25)

Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf der Wohngebäude in den GAK bis 1993 liegen die größten Verbesserungspotentiale im Bereich der Wand, gefolgt von Dach und Kellerdecke. Insgesamt können durch eine Sanierung der Bauteile mit einem energetischen Zustand „vor WSchV 77“ und „WSchV 77/84“ in den GAK bis 1993 (Sanierungsszenario 1) auf den Standard der EnEV 09, ca. 64 % des Gesamtenergiebedarfs für Raumwärme, dieses Bestandsausschnitts eingespart werden. Durch die Anwendung höherer Sanierungsstandards (NEH, Potential) erhöhen sich auch die erzielbaren Einsparungen auf ca. 70 – 80 %. (Tabelle 26)

Bei einer typischen Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,030 - 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ benötigt man für die Realisierung des Sanierungsszenarios 1 im Bereich der EFH im Schnitt ca. 17 - 18 Mio. m³ Dämmstoff für eine Endenergieeinsparung der Transmissionswärmeverluste von 1 %. Für die MFH sind ca. 10 – 14 Mio. m³/%-Einsparung nötig (Tabelle 32). Der Materialeinsatz wird dabei umso größer, je besser der U-Wert der Ausgangsbauweise ist und je ambitionierter das Sanierungsziel gesteckt wird. In-

samt werden für das Sanierungsszenario 1 bei Sanierung auf das Niveau der EnEV 09 ca. 694 Mio. m³ Dämmstoffe benötigt.

7 Motivation und Hemmnisse bei der Sanierung

Trotz der großen Bedeutung des Themas „Energetische Gebäudesanierung“ gibt es derzeit keine Quelle, die jährlich aktuell eine energetische Sanierungsrate für den deutschen Gebäudebestand aufzeigt. Die zuverlässigsten Zahlen über die tatsächliche Sanierungsrate stammen aus der Studie des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) und des Bremer Energie Instituts (BEI) mit dem Titel „Datenbasis Gebäudebestand“ aus dem Jahr 2010 [Diefenbach et al. 2010]. Es wird eine Gesamt-Sanierungsrate für den baulichen Wärmeschutz von 0,8 %/a für den deutschen Wohngebäudebestand angegeben. Diese Zahl liegt deutlich unter dem Ziel des Energiekonzepts der Bundesregierung. Hier ist die Erhöhung der Sanierungsrate insgesamt, also Wohn- und Nichtwohngebäude) auf 2 %/a vorgesehen. Bezogen auf den Altbaubestand (Baujahr bis 1978) beträgt die Rate 1,1 %/a. Dabei sind die energetischen Sanierungsraten für die einzelnen Bauteile zum Teil sehr unterschiedlich. Am häufigsten wird eine Dämmung des Dachs oder der obersten Geschossdecke (ca. 1,5 %) gefolgt von der Außenwanddämmung (ca. 0,8 %) durchgeführt. Am seltensten erfolgt die Sanierung des Fußbodens bzw. der Kellerdecke (ca. 0,3 %).

7.1 Sanierungsgründe

Unter einer Sanierung versteht man im Bauwesen die baulich technische Wiederherstellung oder Modernisierung eines Bauwerks um Mängel zu beseitigen oder den Wohn- und Lebensstandard zu erhöhen. Dabei muss man zwischen Maßnahmen an der bestehenden Bausubstanz einerseits und energetisch wirksamen Maßnahmen an der Gebäudehülle andererseits unterscheiden. Letztere betreffen sowohl den baulichen Wärmeschutz als auch die Anlagentechnik.

Die Gründe, warum eine Sanierung durchgeführt wird, hängen von einer Reihe verschiedener Parameter ab. Eine Liste möglicher Faktoren, die eine Entscheidung für eine energetische Sanierung beeinflussen, ist in Abbildung 88 zu sehen. Dabei sind die einzelnen Faktoren je nach Altersgruppe, Lebenssituation, Gebäudezustand, finanziellem Spielraum und wirtschaftlicher Situation unterschiedlich ausgeprägt.

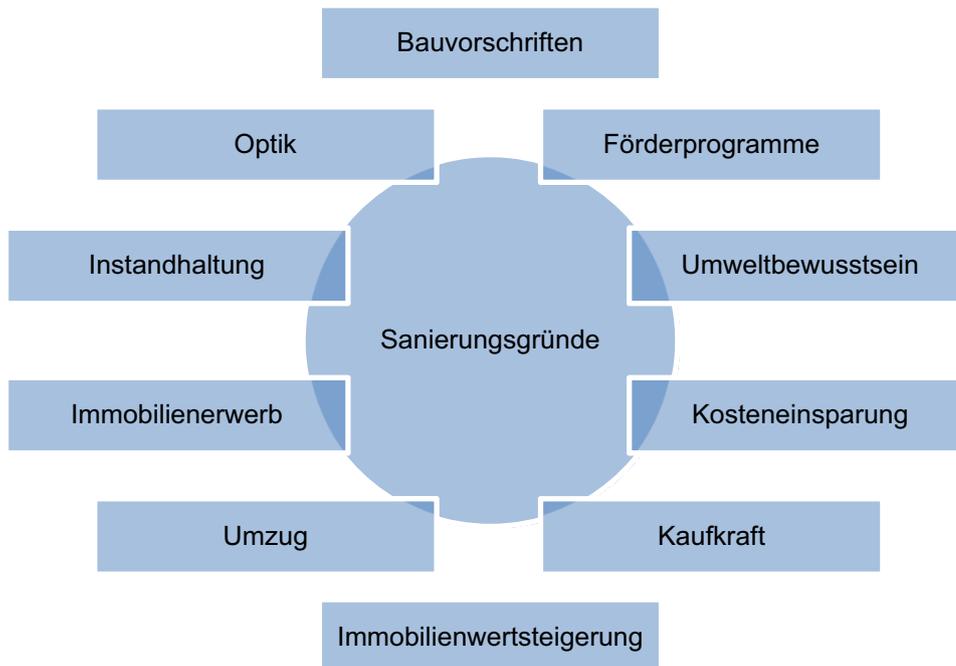


Abbildung 88: Faktoren die eine Entscheidung für eine energetische Sanierung beeinflussen.

Die Motivation, eine energetische Sanierung vorzunehmen, kann sehr unterschiedlich sein. Für die B+L Sanierungsstudie 2013 wurden im August/September 2012 über 960 private Renovierer und 100 Architekten zu allen Details der Sanierung und Renovierung befragt. Die Studie zeigt, dass auch die Art der Sanierungsmaßnahme eine entscheidende Rolle spielt. Die folgende Tabelle nennt die Gründe für die Durchführung einer Sanierung nach Bauteilgruppen (Mehrfachantworten waren dabei möglich).

Tabelle 33: Gründe für die Durchführung einer Sanierung nach Bauteilgruppe (Mehrfachantworten möglich)

Gründe für eine Renovierung [%]	Dach	Außenwände und Fassade	Fenster	Keller
Geld sparen	50,4	61,3	48,5	43,3
Verschleiß / Beseitigung von Schäden	49,3	41,5	44,6	52
Erhöhung des Wohnkomforts	35,1	38,9	31,6	38,3
Wert der Immobilie verbessern	32,1	30,5	36,8	35,7
Optik / Design	18,9	20,3	33,3	-
Nutzung von Fördermitteln	14,3	7,5	5,2	7,9

Bemerkenswert ist, dass die Möglichkeit der Nutzung finanzieller Fördermittel wenig ausschlaggebend für die tatsächliche Entscheidung zur Durchführung von Maß-

nahmen ist. Dabei stellt die Bundesregierung seit 2006 jährlich 1,5 Milliarden Euro (2013) Haushaltsmittel für das energieeffiziente Bauen und Sanieren zur Verfügung.

Geld sparen als Motiv ist vor allem bei der Verbesserung der Fassadendämmung und dem Austausch von Fenstern und Außentüren überdurchschnittlich wichtig. Bei einer ausschließlichen Putzerneuerung steht hingegen die Beseitigung und Ausbesserung von Schäden im Vordergrund.

Die folgende Grafik stellt die Maßnahmen dar, die laut der Befragung von B+L im Zeitraum von 2010 - 2012 durchgeführt wurden, oder konkret im Zeitraum von 2012 - 2013 geplant waren.

Im Rahmen der Renoviererbefragung wurden durch das Screening auch Nicht-Renovierer erfasst. Die Mehrheit hatte keinen Renovierbedarf. Lediglich 20 % verzichteten aus finanziellen Gründen auf eine Renovierung. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass zwar „Geld sparen“ als häufigstes Motiv genannt wurde, aber die vier am häufigsten durchgeführten oder geplanten Maßnahmen eher zur Erhaltung unter dem Begriff „Optik und Design“ subsummierbar sind. Es zeigt sich im Allgemeinen ein deutlicher Trend hin zu Maßnahmen im Innenausbau.

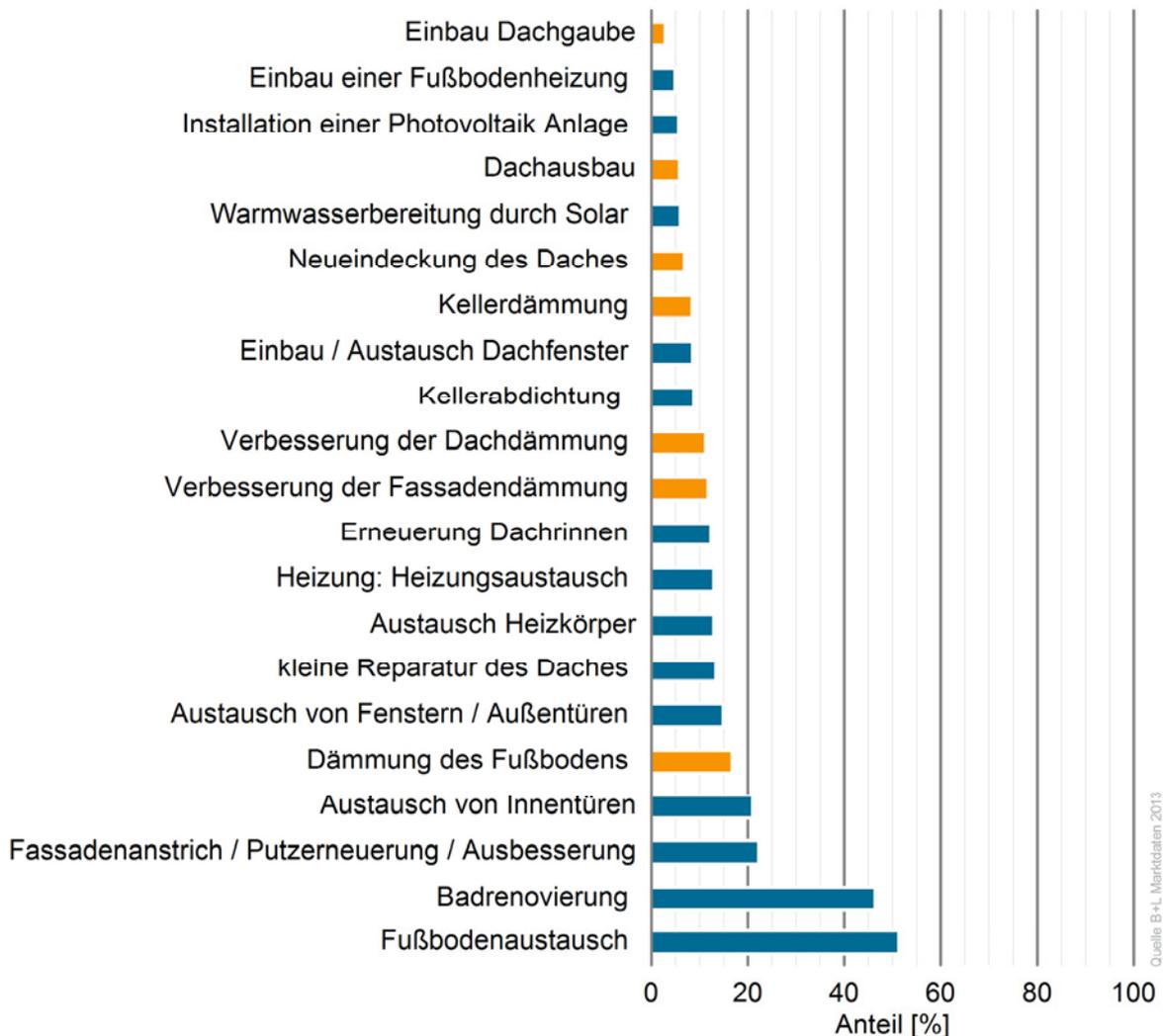


Abbildung 89: Häufigkeit von durchgeführten oder geplanten Sanierungsmaßnahmen nach [B+L 2013]. Die orange gekennzeichneten Maßnahmen beinhalten den Einsatz von Wärmedämmung.

7.2 Sanierungshemmnisse

Die allgemein als notwendig empfundene energetische Sanierung des Gebäudebestandes erfolgt nicht in dem notwendigen Umfang. Dafür gibt es verschiedene Gründe. Eine Befragung, die im Rahmen der Erstellung des CO₂ Gebäudereport 2009 für das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung durchgeführt wurde, erbrachte das in Tabelle 34 wiedergegebene Ergebnis [Friedrich et al. 2009]. Als größtes Hemmnis sehen die Befragten hohe Kosten und fehlende Geldmittel an.

Tabelle 34: Umfrage im Rahmen des CO₂ Gebäudereport 2009 zur Frage warum Gebäude nicht energetisch saniert werden [IFEU/TNS 2008].

Welches sind Ihrer Meinung nach die zwei wichtigsten Gründe, warum Gebäude nicht energetisch saniert werden?	Prozent %
hohe Sanierungskosten	47
fehlende Geldmittel	32
kein Interesse	14
Unwissenheit	8
optische oder technische Gründe	7
hemmende Bauvorschriften	4
fehlende staatliche Förderung	4
persönliche Gründe	3
unattraktive Mieterträge	1
Sonstiges	7
keine Angaben	-

Eine von Technomar durchgeführte Eigentümerbefragung im Jahr 2008 benennt ebenfalls finanzielle Aspekte als den wichtigsten Hinderungsgrund für Hausbesitzer von Ein- und Zweifamilienhäusern, eine energetische Sanierung durchzuführen. Hohe Investitionskosten (65 %) und die lange Gebundenheit des eingesetzten Kapitals (61 %) schrecken über die Hälfte ab. Fast jeder Zweite entschließt sich gegen eine energetische Sanierung der Heizungsanlage, weil er die zukünftige Energiepreisentwicklung einzelner Energieträger nicht abschätzen kann oder weil er keinen Anlass für eine Modernisierung sieht [Technomar 2008].

In Abbildung 90 sind die nach [Albrecht et al. 2010] häufigsten Gründe für Hemmnisse bei der energetischen Sanierung zusammengefasst. Dabei erfolgt eine Verteilung der möglichen Gründe in Matrixdarstellung auf die Quadranten der Achsen „Häufigkeit“ und „Beeinflussbarkeit“ sowie eine Kategorisierung der Begriffe in übergeordnete Gruppen. Die größten Hürden (schwer überwindbar / häufig) für den Fortschritt der energetischen Sanierung im Bestand liegen demnach in den finanziellen Herausforderungen der Maßnahmen und einer generellen Interesselosigkeit am Thema.

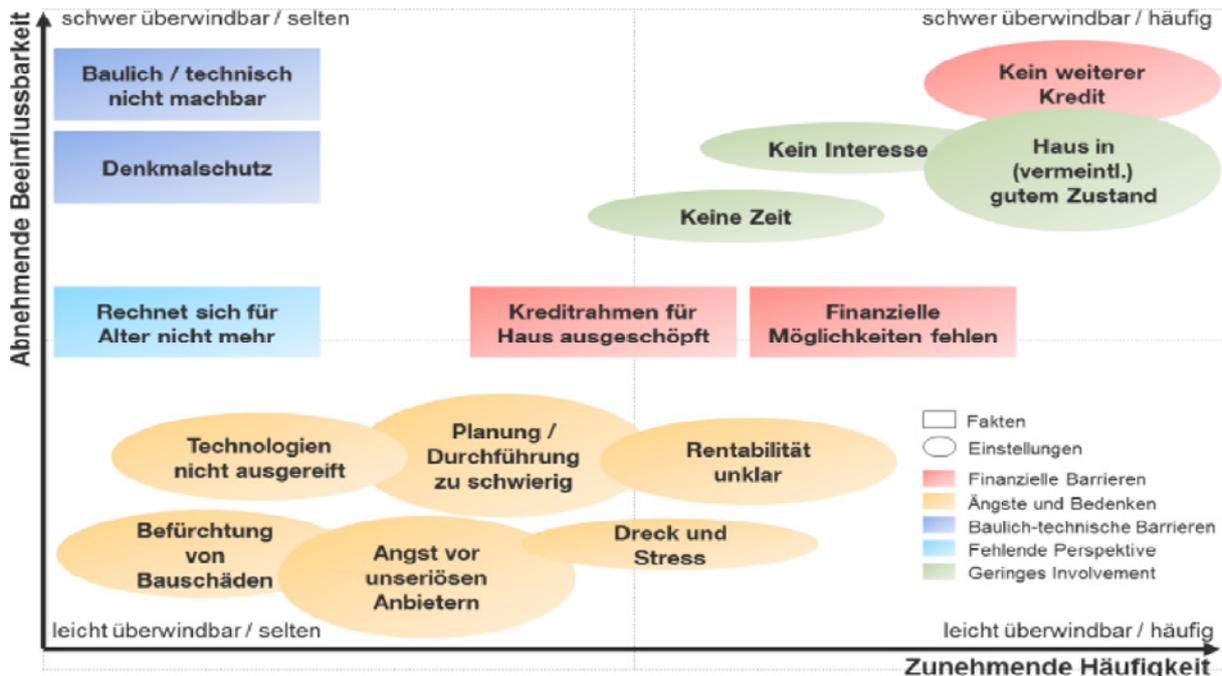


Abbildung 90: Übersicht über die Hemmnisse bei der Sanierung Quelle: ENEF-Haus: Zum Sanieren Motivieren [Albrecht et al. 2010]

Die entscheidende Bedeutung investitionsfreundlicher politischer Rahmenbedingungen wird auch von [Henger und Voigtländer 2012] unterstrichen. Eine für private Eigentümer planungssichere Förderung energetischer Maßnahmen durch den Staat und die Ausrichtung der Höhe staatlicher Förderungen an den gesteckten Zielen (also der angestrebten Sanierungsquote) ist notwendig, damit die geforderte Sanierungsrate und –tiefe wirtschaftlich tragfähig umsetzbar wird [Henger und Voigtländer 2012].

Eine Studie der CPI [Novikova et al. 2011a] bestätigt ebenfalls, dass die größten Bedenken bei der Gebäudesanierung den Bereichen der Finanzierung und der Qualität der Sanierung gelten. Die Initialmotivation der prinzipiell sanierungswilligen Eigentümer liegt vor allem in dem Wunsch die thermische Behaglichkeit und die Wertigkeit der Immobilie zu verbessern. Gründe wie der Verfall des Hauses, also die Erkenntnis der Sanierungsnotwendigkeit, spielen eine untergeordnete Rolle. Die Studie detektiert auch Gründe für Änderungen an ursprünglichen Sanierungsplänen. Hier zeigt sich, dass die Gründe für zusätzliche oder weggelassene Maßnahmen vor allem in den Kostenstrukturen und in Unsicherheiten bezüglich der Rentabilität und Qualität der Maßnahme liegen.

Eine fehlende Bereitschaft zur Auseinandersetzung mit dem Thema der energetischen Sanierung hat zur Folge dass oft weder Beratungsangebote noch Fördermittel zur Kenntnis genommen werden. Das Interesse der Gebäudeeigentümer muss durch verstärkte Öffentlichkeitsarbeit und notfalls über staatliche Lenkungsabgaben geweckt werden, wobei der Druck durch die Energiepreisentwicklung hier ohnehin mittelfristig entsprechende Entwicklungen induzieren wird.

Neben den genannten Gründen können auch Eigentumsverhältnisse zu Problemen bei der Umsetzung energetischer Maßnahmen führen. In mehrgeschossigen Gebäuden mit Eigentumswohnungen sind Maßnahmen an gemeinschaftlich genutzten Bauteilen auf der Eigentümerversammlung nur durch Mehrheitsbildung entscheidbar. Insbesondere dann, wenn geplante Maßnahmen zu Sonderbelastungen führen, die nicht aus den regulären Rücklagen zu bedienen sind, kann die Bildung einer entscheidungsfähigen Mehrheit schwierig werden. Auch das Mieter-Vermieter-Dilemma (d. h. der Mietmarkt erlaubt keine Kostenumlage) kann der Problematik der Eigentumsverhältnisse zugeordnet werden und stellt ein Hemmnis bei der Sanierungsaktivität dar.

Problematisch sind außerdem Maßnahmen bei deren Durchführung Mindestabstände zu Nachbargrundstücken oder öffentlichen Wegen verletzt werden – bspw. bei einer Fassadensanierung mittels WDVS. Hier empfiehlt sich auch bei einer einvernehmlichen Einigung mit dem Grundstücksnachbarn ein entsprechender Vermerk im Grundbuch, um bei einem etwaigen Eigentümerwechsel langfristig einen Rechtsanspruch zu besitzen.

Mögliche Informationsinstrumente und deren Effektivität in der Praxis wurden in [Novikova et al. 2011b] untersucht. Dabei werden drei Kategorien von Informationsinstrumenten aufgestellt. Abbildung 91 zeigt Maßnahmenpakete und Informationsinstrumente im Sinne einer breiteren Umsetzung energetischer Sanierungen.

Zunächst werden Instrumente benötigt, mit denen Haushalte über die Vorteile einer energetischen Gebäudesanierung informiert werden. Diese Instrumente richten sich an bislang uninteressierte Haushalte und können beispielsweise in der Aufbereitung detaillierter Verbrauchsabrechnungen liegen, die das Verständnis für die Vorteile energetischer Sanierungen erhöhen sollen. Im Weiteren wird auch den Energieausweisen eine hohe Bedeutung zugesprochen, gleichzeitig aber auf die nötigen Verbesserungen der Ausweise selbst hingewiesen (siehe auch [Amecke 2011]).

Instrumente zur Hilfestellung bei der Umsetzung geplanter Sanierungsmaßnahmen bestehen vor allem in der Information der Bürger durch Fachleute (Architekten, Handwerker). Neben Informationen aus dem Internet ist oft auch der Einfluss von Erfahrungen des jeweiligen Bekanntenkreises (Freunde, Kollegen) entscheidend.

Um das Vertrauen der Entscheider in die Qualität der Umsetzung zu erhöhen, ist die Entwicklung von Qualifikationsnachweisen in Form von einheitlichen Zertifizierungen der ausführenden Handwerksbetriebe erstrebenswert.

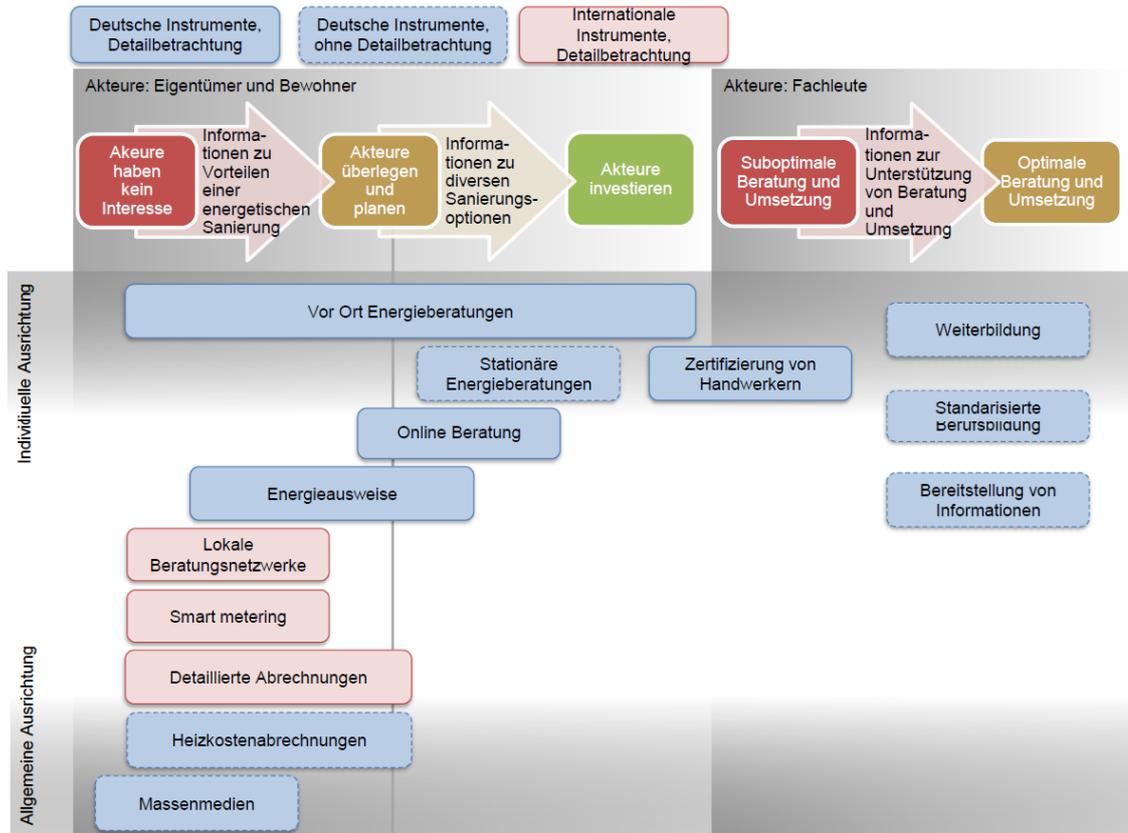


Abbildung 91: Maßnahmenpakete und Informationsinstrumente im Sinne einer breiteren Umsetzung energetischer Sanierungen bei Eigentümern und Bewohnern und einer zielgerichteten, unterstützenden Begleitung geplanter Maßnahmen durch Qualifizierung der agierenden Fachleute (Darstellung aus [Novikova et al. 2011b])

8 Wärmedämmung im Visier der Medien

Negative Berichterstattung zum Thema Wärmedämmung existiert seit Jahren. Waren die kritischen Beiträge jedoch früher eher in Nischenkanälen des Internet zu finden (Blogbeiträge, Foren, etc.) so ist innerhalb der letzten zwei Jahre verstärkt eine Ausweitung des Themas auf reichweitenstarke Medien (Tageszeitungen, Fernsehbeiträge, etc.) zu beobachten. Dabei wird eine Reihe von Problemen im Themenkomplex „Wärmedämmstoffe“ aufgegriffen und – meist durch Fallbeispiele dokumentiert – in Form von Reportagen und populärwissenschaftlichen Sendeformaten bearbeitet. Die öffentliche Debatte über Wärmedämm-Maßnahmen in Fernseh- und Presseberichten wird teilweise sehr emotional geführt. Dabei spielen die geplante Verschärfung der Energieeinspar-Verordnung, aber auch die Marktanteile einzelner Bauweisen eine große Rolle. Teilweise werden in den Diskussionen unscharfe Begriffe verwendet, verschiedene Dinge vermischt, aber auch auf offene Fragen und Probleme hingewiesen.

8.1 Überblick

Stellt man die Häufigkeit der Schlagwörter der Berichterstattung über Wärmedämmstoffe der letzten beiden Jahre gegenüber (Abbildung 92) so fällt eine deutliche Überrepräsentierung tendenziell negativ besetzter Begrifflichkeiten auf. Das bis vor kurzem noch ausgewogene und tendenziell positive Presseecho, ist also mittlerweile einer zumindest in Teilen unsachlichen Auseinandersetzung mit dem Thema der energetischen Ertüchtigung im Gebäudebestand gewichen.

Zeitraum 01.06.11 – 31.12.11



Zeitraum 01.06.12 – 31.12.12



Abbildung 92: Word Cloud nach Mediaberichten, Springer Media Datenbank, Deutschland

Eine verstärkte mediale Aufmerksamkeit für den Bereich Wärmedämmung ist prinzipiell positiv und die kritische Beleuchtung potentiell problematischer Einbausituationen oder in toxikologischer Sicht bedenklicher Inhaltsstoffe ist wichtig und ermöglicht dem mündigen Bürger eine differenzierte Bewertung der durch den Planer oder Handwerker vorgeschlagenen Lösungen für den konkreten Modernisierungsfall. Leider genügt die Qualität der Informationsaufbereitung nicht in allen Fällen dem wissenschaftlichen Anspruch, der dem Konsumenten durch die Art der Informati-

onsbereitstellung und dem Format der Sendung bzw. dem Renommee des Printmediums suggeriert wird. Im Folgenden werden Informationen zu den derzeit im Zentrum der Aufmerksamkeit stehenden und dort kontrovers diskutierten Themenschwerpunkten zusammengestellt.

