

Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe

Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen

Dr.-Ing. Sebastian Tremml
Dipl.-Ing. Christoph Sprengard
Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Albrecht
Prof.-Dr. Ing. Andreas H. Holm
Dipl.-Ing. (FH) Claus Karrer

Zweite und aktualisierte Auflage 2023. Die Aktualisierung wurde von der GRE e.V. gefördert und mit Eigenmitteln des FIW München unterstützt. Der Forschungsbericht aus dem Jahr 2013 wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) gefördert.



FIW München

Bericht FO-08-2021

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

Kurztitel: Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen
Zweite und aktualisierte Auflage 2023

Gefördert durch: Gesellschaft zur rationellen Energieverwendung GRE e.V.

Ausgabe 2013 gefördert vom 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: Unterstützt durch Eigenmittel des FIW München

Ausgabe 2013 unterstützt von:

Gesamtverband Dämmstoffindustrie GDI – Berlin

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

Bericht Nr.: FO-08-2021

Ausstellungsdatum: 03.04.2023

Seiten: 243

Vorwort zur zweiten Auflage

Die vorliegende Publikation schließt thematisch an den im Jahr 2013 veröffentlichten Forschungsbericht „Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe“ an. Nach nunmehr zehn Jahren erscheint es an der Zeit, ausgewählte Aspekte zu überarbeiten, um weiterhin den Stand der Technik sowie Neuerungen in den Regelungsgrundlagen und der Normung adäquat abzubilden.

Eine komplette Neubearbeitung aller Kapitel war dabei aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich, bzw. nicht sinnvoll. Einerseits haben sich einige, damals hochaktuelle Themen, mittlerweile überholt. So hat die Rezeption von Wärmedämmung in der medialen Berichterstattung in den letzten Jahren wieder an fachlicher Präzision und Neutralität gewonnen und ist auch in der öffentlichen Wahrnehmung überwiegend positiv besetzt. Das in der Erstausgabe ausführlich behandelte Thema der Potentialabschätzung wurde mittlerweile in anderen Studien umfangreich aufgearbeitet, so dass ein lediglich wiederholender Abdruck nicht sinnvoll erscheint.

Zahlreiche Neuerungen haben sich seit dem Erscheinen der ersten Auflage aber hinsichtlich der gesetzlichen Regelungen ergeben. In der vorliegenden Fassung werden deshalb ausführlich der Hintergrund europäischer Klima- und Energiepolitik und die daraus abgeleiteten nationalen Anforderungen und gesetzlichen Regelungen erläutert.

Ebenfalls berichtet wird über den aktuellen Stand und Probleme bei der Überarbeitung der Produktnormen für Wärmedämmstoffe. Die Ausführungen zu den Dämmmaterialien und Anwendungen sowie Innovationen wurden durchgesehen und aktualisiert.

Ebenfalls aktualisiert wurden die Marktdaten. Da Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe im Laufe der letzten Jahre weiter an Bedeutung gewinnen konnten, wurde das Kapitel der Marktbedeutung dieser Dämmstoffgruppe deutlich erweitert und untersucht nun auch die Verfügbarkeit der Rohstoffe für die wichtigsten Stoffgruppen in dieser Kategorie.

Auch die Kapitel zur Nachhaltigkeit und der Qualitätssicherung sind grundlegend neu strukturiert bzw. überarbeitet. Da das Thema der Kreislaufwirtschaft und des Recyclings im Rahmen der Circular Economy Strategie der Europäischen Kommission einen hohen Stellenwert einnimmt, wird diesem Thema nun auch ein eigenes Hauptkapitel gewidmet.

Die Autoren wünschen eine interessante und aufschlussreiche Lektüre!

Gräfelfing, März 2023

TECHNOLOGIEN UND TECHNIKEN ZUR VERBESSERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ VON GEBÄUDEN DURCH WÄRMEDÄMMSTOFFE	0
METASTUDIE WÄRMEDÄMMSTOFFE – PRODUKTE – ANWENDUNGEN – INNOVATIONEN	0
VORWORT ZUR ZWEITEN AUFLAGE	3
1 EINLEITUNG	8
2 HINTERGRUND: STEIGERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ UND REDUZIERUNG DER THG-EMISSIONEN DURCH BAULICHEN WÄRMESCHUTZ	11
2.1 Energiepolitische Ziele	11
Europäische Ziele	12
Nationale Ziele in Deutschland	13
2.2 Energieverbrauch im Gebäudebereich	18
2.3 Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich	24
3 DÄMMSTOFFE IM HOCHBAU	28
3.1 Grundlagen: bauphysikalische und technische Eigenschaften	28
Wärmeschutz	29
Wärmespeicherfähigkeit	29
Diffusionswiderstand	30
Wasseraufnahmevermögen	31
Schalldämmung	31
Brandverhalten	32
Mechanische Eigenschaften	35
Elastizität	35
Temperaturbeständigkeit	35
Primärenergieverbrauch	35
Dauerhaftigkeit	36
3.2 Überblick über Dämmstoffmaterialien und Dämmprodukte	36
Aerogel	39
Flachs und Hanf	40
Holzfaser (WF)	41
Holzwolle – Platten (WW)/Holzwolle-Mehrschichtplatten (WW-C)	43
Kalziumsilikat	45
Kork	46
Mineralschaum	47
Mineralwolle (MW)	48
Phenolharz (PF)	50

Polystyrol, expandiert (EPS)	51
Polystyrol, extrudiert (XPS)	52
Polyurethan (PU)	53
Pyrogene Kieselsäure	55
Schafwolle	56
Schaumglas (CG)	57
Vakuumisolationspaneele (VIP)	58
Zellulose (Altpapierflocken)	59
3.3 Regelung und Normung	60
3.4 Anwendung im Hochbau	69
Anwendungsbereiche und -eigenschaften	70
3.5 Anwendungsbeispiele	77
Steildach	77
Flachdach	79
Oberste Geschoßdecke	80
Außenwand	80
Kellerdecke	85
3.6 Marktentwicklung	85
3.7 Verfügbarkeit alternativer Dämmstoffe	90
Holz	93
Hanf	102
Zellulose	104
Zusammenfassung	106
4 INNOVATIONEN	109
4.1 Physikalischer Hintergrund	109
4.2 Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit bei Dämmstoffen	111
Neue Werte bei der Mineralwolle	111
Verbesserung bei EPS durch Wärmestrahlungsabsorber (graues EPS)	112
XPS	113
Polyurethan-Dämmstoffe	114
4.3 Verbesserung bei der dämmenden Wand	117
Mauerwerk: Porenbeton	121
Mauerwerk: Ziegel	122
Mauerwerk: Leichtbeton	123
4.4 Sonstige Entwicklungen	125
Vakuum-Isolations-Panele (VIP)	125
Advanced Porous Materials – APMs	127

	Aerogele	128
	Multifunktionalität / Serielles Sanieren	129
4.5	Umstrittene Entwicklungen	131
	Wärmedämmende Anstriche	131
	Foliensysteme mit IR-Reflexion	132
4.6	Problemfelder und Ziele für Weiterentwicklungen	132
	Anforderungen des Marktes	132
	Anforderungen für die Energiewende	133
5	NACHHALTIGKEIT VON DÄMMSTOFFEN	135
5.1	Grundlagen und Bewertungskriterien	137
5.2	Ökologische Qualität	139
	Energetische Amortisation	139
	Graue Energie und Treibhausgasemissionen für Dämmmaßnahmen	140
	Einsparungen durch Dämmmaßnahmen	143
	Auswertung Aufwand zu Einsparungen für verschiedene Bestandssituationen	144
	Amortisationszeiten	146
	Erzeugungsbedingungen von Energie und Rohstoffen zur Herstellung	148
	Bewertung von Umweltwirkungen	149
5.3	Ökonomische Qualität	150
	Material- und Verarbeitungskosten	151
	Wartungs- und Pflegekosten	153
	Kosten für den Rückbau	153
	Nutzungsdauer	154
	Kosten und Rentabilität	155
	Wirtschaftlichkeit aus wohnungswirtschaftlicher Sicht	157
5.4	Soziokulturelle Qualität	158
	Möglichkeiten der Interaktion zwischen Mensch und Material	158
	Fasern und Stäube	159
	Raumluftqualität	161
	Flammschutzmittel	166
	Behaglichkeit	171
	Architektur	172
6	KREISLAUFWIRTSCHAFT UND RECYCLING VON WÄRMEDÄMMSTOFFEN	174
6.1	Kreislaufwirtschaft, gesetzliche Rahmenbedingungen	174
	Europäische Ebene	175
	Nationale Gesetze und Verordnungen	176
6.2	Recyclingquote und Kreislaufwirtschaft am Bau	178

	Abfallaufkommen Bau	179
	Verarbeitungsmenge Kunststoffe am Bau	180
	Recycling der Kunststoffabfälle aus Bau- und Abbruchabfällen	182
6.3	Recycling von Dämmstoffen	182
	Steinwolle	184
	Glaswolle	186
	Expandierte Polystyrol (EPS)-Dämmstoffe	187
	Extrudiertes Polystyrol (XPS)	197
	Polyurethan-Hartschaum (PU)	200
	Phenolharz- Hartschaum (PF)	202
	Holzfaserdämmstoffe (WF)	202
	Mineralische Dämmplatten	202
6.4	Weitere Entwicklung und Ausblick	203
7	VERPFLICHTENDE UND FREIWILLIGE SYSTEME ZUR FESTSTELLUNG DER DEKLARIERTEN LEISTUNG UND DER QUALITÄTSSICHERUNG	205
7.1	Unabhängige Drittstellen	206
	Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen (PÜZ-Stellen)	206
	Notifizierte Stellen (Notified body)	206
7.2	Verpflichtende Systeme	207
	Dämmstoffe die einer harmonisierten technischen Spezifikation unterliegen	207
	Dämmstoffe die durch nationale Zulassungen oder Genehmigungen geregelt sind	209
7.3	Freiwillige Systeme	210
	Europäisches Zertifizierungssystem KEYMARK	210
	Freiwillige Zertifizierungsprogramme des FIW München und Q-Zeichen	211
	Das Q-Zeichen der ÜGPU für Wärmedämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum (PU)	212
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	214
9	LITERATUR	218

1 Einleitung

Seit dem Erscheinen der ersten Fassung der „Metastudie Wärmedämmung“ haben sich die Anforderungen an einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden verändert. War vor einigen Jahren noch die Reduzierung des Endenergiebedarfs im Gebäudesektor das gesetzlich verankerte Hauptziel, so ist es seit dem Klimaschutzgesetz in Deutschland und vergleichbaren Europäischen Forderungen, die Reduzierung der Treibhausgase, die als zentrale Anforderungsgröße an Bedeutung zunimmt. Hier besteht die Gefahr, dass ein Wechsel des Heizenergieträgers vorgenommen wird, z.B. von Gas auf Strom zum Betrieb einer Wärmepumpe, um durch die voranschreitende Dekarbonisierung der Stromerzeugung die Emissionen im Gebäude zu verringern, ohne dass dabei die Wärmeverluste über die Hülle reduziert werden. Dabei drohen sehr hohe Betriebskosten für die Bewohner, falls nicht parallel auch der energetische Standard des Gebäudes ertüchtigt wird. Es muss also weiterhin ein wichtiges Ziel bleiben, den Wärmeschutz der Gebäudehülle zu ertüchtigen, den Wärmeverlust über die Außenbauteile zu verringern und die Basis für einen effizienten Betrieb von Heiztechniken mit erneuerbaren Energien zu schaffen.

Wärmedämmung bleibt damit 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 wohnhygienisch 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 Studie ist die umfassende Zusammenstellung belastbarer Fakten zum Themengebiet des baulichen Wärmeschutzes.

Die von der Bundesregierung gestellten Zielvorgaben zur Reduzierung des Primärenergiebedarfes und der Treibhausgase im Gebäudebereich sind nur erreichbar, wenn die Energieverluste über die Hülle konsequent reduziert werden. Das betrifft die kontinuierliche Verbesserung des Neubaustandards, aber vor allem auch die dringend gebotene energetische Modernisierung im Bestand.

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. In diesem Sinne will die vorliegende Publikation aufklären und wichtige, dämmstoffrelevante Fragestellungen umfassend und für den Anwender, Planer und Ausführenden verständlich beantworten.

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. Wärmedämmstoffe sparen dabei im Laufe ihrer Nutzung immer deutlich mehr Energie ein, als zu ihrer Herstellung aufgewendet wurde. Trotzdem hat auch bei den Wärmedämmstoffen das Thema der Nachhaltigkeit speziell in den letzten Jahren deutlich an Aufmerksamkeit gewonnen.

Unter ökologischen Gesichtspunkten wird oft der Einsatz begrenzter fossiler Ressourcen hinterfragt. Aktuelle Entwicklungen versuchen deshalb im Sinne der Circular Economy, geschlossene Stoffkreisläufe zu etablieren, was durch eine Wiederverwendung, bzw. chemisches oder physikalisches Recycling realisiert werden kann. Andere Lösungsansätze bestehen in der Substitution fossiler Rohstoffe durch Bio-Naphtha oder Biomethan. Auch die zunehmende Marktrelevanz von Dämmstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe spiegelt die Bedeutung dieses Themas für den Verbraucher wider.

Unter ökonomischen Aspekten ist die seit 2022, durch die plötzliche Umstellung globaler Förderketten für Erdgas aus Russland, provozierte Energieverknappung in Europa ein einschneidendes und auch aufgrund der damit verbundenen politischen Hintergründe, allzu schmerzlich empfundenes Ereignis, das die Bedeutung einer sicheren und bezahlbaren Energieversorgung sehr plötzlich ins kollektive Bewusstsein von Verantwortlichen der Politik und der Bevölkerung gebracht hat. Für Deutschland, als rohstoffarmes Land, ergeben sich daraus zwei Konsequenzen. Einerseits muss der Ausbau regenerativer Energien konsequent vorangetrieben werden, andererseits muss der Energieverbrauch deutlich reduziert werden. Letzteres kann bezogen auf die Heizenergie einerseits durch Suffizienz, bspw. durch die Absenkung der Raumtemperatur, andererseits durch Effizienz, also die Verbesserung der wärmetechnischen Eigenschaften der Gebäudehülle und der Heiztechnik erreicht werden. Beide Ansätze weisen grundsätzlich ein hohes Einsparpotential auf, unterscheiden sich jedoch deutlich in der möglichen zeitlichen Umsetzung und dem dafür notwendigen finanziellen und bautechnischen Aufwand.

Interessanterweise bezog sich der letzte Satz der Erstausgabe der Metastudie Wärmedämmstoffe auf die thermische Behaglichkeit für die Bewohner. Ein wichtiger Punkt, der neben allen ökologischen und ökonomischen Vorteilen bis vor kurzem oft vergessen wurde. Spätestens im Zuge der aus aktuellem Anlass notwendigen Temperaturabsenkung in (Büro-)Gebäuden, die zunächst von September 2022 bis April 2023 auch in der durch die Bundesregierung erlassenen Energiespar-Verordnung [Anonymus 2022a], zumindest bei der Beheizung öffentlicher Gebäude, verankert ist, wird die Bedeutung einer individuell behaglichen Raumtemperatur für das Wohlfühlen und die Leistungsfähigkeit, für viele Menschen zum ersten Mal unmittelbar erfahrbar und unterstreicht damit die Bedeutung dieses „weichen“ Arguments für einen zeitgemäßen Wärmeschutz.

Ein weiterer Aspekt der Nachhaltigkeit betrifft die soziale Komponente. Für Wärmedämmstoffe sind in diesem Zusammenhang gesundheitliche Aspekte hinsichtlich des Einsatzes emissionsarmer Produkte wichtig. Neben möglicherweise direkt gesundheitlich relevanten Einflüssen bei der Verwendung von Produkten, die in direktem Kontakt mit der Innenraumluft stehen, sind auch Herstellungs- und Verarbeitungsbedingungen sowie der Einsatz notwendiger Additive wie bspw. Flammschutzmittel kritisch zu hinterfragen.

Durch die extreme Verteuerung von Energie gewinnen zudem auch immer öfter ökonomische Aspekte eine soziale Relevanz, hinsichtlich der Frage, ob sich Menschen mit geringem Einkommen in Zukunft die Beheizung des privaten Wohnraums noch leisten können. Die Einführung der ersten DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau im Jahr 1952 hatte das Ziel einen unter hygienischen Aspekten bauphysikalisch ausreichenden Mindestwärmeschutz zu garantieren. Eine eher undifferenzierte Lösungsstrategie, für die sich bei Beginn des Angriffskriegs gegen die Ukraine früh abzeichnende Energieverknappung, polarisierte im Jahr 2022 mit dem Satz „Frieren für die Freiheit“ [dpa 2023]. Auch wenn der Ansatz gut gemeint ist, ergeben sich in der Konsequenz eben nicht nur die viel diskutierten Komforteinbußen, sondern im schlimmsten Fall bauphysikalische Probleme aufgrund von Wärmebrücken, die wiederum zu Schäden an der Bausubstanz und auch zu gesundheitlichen Problemen, beispielsweise durch das Wachstum von Schimmelpilzen führen können, wenn die Gebäudehülle entsprechend schlecht gedämmt ist.

Eine energieeffiziente Gebäudehülle ist die Voraussetzung dafür, den Heizenergiebedarf zukünftig durch erneuerbare Energien möglichst vollständig und sicher decken zu können und ermöglicht in der dafür notwendigen Übergangsphase (und darüber hinaus), auch Maßnahmen der Suffizienz, sozial, d.h. ohne erwartbare Schäden an der Gesundheit und baulichen Substanz, umzusetzen.

Zukünftig wird im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung auch der Herstellungsaufwand (Graue Energie und Graue Emissionen) der in den Gebäuden verwendeten Materialien im Vergleich zur Betriebsphase viel mehr beachtet werden müssen. Im Rahmen dieser Neuauflage wird darauf im deutlich erweiterten Kapitel zur Nachhaltigkeit eingegangen.

2 Hintergrund: Steigerung der Energieeffizienz und Reduzierung der THG-Emissionen durch baulichen Wärmeschutz

Die Begriffe „Klimawandel“ und „Energie“ stehen für die Schlüsselthemen der Umweltpolitik der letzten Jahrzehnte und sind bis heute in der Medienberichterstattung entsprechend präsent. Ein wichtiger Baustein zur Erreichung der Klimaziele ist die Verbesserung der Energieeffizienz. Dies betrifft zunächst alle Sektoren und Anwendungsgebiete – der Gebäudebereich nimmt hier jedoch aufgrund des immer noch großen Heizwärmebedarfs und der gleichzeitig vorhandenen großen Einsparpotentiale eine Schlüsselrolle ein. In den Strategiepapieren der europäischen Union sind Maßnahmen zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestands entsprechend präsent.

Die aktuelle Sachlage in Bezug auf die Corona Pandemie und vor allem den seit Februar 2022 angebrochenen Krieg in der Ukraine hat anhaltend massive Auswirkungen auf den Energieverbrauch und die zukünftige Struktur der Energieversorgung. Die in dieser Studie verwendeten Berichte und Statistiken beziehen sich überwiegend auf die Situation bis 2021.

Im folgenden Kapitel werden die europäischen und nationalen energiepolitischen Ziele, die gesetzliche Konkretisierung in Deutschland und aktuelle Zahlen zur Entwicklung des Energieverbrauchs im Gebäudebereich beschrieben.

2.1 Energiepolitische Ziele

Energiepolitische Ziele haben im Wesentlichen zwei Triebfedern. Zunächst ist eine stabile und ausreichende Energieversorgung der Mitgliedsstaaten der Europäischen Union unter wirtschaftlichen und sicherheitspolitischen Gesichtspunkten essentiell, weil bis heute ein Großteil des Energieverbrauchs der EU durch Importe gedeckt wird. Eine Minderung des Energieverbrauchs ist also zunächst auch eine Maßnahme, um sich von Energieimporten unabhängiger zu machen.

Neben den energiepolitischen Zielen hinsichtlich der Versorgungssicherheit ist das Thema Energieeffizienz aber auch unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes wichtig. In diesem Zusammenhang ist das Ziel der EU, einen gerechten und ehrgeizigen Beitrag zum Übereinkommen von Paris zu leisten, welches im Dezember 2015 als erstes allgemeines, rechtsverbindliches weltweites Klimaschutzabkommen zwischen 195 Ländern beschlossen wurde.

Die Energieeffizienz im Gebäudebereich und hierbei insbesondere die Hebung von Energieeinsparpotentialen im Gebäudebestand ist dem zur Folge ein vorrangiges Ziel der Politik, dass zur Definition verschiedener Maßgaben führt, die im Folgenden erläutert werden.

Europäische Ziele

Die europäische Klimapolitik steht seit Ende 2019 konzeptionell unter dem Begriff des „Green Deal“ [EU 2019]. Der Green Deal steht für ein Maßnahmenpaket und ein politisches Klimaschutzkonzept, das aktuell in der Umsetzung ist. Das Ziel ist die Etablierung einer „[...] Wachstumsstrategie, mit der die EU zu einer fairen und wohlhabenden Gesellschaft mit einer modernen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft werden soll, in der im Jahr 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden“ [EU 2019]. Die Kernthemen des europäischen Green Deal zeigt Abbildung 1.

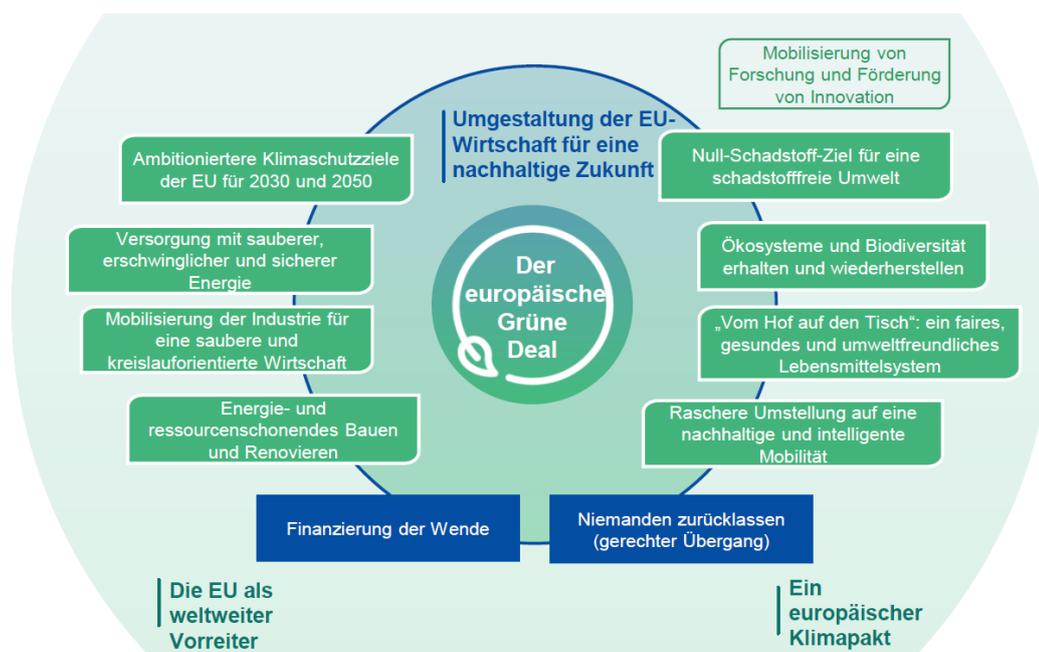


Abbildung 1: Ziele des europäischen Green Deal [EU 2019]

Um diese Ziele zu erreichen, müssen Maßnahmen in unterschiedlichsten Bereichen auf den Weg gebracht werden und die Umsetzung der daraus abgeleiteten Rechtsvorschriften kontrolliert werden. Die wichtigsten Bereiche werden im Folgenden kurz erläutert.

Ein ambitioniertes Ziel ist die bis zum Jahr 2050 angestrebte Klimaneutralität, die darin besteht, dass Treibhausgas (THG) Emissionen nach Möglichkeit reduziert (Quellen vermindert) und unvermeidbare Emissionen kompensiert (Senken erhöht) werden. Um diese Vision zu verwirklichen, wurde am 30. Juni 2021 das Europäische Klimagesetz veröffentlicht. Die zugehörige Verordnung (EU) 2021/1119 [EU

2021a] ist in allen Teilen verbindlich und gilt unmittelbar in jedem Mitgliedsstaat. Die Verordnung nimmt das Temperaturziel des Pariser Klimaabkommens in Bezug und regelt hieraus abgeleitet als verbindliche Unionsvorgabe die Senkung der Netto-THG-Emissionen bis 2030 um -55 % gegenüber dem Referenzjahr 1990, als sogenanntes Klimazwischenziel. Dafür sind in den zuständigen Organen der EU und den Mitgliedsstaaten auf nationaler Ebene Aktionspläne zu entwickeln die unter der Berücksichtigung von Förderung, Fairness, Solidarität und Kostenwirksamkeit geeignet sind das auf Unionsebene gemeinsam formulierte Ziel zu erreichen. Der Fortschritt der Umsetzung wird alle fünf Jahre überprüft und bewertet, woraus sich auch Änderungen in den assoziierten Maßnahmen ergeben können.

Ein Fahrplan zur Umsetzung der Ziele des europäischen Klimaschutzgesetzes auf Unionsebene ist in dem Programm „Fit-for-55“ zusammengefasst [EU 2021b]. Das Programm soll dabei alle relevanten Bereiche abdecken, angefangen bei erneuerbaren Energieträgern, Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz, Gebäudesanierung, Flächennutzung, Energiebesteuerung, Lastenteilung und Emissionshandel.

In dem Kommunikationspapier zu dem am 17. September 2020 veröffentlichten „Climate Target Plan“ [EU 2020] wird festgestellt, dass der Gebäudebereich in der EU immer noch für 40 % der Endenergie und 36 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Insgesamt 75 % des Gebäudebestands sind nicht energieeffizient – sei es aufgrund von veralteten Heizsystemen die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, oder aufgrund einer nicht effizienten Gebäudehülle. Maßnahmen sollten insbesondere zur „Modernisierung der Gebäudehüllen, einer intelligenten Digitalisierung und der Integration erneuerbarer Energien durchgeführt werden“ [EU 2020].