Schlagzeilen und Titel von Berichten in Printmedien, Internet und Fernsehen

Nachfolgend ist eine lose Reihe von Beiträgen aus Printmedien, Internet und Fernsehen zusammengestellt. Interessant ist, dass es sich hierbei fast ausschließlich um überregionale Medien handelt, wohingegen in nur lokal verbreiteten Zeitungen und Broschüren weiterhin eine positive Grundstimmung zum Dämmen überwiegt.

- Zeit Online Okt. 2010: Schluss mit dem Dämmwahn!
- Zeit Online Nov. 2010: Der Sanierungszwang wird teuer
- FAZ Nov. 2010: Die Burka fürs Haus
- Heise Verlag Feb. 2011: Werden Häuser immer mehr zu Sondermüll?
- Welt Online Juli 2011: Schimmel-Dämmplatten können krankmachen
- ARD Plusminus Nov. 2011: Dämmwahn: Nicht immer macht Energiesparen mit Wärmedämmverbund-Systemen Sinn
- Spiegel Online Nov. 2011: Wärmedämmung kann Hausbrände verschlimmern
- Shell Studie Dez. 2011: Gebäudesanierung kostet Bürger bis zu 750 Mrd. Euro
- SZ Dez. 2011: Gefahr aus Plastikschaum
- Der Spiegel Mai 2012: Verdämmt
- Zeit Online Juli 2012: Mieter befürchten mehr Kosten durch Sanierung
- Doku Hitec Aug. 2012: Die verpackte Republik
- Welt am Sonntag Okt. 2012: Höhere Kosten trotz Dämmung
- NDR Fernsehen 2012: Wahnsinn Wärmedämmung
- 3sat 2012: Dämmfieber – Ein Land isoliert sich
- DLF 2012: Sondermüll von der Fassade
- ntv Pressereport: Dämmungsziele überflüssig? Alte Häuser besser als gedacht
- Wirtschaftswoche 2013: Deutschland im Dämmwahn.
- Die Welt 2013: Die große Lüge von der Wärmedämmung.

Verteilung der Vorwürfe

Tabelle 35 zeigt die Verteilung der Vorwürfe in ausgewählten negativen Beiträgen in Zeitungen, Zeitschriften und Internetforen. Die Verteilung der Themen war bis Ende 2012 recht ausgeglichen, hat sich aber in den letzten Monaten (Stand der ausgewerteten Beiträge Mai 2013) vorwiegend auf die Themen „Energieeinsparung“ und „Wirtschaftlichkeit“ konzentriert. Diese beiden Themenfelder machen zusammen 40 % der untersuchten Beiträge aus. Kritisiert wird vor allem, dass die tatsächliche Energieeinsparung deutlich geringer ausfällt als in den Bedarfsberechnungen prognostiziert, und dass die Wirtschaftlichkeit der Dämmmaßnahmen nicht gegeben sei.

Tabelle 35: Absolute Zahl der Nennung und prozentuale Verteilung der Themenbereiche in den ausgewerteten Medien

Themenbereich	absolute Anzahl der Nennungen	Prozentuale Häufigkeit [%]
Brand	5	7
Biozide	5	7
Leaching	4	5
Spechtschäden	4	5
Wirtschaftlichkeit	16	22
Energieeinsparung	13	18
Architektur	4	5
Schimmel	4	5
Veralgung	4	5
Krankheiten	1	1
Dauerhaftigkeit	5	7
Entsorgung	5	7
Instandhaltung	3	4

Zahlen zum Marktrückgang

Konnten 2011 noch 42,5 Mio m² Außenbauteile gedämmt werden, waren es 2012 nur noch 40,1 Mio m². Das entspricht einem Rückgang um 2,4 Mio m² (oder 5,6 %). Dieser Rückgang in den Absatzzahlen kann auf vielerlei Ursachen zurückgeführt werden. Ausschlaggebend sind dabei sicherlich die unsichere Fördersituation, das Warten auf steuerliche Förderung von energetischen Maßnahmen (v. a. im Bereich der Kapitalanleger) und die Unsicherheit hinsichtlich der Entwicklung der Anforderungen der zukünftigen EnEV. Neben den genannten Gründen kann aber auch ein Einfluss der Medienberichterstattung nicht von der Hand gewiesen werden, berücksichtigt man, dass die Einbrüche bei dem Dämmstoff EPS (viele der in der Öffentlichkeit Aufmerksamkeit erregenden Berichte der jüngeren Vergangenheit behandelten das Brandverhalten von EPS in WDVS) von 2011 auf 2012 mit ca. -10 %, den durchschnittlich zu verzeichnenden Marktrückgang im gleichen Zeitraum deutlich überschreiten.

8.2 Ressentiments potentieller Anwender

Architektur und Konflikte mit dem Denkmalschutz

Vorwurf: Flächendeckende Sanierung im Bestand führt zu einer „gesichtslosen“ Einheitsarchitektur!

Ein häufiger Einwand, insbesondere bei der energetischen Sanierung im Bestand, ist der Hinweis auf architektonische Eingriffe in die Fassadengestaltung bei der An-

wendung von WDVS. Individuelle Fassadenzergliederungen durch Simse und Reliefs, wie diese insbesondere in Großstädten typisch sind, müssten u. U. bei der Sanierung abgeschlagen werden und verschwinden unter den aufgeklebten Dämmstoffplatten. Einheitlich glatte Oberflächen sind die Folge. Typische Quartiereindrücke die von unterschiedlichen Baumeistern oder Epochen geprägt sind, gehen verloren.

Ein weiteres Problem wird häufig konstatiert, wenn die Anordnung der Fenster während der Sanierung nicht verändert wurde und im ursprünglichen Mauerwerk verbleibt. Durch die heute üblichen – und sinnvollen – Dämmstärken von > 140 mm tritt die Fensterfläche in der Fassade weit zurück und wird bei seitlichem Lichtabfall weitgehend verschattet. Es entsteht der Eindruck „Toter Augen“ in der Fassade.

Tatsache ist:

Hierzu ist anzumerken, dass auch bei der Wahl eines Außendämmsystems, ob mittels WDVS oder anderen Systemen (Vorsatzschalen, etc.) individuelle und architektonisch ansprechende Fassadengestaltungen möglich sind. Durch die Wahl eines entsprechenden Putzes können Strukturen erzeugt werden und eine freie Farbgestaltung ermöglicht die Betonung bestimmter Elemente welche der, durch die Gebäudemorphologie festgelegten Fassadenzergliederung durch Fenster und Stockwerke folgen kann. Neben der Gestaltung durch Putz- und Farbanstriche sind alternative Fassadenflächen, angefangen bei einfachen Holzverschalungen bis hin zu Keramik und Steinflächen oder auch eine Kombination verschiedener Werkstoffe möglich. Nachfolgendes Bild (Abbildung 93) zeigt eine ansprechende und farblich akzentuierte mit WDVS sanierte Fassade in der Münchner Innenstadt, die das Gebäude aufwertet. Zur Anwendung kam ein schlankes WDVS mit Dämmkernen aus VIP in EPS-Formteilen in der Dicke 100 mm.



Abbildung 93: Mittels WDVS sanierte Fassade eines MFH im modernen Stil

Abbildung 94 zeigt eine mittels WDVS unter Beachtung des zeitgenössischen Stils der Gebäudealtersklasse, sanierte Fassade eines EZFH.



Abbildung 94: Mittels WDVS sanierte Fassade eines EZFH (Bildnachweis: Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme E.V.)

Bei historisch wertvollen Fassadengestaltungen (Jugendstilfassaden, Fachwerk, etc.) stehen neben der Außendämmung auch alternative Dämmmaßnahmen zur Verfügung. Eine energetische Sanierung mittels Innendämmung ist zwar nicht so ef-

fektiv wie vergleichbare Maßnahmen der Außendämmung und erfordert darüber hinaus eine sehr sorgfältige Planung und Umsetzung, belässt die Fassade jedoch ohne Eingriffe. Die Sensibilität des begleitenden Planers vorausgesetzt, kann in jedem Falle entweder eine schützend-erhaltende (Abbildung 95) oder aktiv gestaltende Architektur (Abbildung 96) umgesetzt werden.



Abbildung 95: Mittels Innendämmsystem saniertes EZFH (Bildnachweis: Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme E.V.)



Abbildung 96: Mittels Innendämmsystem saniertes ehemaliges Fabrikgebäude mit umgewidmeter Nutzung (Bildnachweis: Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme E.V.)

Das Problem der tiefen Fensterlaibungen tritt nur auf, wenn die Position der Fenster in der Fassade unverändert bleibt. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben ist jedoch stets eine sinnvolle Koppelung von Maßnahmen anzustreben. Soll ein hohes energetisches Sanierungsniveau erreicht werden, was entsprechend große Dämmstärken an der Außenwand erfordert, sollten in jedem Fall sinnvollerweise auch die Fenster ausgetauscht werden und dann vor dem alten Mauerwerk, also innerhalb der neuen Dämmschicht positioniert werden. Dieses Vorgehen verringert den Rücksprung der Fensterfläche in der Fassade und vermindert überdies effektiv Wärmebrücken im Bereich der außenliegenden Fensterlaibungen.

Im Übrigen sind auch aktuelle Entwicklungen zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen zu beachten. Eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit ermöglicht geringere Dämmstoffdicken (siehe auch Kapitel Energieeinsparpotential) und insgesamt schlankere Wandaufbauten, so dass auch bei erhaltenswerten Fenstern (z. B. wenn diese bereits einen guten energetischen Standard aufweisen) eine Fassaden-dämmung ohne negative optische Eindrücke vorgenommen werden kann. Vor allem Vakuumisolierpaneele, Aerogele und zukünftig auch Dämmstoffe auf Basis von Nanoschäumen bieten hier enormes Potential für hochdämmende und dabei schlanke Bauteile (Abbildung 93).

Energieeinsparung

Vorwurf: Wärmedämmung bringt keine / oder nur geringe Energieeinsparung!

Ein weiteres Argument gegen Wärmedämmung, folgt der Argumentation, Wärmedämmung würde unter den im Bauwesen tatsächlich vorherrschenden instationären Temperaturbedingungen generell keine Energieeinsparung ermöglichen, da Angaben zur Wärmeleitfähigkeit stets auf stationäre Zustände bezogen sind und andererseits solare Wärmegewinne über die opaken und transparenten Bauteile minimiert würden. Diese Argumentation wird inzwischen auch von den kritischen, aber seriösen, Studien nicht mehr aufgegriffen und ist in der Fachliteratur hinreichend widerlegt. Sowohl Berechnungsverfahren zum instationären Wärme- und Feuchte-technischen Verhalten von Bauteilen und Baukonstruktionen, als auch Praxismessungen an realisierten Sanierungen, zeigen tatsächlich realisierte Einsparungen und beweisen damit die generelle Funktionalität der Wärmedämmung.

Trotzdem wird immer wieder der energetische Nutzen von Wärmedämmmaßnahmen bestritten und die erzielbaren Einsparpotentiale angezweifelt.

Tatsache ist:

Durch die Vielzahl an Begriffen und Berechnungsmethoden zum Energiebedarf und –verbrauch, ist es nicht einfach den Überblick zu behalten und die Gefahr von Fehlinterpretationen bestimmter Aussagen oder Kennwerte steigt. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben ist zunächst zwischen dem Energiebedarf und –verbrauch zu unterscheiden. Während sich der Energiebedarf auf einen prognostizierten Verbrauch un-

ter der Annahme einheitlicher Randbedingungen der Nutzung (Innenraumtemperaturen, beheizte Fläche, Anzahl der Bewohner) bezieht, erfasst der Energieverbrauch den tatsächlichen Verbrauch eines individuellen Objekts.

Verunsicherung kommt dann auf, wenn bei einem Objekt der konkret berechnete oder im Energieausweis auf pauschalisierten Annahmen erstellte Energiebedarf von dem tatsächlich ermittelten Verbrauch abweicht. In [Simons 2012] sind durchschnittliche Bedarfszahlen für unsanierte Gebäude (Energieausweis) den in einer anderen Studie [Frondelet et al. 2011] auf Basis von Verbrauchsabrechnungen erstellten Energieverbräuchen gegenübergestellt. Die Abweichungen liegen bei über 50 % (bezogen auf den Energiebedarf im Energieausweis). Simons 2012 stellt im Weiteren die in zwei anderen Studien [Hinz 2006, Walberg et al. 2011] detailliert berechneten Energiebedarfe von insgesamt elf EFH, den vor und nach der durchgeführten Sanierung gemessenen Energieverbräuchen gegenüber. Hier zeigt sich interessanterweise, dass der Energiebedarf der nicht sanierten EFH den tatsächlichen Energieverbrauch überschätzt, während nach der Sanierung leicht höhere Verbrauchswerte festgestellt werden, als in der Bedarfsrechnung ermittelt wurden. Die Abweichungen vor der Sanierung liegen bei ca. 35 %, nach der Sanierung in einem Bereich von ca. 10 % (jeweils bezogen auf den berechneten Energiebedarf).

Die weitestgehende Anpassung der Differenz zwischen den Bedarfs- und Verbrauchswerten vor- und nach der Sanierung folgt im Prinzip der bereits in Kapitel 3.3 beschriebenen historischen Entwicklung des Energieverbrauchs zwischen den Jahren 1900 – 1970. Während sich in einem unsanierten Gebäude mit entsprechend hohen Verbrauchswerten ein sparsames Verhalten der Bewohner manifestiert, wird nun, nach der Sanierung, entsprechend mehr Wohnfläche geheizt und insgesamt höhere, für den Nutzer angenehmere, Innenraumtemperaturen eingestellt. Dieser sogenannte „Rebound-Effekt“ wird von [Henger und Voigtländer 2012] mit ca. 20 – 40 % Mehrverbrauch/m² abgeschätzt. Bezieht man diese Zuschläge, die ja überdies einen positiven Nutzen für die Bewohner mit sich bringen, in die im vorhergehenden Absatz vorgestellten Differenzen zwischen Bedarf und Verbrauch mit ein, so gleichen sich die Werte weitestgehend an. Trotzdem resultieren daraus Abgrenzungsprobleme bei Rentabilitätsbetrachtungen (siehe auch Kapitel 5.3, Kosten und Rentabilität).

Schimmel

Vorwurf: Wärmedämmung erhöht das Risiko eines Befalls mit Schimmelpilzen!

Durch die höhere Luftdichtheit von sanierten Gebäuden wird die natürliche (unkontrollierte) Belüftung der Räume minimiert, was zu einer höheren Luftfeuchtigkeit führt. Die Wände feuchten sich partiell auf und es kommt zu Schimmelpilzbefall.

Tatsache ist:

Schimmelpilzsporen sind in der Luft allgegenwärtig. Ein Bewuchs von Bauteilen (und anderen Flächen) kann immer dann auftreten wenn drei Bedingungen erfüllt sind: Hauptvoraussetzung ist eine dauerhaft ausreichende Feuchtigkeit (> 65 – 70 % relative Luftfeuchtigkeit) und die Existenz leichtverwertbarer Nährstoffe wie Zucker, Eiweiße und Fette. Die dritte Wachstumsbedingung ist die Temperatur, die zwischen 5°C und 40°C liegen muss – was innerhalb des üblichen Einsatzbereichs von Bauteilen liegt, weswegen bei der Temperatur auch nicht eingegriffen werden kann.

Die in einem Raum vorhandene Lufttemperatur ist nie über alle Volumeneinheiten gleich verteilt, sondern folgt einem typischen Temperaturprofil, das je nach Heizungssituation in der Regel vom Fußboden zur Decke und vom Rauminnen zu den raumumschließenden Hüllflächen hin abfällt. Die niedrigsten Temperaturen sind demzufolge in den Raumecken und insbesondere auch hinter Möbeln die an der Außenwand stehen messbar, weil dort aufgrund behinderter Konvektion nur wenig warme Luft vom Rauminnen ankommt. Die relative Luftfeuchtigkeit ist definiert als das Verhältnis des Wasserdampfpartialdrucks zum Sättigungsdampfdruck der Luft (in %) und kann damit Werte von maximal 100 % (Wasserdampfpartialdruck = Sättigungsdampfdruck) annehmen. Der Sättigungsdampfdruck (und damit die maximale Konzentration an Wassermolekülen in der Luft) ist dabei vor allem von der Temperatur abhängig. Eine hohe Temperatur ermöglicht höhere Konzentrationen, eine niedrige Temperatur niedrigere Konzentrationen an Wassermolekülen. Dementsprechend steigt bei niedriger Temperatur und konstanter Menge an Wassermolekülen in der Luft die relative Luftfeuchtigkeit an, bis schließlich, bei Unterschreiten des so genannten Taupunkts, „überschüssiges“ Wasser ausfällt. In der Luft kondensiert das Wasser typischerweise an kleinen Schwebeteilchen (Nebelbildung), im bauphysikalischen Bereich sind aber meist Flächen von angrenzenden Bauteilen die kältesten Stellen, an denen schließlich Feuchtigkeit ausfällt und die Oberflächen aufweicht.

Für Schimmelpilze verwertbare Nährstoffe finden sich bereits in ausreichender Menge in den organischen Anteilen von Staubablagerungen, Tapetenkleistern oder bestimmten Wandfarben, weshalb es generell schwierig ist, dem Pilzwachstum durch den Entzug der Nährstoffgrundlage entgegenzutreten. Die wichtigste Voraussetzung für die Vermeidung von Schimmelpilzwachstum ist deshalb eine ausreichend hohe Temperatur der den Raum begrenzenden Flächen – in der Regel also der Außenbauteile, um die relative Luftfeuchtigkeit im Grenzbereich zum Bauteil und damit die Baustofffeuchte selbst, unter den für das Wachstum nötigen Mindestbedingungen zu halten.

Eine angepasste Wärmedämmung erhöht die innenraumseitigen Bauteiltemperaturen, weil der Wärmestrom durch das Bauteil reduziert wird, was letztlich das Temperaturprofil im Wandquerschnitt in Richtung der Rauminnenseite hin anhebt. Insbesondere an geometrisch bedingten Wärmebrücken (2- und 3-dimensionale Raum-

ecken) ist eine Wärmedämmung wichtig, um die Innenraumtemperaturen – und damit die Feuchteentwicklung – auf einem wohnhygienisch einwandfreien Niveau zu halten.

Bezogen auf den Innenraum erhöht eine außenseitig angebrachte Wärmedämmung also die Schimmelpilzsicherheit deutlich. Anspruchsvoller, aber bei fachgerechter Ausführung genauso effektiv, sind in diesem Zusammenhang Innendämmmaßnahmen.

Weil bei einem bestimmten Temperaturgefälle an einem, aus Baustoffen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit geschichteten Bauteil, der Temperaturverlauf im Bereich der niedrigsten Wärmeleitfähigkeit am steilsten verläuft, bleibt bei einer Innendämmmaßnahme die tragende Wand (zur Außenseite hin ohne Dämmung) kälter, als bei einer Außendämmung (zur Außenseite hin mit Dämmung). Weil unter diesen Voraussetzungen (Temperaturprofil bei Innendämmung) in der Grenzschicht zwischen Dämmstoff und tragender Wand Taupunktunterschreitungen auftreten können, ist es bei der Innendämmung sehr wichtig eine funktionierende (d. h. lückenlose) Dampfbremse einzubauen, um den Eintrag der mit viel Wasserdampf beladenen warmen Raumluft in den Wandaufbau zu verhindern. Mit modernen Folien und diffusionsdichten Klebebändern zur Gestaltung von Anschlüssen und Stößen gelingt diese Abdichtung gut. Durch die Wahl geeigneter Baustoffe wird die Funktionssicherheit weiter erhöht. So können beispielsweise feuchteadaptive Dampfbremsen verwendet werden, die bei normaler relativer Luftfeuchtigkeit einen s_d -Wert von mehr als ca. 4 m aufweisen und damit als Dampfbremse den Eintrag von Luftfeuchtigkeit aus dem Raum in die Dämmschicht verhindern. Bei hoher Feuchte (Tauwasserbildung) ändert das Material seinen Wasserdampfdiffusionswiderstand und wird mit s_d -Werten von ca. 0,1 bis 0,5 m diffusionsoffen. Bei erhöhten Baustofffeuchten oder Tauwasserausfall zwischen der Dämmschicht und der Dampfbremse kann dann die Feuchtigkeit zum Raum hin abtrocknen, da durch die relativ trockenere Raumluft ein Wasserdampfpartialdruckgefälle in Richtung Innenraum entsteht, das durch die feuchteadaptive Dampfbremse hindurch abgebaut wird.

Auch durch geeignete Dämmstoffe können kleinere Mengen an Tauwasserausfall direkt aufgenommen, im Material weiterverteilt und bei entsprechender relativer Luftfeuchtigkeit des Innenraums (Wasserdampfpartialdruckgefälle in Richtung Innenraum) an die Raumluft abgegeben werden. Solche hygroskopisch aktive Materialien zeichnen sich durch hohe kapillare Wasseraufnahme und Wasserweiterverteilungseigenschaften aus. Beispiele hierfür sind Kalziumsilikatplatten oder faserbasierende Platten auf Basis lignocellulosischer Rohstoffe (Holz, Altpapier, etc.).

Nicht zuletzt liegt es in der Verantwortung des Nutzers durch eine ausreichende händische oder automatisierte Lüftung die Luftfeuchtigkeit im Raum zu kontrollieren. Hierbei ist je nach Nutzung des Raums (Wohnzimmer, Bad, Küche) insbesondere bei großer Feuchtfreisetzung (Kochen, Duschen) eine intensive Stoßlüftung erforderlich um die Luftfeuchtigkeit möglichst rasch zu reduzieren.

Veralgung und Biozide

Vorwurf: Wärmedämmte Fassaden veralgeln!

Früher wurden Fassadenflächen häufig vom hohen Staub- und Schadstoffgehalt der Luft verschmutzt. Insbesondere Stellen, die nicht regelmäßig durch Regenwasser abgewaschen wurden, waren hier in Form von meist dunklen Verfärbungen betroffen. Algenbewuchs trat, auch aufgrund des damals höheren Schadstoffgehalts in der Luft (SO₂), eher selten auf [Künzel 2002]. Das heute vermehrt anzutreffende Problem der Veralgung von Fassaden ist eng mit dem Temperaturverlauf verbunden. Auch hier geht es in erster Linie um Feuchteprobleme. Der geringe Transmissionswärmeverlust aufgrund des durch die Dämmung reduzierten Wärmestroms durch die Wand, führt im Vergleich zu einem Wandaufbau mit einem höheren U-Wert, zu einer niedrigeren Außenoberflächentemperatur der Gebäudehülle. Unter ungünstigen Bedingungen (klare Nächte) kommt es dann aufgrund der langwelligen Abstrahlung der Fassadenoberfläche zu einer Unterkühlung des Putzes die schließlich zu einer Taupunktunterschreitung auf der Fassade führen kann. Ausreichende Feuchtigkeit ist eine essentielle Voraussetzung für Algenbewuchs, weshalb hoch gedämmten Wandaufbauten hier per se eine größere Anfälligkeit unterstellt werden kann.

Tatsache ist:

Neben der Oberflächentemperatur sind im Außenbereich noch eine Reihe anderer Faktoren für die Feuchtebilanz der Oberfläche wichtig. Die Orientierung (Wetterseite), die Schlagregenbelastung (Standort), das direkte Umfeld (Nachbarbebauung), konstruktive Aspekte (Dachüberstand, Tropfkanten) und auch die Art und Rauigkeit des verwendeten Putz sind entscheidend dafür, ob sich auf der Fassade Algenbewuchs manifestiert.

Die folgenden Erläuterungen beziehen sich in erster Linie auf WDVS. Für andere Arten wärmedämmter Fassaden (Kerndämmungen, vorgehängte und hinterlüftete Fassaden, Innendämmung) gelten die gleichen grundsätzlichen Zusammenhänge.

Das hygrische Verhalten der Fassadenbeschichtung ist wichtig für den Feuchtehaushalt der Oberfläche. Die Art des verwendeten Putz- und Beschichtungssystems hat darauf großen Einfluss. Dabei konkurrieren zwei unterschiedliche Ansätze. Eine möglichst geschlossene, glatte und wasserabweisende Oberfläche führt zu einem raschen Abfließen anfallenden Regen- und Tauwassers. Feuchteaufnahme im Material soll auf diese Weise nach Möglichkeit vermeiden werden. Derlei Eigenschaften lassen sich beispielsweise mit kunstharzgebundenen Putzsystemen und entsprechenden Anstrichen erzielen. Putze mit so genanntem Lotus-Effekt können die Selbstreinigung der Oberfläche weiter unterstützen.

Dem gegenüber stehen mineralische Putze, die auf Basis von Kalk und Zement hergestellt werden, zumeist eine höhere Dichte aufweisen und bei Verarbeitung in entsprechenden Schichtstärken ein höheres Feuchtepuffervermögen und eine bes-

sere Verteilung der anfallenden Feuchtigkeit bieten. Durch ein günstiges Diffusionsverhalten bieten diese Materialien überdies ein schnelleres Rücktrocknungsverhalten. Der Ansatz gegenüber organischen Putzen ist hier eine begrenzte Aufnahme anfallenden Oberflächenwassers und die Weiterverteilung in tiefere Materialschichten. Freies Wasser steht dadurch an der Oberfläche nicht mehr zur Verfügung; bei entsprechenden Bedingungen wird die Feuchtigkeit wieder abgegeben und das Material trocknet wieder aus. Die Selbstreinigung von mineralischen Putzsystemen aufgrund des leichten Absandens der Oberfläche und einem Abtrag durch Regen, kann ebenfalls dazu beitragen Verschmutzungen und Algenbewuchs zu vermeiden.

Um einen Algenbewuchs zu verhindern können Fassadenbeschichtungen auch mit bioziden Wirkstoffen ausgestattet werden. Diese müssen allerdings wasserlöslich sein, um bei Feuchtigkeit auf der Oberfläche angelöst und von den Mikroorganismen aufgenommen werden zu können. Um eine langfristige Wirksamkeit zu erzielen sollten die Wirkstoffe möglichst ideal dosiert aus dem Materialverbund gelöst werden. Ist die Wasserlöslichkeit zu hoch, werden die Wirkstoffe schnell ausgewaschen, ist sie zu niedrig, steht nicht genügend Wirkstoff zur Bewuchsverhinderung zur Verfügung. Im Allgemeinen lässt sich in den ersten sechs Monaten eine erhöhte Auswaschung feststellen. Die Biozide werden dann über das ablaufende Oberflächenwasser in die Umwelt eingetragen.

Die Konzentrationen verwendeter Biozide (bspw. Terbutryn, Isoproturon) im Grund- und Oberflächenwasser werden im Rahmen unterschiedlicher Messprogramme ermittelt. Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte sind selten und können in der Regel landwirtschaftlichen Einsätzen zugeordnet werden [Anonymus 2013].

Die Verwendung mikroverkapselter Biozide führt gegenüber dem Einsatz von unverkapselten Bioziden zu einem verminderten Auswaschungsverhalten und gewährleistet damit geringere Umweltbelastungen und eine verbesserte Dauerhaftigkeit, bzw. eine längere Wirksamkeit gegen Algenbewuchs [Breuer et al. 2012].