Die bekannten Eckpunkte der europäischen Klimapolitik ergeben sich inhaltlich aus dem Green Deal [EU 2019], dem Klimagesetz [EU 2021a] sowie der darin zitierten Erneuerbaren Energien Richtlinie (RED) [EU 2018a], der EU-Richtlinie zur Energieeffizienz (EED) [EU 2018b] und der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) [EU 2010, EU2018c]. Nachfolgend dargestellt sind die Inhalte der derzeit geltenden Richtlinien und Gesetze, wobei auf europäischer Ebene bereits neue Festlegungen in diversen Entwürfen zu EED und RED II und EPBD untersucht und diskutiert werden.

- Senkung der Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % gegenüber dem Stand von 1990
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien auf 32 %
- Verbesserung der Energieeffizienz um 32,5 %

Nationale Ziele in Deutschland

Die Ziele auf europäischer Ebene werden in Deutschland in nationales Recht übersetzt und für das Land spezifisch definiert. Die nationale Definition spezifischer Ziele

ist auch deswegen erforderlich, weil die für die Festlegung der Systemgrenzen angenommenen Randbedingungen sich in den Mitgliedsstaaten teilweise unterscheiden. Ein Beispiel unter vielen ist hier die in Deutschland und der EU unterschiedlich gehandhabte Berücksichtigung der Umweltwärme in der Endenergie, was vor allem für die bevorzugte Heizungstechnologie der Wärmepumpen zum Tragen kommt. Daher kann die von der EU geforderte Reduzierung um 55 % nicht gleichermaßen auf alle EU-Mitgliedsstaaten verteilt werden. Zudem sind auch die schon umgesetzten Verbesserungen des Gebäudebestands als „Startwerte“ für die Reduzierung zu berücksichtigen. In Deutschland wurde für die Umsetzung ein integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan entwickelt (Integrated National Energy and Climate Plan – NECP). Der finale Deutsche NECP wurde 2020 eingereicht [BMWI 2020a]. Das Zieldreieck der Energiewende wird darin als orientierungsgebend für die Energiepolitik vorgegeben (vgl. Abbildung 2).



Abbildung 2: Zieldreieck der Energiewende – politische Zielebenen [BMWI 2020]

Die zentralen Ziele im NECP sind:

- Verringerung der Treibhausgasemissionen um mind. 55 % bis 2030 gegenüber 1990
- Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch von 30 % in 2030 als deutscher Beitrag zum EU-2030-Ziel
- Minderung des Primärenergieverbrauchs um 30 % gegenüber 2008 in 2030 als deutschen Beitrag zum EU-2030-Ziel

Die Ziele sind in Abbildung 3 dargestellt und in Ziele der Steuerungsebene untergliedert. Auf der Maßnahmenebene findet sich der nötige Maßnahmenmix für die Umsetzung. Den Gebäudesektor betreffen besonders die Ziele Wärme aus erneuerbaren Energien und die Reduktion des Endenergieverbrauchs für Wärme. Im NECP sind die Energieeffizienzstrategie 2050 mit dem deutschen Energieeffizienzziel für 2030 als Beitrag zur Erreichung des EU-Energieeffizienzziels sowie die langfristige Renovierungsstrategie der Bundesregierung gemäß der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden bereits berücksichtigt.

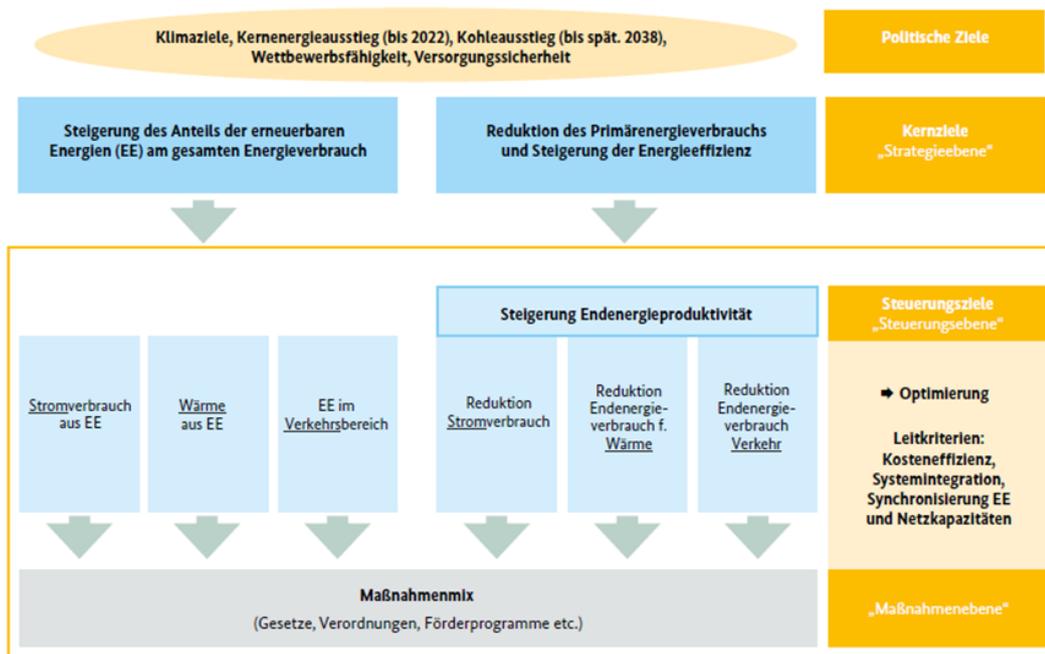


Abbildung 3: Zielarchitektur zur Strukturierung der Einzelziele der Energiewende [BMW 2020]

Am 9. Oktober 2019 hat die Bundesregierung das Klimaschutzprogramm 2030 beschlossen. Essentielle Bestandteile sind die Bepreisung des CO₂ Ausstoßes für Verkehr und Wärme, welche nicht vom europäischen Emissionshandel erfasst sind, sowie das Klimaschutzgesetz (KSG) [Bundestag 2019], deren Ziel die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben und die Erfüllung der Nationalen Klimaschutzziele sind. Im KSG werden für alle Sektoren jährlich sinkende Jahresemissionsgrenzen festgelegt. Dabei werden die in der Effort Sharing Regulation (ESR) der EU [EU 2018] festgelegten verbindlichen Minderungsziele eingehalten. Aufgrund der Entscheidung des Bundesverfassungsgerichts vom 24.3.2021 musste das KSG allerdings überarbeitet werden und konkrete Zwischenziele für 2030 bis 2050 nennen. Der Bundestag beschloss eine Änderung des KSG, welche 65 % THG-Einsparung bis 2030 und vollständige Klimaneutralität bis 2045 in Deutschland vorsieht (vgl. Abbildung 4). Für den Gebäudesektor ist dabei für das Jahr 2030 das Emissionsmaximum um weitere 3 t CO₂-Äq. gesenkt worden und nun auf 67 Mio. t CO₂-Äq. festgelegt.

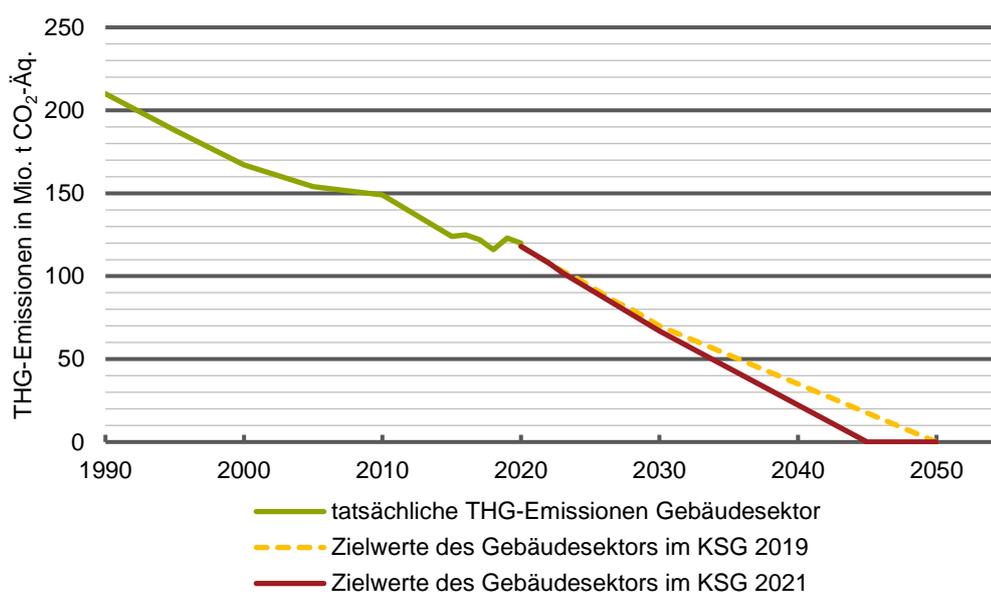


Abbildung 4: THG-Emissionen in Deutschland für den Gebäudesektor bis 2020 [UBA 2021] mit Zielwerten nach dem KSG von 2019 und der aktuellen Verschärfung von 2021 [BMU 2021a]

Auf der Maßnahmenenebene zur Umsetzung der Ziele in der Dimension Energieeffizienz werden elf Strategien und Maßnahmen genannt, die der Erreichung der Ziele dienen sollen. Im Folgenden werden fünf wichtige Strategien und Maßnahmen kurz beschrieben.

Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE)

Der Nationale Aktionsplan Energieeffizienz 2.0, als Teil der Energieeffizienzstrategie, definiert die strategische Ausrichtung von Effizienzmaßnahmen. Die zweite Ausgabe des NAPE schließt eine Lücke bei der Erreichung der Effizienzziele. Dabei ist es zentral, die Energieeffizienz im Gebäudebereich voranzubringen, Energieeffizienz als Rendite- und Geschäftsmodell zu etablieren und die Eigenverantwortlichkeit für Energieeffizienz zu erhöhen [BMW 2019]. Der Aktionsplan beinhaltet Maßnahmen, die sofort wirksam werden, aber auch solche, die als weiterführende Prozesse angestoßen werden.

Langfristige Renovierungsstrategie (LTRS)

Im August 2020 veröffentlicht das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie die Langfristige Renovierungsstrategie der Bundesregierung [BMW 2020b]. Sie dient als Fahrplan und mit den festgelegten Indikatoren kann der Fortschritt erfasst werden. Als Fortschrittsindikator ist vorerst die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden festgelegt, es können jedoch in der Fortschreibung der LTRS weitere Indikatoren hinzukommen. Um den Fortschritt messen zu können, ist eine Verstärkung der Datenbasis wesentlich. Der Fahrplan sieht als Strategien und Maßnahmen unter anderem die Mobilisierung von Investitionen, das Setzen von Anreizen für die Sanierung, Förderprogramme und Kommunikationsmaßnahmen vor.

Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG)

Die Energieeffizienzstrategie Gebäude wurde bereits 2015 veröffentlicht und durch eine Studie mit der Modellierung von zwei Zielszenarien im Jahr 2017 gesamtwirtschaftlich eingeordnet [BMWi 2015] [BMWi 2017]. Die ESG zeigt auf, dass Maßnahmen nötig sind, die Ziele zu erreichen und schlägt hierfür den Ausbau der bestehenden Maßnahmen vor, gibt aber auch neue Impulse zum Erreichen von mehr Energieeffizienz im Gebäudebereich. Der individuelle Sanierungsfahrplan (iSFP) ist eine dieser Maßnahmen und wurde im Jahr 2017 eingeführt. Derzeit findet ein Fortschreibungsprozess der ESG statt, deren Ziel die Aktualisierung und Beachtung der Neuerungen der Klimaziele und der sich daraus ergebenden Sektorenziele ist.

Gebäudeenergiegesetz GEG

Das „Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kältebereitstellung in Gebäuden“, kurz Gebäudeenergiegesetz (GEG) vom 8. August 2020, ist das maßgebliche Gesetz zur Umsetzung der energiepolitischen Ziele im Bereich der Gebäude in Deutschland. Das Gesetz ersetzt das ehemalige Energieeinspargesetz (EnEG), das Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG) und die Energieeinsparverordnung (EnEV). Inkraftgetreten ist das GEG am 1. November 2020 und wurde seitdem mehrmals aktualisiert und angepasst. Die derzeit gültige Fassung gilt seit 1. Januar 2023. Das GEG gilt für alle Gebäude, die beheizt werden oder eine Klimatisierung haben. Die Festlegungen betreffen, ähnlich wie bei der vorausgegangenen Energieeinsparverordnung, sowohl die Anlagentechnik als auch die Gebäudehülle mit ihrem Wärmedämmstandard. Seit der Novellierung zum 1. Januar 2023 darf ein neues Gebäude nur noch 55 % des Primärenergiebedarfs des Referenzgebäudes (gleiche Gebäudegeometrie, Gebäudenutzfläche, Nutzung und Ausrichtung) aufweisen. Vor der Novellierung waren das noch 75 % des Primärenergiebedarfs eines Referenzgebäudes. Damit ist der vorher förderfähige Standard des Effizienzhauses 55 (EH 55) zum neuen gesetzlich geforderten Mindeststandard geworden. Dabei sind die Bedarfe nach DIN 18599:2018-09 zu berechnen. Teil 3 im Gesetz regelt die Anforderungen an bestehende Gebäude. Hier werden, abhängig von der vorgenommenen Maßnahme an der Gebäudehülle und der Anlage, Anforderungen an das bestehende Gebäude gestellt. Die Vorgaben und die Ausnahmen sind dabei im GEG sehr genau geregelt, bspw. welche Heizungen ausgetauscht werden müssen, oder welche Dämmmaßnahmen notwendig sind.

Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)

Die BEG startete Anfang 2021 und fasst die Förderprogramme für Energieeffizienz und erneuerbare Energien der Bundesregierung zusammen [BMWi 2021a]. Sie ist in drei Teilprogramme für Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen gegliedert. Bei der Einführung wurden die Fördersätze angehoben und die Antragstellung vereinfacht, um stärkere Anreize zur Inanspruchnahme der Förderung zu setzen. Die Einführung neuer Förderklassen (Effizienzhaus-EE und NH-Nachhaltigkeits-Klassen) setzen Anreize für Nachhaltigkeit und berücksichtigen die

Lebenszyklusbetrachtung von Gebäuden. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, bei der Erstellung eines iSPF einen Förderbonus in Anspruch zu nehmen. Die BEG wird durch die KfW-Bank und das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) umgesetzt (vgl. Abbildung 5).

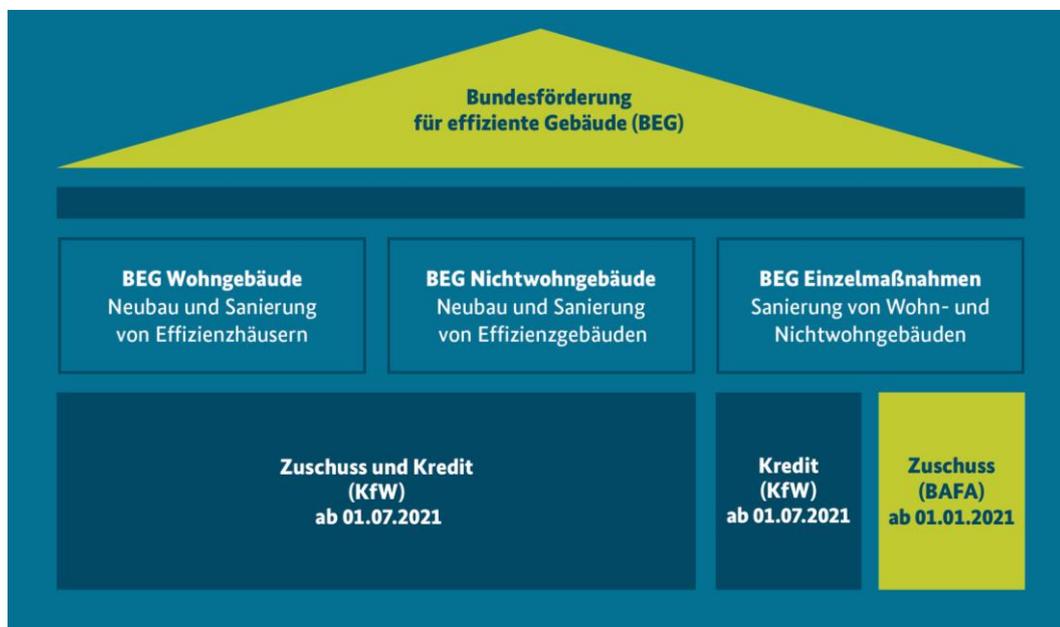


Abbildung 5: Struktur der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) [BMWi 2021b]

2.2 Energieverbrauch im Gebäudebereich

Nachdem der Primärenergieverbrauch in Deutschland ab den 1950er Jahren durch die wirtschaftliche Entwicklung einem starken Anstieg unterworfen war, flachte sich der Verbrauchsverlauf ab den 1980er Jahren ab und stagnierte bis ca. 2008 auf einem Niveau von ca. 4000 TWh. In etwa ab 2010 zeigt der Primärenergieverbrauch dann eine deutlich fallende Tendenz, wobei der Endenergieverbrauch auf einem relativ konstanten Niveau von ca. 2500 TWh verbleibt (Abbildung 6). Der prozentuale Anteil des Endenergieverbrauchs am Primärenergieverbrauch steigt demnach an. Mit einem Blick in die Energiebilanzen [AGEB 2021a] zeigt sich, dass hierfür vor allem die gesunkenen Umwandlungsverluste verantwortlich sind. Bis ca. 2010 lagen die Umwandlungsverluste im Verhältnis zum Umwandlungseinsatz auf einem relativ konstanten Niveau von ca. 28 – 29 %. Ab 2010 sinkt dieser Anteil kontinuierlich und erreicht 2020 einen Anteil von nur noch 20 %. Der Grund für die Verringerung der Umwandlungsverluste ist in dem steigenden Anteil von Energieträgern ohne Verbrennung (Wind, Wasser, Photovoltaik) zu sehen. Aktuell verteilen sich die Energieträger wie folgt.

Auch 2020 war Mineralöl mit einem Anteil von 33,7 % der wichtigste Energieträger, gefolgt von Erdgas mit 26,6 %. An dritter Stelle sind jedoch bereits die erneuerbaren Energieträger mit einem Anteil von 16,6 %. Der Primärenergieeinsatz von Steinkohle (7,7 %) und Braunkohle (8,8 %) ist in den letzten Jahren deutlich gesunken,

ebenso wie der Einsatz von Kernenergie, der aktuell nur noch ca. 6 % des Primärenergieeinsatzes stellt.

Der in 2020 gegenüber 2019 deutlich erkennbare Rückgang des Primär- und Endenergieeinsatzes hat unterschiedliche Gründe. Zunächst lag in 2020 die Anzahl der Gradtage deutlich unter dem Niveau des langjährigen Durchschnitts. Da immer noch ein Großteil der eingesetzten Energie für die Bereitstellung von Raumwärme aufgewendet wird, ist der Energieverbrauch entsprechend sensitiv für Temperatur- und Witterungseinflüsse. Unter Ansatz der langjährigen Mitteltemperaturen wäre der Primärenergieverbrauch im Jahr 2020 insgesamt (über alle Sektoren) nicht um 8,0 %, sondern nur um 7,5 % zurückgegangen, wobei die Auswirkungen in den verschiedenen Sektoren unterschiedlich sind. Der maßgebliche Grund für die Verbrauchsentwicklung liegt jedoch in den wirtschaftlichen Auswirkungen der Covid-19-Pandemie. Das Bruttoinlandsprodukt sank im Jahr 2020 gegenüber dem Vorjahr um 5 %. Große Einbrüche waren in der Krafffahrzeugbranche, Maschinenbau und der energieintensiven Montanindustrie zu verzeichnen. Grundsätzlich sind auch demographische Faktoren zu berücksichtigen. Aufgrund der geringen Dynamik der Bevölkerungsentwicklung ist dieser Punkt zwar von untergeordneter Bedeutung, trotzdem muss auch berücksichtigt werden, dass das Bevölkerungswachstum in 2020 gegenüber 2019 von 0,2 %/a auf 0,1 %/a zurückgegangen ist.

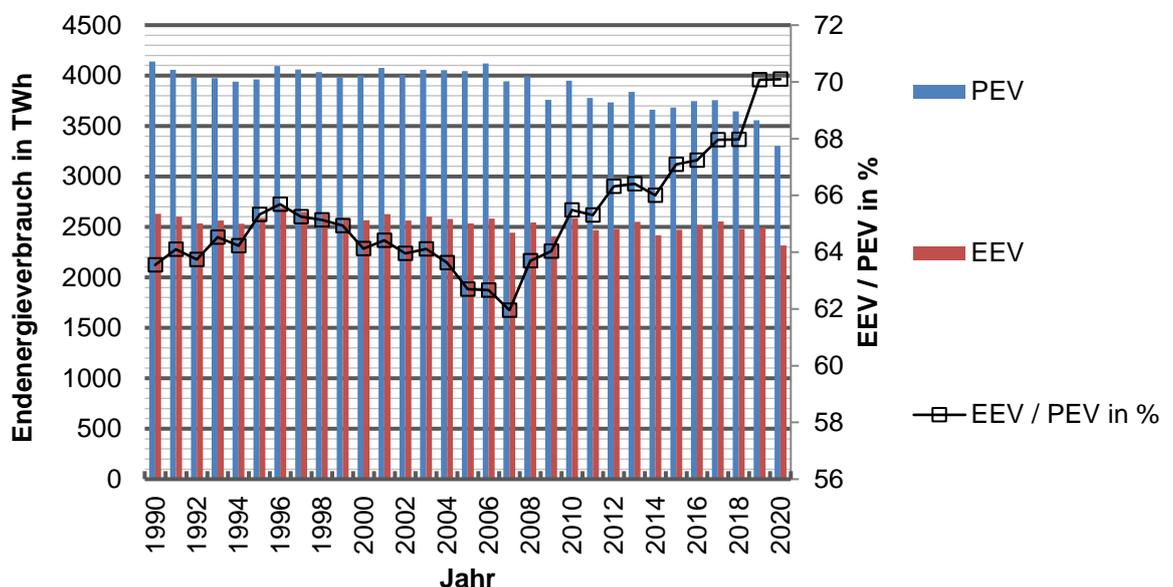


Abbildung 6: Primärenergieverbrauch (PEV) und Endenergieverbrauch (EEV) sowie Verhältnis von EEV zu PEV in Deutschland in den Jahren von 1990 – 2020 [AGEB 2021a]

In Deutschland ist der Energieverbrauch nicht mehr an die wirtschaftliche Entwicklung geknüpft. Einen Energieeffizienzfaktor stellt in diesem Zusammenhang die eingesetzte Energie je 1000 Euro Bruttoinlandsprodukt (BIP) dar. In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass Primärenergieverbrauch und Endenergieverbrauch je 1000 Euro BIP kontinuierlich sinken.

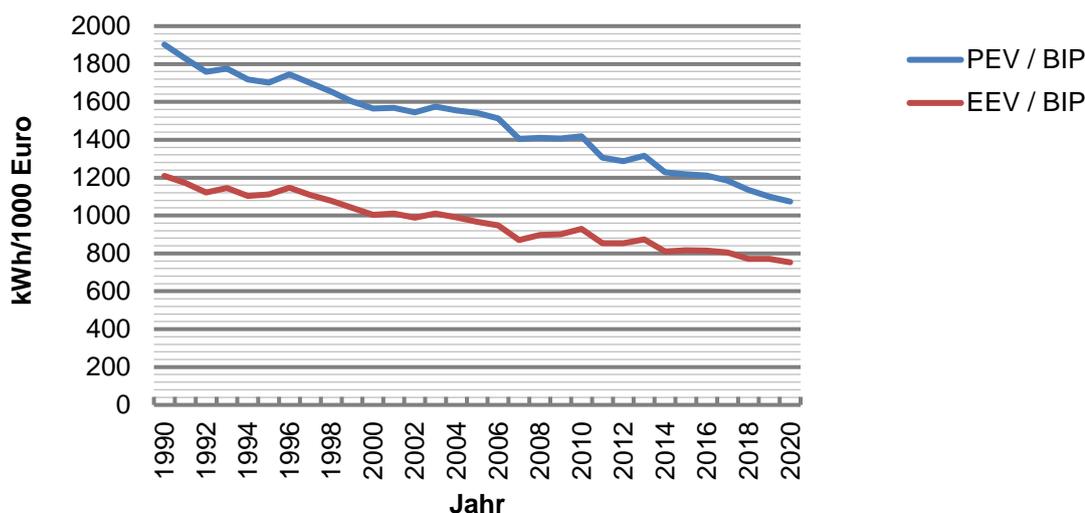


Abbildung 7: Primärenergieverbrauch (PEV) und Endenergieverbrauch (EEV) im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt (BIP) in Deutschland in den Jahren von 1990 – 2020 [AGEB 2021a]

Nach Abzug von Umwandlungsverlusten und dem nicht-energetischen Verbrauch, bleibt die Endenergie als die von den jeweiligen Verbrauchern konsumierte Energie übrig. Gegenüber der deutlich erkennbaren Verringerung des Primärenergieverbrauchs seit etwa 2010, sinkt der Endenergieverbrauch in den letzten 10 Jahren nur unwesentlich. Auch gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 sind bis einschließlich 2019 nur unwesentliche Reduzierungen im Minimum auf 91,5 % (2009 → Wirtschaftskrise) zu verzeichnen. Noch im Jahr 2017 lag der Energieverbrauch auf einem Niveau von 97 % gegenüber 1990.

Veränderungen sind wie beschrieben klimatischen, konjunkturellen und demographischen Einflüssen geschuldet. Der statistisch signifikante Einbruch im Jahr 2020 ist auf konjunkturelle Gründe im Zusammenhang mit der Covid-19-Pandemie zurückzuführen. In Abbildung 8 ist demnach zu sehen, dass die Veränderung von 2019 auf 2020 vor allem durch geringere Verbräuche in der Industrie (von 698 auf 657 TWh), Verkehr (von 756 auf 637 TWh) und GHD (365 auf 354 TWh) zurückzuführen ist. Der Verbrauch im Bereich der privaten Haushalte blieb von 2019 auf 2020 auf einem konstanten Niveau (von 674 auf 670 TWh).