Sinnvoller als die Verhinderung eines Bewuchses durch Pestizide in den Beschichtungen ist aber die Vermeidung von Feuchteansammlungen an der Fassade. Neben den beschriebenen Möglichkeiten des Feuchtemanagements durch die Wahl des Putzsystems kann das Abstrahlungsverhalten der Fassade auch durch unterschiedliche Fassadenfarben (hell vs. dunkel) und spezielle Infrarot-aktive Anstriche verändert werden [Krus et al. 2006]. Die Infrarot-aktiven Anstriche besitzen dabei ein vermindertes Emissionsvermögen im langwelligen Bereich. Während der Einfluss der farbigen WDVS auf die Betauungszeit (Zeit der Taupunktunterschreitung) eher gering ist, konnte durch den Infrarot-aktiven Anstrich die Betauungszeit um 20 % reduziert werden. In einer exemplarischen Messung des oberflächennahen Wassers konnten durch den Infrarot-aktiven Anstrich deutlich geringere Wassermengen auf der Fassadenfläche erzielt werden. Dem Einsatz von Infrarot-aktiven Anstrichen steht zurzeit noch deren mangelhafte Witterungsbeständigkeit im Weg. [Künzel et al. 2001, Krus et al. 2006]

Auch die Art des in einem WDVS eingesetzten Dämmstoffs beeinflusst die Oberflächentemperaturen und damit den Grad und den Verlauf der Taupunktunterschreitungen auf der Fassade. Insbesondere Dämmstoffe mit höherer Rohdichte und einer hohen spezifischen Wärmekapazität (z. B. Holzfaserdämmstoffe) können sich in diesem Zusammenhang vorteilhaft auswirken [Krus und Sedlbauer 2004].

Generell muss festgestellt werden, dass Algenbewuchs kein spezifisches Problem gedämmter Fassaden ist. Geringere Oberflächentemperaturen begünstigen zwar die Betauung der gedämmten Fassadenoberflächen, aber auch ungedämmte Bauteile weisen bei ungünstigen Rahmenbedingungen Algenbewuchs auf. Eine Beachtung und Optimierung aller problemrelevanten Einflussfaktoren sollte in Zukunft dauerhaft bewuchsfreie Fassaden ermöglichen und den Einsatz von Pestiziden auf Ausnahmefälle beschränken helfen. In diesem Sinne läuft zur weiteren Aufklärung der Zusammenhänge am Fraunhofer IBP derzeit ein vom Umwelt Bundesamt gefördertes Projekt mit dem Titel „Verbesserung der Umwelteigenschaften von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) – Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten biozidfreier Komponenten und Beschichtungen“. In dem Projekt sollen sowohl von Veralgung betroffene, als auch schadensfreie Fassaden bezüglich der verwendeten Baustoffe, der baulichen Gegebenheiten sowie sonstiger Randbedingungen aufgenommen werden. Aus der Auswertung der Datensätze werden erweiterte Rückschlüsse zu potentiell für Algenbewuchs gefährdeten Situationen erwartet (www.fassadenforschung.de).

Dauerhaftigkeit

Vorwurf: Dämmstoffe verlieren alterungsbedingt ihre Funktion!

Die bauphysikalischen Eigenschaften verändern sich mit der Zeit alterungsbedingt nachteilig. Die Materialien unterliegen einem Abbau durch Temperatur, Feuchte und evtl. UV-Strahlung. Durch physikalisch bedingte Prozesse wie dem Kriechverhalten können Schäden entstehen.

Tatsache ist:

Das älteste WDVS wurde vor nunmehr 56 Jahren in Berlin Dahlem eingebaut [Setzler 2012] und ist nach wie vor funktionsfähig. Die Dauerhaftigkeit aller relevanten Eigenschaften der Wärmedämmung ist die Voraussetzung für deren langfristige Funktionssicherung. Natürlich können Alterungsprozesse aber generell nicht verhindert werden.

Aufgrund endlicher Diffusionswiderstände der verwendeten Materialien, findet beispielsweise bei Hartschäumen mit anderen Zellgasen als Luft, ein schleichender Austausch des Zellgases (z.B. Pentan) mit der Luft statt. Da Luft gegenüber Pentan eine höhere Wärmeleitfähigkeit besitzt, führt der voranschreitende Zellgasaustausch langfristig auch zu einer begrenzten Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs, welche durch die im Bemessungswert enthaltenen Zuschläge berücksichtigt

wird. Ein anderes Beispiel sind Setzungserscheinungen bei losen Dämmstoffen. Durch Einflüsse aus der Nutzung (mechanische Belastung, hygri sche Einflüsse) kann bei offen aufgeblasenen Materialien (z. B. Dämmung der obersten Geschossdecke) innerhalb bestimmter Grenzen ein Zusammensacken der Dämmschicht, also eine Verringerung der Dämmschichtdicke, beobachtet werden. Ähnliche Effekte sollen durch die Charakterisierung des Kriechverhaltens von Hartschäumen beschrieben werden. Bei druckbelasteten Dämmstoffen (z.B. Flachdach, hoch belastete Fußböden/Decken, etc.) darf die durch das Kriechverhalten hervorgerufene Dickenänderung bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten.

In allen Beispielen ist das Materialverhalten physikalisch bedingt und nur in bestimmten Grenzen vermeidbar, kann aber durch Versuche beschrieben werden. Auf Basis von wissenschaftlichen Untersuchungen zum Langzeitverhalten können daraus Einbauvorschriften, z. B. eine zunächst größere Dämmschichtdicke bei offen aufgeblasenen Faserstoffdämmungen, oder eine Berücksichtigung des Langzeitverhaltens der Wärmeleitfähigkeit in Form von Zuschlägen auf den Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit, erfolgen. Zeitabhängige Veränderungen der Materialspezifika werden also in den Zulassungs- und Bemessungsvorschriften berücksichtigt. Für den Anwender garantiert dieses Prinzip die dauerhafte Einhaltung zugesicherter Mindesteigenschaften.

Neben den exemplarisch beschriebenen, natürlichen Alterungsprozessen, die sich auch bei fachgerechter Anwendung und ohne besondere Belastungen nicht vermeiden lassen, können natürlich erschwerte Umgebungsbedingungen die ohnehin auftretenden Alterungsprozesse beschleunigen oder gar Abbaumechanismen ermöglichen, die unter normalen Umständen nicht auftreten würden. Im Wesentlichen können hier die Einflussfaktoren Temperatur, Feuchtigkeit und UV-Strahlung hervorgehoben werden, die jeweils einzeln oder in Kombination mit einander die Alterung von Baustoffen maßgeblich beeinflussen.

Der Einfluss der Temperatur ist insbesondere bei Kunststoffen groß und hängt von der materialspezifischen Aktivierungsenergie ab. Im Bereich bis 120°C wird häufig die Faustformel angesetzt, dass eine Temperaturerhöhung um 10°C eine Halbierung der Lebensdauer nach sich zieht (Arrhenius-Modell). Mechanisch belastete Dämmstoffe, die gleichzeitig hohen Temperaturspitzen ausgesetzt sind (z. B. lasttragende Dachdämmungen) sind hier hohen Anforderungen ausgesetzt und werden deshalb auf das Langzeitkriechverhalten und das Verformungsverhalten bei definierter Druck- und Temperaturbeanspruchung geprüft.

Ein kombinierter Feuchte- und Temperatureinfluss ist z. B. bei Umkehrdächern vorhanden. In diesem besonderen Fall (Dämmstoff liegt oberhalb der wasserführenden Schicht) werden die begrenzt stattfindenden Feuchteaufnahmen in Zuschlägen zum Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt. Ist die Eindeckung (Bekiesung, Begrünung) defekt können auch noch Belastungen durch UV-Strahlung auftreten.

Während Temperaturspitzen bei der Perimeterdämmung aufgrund der relativ konstanten Temperatur des Erdreichs für die Alterung keine große Rolle spielen, ist hier aber der Einfluss von Feuchte ausgeprägt. Eine hohe Belastung stellen das anliegende Grundwasser und der Schlagregen im Bereich des Haussockels dar. In diesem Anwendungsbereich können daher, wie beim Umkehrdach nur Dämmstoffe eingesetzt werden die kein Wasser aufnehmen. Zum Einsatz kommen deshalb geschlossenzellige Schäume (EPS, XPS, PU) und alternativ Schaum- oder Blähglas.

Die genannten Beispiele sollen ein Gefühl dafür vermitteln, dass der Begriff der Dauerhaftigkeit einen vielschichtigen Themenkomplex berührt. Je nach Anwendungsgebiet ergeben sich unterschiedliche Einflussfaktoren und Beanspruchungsszenarien, die je nachdem wie spezifisch die Anforderungen sind (Bsp. Wasseraufnahme), die Auswahl potentiell geeigneter Materialien von vorneherein einschränken. Bei einer prinzipiellen Eignung des Materials können dann durch die Kenntnis des zeitabhängigen Materialverhaltens unter bestimmten Randbedingungen der Nutzung, Zuschläge bestimmt werden, bei deren bemessungstechnischer Berücksichtigung die Einhaltung vereinbarter Mindestanforderungen dauerhaft gewährleistet ist.

Schäden nach der Sanierung

Vorwurf: Die energetische Sanierung von Gebäuden führt zu Schäden an der Gebäudesubstanz und einer unhygienischen Raumluftqualität!

Vor allem Schimmel- und Feuchteprobleme werden immer wieder originär mit zuvor durchgeführten Wärmedämmmaßnahmen in Verbindung gebracht. Dabei wird ein kausaler Zusammenhang unterstellt, der nicht existiert.

Tatsache ist:

Das Auftreten von Schäden an Wohngebäuden wird durch eine angepasste energetische Sanierung verringert. Gedämmte Bauteile sind geringeren Temperaturschwankungen ausgesetzt, was die Belastung für die Baustoffe reduziert. Eine Erhöhung der Innenwandtemperatur führt zu einem geringeren Risiko von Tauwasseranfall und daraus resultierender Folgeschäden oder gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch Schimmelpilzbildung.

Durch eine fachgerechte Planung und Ausführung sowie eine der neuen Gebäudephysik angepassten Nutzung können Schäden nach energetischen Sanierungen sicher vermieden werden. Trotzdem treten in der Praxis immer wieder Schadensfälle auf. Eine Gliederung in die Bereiche „Planung“, „Ausführung“ und „Nutzung“ kategorisiert die auftretenden Schäden nach deren Herkunft.

Planungsinduzierte Schäden

Durch mangelhafte Planung können Bauschäden entstehen. Dabei gibt es auf den verschiedenen Ebenen der Planung unterschiedliche Aspekte zu beachten.

Wärmebrücken vermeiden!

Insbesondere die nachträgliche Wärmedämmung von Bestandsgebäuden erfordert zunächst einmal die ingenieurmäßige Betrachtung der Baukonstruktion zur Vermeidung von Wärmebrücken. Wärmebrücken werden durch Materialwechsel in den Bauteilen, durch die Bauteilgeometrie (insbesondere an Ecken) sowie durch undichte Fugen an Anschlüssen (Durchdringungen, Fenster, etc.) verursacht und erzeugen dort einen erhöhten Wärmestrom, der die Oberflächentemperatur der Bauteile auf der Innenseite verringert [Schild und Willems 2011]. Hierdurch entstehen in jedem Fall ökonomische Nachteile (Erhöhung der Wärmeverluste) und die Gefahr bauphysikalischer Probleme durch erhöhte Luftfeuchtigkeit oder Tauwasserausfall steigt. Abbildung 97 zeigt mögliche Wärmebrücken an einem Wohngebäude.

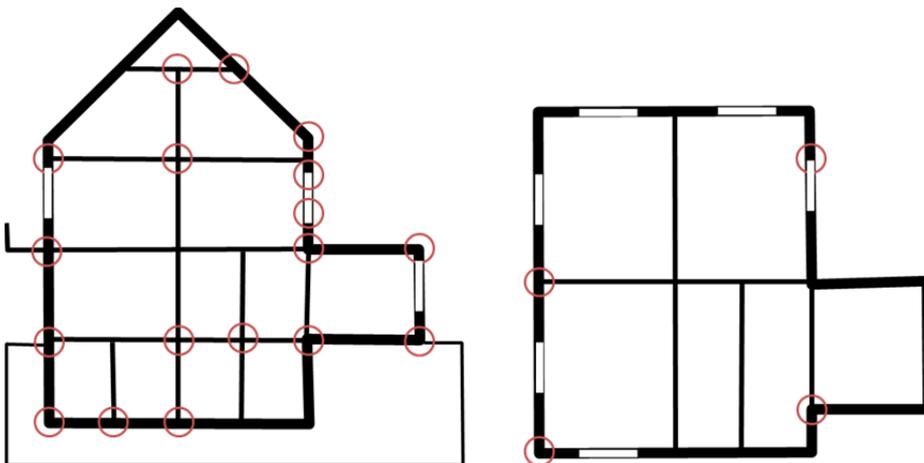


Abbildung 97: Positionen möglicher Wärmebrücken (Eigene Darstellung in Anlehnung an [Feldmann und Becker 2008])

In der Energiebilanz eines Gebäudes sind regelmäßig auftretende kleinere Materialwechsel bei inhomogenen Bauteilen (Holzständer - Gefach, etc.) in den so genannten äquivalenten U-Werten enthalten, bei denen die unterschiedlichen Wärmedurchgangswiderstände in der U-Wert Berechnung für das Bauteil berücksichtigt werden.

Für den Energieverlust maßgebliche Wärmebrücken sind insbesondere Gebäudekanten, umlaufende Laibungen bei Fenstern und Türen, Wand- und Deckeneinbindungen, Deckenaufleger und Balkonplatten. Der Einfluss dieser Elemente und Details wird durch Zuschläge auf die Wärmedurchgangswiderstände der gesamten Hüllfläche des Gebäudes abgebildet. Dabei können je nach Zustand des Gebäudes bzw. dem Umfang der geplanten Sanierung, pauschalisierte Zuschläge angesetzt werden. Bei vollständiger energetischer Modernisierung aller Wärmebrücken steht

außerdem die Anwendung des so genannten Nachweises der Gleichwertigkeit oder ein detaillierter Wärmebrückennachweis zur Verfügung. In diesen Fällen können deutlich niedrigere Zuschläge angesetzt werden, weshalb dieses Vorgehen bei energetisch hochwertigen Sanierungen der Regelfall ist.

Da vor allem bei Bestandssanierungen die Vorgaben des Nachweises der Gleichwertigkeit zu einer Referenzplanung aufgrund der vorgegebenen Konstruktion des Gebäudes, oft nicht eingehalten werden können, ist hier ein detaillierter Wärmebrückennachweis sinnvoll. Hierbei sind im Wesentlichen vier Schritte zu unterscheiden. Zunächst werden die Wärmebrücken in der Konstruktion detektiert und die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten bestimmt. Nach der Erstellung eines Längenaufmaßes kann dann der zusätzliche Wärmedurchgang berechnet werden. Konstruktionsempfehlungen für zahlreiche Details sind in so genannten Wärmebrückenkatalogen und Planungshandbüchern zusammengefasst [exemplarisch Hauser und Stiegel 2006, BV Kalksandsteinindustrie 2009].

Brandschutz beachten!

Neben der Vermeidung von Wärmebrücken durch eine kompetente ingenieurmäßige Planung aller relevanten Details, ist die Einhaltung der Vorschriften zum Brandschutz die wohl wichtigste Aufgabe bei der Planung. Insbesondere im Bereich der Fluchtwege von Gebäudekomplexen, Tiefgaragen und Tunnels werden hohe Anforderungen an die eingesetzten Materialien gestellt, um die Temperatur- und Rauchentwicklung im Brandfall so weit zu reduzieren, dass eine Evakuierung der Gebäudenutzer möglich ist. Im Hochhausbereich kommen ausschließlich nicht brennbare Materialien (mineralische Produkte) als Dämmstoff zum Einsatz, bei 1-2 geschossigen Anwendungen genügen normal entflammbare Baustoffe.

Verantwortlichkeit des Planers einfordern!

Es ist wichtig klar zu kommunizieren, dass der Planer (Architekt, Bauingenieur, Fachhandwerker) die Einhaltung aller amtlichen Vorschriften sicherstellen muss und auch für die Wahrung eines schadenfreien Betriebs verantwortlich ist. Dazu gehören neben der Beachtung von Brandschutzvorschriften auch die Berücksichtigung der baulichen Gegebenheiten hinsichtlich des nötigen Wärme- und Feuchteschutzes und nicht zuletzt auch die gestalterische Qualität.

Art und Umfang der Leistungen werden dabei in einer detailgenauen Ausschreibung festgelegt. Bei der Überwachung der Ausführung muss auf die Qualifikation der ausführenden Gewerke geachtet werden. Bestimmte Materialien dürfen beispielsweise nur von qualifizierten Betrieben verarbeitet werden (Einblasdämmung) die durch die systemgebenden Herstellerwerke entsprechend geschult wurden. Eine Weitergabe an Subunternehmer sollte nach Möglichkeit vermieden werden. Insbesondere bei Systemprodukten ist die ausschließliche Verwendung der im System beschriebenen

Produktkomponenten (Kleber, Putz, etc.) wichtig, um die Funktionalität und Dauerhaftigkeit der Maßnahme zu gewährleisten.

Durch Teilabschnittskontrollen kann die ordnungsgemäße Ausführung dokumentiert werden. Die zugehörigen Protokolle müssen vom ausführenden Unternehmer bestätigt werden und sind vom Bauherrn aufzubewahren.

Ausführungsinduzierte Schäden

Ausführungsinduzierte Schäden sind oftmals auf lückenhaft ausgeführte Dämmmaßnahmen oder auf das Versagen einzelner Systemkomponenten zurückzuführen.

Lücken vermeiden!

Zu unterscheiden sind Lücken in der Dämmebene und eine lückenhaft ausgeführte Luftdichtheitsschicht. Lücken in der Dämmebene entstehen häufig an komplex ausgebildeten Anschlussdetails. Dies können verwinkelte Gauben oder Wechsel, aber auch die Wandanschlüsse von Fenstern und Türen sein. Durch nicht maßgerechte Zuschnitte können auch an einfachen Bauteilen (Zwischensparrendämmungen) Luftschichten entstehen. Ein Zuschnitt im Untermaß führt zu Luftspalten an den Seiten des Bauteils. Tritt hier eine Taupunktunterschreitung auf, können sich beispielsweise Holzständer dauerhaft auffeuchten, was den Befall durch Mikroorganismen (Pilze) begünstigt.

Unsauber ausgeführte Luftdichtheitsschichten können insbesondere an den Verklebungen der Bahnen untereinander und im Bereich des Anschlusses unterschiedlicher Bauteile (Fenster – Wand) auftreten. Über diese Leckagen kann mit Wasserdampf beladene Raumluft in kältere Bereiche der Konstruktion eindringen. Kühlt sich die Luft ab, so steigt die relative Luftfeuchtigkeit an und kondensiert beim Überschreiten des Taupunkts aus. Neben der angesprochenen Auffeuchtung tragender Bauteile und Schimmelpilzbildung ist auch eine Auffeuchtung der Dämmstoffe selbst möglich. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des eingelagerten Wassers, erhöht sich auch die Wärmeleitfähigkeit des Materials – die Dämmwirkung lässt nach.

Systemgedanken beachten!

Bei der Verwendung von WDVS können Fehler insbesondere durch eine mangelhafte Vorbereitung des Untergrunds entstehen (bröckelige Putzreste, ungleichmäßiger Untergrund). Wenn die Plattenmaterialien nicht gleichmäßig an der Wand anliegen, werden die ringförmigen Verklebungsraupen unterbrochen und die Maßhaltigkeit der Fluchtlinien leidet. Insbesondere bei seitlichem Licht kann so ein welliger Eindruck entstehen. Die vom System vorgeschriebenen Klebstoffe müssen auf jeden Fall verwendet werden und Befestigungsdübel sind in ausreichender Zahl zu montieren. Eine unzureichende Befestigung kann aufgrund von Längenausdehnungen bei Temperaturschwankungen oder durch Windlasten auf der Leeseite des Ge-

bäudes (Saugwirkung) zu Ablösungen der Platten und in der Folge zu Rissen in der Putzschicht führen.

Das Putzsystem, bestehend aus Armierungsschicht, Putz und Anstrich muss ebenfalls aufeinander abgestimmt sein um Risse aufgrund unterschiedlicher Temperaturendeckungskoeffizienten oder nicht kompatibler Inhaltsstoffe bzw. ungenügender Ausbildung des Trägers zu vermeiden.

Die in den Medien oft zitierten Spechtschäden an WDVS sind kein flächendeckendes Problem und können zudem durch eine Reihe von Maßnahmen verhindert werden. Empfehlungen hierzu sind beispielsweise in einem Ratgeber des Landesbund für Vogelschutz zusammengefasst [LBV 2010]. Als einfache Abwehrmaßnahmen gelten Windspiele (spiegelnde Blechstreifen, CD-Ketten, Wimpelleinen) und Feindattrappen (Raubvogelattrappen). Von baulicher Seite her sind falls möglich verstärkte Putzsysteme, möglichst glatte Fassadenwerkstoffe (z. B. bei vorgehängten Fassaden) oder auch Fassadenbegrünungen mögliche Abwehrmaßnahmen. Ist trotzdem ein Loch in der Fassade, so muss zunächst geprüft werden, ob dieses aktuell benistet wird. Spechte und andere Höhlenbrüter stehen unter Artenschutz, weshalb mit dem Entfernen des Nistmaterials und dem Verschluss des Lochs in der Fassade bis zum Ausfliegen der Jungvögel gewartet werden muss. Wird das Loch anschließend verschlossen, so sollte evtl. noch vorhandenes Nistmaterial vorher entfernt werden. Um zukünftige Besiedelungen zu vermeiden, kann es zudem sinnvoll sein, in der Umgebung entsprechende Nistkästen aufzuhängen oder alternative Nistmöglichkeiten anzubieten.

Die Vermeidung von ausführungsimpulsierten Schäden ist wie beschrieben in der Verantwortung des Planers, der durch geeignete baubegleitende Qualitätssicherungsmaßnahmen (Teilabschnittskontrollen, Abnahmen) die Ausführung überwachen muss.

Nutzungsinduzierte Schäden

Durch falsches Nutzerverhalten provozierte Schäden sind in den häufigsten Fällen auf eine unzureichende Raumlüftung zurückzuführen, wenn keine automatische Raumlüftung (kontrollierte Lüftung) vorgesehen ist. Die Luftdichtheit eines Gebäudes ist eine wesentliche Voraussetzung zur Wirksamkeit von Dämmmaßnahmen. Anschaulich wird das Prinzip, wenn man die Situation eines gut gedämmten, aber undichten Gebäudes mit einer ausreichend dicken, aber zu kurzen Decke im Winter vergleicht – auch hier bleibt die Dämmwirkung gering, wenn durch den Luftspalt bei dem unter der Decke herausschauenden Fuß die Wärme schleichend nach außen entweicht.

Kontrolliertes Lüften!

Trotzdem ist eine gewisse Lüftung zur Sicherstellung einer hygienischen Raumlüftungsqualität wichtig. Durch eine automatische Lüftungsanlage wird den Räumen immer

genug Frischluft zugeführt. Über Wärmetauscher kann diese durch die Energie der (warmen) Abluft vorgewärmt werden, was die Energieverluste minimiert. Ist keine automatische Lüftungsanlage installiert, ist der Nutzer selbst für die ausreichende Lüftung der Räume verantwortlich. Kommt er dieser Aufgabe nicht oder nur unzureichend nach, so steigt durch interne Feuchtequellen (Kochen, Waschen, Schweiß, etc.) die relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft an.

Bei der Berechnung von Wärmebrücken werden bestimmte Randbedingungen der Nutzung angenommen, unter denen die Konstruktion schadensfrei bleibt. Dies wird durch die Einhaltung einer bestimmten Mindesttemperatur der inneren Bauteiloberflächen gewährleistet, die über der Taupunkttemperatur der Innenraumluft liegen muss. Wird die relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft unzulässig erhöht, so erhöht sich auch die Taupunkttemperatur. Unter ungünstigen Umständen kann dann im Bereich von Wärmebrücken Tauwasser ausfallen, was bei wiederholter und dauerhafter Einwirkung Feuchteprobleme (hauptsächlich Schimmelpilzwachstum) fördern kann.

Schäden können auch auftreten, wenn der Nutzer beispielsweise bei Innendämmmaßnahmen durch Installationen (nach der Dämmmaßnahme gesetzte Elektroinstallationen, Dosen, Dübel, etc.) die Luftdichtheitsebene durchdringt. In diesem Fall ist wieder das bereits beschriebene Eindringen von feuchter Raumluft in die (kälteren) Schichten der Konstruktion möglich.

Brandgefahr

Vorwurf: Brennbare Dämmstoffe führen zu unkontrollierbaren Brandentwicklungen über die Fassade!

Der Anteil an WDVS aus mineralischen (nicht brennbaren) Produkten lag 2012 bei lediglich 15 % aller verbauten WDVS. Aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen und aufgrund des günstigen Preises, werden im Bereich der WDVS, aber auch bei Innendämmmaßnahmen, überwiegend EPS Produkte eingesetzt. Durch Berichterstattungen in den Medien ist das Brandverhalten von Fassadendämmungen aus Schaumkunststoffen verstärkt in das Interesse der Öffentlichkeit gerückt. Spektakuläre Brandereignisse an WDVS Fassaden, z. B. in Berlin-Pankow 2005, Delmenhorst 2011 und Frankfurt 2012, legen den Verdacht nahe, dass bei Anwendung von WDVS aus Schaumkunststoffen die vertikale Brandweiterleitung über die Stockwerke hinweg deutlich erleichtert wird. Im Brandfall führt dies zu einer unkontrollierten Brandausbreitung. Rettungsmaßnahmen können im Weiteren durch abtropfendes Polystyrol erschwert werden.

Tatsache ist:

Zunächst muss klargestellt werden, dass die Brandweiterleitung über die Fassade nicht nur von der Brennbarkeit des verbauten Dämmstoffs abhängig ist. Bewertet werden muss vielmehr das gesamte Fassadensystem, welches aus Dämmstoff,

Armierung, Putz oder alternativen Fassadenbekleidungen (z.B. bei vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden) besteht. Je nach konstruktiven Gegebenheiten kann so die Entzündung des eingebauten Dämmstoffs wirkungsvoll verhindert werden. Gleiches gilt z. B. für Kerndämmungen, bei denen der Dämmstoff zwischen zwei Schichten Mauerwerk eingebaut ist und somit wirksam vor Entzündungen geschützt ist.

Bei näherer Betrachtung der in den Medien diskutierten Brandereignisse offenbart sich eine Gemengelage mit Interessenskonflikten zwischen Lobbyisten, Pusch am Bau, unklaren Regelungen auf nationaler und europäischer Ebene und den Erfordernissen der Energiewende. Nach der Aufklärung der Brandursachen kann in vielen Fällen Entwarnung gegeben werden. Meistens waren Baumängel im Spiel, es kam zu Entzündungen im unfertigen Zustand, es wurden unzureichende Schutzmaßnahmen beim Schweißen, Trennschneiden etc. getroffen, oder es wurden Bauauflagen und Anwendungsregeln verletzt. Die abgebrannten Fassaden hatten mitunter wenig mit einem ordnungsgemäß angebrachten WDVS gemeinsam. R. Eberl-Pacan beschreibt in seinem Beitrag in der Zeitschrift „Feuertrutz“ die gesetzlichen Grundlagen für den Einsatz von WDVS [Eberl-Pacan 2013]:

Anfang des wörtlichen Zitats:

Gesetzliche Grundlagen

Die Verwendung von WDVS an Fassaden ist in den Bauordnungen der Bundesländer geregelt. Je nach Gebäudehöhe (oder Gebäudeklasse) steigen die Brandschutzanforderungen an die verwendeten Baustoffe. Bei Gebäuden mittlerer Höhe (ab etwa vier Geschossen oder Gebäudeklasse 4) muss die Oberfläche der Außenwand (Fassade) nach den Bauordnungen, übereinstimmend in allen Bundesländern, schwer entflammbar sein oder der Baustoffklasse B 1 entsprechen. Die Anforderung schwer entflammbar soll verhindern, dass sich ein Brand, z. B. aus dem geborstenen Fenster eines Wohnraums, über die Fassade zu schnell nach oben ausbreitet: über mehr als zwei Geschosse oberhalb der Brandstelle und vor dem Löschangriff der Feuerwehr (ca. 15 bis 20 Minuten). Das eventuelle Mitbrennen der Außenwandbekleidung wird bei Wohngebäuden bis zur Hochhausgrenze in Kauf genommen. Fassadenbekleidungen, die schwer entflammbar sein müssen, werden nach DIN 4102-15 durch Brandschachtversuche in Materialprüfanstalten geprüft, bewertet, klassifiziert und überwacht. Für das Brandverhalten von Systemen mit Dämmstoffdicken > 100 mm wurde im Entwurf der DIN 4102-20 in Deutschland ein Großversuch definiert, der für die Zulassung schwer entflammbarer Fassadensysteme mit Polystyrol-Hartschäumen durchgeführt werden muss. Mit einer solchen Prüfung wird nachgewiesen, dass das Fassadensystem nicht zu einer Brandweiterleitung über die Fassade beiträgt. Dies entspricht den Zulassungsgrundsätzen des DIBt, das auf der Basis bestandenen Prüfungen allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) erteilt, mit denen Hersteller und Baufirmen auf der Baustelle die sichere Verwendbarkeit der Systeme nachweisen können.