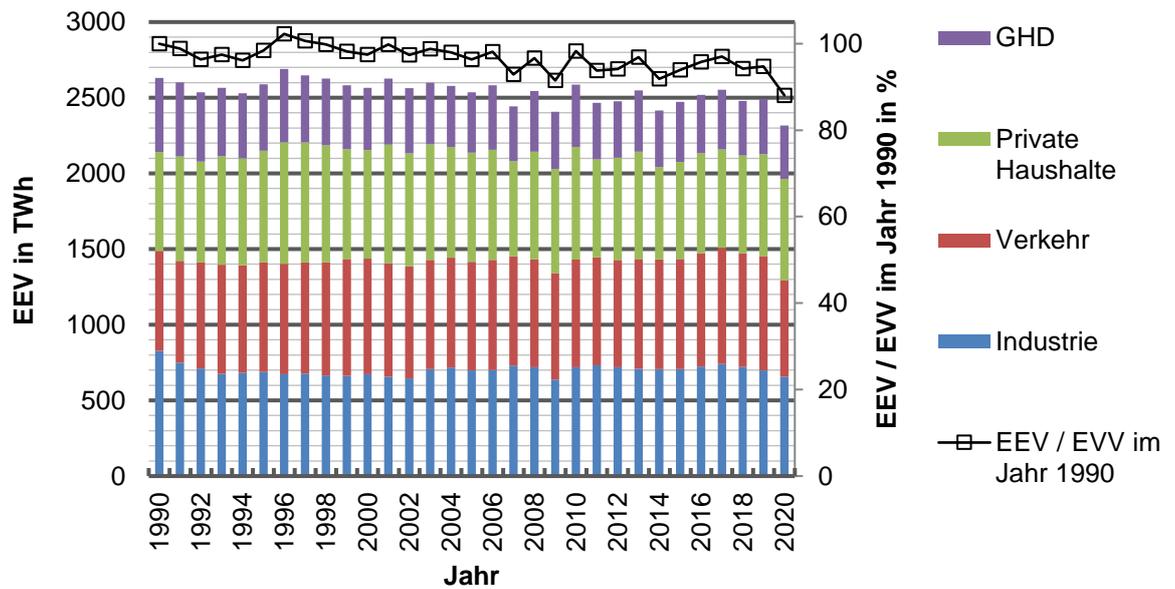


Abbildung 8: Endenergieverbrauch (EEV) in Deutschland für die Sektoren Industrie, Verkehr, Private Haushalte sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) und die Entwicklung des gesamten Endenergieverbrauchs bezogen auf das Jahr 1990 [AGEB 2021 a]

Betrachtet man die relativen Veränderungen der Endenergieverbräuche in den Sektoren gegenüber dem Referenzjahr 1990, so fällt auf, dass die Privaten Haushalte und Verkehr nach zwischenzeitlichen Verbrauchssteigerungen inzwischen wieder auf dem Niveau von 1990 angekommen sind, wobei nochmal zu erkennen ist, dass der Sektor Verkehr im Jahr 2020 den deutlichsten Verbrauchsrückgang zeigt. Industrie und GHD weisen von 1990 – 2000 deutlichere Verbrauchsrückgänge auf und verweilen seitdem auf einem relativ konstanten Niveau. Deutlich zu erkennen ist der Einbruch während der Wirtschaftskrise 2009 und ein leichter Rückgang seit 2018, der aber noch im Rahmen der vorher beobachtbaren Schwankungsbreite liegt. (Abbildung 9)

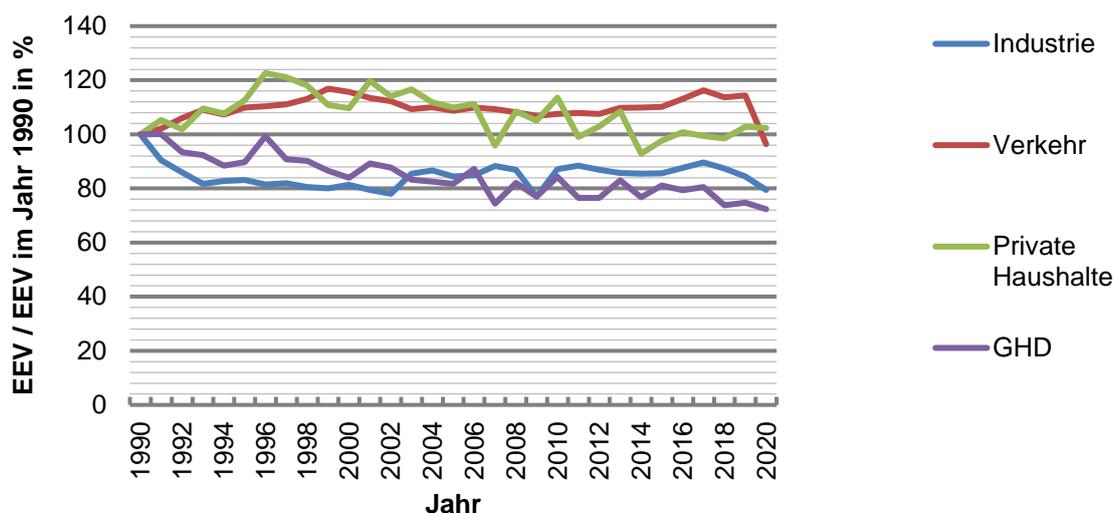


Abbildung 9: Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Deutschland in den Sektoren Industrie, Verkehr, Private Haushalte sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) bezogen auf das Jahr 1990 [AGEB 2021a]

Bei der Betrachtung des absoluten Endenergieverbrauchs werden Effekte einer Effizienzsteigerung durch Veränderungen der Grundgesamtheit (Wirtschaftsleistung, Wohnraum, Einwohnerzahl) verwischt. Für den Gebäudebereich ist dies die vorhandene Wohnfläche und die Einwohnerzahl.

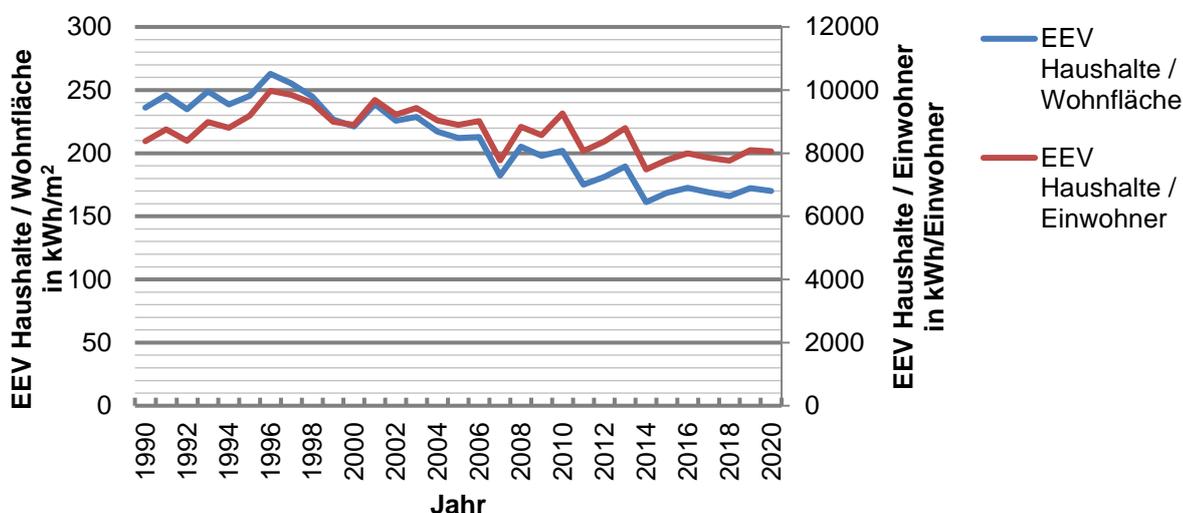


Abbildung 10: Energieeffizienzindikatoren für Deutschland in den Jahren von 1990 – 2020: Endenergieverbrauch der Haushalte je m² Wohnfläche, Endenergieverbrauch der Haushalte je Einwohner [AGEB 2021a]

In Abbildung 10 ist der Endenergieverbrauch des Sektors Haushalte im Verhältnis zur Wohnfläche und zu der Anzahl der Einwohner dargestellt. Es zeigt sich, dass der Endenergieverbrauch je m² Wohnfläche von vormals 250 kWh/m² (Jahre 1990 – 1996) auf aktuell ca. 170 kWh/m² gesunken ist, was ca. -32 % entspricht. Dem gegenüber ist die Veränderung des Endenergieverbrauchs je Einwohner mit einem Startwert von ca. 8757 kWh/Einwohner im Jahr 1990 bis 2020 nur auf ca. 8055

kWh/Einwohner gesunken, was ca. -8 % entspricht. Dem gegenüber steht eine deutliche Erhöhung der Wohnfläche von ca. +42 % im gleichen Zeitraum. Die Einwohnerzahl stieg demgegenüber nur um ca. 6,4 %, woraus sich eine deutliche Erhöhung der Wohnfläche je Einwohner ergibt. Im Jahr 1990 lag diese bei ca. 35,5 m²/Einwohner und stieg bis zum Jahr 2020 auf 47,3 m²/Einwohner, was einem Plus von ca. 33 % entspricht.

Der deutlich gesunkene Endenergieverbrauch je m² Wohnfläche zeigt demnach einen großen Fortschritt in der Energieeffizienz im Bereich der privaten Haushalte. Die Anteile der Anwendungen am Endenergieverbrauch der privaten Haushalte zeigt Abbildung 11.

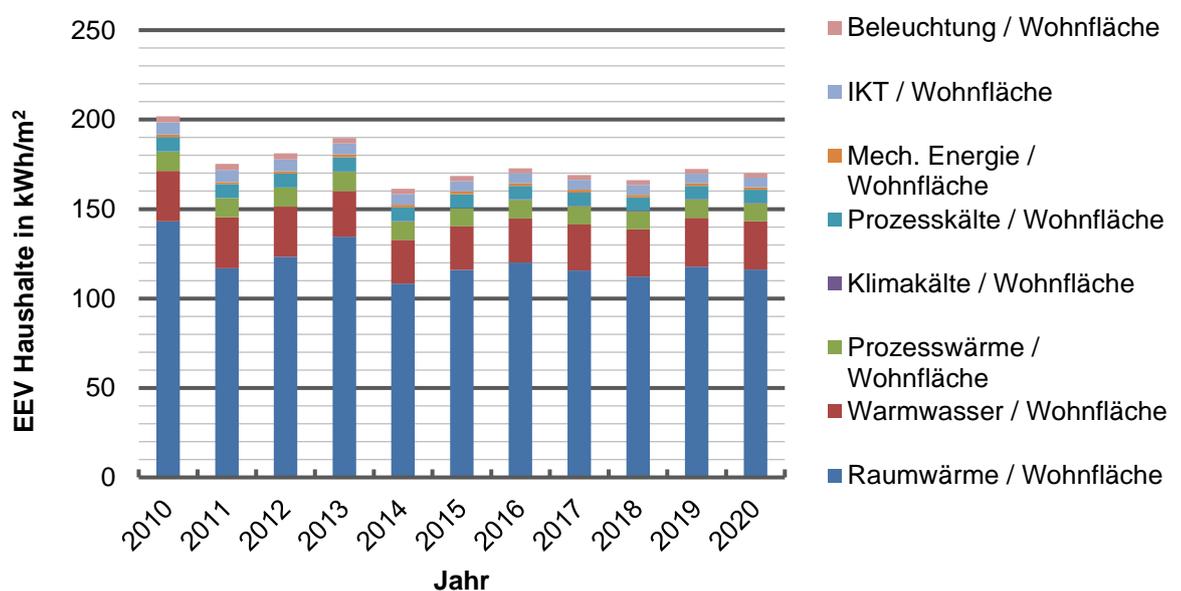


Abbildung 11:: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte in Deutschland in den Jahren von 2010 - 2020 je m² Wohnfläche aufgeteilt nach Anwendungen [AGEB 2021b]

Den größten Anteil am Endenergieverbrauch der privaten Haushalte nimmt immer noch die Raumwärme ein. In 2020 waren dies 68,3 %, gefolgt von der Energie für Warmwasser mit 15,9 %. Die anderen Beiträge sind auf einem verhältnismäßig geringen Niveau (Prozesswärme 5,9 %, Prozesskälte 4,3 %, IKT 3,2 %, Beleuchtung 1,5 %, mech. Energie 0,9 %), Klimakälte 0,2 %). Interessant ist, dass die Verschiebungen der prozentualen Anteile in den letzten 10 Jahren gering sind.

Neben den Wohngebäuden (Private Haushalte) sind auch Nichtwohngebäude für den Energieverbrauch im Gebäudebereich relevant. Diese sind in den Sektoren Industrie und GHD repräsentiert. Um die Verteilung der Endenergie auf die Anwendungen vergleichbar zu machen, ist eine Reduzierung auf die gebäuderelevanten Anwendungen sinnvoll. Dies sind die Raumwärme, Warmwasser, Klimakälte und Beleuchtung. Die Posten Prozesswärme, Prozesskälte und mechanische Energie sind in der Industrie und GHD von den jeweiligen wirtschaftlichen Prozessen der Erzeugung und/oder des Vertriebs von Gütern beeinflusst. Insgesamt war der

Verbrauch an Endenergie in den genannten gebäuderelevanten Anwendungen im Jahr 2019 bei 866,7 TWh. Davon entfallen 578,4 TWh (ca. 67 %) auf die Wohngebäude und 288,3 TWh (ca. 33 %) auf die Nichtwohngebäude. (Abbildung 12)

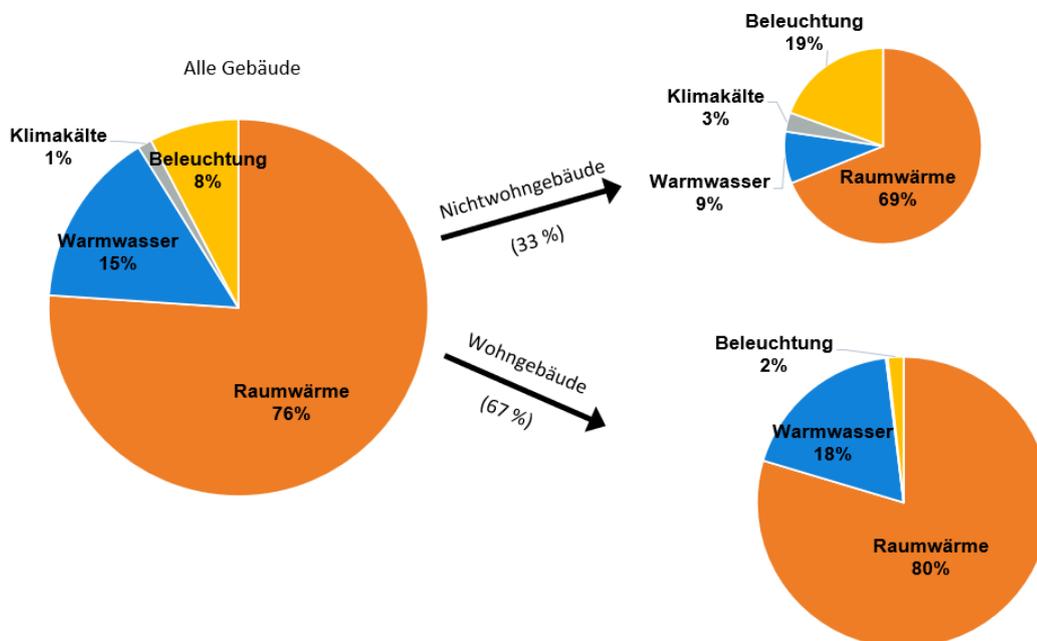


Abbildung 12: Endenergieverbrauch der Gebäude in Deutschland und Aufteilung auf Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude im Jahr 2019 [AGEB 2021b]

Der Anteil an Endenergie für die Raumwärme ist bei den NWG mit ca. 69 % (2019) (zum Vergleich: 71 % in 2010) etwas geringer als bei den WG mit ca. 80 % (2019) (zum Vergleich: 85 % in 2010). Auffällig ist der große Anteil an Energie für Beleuchtung bei den NWG von 19 % (2019) (zum Vergleich: 20 % in 2010), während diese Position bei den WG mit 2 % (2019) (zum Vergleich: 2 % in 2010) praktisch vernachlässigbar ist. Die Energie zur Raumheizung ist also bezüglich des Endenergiebedarfs einer der bestimmenden Faktoren und gleichzeitig ein Posten mit verhältnismäßig großem Einsparpotential. Gegenüber den Zahlen von 2010 sind bei dieser Betrachtung mit Ausnahme von einer Verringerung des prozentualen Raumwärmebedarfs von -5 % bei den Wohngebäuden, nur geringfügige Verschiebungen festzustellen. Interessant ist, dass auch der Bereich der Beleuchtung trotz einer weitgehenden Etablierung energiesparender LED-Technik für den Gesamtenergieverbrauch einerseits nicht bedeutsam ist (Wohngebäude), bzw. nur zu einer sehr geringen relativen Verschiebung geführt hat (Nichtwohngebäude).

2.3 Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich

Eine verbesserte Energieeffizienz durch Verbesserungen der energetischen Qualität der Gebäudehülle wird hinsichtlich des Endenergieverbrauchs wie beschrieben durch eine Erhöhung der Wohnfläche je Einwohner, konjunkturelle, klimatische und demographische Einflüsse überspielt. Die erklärten energiepolitischen Ziele auf

europäischer und nationaler Ebene orientieren sich aber wie beschrieben nur indirekt am Energieverbrauch. Im Fokus der Politik liegt die Einsparung an Treibhausgasemissionen, die neben der direkten Energieeinsparung in hohem Maß auch von den eingesetzten Primärenergieträgern und Heiztechnologien abhängen.

Die Umsetzung der Energiewende in Deutschland wird durch den Monitoring Prozess „Energie der Zukunft“ regelmäßig überprüft. Die Ergebnisse werden in sogenannten Monitoring-Berichten zusammengefasst. Aktuell liegt der 8. Monitoring Bericht mit Ausgabe vom Februar 2021 zu den Berichtsjahren 2018 und 2019 vor [BMWI 2021].

Abbildung 13 zeigt die Treibhausgasemissionen in Deutschland in Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent, nach Sektoren, ab 1990 bis zum Jahr 2020. Gegenüber 1990 konnten im Jahr 2019 die Treibhausgasemissionen um 35,1 % gesenkt werden. Die Zielvorgabe für 2020 von -40 % wird im Mittel nicht erreicht. Insgesamt betragen die Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2019 rund 810 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent, was ca. einem Fünftel der jährlichen Emissionen der Europäischen Union entspricht.

Schlüsselt man die Einsparungen auf die Sektoren auf, so zeigt sich, dass die Energiewirtschaft mit - 44,6 % und die Gebäude mit -41,4 % sowie die Abfallwirtschaft mit -76,3 % die Zielvorgaben zur Einsparung gegenüber 1990 einhalten oder übertreffen. Die Sektoren Industrie (-34,2 %) und Landwirtschaft (-19,5 %) erreichen niedrigere relative Einsparungen, während der Sektor Verkehr im Jahr 2019 bezüglich der Treibhausgasemissionen auf dem Stand von 1990 bleibt.

Die hohen Rückgänge der Treibhausgasemissionen im Bereich der Energiewirtschaft während der letzten Jahre sind auf die verstärkte Nutzung verbrennungsfreier Energieerzeugung zurückzuführen. Andererseits werden Effizienzverbesserungen im Verkehrssektor durch die steigenden Bestände an PKW und LKW bei insgesamt steigender Fahrleistung kompensiert.

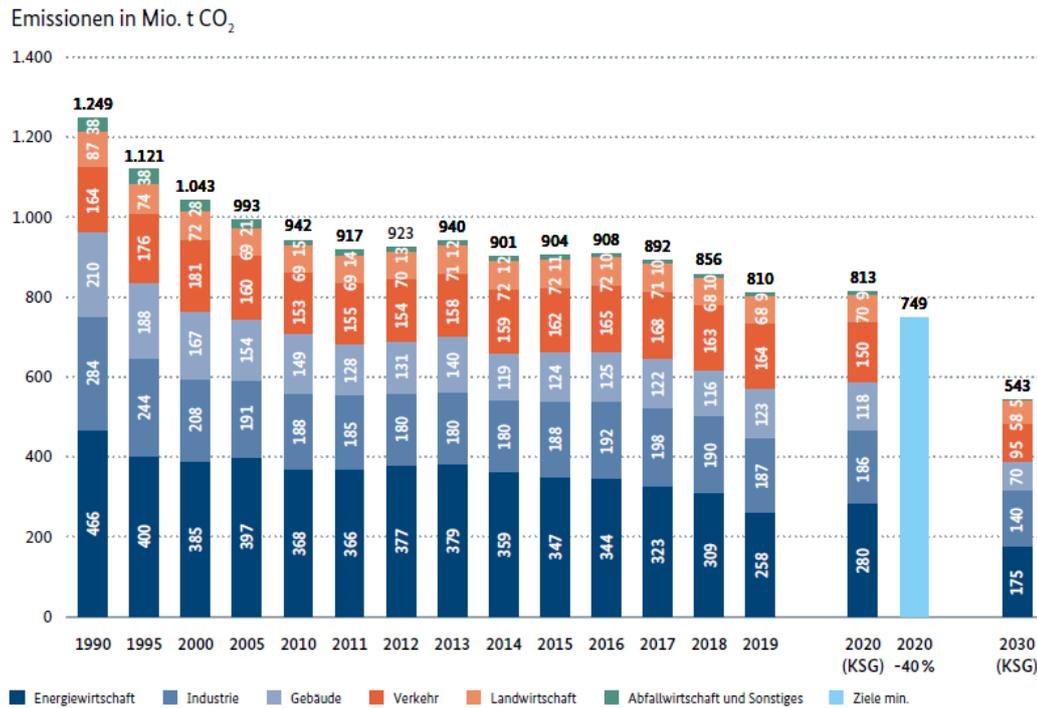


Abbildung 13: Treibhausgasemissionen nach Sektoren (gemäß Klimaschutzplan 2050) [BMW 2021]

Die Verteilung der Treibhausgasemissionen in Deutschland ist typisch für ein industrialisiertes Land. Den größten Anteil im Jahr 2019 machen CO₂-Emissionen durch Verbrennungsprozesse aus. Daneben sind Methanemissionen (CH₄) mit ca. 6,1 % und Lachgas (N₂O) mit ca. 4,3 % relevant. Fluorierte Treibhausgase sind für ca. 1,7 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich. [BMW 2021]

Interessant ist eine Bewertung der Beiträge der zentralen politischen Maßnahmen zum Erreichen des 40 % Ziels. Tabelle 1 stellt die gemäß Schätzung aus dem Jahr 2014 erwarteten Beiträge zur Treibhausgasemissionsminderung im Jahr 2020 (Schätzung, Stand Dezember 2014) dem lt. gutachterlicher Schätzung in 2020 erreichten Beitrag gegenüber. Die damals geplante Minderung aus dem sogenannten „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ von 62 – 78 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent wurde nicht erreicht. Der realisierte Beitrag beläuft sich auf 38 – 48 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent (Schätzung ohne Berücksichtigung der Auswirkungen der Covid-19-Pandemie).

Der Vergleich von Soll- und Ist-Werten zeigt, dass die Maßnahmen im Stromsektor die Erwartungen nahezu erfüllt haben, während die Maßnahmen aus dem Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz, die auch Maßnahmen zur Energieeffizienz im Gebäudebereich beinhalten, hinter den Erwartungen zurückbleiben.

Tabelle 1: Beiträge zentraler politischer Maßnahmen zum Erreichen des 40 % Ziels [BMWI 2021]

Zentrale politische Maßnahmen	Beitrag zur Treibhausgasemissionsminderung im Jahr 2020 in Millionen Tonnen CO ₂ -Äquivalente	
	Beitrag nach ursprünglicher Schätzung, Stand Dezember 2014	Beitrag nach aktueller gutachterlicher Schätzung (gerundete Werte)
Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) ohne Maßnahmen im Verkehrssektor	zirka 25 bis 30 (einschließlich Energieeffizienz Gebäude)	14,1 bis 14,51 (einschließlich Energieeffizienz Gebäude)
Strategie „Klimafreundliches Bauen und Wohnen“ und energetische Sanierungsfahrpläne Bund, Länder und Kommunen	Gesamt zirka 5,7 bis 10 (davon 1,5 bis 4,7 zusätzlich zu NAPE)	Gesamt 4,08 (davon 1,73 zusätzlich zu NAPE)
Maßnahmen im Verkehrssektor	zirka 7 bis 10	1,06 bis 1,38
Minderung von nicht energiebedingten Emissionen in den Sektoren:		
Industrie, GHD	2,5 bis 5,2	1,2 bis 1,7
Abfallwirtschaft	0,5 bis 2,5	0,24
Landwirtschaft ¹⁾	3,6	0,68 bis 2,37
Reform des Emissionshandels	-	3,5
Weitere Maßnahmen, insbesondere im Stromsektor	22	15,04 bis 19,56
Beratung, Aufklärung und Eigeninitiative für mehr Klimaschutz		0,25 bis 2
Gesamt	62 bis 78	37,5 bis 47,96

Quelle: Klimaschutzbericht 2019

¹⁾ Die im Dezember 2014 geschätzten Minderungsbeiträge beruhen auf den zum damaligen Zeitpunkt für die internationale Berichterstattung gültigen Emissionsfaktoren für Lachgas. Diese wurden mittlerweile angepasst und der Schätzung zum Klimaschutzbericht 2016 zugrunde gelegt.

Obwohl die Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen gemäß einer in [BMWI 2021] zitierten Umweltbewusstseinsstudie 2018 [BMU/UBA 2019] hoch ist, konnten also nicht alle Maßnahmen die erwünschten Einspareffekte erzielen. Etwa 74 % der Befragten wünschen sich in diesem Zusammenhang mehr Beteiligung an Planungs- und Genehmigungsprozessen. Für 76 % der Befragten sind zudem die Kosten der Energiewende in Deutschland zu ungleichmäßig verteilt. Entsprechend hohe Zustimmung erhalten demzufolge Maßnahmen zur staatlichen Förderung bei der Sanierung im Gebäudebereich, welche dazu beitragen, die bis zum Erreichen der Amortisationsgrenze auftretenden Kosten zumindest teilweise aufzufangen.

3 Dämmstoffe im Hochbau

Der Großteil 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 konstruktive 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. Das wichtigste Maß zur Bewertung der Wärmedämmleistung ist die Wärmeleitfähigkeit. Die am häufigsten eingesetzten Dämmstoffe sind im Hinblick auf das Kriterium Wärmeleitfähigkeit nach den geltenden harmonisierten europäischen Normen (DIN EN 13162 bis 13171) bewertbar. Darüber hinaus gibt es noch weitere Dämmstoffe für die Europäische oder nationale Technische Zulassungen (ETA, EAD oder Bauartgenehmigung) die Grundlage für die Bewertung und die Anwendung bilden. 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.

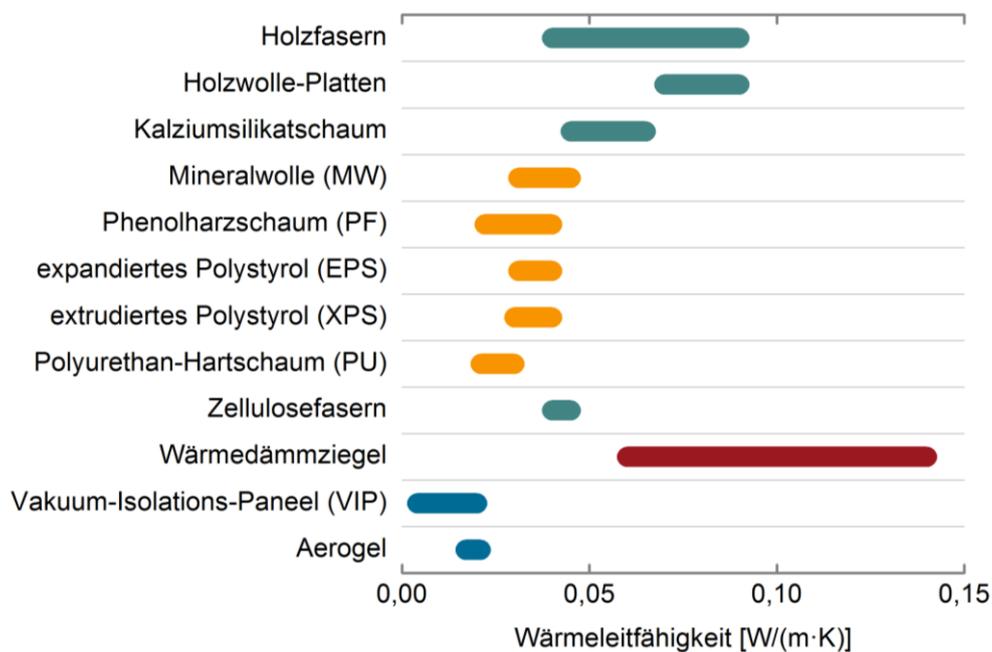


Abbildung 14: Bereich der Wärmeleitfähigkeiten von dämmenden Baustoffen

Wärmespeicherfähigkeit

Die Wärmespeicherfähigkeit von Dämmstoffen wird durch die Rohdichte und die spezifische Wärmekapazität bestimmt. Bei hygroskopischen Dämmstoffen trägt auch die im Dämmstoff adsorbierte Feuchtigkeit zur Erhöhung der Wärmespeicherfähigkeit bei. 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. Bis zur Neuausgabe der *DIN 4108-3* im Jahr 2018 galten die nachfolgend angegebenen Begriffe und Grenzen für Bauteilschichten in Abhängigkeit des s_D -Wertes:

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

Seit der Neuausgabe 2018 differenziert *DIN 4108-3* nun deutlicher zwischen den einzelnen Bereichen und hat vor allem den vorher als „diffusionshemmend“ beschriebenen Bereich von 0,5 m bis 1500 m eine neue Abstufung mit drei neuen Begriffen eingeführt:

- Diffusionsoffene Schicht: $s_D \leq 0,5 \text{ m}$
- Diffusionsbremsende Schicht: $0,5 \text{ m} < s_D \leq 10 \text{ m}$
- Diffusionshemmende Schicht: $10 \text{ m} < s_D \leq 100 \text{ m}$
- Diffusionssperrende Schicht: $100 \text{ m} < s_D < 1500 \text{ m}$
- Diffusionsdichte Schicht: $s_D \geq 1500 \text{ m}$

Um dabei einer Verwechslung der Bereiche durch den bisher verwendeten Begriff „diffusionshemmend“ vorzubeugen, wird dieser nicht mehr für den ganzen Bereich zwischen 0,5 m und 1500 m verwendet. Stattdessen wird als übergreifender Begriff für diese große Spanne der neue Begriff „diffusionsmindernd“ verwendet.

Im Weiteren gibt es auch diffusionsmindernde Schichten mit variablem s_D -Wert, die ihren Diffusionswiderstand in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte von diffusionsmindernd (meistens im Bereich diffusionsbremsend) nach diffusionsoffen verändern. Diese sogenannten feuchtevariablen Dampfbremsen erhöhen das Rücktrocknungspotential der Konstruktion im Sommer. Unter Verwendung feuchtevariabler Dampfbremsen mit einem bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis darf beispielsweise ein voll gedämmtes, nicht belüftetes Flachdach auf Schalung oder Beplankung ohne Verschattung nach *DIN 68800-2* nachweisfrei ausgeführt werden.

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 beeinflusst 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. Seit einigen Jahren liegt mit der EN 16733:2016 auch ein europäisches Prüfverfahren zum Glimmverhalten vor.

Die Anforderungen an das Brandverhalten der in einer bestimmten Anwendung eingesetzten Baustoffe regeln die Bauordnungen und spezifischen Verwaltungsvorschriften der Länder. In diesem Zusammenhang sind so genannte bauaufsichtliche Benennungen eingeführt (Tabelle 2), die wiederum den europäischen und deutschen Baustoffklassen zugeordnet werden können.

Die Zuordnung der bauaufsichtlichen Anforderungen ist ansonsten im Wesentlichen an die Gebäudeklassen (GK) nach Musterbauordnung (MBO) geknüpft (Abbildung 15). Dabei können für die meisten Anwendungen in den GK 1 – 3 normalentflammbare Dämmstoffe eingesetzt werden. Der Einsatz in GK 4 und GK 5 erfordert in aller Regel schwerentflammbare oder nichtbrennbare Dämmstoffe. Auch bei Fluchtwegen und in öffentlichen Gebäuden sind ausschließlich nicht brennbare Baustoffe zu verwenden. Weiterführende Informationen zum Brandverhalten von Dämmstoffen finden sich in Holm et al. 2014.

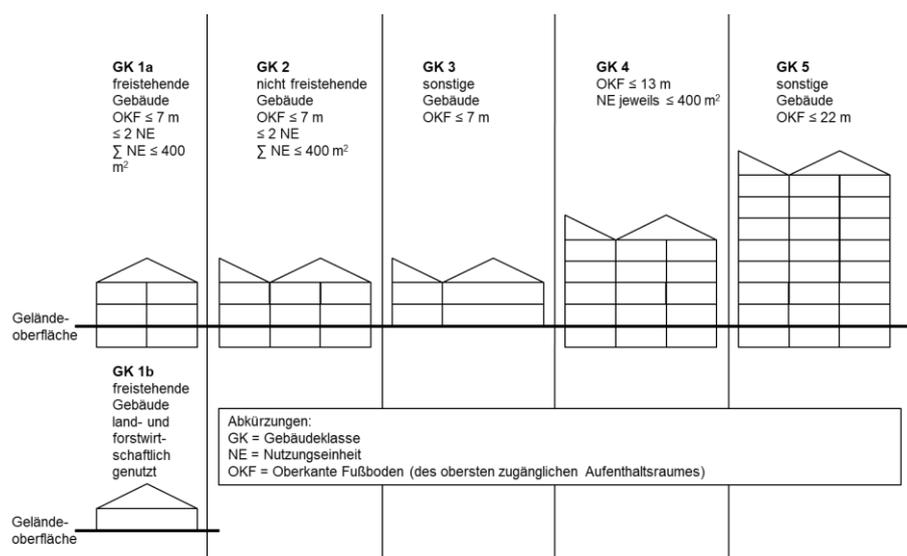


Abbildung 15: Gebäudeklassen nach MBO

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 3). Im Bereich der schwer- / normal- und leicht entflammaren Baustoffe sind die Klassen A2 – E, jeweils in Kombination mit entsprechenden Anforderungen an d und s definiert.

Die Zuordnung der bauaufsichtlichen Anforderungen zu den Europäischen Brandklassen (Tabelle 2) bzw. den Baustoffklassen nach DIN 4102 (Tabelle 4) ist im Folgenden gemäß der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MMV-TB) 2020/2 aufgeführt.

Tabelle 2: Zuordnung der in den deutschen Bauordnungen verwendeten bauaufsichtlichen Benennungen zu den europäischen Brandklassen nach EN 13501-1 (MMV-TB 2020-02)

Bauaufsichtliche Anforderungen	Mindestens erforderliche Leistungen
nichtbrennbar ^{1,2}	A2 – s1,d0 ³
schwerentflammbar ² und nicht brennend abfallend oder abtropfend, sowie geringe Rauchentwicklung	C – s1,d0 ³
schwerentflammbar ² und nicht brennend abfallend oder abtropfend	C – s2,d0 ³
schwerentflammbar und geringe Rauchentwicklung	C – s1,d2 ³
schwerentflammbar	C – s2,d2 ³
normalentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend	E
normalentflammbar	E – d2
1 soweit erforderlich zusätzlich Schmelzpunkt > 1000°C	Angabe: Schmelzpunkt von mindestens 1000°C
2 soweit erforderlich zusätzlich Rohdichte	Angabe: Rohdichte
3 soweit erforderlich Glimmverhalten	Angabe: „...zeigt keine Neigung zum kontinuierlichen Schwelen“

Tabelle 3: 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 4). Die Rauchgasdichte und das brennende Abtropfen sind zwar Kriterien der zugeordneten Prüfungen, werden jedoch nicht explizit in der Kurzbezeichnung der Baustoffklasse ausgewiesen. Eine Zuweisung erfolgt aber als

zusätzliches Merkmal für die Verwendung bei der Zuordnung der Baustoffklassen zu den bauaufsichtlichen Benennungen in der MVV-TB (Tabelle 4).

Tabelle 4: Bauaufsichtliche Benennung und Zuordnung der Baustoffklassen nach DIN 4102-1

Bauaufsichtliche Anforderungen	Mindestens erforderliche Baustoffklasse nach DIN 4102-1:1998-05	Zusätzliche Merkmale für die Verwendung
nichtbrennbar ^{1,2}	A2	-
schwerentflammbar ²	B1	Begrenzte Rauchentwicklung (I ≤ 400 % x Min. bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05) bestanden
schwerentflammbar ² und nicht brennend abfallend oder abtropfend	B1	Kein brennendes Abfallen oder Abtropfen Begrenzte Rauchentwicklung (I ^a ≤ 400 % x Min. bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05) bestanden
Schwerentflammbar ² und geringe Rauchentwicklung	B1	Geringe Rauchentwicklung (I ^a ≤ 100 % x Min. bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05) bestanden
schwerentflammbar ² und nicht brennend abfallend oder abtropfend sowie geringe Rauchentwicklung	B1	Kein brennendes Abfallen oder Abtropfen Geringe Rauchentwicklung (I ^a ≤ 100 % x Min. bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05) bestanden
normalentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend	B2	Kein brennendes Abfallen oder Abtropfen
normalentflammbar	B2	-
¹ soweit erforderlich zusätzlich Schmelzpunkt > 1000°C ² soweit erforderlich zusätzlich Rohdichte	Angabe: Schmelzpunkt von mindestens 1000°C Angabe: Rohdichte	
^a Der Integralwert I der Rauchentwicklung ist durch Bestimmung des Flächeninhalts mittels Rechteckmethode unter der Kurve der Lichtschwächung über die Zeit zu ermitteln, die bei der Prüfung nach DIN 4102-15: 1990-05 während der Beflammungsdauer mittels der Lichtmessstrecke nach DIN 50055:1989-03 mit einer Abtastrate von mindestens einem Messwert je 3 Sekunden aufgezeichnet wird.		

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.

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. Übliche elastische Produkte werden auch oft als Dämmstoffmatten bezeichnet. 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. Außerdem ist zu unterscheiden, ob die eingesetzte Energie aus erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Energiequellen stammt. Dies wird auch in den Umweltproduktdeklarationen (EPD) ausgewiesen.

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).

Dauerhaftigkeit

Wärmedämmstoffe sollen in Bauteilen über einen langen Zeitraum die deklarierte Leistung (Wärmeleitfähigkeit, Wasseraufnahme, Dicke, etc.) einhalten. Der bislang übliche Zeitrahmen für die Bewertung der Dauerhaftigkeit von Wärmedämmstoffen orientierte sich an einer angenommenen Nutzungsdauer von 25 Jahren. Dieser Zeitraum wird mittlerweile nicht mehr als praxisgerecht erachtet, da ein Austausch der Dämmstoffe in Bauteilen nicht oder nur mit großem Aufwand möglich ist, weshalb sich die Dauerhaftigkeit von Wärmedämmstoffen an der üblichen Nutzungsdauer von Gebäuden, d. h. einem Zeitraum von mindestens 50 Jahren orientieren muss (einzelne Stoffe oder Bauteile können ggf. auch von dieser Forderung etwas abweichen). Dies setzt voraus, dass die Produkte in ihrer Struktur und Zusammensetzung auch bei physikalischen, chemischen und biologischen Belastungen stabil bleiben. 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. Während diese Zuordnung zumindest hinsichtlich des hauptsächlich strukturbildenden Materials eindeutig ist, gestalten sich weitere Untergliederungen als schwierig. Eine gängige weitere Unterteilung wird nach den Bezeichnungen „natürlich“ und „synthetisch“ vorgenommen. Hierbei ist anzumerken, dass grundsätzlich jedes Material eine Form der technischen Aufbereitung erfährt. Der Unterschied zwischen einem Rohmaterial (Stein, Erdöl, Holz, etc.) und einem verarbeiteten Material liegt immer in einer Zerlegung und Neuordnung der nativen Struktur. Beispiele für Materialien mit einem sehr geringen Anteil an technischer Aufbereitung sind bspw. Dämmstoffe aus Stroh und Reet – aber

auch hier werden zumindest mechanische Verfahren zur Ernte und Bündelung der Halme angewendet. Typische verfahrenstechnische Prozesse bei der Herstellung von Dämmstoffen sind thermisch (bspw. Stein/Glas wird geschmolzen und zu Fasern verarbeitet), chemisch (bspw. Rohöl wird zu Olefinen aufgeschlossen und anschließend polymerisiert) oder thermo-mechanisch (bspw. Holz wird zu Fasern aufgeschlossen). Im Verlauf der Verarbeitung werden bei vielen Dämmstoffen außerdem weitere Stoffe eingesetzt, bspw. Stützfasern, Flammschutz- oder Imprägniermittel. 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 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: 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.

Für die Verwendbarkeit von Bauprodukten sind zunächst die Anforderungen der Musterbauordnung (MBO) entscheidend. Diese werden in der Musterverwaltungsvorschrift technische Baubestimmungen (MVV-TB) konkretisiert und ergänzt. Dabei ist zu beachten, dass sowohl die MBO als auch die MVV-TB in den einzelnen Ländern durch entsprechende Landesbauordnungen (LBO) bzw. länderspezifische Verwaltungsvorschriften umgesetzt werden. Die MVV-TB wurde in den letzten Jahren mehrfach aktualisiert. Die jeweils aktuellste Fassung ist auf den Seiten des Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) einzusehen. Dort findet sich auch ein Verweis auf den Stand der Umsetzung der MVV-TB in den Ländern. [DIBt 2021]

Hinsichtlich der notwendigen Verwendbarkeitsnachweise von Bauprodukten ist zwischen geregelten und nicht geregelten Produkten zu unterscheiden. Geregelte Produkte sind durch eine harmonisierte technische Spezifikation, d. h. eine harmonisierte europäische Produktnorm (hEN) oder eine Europäische Technische Bewertung (ETA) beschrieben. Dies umfasst jedoch tatsächlich ausschließlich die Beschreibung der technischen Eigenschaften. Die Verwendbarkeit ergibt sich dann aus der Übereinstimmung der deklarierten Eigenschaften mit den national definierten Anforderungen. Zu erwähnen ist außerdem, dass ein Hersteller nicht alle in der hEN enthaltenen Eigenschaften deklarieren muss. Die an die Konformität mit der hEN verknüpfte CE Kennzeichnung stellt lediglich die Handelsfähigkeit des Produkts im europäischen Wirtschaftsraum sicher und stellt keinen Qualitäts- oder Verwendbarkeitsnachweis dar. Eine direkte Nachregelung von Eigenschaften für Verwendungen im Anwendungsbereich der hEN ist nicht möglich. Da sich aber insbesondere bei der Kombination von Bauprodukten erweiterte Anforderungen ergeben können, stellt das DIBt mit einer sogenannten Allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) Anwendungsregelungen zur Verfügung, die Anforderungen an Eigenschaften und Funktionen beschreiben die sich erst durch den Zusammenbau von Bauprodukten zu Anlagen oder Bauteilen ergeben. Für nicht geregelte Bauprodukte besteht die Möglichkeit der sogenannten Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (AbZ).

Weiterführende Informationen finden sich in Kapitel 3.3 Regelung und Normung und 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, Ingenieur, Energieberater, 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 wider.

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 Außen-dämmung von Fassaden (z. B. hinter vorgehängten Fassadenbekleidungen) 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.

Anwendungsgebiete

DAD, DZ, WZ, WH, WI, WAB

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	75 - 100 (lose) 130 - 350 (Matten)
λ	[W/(m·K)]	0,018 - 0,021 (lose) 0,014 - 0,017 (Matten)
μ	[-]	2 - 3 (lose) 6 - 13 (Matten)
Brandklasse	Europ.	A1, E
c	[J/(kg·K)]	1000 - 1500
σ_{10}	[kPa]	50 – 100 (Matten)
σ_{mt}	[kPa]	10 – 60 (Matten)
S'	[MN/m ³]	
Dim.Sta.	[%]	70 (Matten)
Temp.best.	[°C]	600
EPD	-	Vorhanden
Produktnorm	-	Nein



Abbildung 16 Dämmstoffe aus Aerogel

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 Stützfasern (BiCo-Fasern: Kern aus PES/PP, Mantel aus PP/PE, bzw. PLA) verwendet; insbesondere um elastische Vliese herzustellen. Der Brandschutz kann bei beiden Fasertypen durch Beimengungen von Borsalz oder Soda verbessert werden.

Lieferformen und Verarbeitung

Hanf-/Flachsdämmstoffe sind lieferbar als Stopfwolle, 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 Ausgleichsschüttungen verwenden. Der Zuschnitt der gebundenen Produkte ist mit einer Band- oder Kreissäge möglich.

Anwendungsgebiete

DAD, DZ, DI, DES, WAB, WH, WI, WTR

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	40 – 50 (Stopfwohle) 35 - 50 (Matten) 150 (Schäben)
λ	[W/(m·K)]	0,038 – 0,043 (Fasern) 0,080 (Schäben)
μ	[-]	1 - 2
Brandklasse	Europ.	E
c	[J/(kg·K)]	1300 - 2300
σ_{10}	[kPa]	k. A.
σ_{mt}	[kPa]	30
S'	[MN/m ³]	20 – 60
Dim.Sta.	[%]	70
Temp.best.	[°C]	120
EPD	-	Vorhanden
Produktnorm	-	Nein



Abbildung 17 Dämmstoffe aus Hanffasern

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 (z. B. Paraffin zur Hydrophobierung) beigegeben und die Mattenbildung erfolgt im wässrigen Medium über ein Langsieb mit anschließender Trocknung. Der mechanische Verbund erfolgt hierbei überwiegend durch Verfilzung der Fasern. Bei Produkten mit geringer Rohdichte ($< 80 \text{ kg/m}^3$) oder bei höheren Brandschutzklassen kommen als Flammschutzmittel Borverbindungen oder Ammoniumphosphat zum Einsatz.

Lieferformen und Verarbeitung

Holzfaserdämmstoffe sind in Form von Matten, Stopfwohle, 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 240 mm in einem Produktionsschritt möglich. Lose Holzfasern für Einblasdämmung gibt es in unterschiedlichen Gebinden.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAP, WZ, WH, WI, WTR

Eigenschaften

ρ	[kg/m^3]	30 – 60 (lose) 50 – 270 (Matten/Platten)
λ	[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	0,035 – 0,090
μ	[-]	1 – 2 (lose) 5 – 10 (Matten/Platten)
Brandklasse	Europ.	E - C-s1,d0
c	[$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	1600 – 2100
σ_{10}	[kPa]	20 – 200
σ_{mt}	[kPa]	10 – 60
S'	[MN/m^3]	5 – 40
Dim.Sta.	[%]	k. A.
Temp.best.	[$^{\circ}\text{C}$]	110
EPD	-	Vorhanden
Produktnorm	-	DIN EN 13171



Abbildung 18 Dämmstoffe aus Holzfasern

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).

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).

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAA, WZ, WTR, WAP, WH, WI

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 nied- riger
μ	[-]	2 – 5 (WW)
Brandklasse	Europ.	B, A2-s1, d0 (WW/MW) E (mit EPS)
c	[J/(kg·K)]	2100
σ_{10}	[kPa]	150 – 200 (WW) je nach Kern nied- riger
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
Produktnorm	-	DIN EN 13168



Abbildung 19 Holzwolle-Leichtbauplatte (HWL)

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.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DEO, DI, WAB, WAP, WI

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	115 – 300
λ	[W/(m·K)]	0,045 – 0,10
μ	[-]	3 – 20
Brandklasse	Europ.	A1; A2-s1, d0
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
Produktnorm	-	Nein

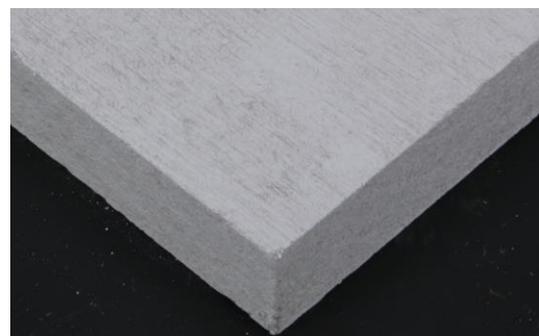
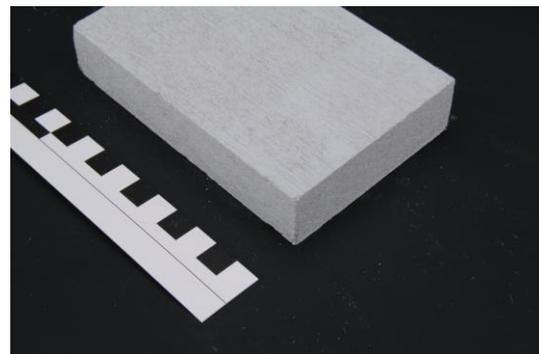


Abbildung 20 Dämmstoff aus Kalziumsilikat

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 Korkschat 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.

Lieferformen und Verarbeitung

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

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAP, WZ, WH, WI, WTR

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	Europ.	E
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	-	Vorhanden
Produktnorm	-	DIN EN 13170



Abbildung 21 Dämmstoff aus Kork

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

Mineralschaum 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.

Anwendungsgebiete

DI, DEO, DAD, DAA, WAP, WI, WAB, WZ

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	20 – 30 (lose) 115 – 130 (Platten)
λ	[W/(m·K)]	0,040 – 0,045
μ	[-]	3 – 6
Brandklasse	Europ.	A1
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
Produktnorm	-	Nein

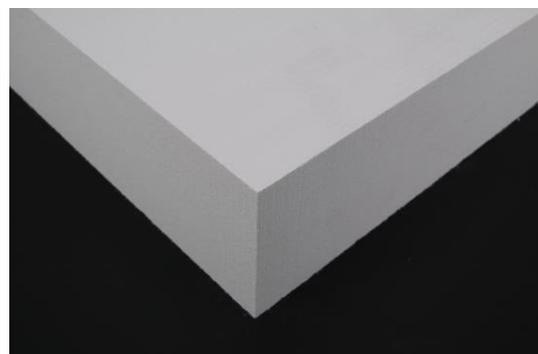
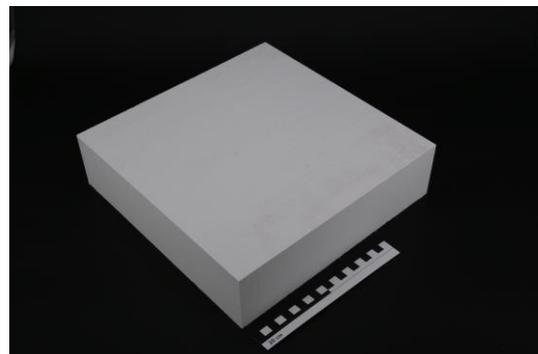


Abbildung 22 Dämmstoff aus Mineralschaum

Mineralwolle (MW)

Herstellung und Rohstoffe

Mineralwolle ist eine übergeordnete Bezeichnung für die anorganischen Faserdämmstoffe aus Steinwolle oder Glaswolle. Seit einigen Jahren ist auch so genannte 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. Typische Rohstoffe für die Steinwolle-Herstellung sind Diabas, Dolomit und Kalkstein(-Sand) (jeweils ca. 20 - 30 Masse-%) sowie Eisenoxid und Zement (jeweils ca. 5 - 15 Masse-%). Zur Herstellung von Glaswolle werden Altglas-Scherben (50 bis 70 Masse-%), Quarzsand (10 bis 20 Masse-%), Kalkstein, Soda (5 - 15 Masse-%) und Borax (5 - 10 Masse-%) eingesetzt. Stein- und Glaswolle ist gemeinsam, dass die Rohstoffe geschmolzen werden und mit firmenspezifischen Verfahren zerfasert. Zur Bindung der Fasern wird unmittelbar nach dem Zerfaserungsaggregat Phenol-Formaldehydharz auf die Fasern gesprüht. Am Markt sind auch einige Phenolharz- und Formaldehyd-freie Produkte erhältlich. Zusätzlich enthalten einige Produkte geringe Mengen Hydrophobierungsmittel (z.B. Silikonöle). 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.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAP, WZ, WH, WI, WTR, WTH

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	15 – 150 (Glaswolle) 30 – 220 (Steinwolle)
λ	[W/(m·K)]	0,032 – 0,048
μ	[-]	1 – 2
Brandklasse	Europ.	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
Produktnorm	-	DIN EN 13162 (für Gebäude) DIN EN 14303 (TGA)



Abbildung 23 Dämmstoffe aus Mineralwolle

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 beispielweise durch Bohlen und Platten zu schützen.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WI

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	35 – 45
λ	[W/(m·K)]	0,021 – 0,024
μ	[-]	55
Brandklasse	Europ.	C-s1 / s2, d0
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	-	Vorhanden
Produktnorm	-	DIN EN 13166 (für Gebäude) DIN EN 14314 (TGA)



Abbildung 24 Dämmstoff aus Phenolharz

Polystyrol, expandiert (EPS)

Herstellung und Rohstoffe

Polystyrol (PS) gehört zu den thermoplastischen Kunststoffen. Expandiertes Polystyrol, auch bekannt unter dem Markennamen „Styropor“, besteht aus Polystyrol, Treibmittel (Pentan) und Additiven zum Flammenschutz. Bis etwa 2013 wurde HBCD eingesetzt. Aktuell wird nur noch das Flammenschutzmittel Polymer-FR eingesetzt, das chemisch im Polystyrol gebunden ist. 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.