Regelungswirwar in Europa

Trotz aller Anstrengungen, Bauprodukte europäisch einheitlich zu regeln, gelang dies bei WDVS bisher nicht. Der sogenannte SBI-Test - europaweit für die Klassifizierung von thermoplastischen Schaumstoffen (z. B. EPS) nach DIN EN 13501-1 erforderlich - bleibt in Deutschland umstritten. Trotz Nachbesserungen der Prüf- und der Produktnorm streuen - nach Auffassung des Industrieverbandes Hartschaum e.V. (IVH) - die dort erzielten Prüfergebnisse extrem stark: Der Beitrag der Polystyrol-Hartschaumplatten bei der Brandausbreitung sei nur unzureichend charakterisierbar. Die Einstufungen in die Klassen A bis D (nach SBI) seien im Wesentlichen abhängig von der Dicke und Dichte des geprüften Produktes sowie von der Art der Befestigung im Prüfgerät. Zur Differenzierung zwischen den europäischen Baustoffklassen B, C und D wird zusätzlich die Kleinbrennerprüfung nach DIN EN ISO 11925-2 gefordert. Dabei würde das bisher als B- s1, d0 ¹⁾ (schwer entflammbar) beurteilte EPS in Zukunft als D – s1, d0 (normal entflammbar) eingestuft. Eine Verwendung von WDVS-Fassaden an Gebäuden der Gebäudeklassen 4 oder 5 wäre dann ohne weitere Brandschutzmaßnahmen nicht mehr möglich....

...Der an Gebäuden verbaute Dämmstoff wird in einem fertiggestellten WDVS für mindestens 30 Minuten vor Feuer geschützt. Das geschieht durch ein Armierungsgewebe aus Glasfasern und überwiegend (> 90 %) nichtbrennbaren Putzen, die auch ein Lauffeuer an der Oberfläche verhindern sollen. Tatsächlich kann sich bei einem WDVS an der Fassade im Brandfall ein gefährliches Szenario abspielen. Schlagen etwa Flammen bei einem Brand aus einem Fenster, setzen sie die Putzschicht des WDVS und den darunterliegenden Dämmstoff starker Hitze aus. Der Dämmstoff aus EPS wird weich und schmilzt bereits ab einer Temperatur von ca. 140 °C. Die brennbare Schmelze sammelt sich über dem Putz des Sturzes innerhalb des WDVS und ist von außen weder sichtbar noch zugänglich. Da sie durch die Flammen weiter erhitzt wird, verdampft sie teilweise und pyrolysiert zu brennbaren Gasen. Diese Gase dehnen sich aus und drücken von innen auf den Putz. Wird der Druck zu groß und das Gewicht auf dem Sturz zu hoch, reißt die schützende Putzschicht (mechanisches Versagen). Die Flammen dringen in das WDVS, entzünden die brennbaren Gase und es kommt zu einem explosionsartigen Brand an der darüberliegenden Fassade. Dieser gefährliche Vorgang stellt sich umso eher ein, je dicker die Dämmung ist. Spätestens bei Dämmstoffdicken über 100 mm müssen deshalb Brandschutzmaßnahmen ergriffen werden, die ein mechanisches Versagen wirkungsvoll verhindern. Zum Schutz der brennbaren Dämmung vor dem Erhitzen und Abschmelzen sind in den Zulassungen der WDVS i. d. R. zwei Varianten vorgesehen: Sturzschutz oder Brandriegel Beide Varianten sind gleichwertig. Die Auswahl der geeigneten Maßnahme bleibt dem Planer und der ausführenden Firma überlas-

¹ Anmerkung der Autoren: EPS konnte auch bisher nicht als B-s1,d0, also als schwer entflammbar mit wenig Rauchentwicklung und ohne brennendes Abtropfen nach den europäischen Brandklassen, klassifiziert werden. Gemeint ist hier wahrscheinlich die nationale Einstufung in B1 (schwer entflammbar).

sen. Die Ausführungsdetails sind den jeweiligen Verwendbarkeitsnachweisen (Zulassungen) zu entnehmen.

Ende des wörtlichen Zitats.

Generell sind Schaumkunststoffe auf Basis von Polystyrol (als hauptsächlich in der Kritik stehender Rohstoff) wie alle anderen Dämmstoffe auf Basis organischer Rohstoffe brennbar. Die Entzündbarkeit, das Brandverhalten (Vollbrand, Schwelen, Glimmen) und die Brandweiterleitung können durch die Zugabe von Additiven beeinflusst werden. Diese auch als Flammschutzmittel bezeichneten Produkte haben unterschiedliche Wirkprinzipien. Unterschieden wird allgemein eine chemische und physikalische Wirkung. Die genauen Wirkmechanismen, wie die Unterbrechung der Radikalkettenreaktion, die Bildung einer Schutzschicht zur Unterbrechung der Wärme- und/oder Sauerstoffzufuhr, die Verdünnung der brennbaren Gase oder die Kühlung durch Kondensationsprodukte können der Fachliteratur entnommen werden.

Neben der Ausrüstung der Produkte mit Flammschutzmitteln kann die Brandweiterleitung über die Fassade auch durch konstruktive Maßnahmen eingeschränkt werden. Die Unterbrechung der brennbaren Dämmstofffläche mit einem Brandschutzriegel oder einem Sturzschutz aus nicht brennbarem Material (z. B. Mineralwolle) kann wirkungsvoll die Brandweiterleitung über die nächste Geschosshöhe hinaus verhindern (Abbildung 98).

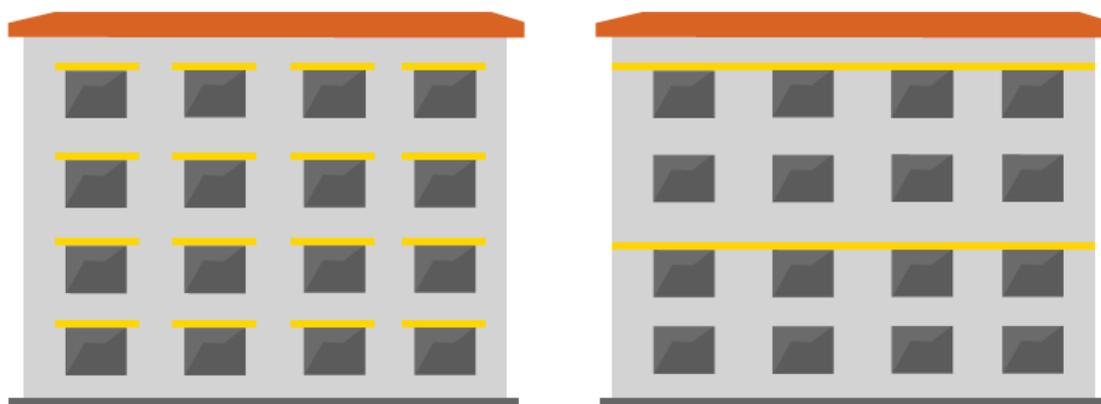


Abbildung 98: Sturzschutz (links) und Brandschutzriegel (rechts) zur Verhinderung der Brandweiterleitung über die Fassade (Quelle: [WID 2013])

Brandschutzriegel verlaufen umlaufend in jedem zweiten Geschoss um die Fassade herum und begrenzen somit die Brandausbreitung über die ganze Fassadenbreite. Der sogenannte Sturzschutz wird hingegen jeweils direkt über dem Fenster angebracht und verleiht dem Sturzbereich zusätzliche Stabilität und verhindert das Eindringen des Feuers in die Dämmschicht. Der Sturzschutz kann wie die Brandschutzriegel aus Mineralwolle hergestellt werden – alternativ kann die Dämmschicht hier auch über eine Lage aus Glasgewebe geschützt werden.

Die Anforderungen an das Brandverhalten der Baustoffe sind in den Landesbauordnungen geregelt. Abhängig von der Höhe des Gebäudes bestehen unterschiedliche Anforderungen an das Brandverhalten der eingesetzten Dämmstoffe (Tabelle 36). Bei WDVS kommt noch erschwerend hinzu, dass die europäischen Brandklassen des Systems selber und die Zusatzanforderungen der DIN EN 13501-1 derzeit in vielen Punkten nicht zu den nationalen Festlegungen passen, oder diesen widersprechen. Hier müssen die Ungereimtheiten zwischen nationalen und europäischen Regelungen umgehend vereinheitlicht werden.

Baustellen bergen eine Vielzahl von Gefahrenquellen. Der Spitzenverband der gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) empfiehlt daher Baustellen vor dem Zugang von fremden Personen zu sichern und Brandstiftung vorzubeugen. Brennbar Materialien und Abfall sollten im ausreichenden Abstand (≥ 5 m) von Gebäuden oder in verschließbaren Metallcontainern lagern. Bei Feuer- und Heißarbeiten wie Schweißen oder Trennschleifen ist auf brennbares Material zu achten – dazu gehört beispielsweise auch EPS. Geeignete Feuerlöscher sind grundsätzlich einsatzbereit in der Nähe zu halten. Auch nach Feuer- und Heißarbeiten ist der Arbeitsbereich zu kontrollieren (Brandwache) [WID 2013].

Tabelle 36: Anforderungen an das Brandverhalten von Fassadenbekleidungen einschließlich der Dämmstoffe in Abhängigkeit der Gebäudehöhe [Eberl-Pacan 2013]:

Gebäudehöhe ¹ Gebäudeklasse nach Landesbauordnung LBauO	Brandschutzanforderung nach LBauO ²	Baustoffklasse		Zusatzanforderung nach DIN EN 13501-1 ^{3,4}	
		Nach DIN 4102-1 (national)	Nach DIN EN 13501-1 (europäisch)	Kein Rauch (s=smoke)	Kein brennendes Abfallen/Abtropfen (d=droplets)
0 bis 7 m Gebäudeklasse 1 – 3 Gebäude geringer Höhe	normal entflammbar	B2	D1-s1,d0		X
			*		
			E-d2		
> 7 m Gebäudeklasse 4 und 5	Schwer entflammbar	B1	B1-s1,d0	X	X
			*		
> 7 bis 22m Gebäude mittlerer Höhe			A2-s1,d1	X	
			*		
			A2-s3,d2		
	*	C-s3,d2			
> 22 m Hochhaus (Sonderbau)	Nicht brennbar	A	A1	X	X
			A2-s1,d0		
¹⁾ Höhe Oberkante Fußboden oberstes Geschoss	²⁾ Bei Sonderbauten ggf. höhere Anforderungen	³⁾ In den europäischen Prüf- und Klassifizierungsregeln ist das Glimmverhalten von Baustoffen nicht erfasst. Für Verwendung, in denen das Glimmverhalten erforderlich ist, ist das Glimmverhalten nach nationalen Regeln nachzuweisen.			
		⁴⁾ Mit Ausnahme der Klassen A1 (ohne Anwendung der Fußnote c zu Tabelle 1 der DIN EN 13501-1) und E kann das Brandverhalten von Oberflächen von Außenwänden und Außenwandbekleidungen (Bauarten) nach DIN EN 13501-1 nicht abschließend qualifiziert werden.			
Die Tabelle der Anforderungen nach DIN EN 13501-1 ist stark vereinfacht dargestellt. Eine Anwendung der Tabelle auf die Verwendung von WDVS in Deutschland ist derzeit (01/2013) nicht möglich.					

Auf der 124. (Sonder-)Bauministerkonferenz im März 2013 wurden die Ergebnisse der Analyse von insgesamt 18 Brandfällen durch den Ausschuss für Stadtentwicklung, Bau- und Wohnungswesen (ASBW) vorgestellt. Die Analyse ergab, dass für den Fall von aus einer Wandöffnung schlagenden Flammen (Wohnungsbrand der durch das Fenster nach außen schlägt), die Anforderungen an die verbauten Wärmedämmverbundsysteme entsprechend der Zulassung als ausreichend betrachtet werden können. Wie sich Brandereignisse, die außerhalb eines Gebäudes ausgelöst werden (brennender Müllcontainer, etc.) auswirken, wird aktuell durch weitere Versuchsreihen unter Naturbrandbedingungen untersucht. Nach Abschluss der Untersuchungen sollen Vorschläge zur weiteren Verbesserung der Montage von Wärmedämmverbundsystemen aus Polystyrol und zur Sicherheit auf Baustellen erarbeitet werden [BMK 2013].

Entsorgung

Vorwurf: Dämmstoffe werden nach dem Rückbau zum Entsorgungsproblem!

Im Jahr 2010 wurden ca. 28 Mio. m³ an Dämmstoffen abgesetzt. Neben Mineralwolle ist EPS mit ca. einem Drittel an der Gesamtmenge eines der marktbestimmenden Materialien. Im Bereich WDVS wurden ca. 41,8 Mio m² durch Wärmedämmverbundsysteme belegt. Hier überwiegt der Anteil an EPS

Wird die Haltbarkeit von Fassaden mit WDVS innerhalb eines Sanierungszyklus von ca. 50 Jahren angesetzt, so steht die heute innerhalb Jahresfrist verbaute Menge an EPS nach dieser Zeit zum Rückbau an. Angesichts dieser in Zukunft anfallenden großen Mengen, nicht biologisch abbaubarer Produkte, wird in der Berichterstattung immer wieder die kritische Frage gestellt, wie das Problem der Entsorgung zukünftig gelöst werden kann. Neben dem zukünftig im Rahmen von Rückbau und Ersatz innerhalb des Sanierungszyklus anfallenden Materialaufkommen, wirft auch der bei Montage der Dämmstoffsysteme anfallende Verschnitt (ca. 3 – 7 %) die Frage nach einer sinnvollen Verwertung auf.

Tatsache ist:

Bei der Verwertung von Materialien aus Rückbau oder Verschnitt, ist zunächst eine stoffliche Nutzung anzustreben, gleichwohl oft eine thermische Verwertung ohne vorangestellte Kaskadennutzung durchgeführt wird.

Wiederverwendung!

Innerhalb der stofflichen Nutzung kann als einfachste Form der Abfallbewirtschaftung die Wiederverwendung bezeichnet werden. Das heißt das Produkt wird ohne Auflösung der Struktur an anderer Stelle wiederverwendet. Dieses Verfahren setzt voraus, dass der Dämmstoff schadensfrei ausgebaut und nach einer Aufbereitung oder Reinigung an anderer Stelle mit weitgehend gleicher Funktionalität wieder eingebaut werden kann. Diese Forderung ist bei plattenförmigen WDVS durch die Verklebung mit dem tragenden Untergrund und der flächig anhaftenden Putzschicht praktisch nicht einzuhalten. Auch wenn es erste Überlegungen zu WDVS mit eingebauten Sollbruchstellen gibt, die einen Rückbau erleichtern würden, so führt eine Demontage trotzdem in jedem Fall zu einer weitgehenden Zerstörung des Materials.

Gleichwohl gibt es im Bereich Dämmstoffe auch Materialien die problemlos ausgebaut und wiedereingebaut werden können. Hierunter fallen i. d. R. alle losen Schüttdämmstoffe wie Altpapierflocken oder mineralische Partikel (Blähglas, Perlite). Diese können durch pneumatische Förderverfahren aus dem Bauteil abgepumpt werden und stehen nach einer Aufbereitung für eine erneute Verwendung zur Verfügung. In der Regel erfolgt eine Rücknahme über den Hersteller, der das Material als Zuschlag in die Produktion neuen Materials einfließen lässt.

Recycling!

Ist eine Wiederverwendung, wie bei den losen Schüttdämmstoffen, nicht oder nur mit hohem Aufwand umsetzbar (Bsp. WDVS), so ist trotzdem ein Recycling des Materials möglich. Recycling bezeichnet die stoffliche Aufbereitung eines Produkts am Ende seiner Lebensdauer, um vermarktungsfähige Rohstoffe zu erhalten, die in anderer Form für die gleiche oder andere Anwendungen zur Verfügung stehen.

Beispielsweise kann der Verschnitt bei der Montage plattenförmiger Materialien aus Hartschaum problemlos zerkleinert werden und das entstehende Granulat steht anschließend, von Fremdstoffen gereinigt, für die weitere Verwendung zur Verfügung. Je nach Material können die Partikel der Produktion neuer Platten zugeführt werden. Bei EPS können beispielsweise bis zu 8 % recycelten EPS der Produktion zugeführt werden und aus granulierten PU Hartschaumplatten können in einem Pressverfahren neue plattenförmige Werkstoffe für konstruktive und wärmedämmende Anwendungen hergestellt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Verwendung von losem Granulat als Ausgleichschüttung, Füllstoff/Leichtzuschlag (bspw. zur Porosierung von Ziegeln) oder dem Einsatz als losen Dämmstoff. Teilweise ist auch eine Verwendung zur Herstellung von Hartschaumblöcken für minderwertige Anwendungen im Bereich des Verpackungswesens (Downcycling) möglich.

Neben den angesprochenen stofflichen Verwertungsmöglichkeiten besteht prinzipiell auch die Möglichkeit einer Rückgewinnung der eingesetzten Rohstoffe. Ein Beispiel hierfür ist die Rückgewinnung von Polyolen aus PU Schaum mittels Acidolyse. Das Verfahren ist erst seit kurzem im industriellen Maßstab umgesetzt. Die zurückgewonnenen Basispolyole können für unterschiedliche Anwendungen (Hart- und Weichschäume) eingesetzt werden. [Rampf 2013]

Auch bei Mineralwolle kann der anfallende Verschnitt über die Hersteller zurückgeführt und in zerkleinerter Form beispielsweise als Einblasdämmung verwendet werden.

Aber auch ein Recycling von rückgebauten WDVS ist möglich. Durch die hohe Verbundfestigkeit sind allerdings aufwändigere Methoden zur Trennung der Komponenten Klebstoff, Dämmstoff, Armierungsträger und Putz nötig. Ein aktuelles Forschungsvorhaben mit dem Titel „Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des Wärmedämmverbundsystems nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur thermischen Verwertung“ beschäftigt sich mit Techniken zur mechanischen Trennung der beteiligten Komponenten. Das Vorhaben wird vom Fachverband WDVS, dem Industrieverband Hartschaum und dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) finanziert. Die abgetrennten mineralischen Bestandteile des WDVS können weiter zerkleinert werden und stehen als Be-

tonsand, Ziegelsplit oder Betonschotter für Anwendungen im Straßen- und Wegebau oder zur Geländefüllung zur Verfügung.

Thermische Verwertung!

Sind alle Möglichkeiten einer Kaskadennutzung erschöpft, ist als letzter Schritt auch eine thermische Verwertung möglich. Dabei lässt sich die für die Herstellung aufgewendete Energie etwa zur Hälfte in Form von Wärme zurückgewonnen und steht für andere Industrieprozesse und Anwendungen zur Verfügung. Auch das Volumen wird durch die Verbrennung stark verkleinert – in etwa um den Faktor 50 – 150. Durch kontrollierte Verbrennungsversuche wurde nachgewiesen dass die in Hartschäumen enthaltenen Flammschutzmittel bei einer kontrollierten Temperaturführung keine Nachteile auf die thermische Verwertung haben. Durch Rauchgaswaschanlagen werden schädliche Emissionen aus der Verbrennung wirkungsvoll verhindert. Diese Systeme sind in deutschen Müllverbrennungsanlagen Standard.

9 Qualitätssicherung und vorgeschriebene bzw. freiwillige Gütesiegel oder Qualitätszeichen

9.1 Kennzeichnung von europäisch harmonisierten Bauprodukten

Europäisch harmonisierte Bauprodukte sind solche, die entweder unter eine harmonisierte europäische Norm (hEN) fallen oder für die ein europäisches Bewertungsdokument erteilt ist. Für beide gilt der Oberbegriff „Harmonisierte Technische Spezifikationen“ (vgl. Art. 17 ff. EU-BauPV). Die Europäische Bauproduktenverordnung (EU-BauPV) ist seit dem 01.07.2013 als unmittelbar auch in Deutschland geltendes Recht vollständig in Kraft und ersetzt zum einen die nicht unmittelbar geltende Europäische Bauproduktenrichtlinie (BPR), aber zum anderen auch die auf dieser basierenden nationalen gesetzlichen Regelungen der Mitgliedsstaaten.

CE-Kennzeichnung

Die CE-Kennzeichnung ist für Bauprodukte, die unter eine hEN fallen, durch Art. 8 ff. EU-BauPV vorgeschrieben und signalisiert, dass das Bauprodukt die vorgeschriebenen Konformitätsverfahren durchlaufen hat. Basis der CE-Kennzeichnung ist die jeweilige Leistungserklärung (Art. 4 ff. EU-BauPV). Ohne Leistungserklärung und CE-Kennzeichnung darf das harmonisierte Produkt nicht auf den Markt gebracht werden. Die ordnungsgemäße CE-Kennzeichnung gibt dem jeweiligen Empfänger des Bauprodukts die Sicherheit, dass dieses gehandelt und als Bauprodukt generell verwendet werden darf, sagt jedoch nicht aus, für welche konkrete Anwendung in einem Bauwerk das Bauprodukt nach den Vorschriften eines Mitgliedsstaates eingesetzt werden darf. Es ist im eigentlichen Sinne kein Qualitätskennzeichen.

Übereinstimmungszeichen (Ü-Kennzeichnung)

Das auf einem Bauprodukt angebrachte Ü-Zeichen ist die Dokumentation dafür, dass nach deutschem Bauordnungsrecht der Länder für dieses Bauprodukt eine Übereinstimmung mit einer bauaufsichtlichen Grundlage wie z.B. einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) festgestellt wurde, in welcher sich ebenfalls Hinweise für einen Verwendungszweck des Bauprodukts finden können. Eine abZ wird vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) auf Antrag des Herstellers erteilt. Für die jeweilige abZ evtl. zu berücksichtigende nationale Anforderungen finden sich in der jeweils aktuell vom DIBt auf dessen Website vorangekündigten bzw. veröffentlichten Bauregelliste (BRL).

Bauprodukte die in der geltenden Version der Bauregelliste (BRL) genannt werden, dürfen, eventuell unter Beachtung von Auflagen, für die dort vorgesehene Anwendung verwendet werden. Dort nicht gelistete Bauprodukte oder nicht geregelte Anwendungen erfordern eine abZ.

Freiwillige Qualitätszeichen

Solche Qualitätszeichen oder Gütesiegel wurden in der Vergangenheit und werden auch heute umfänglich verwendet. Sie werden, zumindest soweit es sich um private Zeichen handelt, anscheinend durch die EU-BauPV nicht generell ausgeschlossen, sondern dürfen nur nicht im direkten räumlichen und inhaltlichen Zusammenhang mit der CE-Kennzeichnung verwendet werden. Zu beachten sind bei derartigen Zeichen jedoch die sonstigen juristischen, insbesondere wettbewerbsrechtlichen Anforderungen.

Wärmedämmstoffe im Besonderen

Die europäisch harmonisierten Produktnormen u. a. EN 13162 bis EN 13171 der Wärmedämmstoffe werden nach Bekanntmachung im Amtsblatt der Europäischen Union und Aufnahme in der Liste der harmonisierten Normen (Liste der hEN's: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/european-standards/harmonised-standards/construction-products/index_en.htm) auch in Deutschland in der BRL B Teil 1 Abschnitt 1.5 aufgeführt. Die Verwendung dieser CE-gekennzeichneten Bauprodukte ist damit grundsätzlich ohne weiteres möglich. Es sind jedoch einige in der BRL erwähnte Anlagen und Nebenbestimmungen produktabhängig zu beachten. Darüber hinaus ist die Beantragung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung zur Festlegung des Bemessungswertes der Wärmeleitfähigkeit nach Kategorie II der DIN 4108-4 (siehe nachfolgende Erläuterungen) dem Hersteller freigestellt. Zwischen Deutschland als Mitgliedsstaat und der EU besteht schon unter der Geltung der BPR Streit über die Zulässigkeit von abZ für harmonisierte Bauprodukte und der BRL; insoweit ist seitens der EU gegen Deutschland vor dem Europäischen Gerichtshof ein Klageverfahren anhängig, welches noch nicht entschieden ist. Es ist nicht Aufgabe dieser Studie, darüber zu befinden und insoweit eine Position zu beziehen. Es wird im Weiteren von der derzeitigen Situation ausgegangen.

Die Hersteller dokumentieren in Deutschland die Übereinstimmung eines Wärmedämmstoffes mit den Anforderungen einer abZ, indem sie unter Beachtung der erteilten abZ das Ü-Zeichen sowie zusätzliche Angaben auf dem Produkt, dem Beipackzettel oder der Verpackung anbringen.

Die EU-BauPV regelt in Art. (3), dass die CE-Kennzeichnung die einzig zulässige Kennzeichnung im Hinblick auf die Konformität der Produkte mit den deklarierten Leistungen nach einer harmonisierten Norm ist.

In Deutschland wird jedoch dennoch auf Antrag weiterhin eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) für Dämmstoffe verbunden mit einer Überwachung und Zertifizierung der betroffenen Produkte erteilt; bisher geltende abZ's werden nicht widerrufen. Die Überwachung und Zertifizierung führt dann zur Kennzeichnung mit dem entsprechenden Übereinstimmungszeichen (Ü-Zeichen) unter Angabe der Zertifizierungsstelle.

Dämmstoffe, die eine abZ nutzen und das Ü-Zeichen tragen, unterliegen einer Überwachung und Zertifizierung. Die Überwachung und Zertifizierung führt zur verbindlichen Kennzeichnung mit dem entsprechenden Ü-Zeichen unter Angabe der Zertifizierungsstelle. Das Ü-Zeichen ist klar getrennt vom CE-Zeichen anzubringen.

Folgen für die Praxis

Mit Einführung der Bauproduktenverordnung nach europäischer Norm zum 1. Juli 2013 müssen Hersteller die wesentlichen Eigenschaften eines Produktes deklarieren. So ist es verpflichtend, den Nennwert der Wärmeleitfähigkeit λ_D neben dem CE-Zeichen anzugeben (Abbildung 99). Für viele Planer, Architekten und Energieberater fängt hier das Problem an. Welcher der von den Herstellern ausgewiesene Wert der Wärmeleitfähigkeit ist für die Berechnung des U-Wertes und damit für den Nachweis des ausreichenden Wärmeschutzes zu verwenden? Ist es der Bemessungswert λ , der deklarierte Nennwert λ_D oder der Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit λ_{Grenz} ?

Chargenr. bzw. Herstelldatum  06 LE-13.1-WDV-032-kd-IR	EN 13 163: 2012 Fassadendämmplatte	EPS-EN 13163-L(2)-W(2)-T(1)-S(2)-P(3)-DS(70,-)2-BS100-DS(N)2-TR100-SS50-GM1000
	Nennstärke 100 mm Format 1000x500 mm Stück 4 Fläche 2 m ² λ_D 0,031 W/(mK) R_D 3,20 m ² K/W RtF - E	Querkzugfestigkeit ≥ 100 kPa Dimensionsstabilität DS(N) $\leq 0,2$ % Dimensionsstabilität DS(70,-) ≤ 2 % Scherfestigkeit ≥ 50 kPa Schermodul ≥ 1000 kPa MUSTER Dämmtechnik GmbH & Co. KG Musterstraße 1, 12345 Musterstadt 01234 567-0

Quelle: IVH Heidelberg 2013

Abbildung 99: Beispielhaftes Etikett, wie ein Dämmstoff mit Einführung der Bauproduktenverordnung nach europäischer Norm zu deklarierten ist. Die Hersteller müssen den Nennwert der Wärmeleitfähigkeit λ_D von 0,031 W/(m·K) (neben dem CE-Zeichen) angeben. Der Planer müsste in diesem Fall für die Berechnung des U-Wertes nach deutschem Baurecht einen Bemessungswert von 0,037 W/(m·K) verwenden.

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) ist nach deutschem Bauordnungsrecht eine festgelegte Größe für den Wärmeverlust eines Bauteils und entsprechend der DIN EN ISO 6946 zu ermitteln. In diesen wärmeschutztechnischen Berechnungen ist als Eingangsgröße der **festgelegte Bemessungswert** für die Wärmeleitfähigkeit der Bauprodukte zu verwenden. Es kann kein anderer Wert für die Berechnung des

U-Wertes benutzt werden. Dieser Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ für Dämmstoffe und andere Baustoffe ist in der DIN 4108, Teil 4, definiert. In der DIN sind zwei mögliche Verfahren festgelegt, die alternativ angewendet werden können.

Für Bemessungswerte, die sich nach Kategorie I ableiten, geht man von dem Nennwert der Wärmeleitfähigkeit λ_D aus. Auf diesen Wert wird ein Sicherheitszuschlag von 20 % addiert Dieser mit 20 % Sicherheit ermittelte Wert ist dann der für die U-Wertberechnung zu verwendende Bemessungswert λ .

Das heißt, wenn mit dem angegebenen λ_D -Wert aus der Leistungserklärung der Wärmedurchgangskoeffizient U für ein Bauteil berechnet wird, so muss bei λ_D ein Sicherheitszuschlag von 20 % und bei R_D ein Abschlag von 20 % angesetzt werden.

WDVS-Platte xyz 032 WDV		
<p>[Werk] Z-23.15... BFA QS EPS BWU 31</p>	WDVS-Fassadendämmplatte gemäß Anwendungstyp WAP nach DIN 4108-10 und gemäß ETAG 004	Artikelnr. 0815 9 780201 379624 Bemessungswert gem. DIN 4108-4 u. abZ λ 0,032 W/(mK)
	EPS 032 WDV Qualitätstyp nach Qualitätsrichtlinie IVH und FV WDVS	B1 Baustoffklasse nach DIN 4102 BFA-Nr. Rohstoff 2.3285 schwerentflammbar (B1): horizontal als sichtbare Deckenbekleidung ($d \leq 80\text{mm}$); unter Estrichen; vertikale Anordnung
Chargennr. bzw. Herstelldatum <p>06 LE-13.1-WDV-032-kd-IR</p>	EN 13 163: 2012 Fassadendämmplatte Nennstärke 100 mm Format 1000x500 mm Stück 4 Fläche 2 m ² λ_D 0,031 W/(mK) R_D 3,20 m ² K/W RfF - E	EPS-EN 13163-L(2)-W(2)-T(1)-S(2)-P(3)-DS(70,-)2-BS100-DS(N)2-TR100-SS50-GM1000 Querkzugfestigkeit ≥ 100 kPa Dimensionsstabilität DS(N) $\leq 0,2$ % Dimensionsstabilität DS(70,-) ≤ 2 % Scherfestigkeit ≥ 500 kPa Schermodul ≥ 1000 kPa MUSTER Dämmtechnik GmbH & Co. KG Musterstraße 1, 12345 Musterstadt 01234 567-0

Quelle: IVH Heidelberg 2013

Abbildung 100: Musteretikett wie es seit 1. Juli 2013 auf allen Dämmstoffen in Deutschland zu finden sein sollte. Durch die bauaufsichtliche Zulassung und Fremdüberwachung, dokumentiert durch das Ü-Zeichen und ein Übereinstimmungszertifikat, ist ein Bemessungswertes von 0,032 W/(m·K) geregelt (siehe oben rechts: Bemessungswert λ).

Die zweite nach DIN 4108-Teil 4 alternative Möglichkeit zur Bestimmung des Bemessungswertes der Wärmeleitfähigkeit, die als Kategorie II bezeichnet wird, geht von einem sog. „Grenzwertkonzept“ und einem „Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit“ aus, was in einer „technischen Spezifikation“ zu regeln ist. Vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBT) werden dazu allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) (Z-23.15-XXXX) erteilt, die eine Fremdüberwachung und Zertifizierung fordern. Die Kategorie II spricht von einem Grenzwert λ_{Grenz} , der im Rahmen der Überwachung des jeweiligen Dämmstoffes festgelegt wird. Dieser Grenzwert muss zur Berechnung des Bemessungswertes mit einem Sicherheitszuschlag von 5 % addiert werden. Deshalb erfolgt hier der geringere Zuschlag gegenüber der Kategorie I von nur 5 %. Dieser Wert ist dann auch ein Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit, der auf dem Etikett und dem Übereinstimmungszertifikat ausgewiesen werden muss und

vom Anwender für seine Berechnungen verwendet werden kann. Schnell und einfach zu erkennen sind Produkte der Kategorie II u. a. auf den Paketeinlegern/Etiketten durch das Ü-Zeichen (Übereinstimmungszeichen) dessen rechtmäßige Verwendung durch ein Übereinstimmungszertifikat einer bauaufsichtlich anerkannten Zertifizierungsstelle dokumentiert wird. Das Ü-Zeichen ist als zusätzliche Kennzeichnung zum CE-Zeichen angebracht. (Abbildung 100). Das bedeutet in der Praxis, dass ein mit dem Ü-Zeichen ausgewiesener Dämmstoff zum Beispiel bei der Sanierung einer Außenwand nach EnEV in der Ausführung um ca. 2 cm, bei Sanierung nach Passivhausstandard sogar 4 cm schlanker auszuführen ist, im Vergleich zu einem Dämmstoff nur mit CE-Zeichen und Anwendung von Kategorie I nach DIN 4108-4.

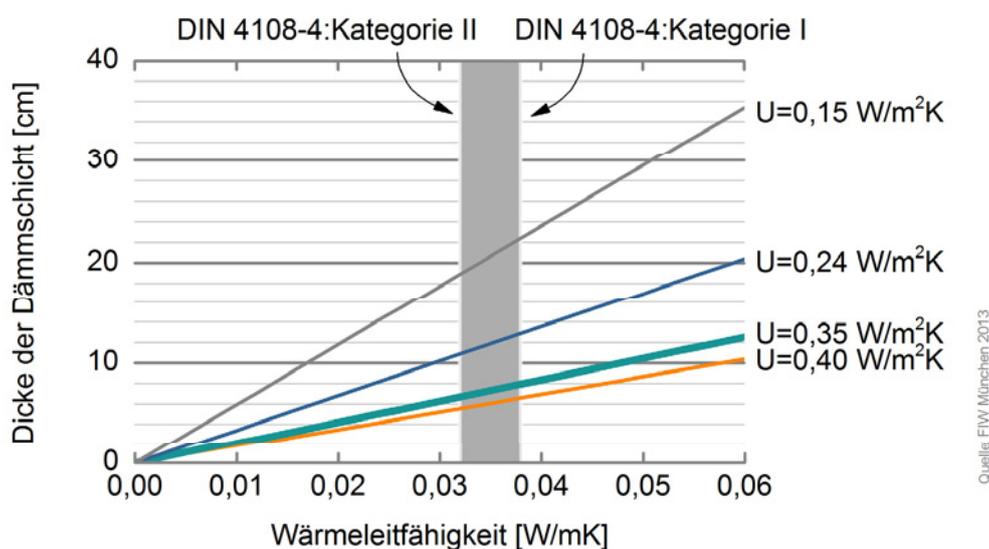


Abbildung 101: Einfluss eines Übereinstimmungszertifikats und einer Fremdüberwachung auf die erforderliche Dicke der Dämmschicht zur Erfüllung gewisser Standards für eine Außenwand. Der graue Bereich bildet die Grenzen zwischen Kategorie I und II. Soll zum Beispiel nach Passivhausstandard gebaut werden erhöht sich die erforderliche Dicke von 19 auf 23 cm bei Verwendung des gleichen Dämmstoffes mit und ohne Ü-Zeichen.

9.2 Freiwillige Produktzertifizierung

Für die Praxis ist es wichtig, zwischen drei Fällen zu unterscheiden:

1. der technischen Brauchbarkeit und damit Verwendbarkeit eines Bauprodukts, die maßgeblich von der Einhaltung der einschlägigen technischen Normen abhängt,
2. die Anwendbarkeit eines Bauprodukts, die maßgeblich von der Einhaltung der einschlägigen bauaufsichtlichen Bestimmungen abhängt und
3. der Verbrauchersicherheit eines Bauprodukts, die davon abhängt, ob eine Gefährdung von der vorhersehbaren Verwendung und Anwendung des Bauprodukts - gegebenenfalls trotz einer einwandfreien technischen Beschaffenheit - ausgehen kann.

Die Hersteller-Endverbraucher Beziehung im Sinne der Europäischen Regelung seit der Umsetzung der Bauproduktenrichtlinie im Jahr 2000 stellt sich wie folgt dar. Der Hersteller erklärt in der Leistungserklärung in Eigenverantwortung alle Eigenschaften des Dämmstoffes und überlässt dem Kunden und dem Verwender, der auch Endverbraucher sein kann, die Kaufentscheidung aufgrund dieser Angaben. Durch die differenzierten und vielfältigen Regelungen ist vielfach der Endverbraucher überfordert, allen nationalen und europäischen Anforderungen gerecht zu werden. In der EU-BauPV ist es nicht vorgesehen, dass die Eignung eines Wärmedämmstoffes für eine bestimmte Anwendung durch eine regelmäßige Überwachung und Prüfung durch eine neutrale Stelle garantiert wird, mit Ausnahme des Brandverhaltens einiger Dämmstoffe. Es genügt der einmalige Nachweis weniger Eigenschaften durch eine akkreditierte Prüfstelle an vom Hersteller ausgewählten Proben.

In Deutschland gelten neben den europäischen Produktnormen für Wärmedämmstoffe auch die nationalen bauaufsichtlichen Anwendungsregeln. In Tabelle 37 ist eine Gegenüberstellung der Überwachung und Zertifizierung aufgrund deutscher nationaler Regelungen für Wärmedämmstoffe mit dem europäischen System abgebildet. Deutlich zu erkennen ist die unterschiedliche Rolle von Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen (PÜZ-Stellen) und dem Hersteller. Während bei der CE Kennzeichnung teilweise bis auf eine Erstprüfung durch eine notifizierte Stelle die gesamte Verantwortung beim Hersteller liegt, fordert die nationale Zulassung erheblich umfangreicher einen kontinuierlichen Überwachungs- und Zertifizierungsprozess durch eine vom DIBt anerkannte PÜZ Stelle. Das heißt ein Produkt, das auf dem Etikett ein Ü-Zeichen enthält, ist einem strengen Überwachungssystem unterworfen. Bei wiederholten Abweichungen bzw. Abweichungen der deklarierten Eigenschaften im Überwachungsprozess wird das Übereinstimmungszertifikat durch die Zertifizierungsstelle entzogen. Das Ü-Zeichen mit dem Bildzeichen dieser Zertifizierungsstelle darf dann nicht mehr verwendet werden.

Tabelle 37: Gegenüberstellung der Überwachung und Zertifizierung aufgrund deutscher nationaler Regelungen für Wärmedämmstoffe mit dem europäischen System.

Aufgabe	Ü-Zeichen allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)	CE-Zeichen ¹⁾ Konformitätssystem 3 für Wärmedämmstoffe
Werkseigene Produktionskontrolle (WPK)	Hersteller	Hersteller
Erst-Auditierung der WPK	PÜZ-Stelle	----
Erstprüfung (ITT)	PÜZ-Stelle	teilweise Notified Body
Probennahme für ITT	PÜZ-Stelle	Hersteller
Laufende Auditierung der WPK	PÜZ-Stelle	----
Laufende Produktentnahme und –prüfung	PÜZ-Stelle	----
Produktzertifizierung	PÜZ-Stelle	----



Überwachte und zertifizierte Qualität	Ausschließlich Herstel- lerverantwortung
--	---

¹⁾ Wärmedämmstoffe unterliegen nach Anhang ZA der jeweiligen europäisch harmonisierten Produktnorm grundsätzlich dem Konformitätssystem 3. Unter bestimmten Voraussetzungen können Dämmstoffe mit dem Brandverhalten der Klasse C, B oder A dem Konformitätssystem 1 zugeordnet sein. Dies erfordert eine Zertifizierung und Auditierung der werkseigenen Produktionskontrolle in Bezug auf das Brandverhalten.

Auch auf europäischer Ebene ist es vorgesehen, dass nationale Einrichtungen die Einhaltung aller Erfordernisse der europäischen Produktnormen kontrollieren, insbesondere auch durch die neu eingerichtete Marktüberwachung gem. Art. 56 EU-BauPV.

Tabelle 38 zeigt den Vergleich mit dem nationalen System. Während auf nationaler Ebene in regelmäßigen Abständen eine Produktprüfung, eine Auditierung der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) sowie der Kennzeichnung durch eine vom DIBt anerkannte Überwachungsstelle durchgeführt und durch eine Zertifizierungsstelle bestätigt wird, betrifft auch die Marktüberwachung nicht etwa nur die Kontrolle von Etiketten, sondern kann auch Produkte entnehmen und analysieren lassen, wobei dies nunmehr so geregelt ist, dass im Auftrage der Marktüberwachung diese Tätigkeit das DIBt wegen der besonderen Fachkunde übernimmt. Als dann kann durch die Marktüberwachung auch alles Erforderliche bis zur Untersagung der Bereitstellung des entsprechenden Bauproduktes auf dem Markt veranlasst werden.

Tabelle 38: Gegenüberstellung der Überwachung und Zertifizierung aufgrund deutscher nationaler Regelungen mit der Durchführung der europäischen Marktüberwachung. .

Aufgabe	Derzeitige Überwachung auf Grundlage abZ oder freiwillig	Maßnahmen der staatlichen Marktüberwachung für CE-Produkte
Werkseigene Produktionskontrolle (WPK)	2x jährlich Audit im Herstellwerk	-----
Kontrolle der Kennzeichnung (Beipackzettel)	2x jährlich im Lager des Hersteller	aktiv: abgeschlossen nur reaktiv
Laufende Produktentnahme und –prüfung	regelmäßige Prüfungen	Prüfung möglich
Produktzertifizierung	Erteilung / Entzug von Zertifikaten	Kontrolle von Hersteller-/Leistungserklärungen

Beispiele für freiwillige Qualitätssicherungssysteme

Zur Sicherung des Vertrauens bei den Verbrauchern haben sich auf dem Markt in den letzten Jahren verschiedene freiwillige Qualitätssicherungssysteme (Gütesiegel) entwickelt. Folgend wird beispielhaft auf drei Systeme eingegangen.

NQCI – Neopor® Quality Circle Italy

Nach der Einführung von EPS in Italien war wegen fehlender Überwachungssysteme ein zunehmender Qualitätsverfall im Markt zu beobachten. Zunächst wurden die Rohdichten auf Grund des Kostendruckes immer weiter gesenkt. Zur Kompensierung dieser offensichtlichen Qualitätsmängel wurde durch Zugabe von Marmormehl das Raumgewicht entsprechend wieder erhöht. Dies verschärfte die Verschlechterung der physikalischen Produkteigenschaften noch zusätzlich. Das Vertrauen der Verbraucher in den Baustoff EPS ist dadurch deutlich gesunken. Dieser Trend konnte in Deutschland durch die nationale Regelung der DIN 18164 mit regelmäßiger Überwachung und Zertifizierung sowie dem Engagement der Gütegemeinschaften verhindert werden.

Mit der Markteinführung von Neopor® durch die BASF im Jahr 2006 in Italien erfolgte die Gründung des NQCI (Neopor® Quality Circle Italy). Nur Schäumbetrieben, die sich einer freiwilligen Überwachung durch eine notifizierte Prüfstelle unterwerfen, wurde der Rohstoff Neopor® geliefert. Dabei verpflichtet sich das herstellende Unternehmen gewissen Überwachungsregeln:

- Auditierung der werkseigenen Produktionskontrolle 2x jährlich

- Regelmäßige Produktentnahme und Prüfung durch eine notifizierte Prüfstelle

Dies führte zu einer hohen Marktakzeptanz des Markennamens „Neopor®“ und des Labels „NQCI“. Durch Markt begleitende Maßnahmen wie gemeinsame Messeauftritte, Werbung in Fachzeitschriften und einen professionellen Internetauftritt wurde das Vertrauen der Verbraucher in den Dämmstoff EPS wieder zurück gewonnen.



Abbildung 102: Label NQCI

Freiwillige Überwachung von EPS für die Verwendung im Wärmedämm- Verbundsystem (WDVS)

Bis 2002 wurden die Anforderungen für Dämmstoffe zur Verwendung im WDVS nur national geregelt. Mit Einführung der europäischen Grundlagen folgten europäisch technische Zulassungen (ETAs) auf Basis der ETAG004. Das bedeutet für die Hersteller von EPS-Dämmstoffen, dass sie den verschiedensten Regelungen mit entsprechenden Anforderungen für die Anwendung im Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) gerecht werden müssen:

- ETAG 004 (Richtlinie für ETAs für das WDVS)
- ETAs für das WDVS aus D, A oder anderer Länder
- abZ für das WDVS
- abZ für EPS für die Verwendung im WDVS
- DIN 4108-10 WAP: Außenwand unter Putz, jedoch nicht WDVS

Auf Initiative des IVH, Industrieverband Hartschaum, entstand 2012 ein freiwilliges Überwachungssystem, das möglichst allen Anforderungen gerecht wird. Die Auditierung der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) auf Grundlage der europäischen Normen und der ETAG 004 und Überprüfung der Kennzeichnung erfolgt 2x jährlich durch eine notifizierte Prüfstelle. Zusätzlich erfolgt eine Produktentnahme im Herstellwerk und Prüfung aller anwendungsrelevanten Eigenschaften an zwei Chargen jährlich. Bei erfolgreichem Bestehen der Auditierung und Überprüfung, werden entsprechende Zertifikate (nicht Ü- oder CE-Zertifikate) ausgestellt, welche die Einhaltung der deklarierten Nennwerte, Stufen und Klassen, sowie der Anforderungen der EN und der ETAG 004 bestätigen. Abbildung 103 zeigt ein solches Musterzertifikat. Diese freiwilligen Nachweise genießen eine hohe Akzeptanz bei den Herstellern von WDVS, sowie bei den relevanten Überwachungs- und Zertifizierungsstellen.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.
München

ZERTIFIKAT

Reg.-Nr.: FZ-xxx-0-01/13

über die Durchführung der werkseitigen Produktionskontrolle und der freiwilligen Fremdüberwachung aller relevanten Produkteigenschaften auf Grundlage der Anforderungen der ETAG 004:2000

Produkt: "xxx - Fassadendämmplatte"

Wärmedämmplatten aus expandiertem Polystyrol (EPS) nach DIN EN 13163
Blockware aus grauem Rohstoff mit IR – strahlungsabsorbierenden Eigenschaften
für die Anwendung in Wärmedämmverbandsystemen (WDVS) nach ETAG 004:2000
EPS-EN 13163-T2-L2-W2-G2-P4-BS100/150-DS(N)2-DS(70,-)2-TR100/150
Brandverhalten nach EN 13501-1: Klasse E

der Hersteller xxx-Dämmstoffe GmbH, PLZ+Ort

hat mit dem FIW München, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., 82166 Gräfelfing

für das Herstellwerk PLZ+Ort

einen Vertrag über die freiwillige Fremdüberwachung des oben genannten Produktes geschlossen.
Die Überwachung umfasst die regelmäßige Überprüfung der werkseitigen Produktionskontrolle (WPK) auf Grundlage der EN 13163 und EN 13172 Abschnitt 5, sowie die regelmäßige Produktprüfung an zufällig im Herstellwerk entnommenen Proben. Dadurch soll die Eignung des Wärmedämmstoffes für die Anwendung in Wärmedämmverbandsystemen nachgewiesen werden, die nach europäisch technischen Zulassungen (ETA) auf Grundlage der ETAG 004, sowie nach nationalen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) geneigt ist.

Folgende Eigenschaften wurden im abgeschlossenen Überwachungsjahr bei Produktprüfungen nachgewiesen:

Produkteigenschaften vom FIW München überwacht:	xxx-Fassadendämmplatte		Anzahl der erbrachten positiven Nachweise
	EPS 035 WDV kd IR	EPS 032 WDV kp IR	
Wärmeleitfähigkeit (EN 12667): Bemessungswert λ (Z-23.15-xxxx): überwachter Grenzwert λ_{max} : nach DIN 4108-4 (Kategorie II)	0,035 W/(m·K) 0,0336 W/(m·K)	0,032 W/(m·K) 0,0309 W/(m·K)	1x pro Produkt
Nennwert λ_D : $\lambda_{max} = \lambda_D$ in der WPK	0,035 W/(m·K) erfüllt	0,032 W/(m·K) erfüllt	2x WPK-Kontrolle
Dicke (EN 823):	T2 (± 1 mm)	T2 (± 1 mm)	1x pro Produkt
Zugfestigkeit senkrecht (EN 1607):	≥ 100 kPa	≥ 150 kPa	2x pro Produkt
Biegefestigkeit (EN 12069):	≥ 100 kPa	≥ 150 kPa	2x pro Produkt
Scherfestigkeit (60 mm Dicke) und Schermodul (EN 12090):	≥ 50 kPa ≥ 1000 kPa	≥ 50 kPa ≥ 1000 kPa	2x pro Produkt 2x pro Produkt
Wasseraufnahme bei kurzzeitigem, teilweisem Eintauchen (EN 1609):	$\leq 0,2$ kg/m ²	$\leq 0,2$ kg/m ²	1x pro Produkt
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ (EN 12096):	≤ 50	≤ 60	1x pro Produkt
Dimensionsstabilität bei Normalklima 23°C/50%F (EN 1603) 70 °C über 48 h (EN 1604)	DS(N)2 ($\leq 0,2$ %) DS(70,-)2 (≤ 2 %)	DS(N)2 ($\leq 0,2$ %) DS(70,-)2 (≤ 2 %)	je 2x pro Produktgruppe
Länge und Breite (EN 822): Rechtwinkligkeit (EN 824): Ebenheit (EN 825): Rohdichte (EN 1602):	L2, W2 (± 2 mm) S2 (± 2 mm/1000 mm) P4 (5 mm) ≤ 25 kg/m ³	L2, W2 (± 2 mm) S2 (± 2 mm/1000 mm) P4 (5 mm) ≤ 25 kg/m ³	je 2x pro Produktgruppe

Das Zertifikat ist gültig bis zum Datum.

Leiter der Überwachungsstelle

Gräfelfing, Datum

Dipl.-Ing. (FH) Claus Karrer

Dieses Zertifikat wurde nach Abschluss der jährlichen Überwachungsprüfungen ausgestellt, ist 15 Monate gültig und wird nach positiven Produktprüfungen im folgenden Überwachungsjahr erneuert.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V., München
Lochnerer Schlag 4 - 82166 Gräfelfing

Telefon +49 89 858000 - Telefax +49 89 8580040
info@fiw-muenchen.de - www.fiw-muenchen.de

Abbildung 103: Beispielzertifikat für EPS

Freiwillige Überwachung aller Produkteigenschaften in Verbindung mit den Z-23.15-XXXX

Die Deklaration der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen nach europäischen Produktnormen erfolgt auf Grundlage der dort festgelegten Verfahren. Nach bestandener, einmaliger Erstprüfung ist ausschließlich der Hersteller für die korrekte Deklaration der Wärmeleitfähigkeit verantwortlich. Er berechnet regelmäßig den sog. $\lambda_{90/90}$ auf Grundlage der Messergebnisse im Rahmen der werkseitigen Produktionskontrolle (WPK). Die Daten der WPK bilden die Grundlage für die Auswertung und die Einstufung des Nennwertes der Wärmeleitfähigkeit. Der $\lambda_{90/90}$ darf den in Stufen von 0,001 W/(m K) deklarierten Nennwert der Wärmeleitfähigkeit nicht übersteigen. Bei Einhaltung dieser Anforderung, sind gelegentliche Überschreitungen des Nennwertes der Wärmeleitfähigkeit entsprechend der europäischen Produktnormen zulässig. Die europäische Norm hEN 13172 zur Konformitätsbewertung von Wärmedämmstoffen sieht zwar ein „Verfahren im Fall einer Beschwerde“ zur Überprüfung der Rechtmäßigkeit einer Deklaration durch Prüfungen an Stichproben vor, jedoch ist

dieses entsprechend Anhang F nur „informativ“. „Normativ“ und damit rechtsverbindlich sind die Regelungen der Produktnormen hEN 13162 bis hEN 13171, die eine Absicherung des Nennwertes der Wärmeleitfähigkeit λ_D auf Grundlage der statistischen Auswertung der Messwerte des Herstellers vorsehen.

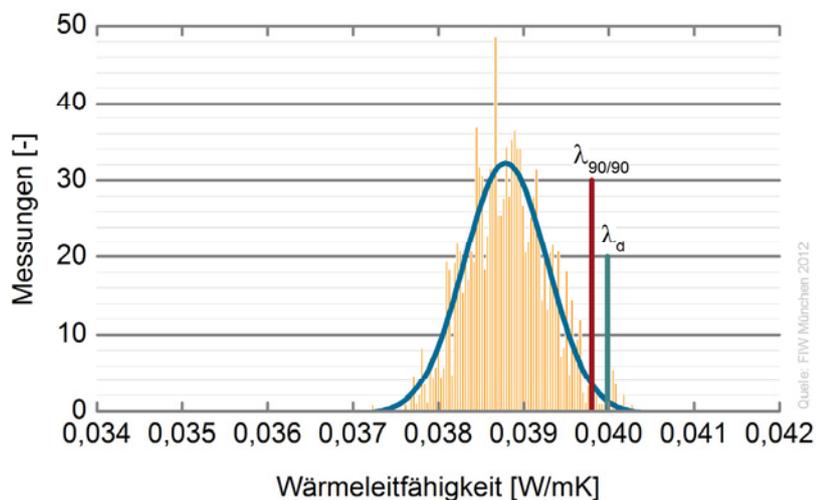


Abbildung 104: Zusammenhang zwischen $\lambda_{90/90}$ und λ_d

Eine Beurteilung über die Richtigkeit eines λ_D aufgrund einzelner Prüfergebnisse ist nicht möglich. Zur Sicherstellung des λ_D wäre eine regelmäßige Auditierung der werkseigenen Produktionskontrolle im Herstellwerk durch „Spezialisten“ im Hinblick auf

- Kenntnisse der Produkt-, Prüf- und Konformitätsnormen
- Erfahrung mit der Messung der Wärmeleitfähigkeit
- Kenntnisse zum Produkt und Herstellverfahren

nötig. Nur die Bestätigung der Produkteigenschaften durch regelmäßige Entnahme und Prüfung von Stichproben durch eine erfahrene PÜZ-Stelle, führt zu einer verlässlichen Deklaration der Wärmeleitfähigkeit. Eine Absicherung des Niveaus der werkseigenen Produktionskontrolle im Vergleich zur Fremdüberwachung ist dabei unerlässlich. Weder eine regelmäßige Auditierung noch die stetige Überprüfung der wärmetechnischen Produkteigenschaften durch eine neutrale Überwachungs- und Zertifizierungsstelle ist für Wärmedämmstoffe im Konformitätssystem 3 vorgesehen.

Die deutschen Regeln für den nationalen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für die Anwendung sind in der DIN 4108-4 festgelegt. Aufgrund der vorab geschilderten Problematik, dass es erstens keine Grenzwertfassung, sondern nur eine statistische Regelung der Wärmeleitfähigkeit und zweitens keine Überprüfbarkeit bzw. Verlässlichkeit aufgrund der ausschließlichen Herstellerverantwortung bei der Deklaration gibt, sehen die deutschen Regeln einen 20 %-Zuschlag auf den europäischen Nennwert der Wärmeleitfähigkeit vor. Durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.15-xxxx, verbunden mit einer Überwachung und Zertifizierung kann

der Zuschlag von 20% auf 5% auf einen Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit reduziert werden.

Die Zulassungen Z-23.15-xxxx sahen bis 2007 die externe Überwachung und externe Prüfung aller anwendungsrelevanten Eigenschaften durch eine unabhängige Stelle vor, danach nur noch ausschließlich die externe Überprüfung des Grenzwertes der Wärmeleitfähigkeit auf Grundlage der DIN 4108-4 und die externe Überprüfung der nationale Brandklassen nach DIN 4102. Die geforderte Anzahl der Prüfungen wurde jedoch auf eine jährliche Prüfung der Wärmeleitfähigkeit für jedes Anwendungskurzzeichen, jeden Produkttyp und Nennwert der Wärmeleitfähigkeit verstärkt.

Da jedoch bei einigen Dämmstoffen nicht die Wärmeleitfähigkeit, sondern andere Eigenschaften den kritischen Fall darstellen, wurde mit den Herstellern auf freiwilliger Basis die Überprüfung aller deklarierten Eigenschaften vereinbart. Prüferergebnisse und Informationen, die indirekt den anwendungsbezogenen Wärmedurchlasswiderstand sicherstellen, können bei der Überwachung mit herangezogen werden. Dadurch kann die Prüfhäufigkeit der Wärmeleitfähigkeit wieder reduziert werden. Die Prüfung, Überwachung und Zertifizierung muss durch eine nach Landesbauordnung anerkannte PÜZ-Stelle erfolgen.