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.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAA, WAP, WZ, WI, PW, PB

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	15 - 30
λ	[W/(m·K)]	0,031 - 0,045
μ	[-]	20 - 100
Brandklasse	Europ.	E
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
Produktnorm	-	DIN EN 13163 (für Gebäude) DIN EN 14309 (TGA)



Abbildung 25 Dämmstoffe aus EPS

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 hergestellt. Bis etwa 2013 wurde als Flammschutzmittel HBCD eingesetzt. Aktuell wird nur noch das Flammschutzmittel Polymer-FR eingesetzt, das chemisch im Polystyrol gebunden ist. Das milchig-opake Polystyrolgranulat wird bei ca. 200°C in einem Extruder aufgeschmolzen und mit den Zusatzstoffen vermengt. Die über eine Breit-schlitzdüse 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 oder verschweißte 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.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DUK, DI, DEO, WAB, WAP, WZ, WI, PW, PB

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	25 - 50
λ	[W/(m·K)]	0,028 - 0,042
μ	[-]	80 - 200
Brandklasse	Europ.	E
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
Produktnorm	-	DIN EN 13164 (für Gebäude) DIN EN 14307 (TGA)



Abbildung 26 Dämmstoff aus XPS

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.

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.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WH, WI, PW, PB

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	30 - 100
λ	[W/(m·K)]	0,023 - 0,029
μ	[-]	40 - 200
Brandklasse	Europ.	E, D-s2-d0, C-s3-d0
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	-	Ja
Produktnorm	-	DIN EN 13165 (für Gebäude) DIN EN 14308 (TGA)



Abbildung 27 Dämmstoffe aus Polyurethan

Pyrogene Kieselsäure

Herstellung und Rohstoffe

Als pyrogene Kieselsäure werden SiO_2 -Pulver bezeichnet, die mittels Flammenhydrolyse aus Silanen oder SiCl_4 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.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WH, WI

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	120 - 350
λ	[W/(m·K)]	0,018 - 0,021
μ	[-]	6
Brandklasse	Europ.	A1
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	-	Vorhanden
Produktnorm	-	Nein



Abbildung 28 Dämmstoff aus pyrogener Kieselsäure

Schafwolle

Herstellung und Rohstoffe

Das Rohmaterial ist die Schurwolle von Schafen. Das Material wird gewaschen, entfettet und der pH-Wert neutralisiert. Durch Nadelverfilzung und teilweise mit Stabilisierung durch Stützfasern aus Polyester oder Maisstärke werden Vliese und mattenförmige Dämmstoffe, hergestellt. Zum Schutz vor Motten wurden in der Vergangenheit Borverbindungen eingesetzt. Die Verwendung von Permethrin und anderen Pyrethroiden ist in geringen Konzentrationen zulässig, aber wird bzgl. der gesundheitlichen Auswirkungen kontrovers diskutiert. Zum Einsatz kommen aktuell das Wollschutzmittel Thorlan IW mit dem Wirkstoff Kaliumfluorotitanat IV. Aktuell werden außerdem Produkte angeboten, die mit einem Plasmaionenverfahren behandelt werden, wodurch die Proteinstruktur der Wolle verändert wird.

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.

Anwendungsgebiete

DZ, DI, WAB, WH, WI, WTR

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	25 - 30
λ	[W/(m·K)]	0,040 - 0,045
μ	[-]	1 - 2
Brandklasse	Europ.	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
Produktnorm	-	Nein

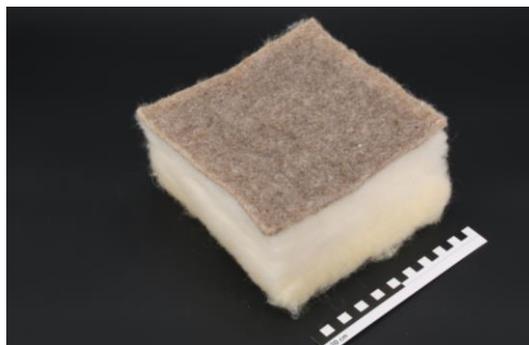


Abbildung 29 Dämmstoff aus Schafwolle

Schaumglas (CG)

Herstellung und Rohstoffe

Schaumglas besteht aus Glas, das aus den Rohstoffen Quarzsand (41 M.-%), Kalifeldspat (22 M.-%), Natriumkarbonat und Kalziumkarbonat mit jeweils 17 M.-% sowie Eisenoxid (3 M.-%) hergestellt wird. Die Rohstoffe werden bei 1100°C geschmolzen und anschließend abgekühlt. Alternativ kann auch recyceltes Altglas eingesetzt werden. Das Rohglaspulver wird anschließend mit Kohlenstoff (0,15 M.-%) in Edelstahlformen in einem Aufschäumofen gebacken. Der Schaumglaskuchen wird dann in einem kontrollierten Prozess abgekühlt.

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.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WI, WTR, PW, PB

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	100 - 200
λ	[W/(m·K)]	0,037 - 0,060
μ	[-]	∞
Brandklasse	Europ.	A1
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
Produktnorm	-	DIN EN 13167 (für Gebäude) DIN EN 14305 (TGA)



Abbildung 30 Dämmstoff aus Schaumglas

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 offene Volumen wird im Herstellungsprozess evakuiert und die gasdichte Hülle passgenau verschweißt. Als Stützkern für VIPs für Bauanwendungen wird in der Regel pyrogene Kieselsäure verwendet, da dieser Stoff aufgrund der sehr kleinen Porendurchmesser gegenüber dem über die Zeit auftretenden Druckanstieg die geringsten Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit zeigt (Knudsen-Effekt). Alternative Stützkernmaterialien sind Mineralwolle und einige offenzellige Dämmstoffe, die aber vorwiegend in VIPs für Kühl- und Gefriergeräte und bei Transportboxen eingesetzt werden. Um mit diesen Materialien eine dauerhaft niedrige Wärmeleitfähigkeit des Produkts auch für Bauanwendungen 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. Eindringende Gase erhöhen die Wärmeleitfähigkeit. Der Einfluss auf und der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit ist umso größer, je größer der Porendurchmesser des Kernmaterials ist.

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 VIPs für Bauanwendungen 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 werden ausschließlich ebene und rechteckige Plattenformate im Baubereich eingesetzt. Bei der Verarbeitung darf die Vakuumschicht 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 zwangungsfreien 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.

Anwendungsgebiete

DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WH, WI

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	170 - 210
λ	[W/(m·K)]	0,007 - 0,009
μ	[-]	∞
Brandklasse	Europ.	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
Produktnorm	-	Nein



Abbildung 31 Vakuumisulationspaneele

Zellulose (Altpapierflocken)

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

Zellulosedämmstoffe sind als Matten (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 Anwendung lose aufgeblasener Flocken (Schüttung) oder die verdichtete Einbringung in Wand- oder Deckengefache.

Anwendungsgebiete

DAD, DZ, DI, WH, WI, WTR

Eigenschaften

ρ	[kg/m ³]	30 - 60 (lose) 60 - 90 (Platten)
λ	[W/(m·K)]	0,039 - 0,045
μ	[-]	1 - 2
Brandklasse	Europ.	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	-	Vorhanden
Produktnorm	-	EN 15101-1/-2



Abbildung 32 Dämmstoff aus Zellulose

3.3 Regelung und Normung

Die gesetzlichen Grundlagen zur energetischen Qualität von Gebäuden, der Erstellung und Verwendung von Energieausweisen und zum Einsatz von erneuerbaren Energien in Gebäuden regelt in Deutschland wie beschrieben das Gebäudeenergiegesetz – GEG (siehe Kapitel 2.1). Das Ziel des neuen Gesetzes war eine Entbürokratisierung und Vereinfachung des Ordnungsrechts zur Umsetzung der Anforderungen aus der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Eine Erhöhung der energetischen Anforderungen gegenüber der Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2014 war bei der Ausarbeitung des Gesetzes explizit nicht vorgesehen, was anhaltend kontrovers diskutiert wird [Pehnt et al. 2021]. Eine Überprüfung des Gebäudeenergiegesetzes zur Vorbereitung einer anstehenden Novelle ist gemäß §9 des GEG für 2023 vorgesehen [Tuschinski 2021].

Neubauten, die unter die Regelung des GEG fallen, müssen als sogenanntes Niedrigstenergiegebäude geplant und gebaut werden. In der aktuell gültigen Fassung nutzt das GEG zur Definition der Anforderungen weitgehend die gleiche Systematik wie die alte EnEV. Die wichtigsten Kenngrößen zur Bewertung der energetischen Qualität des Gebäudes sind der Primärenergiebedarf und der

Transmissionswärmeverlust über die Gebäudehülle. Beide Größen beziehen sich auf ein virtuelles Referenzgebäude, das in Anhang 1 des GEG für Wohngebäude und in Anhang 2 für Nichtwohngebäude hinsichtlich der technischen Eigenschaften der Gebäudehülle und der Anlagentechnik definiert ist. Der zum Betrieb notwendige Energieeinsatz soll zumindest anteilig durch die Nutzung erneuerbarer Energien gedeckt werden. Weitere wichtige thermische Eigenschaften der Gebäudehülle, die im GEG geregelt werden, betreffen die Wärmebrücken, die Luftdichtheit und den sommerlichen Hitzeschutz.

Der Primärenergiebedarf eines real errichteten Neubaus, darf nach Inkrafttreten der letzten GEG-Aktualisierung am 1. Januar 2023 flächenbezogen maximal 55 % des Primärenergiebedarfs des Referenzgebäudes betragen. Der Wärmeverlust über die Gebäudehülle darf maximal 70 % des Wärmeverlustes des Referenzgebäudes betragen. Hinsichtlich der technischen Ausführung der Gebäudehülle sind in Anlage 1 des GEG typische U-Werte für verschiedene Bauteile hinterlegt, mit denen unter Beachtung der technischen Ausführung des Referenzgebäudes die erforderlichen Kenngrößen zur Beurteilung des real errichteten Gebäudes berechnet werden. Dabei resultiert die Verschärfung der Neubauanforderungen im GEG nicht aus einer Anpassung der Bauteile des Referenzgebäudes (diese sind seit der EnEV 2014 unverändert, siehe auch Tabelle 6), sondern aus einer Anpassung der prozentual genannten Anforderungsgrößen Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust.

Tabelle 6: Typische U-Werte für Bauteile nach verschiedenen Wärmestandards [1]

Bauteile U-Werte (W/m ² ·K)	WSchV 1995	EnEV 2014	GEG 2020 bzw. 2023 ¹	Passivhaus
Dach	0,22	0,20	0,20	0,15
Außenwände	0,50	0,28	0,28 ²	0,15
Keller	0,50	0,35	0,35	0,15
Fenster	1,8	1,3	1,3	< 0,80

¹Referenzgebäude

²gegen Außenluft.

Die in Tabelle 6 dargestellten U-Werte ordnen die momentan gültigen Anforderungen des Referenzgebäudes entsprechend GEG in das Wertespektrum zwischen mittlerweile historischen Anforderungen der WSchV 1995 und dem aktuell technisch noch sinnvoll umsetzbaren Stand der Technik („Passivhaus“) ein. Dabei zeigt sich, dass sich die Anforderungen an den Wärmedurchgang über die Jahre deutlich weiterentwickelt haben. Um eine größere Wahlfreiheit für die Ausführung zu erhalten, wurden die GEG Verschärfungen nicht über eine Anpassung der Bauteile des Referenzgebäudes umgesetzt, sondern über eine prozentuale Anpassung der Ergebnisse des Referenzgebäudes.

Eine Reduzierung des Wärmedurchgangs erfordert im einfachsten Fall dickere Dämmschichten bzw. eine verringerte Wärmeleitfähigkeit. Daraus ergeben sich aber

zahlreiche weitere technische Implikationen hinsichtlich des mechanischen, feuchte-technischen und brandtechnischen Verhaltens. Dieser „Herausforderung“ müssen sich die unterschiedlichen Dämmstoffe stellen.

Im folgenden Abschnitt wird die Umsetzung dieser Herausforderungen in die entsprechende Sprache für Fachleute beschrieben – dazu dienen Technische Richtlinien und insbesondere Normen. Die Abbildung 33 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).

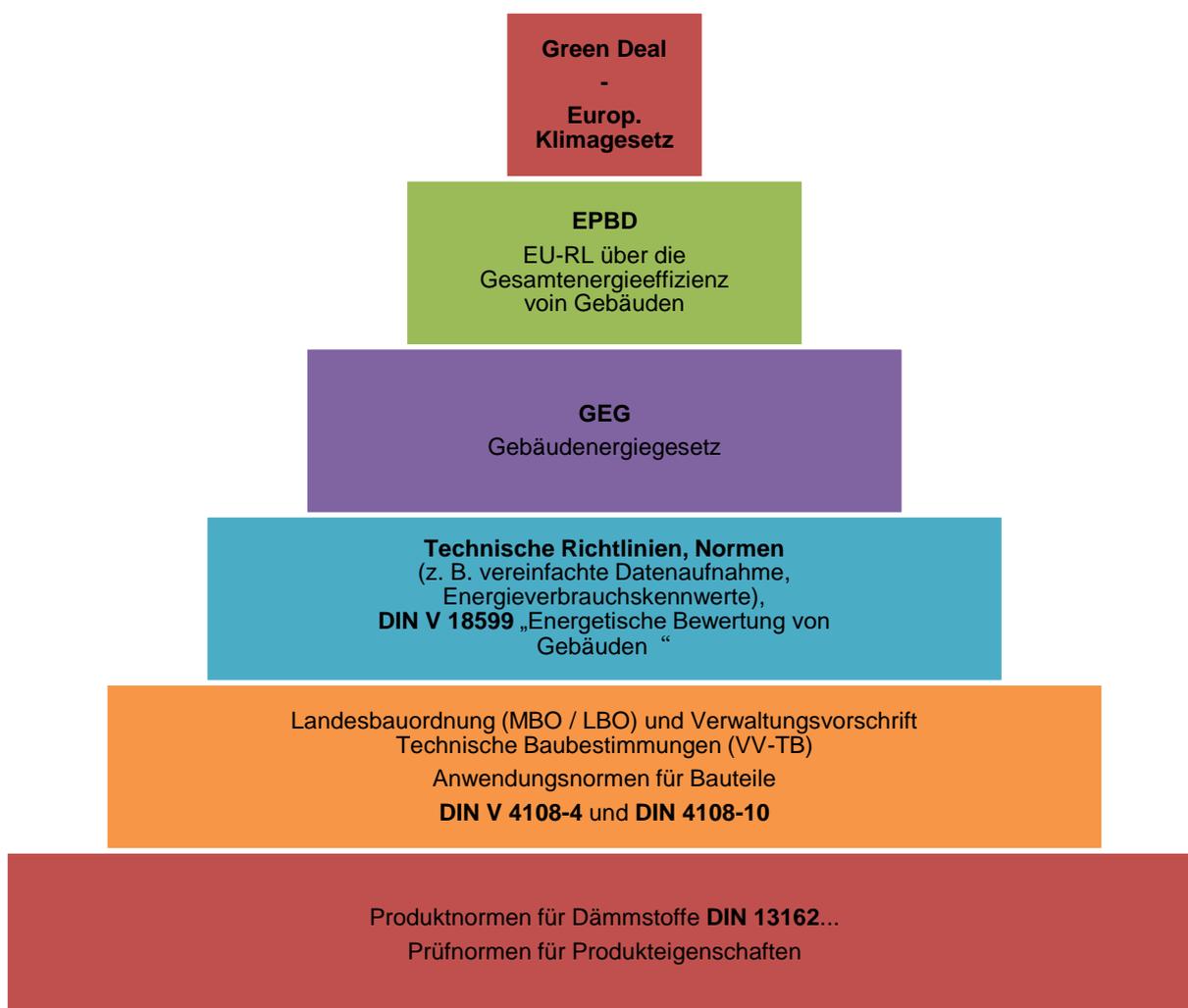


Abbildung 33: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der europäischen Verordnungsgebung im Bereich des energieeffizienten Bauens und deren Umsetzung in Deutschland (schematisch)

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 Beschreibung von technischen Eigenschaften hat dabei in Form einer sogenannten Leistungserklärung (engl. „Declaration of Performance“ – DoP) zu erfolgen, die auf Grundlage einer sogenannten harmonisierten technische Spezifikation erstellt wird. Eine harmonisierte technische Spezifikation ist dabei entweder eine harmonisierte Produktnorm (hEN) oder eine Europäische Technische Bewertung (engl. European Technical Assessment – ETA (auf Basis eines EAD)).

Für viele Dämmstoffe existieren in diesem Zusammenhang bereits gültige harmonisierte europäische Normen. Die Harmonisierung einer Norm wird durch die Veröffentlichung im Europäischen Amtsblatt (Official Journal) angezeigt. Das Dokument ist danach baurechtlich verbindlich eingeführt und muss bei der Erstellung der DoP in Bezug genommen werden.

Unterstützt werden die harmonisierten Produktnormen (hEN) durch die Querschnittsnormen, wie Prüfmethode, Berechnungs- oder Anwendungsnormen.

Die Erarbeitung von europäischen harmonisierten Normen findet innerhalb des Europäischen Komitees für Normung (CEN) statt. Für jede Produktgruppe gibt es dabei ein spezifisches technisches Komitee (TC), in dem Experten aus allen interessierten Kreisen zusammenarbeiten. Ein TC ist üblicherweise in verschiedene Sub-Komitees (SC) und/oder Arbeitsgruppen (WG) unterteilt. Die einzelnen SC/WG beschäftigen sich dann mit spezifischen Produkten oder Fragestellungen. Die Entwicklung von harmonisierten Normen für Dämmstoffe findet im CEN TC 88 statt. Der TC 88 ist aktuell in 21 SC/WG aufgeteilt, die sich sowohl mit spezifischen Produktnormen als auch mit horizontalen Prüfmethode und allgemein der Koordination der verschiedenen Arbeitsgruppen beschäftigen.

Die Grundlage der aktuellen Normungsarbeit sind sogenannte Mandate, die noch auf Basis der Bauproduktenrichtlinie erstellt wurden. Über die Jahre wurden die Inhalte der Normen an die voranschreitende technische Entwicklung angepasst, während die der Normung zugrunde liegenden Mandate nicht oder nur begrenzt erweitert wurden. Diese Situation und der Übergang von der Bauproduktenrichtlinie zur Bauproduktenverordnung hat dazu geführt, dass viele Inhalte der hENs nicht mehr mit den Anforderungen der Bauproduktenverordnung übereinstimmen.

Um die harmonisierten Normen auf dem Stand der Technik zu halten, findet alle vier Jahre eine Überprüfung statt. Änderungen werden mittels einer vollständigen Überarbeitung (Revision) oder der Veröffentlichung eines Änderungsdokuments (Amendment) eingeführt. Die erwähnte Diskrepanz zwischen den technischen Inhalten der grundlegenden Mandate und der vorangeschrittenen technischen Beschreibung der Dämmstoffe einerseits und den Anforderungen der Bauproduktenverordnung andererseits, hat dazu geführt, dass die Überarbeitung vieler harmonisierter Normen derzeit stillsteht. Gleiches gilt für die Veröffentlichung neuer Normen. Da für die DoP die jeweils im Amtsblatt veröffentlichte Version maßgebend ist, kann sich somit auch der Fall ergeben, dass eine durch CEN bereits veröffentlichte Norm neueren Inhalts ggf. nicht für die Bewertung eines Produkts herangezogen werden kann. Um die Überarbeitung von harmonisierten Normen wieder zu ermöglichen, werden derzeit mit großem Aufwand sogenannte Standardisation Requests (SReq) erarbeitet. Die SReq stellen einen neuen Normungsauftrag dar und ersetzen somit die bisher verwendeten Mandate. Die Dämmstoffe stehen hier an der sechsten Stelle der zu erarbeitenden SReq und die Arbeit daran beginnt im Frühjahr 2023.

Neben der harmonisierten Produktnorm kann auch eine Europäische Technische Bewertung (ETA) für die Erstellung einer DoP verwendet werden. Die Inbezugnahme einer ETA ist nur dann zulässig, wenn es keine hEN gibt, bzw. das Produkt Eigenschaften aufweist, die nicht in der jeweiligen hEN abgebildet sind. Grundlage für die Erstellung einer ETA ist ein sogenanntes Europäisches Bewertungsdokument (engl. European Assessment Document – EAD) das unter den nationalen Bauaufsichtsbehörden der Länder abgestimmt wird.

Das europäische Konzept der Normung besteht darin, dass in den harmonisierten Produktnormen ausschließlich die Verfahren zur Bestimmung sowie die Art der Deklaration der sogenannten wesentlichen Eigenschaften (Essential characteristics) oder sogenannter Stellvertretereigenschaften (Proxy characteristics) beschrieben ist. Die Eigenschaften können gemäß Bauproduktenverordnung in Form von Leistungsstufen (Zahlenwert), Leistungsklassen (Bandbreite von Leistungsstufen) und Schwellenwerten (Mindest- oder Höchstleistungsstufe) angegeben werden. Im Sinne einer lediglich beschreibenden Deklaration sind wann immer möglich Leistungsstufen heranzuziehen. Bei den Dämmstoffnormen sind überdies auch Leistungsklassen üblich (z. B. CS 10, CS 20, usw.). Insbesondere die Verwendung von Schwellenwerten ist jedoch nur in Ausnahmefällen zulässig. Existieren Schwellenwerte aus harmonisierten (d. h. im Amtsblatt veröffentlichten) Vorgängernormen, so können diese weiterverwendet werden. Die Einführung neuer Schwellenwerte ist jedoch an einen sogenannten Delegierten Rechtsakt gebunden, der nur durchgeführt wird, wenn ein entsprechender Regelungsbedarf in den Mitgliedsstaaten besteht. Die relativ hohen Hürden zur Einführung von Schwellenwerten leiten sich aus dem erklärten Ziel der Bauproduktenverordnung ab, Handelshemmnisse innerhalb der EU abzubauen.

Eine hEN ist also wie ein Kochrezept zu verstehen, mit deren Hilfe die Leistungen eines Produkts beschrieben werden. Aussagen über die Anwendbarkeit lassen sich daraus aber nicht ableiten. Die deklarierten Leistungen und auch das darauf beruhende CE Zeichen stellen somit keinen Verwendbarkeitsnachweis dar.

Die Verwendbarkeit eines Bauprodukts wird durch den Abgleich der deklarierten Eigenschaften mit Anforderungen auf Grundlage nationaler Anforderungsnormen oder anderer Anforderungen von Seiten der Baubehörden (z. B. entsprechend der länderspezifischen Umsetzungen der MVV-TB) nachgewiesen. Dieser Ansatz macht im europäischen Kontext durchaus Sinn, weil Bauprodukte zumeist europaweit gehandelt werden und deren Verwendung in den verschiedenen Ländern aufgrund der spezifischen Baukonstruktionen und klimatischer Einflüsse unterschiedlichen Anforderungen unterworfen sein kann.

Die grundlegenden Anforderungen an Bauwerke werden in Deutschland durch die Landesbauordnungen geregelt. Soweit notwendig werden diese Anforderungen in Technischen Baubestimmungen konkretisiert. Früher war dies die Bauregelliste. Seit einigen Jahren werden entsprechende Ländervorschriften auf Basis der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV-TB) erstellt. Mittlerweile ist die MVV-TB in allen Bundesländern umgesetzt.

Die MVV-TB gliedert sich dabei in vier Teile (A, B, C, D). Für die Anwendung von Dämmstoffen ist insbesondere Teil A relevant. Dieser enthält Technische Baubestimmungen, die bei der Erfüllung der Grundanforderungen an Bauwerke zu beachten sind. Hier werden für den Bereich Wärmeschutz (A 6) im Wesentlichen die nationalen Normen zur Anforderung an den Wärmeschutz der Reihe DIN 4108 in Bezug genommen. In den Anlagen zum Teil A werden weitere Anforderungen an bestimmte Gruppen von Dämmstoffen definiert. Teil B enthält zusätzliche Baubestimmungen für Bauteile und Sonderkonstruktionen, Teil C regelt Technische Baubestimmungen für Bauprodukte, die keine CE-Kennzeichnung tragen und für Bauarten, während Teil D die sogenannten untergeordnete Bauprodukte beschreibt, die keinen Verwendbarkeitsnachweis benötigen.

Tabelle 7 zeigt, wie die im vorangegangenen Abschnitt (Grundlagen: bauphysikalische und technische Eigenschaften) beschriebenen Anforderungen an Dämmstoffe in technische Eigenschaften – gekoppelt an europäische Prüfverfahren – umgesetzt werden. Die gelisteten Abkürzungen finden sich in den Deklarationen der Produkte und in der Beschreibung von Anforderungen nach DIN 4108-10 wieder.