Dadurch ergeben sich folgende Vorteile sowohl für den Hersteller, als auch für den Anwender:

- Überwachung und Bestätigung aller deklarierten Eigenschaften bei nur mäßigen Mehrkosten gegenüber der ausschließlichen λ -Prüfung
- Faire Marktbedingungen in Bezug auf alle Eigenschaften
- Bestätigung der Eignung eines Wärmedämmstoffes für Anwendungen nach DIN 4108-10 z. B.: DEO, DAA

Weiterhin sehen die Zulassungen Z-23.15-xxxx eine Zertifizierung sowie ein zweimal pro Jahr durch die Überwachungsstelle durchzuführendes, externes Audit vor.

Im Folgenden werden weitere freiwillige Überwachungssysteme, die auf Initiative von Dämmstoffverbänden entstanden sind, vorgestellt.

ÜGPU - Überwachungsgemeinschaft Polyurethan-Hartschaum e.V. - Freiwilliger Bereich der Zertifizierung

Neben der Zertifizierung auf Grundlage einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung ist in der Satzung der ÜGPU verbindlich eine freiwillige Überwachung und Zertifizierung für alle Mitglieder geregelt. Die Durchführung von Audits und Entnahmen in den Herstellwerken der Mitglieder durch eine akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle, sowie der Prüfumfang der deutlich über die Forderungen bauaufsichtlicher Grundlagen hinaus geht, wird im „freiwilligen Bereich“ der „Bestimmungen zur Durchführung der Zertifizierung (BdZ)“ festgelegt. Abweichungen bei der werkseigenen Produktionskontrolle, sowie Prüfergebnisse, die die deklarierten Nennwerte,

Stufen und Klassen nicht erfüllen, werden von der Prüf- und Überwachungsstelle in Überwachungsberichten dokumentiert. Der Fachausschuss der ÜGPU, dem diese Berichte herstellerneutral vorgelegt werden, entscheidet über Konsequenzen der Abweichung, wie die Verhängung von sog. Bußgeldern als privatrechtliche vereinsrechtliche Strafmaßnahme.

IVH - Industrieverband Hartschaum e.V. - Freiwillige Marktüberwachung

Die Mitglieder des IVH gründeten die Bundesfachabteilung Qualitätssicherung EPS-Hartschaum (BFA QS EPS) als Zertifizierungsstelle nach allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen. In „Qualitätsrichtlinien“ für definierte „Qualitätstypen“ werden anwendungsbezogene Anforderungen festgelegt, die über den Ansprüchen der bauaufsichtlichen Grundlagen liegen. Die Einhaltung dieser Ansprüche wird durch akkreditierte Prüf- und Überwachungsstellen gesichert.

Die Fremdüberwachung wird ergänzt durch ein privatrechtlich strafbewertetes System der freiwilligen Marktentnahme. Vom IVH entsandte Entnahmebeauftragte erwerben anonym und zufällig Produkte der Mitglieder und übergeben diese akkreditierten Prüfstellen zur Untersuchung definierter Eigenschaften. Abweichungen von den deklarierten Nennwerten, Stufen und Klassen werden privatrechtlich mit Bußgeldern geahndet.

GSH – Gütegemeinschaft Hartschaum e.V. – Freiwilliges Gütezeichen

Die GSH ist notifizierte Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Wärmedämmstoffe u.a. für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen. Die Produkte der Mitglieder werden nach den jeweiligen Güte- und Prüfbestimmungen überwacht und geprüft. Diese stellen höhere Anforderungen als einschlägige Dämmstoffzulassungen. Bei positiven Überwachungsergebnissen wird das freiwillige RAL-Gütezeichen verliehen.

Die „Güte- und Prüfbestimmungen für Polystyrol-Hartschaumplatten und -bahnen“ z.B. fordern eine Fremdüberwachung nach Anhang A der DIN EN 13172. Dies wird durch ein entsprechendes Konformitätszertifikat für die freiwillige Überwachung (System 1+) belegt. Eine Marktentnahme oder die Verhängung von Bußgeldern finden nicht statt.

10 Zusammenfassung: Wärmedämmung als Baustein der Energiewende

Da die Energie am umweltfreundlichsten ist, die gar nicht erst verbraucht wird, bezeichnet die Bundesregierung die Steigerung der Energieeffizienz als Schlüssel der Energiewende. Der Gebäudesektor ist für einen bedeutenden Anteil des Primär- und Endenergieverbrauches verantwortlich. Der Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden kommt somit eine besondere Bedeutung zu.

Der Gebäudebestand in Deutschland beträgt derzeit ca. 18,2 Millionen Gebäude. Davon entfallen 80 % auf Ein- und Zweifamilienhäuser, 16 % auf Mehrfamilienhäuser und 4 % auf Nichtwohngebäude. Von den gut 2.500 TWh Endenergie, die jedes Jahr bundesweit verbraucht werden, entfallen ca. 40 % auf Raumwärme, Warmwasserbereitung und Beleuchtung in Gebäuden allgemein. Auf Raumwärme und Warmwasserbereitung in Wohngebäuden entfallen ca. 25 %. Bis zu 75 % der in einem Wohngebäude eingesetzten Energie wird für das Heizen benötigt. Über eine ungedämmte Gebäudehülle wird ein großer Teil dieser Heizwärme ohne Nutzen für den Bewohner an die Umwelt abgegeben. Durch den Einsatz von Dämmstoffen kann eine wesentliche Minderung dieser Verluste erreicht werden. Darüber hinaus schützen Dämmstoffe die Bauteile und die Behaglichkeit von Gebäuden wird erheblich verbessert. Durch richtige Dämmung wird die Sicherheit vor Bauschäden erhöht und nicht verringert. Mit den heute verfügbaren Dämmstoffen stehen dabei Produkte für alle Detaillösungen zur Wärmedämmung zur Verfügung. Wenn die Beiträge der einzelnen Bauteile (Wände, Decken, Dach, Fenster, Boden) zum Wärmeverlust der Gebäudehülle bilanziert werden, können einzelne Dämmmaßnahmen hinsichtlich ihres Einsparpotentials bewertet werden. Betrachtet man die möglichen Einsparpotentiale, so wird deutlich, dass Dämmstoffe ein unverzichtbarer Baustein der Energiewende sind.

Die energetische Qualität der Gebäude hat seit Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung Ende der 70er Jahre deutlich zugenommen und ist inzwischen etwa viermal so gut wie die von Vorkriegsaltbauten. Den Einfluss der seit 1978 in Deutschland geltenden Verordnungen zum energiesparenden Bauen (WSchV und EnEV) auf den Endenergieverbrauch für die Heizung von Wohngebäuden in Deutschland zeigt Abbildung 105. Hätte man seit 1978 sämtliche neu errichteten Wohngebäude ohne Verbesserungen im baulichen Wärmeschutz gebaut sowie an Bestandsgebäuden ausschließlich nicht energetische Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt, würde heute der jährliche Endenergieverbrauch im Wohngebäudebereich etwa 767 TWh betragen. Das heißt, die Einführung der WSchV 1977 und den entsprechenden Anpassungen, bzw. die Einführung der EnEV 2002, spart bereits jetzt jährlich in etwa 167 TWh an Endenergie für Heizung alleine im Wohnungsbau ein. Bezogen auf den Gesamtverbrauch an Endenergie in Höhe von ca. 2500 TWh sind dies 6,7 %.

Hätte man nur, wie damals gefordert, die Anforderungen an den energetischen Standard im Neubau entsprechend geregelt, aber die Sanierungen im Gebäudebestand ohne jede Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes umgesetzt, würde der Endenergieverbrauch 86 TWh über dem aktuellen Ist-Wert liegen.

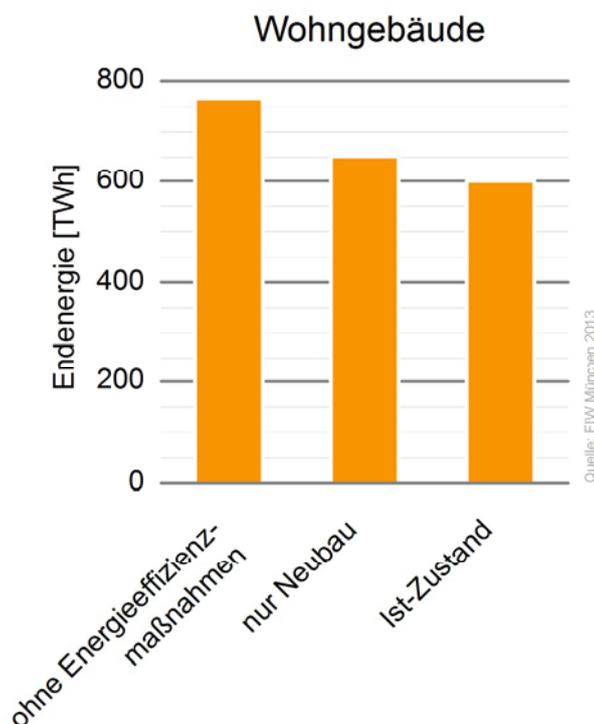


Abbildung 105: Vergleich des aktuell erreichten energetischen Standards (rechter Balken) mit einer Modellbetrachtung ohne Einführung von Energieeffizienzmaßnahmen (linker Balken) und einer Modellbetrachtung bei ausschließlicher Anwendung der eingeführten Energieeffizienzmaßnahmen im Neubau (mittlerer Balken)

Ausgehend von einem technisch realisierbaren Einsparpotential von 50 Prozent, ergibt sich im gesamten Gebäudebereich (Wohn- und Nichtwohngebäude) grob geschätzt ein möglicher Minderverbrauch von ca. 500 TWh pro Jahr. Diese theoretische Effizienzverbesserung ist natürlich nur abrufbar, wenn bei allen Gebäuden sämtliche Möglichkeiten, wie eine ausreichende Dämmung der Gebäudehülle, eine Fenstermodernisierung und der Einsatz moderner Technik, vollständig genutzt werden.

Energieeinsparpotentiale durch Maßnahmen an der opaken Gebäudehülle im Wohngebäudebereich

Die energetische Sanierung von Wohngebäuden ist eines der zentralen Arbeitsfelder zur Erreichung der gesetzten Klimaschutzziele. Vergleicht man die Gebäudebestandsverteilung mit dem entsprechenden energetischen Zustand der Gebäude, so stellt man fest, dass über 80 % der Gebäude vor der Einführung der Wärmeschutzverordnung 1995 gebaut wurden. Berücksichtigt man nur die Gebäude, die gering bzw. nicht modernisiert sind, bedeutet das, dass derzeit 65 % der Gebäude in

Deutschland sanierungsbedürftig sind. Eine Zusammenstellung der geschätzten Flächen der Gebäudehülle für den gesamten Wohngebäudebestand in Deutschland enthält Tabelle 39. Ca. 3,2 Mrd. m² Fassade und ca. 2,1 Mrd. m² Dachfläche sind in einem energetischen Zustand vor der WSchV 1995 und haben damit nur einen schlechten, bzw. mäßigen baulichen Wärmeschutz.

Tabelle 39: Zusammenstellung der geschätzten Flächen der Gebäudehülle in einem bestimmten energetischen Zustand, für den Gebäudebestand bis GAK 1993 in Deutschland

		Vor WSchV 1977 [Mrd. m ²]	WSchV 77/84 [Mrd. m ²]	Nach WSchV 1995 [Mrd. m ²]	Summe [Mrd. m ²]
EFH	Dach	0,55	0,77	0,25	1,57
	Wand	1,30	0,39	0,16	1,85
	Fenster	0,24	0,10	0,05	0,39
	Keller	0,42	0,13	0,69	1,24
MFH	Dach	0,36	0,38	0,12	0,86
	Wand	1,18	0,34	0,12	1,64
	Fenster	0,25	0,09	0,05	0,39
	Keller	0,11	0,70	0,03	0,84
Summe	Dach	0,91	1,15	0,36	2,43
	Wand	2,49	0,72	0,28	3,49
	Fenster	0,49	0,19	0,10	0,78
	Keller	0,53	0,83	0,72	2,08

Die möglichen Einsparpotentiale wurden bauteilspezifisch und für unterschiedliche Niveaus der Sanierung, entsprechend dem Standard der EnEV 09, eines Niedrigenergiehauses (NEH) und einem ambitionierten Standard, der das aktuell erreichbare energetische Optimum darstellen soll (Potential), berechnet. Tabelle 40 zeigt die für die Potentialabschätzung verwendeten U-Werte.

Tabelle 40: U-Werte der für die Berechnung der Sanierungsszenarien angesetzten energetischen Standards EnEV 09, NEH (Niedrigenergiehaus) und Potential (aktuelles Optimum)

	EnEV09	NEH	Potential
Dach/ob.GeDe	0,24	0,18	0,10
Wand	0,24	0,18	0,10
Fenster	1,30	0,95	0,65
U.Geb.abschl.	0,30	0,20	0,20

Die Berechnungen wurden für den Gebäudebestand bis 1993 angewendet (Kapitel 6.4). Zur Anwendung kamen zwei unterschiedliche Szenarien. Tabelle 41 zeigt exemplarisch die Ergebnisse des Sanierungsszenario 1, bei dem alle Bauteile mit einem energetischen Zustand „vor WSchV 77“ und „WSchV 77/84“ in den GAK bis 1993 saniert werden.

Der Tabellenteil I) enthält dabei das bauteilspezifische, prozentuale Einsparpotential, bezogen auf den Verbrauch aller Bauteile der jeweiligen Bauteilgruppe in den GAK bis 1993. Es ist zu erkennen, dass alle Bauteilgruppen der opaken Gebäudehülle noch relevante energetische Einsparpotentiale bieten. Tendenziell beinhalten die Fassaden dabei das größte Verbesserungspotential, gefolgt von Dach und Keller.

Tabelle 41: I) Energieeinsparpotential [%] bei Sanierung von Bauteilen mit einem bestimmten energetischen Niveau in der GAK bis 1993, bezogen auf den Energiebedarf aller Bauteile diesen Typs im Ist-Zustand vor der Sanierung (Sanierungsszenario 1, EFH und MFH)
 II) Energieeinsparpotential [%] bei Sanierung von Bauteilen mit einem bestimmten energetischen Niveau in der GAK bis 1993, bezogen auf den Energiebedarf für Raumwärme aller Wohngebäude in der GAK bis 1993 (Sanierungsszenario 1, EFH und MFH)

	Sanierung auf...	EnEV 09	NEH	Potential
I)	<i>Dach/ob.GeDe</i>	54,7	64,0	76,4
	<i>Wand</i>	78,1	82,9	89,3
	<i>Fenster</i>	41,6	54,5	65,6
	<i>U.Geb.abschl.</i>	55,7	63,6	63,6
II)	<i>Dach/ob.GeDe</i>	9,05	10,6	12,6
	<i>Wand</i>	39,0	41,4	44,6
	<i>Fenster</i>	9,46	12,4	14,9
	<i>U.Geb.abschl.</i>	5,99	6,84	6,84
	<i>Summe</i>	63,5	71,3	79,0

Im Tabellenteil II) sind die durch die energetische Sanierung der im Sanierungsszenario 1 definierten Bauteile erzielbaren Einsparungen, ins Verhältnis gesetzt zum Gesamtenergiebedarf für Raumwärme der Wohngebäude in den GAK bis 1993. Gegenüber dem Tabellenteil I) ist in dieser Betrachtung also auch das Verhältnis der Flächen und der Verteilung des Energiebedarfs der einzelnen Bauteile zueinander berücksichtigt. In dieser Darstellung wird der große Einfluss der Fassaden auf die erzielbare Gesamteinsparung noch deutlicher. Je nach angestrebtem Sanierungsziel können ca. 39 – 45 % des Gesamtenergiebedarfs für Raumwärme in den GAK bis 1993 durch Maßnahmen an der Fassade eingespart werden. Die Energieeinsparung durch eine Sanierung der Dächer leistet in diesem Betrachtungszusammenhang noch ca. 9 – 13 %, durch Maßnahmen am Keller können zusätzlich ca. 6 – 7 % der Gesamtenergie für Raumwärme im betrachteten Bestandsausschnitt eingespart werden.

Die in Kapitel 6.4 detailliert vorgestellten und in Tabelle 41 zusammengefassten Ergebnisse beruhen auf einer Berechnung nach dem Heizperiodenverfahren unter Berücksichtigung der Verteilung des energetischen Zustands der Bauteile und beziehen sich wie beschrieben auf die GAK bis 1993, weil dieser Bestandsausschnitt mittelfristig das größte Potential zur energetischen Sanierung enthält.

In Abbildung 106 sind die ermittelten Ergebnisse bezogen auf den bauteilbezogenen Heizwärmeverlust des Ist Zustand (GAK bis 2008) angewendet. Die weiteren Balkendarstellungen zeigen die Entwicklung der Energieverluste des gesamten Wohngebäudebestands bis GAK 2008, bei Anwendung des Sanierungsszenario 1 (Sanierung modernisierungsbedürftiger Bauteile in den GAK bis 1993) entsprechend der gewählten energetischen Standards (EnEV 09, NEH, Potential).

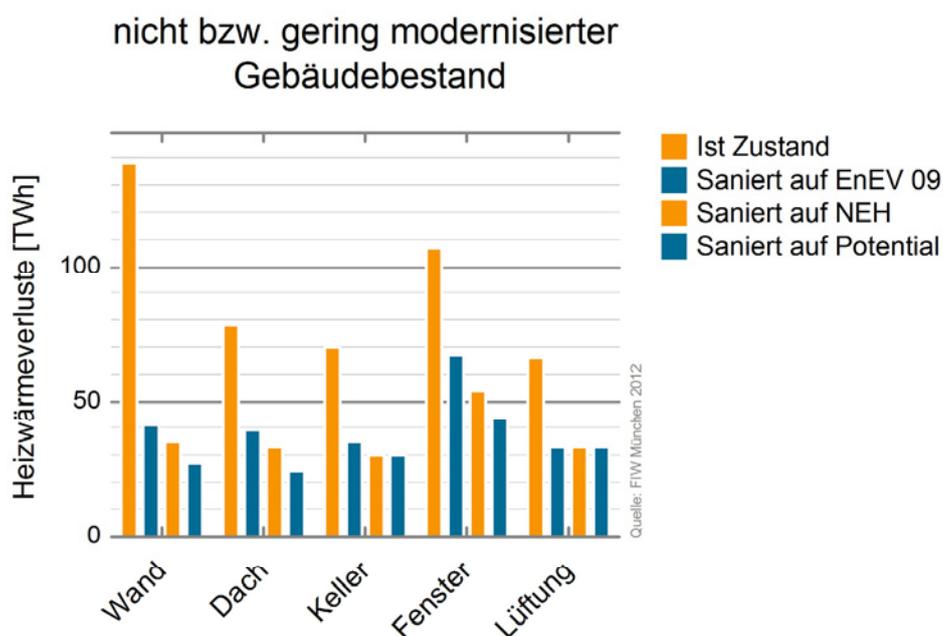


Abbildung 106: Aufsummierte Heizwärmeverluste je Bauteil, des unsanierten, bzw. des entsprechend Sanierungsszenario 1 auf die Anforderungen der EnEV 09, NEH oder Potential sanierten Wohngebäudebestands der GAK bis 2008

Im Ist-Zustand gehen über die Fassadenflächen der Wohngebäude bis GAK 2008, ca. 138 TWh Heizwärme verloren. Eine Sanierung der sanierungsbedürftigen Fassaden in der GAK bis 1993, auf den Zustand der EnEV 09 spart hier fast 100 TWh Energie ein. Zusammen mit dem Einsparpotential von Dach und Keller können allein durch Maßnahmen an der opaken Gebäudehülle, bei Anwendung des Sanierungsszenarios 1, also nur der Sanierung der nicht- bzw. gering modernisierten Bauteile in den GAK bis 1993, ca. 170 TWh an Energie eingespart werden.

Zur Realisierung der vorgestellten Einsparpotentiale müssen je nach Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Dämmstoffe, unterschiedliche Volumina an Dämmstoffen eingesetzt werden. In Kapitel 4, Innovationen, werden zahlreiche Entwicklungen an unterschiedlichen Materialien vorgestellt, die eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit zum Inhalt haben. Um den Einfluss einer Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit auf den Gesamtbedarf an Dämmstoffen darzustellen, sind in Tabelle 42 für die verschiedenen Bauteile das geschätzte benötigte Volumen an Dämmstoff in Mio. m³ zur Umsetzung des Sanierungsszenario 1 dargestellt.

Eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Dämmstoffe von 0,040 W/(m·K) auf 0,030 W/(m·K) reduziert das notwendige Volumen signifikant. So müssen bei einer Sanierung auf das Niveau der EnEV 09, statt 694 Mio. m³ nur noch 583 Mio. m³ aufgewendet werden. Neben dieser Reduzierung des absolut verbauten Volumens, sind die bei einer verringerten Wärmeleitfähigkeit schlankeren Dämmstoffschichten auch unter konstruktiven und optischen Gesichtspunkten, gerade bei Sanierungen im Bestand, vorteilhaft.

Tabelle 42: Geschätztes benötigtes Volumen an Dämmstoff im Mio. m³ für die verschiedenen Bauteile, differenziert nach EFH und MFH, um ein entsprechendes Sanierungsziel zu erreichen. Betrachtet werden alle sanierungsnotwendigen Bauteile in den Gebäudealtersklassen bis 1993 (Sanierungsszenario 1)

Gebäude- typ	Bauteil	Dämmstoffvolumen [Mio. m ³]					
		bei $\lambda = 0,040$ W/(m·K) auf...			bei $\lambda = 0,030$ W/(m·K) auf...		
		EnEV	NEH	Poten- tial	EnEV	NEH	Poten- tial
EFH	Dach / oberste Geschoßdecke	118	184	421	70	107	240
	Wand	221	323	627	199	291	564
	Keller / unterer Gebäudeabschluss	55	88	88	62	111	111
MFH	Dach / oberste Geschoßdecke	86	146	318	51	85	181
	Wand	174	242	462	157	218	416
	Keller / unterer Gebäudeabschluss	40	67	67	44	85	85
Gesamt	EFH + MFH	694	1050	1983	583	897	1597

Natürlich sind die vorgestellten Einsparpotentiale mit Kosten für die hierfür notwendigen Maßnahmen verknüpft. Die Angaben für Kosten einer energetischen Sanierung sind oft nicht eindeutig und unterscheiden sich deutlich in den verschiedenen vorliegenden Studien. Dabei sind die bestehenden Unterschiede zum Teil durchaus sachlich bedingt. Einerseits können sich exakte Kostenangaben immer nur auf ein konkretes Gebäude beziehen, andererseits lässt sich die Frage, welche Kosten nun tatsächlich für die Amortisationsberechnung herangezogen werden dürfen, oft nicht klar beantworten. Unterschieden werden muss dabei in jedem Fall zwischen den tatsächlich energiebedingten Kosten für eine moderate bzw. anspruchsvolle Sanierung und den sogenannten Sowieso-Kosten. Dabei wird unterstellt, dass die energetische Sanierung im Zuge einer ohnehin vorgenommenen allgemeinen Sanierung des Gebäudes oder Gebäudeteils durchgeführt wird.

In Abbildung 107 sind die geschätzten Gesamtkosten für eine Komplettsanierung mit einem moderaten energetischen Zustand aller zur Sanierung anstehender Ein-

und Zweifamilienhäuser in Abhängigkeit der Gebäudealtersklasse aufgetragen. Insgesamt wären 540 Mrd. € notwendig. Dabei entfallen in etwa 400 Mrd. € auf die Sowieso-Kosten. Die rein energetisch bedingten Mehrkosten liegen bei 140 Mrd. €. Im Gegenzug würde man jährlich fast 290 TWh Endenergie für die Heizung der Gebäude einsparen. Das entspricht bei einem derzeitigen Heizölpreis von 0,8 €/Liter einer jährlichen Einsparung von etwa 25 Mrd. €. Die Einsparung alleine durch die Dämmung beträgt fast 15 Mrd. €.

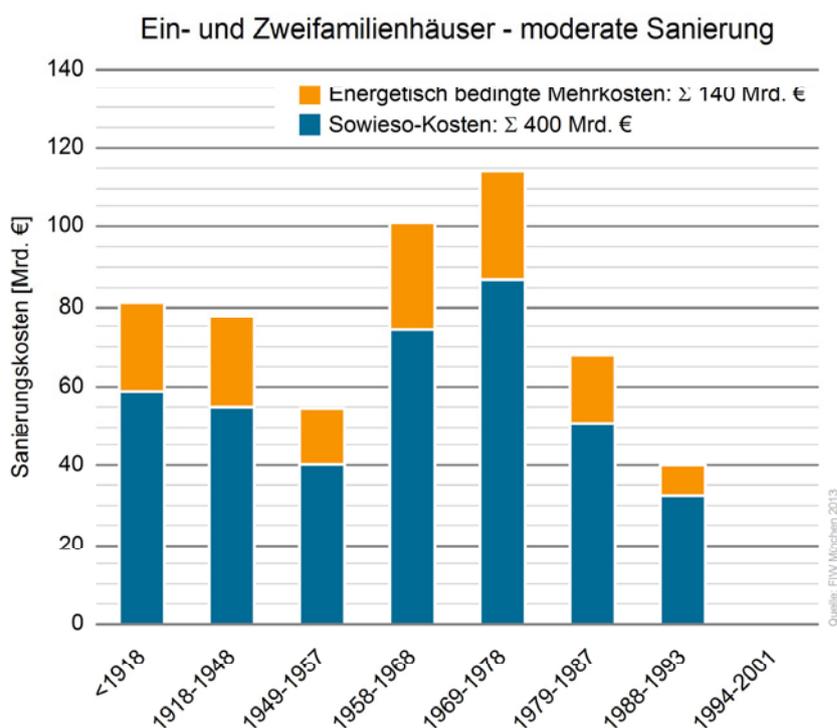


Abbildung 107: geschätzte Sanierungskosten nach Baualtersklassen für Ein- und Zweifamilienhäuser

Fazit

Die energetische Sanierung des Gebäudebestands ist die wichtigste Maßnahme, um den Verbrauch an fossilen Energieträgern nachhaltig zu mindern und die Abhängigkeit von Energieimporten zu reduzieren. Abbildung 108 zeigt die Bedeutung der Gebäudedämmung im Vergleich zur Endenergiebereitstellung aus regenerativen Energien bzw. aus Kernkraftwerken. Die in der Grafik dargestellten Energieeinsparungen beziehen sich auf die konsequente Sanierung aller Wohngebäude auf das Niveau der EnEV 09.

Diese Effekte sind natürlich nicht zum Nulltarif zu haben, sondern erfordern erhebliche Investitionen, die aber im Gegenzug zu einer langfristig gesicherten Energie- und Kostenersparnis führen. Die Umsetzung dieser Strategie erfordert jedoch geeignete und verlässliche rechtliche Rahmenbedingungen, Zeit und Geld. Deshalb ist

ein langfristiger Sanierungsfahrplan erforderlich, der den Akteuren sowohl den Orientierungsrahmen für Investitionen gibt, als auch die notwendige Flexibilität belässt.