Tabelle 7: Umsetzung der Bewertungskriterien in genormte europäische Prüfverfahren

Eigenschaft	Prüfverfahren	Symbol	Einheit	Abkürzung
Nennwert des Wärmedurchlasswiderstandes/-leitfähigkeit	DIN EN 12667 oder DIN EN 12939	R_D λ_D	$m^2 \cdot K/W$ $W/(m \cdot K)$	R λ
Länge und Breite	DIN EN 822	l und b	mm	L und W
Dicke	DIN EN 823	d	mm	T
Rechtwinkligkeit	DIN EN 824		mm/m	S
Ebenheit	DIN EN 825		mm	P oder S_{max}
Dimensionsstabilität unter normalen Laborbedingungen	DIN EN 1603	$\Delta \epsilon$	%	DS(N)
Biegefestigkeit	DIN EN 12089	σ_B	kPa	BS
Brandverhalten	DIN EN 13501-1		Euroklassen	A, B, C, D, E, F
Rohdichte	DIN EN 1602	ρ_a	kg/m^3	AD
Dimensionsstabilität unter definierten Temperaturbedingungen	DIN EN 1604	$\Delta \epsilon$	%	DS(T)
Dimensionsstabilität unter definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen	DIN EN 1604	$\Delta \epsilon$	%	DS(T, H)
Verformung bei definierter Druck- und Temperaturbeanspruchung	DIN EN 1605	ϵ	%	DLT
Druckspannung bei 10 % Stauchung	DIN EN 826	σ_{10}	kPa	CS(10)
Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene	DIN EN 1607	σ_{mt}	kPa	TR
Zugfestigkeit parallel zur Plattenebene	DIN EN 1608	σ_t	kPa	
Punktlast	DIN EN 12430		N	PL(5)
Langzeit-Kriechverhalten	DIN EN 1606	ϵ_{ct}	%	CC() σ_c
Scherfestigkeit	DIN EN 12090	τ	kPa	SS
Wasseraufnahme bei kurzzeitigem teilweisem Eintauchen	DIN EN 1609		kg/m^2	WS
Wasseraufnahme bei langfristigem teilweisem Eintauchen	DIN EN 12087	W_{lp}	kg/m^2	WL(P)
Wasserdampfdiffusionswiderstand(szahl)	DIN EN 12086	μ	$m^2 \cdot h \cdot Pa/mg (-)$	Z oder MU
dynamische Steifigkeit	DIN EN 29052-1	s'	MN/m^3	SD
Dicke/Dicke unter Belastung; Zusammendrückbarkeit	DIN EN 12431	d_L d_B	mm	
		c	mm	CP
Schallabsorptionskoeffizienten	DIN EN ISO 354:2003-12	α_p α_w	-----	AP/AW
Strömungswiderstand	DIN EN 29053		$kPa \cdot s/m^3$	AF
organische Bestandteile	DIN EN 13820		%	M_{oc}

Tabelle 8 gibt den derzeitigen Stand der Produktnormen wieder. Diese harmonisierten Normen legen die Anforderungen an werkmäßig hergestellte Produkte aus elf unterschiedlichen Ausgangsmaterialien fest. Tabelle 9 listet die harmonisierten Produktnormen für an der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmstoffe auf. Da im GEG auch Anforderungen an die Wärmedämmung von Wärmeverteilungs-Warmwasserleitungen, Kälteverteilungs- und Kaltwasserleitungen sowie Armaturen gestellt werden, wird an dieser Stelle auf die entsprechenden Dämm- bzw. Isolierstoffe hingewiesen (Tabelle 10), mit denen die Anforderungen erfüllt werden können.

Tabelle 8: Harmonisierte Normen für werkmäßig hergestellte Dämmstoffe

Normbezeichnung	Titel
DIN EN 13162:2015-04	Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) – Spezifikation; Deutsche Fassung EN13162:2012+A1:2015
DIN EN 13163:2017-02	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13163:2012+A2:2016
DIN EN 13164:2015-04	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13164:2012+A1:2015
DIN EN 13165:2016-09	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyurethan-Hartschaum (PU) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13165:2012+A2:2016
DIN EN 13166:2016-09	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Phenolharzschaum (PF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13166:2012+A2:2016
DIN EN 13167:2015-04	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas (CG) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13167:2012+A1:2015
DIN EN 13168:2015-04	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzwolle (WW) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13168:2012+A1:2015
DIN EN 13169:2015-04	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Blähperlit (EPB) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13169:2012+A1:2015
DIN EN 13170:2015-04	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Kork (ICB) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13170:2012+A1:2015
DIN EN 13171:2015-04	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13171:2012+A1:2015
DIN EN 16069:2015-04	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyethylenschaum (PEF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 16069:2012+A1:2015

Tabelle 9: 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 14315-1:2013-04	Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Polyurethan (PUR)- und Polyisocyanurat (PIR)-Spritzschaum - Teil 1: Spezifikation für das Schaumsystem vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 14315-1:2013
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
DIN EN 14318-1:2013-04	Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus dispensiertem Polyurethan (PUR)- und Polyisocyanurat (PIR)-Hartschaum - Teil 1: Spezifikation für das Schaumsystem vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 14318-1:2013

Tabelle 10: Normen für Dämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung

Normbezeichnung	Titel (der entsprechenden DIN)
DIN EN 14303:2013-04	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14303:2009+A1:2013
DIN EN 14304:2013-04	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+A1:2013
DIN EN 14305:2013-04	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas (CG) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14305:2009+A1:2013
DIN EN 14306:2013-04	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Calciumsilikat (CS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14306:2009+A1:2013
DIN EN 14307:2013-04	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+A1:2013
DIN EN 14308:2013-04	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+A1:2013
DIN EN 14309:2013-04	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+A1:2013
DIN EN 14313:2013-04	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyethylenschaum (PEF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14313:2009+A1:2013
DIN EN 14314:2013-04	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Phenolharzschaum (PF) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 14314:2009+A1:2013
DIN EN 14319-1:2013-04	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Polyurethan (PUR)- und Polyisocyanurat (PIR)-Gießschaum - Teil 1: Spezifikation für das Schaumsystem vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 14319-1:2013
DIN EN 14320-1:2013-04	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Polyurethan (PUR)- und Polyisocyanurat (PIR)-Spritzschaum - Teil 1: Spezifikation für das Schaumsystem vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 14320-1:2013
DIN EN 15501:2013-07	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Bläherlit (EP) und expandiertem Vermiculit (EV) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 15501:2013
DIN EN 15599-1:2010-12	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung mit Produkten aus expandiertem Perlit (EP) - Teil 1: Spezifikation für gebundene und Schüttprodukte vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 15599-1:2010
DIN EN 15600-1:2010-12	Wärmedämmstoffe für die technische Gebäudeausrüstung und für betriebstechnische Anlagen in der Industrie - An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung mit Produkten aus expandiertem Vermiculit (EV) - Teil 1: Spezifikation für gebundene und Schüttprodukte vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 15600-1:2010

Zusätzlich zu den Paketen mit harmonisierten Normen sind weitere Dämmstoffnormen auf europäischer Ebene publiziert worden, die aber nicht harmonisiert sind. Tabelle 11 enthält eine Auswahl solcher Normen.

Tabelle 11: Nicht harmonisierte europäische Normen für Dämmstoffe

Normbezeichnung	Titel
DIN EN 15101-1:2019-07	Wärmedämmstoffe für Gebäude - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Zellulosefüllstoff (LFCI) - Teil 1: Spezifikation für die Produkte vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 15101-1:2013+A1:2019
DIN EN 15101-2:2013-12	Wärmedämmstoffe für Gebäude - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Zellulosefüllstoff (LFCI) - Teil 2: Spezifikation für die eingebauten Produkte; Deutsche Fassung EN 15101-2:2013
DIN EN 17140:2021-08	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Vakuumisolationspaneele (VIP) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 17140:2020
DIN EN 16012:2015-05	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Reflektierende Wärmedämm-Produkte - Bestimmung der Nennwerte der wärmetechnischen Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 16012:2012+A1:2015
DIN EN 14315-1:2013-04	Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Polyurethan (PUR)- und Polyisocyanurat (PIR)-Spritzschaum - Teil 1: Spezifikation für das Schaumsystem vor dem Einbau; Deutsche Fassung EN 14315-1:2013
DIN EN 14315-2:2013-04	Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Polyurethan (PUR)- und Polyisocyanurat (PIR)-Spritzschaum - Teil 2: Spezifikation für die eingebauten Produkte; Deutsche Fassung EN 14315-2:2013
DIN EN 16977:2021-01	Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Calciumsilicat (CS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 16977:2020

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, werden 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) entsprechend der harmonisierten europäischen Produktnormen DIN EN 13162 bis DIN EN 13171 beschrieben. In Ergänzung zu diesen genormten Dämmstoffen gibt es Europäische Technische Zulassungen die als harmonisierte technische Spezifikation ebenfalls zur Deklaration der Eigenschaften herangezogen werden können. Die Anforderungen für diese Dämmstoffe werden als Leistungsstufen, Leistungsklassen oder Schwellenwerte beschrieben.

Anwendungsbereiche und -eigenschaften

Wie beschrieben stellt in Deutschland die jeweils auf Länderebene umgesetzte Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen MVV-TB die Verbindung zwischen den Anforderungen der Landesbauordnungen und der technischen Umsetzung dar. Im Teil A6 sind die relevanten nationalen Anwendungsnormen für Dämmstoffe beschrieben (Tabelle 12).

Tabelle 12: Nationale Anwendungsnormen für den Wärmeschutz von Gebäuden gemäß MVV-TB 2021/1

Normbezeichnung	Titel
DIN 4108-2:2013-02	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
DIN 4108-3:2018-10	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
DIN 4108-4:2017-03 ¹⁾	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte
DIN 4108-10:2015-12 ²⁾	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe

¹⁾ Aktuellste Fassung: DIN 4108-4:2020-11

²⁾ Aktuellste Fassung: DIN 4108-10:2021-11

Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

Die DIN 4108-2 legt Mindestanforderungen an die Wärmedämmung von Bauteilen sowie im Bereich von Wärmebrücken der Gebäudehülle fest, um ein behagliches und hygienisch einwandfreies Raumklima zu gewährleisten. Im Weiteren werden Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz definiert.

Anforderungen an den Feuchteschutz

Die DIN 4108-3 behandelt Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für die Planung und Ausführung zum klimabedingten Feuchteschutz in Gebäuden. Nachweise können je nach Anwendungsfall entweder durch die Wahl einer nachweisfreien Konstruktion, ein einfaches Periodenbilanzverfahren (Glaser-Verfahren) oder durch eine hygrothermische Simulation geführt werden. Da feuchtebedingte Einflüsse im Baubereich zu den häufigsten Schadensmechanismen gehören, ist die hygrothermische Funktionalität eine sehr wichtige Anforderung. Ein für die Anwendung repräsentativer Nachweis setzt eine entsprechend exakte Beschreibung der Materialeigenschaften der eingesetzten Bauteilschichten voraus.

Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte

Die DIN 4108-4 legt wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte für Baustoffe fest, darunter werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe. Der Bemessungswert stellt dabei einen unter baupraktischen Verhältnissen repräsentativen bzw. auf der sicheren Seite liegenden Wert dar, der sich aus den nach Produktnorm ermittelten Leistungsstufen und einer Umrechnung entsprechend den angesetzten

Randbedingungen ergibt. Beispielsweise werden die Leistungsstufen der Wärmeleitfähigkeit nach den harmonisierten Produktnormen üblicherweise für einen Feuchtegehalt entsprechend Lagerung im Klima 23°C und 50 % r. F. (deklarierte Wärmeleitfähigkeit oder Nennwert, λ_D) angegeben. Diese Werte werden nach DIN 4108-4 unter Beachtung der Hinweise in DIN EN ISO 10456 auf einen bei einem Feuchtegehalt entsprechend Lagerung im Klima 23°C und 80 % r. F. (Bemessungswert, λ_B) umgerechnet. Neben der Wärmeleitfähigkeit werden noch typische Werte für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ angegeben.

Das Prinzip dahinter bildet ab, dass im Europäischen Nennwertkonzept nur die Produktidentifikation eindeutig sein muss, damit das Produkt in Verkehr gebracht werden darf. Die Anwendung der Produkte wird dann jedoch in den einzelnen Mitgliedsstaaten geregelt. Für die Bemessung von Bauteilen hinsichtlich des energiesparenden Wärmeschutzes in Deutschland – bspw. im Rahmen von Nachweisen für das GEG – wird dies wie oben dargestellt durch DIN 4108-10 in Verbindung mit den Festlegungen zu den Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit in DIN 4108-4 geregelt.

Dabei sind die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit so konzipiert, dass sie die Schwankungen im Produktionsverfahren abbilden und auch für den langjährigen Gebrauchszustand des Produktes im Gebäude repräsentativ sind. Daher wird bei der Festlegung der Zuschläge berücksichtigt, wie gut die Produktqualität in der Produktion gesteuert werden kann aber auch welche Einflüsse aus der Anwendung berücksichtigt werden müssen (z.B. Feuchteinflüsse oder Alterung aufgrund von Umgebungseinflüssen, sofern diese noch nicht im Nennwert der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt wurden).

Da aber nicht alle Dämmstoffe sich hier gleichermaßen verhalten, wird in DIN 4108-4 in Tabelle 2 für die einzelnen Materialien festgelegt, wie groß der Zuschlag auf den deklarierten Wert der Wärmeleitfähigkeit sein muss, um zum Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für die Anwendung in Deutschland zu gelangen. Alle Dämmstoffgruppen haben hier für die Festlegung der Zuschläge umfangreiche Daten aus der Produktionsüberwachung, Alterungsuntersuchungen und Entnahmen aus ausgeführten Dämmmaßnahmen vorgelegt, die in die Festlegung eingeflossen sind. Die Fußnoten a) bis e) der Tabelle 2 aus DIN 4108-4 zeigen hier das Spektrum der unterschiedlichen Materialien auf:

$\lambda_{\text{Bemessung}} = \lambda_D \cdot 1,03$; aber mindestens ein Zuschlag von 1 mW/(m·K) – gilt beispielsweise für Mineralwolle MW; Polystyrol EPS und XPS; Polyurethan PU; Phenolharzschaum PF; Schaumglas CG; Perlite EPB und für damit hergestellte Kombiprodukte wie z.B. Mehrschichtplatten

$\lambda_{\text{Bemessung}} = \lambda_D \cdot 1,05$; aber mindestens ein Zuschlag von 2 mW/(m·K) - gilt beispielsweise für hygroskopische Produkte aus Holzwolle WW oder Holzfasern WF

$\lambda_{\text{Bemessung}} = \lambda_D \cdot 1,10$; aber mindestens ein Zuschlag von 3 mW/(m·K) – gilt beispielsweise für Polyurethan Spritzschäum

$\lambda_{\text{Bemessung}} = \lambda_{\text{D}} \cdot 1,20$ – gilt beispielsweise für Polyethylenschaum oder Vermiculite
 $\lambda_{\text{Bemessung}} = \lambda_{\text{D}} \cdot 1,23$ – gilt für Produkte aus Kork ICB

Oft wird der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit eines Produktes für die Anwendung in Deutschland nicht auf dem Etikett angegeben, weil neben oder im Kontext der CE-Kennzeichnung keine weiteren Leistungsmerkmale oder Gütesiegel abgedruckt werden dürfen. Die Planer und Anwender können aber bei diesen Produkten den Bemessungswert sehr leicht aus der Tabelle 2 der DIN 4108-4 oder mit den o.g. Beziehungen a) bis e) selbst ermitteln. Oft wird dieser auch auf dem Produktdatenblatt ausgewiesen.

Die DIN 4108-10 verknüpft schließlich die anwendungsbezogenen Eigenschaften für Dämmstoffe mit speziellen Anwendungsgebieten und definiert die jeweiligen Mindestanforderungen. Diese sind für die einzelnen Dämmstofftypen in Tabellen zusammengestellt. Die aktuellste Fassung der DIN 4108-10 mit Ausgabedatum 2021-11 ist in der aktuellen Fassung der MVV-TB noch nicht in Bezug genommen und enthält eine Reihe von Tabellen die in der Vorgängerversion mit Ausgabedatum 2015-12 noch nicht enthalten waren. Dies betrifft Polyethylenschaum (PEF) nach DIN EN 16069, Dämmprodukte aus tierischen und pflanzlichen Fasern nach EAD 040005-00-1201 sowie die an der Verwendungsstelle hergestellten Produkte gemäß Tabelle 9 und an der Verwendungsstelle hergestellte Dämmprodukte aus tierischen und pflanzlichen Fasern gemäß EAD 040138-01-1201.

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 des Wärme- und Schallschutzes für das entsprechende Bauteil unterliegen, differenziert die DIN 4108-10 zwischen einer ganzen Reihe von Anwendungsgebieten (Tabelle 13).

Die Kurzzeichen, denen die Norm auch Piktogramme zuordnet, erscheinen auf dem Etikett und signalisieren, dass für das Anwendungsgebiet die Mindestanforderungen gemäß Produkttabelle 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 14 dargestellt, werden ebenfalls durch Kurzzeichen gekennzeichnet.

Die für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche einsetzbaren Dämmstoffe sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 13: 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 14: 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
Verformung	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 15: 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								
	natürlich	Aerogel								
		Pyrogene Kieselsäure					o	o		
		Schlackenwolle								
		Gipsschaum					o			
		Blähperlit (EPB)								
		Vermiculite, expandiert (EV), Blähglimmer								
anorganisch	natürlich	Blähton	X			X		X		
		Bims								
		Wärmedämmziegel								
organisch	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			
	anorganisch	natürlich	Polyesterfasern				o	o		
			Holzwohle (WW)				•	•	•	
			Holzfasern (WF)	•	•		•	•	•	•
			Kork, expandiert (ICB)	•	•		•	•	•	
			Zellulosefasern	X			X	X		
			Hanf	X			X	X	X	
organisch	natürlich	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	Blähperlith (EPB)										
		Vermiculite, expandiert (EV), Blähglimmer										
		Blähton					X	X		X		
		Bims	o	o								
		Wärmedämmziegel	X	X	X	X						
	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		Holzwohle (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					
	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

3.5 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].

Steildach

Im Bereich der energetischen Sanierung von Steildächern können prinzipiell drei unterschiedliche Maßnahmen vorgenommen werden.

Zwischensparrendämmung

Eine Zwischensparrendämmung in Dach und Decke wird in 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 exakt die Maße der jeweils lieferbaren Platten bzw. Matten 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, Wechseln, Leerrohren für Kabel, etc. möglich. Die korrekte Verfüllung der durch die Sparren und einer anzubringenden Beplankung entstehenden Kavitäten erfordert allerdings Erfahrung und sollte daher von qualifizierten Handwerksbetrieben durchgeführt werden. 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 Begrenzung auf die vorhandene 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 bei Klimawechseln 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 um konvektive Feuchteinträge in die Dämmebene zu verhindern. Planungshinweise liefert hier die DIN 4108-7. Bei Bestandsgebäuden ist beides meist nicht gegeben, daher sind oft größere Eingriffe in die Bausubstanz nötig.

Untersparrendämmung

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 Aufdopplung der Sparren in Richtung Innenraum, zu einer Verkleinerung des Dachraums.

Aufsparrendämmung

Eine Aufsparrendämmung im Bestand kann nur in Verbindung mit einer Neueindeckung oder Wiedereindeckung 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.

Flachdach

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 begehbar 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.

Umkehrdach

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, solange das von der Wärmedämmung aufgenommene Wasser in Trockenperioden wieder aus dem Material ausdiffundieren kann, bzw. das sich langfristig einstellende Feuchteniveau hinsichtlich seiner Verringerung der Wärmedämmeigenschaften im Bemessungswert der Dämmlage berücksichtigt wurde. 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 bekieseten Umkehrdächern zeigen, dass die Zunahme der Materialfeuchte hier in einem Bereich $< 1-2$ Vol.-% bleibt. Begrünte- und befahrbare Umkehrdächer (Parkdecks) zeigen maximale Feuchtezunahmen von $0,3 - 4,6$ Vol.-%, was durch einen Zuschlag in der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt wird. Durch die Verwendung diffusionsoffener, aber wasserableitender Trennlagen 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 Geschosßdecke

Die Dämmung der obersten Geschosßdecke erfolgt, wenn der darüber liegende Dachraum nicht als Wohnraum genutzt wird. Dämmmaßnahmen der obersten Geschosßdecke 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 Deckenbepankung 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.

Dämmung von außen

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. Die bekannteste Ausführung von Außendämmungen von Wänden ist das Wärmedämm-Verbundsystem WDVS.

Zweischaliges Mauerwerk

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 Lufträume für eine nachträgliche Dämmung oft relativ gering. Trotzdem lassen sich durch die Wahl geeigneter Systeme auch in solchen Fällen signifikante Effizienzverbesserungen erreichen.

Innendämmung

Als dritte Variante steht die Innendämmung zur Verfügung, die in Deutschland jedoch im Neubau nicht verbreitet ist und auch in Bestandsgebäuden bisher wenig eingesetzt wird. Bei der Innendämmung liegt der Dämmstoff auf der Warmseite der ursprünglichen Wand. Weil das Mauerwerk durch den Dämmstoff von der Innentemperatur thermisch getrennt ist, führt diese Anordnung zu einer Temperaturabsenkung der Außenwand. Damit verbunden ist eine Erhöhung der relativen Feuchte der Luft und des Bauteils außerhalb der Dämmschicht. Damit wächst das Risiko für Tauwasser in der Wand, was in der Vergangenheit zu großer Unsicherheit bei der Ausführung von Innendämmungen geführt hat. Moderne Innendämmungen haben allesamt auf die Erhöhung des Tauwasserrisikos eine Antwort, die jedoch auf unterschiedlichen Schutzmechanismen beruht. Die einfachste Möglichkeit die verschiedenen Ansätze einzuteilen kann über die Diffusionseigenschaften der verfügbaren Innendämmsysteme erfolgen, die sich in „diffusionsdichte Innendämmsysteme“, „diffusionsmindernde Innendämmsysteme“ und „diffusionsoffene Innendämmsysteme“ klassifizieren lassen. Diese Einteilung ist oft jedoch nicht eindeutig und kann auf unterschiedlichen Untergründen auch zu deutlich voneinander abweichenden Aussagen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit eines Innendämmsystems führen. Wichtig ist, dass bei der Wahl eines Schutzprinzips gegen Kondensat alle Randbedingungen der zu dämmenden Bauteile in die Entscheidung und Beurteilung einbezogen werden. Dazu gehören alle hygrothermischen Eigenschaften der bestehenden Bauteile und des geplanten Dämmsystems, die klimatischen Randbedingungen im Gebäude und außerhalb, sowie der Zustand des äußeren Bauteilabschlusses hinsichtlich der Aufnahme von Schlagregen (Risse im Putz/ in den Fugen / Hydrophobierung...).

Daher werden moderne Innendämmsysteme nicht mehr nur nach ihrer Diffusionsdichtheit unterschieden, sondern nach der Art und Weise wie diese mit Feuchte und Kondensat umgehen – also ob Tauwasser entsteht und wenn welches entsteht, wie es gemanagt wird. Hier hat sich vor allem die Unterscheidung in

- kondensatverhindernde, diffusionsdichte Innendämmsysteme
- kondensatbegrenzende, diffusionsmindernde Innendämmsysteme und
- kondensattolerierende, diffusionsoffene Innendämmsysteme

durchgesetzt. Dabei gehen die Bauteil-, System- und Materialeigenschaften vor allem bei der zweiten Klasse der Innendämmsysteme (kondensatbegrenzend und diffusionsmindernd) u.U. deutlich auseinander. Hier finden sich bspw. sehr dichte Konstruktionen mit geschlossenzelligen Dämmstoffen, die „klassisch“ die Diffusion stark vermindern, ebenso wieder wie Konstruktionen aus diffusionsoffenem Dämmstoff mit Dampfbremsen, die auch noch feuchteadaptiv sein können. Eine ausführliche Beschreibung der möglichen Entscheidungsgrundlagen für geeignete Innendämmsysteme findet sich in [FV ID 2023].

Fällt Tauwasser aus, wird die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs 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 zu bewerten. Neben der Flammenausbreitung und Brandweiterleitung entstehen Gefährdungen vor allem auch durch die bei der Verbrennung entstehenden Rauchgase.

Gefachdämmung im Holzbau

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 Bepunktungen 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 ist von der Konstruktion her vergleichbar mit einer Zwischensparrendämmung.

Prinzipielle Lösungsmöglichkeiten zur Außenwanddämmung

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

Wärmedämm-Verbundsystem WDVS: 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].

Gedämmte Vorsatzschalen: 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].

Vorgehängte hinterlüftete Fassade VHF: 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.

Perimeterdämmung erdreichberührender Wände: 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 dazu beispielsweise Aerogele eingesetzt werden, die durch eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,015 – 0,020 W/(m·K) bereits bei geringen Schichtstärken den Wärmedurchgang signifikant reduzieren. 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 auch bei energetisch hochwertigen Innendämmungen möglichst gering zu halten sind auch hier Produkte mit möglichst niedriger Wärmeleitfähigkeit zu bevorzugen. Mehr als 10 cm Dämmstärke werden aus Platzgründen selten realisiert, sind nach neuesten Untersuchungen jedoch auch aus Bauschadenssicht oft unproblematisch möglich. EPS, XPS, PU, Schaumglas, Gipskarton-Verbundplatten und VIP können direkt mit der Außenwand verklebt werden. Kapillaraktive Systeme müssen mit dem passenden mineralischen Kleber fest und

vollflächig mit dem Untergrund verbunden werden, um ihre kondensatregulierende Wirkung zu entfalten.

Daneben existieren auch Systeme auf Basis von Holzfaserplatten, vorgeständerte Aufbauten die nachträglich ausgeblasen werden können, oder im Nasssprühverfahren aufgebraute Dämmschichten aus Altpapierflocken. Wie beschrieben, sind Innendämmsysteme zwar bauphysikalisch anspruchsvoller, aber bei korrekter Auslegung sicher und schadensfrei zu betreiben. Konkrete Wandaufbauten können heute mittels vereinfachter Nachweisverfahren (z.B. WTA Merkblätter) oder einer dynamischen Simulation des Wärme- und Feuchteverhaltens am Rechner nachgewiesen werden (WUFI®).

Eine besondere Bedeutung bei Innendämmanwendungen kommt Kalziumsilikatschaumplatten aufgrund ihres Feuchtepuffervermögens und der ausgeprägten Weiterleitung der Feuchte (auch im Zusammenspiel mit dem passenden Kleber) in der Platte zu. Innendämmsysteme mit Kalziumsilikatschaumplatten erlauben Kondensat explizit, verhindern jedoch Schimmelpilzwachstum und Feuchteschäden durch ein aktives Management der entstandenen Feuchte mittels Weiterleitung innerhalb der Platte und in Richtung der inneren Bauteiloberfläche zur schadensfreien Abtrocknung. Dafür werden diese Konstruktionen fallweise ausgelegt und ihre Funktionstüchtigkeit mittels hygrothermischer Simulation nachgewiesen. Aufgrund der vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeit, werden Innendämmungen aus Kalziumsilikatschaumplatten oft nicht mit dem Zweck eingesetzt einen möglichst niedrigen U-Wert zu erreichen, sondern vor allem um die Behaglichkeit für die Bewohner zu erhöhen und die Tauwassergefahr an der Oberfläche schlecht gedämmter Konstruktionen zu verringern.