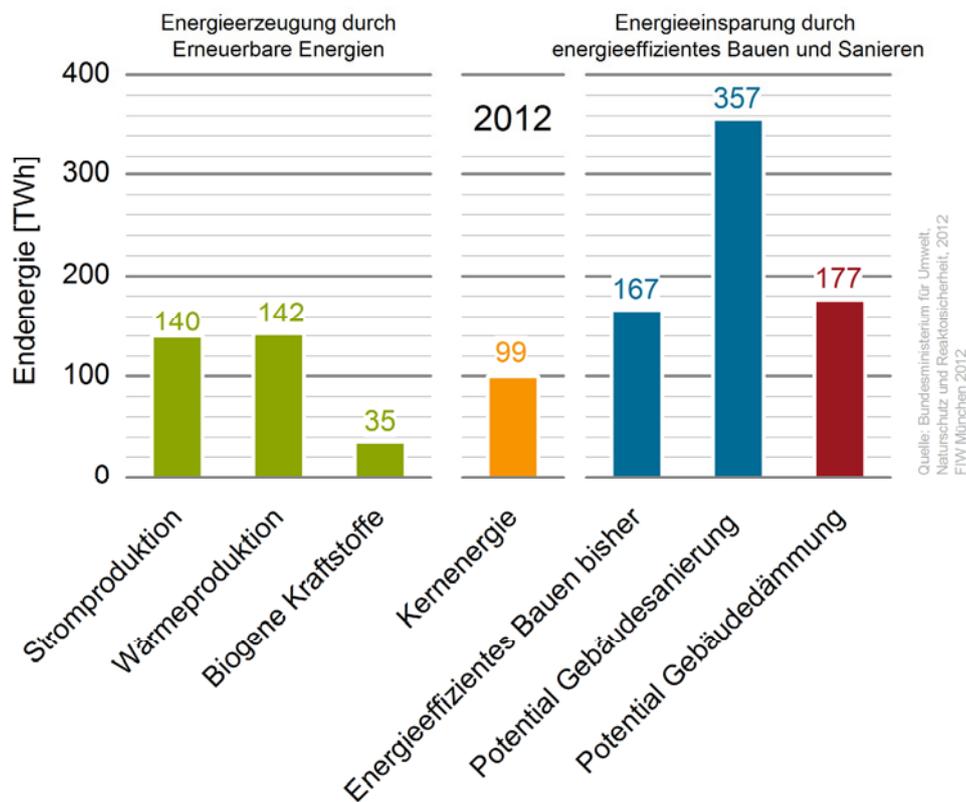


Abbildung 108: Bedeutung der Gebäudedämmung (Sanierung aller Wohngebäude auf das Niveau der EnEV 09), im Vergleich zur Endenergiebereitstellung aus regenerativer Energie bzw. aus Kernkraftwerken.

Mit den steigenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden sind in den letzten Jahrzehnten leistungsfähige Dämmstoffe entstanden; die Anwendungsbereiche ausgeweitet und neue Verarbeitungstechniken wurden entwickelt. Der Bereich der energetischen Sanierung des Gebäudebestands, aber auch die Energieeffizienz der Neubauten, sind nach wie vor wichtige politische Themen, wenn im Rahmen der Diskussion um die EnEV 2013 über weitere Senkungen des Primärenergiebedarfs gestritten wird. Gleichzeitig häufen sich Medienberichte über angeblich systematische bautechnische Probleme die Schimmel- und Algenbildung begünstigen und Defizite bei der Wärmedämmung bis hin zu dem unhaltbaren Argument, Energieeinsparung durch Wärmedämmung sei bauphysikalisch unmöglich.

Zwar ist die Anwendung allgemein gültiger Aussagen über die einzelnen Wirkpotentiale der Sanierungsmaßnahmen (Wärmedämmung der Hüllfläche, Fenstertausch und die Heizungserneuerung) auf konkrete Objekte nicht möglich, da objektspezifisch große Unterschiede bezüglich der baulichen und konstruktiven Voraussetzungen auftreten können. Fakt ist aber: Wärmedämmung ist ein unverzichtbarer Bestandteil einer zeitgemäßen und zukunftsorientierten Bauweise und bei fachgerechter Durchführung ohne Probleme und ohne zu erwartende Mängel umsetzbar.

Zahlreiche Studien haben belegt, dass bei sachgerechter Verarbeitung, Wartung und Instandhaltung von einer sehr langen Lebensdauer der Dämmung, vergleichbar mit einfach verputztem Mauerwerk, auszugehen ist. Vorliegende Erfahrungen aus 50 Jahren mit mittlerweile ca. 800 Mio. m² WDVS in Deutschland zeigen, dass es sich bei WDVS um ein bewährtes System mit minimaler Schadensbilanz handelt [Künzel et al. 2005]. Mechanische Beschädigungen durch Sturm, Regen oder Hagel treten nicht häufiger auf als bei sonstigen Fassadenbekleidungen. Schäden durch Löcher, die zum Beispiel von Spechten verursacht wurden, sind allgemein selten zu beobachten und darüber hinaus auch kein Dämmstoff- oder EPS-spezifisches Thema, da sie auch bei Bekleidungen oder Verschalungen mit Brettern oder Holzwerkstoffen auftreten können.

Auch Feuchteschäden an Fassaden sind kein spezielles oder typisches Problem von Wärmedämmverbundsystemen, weder bei kunstharzgebundenen, noch bei mineralischen Putzen. Algenbildung tritt nicht nur an wärmegeämmten, sondern ebenso an einfach verputzten Fassaden und massiven Steinfassaden auf, wie man leicht auch an historischen Gebäuden sehen kann, die sich grün oder schwarz verfärben. Ein dauerhaft vorhandener, feuchter Oberflächenfilm auf der Fassade stellt dabei die Grundlage und den Nährboden für Algen dar. Ein durch Regen und Umgebungsfeuchte unvermeidlich entstehender Feuchtigkeitsfilm trocknet aber unter den meisten Bedingungen auch ohne hohe Wärmeverluste eines Gebäudes ab. Das trockenheizen der Oberflächenfeuchtigkeit der Außenseite der Fassade von innen heraus, kann dabei keine ernsthafte Lösungsstrategie darstellen. Moderne Putzsysteme können durch hygroskopisches oder wasserabweisendes Verhalten so eingestellt werden, dass die Gefahr der Algen- und Schimmelpilzbildung minimiert wird.

Was die Kostendiskussion betrifft, kann man feststellen: Ein WDV-System wird üblicherweise dann aufgebracht, wenn ohnehin ein Anstrich, eine Putzsanierung oder eine Komplettrenovierung ansteht. Bei größeren Renovierungsarbeiten ist immer auch die energetische Ertüchtigung des gesamten Gebäudes sinnvoll. Wenn bei einer Sanierung der Fassade ohnehin Putzarbeiten, Malerarbeiten und Gerüstkosten anfallen, erhöht der Aufwand für die Wärmedämmung die Gesamtkosten der Maßnahmen nur moderat. Die Mehrbelastungen amortisieren sich in einem angemessenen Zeitraum, vor allem wenn die Energiekosten weiter steigen.

Bei Investitionsentscheidungen sollten aber neben den energetischen Aspekten auch Gesichtspunkte der Substanzerhaltung, Wertsteigerung und Behaglichkeitserhöhung beachtet werden. Vielfach wird leider vergessen oder bewusst unterschlagen, dass eine energetisch effiziente Gebäudehülle nicht nur unter den Aspekten der Nachhaltigkeit oder Rentabilität zu betrachten ist, sondern vor allem auch für den Bewohner des Gebäudes Vorteile bringt, weil die thermische Behaglichkeit im Winter, aber auch im Sommer nachweislich erhöht wird.



11 Literatur

[Achtziger und Anton 1985a]

Achtziger, J.; Anton, H. (1985a): Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Wänden aus Mauerwerk – Vergleiche zwischen experimenteller Untersuchung und Berechnung nach der Finiten-Differenzen-Methode – Teil 1: äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Luftkammern in Mauerwerkssteinen – Schlußbericht, Forschungsbericht für das DIBt, Berlin, 1985

[Achtziger und Anton 1985b]

Achtziger, J.; Anton, H. (1985b): Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Wänden aus Mauerwerk – Vergleiche zwischen experimenteller Untersuchung und Berechnung nach der Finiten-Differenzen-Methode – Teil 2: Vergleich Messen - Rechnen – Schlußbericht, Forschungsbericht für das DIBt, Berlin, 1985

[AgBB 2012]

AgBB (2012): Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC und SVOC) aus Bauprodukten. Teil 1: Einführung. Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten, AgBB, Juni 2012

[AGEB 2013a]

AGEB (2013a): AG Energiebilanzen e.V., <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=139>, abgerufen am 05.06.2013

[AGEB 2013b]

AGEB (2013b): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2012. Stand: März 2013, AG Energiebilanzen e.V., abgerufen am 10.06.2013

[AGEB 2013c]

AGEB (2013c): Ausgewählte Effizienzindikatoren zur Energiebilanz in Deutschland. Stand: Ende März 2013, AG Energiebilanzen e.V., abgerufen am 10.06. 2013

[AGEB 2013d]

AGEB (2013d): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2010 und 2011. Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Projektnummer: 23/11, Berlin, März 2013

[Albrecht et al. 2010]

Albrecht, T., Deffner, J., Dunkelberg, E., Hirschl, B., Stieß, I., Vogelpoint, T., Weiß, J., and et al. 2010. Zum Sanieren Motivieren. ENEF HAUS Energetische Sanierung von Eigenheimen www.enef-haus.de.

[Albrecht und Koppold 2010]

Albrecht, W.; Koppold, S. (2010): Langzeitverhalten von Dämmstoffen . In: Fouad, N.A. (Hrsg.) (2010): Bauphysik Kalender 2010. 10. Jg. Berlin: Ernst & Sohn 2010.

[Albrecht 2013]

Albrecht, W. (2013): Sind WDVS Sondermüll? Flammschutzmittel, Rückbaubarkeit und Recyclingfreundlichkeit. Tagungsband zu den Aachener Bausachverständigentagen, 15./16.04.2013

[Amecke 2011]

Amecke, H. (2011): Energieausweis: Ein Beispiel für wenig genutztes Potential. DIW Wochenbericht Nr. 34.2011, S. 14 – 19

[Amecke et al. 2012]

Amecke, H.; Neuhoff, K.; Stelmah, K. (2012): Steuerliche Förderung von energetischen Sanierungen: Erfahrungen aus der Praxis. CPI Report, Climate Policy Initiative Berlin, Januar 2012

[Amtsblatt 2007]

Amtsblatt der Europäischen Union (2007): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)

[Amtsblatt 2011]

Amtsblatt der Europäischen Union (2011): Verordnung (EU) Nr. 253/2011 der Kommission vom 15. März 2011 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) hinsichtlich Anhang XIII.

[Anonymus 1998]

Anonymus (1998): Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“. Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung. Drucksache 13/11200, Deutscher Bundestag, Sachgebiet 1101, 26.06.1998

[Anonymus 2013]

Anonymus (2013): Belastung Brandenburger Gewässer durch Biozideinträge aus wärme gedämmten Fassaden. Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrag 2776, Landtag Brandenburg, Drucksache 5/7231

[ASHRAE 2013]

ASHRAE (2013): Handbook- Fundamentals.

[BASDF 2013]

BASF (2013):

http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/de/content/group/News_und_Medien/Presseinformationen/Customized_climate

[B+L 2013]

B+L (2013): B+L Sanierungsstudie 2013. Budgets, Gebäudearten, Motive, Prognosen, Trends, Zielgruppen. B+L Marktdaten GmbH

[Baulinks 2011]

Baulinks (2011): Fassadenmodernisierung bei gleichzeitiger Gebäudenutzung, Bericht zur Baumesse 2011, <http://www.baulinks.de/webplugin/2011/0141.php4> zuletzt abgerufen am 30. Juli 2013

[Bahr 2008]

Bahr, U. (2008): Realdatenanalyse zum Instandhaltungsaufwand öffentlicher Hochbauten – Ein Beitrag zur Budgetierung. Dissertation, Fakultät Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TU), 2008

[Bayer 2009]

Bayer, W. (2009): Energie auf einen Blick. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2009

[Bigalke et al. 2012]

Bigalke, U.; Henning, D.; Lukas, H.; Zeng, Y.; Bensmann, K.; Stolte, Ch. (2012): Der dena-Gebäudereport 2012. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, Stand: 09/2012

[BMK 2013]

BMK (2013): Medien-Info 14/2013. Ausgegeben: 22. März 2013, <http://www.is-ergebau.de/verzeichnis.aspx?id=769&o=7590769>

[BMU 2011]

BMU (2011): Kreislaufwirtschaft: Abfall nutzen, Ressourcen schonen; Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Juli 2011

[BMVBS 2011]

BMVBS (2011): BBSR-Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB“, Aktualisierung vom 03.11.2011, online unter: <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html>

[BMVBS 2013]

BMVBS (2013): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, April 2013

[BMWl 2012a]

BMWl (2012): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. 28. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Abteilung KI

[BMWl 2012b]

BMWl (2012): Bruttostromerzeugung nach Energieträgern. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.thema-energie.de/energie-im-ueberblick/daten-fakten/statistiken/energieerzeugung/bruttostromerzeugung-in-deutschland.html>.

[Böck und Tremel 2013]

Böck, A.; Tremel, S. (2013): Response characteristic of acceleration forces in loose-fill cellulose insulation material caused by impact tests. *Eur J Wood Prod*, volume 71, issue 3, pp 397-399

[Bohenschäfer et al. 2005]

Bohenschäfer, W.; von Hirschhausen, C.; Ströbele, W.; Treusch, J.; Wagner, U. (2005): Nachhaltige Energiepolitik für den Standort Deutschland, Anforderungen an die zukünftige Energiepolitik. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V., Berlin

[Breuer et al. 2012]

Breuer, K.; Mayer, F.; Scherer, Ch.; Schwerd, R.; Sedlbauer, K. (2012): Wirkstoffauswaschung aus hydrophoben Fassadenbeschichtungen: verkapselte versus unverkapselte Biozidsysteme. *Bauphysik* 34, Heft 1, Seite 19-23.

[BRL 2013]

BRL 2013: Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C. Ausgabe 2013/1, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

[Bundesgesundheitsblatt 1996]

Bundesgesundheitsblatt (1996): Richtwerte für die Innenraumluft: Basisschema. Bundesgesundheitsblatt 11/96

[Bunge und Merkel 2011]

Bunge, F.; Merkel, H. (2011): Polystyrol-Extruderschaum mit verbesserten wärmetechnischen Eigenschaften – Entwicklung, Prüfung und Anwendung. *Bauphysik* 33 (2011) Heft 1; Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2011

[Buschmann 2003]

Buschmann, R. (2003): Informationsbroschüre: Umweltverträglichkeit von Gebäudedämmstoffen. Katalyse Institut für angewandte Umweltforschung, Köln 2003, Herausgegeben vom Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig-Holstein

[BV Kalksandsteinindustrie 2009]

BV Kalksandsteinindustrie (2009): Kalksandstein. Planung, Konstruktion, Ausführung. Autorenkollektiv, Hrsg.: Bundesverband Kalksandstein e.V., 5. Überarbeitete Auflage 2009, Verlag Bau und Technik GmbH, Düsseldorf

[C2C 2013]

C2C (2013):

http://c2ccertified.org/products/search_results/YTo0OntzOjg6ImtleXdvcmRzljtzOjEwOiJlbnN1bGF0aW9uUlJtzOjExOjEzZWZyY2hfbW9kZSI7czozOjEhbGwiO3M6MTE6InJlc3VsdF9wYWdlIjtzOjEzOjEwcm9kdWN0cy9zZWZyY2hfcml7VzdWx0cy17czoxMDoiY29sbGVjdGlvbil7YT0xOntzOjA7czoxOjE3fQ, abgerufen am 09.10.2013

[Cammerer 2001]

Cammerer, J. (2001): Neue Prüfmethode zur Beurteilung des Setzungsverhaltens von losen Dämmstoffen. Forschungsbericht, FIW München 2001

[Cammerer und Spitzner 2004]

Cammerer, J.; Spitzner, M. (2004): Untersuchungen zur Auswirkung von Hohlräumen in der Wärmedämmung von Holzständerkonstruktionen. Abschlussbericht, Forschungsvorhaben des STMWIVT, Proj.Nr. 9170/1.11 – IBS/e – 42977/01

[Chau 2012]

Chau, V. (2012): EU project NANOFOAM – New NANO-technology based high performance insulation FOAM. proceedings of the International Symposium on Superinsulating Materials, Brüssel, Belgien, am 26. April 2012.

[Destatis 2012]

Destatis (2012): Statistisches Jahrbuch 2012. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

[Diefenbach et al. 2010]

Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.-D. (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), Bremer Energie Institut (BEI). Darmstadt.

[Creutzenberg et al. 2005]

Creutzenberg, O.; Muhle, H.; Bellmann, B.; Dasenbrock, C.; Rittinghausen, S., Wardenbach, P., Pott, F. (2005): Toxizität von Stäuben im Peritoneum der Ratte. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung, Fb 1039

[Diefenbach et al. 2012]

Diefenbach, N.; Stein, B.; Loga, T.; Rodenfels, M.; Gabriel, J.; Fette, M. (2012): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2011. Gutachten des Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt und des Bremer Energie Institut im Auftrag der KfW-Bankengruppe, 30. August 2012

[Eberl-Pacan 2013]

Eberl-Pacan, R. (2013): Wärmedämmverbundsysteme und Brandschutz. FeuerTrutz Magazin, 4, 2013

[Eicke-Hennig 1997]

Eicke-Hennig, W. (1997): Neue Dämmstoffe - (k)eine Alternative?. das Bauzentrum 9, S. 64 – 72

[Eicke-Hennig 2013]

Eicke-Hennig, W. (2013): Mitten im epochalen Umbruch: Von der Massiv- zur Dämmbauweise. Vortrag im Rahmen des „Wärmeschutztag 2013 – Energieeffizienz im Visier“, München, 07.06.2013, abrufbar unter:
http://www.waermeschutztag.de/media/pdf/wtag2013/eicke-hennig_fiw_wst2013.pdf

[Erhorn et al. 2001]

Erhorn, H.; de Boer, J.; Kluttig, H.; Reith, A. (2001): Fertighäuser im Wandel. Vom Niedrigenergiehaus zum Null-Heizenergiehaus. Broschüre des Fraunhofer IBP und WeberHaus (Projektstudie des BMWI), 2001

[Ettrich et al. 2010]

Ettrich, M., Hauser, G., Hoppe, M. (2010): Modernisierungsempfehlungen im Rahmen der Ausstellung eines Energieausweises - Energetische, baukonstruktive, bauphysikalische und wirtschaftliche Bewertung von Modernisierungsmaßnahmen. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2010.

[EU Risk Assessment TCPP 2008]

EU Risk Assessment TCPP (2008): European Union Risk Assessment Report (TCPP), May 2008, Ireland (lead) and United Kingdom

[FAO 2013]

FAO (2013): <http://faostat3.fao.org/home/index.html#DOWNLOAD> (Abruf am 08.07.2013; Unterkategorie "Forestry Production and Trade", Germany, Elements: Production (m3) Import quantity (m3), Export quantity (m3), Items: Insulating boards, Years: all

[Feldmann und Becker 2008]

Feldmann, R.; Becker, T. (2008): Wärmebrücken in der Bestandssanierung. Leitfaden für Fachplaner und Architekten. Deutsche Energieagentur GmbH (dena), Stand: 04/08

[Fengel und Wegener 1989]

Fengel, D.; Wegener, G. (1989): Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. New York: de Gruyter, 1989

[Fischer 1996]

Fischer (1996): Gesundheitliche Bewertung künstlicher Mineralfasern und ihre Alternativen, in: WAW, Tagungs-band, Dämmstoffe im Bauwesen, Weinheim 1996]

[Fouad 2010]

Fouad, N.A. (Hrsg.) (2010): Bauphysik Kalender 2010. 10. Jg. Berlin: Ernst & Sohn 2010.

[Frick und Droß 2011]

Frick, J.; Droß, P.J. (2011): Datenreport 2011. 8 Wohnverhältnisse und Wohnkosten. Hrsg.: Statistisches Bundesamt, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Zentrales Datenmanagement, Bonn 2011

[Fricke et al. 2007]

Fricke, J.; Beck, A.; Binder, M. (2007): Vakuum-Isolations-Paneel für Gebäude – Ein Lehrbuch. ZAE Bayern, Würzburg, 2007; ISBN 978-3-00-022618-2

[Friedrich et al. 2009]

Friedrich, M.; Bollich, P.; Treichel, M.; Erhorn, H.; Erhorn-Kluttig, H. (2009): CO₂ Gebäudereport 2009. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, Juni 2009. unveröffentlicht

[Frondelet et al. 2011]

Frondelet et al. (2011): Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2006 – 2008. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin, 2011

[Fuehres und Faul 2000]

Fuehres, M.; Faul, L. (2000): Bewertung natürlicher, organischer Faserdämmstoffe. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2000

[GDI 2013]

GDI (2013): Zusammenstellung der Daten zur Baumarktstatistik des GDI, 2013

[GdW 2010]

GdW (2010): GDW Arbeitshilfe 64: Energieeffizientes Bauen und Modernisieren. Gesetzliche Grundlagen, EnEV 2009, Wirtschaftlichkeit. 2010

[Gierga 2005]

Gierga, M. (2005): Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmauerwerk im historischen Wandel. AMz-Bericht ZIEGEL 8/2005 der Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der deutschen Ziegelindustrie e.V., Bonn, 2005

[Hammerschmidt und Sabuga 2000]

Hammerschmidt, U.; Sabuga, W. (2000): Messungen thermischer Eigenschaften einer Thermobeschichtung für den baulichen Wärmeschutz. Bauphysik 22 (2000) Heft 2, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 2000.

[Hauser 1992]

Hauser, G. (1992): Wer den Gebäudebestand vergißt, kann alle Energiesparziele vergessen. In: Isoliertechnik 18, H 5, 1992, S. 37. Umwelt & Energie-Report 14, Nr. 10/11, 1993, S. 30.

[Hauser und Stiegel 2006]

Hauser, G.; Stiegel, H. (2006): Wärmebrückenkatalog für Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzen. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, Bauforschung für die Praxis, Bericht 74

[Hauser et al. 2011]

Hauser, G.; Etrich, M.; Göttig, R. (2011): Grenzen einer kurz und mittelfristigen Substitutionsmöglichkeit von HBCD-haltigen Dämmstoffen durch andere Dämmstoffe im Hochbau. Gutachten im Auftrag des Industrieverband Hartschaum e.V., München, 30. Juni 2011

[Hegger 2008]

Hegger, M. (2008): Energie Atlas. Nachhaltige Architektur. 1. Aufl. Basel, München: Birkhäuser; Edition Detail.

[Henger und Voigtländer 2012]

Henger, R.; Voigtländer, M. (2012): Energetische Modernisierung des Gebäudebestandes: Herausforderungen für private Eigentümer. Gutachten des Institut der deutschen Wirtschaft Köln, 2012

[Hinz 2006]

Hinz, E. (2006): Gebäudetypologie Bayern. Entwicklung von 11 Hausdatenblättern zu typischen Gebäuden aus dem Wohngebäudebestand Bayerns. Studie im Auftrag des Bund Naturschutz Bayern e.V., Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Endbericht 27.02.2006

[Hinz 2012]

Hinz, E. (2012): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden. BMVBS-Online-Publikation, Nr. 07/2012, BMVBS, Juni 2012

[Hoffmann 2012]

Hoffmann, R. (2012): Häuser richtig energieeffizient bauen. [Schimmelbildung vermeiden ; Energieeffizientes und kostenbewusstes Bauen ; Brandschutz und Einbruchsicherungen ; Pfusch verhindern und Kosten sparen ; Dämmstoffvergleich]. Haar bei München: Franzis.

[Holm und Sprengard 2013]

Holm, A.; Sprengard, C. (2013): Dämmstoffe als Baustein der Energiewende. Energieeffizienz in Gebäuden. Jahrbuch 2013. VME-Verlag und Medienservice Energie, 2013

[Holm et al. 2013a]

Holm, A.; Sprengard, C.; Simon, H. (2013): Hitzeschutz – Was im Sommer wirklich zählt. *mikado* 8.2013 (in Druck), WEKA Baufachverlag, Kissing, 2013

[Holm et al. 2013b]

Holm, A.; Sprengard, C.; Simon, H.; Künzel, H. (2013): Das Verhalten von Dämmungen bei Hochwasser. Presseinformation, Gesamtverband Dämmstoffindustrie GDI, Juli 2013

[IC 2013]

IC (2013): IC Market Forecast. Thermal Insulation in Germany. June 2012. IC Interconnection Consulting, Wien

[IFEU/TNS 2008]

IFEU/TNS (Institut für Energie- und Umweltforschung IFEU und TNS Emnid) (Hrsg.) (2008): Evaluation des Förderprogramms „Energiesparberatung vor Ort“. Schluss-

bericht. im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Heidelberg, Juni 2008.

[IsoBow 2012]

IsoBow (2012): <http://www.isobouw.de/index.php/biofoamr> zuletzt geprüft am 30. Juli 2013.

[Knissel et al. 2006]

Knissel, Jens; Alles, R.; Born, R.; Loga, T.; Müller, K.; Stercz, V. (2006): Vereinfachte Ermittlung von Primärenergiekennwerten zur Bewertung der wärmetechnischen Beschaffenheit in ökologischen Mietspiegeln; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 2006

[Kolge 2011]

Kolbe, G. (2011): Schlanke Schale: WDVS mit Vakuumdämmung. Bauhandwerk, 09/2011

[König 2012]

König, H. (2012): Wärmedämmung. Vom Keller bis zum Dach. 7. Aufl. Berlin: Verbraucherzentrale Bundesverband (Bauen und Wohnen).

[Königstein 2011]

Königstein, Th. (2011): Ratgeber energiesparendes Bauen. Auf den Punkt gebracht: neutrale Fachinformationen für mehr Energieeffizienz. 5. Aufl. Taunusstein, Stuttgart: Blottner; Fraunhofer IRB-Verlag.

[Königstein 2013]

Königstein, Th. (2013): Flammschutzmittel in Polystyrol-Dämmstoffen. Weltweites Verbot von HBCD. Informationsdienst Bauen + Energie, Ausgabe Juni 2013, S. 10-12

[Krause 2012]

Krause, M. (2012): Gebäude minimalinvasiv sanieren. Forschung kompakt 08/2012, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen, 2012

[Krus und Sedlbauer 2004]

Krus, M.; Sedlbauer, K. (2004): Vorteile und Einsatzgrenzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. In Ökonomie und Ökologie in der Bauwerkserhaltung: Sonderheft zur Denkmal 2004; Tagung/Kongress zur denkmal 2004, 27 – 30.10.2004, in Leipzig; Tagung „Ökonomie und Ökologie bei der Sanierung Historischer Bauten“, 28.10.2004 München: WTA, 2004 (WTA-Schriftenreihe 26) ISBN: 3-937066-02-0, S. 99-117

[Krus et al. 2006]

Krus, M.; Fitz, C.; Holm, A.; Sedlbauer, K. (2006): Vermeidung von Algen- und Schimmelpilzwachstum an Fassaden durch Beschichtungen mit verringerter langwelliger Abstrahlung. IBP-Mitteilung 478, 33 (2006)

[Kubina L. 2011]

Kubina, L. (2011): Practice Experience with LockPlate. 2011, Proceedings of the International Vacuum Insulation Symposium IVIS, Montreal, 2011

[Künzel et al. 2001]

Künzel, H.M.; Krus, M.; Sedlbauer, K. (2001): Algen auf Außenwänden – Bauphysik als Ursache? Bauphysik als Lösung!. Beitrag zum 3. Dahlberg-Kolloquium „Mikroorganismen und Bauwerksinstandsetzung“, Wismar, Sept. 2001

[Künzel 2002]

Künzel, H. (2002): Bauphysik – Geschichte und Geschichten. IRB-Verlag Stuttgart; 2002[Künzel et al. 2005]

Künzel, H; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K. (2005): Langzeitverhalten von Wärmedämmverbundsystemen. IBP-Mitteilungen 461/2005 u. a. IBP-Bericht HTB-01/2005

[LBV 2010]

LBV (2010): Wer klopft denn da? Spechte als Fassadenhacker. Ratgeber zum Artenschutz an Gebäuden und in der Stadt. Hrsg. Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V., Kreisgruppe München, 2010

[Leisewitz et al. 2000]

Leisewitz, A.; Kruse, H.; Schramm, E. (2000): Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel. Band I: Ergebnisse und zusammenfassende Übersicht. Forschungsbericht 204 08 542 (alt) 297 44 542 (neu), im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dezember 2000

[LfU 2013a]

LfU (2013a): Organische Luftschadstoffe in Innenräumen – ein Überblick. Bayerisches Landesamt für Umwelt, abgerufen am 07.10.2013

http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_45_organische_luftschadstoffe_innenraeume_ueberblick.pdf

[LfU 2013b]

LfU (2013b): Organische Luftschadstoffe in Innenräumen – Probennahme, Messung und Bewertung. Bayerisches Landesamt für Umwelt, abgerufen am 07.10.2013

http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_45_organische_luftschadstoffe_innenraeume_ueberblick.pdf

[Lignotrend 2013]

Lignotrend (2013): <http://www.lignotrend.de/produkte/zertifiziertebauteile/suche/> (Abruf am 04.07.2013)

[Lindner 2012]

Lindner, S. (2012): Lightweight nanofoams for thermal insulation. *proceedings of the International Symposium on Superinsulating Materials*, Brüssel, Belgien, am 26. April 2012.