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 Gefache 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 Hobelspandämmstoffen). 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 Gegenstand von zahlreichen Untersuchungen (u. a. [Svennerstedt 1986], [Tröger 2001], [Cammerer 2001], [Rasmussen 2002], [Cammerer und Spitzner 2004], [Rasmussen 2005], [Treml und Engelhardt 2013], [Böck und Treml 2013]). Bei fachgerechter

Einbringung sind die Materialien setzungsstabil. 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 Relaxationsmechanismen, 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 und direkt verputzt oder beplankt werden. Ebenfalls eingesetzt werden Verbundplatten aus Dämmstoffen und Plattenwerkstoffen, bspw. Holzwolle-Leichtbauplatten im EPS oder Mineralwolle-Dämmschicht. 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.

3.6 Marktentwicklung

Bei der Erhebung von Marktdaten ergeben sich zwischen unterschiedlichen Studien oft Abweichungen, die auf die jeweils angewendete Erfassungslogik zurückzuführen sind. Dies betrifft beispielsweise die Abgrenzung von Produktgruppen, die Zugänglichkeit bei der Auswertung der Vertriebswege und die Systematik von Hochrechnungen, bzw. Schätzungen auf Basis von Experteninterviews und ähnlichen Quellen. Eine langjährig unter den gleichen Erhebungsbedingungen durchgeführte Studie ist die Baumarktstatistik des bis 2015 bestehenden Gesamtverband Dämmstoffindustrie GDI. Abbildung 34 zeigt daraus den Absatz der wichtigsten Dämmstoffgruppen in Deutschland in den Jahren von 1987 bis 2010.

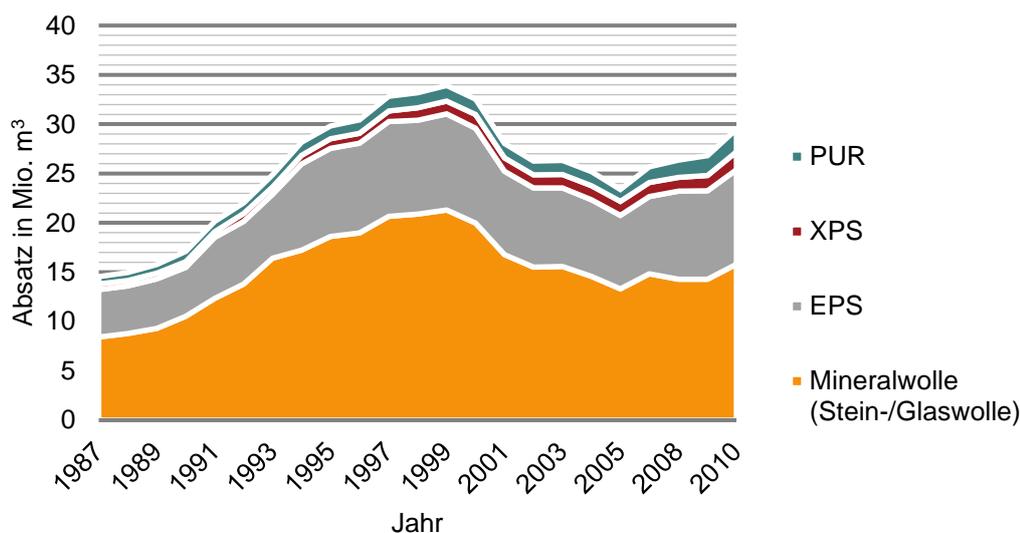


Abbildung 34: Absatz der wichtigsten Dämmstoffgruppen in Deutschland in den Jahren von 1987 – 2010 [GDI 2013]

Demnach wurden im Jahr 2010 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]. 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 34)

Anknüpfend an die Zahlen des GDI ist in Abbildung 35 auf Basis von Marktdaten der Interconnection Consulting Group [IC 2021] der Absatz der wichtigsten Dämmstoffgruppen in Deutschland in den Jahren von 2012 – 2021 zusammengefasst. Wie beschrieben sind vermutlich aufgrund von Abweichungen in der Erfassungssystematik die Zahlen aus unterschiedlichen Studien nicht direkt vergleichbar. Der Größenordnung nach schließt der Absatz im Jahr 2012 gemäß [IC 2021] mit 30,4 Mio. m³ aber an die Zahlen von 2010 gemäß [GDI 2013] mit 28 Mio. m³ sinnvoll an.

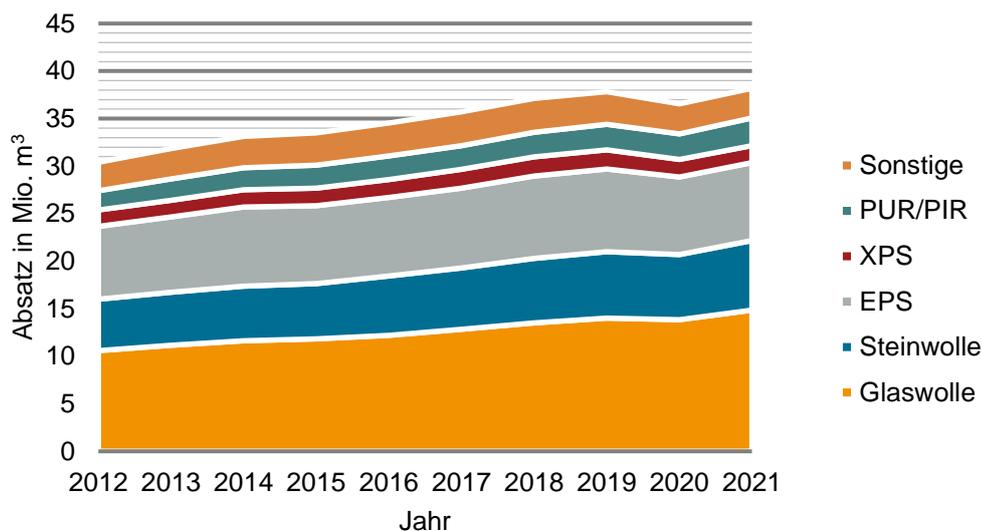


Abbildung 35: Absatz der wichtigsten Dämmstoffgruppen in Deutschland in den Jahren von 2012 – 2021 [IC 2021]

Um einen Vergleich der Anteile der Dämmstoffgruppen zwischen der Zeitreihe von 1987 – 2010 gemäß Abbildung 34 und der Zeitreihe von 2012 – 2021 gemäß Abbildung 35 herzustellen, können die Dämmstoffe der Gruppen Mineralwolle (Steinwolle, Glaswolle), EPS, XPS und PUR für die neueren Zahlen subsummiert werden. Für das Jahr 2010 [GDI 2013] ergibt sich ein Anteil von ca. 54 % Mineralwolle, ca. 32 % EPS, ca. 8 % XPS und ca. 6 % PUR. Für das Jahr 2012 [IC 2021] schließen die Daten bei Auswertung des gleichen subset mit ca. 58 % Mineralwolle, ca. 28 % EPS, ca. 6 % XPS und ca. 7 % PUR an.

Wertet man die Zeitreihe gemäß [IC 2021] weiter aus, so ergibt sich in den folgenden zehn Jahren eine Verschiebung mit steigenden Anteilen von Mineralwolle (ca. 63 % in 2021), sinkenden Anteilen von EPS (ca. 23 % in 2021), leicht sinkenden Anteilen von XPS (ca. 5 % in 2021) und leicht steigendem Anteil von PUR/PIR (ca. 8 % in 2021).

Abbildung 36 zeigt die jährlichen prozentualen Veränderungen des Absatzes für alle in [IC 2021] betrachteten Dämmstoffgruppen.

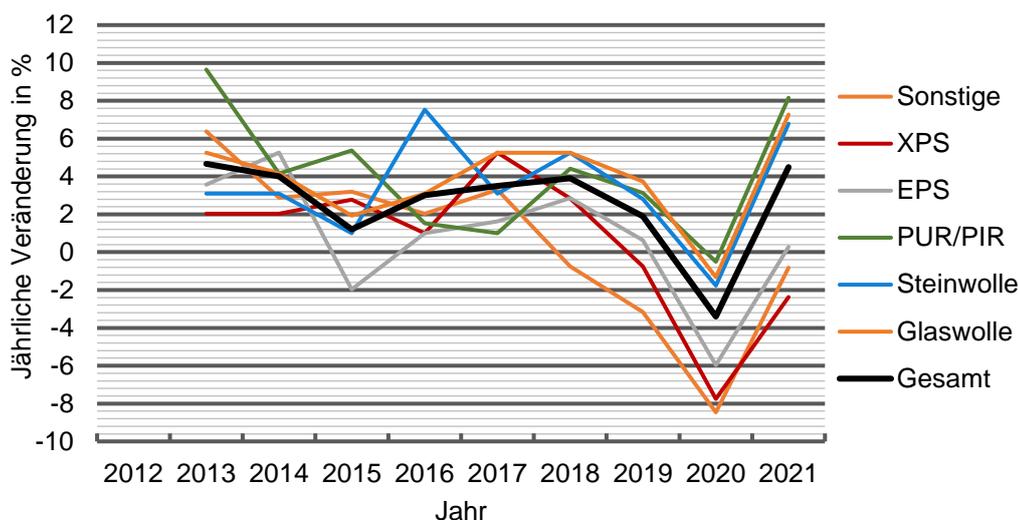


Abbildung 36 Jährliche prozentuale Veränderung des Absatzes der wichtigsten Dämmstoffgruppen in Deutschland in den Jahren von 2012 – 2021 [IC 2021]

Von 2012 – 2021 ergibt sich, wie bereits in Abbildung 35 zu erkennen, über alle Produktgruppen hinweg ein steigender Absatz. Die jährliche Veränderung der Absatzzahlen in diesem Zeitraum liegt für den Gesamtmarkt im Bereich von ca. + 1,2 bis + 4,7 %. Die Veränderungen bei den einzelnen Produktgruppen fallen spezifisch aus. Auffallend hohe Marktgewinne zeigen sich in ausgewählten Jahren bei PUR/PIR und Steinwolle, während EPS im Jahr 2015 auffallend rückläufige Absätze verzeichnet. Prozentuale Verluste zeigen sich ab 2018 bei Glaswolle und ab 2019 bei XPS.

Im Jahr 2020 ergeben sich schließlich über alle Produktgruppen hinweg deutliche Einbrüche, was auf die Auswirkungen der Covid-19 Pandemie zurückzuführen ist. In Deutschland wurde im Zeitraum von 01.01.2020 – 15.06.2021 an insgesamt 148 Tagen ein Lockdown verhängt.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass im Gegensatz zu den deutlichen Einbrüchen im Absatz von Dämmstoffen im Jahr 2020, bei der Zahl der Fertigstellungen von Ein-/Zweifamilienhäusern im gleichen Jahr, mit +1,8 % positive Zuwachsraten verzeichnet werden. In den Jahren von 2017 bis 2019 war die Zahl der jährlichen Fertigstellungen in diesem Segment stets rückläufig. Auch im mehrgeschossigen Wohnungsbau zeigt sich bereits ab 2020 (+4,1 %) und fortlaufend auch in 2021 (+7,8 %), nach eher rückläufigen (aber positiven) Zuwachsraten in den Jahren davor, erstmals wieder eine Trendwende. Ein deutlicher Einbruch in der Zahl der fertiggestellten Einheiten ergibt sich jedoch im Jahr 2021 im Bereich des Nichtwohngebäudebaus. Insbesondere Gewerbeimmobilien (- 8,8 %), Industriegebäude (- 12 %), Bürogebäude (- 4,8 %) und sonstige Gebäude (- 5,8 %) verzeichnen eine deutlich verringerte Zahl an fertiggestellten Einheiten. [IC 2021]

Bezogen auf die Verwendung im Bereich Neubau (-3,4 % von 2019 auf 2020) und Renovierung (-3,8 % von 2019 auf 2020) sind nur geringe Unterschiede

festzumachen. Und obwohl der Rückgang der Fertigstellungen wie beschrieben den Bereich des Nichtwohnungsbaus ab dem Jahr 2021 stärker betrifft, sind dort die Rückgänge im Dämmstoffverbrauch 2020 mit -1,1 % geringer als im Wohngebäudebau mit - 4,4 %.

Trotz allem ist festzuhalten, dass der Einbruch im Absatz von Dämmstoffen im Jahr 2020, im Vergleich zum Trend der letzten zehn Jahre, der einen relativ gleichmäßigen Anstieg zeigt, verhältnismäßig gering ausfällt. Bereits 2021 wurde mit 38,2 Mio. m³ wieder ein Absatz auf dem Niveau von 2019 erreicht. Die kurzfristigen Prognosen bis zum Jahr 2024 schreiben den linearen Trend der letzten Jahre fort.

Abbildung 37 zeigt die Verteilung in Volumenanteilen der wichtigsten Dämmstoffe in Deutschland in Gegenüberstellung zum restlichen Europa für das Jahr 2021.

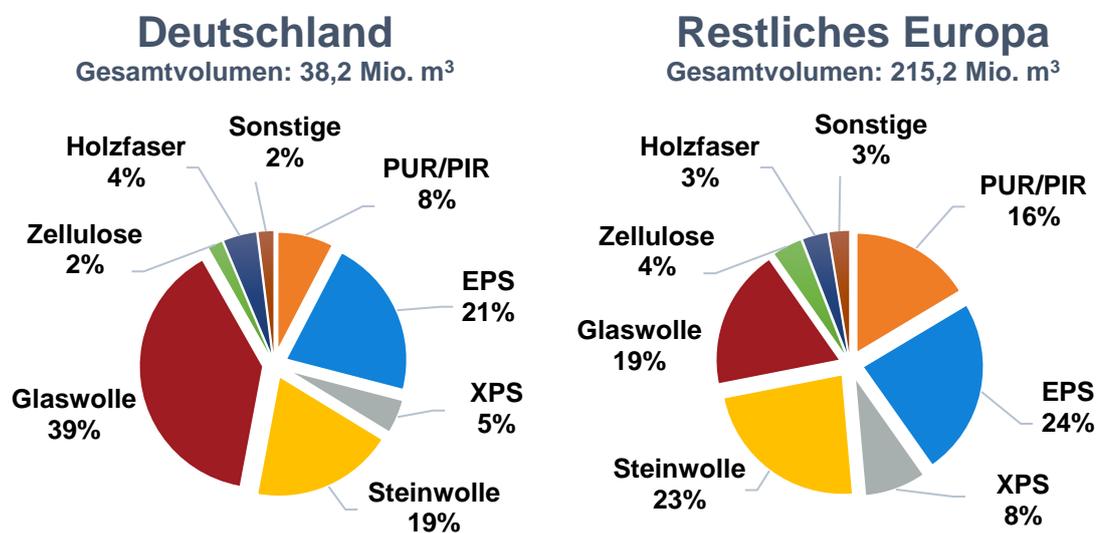


Abbildung 37: Marktanteile der wichtigsten Dämmstoffe im Jahr 2021 und Gesamtvolumen; Links: Deutschland; Rechts: Restliches Europa [IC 2021]

Dabei zeigen sich zwischen den Dämmstoffgruppen einige Verschiebungen. Größere Unterschiede ergeben sich beim Einsatz von PUR/PIR. Diese Stoffgruppe hat im restlichen Europa einen deutlich höheren Marktanteil als in Deutschland. Umgekehrte Verhältnisse liegen auch beim Einsatz von Steinwolle und Glaswolle vor. Während im übrigen Europa etwas mehr Steinwolle als Glaswolle zum Einsatz kommt, überwiegt in Deutschland deutlich der Einsatz von Glaswolle. Ebenfalls auffällig ist, dass in Deutschland insgesamt weniger Polystyrol eingesetzt wird als im Rest von Europa. Bei den Dämmstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe fällt auf, dass in Europa mehr Zellosedämmstoffe eingesetzt werden als in Deutschland. Die Marktanteile von Holzfasern liegen näher zusammen.

Die Verteilung des Dämmstoffmarktes auf die Bereiche Renovierung und Neubau zeigt Abbildung 38. Auch hier gibt es deutliche Unterschiede zwischen Deutschland und dem restlichen Europa. Während in Deutschland der Einsatz von Dämmstoffen für die Renovierung überwiegt, geht im restlichen Europa der deutlich größere Anteil

von Dämmstoffen in den Neubau. In Deutschland hat sich das Verhältnis damit gegenüber dem Stand von 2010 umgedreht. Damals überwog der Anteil der Anwendungen im Neubau mit ca. 54 %.

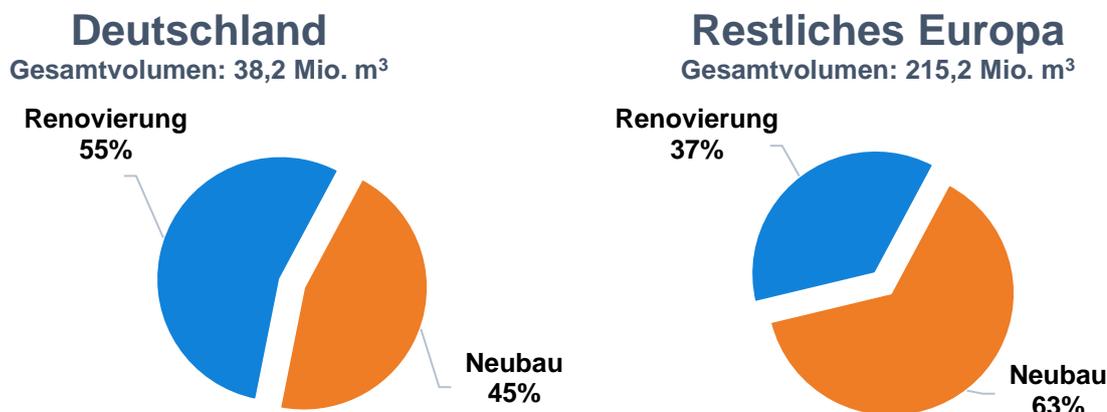


Abbildung 38 Verteilung des Absatzes von Dämmstoffen im Jahr 2021 auf den Bereich Renovierung und Neubau; Links: Deutschland; Rechts: Restliches Europa [IC 2021]

Die Verteilung des Dämmstoffmarktes auf die Bereiche Wohnungsbau und Nichtwohnungsbau zeigt Abbildung 39. In Deutschland sowie im restlichen Europa überwiegt der Anteil für den Wohnungsbau mit ca. 70 % zu Anwendungen im Nichtwohnungsbau mit ca. 30 %. Gegenüber dem Stand von 2010 hat sich damit in Deutschland der Verbrauch von Dämmstoffen im Wohnungsbau weiter erhöht. Dieser lag 2010 noch bei ca. 57 %.

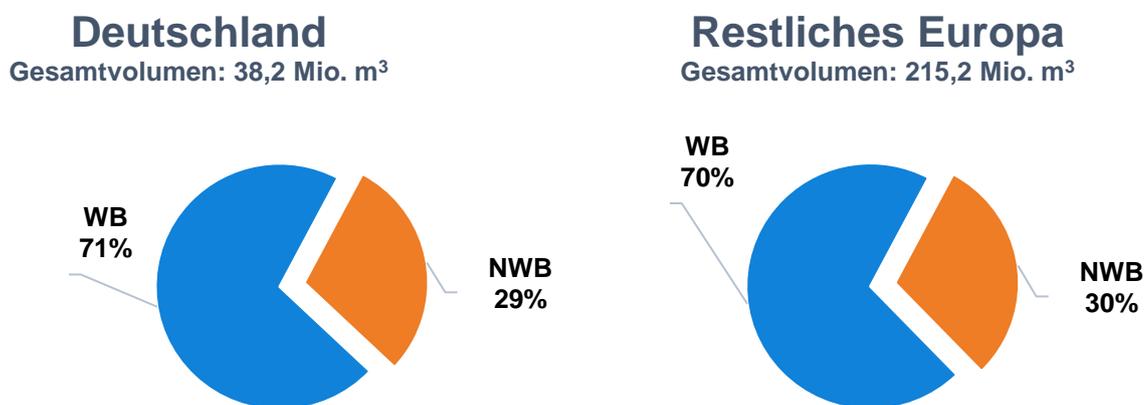


Abbildung 39 Verteilung des Absatzes von Dämmstoffen im Jahr 2021 auf den Bereich Wohnungsbau (WB) und Nichtwohnungsbau (NWB); Links: Deutschland; Rechts: Restliches Europa [IC 2021]

3.7 Verfügbarkeit alternativer Dämmstoffe

Die explizite Erfassung von Holzfaser und Zellulose in aktuelleren Marktstudien zeigt den steigenden Absatz dieser beiden Gruppen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, die noch vor zehn Jahren in der Kategorie „Sonstige“,

zusammen mit anderen mengenmäßig untergeordneten Dämmstoffen auf Basis mineralischer, petrochemischer und nachwachsender Rohstoffe, subsummiert waren.

Die Endlichkeit petrochemischer Rohstoffe wird seit vielen Jahren auf breiter Ebene diskutiert. In den letzten Jahren sind daher Themen wie die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft und Effizienzsteigerungen beim Materialeinsatz verstärkt in das öffentliche Bewusstsein gerückt. Ein real geschlossener Kreislauf bei der Nutzung von Rohstoffen muss momentan aber noch als Zukunftsszenario betrachtet werden. Hierbei gibt es noch viele Probleme zu lösen, angefangen bei der Abfalltrennung bis hin zum Problem der Bereitstellung definierter Qualitäten in ausreichender Menge.

In vielen Anwendungen können auch Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt werden. Vor allem bei Bauprodukten und Dämmstoffen, die einen Massenmarkt darstellen und über einen langen Zeitraum verbaut werden, ist dabei auch die Kohlenstoffsенке, die biobasierte Materialien bieten, von Vorteil. Die Photosynthese der Pflanzen wandelt CO_2 und H_2O in O_2 und Zucker um, der die Grundlage für alle biobasierten Zellstrukturen ist. Je länger das Material verwendet, wiederverwendet oder recycelt wird, desto länger ist auch die Kohlenstoffspeicherung. Bei einer energetischen Abfallentsorgung wird am Ende der Lebensdauer nur der Kohlenstoff freigesetzt, welcher der Atmosphäre kurzfristig (z. B. vor 25 - 100 Jahren) entzogen wurde.

Aber auch bei nachwachsenden Rohstoffen gibt es Einschränkungen bezüglich der Verfügbarkeit, die sorgfältig bedacht werden müssen. Dies hängt in erster Linie mit der allgemeinen Begrenztheit des Raums und der Flächenkonkurrenz zwischen verschiedenen Nutzungsszenarien zusammen.

Abbildung 40 zeigt die Entwicklung der Flächennutzung in Deutschland von 1992 bis 2020 [Destatis 2021a]. Trotz einer Änderung der Datenstruktur ab 2015 nehmen im Mittel die Siedlungsfläche (+0,27 %/a), die Verkehrsfläche (+0,28 %/a) und die Wasserfläche (+0,41 %/a) zu, während die Vegetationsfläche mit rund -0,06 % pro Jahr konstant sinkt. Der Unterschied in den relativen Veränderungen ist auf den großen Unterschied in den absoluten Werten der Vegetation im Vergleich zu den anderen Landnutzungskategorien zurückzuführen. Generell sind aber nur geringe Veränderungen in der Landnutzung zu verzeichnen. Der größte Teil der Fläche in Deutschland ist von Vegetation bedeckt, die aus landwirtschaftlichen Flächen und Wäldern besteht.

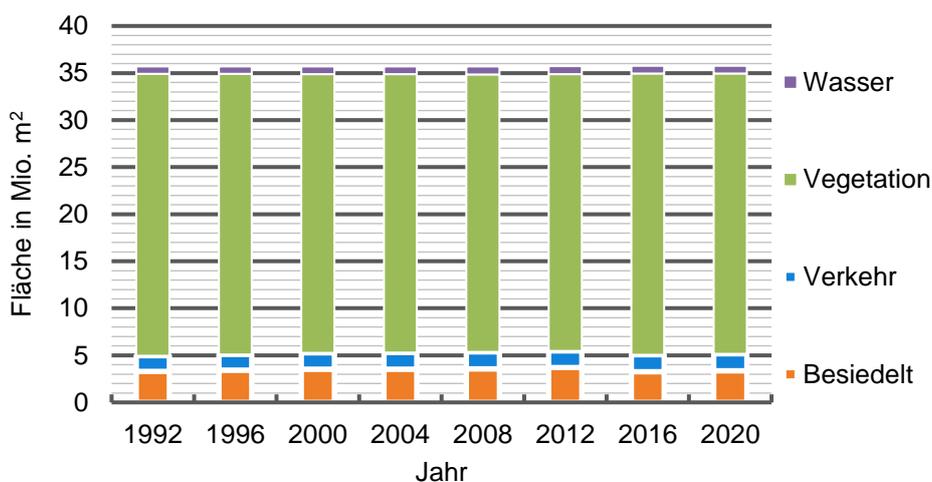


Abbildung 40 Flächennutzung in Deutschland von 1992 – 2020 [Destatis 2021a]

Da auch der Transport von Materialien Kosten verursacht und Energie benötigt, sollten die eingesetzten Rohstoffe möglichst nahe am Standort der industriellen Verarbeitung verfügbar sein. Folglich sind die möglichen Produktionskapazitäten an die Erntemenge gebunden, die in einer bestimmten Region um den Produktionsort erzielt werden kann, oder es muss Material aus einer größeren Region entnommen werden, was wiederum ökonomisch und ökologisch nachteilig ist.

Eine mögliche Konkurrenz zur Nutzung von Agrarpflanzen bzw. Wald besteht zwischen der stofflichen Nutzung (bspw. als Dämmstoff oder zur Herstellung biobasierter Chemikalien), der Nahrungsmittelproduktion und der Nutzung als Energiepflanze (Verbrennung oder Biogas). Darüber hinaus schränkt eine beliebige Ausweitung von land-/forstwirtschaftlich genutzten Flächen ggf. auch den Lebensraum für Pflanzen und Tiere weiter ein und es können Umweltprobleme, bspw. durch eine Übernutzung der Flächen, landwirtschaftliche Düngung und ggf. den Einsatz von Pestiziden entstehen.