[Loga et al. 2011]

Loga, T.; Diefenbach, N.; Born, R. (2011): Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), Darmstadt, 18.11.2011

[Mandate M/366]

Mandate M/366: Development of horizontal standardized assessment methods for harmonized approaches relating to dangerous substances under the Construction Products Directive (CPD). EU-Commission, DG Enterprise, Brüssel, 16.03.2005

[Müssig et al. 2006]

Müssig, J.; Cescutti, G.; Fischer, H. (2006): Le management de la qualite applique a l'emploi des fibres naturelles dans l'industrie. In: Bouloc, P. (Editor): Le chanvre industriel – production et utilisations. Paris: Groupe France Agricole, 2006, (Editions France Agricole) (ISBN 2-85557-130-8), S.235-269

[Neitzel und Schulze Darup 2011]

Neitzel, M.; Schulze Darup B. (2011): Energieeffizienz mit städtebaulicher Breitenwirkung. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt AZ: 26422 – 25 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), 2011

[Novikova et al. 2011a]

Novikova, A.; Amecke, H.; Neuhoff, K.; Stelmakh, K; Kiss, B.; Rohde, C.; Dunkelberg E.; Weiß, J.; Matschoss, K.; Darby, S. (2011): Informationsinstrumente zur Förderung von Energieeinsparungen im Wohngebäudebestand. CPI Report, Climate Policy Initiative Berlin, Juli 2011

[Novikova et al. 2011b]

Novikova, A.; Amecke, H.; Neuhoff, K.; Stelmakh, K; Kiss, B.; Rohde, C.; Dunkelberg E.; Weiß, J.; Matschoss, K.; Darby, S. (2011b): Informationsinstrumente zur Förderung von Energieeinsparungen im Wohngebäudebestand. CPI Report, Climate Policy Initiative Berlin, Juli 2011

[Oswald et al. 2012]

Oswald, R.; Spilker, R.; Abel, R.; Wilmes, K. (2012): Zustandsänderungen von Mineralwolle in Warmdachaufbauten bei Flachdächern in folge Feuchteintritt. Abschlussbericht, Mai 2012. AlBau – Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik, Aachen, 2012

[Paschko et al. 2013]

Paschko, K.; Paschko, H.; Drewer, A. (2013): Für jedes Haus den passenden Dämmstoff. Bauen im Bestand, B+B, 3.2013

[Pfeiffer 2008]

Pfeiffer, M. (2008): Energetische Gebäudemodernisierung. Institut für Bauforschung e.V. (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag, 2008

[Pfundstein et al. 2007]

Pfundstein, M.; Gellert, R.; Spitzner, M.H.; Rudolphi, A. (2007): Dämmstoffe. Grundlagen, Materialien, Anwendungen. Edition Detail, 1. Auflage 2007

[Pistohl 1998]

Pistohl, W. (1998): Handbuch der Gebäudetechnik. Planungsgrundlagen und Beispiele. Band 2 Heizung/Lüftung/Energiesparen. Düsseldorf: Werner.

[Porextherm 2013]

Porextherm (2013): Umwelt-Produktdeklaration, Porextherm Dämmstoffe GmbH, Deklarationsnummer: EPD-PDG-20111111-D

[Pöschk 2013]

Pöschk, J. (2013): Anstelle eines Vorwortes: Bemerkungen zu aktuellen Entwicklungen im Themenfeld Energieeffizienz in Gebäuden. Energieeffizienz in Gebäuden. Jahrbuch 2013. VME-Verlag und Medienservice Energie, 2013

[Consultic 2012]

Consultic (2012): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011, Consultic Studie vom 31.08.2012

[Prognos 2005]

Prognos (2005): Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030 – Energie-wirtschaftliche Referenzprognose (Energieraport IV). Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Prognos AG (2005), Köln/Basel

[Pfnür und Müller 2013]

Pfnür, A.; Müller, N. (2013): Energetische Gebäudesanierung in Deutschland. Studie Teil II: Prognose der Kosten alterantiver Sanierungsfahrpläne und Analyse der finanziellen Belastung für Eigentümer und Mieter bis 2050. Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 28, August 2013

[Rampf 2013]

Rampf (2013): Pressemitteilung Rampf Ecosystems, vom 13. Dezember 2012, <http://www.rampf-ecosystems.de/aktuell-informiert-pressemeldungen/>, abgerufen am 11.10.2013

[Rasmussen 2002]

Rasmussen, T (2002) By og Byg Documentation 028: creep of granulated loose-fill insulation. Test method and round robin test

[Rasmussen 2005]

Rasmussen, T (2005) Density of loose-fill insulation material exposed to cyclic humidity conditions. Test method and round-robin test, Nordtest project 1623-03

[REACH 2006]

REACH (2006): REACH EU VO 1907/2006 Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical substances vom 18. December 2006

[Schild et al. 2010]

Schild, K.; Weyers, M.; Willems, W.M. (2010): Handbuch Fassadendämmsysteme - Grundlagen, Produkte, Details. 2. überarbeitete Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2010.

[Schild und Willems 2011]

Schild, K.; Willems, W. (2011): Wärmeschutz. Grundlagen – Berechnung – Bewertung. 1. Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

[Schröder et al. 2010]

Schröder, F.; Engler, H. J.; Boegelein, T.; Ohlwärter, C. (2010): Spezifischer Heizenergieverbrauch und Temperaturverteilungen in Mehrfamilienhäusern – Rückwirkung des Sanierungsstandes auf den Heizenergieverbrauch. HLH 61 (2010) Heft 11.

[Schwab 2010]

Schwab, R. (2010): Innovativ Saniert! – mit integrierten Lüftungskanälen in der Außen­dämmung. Pressemitteilung des Fraunhofer Instituts für Bauphysik. Kassel, 2010

[Setzler 2012]

Setzler, W. (2012): Fachverband WDVS: WDVS im Lebenszyklus. 2nd ETICS-Forum, 25. Oktober 2012, Straßburg

[Simons 2012]

Simons, H. (2012): Empirica Studie. Energetische Sanierung von Ein- und Zweifamilienhäusern. Hg. v. Verbandes der Privaten Bausparkassen e.V. Berlin.

[Sprengard und Spitzner 2011a]

Sprengard, C.; Spitzner, M. (2011a): Optimierung der energetischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von VIP-Paneelen durch die optimale Kombination von Kieselsäure-, Mineralfaser- und EPS-Dämmstoff. Forschungsbericht der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, BBR, Bonn, 2011.

[Sprengard und Spitzner 2011b]

Sprengard, C.; Spitzner, M. (2011b): Untersuchungen zu Alterung und Wärmebrücken bei Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) für Bauanwendungen. Bauphysik 33 (2011), Heft 4, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 2011.

[SRU 2012]

SRU (2012): Umweltgutachten 2012. Kapitel 6: Umweltgerechte Waldnutzung. Sachverständigenrat für Umweltfragen, 04.06.2012

[Stempel 2011]

Stempel, U. E. (2011): Dämmen und Sanieren in Alt- und Neubauten. [Dach, Decke, Wand fachgerecht dämmen und dichten ; sanieren und modernisieren ; Materialwahl und richtige Verarbeitung ; Dämmstoffe und ihre Eigenschaften ; Fenster- und Rollladensanierung und vieles mehr]. 2. Aufl. Haar bei München: Franzis

[Svennerstedt 1986]

Svennerstedt, B (1986) Settling of loose fill thermal insulation. National Swedish Institute for Building Research, Bulletin M85:31, Gävle, Sweden

[Technomar 2005]

Technomar (2005): Abbau von Hemmnissen bei der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes. München S. 80-82

[Tremel und Engelhardt 2013]

Tremel, S.; Engelhardt, M. (2013): Evaluation of settlement behaviour of loose-fill insulation material using relaxation tests. Wo Sci Tech, volume 47, issue 2, pp 343-351

[Tröger 2001]

Tröger, J (2001) Setzungsverhalten von Schüttdämmstoffen. Mikado 1/2001, pp 66–70

[Tryfonidou et al. 2013]

Tryfonidou, R.; Hauer, A.; Hiebler, S.; Hirn, G.; Meyer, F. (2013): Kälte- und Wärmespeicher in Gebäuden, Energieeffizienz in Gebäuden – Jahrbuch 2013. Verlag Medienservice und Energie VME, Pöschk J. (Hrsg.), Berlin, 2013

[Tzscheutschler et al. 2009]

Tzscheutschler, P.; Nickel, M.; Wernicke, I.; Buttermann, H.G. (2009): Energieverbrauch in Deutschland. Stand 2007: Daten, Fakten, Kommentare. BWK Bd. 61, Nr. 6, S. 6 - 14 et al. 2009

[UBA 1999]

Umweltbundesamt (1999): Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC. Erich Schmidt Verlag, 1999

[Uni Bayreuth 2013]

Uni Bayreuth (2013): Medienmitteilung Nr. 17/2013, 31. Januar 2013

[Walberg et al. 2011]

Walberg, D.; Holz, A.; Gniechwitz, T.; Schulze, Th. (2011): Wohnungsbau in Deutschland – 2011. Modernisierungen oder Bestandsersatz. Studie zum Zustand

und der Zukunftsfähigkeit des deutschen „Kleinen Wohnungsbaus“. Bauforschungsbericht Nr. 59, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., 2011

[WID 2013]

WID (2013): <http://www.waerme-im-dialog.de/wissen/wissen-detail/richtiges-verbauen-und-technische-massnahmen-bieten-sicherheit.html> (Abruf am 26.07.2013)

[Winterling und Sonntag 2011]

Winterling, H.; Sonntag, N. (2011): Polystyrol-Hartschaumstoff (EPS, XPS). *Kunststoffe 10/2011*; Carl Hanser Verlag, München, 2011

[Zeitler 2000]

Zeitler, M. (2000): Allgemein gültiges Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe und Stoffschichten. Dissertation vom Fachbereich 12 – Maschinenwesen der Universität GHS Essen, 2000.

[Zirkelbach und Holm 2001]

Zirkelbach, D.; Holm, A. (2001): Trocknungsverhalten von monolithischen Wänden. IBP-Mitteilung 389, 28 (2001), Fraunhofer Institut für Bauphysik

Nicht zitierte Literatur zum Weiterlesen:

Adolf, J., Marczewski, A., Schabla, U., and et al. 2011. Shell Hauswärme-Studie. Nachhaltige Wärmeerzeugung für Wohngebäude: Fakten Trends und Perspektiven. Shell Deutschland; HWWI Hamburgisches WeltWirtschafts Institut; ifeu, Hamburg.

Albrecht, W., and Koppold, S. 2010. Langzeitverhalten von Dämmstoffen. In Bau-physik Kalender 2010, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, Hrsg. N. Fouad, 2010

ASSMANN Beraten + Planen. 1992. Energetische Sanierung Industriell Errichteter Wohnbauten. Grundlagenstudie zur Energiegerechten Bauschadenssanierung industriell errichteter Wohngebäude in den neuen Bundesländern.

Bagda, E. 2010. Algen und Pilze. Es gibt kein Patentrezept. Ausbau + Fassade 2010, 6 (2010).

Beck, A. 2012. Auszüge Bachelorarbeit_Wirtschaftlichkeit von Dämmung.

Berufsgenossenschaften der Bauwirtschaft. 2000. Umgang mit Mineralwolle-Dämmstoffen. (Glaswolle, Steinwolle). Berufsgenossenschaften der Bauwirtschaft.

Bodewig, K. 2001. Leitfaden Nachhaltiges Bauen.

Brake, M. 2011. Werden Häuser immer mehr zu Sondermüll?

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2007. Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan (EEAP) der Bundesrepublik Deutschland. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2011. Energiedaten. ausgewählte Grafiken. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). 2005. Gesund Wohnen durch richtiges Lüften und Heizen. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

Deutscher Bundestag. 2011. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Vierter Bericht über die Substitution risikoreicher durch risikoärmere Biozid-Wirkstoffe und Biozid-Produkte. Deutscher Bundestag 2011 (Sep.).

Die Rheinpfalz - Veranstaltungsmagazin "LEO". 2012. Antworten auf Fragen zum Thema Dämmung. Die Rheinpfalz - Veranstaltungsmagazin "LEO" 2012 (Dec.).

Diermann, R. 2013. Wärme mit Nebenwirkungen. Süddeutsche Zeitung 2013, 3. (Jan.).

Dürand, D., Gerth, M., Schürmann, C., Schumacher, H., and Haerder, M. 2010. Der Sanierungszwang wird teuer. Zeit Online 2010 (Nov.).

Economidou, M., and et al. 2011. Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings. Buildings Performance Institute Europe (BPIE).

Endres, E., and Kleser, J. 2008. Wärmedämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum. Herstellung - Anwendung - Eigenschaften. IVPU - Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V.

Enseling, A. 2003. Leitfaden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparinvestitionen im Gebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), Darmstadt.

Erhard, A., Dietrich, W., and et al. 1990. Polyurethan Eigenschaften. Information im Dienst wirtschaftlichen Bauens.

eza, e. 2002. Bauen für die Zukunft. wirtschaftlich - energiebewusst - komfortabel. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

Fachverband WDV-Systeme. 2010. Technische Information-Algen und Pilze. Fachverband WDV-Systeme.

Fleury, G. 1990. Die UEAtc-Richtlinie für die Erteilung von Agréments für Fassaden-Wärmedämmverbundsysteme. mit dünnen Putzbeschichtungen auf Wärmedämmmaterial aus expandiertem Polystyrol. Bauphysik 1990, 12 (1990).

Gaukesbrink/Fa Elastogran, U., Hofmann/Süddeutsches Kunststoff-Zentrum Würzburg, H., and Lang/Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München (FIW), G. 2005. Arbeitsunterlage zur Vorbereitung auf die Prüfung von PUR-Dachspritzschaum. "Blaues Buch". Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V; Güteschutzgemeinschaft Hartschaum e.V; MPA NRW Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen.

Groß, M., Bartol, S., Beckmeyer, U., and et al. 2012. Brandverhalten von Baustoffen. Fragen zum Brandschutz.

Haimann, R. 2011. Schimmel-Dämmplatten können krank machen. Welt Online 2011 (Jul.).

Haimann, R. 2012a. EU will Wohnhäuser zwangssanieren lassen. Die Welt 2012 (Mar.).

Haimann, R. 2012b. Die unterschätzte Brandgefahr bei Wärmedämmung. Die Welt 2012 (Oct.).

Haimann, R. 2012c. Höhere Kosten trotz Dämmung. Die Welt 2012 (Oct.).

Händel, C. 2012. Stellungnahme zur Hygiene in Wohnungslüftungsanlagen.

- Hegner, H.-D., Bender, U., and Tabbert, G. 2003. Anwendung der Energieeinsparverordnung - energetische Kennwerte und Durchführungsbestimmungen.
- Hladik, M. Speckschäden an Fassaden.
- Isoliertechnik. 2001. WDVS Purenotherm. Isoliertechnik 2001, 1. (2001).
- Isoliertechnik. 2013. EPS - Dämmstoff mit Zukunft.
- Krus, M., Fitz, C., and Sedlbauer, K. Latentwärmespeicherzusätze und IR-Anstriche zur Reduktion des Bewuchsriskos an Außenfassaden. Gesundheits-Ingenieur 2009.
- Latnser, K. 1990a. Erläuterungen "Zum Nachweis der Standsicherheit von Wärmedämmverbundsystemen mit Mineralfaserdämmstoffen und mineralischem Putz". Bauphysik 1990, 12 (1990).
- Latnser, K. 1990b. Zum Nachweis der Standsicherheit von Wärmedämmverbundsystemen mit Mineralfaser-Dämmstoffen und mineralischem Putz. Bauphysik 1990, 12 (1990).
- Löfken, J.O. 2012. Superleichte Aerogele. Technology Review.
- Loga, T., Knissel, J., Diefenbach, N., and Born, R. 2005. Entwicklung eines vereinfachten, statisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden. Kurzverfahren Energieprofil. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU).
- Löhnert, G., Dorn, S., Dalkowski, A., Dührkop, F., Haegi, A., and et al. 2013. Energieeffizient Bauen und Modernisieren (BVBS), Berlin.
- Lücke, A. 2007. Presseinformation: Zweite Fachtagung Baumaschinentechnik setzt Maßstäbe. Licht am Ende des Tunnels. BDH Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V.
- Mertz, G. 2012. ohne gebaueudesanierung werden die ziele nicht erreicht. www.trend-zeitschrift.de 2012 (Oct.).
- Neubacher, A. 2012. Verdämmt. Der Spiegel 2012, 20 (2012).
- ntv. 2012. Dämmungsziele überflüssig? Alte Häuser besser als gedacht. ntv 2012 (Nov.).
- Oden, M., Hecking, C., Beyerle, H., and Fichtner, N. 2013. Verdämmt und zugeklebt. Capital Das Wirtschaftsmagazin 2013 (Feb.).
- Ornth, W. 2008. Energieeffizienz und erneuerbare Wärme. -Zukünftige Pflichten-, Düsseldorf.

Oschütz, R., and et al. 2012. Allgemeine Bauzeitung. Anspruch und Wirklichkeit der Energiewende klaffen weit auseinander. Allgemeine Bauzeitung 2012, 49 (Dec.).

Paschko, K., and Drewer, A. 2012. Ökologie von Dämmstoffen. Der Bausachverständige 2012 (Aug.).

Pillen, N. 2008. Deutschland setzt auf minimalen Energieverbrauch und erneuerbare Energien im Gebäudebestand. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

Pillen, N., Discher, H., Hinz, E., and Enseling, A. 2010. dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand.

Purtul, G. 2011a. Wärmedämmung kann Hausbrände verschlimmern. Styropor-Platten in Fassaden. Spiegel Online 2011 (Nov.).

Purtul, G. 2011b. Gefahr aus Plastikschaum. Spechtlöcher, Algen, Brandrisiko: Hausdämmung mit Styropor ist problematisch. Süddeutsche Zeitung 2011 (Dec.).

Rauterberg, H. 2010. Schluss mit dem Dämmwahn! Zeit Online 2010 (Oct.).

Rommel, J. 2013a. Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser, Düsseldorf.

Rommel, J. 2013b. Belastung der Ruhr mit Mikroschadstoffen ist ernstes Thema, Düsseldorf.

Richter, P., and Maak, N. 2010. Die Burka fürs Haus. Frankfurter Allgemeine Zeitung 2010 (Nov.).

Schäfer, H.G. 1990. Zum Standsicherheitsnachweis von Wärmedämmverbundsystemen mit Klebung und Verdübelung. Bauphysik 1990, 12 (1990).

Schulze, B. Unbekannt. Entwurfsanforderungen bei der Sanierung.

Steinmeier, W., and et al. 2012. Kleine Anfrage; Brandverhalten von Baustoffen.

Stiftung Warentest. Bloß keine Wärmebrücke. Stiftung Warentest 04.2012.

Stolte, C., Marcinek, H., Discher, H., Hinz, E., and Enseling, D. 2012. dena-Sanierungsstudie.2011. Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU).

Streitz, M. 2007. "Die klassische Solartechnik ist eine Sackgasse". Spiegel Online 2007 (Jun.).

Thamling, N., Böhmer, M., Kemmler, A., and Hoch, M. 2011. Volkswirtschaftliche Bewertung der EnEV 2009. Abschlussbericht der Studie. prognos, Basel/Berlin.

Toller, A. 2012. Kostenfalle Wärmedämmung. Wirtschaftswoche 2012 (Oct.).

Trommer, S., Franz, K., and Stimpel, R. 2013. "Bewährte Produkte - aber kein Allheilmittel". schwerpunkt: fassaden. Deutsches Architektenblatt 2013 (Jan.).

Umweltbundesamt. 2008. Bromierte Flammschutzmittel - Schutzengel mit schlechten Eigenschaften? Umweltbundesamt.

Unbekannt. 2011. Entscheidungshandbuch für die Umsetzung der Richtlinie 98/8/EU über das Inverkehrbringen von Bioziden. Uebersetzung-Biozide.pdf (Jan.).

Weber, G. 2012. WDVS unter der Lupe. WSM Wissen schafft Markt.

Winkelmüller, M. 2011. Bauprodukte und technische Normen - Rechtliche Anforderungen und technische Regelungen. ibr-online.

Wittstock, B., Albrecht, S., Colodel, C.M., and Lindner, J.P. 2009. Gebäude aus Lebenszyklusperspektive. Ökobilanzen im Bauwesen.

Wolber, C. 2011. Gebäudesanierung kostet Bürger bis zu 750 Milliarden Euro. www.shell.de 2011 (Dec.).

Zeit Online. 2012. Mieter befürchten mehr Kosten durch Sanierung. Zeit Online 2012 (Jul.).

Zipp, K. 2003. EPS White Book. EUMEPS Background Information on Standardisation of EPS. EUMEPS Construction.

Bücher zum Weiterlesen:

2000. Ökologie der Dämmstoffe. Grundlagen der Wärmedämmung, Lebenszyklusanalyse von Wärmedämmstoffen, optimale Dämmstandards. Springer, Wien.

Balog, K., and Scarailo, D. 2011. Gefahrenstoffe am Arbeitsplatz durch Formaldehyd in Baumaterialien. GRIN Verlag GmbH.

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2012. Bruttostromerzeugung nach Energieträgern. <http://www.thema-energie.de/energie-im-ueberblick/daten-fakten/statistiken/energieerzeugung/bruttostromerzeugung-in-deutschland.html>.

Eisenschink, A. 2004. Die krankmachende Ökofalle in unseren Häusern. Verordnete Irrwege und der Ausweg. JohanThV, Murnau.

Eiserloh, H.P. 2009. Handbuch Dachabdichtung. Aufbau - Werkstoffe - Verarbeitung - Details. R. Müller, Köln.

Endhardt, M. 2010. Vom Altbau zum Niedrigenergie- und Passivhaus. Gebäudesanierung, neue Energiestandards, Planung und Baupraxis mit EnEV 2009. Ökobuch, Staufen bei Freiburg.

Fischer-Uhlig, H. 1998. Das Buch vom gesunden Bauen und Wohnen. Schritte zum grösseren Wohnbehagen : Baustoffe, Bauweisen, Bauideen. Blottner, Taunusstein.

Giebeler, G., Fisch, R., Krause, H., Musso, F., Petzinka, K.H., and Rudolphi, A. 2008. Atlas Sanierung. Instandhaltung, Umbau, Ergänzung. Birkhäuser, Basel.

Gniechwitz, T., Holz, A., Schulze, T., and Walberg, D. 2011. Wohnungsbau in Deutschland - 2011 - Modernisierung oder Bestandsersatz. [Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen "Kleinen Wohnungsbaus"]. Bauforschungsbericht 59. Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen, Kiel.

Häfele, G., Oed, W., and Sabel, L. 2008. Hauserneuerung. Instandsetzen, Modernisieren, Umbauen ; ökologische Baupraxis ; mit Anleitung zur Selbsthilfe. Ökobuch, Staufen bei Freiburg.

Hegger, M. 2008. Energie Atlas. Nachhaltige Architektur. Birkhäuser; Edition Detail, Basel, München.

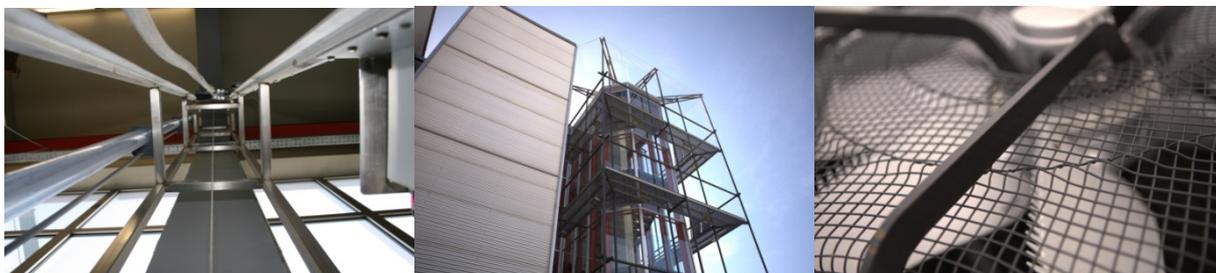
Hoffmann, R. 2011. Altbauten richtig instand setzen: Schadstoffe erkennen und beseitigen. Franzis, Poing b München.

Krolkiewicz, H.J. 2007. Günstig bauen. [richtig kalkulieren ; mit Rechts- und Kostenchecks]. Haufe, München [i.e.] Planegg.

Lang, W., Hamacher, T., Hauser, G., and Hausladen, G. 2012. Energetische Gebäudesanierung in Bayern. Studie. Stand: Juli 2012, München.

- Lange, M. 2011. Schäden und deren Sanierungskosten an Wärmedämmverbundsystemen. GRIN Verlag GmbH, München.
- Meier, C. 2010a. Richtig bauen. Bauphysik im Zwielficht - Probleme und Lösungen ; mit 49 Tabellen. Expert-Verl., Renningen.
- Meier, C. 2010b. Verwildertes Bauen. Kriminelle Netzwerke zerstören Bauten - und Glaubwürdigkeit ; mit 21 Tabellen ; [Fragen und Antworten]. Expert-Verl., Renningen.
- Müller-Rees, K. 2012. Möglichkeiten und Aspekte der energetischen Sanierung eines Altbaus. GRIN Verlag GmbH.
- Neimke, G., and Erlenbeck, M. 2008. Ökologisch wohnen, bauen und sanieren. Für Eigentümer und Mieter ; mit Übersicht der Förderprogramme. Humboldt, Hannover.
- Nussbaum-Sekora, G. 2012. (K)ein Pfusch am Bau. Wie ein Bausachverständiger (s)ein Haus richtig und dennoch kostengünstig bauen würde. Das Buch zur Sendung. Linde Verlag Wien, Wien.
- Pluschke, P. 1996. Luftschadstoffe in Innenräumen. Ein Leitfaden ; mit 44 Tabellen. Springer, Berlin [u. a.].
- Reyer, E., Schild, K., and Völkner, S. 2001. Kompendium der Dämmstoffe. Fraunhofer IRB-Verl., Stuttgart.
- Schäfer, H. 2006. Vom Altbau zum Passivhaus. Analyse, Zielstellung, Lösungsansätze. VDM Verl. Dr. Müller, Saarbrücken.
- Schmitz-Günther, T. 2007. Wenn Wohnen krank macht. Schadstoffe erkennen, beseitigen, vermeiden ; Öko-Test - richtig gut leben. Südwest, München.
- Sprengard, C., and Spitzner, M.H. 2011. Optimierung der energetischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von VIP-Paneelen durch die optimale Kombination von Kieselsäure-, Mineralfaser- und EPS-Dämmstoff. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart.
- Volkenant, K., Wolff, P.K., Trauthwein, D., and Goldmann, M. 2008. Gesund bauen und wohnen. Gesund bauen und wohnen.

Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle von Baustoffen und Bauteilen.
Forschung, Entwicklung sowie Beratung auf dem Gebiet des Wärme- und Feuchteschutzes.



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München T+49 89 85800-0 | F +49 89 85800-40
Lochhamer Schlag 4 | DE-82166 Gräfelfing info@fiw-muenchen.de | www.fiw-muenchen.de

Die energetische Sanierung im Gebäudebereich ist eine der entscheidenden Voraussetzungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs in Deutschland. Die Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen fasst den aktuellen Stand des Wissens hinsichtlich materialwissenschaftlicher, ökologischer und ökonomischer Aspekte von Wärmedämmstoffen und deren Anwendung zusammen und gibt Einblicke in die Innovationen von morgen.

Eine ausführliche und bauteilbezogene Analyse der energetischen Qualität des Gebäudebestands dient als Grundlage für eine detaillierte Abschätzung des möglichen Einsparpotentials durch Sanierungsmaßnahmen im Bestand. Factsheets stellen fundierte Informationen zu häufigen Fragen aus den Themenkomplexen Energieeinsparung, Rentabilität, Bauschadenssicherheit und Brandgefahr bereit. Erklärungen zu den gesetzgeberischen und ordnungspolitischen Rahmenbedingungen und technischen Regelwerken (Normen) machen die Metastudie Wärmedämmstoffe zu einem umfassenden Kompendium.

Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle von Baustoffen und Bauteilen.
Forschung, Entwicklung sowie Beratung auf dem Gebiet des Wärme- und Feuchteschutzes.



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München T+49 89 85800-0 | F +49 89 85800-40
Lochhamer Schlag 4 | DE-82166 Gräfelfing | info@fiw-muenchen.de | www.fiw-muenchen.de

ISBN 978-3-8167-9254-3



9 783816 792543