Wie bei den konventionellen Rohstoffen, so müssen also auch bei den nachwachsenden Rohstoffen prinzipiell mögliche Umweltprobleme kritisch hinterfragt werden. Dazu gehört die Verbesserung der Anbau- und Erntemethoden ebenso wie die Verringerung des Gehalts an Bindemitteln und Zusatzstoffen und das Ziel, eine langfristige, auf Wiederverwendung und Recycling basierende Kreislaufwirtschaft zu etablieren, um die Kohlenstoffsенke beim Einsatz biobasierter Rohstoffe möglichst zu verlängern.

Die beschriebene Flächen- und Nutzungskonkurrenz führt zu der Frage, welches Substitutionspotential der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen bietet. Im nächsten Unterkapitel wird deshalb versucht, die Verfügbarkeit der Rohstoffe Holz, Hanf und Zellulose auf Altpapierbasis zu bewerten.

Holz

Als Vorbemerkung muss deutlich gemacht werden, dass fast alle Wälder in Europa Wirtschaftswälder sind. Im Jahr 2021 waren 40 % der Fläche Europas mit Wäldern bedeckt, während nur 0,2 % der Fläche mit Urwäldern bedeckt sind [Anonymus 2021a]. Wirtschaftswälder erfüllen Schutz-, Nutz-, Freiraum- und Biodiversitätsfunktionen. Die Forstwirtschaft will diese Funktionen durch eine sogenannte Wald funktionsplanung kombinieren. Informationen zur regionalen Wald funktionsplanung sind bei den zuständigen Forstämtern erhältlich [Anonymus 2021b].

Deutschland verfügt über eine Gesamtfläche von ca. 35,8 Mio. Hektar Land. Davon sind im Jahr 2020 insgesamt ca. 29,8 Mio. Hektar (83,3 %) mit Vegetation bedeckt. Der größte Teil der Vegetationsfläche wird für die landwirtschaftliche Produktion (50,6 %) und als Wald (29,8 %) genutzt. Damit ist fast ein Drittel der Landesfläche Deutschlands mit Wald bedeckt, nämlich 11 Millionen Hektar. Zwischen den Bundesländern sind Unterschiede zu erkennen. Die bewaldeten Flächen reichen (ohne Stadtstaaten) von 10,3 % in Schleswig-Holstein bis zu 40,7 % in Rheinland-Pfalz [Destatis 2021a].

Auf jedem Hektar Wald wachsen jährlich etwa 8 - 12 m³ Holz nach. Bezogen auf den Mittelwert von ca. 10 m³ bedeutet dies einen jährlichen Zuwachs von 110 Mio. m³ stehenden Holzes. Ein ausgewogenes Verhältnis von Zuwachs und Einschlag steht für das Prinzip der nachhaltigen Forstwirtschaft. Demnach soll nur so viel Holz genutzt werden, wie in der gleichen Zeit nachwachsen kann. Die deutschen Wälder werden seit weit über 200 Jahren nach diesem Prinzip bewirtschaftet. Der Erfolg und die Vorteile dieses Ansatzes sind durch die Bundeswaldinventur [BMEL 2012] bestätigt, die zuletzt im Jahr 2012 durchgeführt wurde. Die nachhaltige Waldbewirtschaftung hat in Deutschland dazu geführt, dass der tatsächliche Vorrat an stehendem Holz im Jahr 2012 auf mehr als 3.500 Millionen m³ Holz gestiegen ist.

Aktuellere Zahlen liefert die Kohlenstoffinventur des Thünen-Instituts aus dem Jahr 2017 [Thünen-Institut 2017]. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen einen aktuellen Vorrat an stehendem Holz von mehr als 3.900 Mio. m³, was ein Plus von 6 % gegenüber den Ergebnissen von 2012 bedeutet.

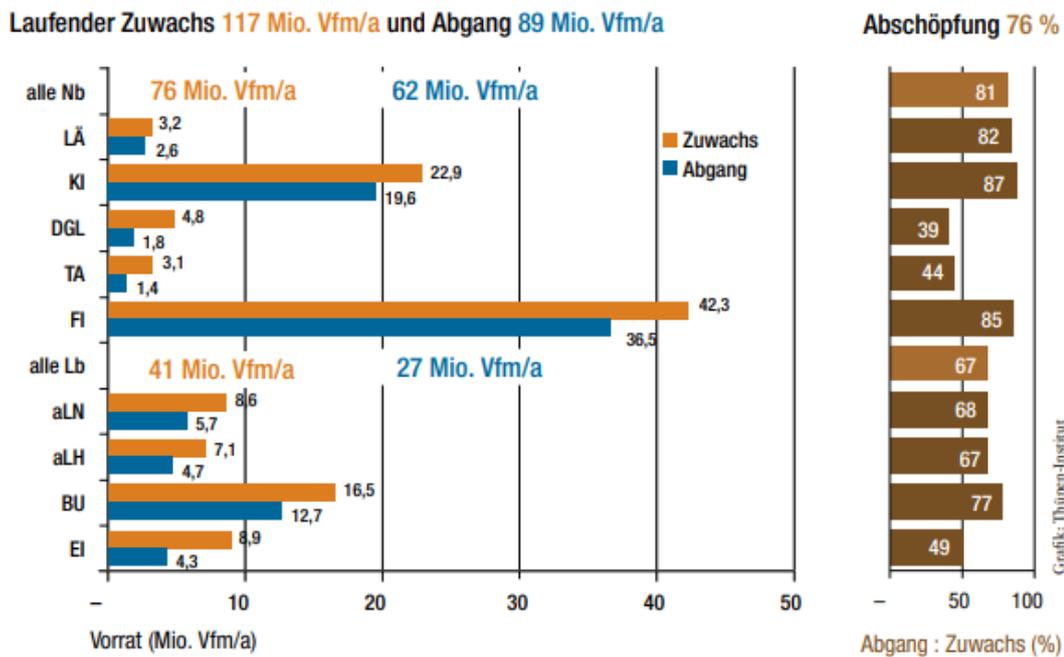


Abbildung 41 Zuwachs und Entnahme von Holz im Zeitraum von 2012 – 2017 (Darstellung aus [Thünen-Institut 2017])

Abbildung 41 zeigt den Zuwachs und die Entnahme stehenden Holzes und ihr Verhältnis im Zeitraum von 2012 bis 2017 auf der Grundlage der Kohlenstoffinventur 2017 des Thünen-Instituts. Die Einheit Vfm entspricht m^3 Vollholz eines lebenden (stehenden) Baumes einschließlich Rinde und einem Durchmesser von mehr als 7 cm (sog. Derbholz), gemessen am schwächeren Ende des Stammes.

Für Dämmstoffe werden überwiegend Nadelhölzer (Nb) verwendet. Für alle Nadelhölzer steht ein Gesamtzuwachs von 76 Mio. Vfm/a einem Einschlag von 62 Mio. Vfm/a gegenüber. Daraus ergibt sich ein jährlicher Zuwachs des stehenden Nadelholzbestandes in der Größenordnung von ca. 14 Mio. Vfm.

Für die Ableitung der Einheit m^3 genutztes Festholz, können überschlägig 10 % Ernterückstände und 12 % Rinde berücksichtigt werden [Egenolf et al. 2021]. Daraus ergeben sich ca. 11,5 Mio. m^3 Nadelholz, das verarbeitet werden könnte, aber jedes Jahr in den Wäldern verbleibt. Ausgehend von einer mittleren Rohdichte für Nadelholz von $470 \text{ kg}/m^3$ kann eine Gesamtmasse von ca. 5,4 Mio. Tonnen trockenem Holz abgeschätzt werden. Bei einer mittleren Rohdichte von ca. $155 \text{ kg}/m^3$ entspricht dies ca. 34,8 Mio. m^3 Dämmmaterial. Mit dem jährlichen Zuwachs an ungenutztem Nadelholz, könnten also ca. 90 % des jährlichen Dämmstoffmarktvolumens in Deutschland produziert werden.

In Anbetracht einer allgemein steigenden Holznachfrage, auch aus anderen Produktgruppen, unter Berücksichtigung ökologischer Gründe im Sinne der Kohlenstoffspeicherung im Wald oder der Schutzfunktion des Waldes sowie der eingeschränkten Mobilisierung des Holzvorrates aufgrund unterschiedlicher Waldbesitzverhältnisse kann eine solche grobe Abschätzung natürlich bei weitem nicht als realistisches Szenario für die Zukunft angesehen werden. Aber auch wenn unklar

bleibt, wie viel des derzeit ungenutzten Holzes für die Produktion von Dämmplatten zur Verfügung steht - die Größenordnungen der Zahlen zeigen grundsätzlich das Potenzial, die Produktionskapazitäten von Holzprodukten, also auch von Holzfaserdämmstoffen weiter zu steigern.

Informationen über den Einschlag von Rundholz in Deutschland sind in der Holzeinschlagsstatistik von [Destatis 2021b] enthalten. Die dort angegebenen Zahlen beziehen sich auf Rundholz unter Rinde mit einem Durchmesser von mehr als 7 cm am schwächeren Ende des Stammes. Es werden vier Gruppen von Holzarten unterschieden, nämlich Eiche (EI), Buche und anderes Laubholz (BU/LH), Kiefer und Lärche (KI/LA) sowie Fichte, Tanne, Douglasie und anderes Nadelholz (FI/TA/DOU/NH).

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland insgesamt 80,4 Mio. m³ Holz eingeschlagen. Die beiden Nadelholzsortimente (KI/LA und FI/TA/DOU/NH) haben zusammen einen Anteil von ca. 87 %. Nur ca. 13 % sind Laubholz.

Abbildung 42 zeigt die Entwicklung des Holzeinschlages im Zeitraum von 2014 - 2020. Ab 2018 steigt die geerntete Holzmenge von ca. 50 Mio. m³ auf 80 Mio. m³ im Jahr 2020 an. Bei näherer Betrachtung der Sortimente wird deutlich, dass vor allem die Mengen an FI/TA/DOU/NH zunehmen, während die anderen gelieferten Holzarten auf einem konstanten Niveau bleiben.

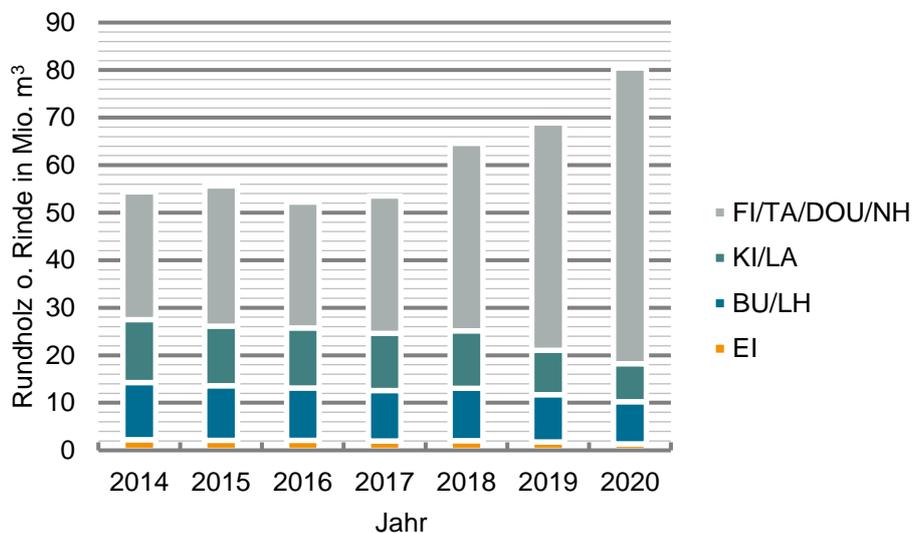


Abbildung 42 Aufgearbeitetes Rundholz ohne Rinde in Deutschland im Zeitraum von 2014 – 2020 [Destatis 2021b]

Der Anstieg des Holzaufkommens in den Jahren 2018 bis 2020 lässt sich durch die Zunahme von Kalamitätsholz erklären. Als Folge von Stürmen, Trockenperioden, Schädlingsbefall usw. muss Holz aus dem Wald entfernt werden, um weitere Probleme zu vermeiden. Die Statistik von [Destatis 2021b] enthält auch Informationen über Kalamitäten, die in Abbildung 43 zusammengefasst sind. Es wird deutlich, dass in den Jahren von 2019 – 2020 vor allem Insekten für die Zunahme von Kalamitätsholz verantwortlich sind. Davor, im Jahr 2018 war das Orkantief Friedrike für eine

Zunahme von Kalamitätsholz durch Wind/Sturm verantwortlich. Dieser Zyklus ist durchaus symptomatisch und in abgeschwächter Form auch in den Jahren von 2015 – 2017 zu erkennen. Die Gesamtzahl an Kalamitätsholz im Jahr 2020 von ca. 60 Mio. m³ macht ca. 75 % der gesamten geernteten Holzmenge aus. Diese Zahlen zeigen, dass unvorhersehbare Naturereignisse einen großen Einfluss auf das Holzangebot haben.

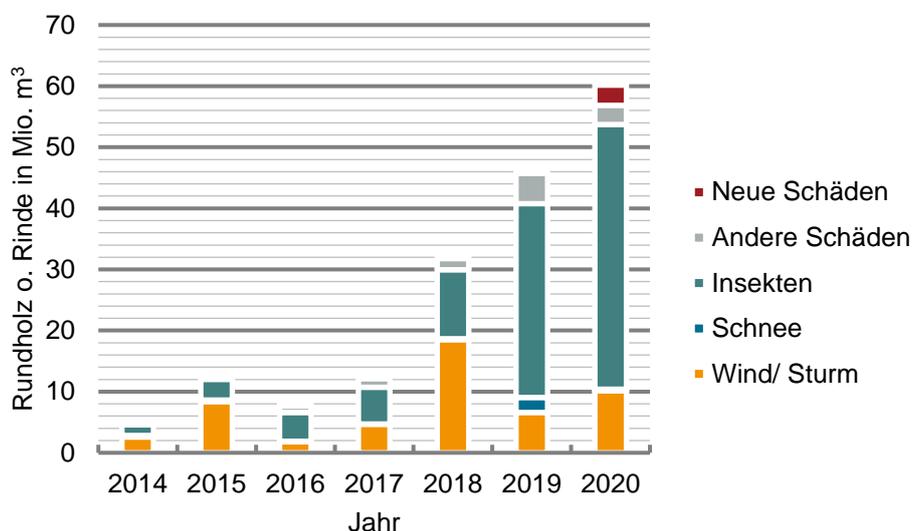


Abbildung 43 Aufgearbeitetes Kalamitätenholz ohne Rinde in Deutschland im Zeitraum von 2014 – 2020 [Destatis 2021b]

Eine weitere interessante Statistik bezieht sich auf den Anteil der verschiedenen Holzsortimente. In Abbildung 44 wird das geerntete Rundholz ohne Rinde im Jahr 2020 in Deutschland den Holzsortimenten und den zugehörigen Holzarten zugeordnet.

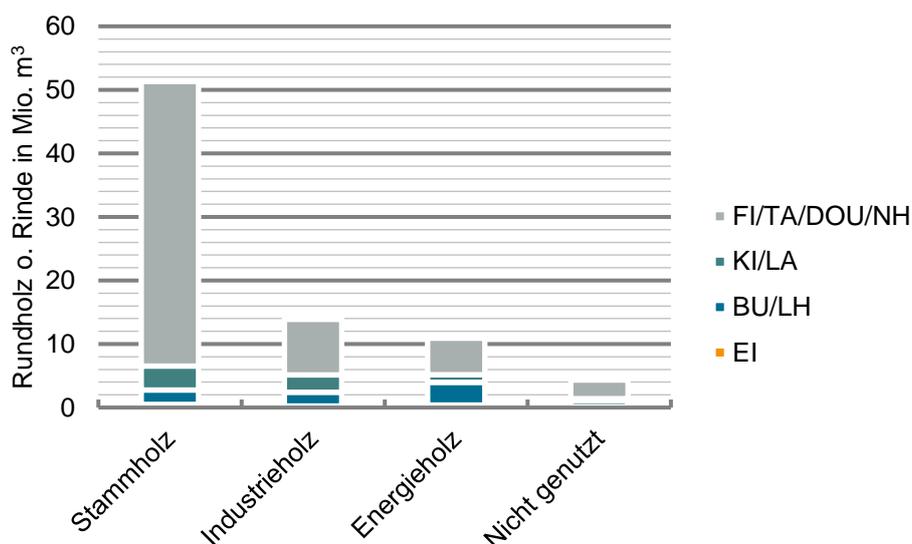


Abbildung 44 Aufgearbeitetes Rundholz ohne Rinde in Deutschland im Jahr 2020 aufgeteilt nach Holzsortimenten und Holzarten [Destatis 2021b]

Gemäß Abbildung 44 wird der größte Teil des Holzes als Rundholz eingestuft (ca. 64 %). Diese Sortimente werden in Sägewerken zu Balken und Brettern geschnitten. Je nach Ausbeute und Einschnitttechnik fällt dabei eine beträchtliche Menge an Nebenprodukten (Hackschnitzel, Sägemehl) an, die für die Herstellung von Papier, Holzwerkstoffen oder zur Energieerzeugung verwendet werden können. Industrielholz, das für die gleichen Zwecke wie die Nebenprodukte verwendet wird, macht ca. 17 % der Gesamternte aus, gefolgt von ca. 14 % Energieholz. Auch wenn der prozentuale Anteil gering erscheint, werden aktuell ca. 4,3 Mio. m³ des geernteten Holzes derzeit nicht genutzt. Nach der Definition von [Destatis 2021b] ist nicht genutztes Holz, geerntetes Holz, das dauerhaft im Wald verbleibt. Mögliche Gründe können nur geschätzt werden - seien es schwächere Durchmesser, die für die beabsichtigte Nutzung der Hauptpartie nicht geeignet sind, oder einfach Fehler in der Lieferkette. Den größten Anteil daran haben wiederum die Nadelhölzer mit insgesamt 3,2 Mio. m³.

Eine detaillierte Diskussion über die potenzielle Holzverwendung erfordert eine differenzierte Modellierung der zukünftigen Entwicklung der Wälder und der Lieferkette zu den potenziellen Holzverbrauchern. In Deutschland beschreibt das Modell WEHAM (Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung) auf der Grundlage der dritten Bundeswaldinventur die Entwicklung der Waldkapazitäten bis zum Jahr 2052. Das Basismodell berücksichtigt eine kontinuierliche Versorgung mit Holz entsprechend der aktuellen Situation. Darüber hinaus werden in [Wolf et al. 2020] zwei Szenarien berechnet. Das Szenario "Holznutzungspräferenz" berücksichtigt eine Absenkung des Waldbestandes und eine Zunahme der verarbeiteten Rundholzäquivalente. Das alternative Szenario "Naturschutzpräferenz" stellt die Entwicklung der Biodiversität in den Mittelpunkt.

Da vor allem Nadelhölzer für Dämmstoffe verwendet werden, ist insbesondere die Entwicklung der Nadelholzanbaufläche von Bedeutung. Im Jahr 2012 wurde auf 42 % der Waldfläche Laubholz angebaut. Nadelhölzer wurden auf 58 % der Waldfläche angebaut. Für das Basisszenario werden nur geringe Veränderungen im Zeitablauf modelliert, da hier keine explizite Veränderung der Holzarten angenommen wird. Im Holznutzungsmodell erfolgt eine Substitution von Fichte (Rückgang um 29 %) und Kiefer (Rückgang um 30 %) durch den verstärkten Anbau von Douglasie, die bis 2052, 17 % der gesamten Waldfläche einnehmen wird. Damit bleibt die Waldfläche für Nadelhölzer vergleichbar mit dem Basisszenario, aber die Anteile der Nadelholzarten verändern sich. Im Naturschutzszenario sinkt die Waldfläche für Nadelhölzer deutlich von 58 % (2012) auf 47 % (2052). Die Veränderungen in der Holzartenverteilung sind auf den Klimawandel zurückzuführen, der sich in Zukunft vor allem auf den Anbau von Fichte auswirken wird.

Je nach den beobachteten Szenarien und der Entwicklung der Holzartenverteilung werden sich deutliche Unterschiede in der verfügbaren Holzmenge ergeben. Abbildung 45 zeigt die mittlere am Markt verfügbare Rohholzmenge für die vier wichtigsten Holzartengruppen im Zeitrahmen von 2013 - 2052 nach [Wolf et al. 2020]. Im

Holznutzungsszenario nimmt der Anteil von Kiefer und Fichte deutlich zu, aber auch der Anteil von Buche. Das Naturschutzszenario führt zu einer Stagnation der verfügbaren Holzmasse von Buche und Fichte, prognostiziert aber eine Zunahme der Kiefer (im Vergleich zum Basisszenario).

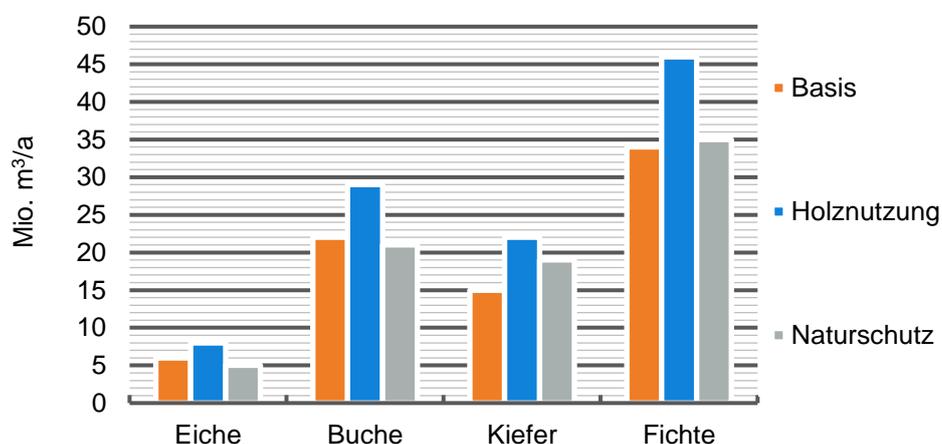


Abbildung 45 Mittleres jährliches Rohholzaufkommen (Rundholzäquivalente) in Deutschland im Zeitraum von 2013 – 2052 für drei WEHAM Szenarien zur Holznutzung [Wolf et al. 2020]

Für das Basisszenario sind weitere Informationen zur Verteilung der Holzsortimente für die vier Holzarten verfügbar und in Abbildung 46 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Fichte die wichtigste Holzart für Stammholz bleiben wird, gefolgt von Kiefer und Buche. Buchenholz wird die wichtigste Holzart für Industrierundholz werden. Auf der Grundlage dieser Entwicklungen könnte es sinnvoll sein, Holzfaserdämmplatten mit einem höheren Anteil an Laubböhlern zu entwickeln. Für die beiden anderen Szenarien liegen keine spezifischen Daten vor.

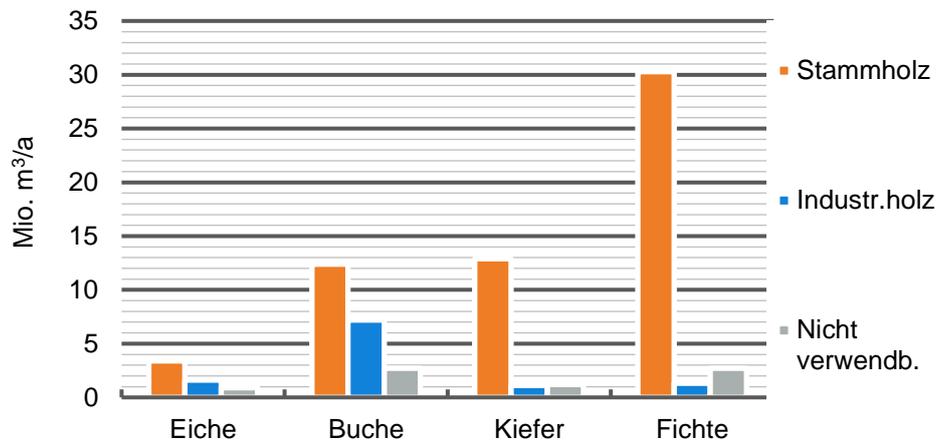


Abbildung 46 Mittleres jährliches Rohholzaufkommen in Deutschland im Zeitraum von 2013 – 2052 für das WEHAM Basisszenario Holznutzungspräferenz [Wolf et al. 2020]

Wie erwähnt, werden für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen derzeit noch überwiegend Nadelhölzer eingesetzt. Die Menge an Industrierundholz aus Kiefer und Fichte ist mit insgesamt 1,4 Mio. m³ vergleichsweise gering (Abbildung 46). Neben Rundholz sind auch Hackschnitzel aus Hackschnitzellinien ein Rohstoff für die Herstellung von Holzfasern. Die Menge der Hackschnitzel beim Sägen von Holz hängt von der verwendeten Technik und der Ausbeute ab, die auch eine Funktion des Durchmesser ist. Eine Ausbeute von 40 bis 55 % ist bei schwächeren Durchmessern normal und kann bei dickeren Stämmen auf 50 bis 70 % ansteigen. Neben Hackschnitzeln fällt auch Sägemehl an. Das bedeutet, dass auch eine beträchtliche Menge an Holz aus der Sägeindustrie (Nebenprodukt Hackschnitzel aus dem Sortiment Rundholz in Abbildung 46) für die Herstellung von Holzwerkstoffen - und damit grundsätzlich auch für die Produktion von Dämmplatten - zur Verfügung steht.

Obwohl Deutschland reich an Holzressourcen ist, wird in Deutschland geerntetes und verwendetes Holz auch auf globaler Ebene exportiert und importiert. In der Studie von [Egenolf et al. 2021] wurden die in Deutschland verbrauchten Rundholzäquivalente (RE) und deren Herkunftsregionen analysiert. Die zugrunde liegende Frage ist, ob Deutschland seinen Rundholzbedarf autark und nachhaltig decken kann. Die Untersuchung betrachtet den sogenannten Timber Footprint of Production (TFP),

also die Menge an Rundholzäquivalenten ohne Rinde in m³. Der Selbstversorgungsgrad ist das Verhältnis zwischen dem TFP und dem im Inland geernteten Holz.

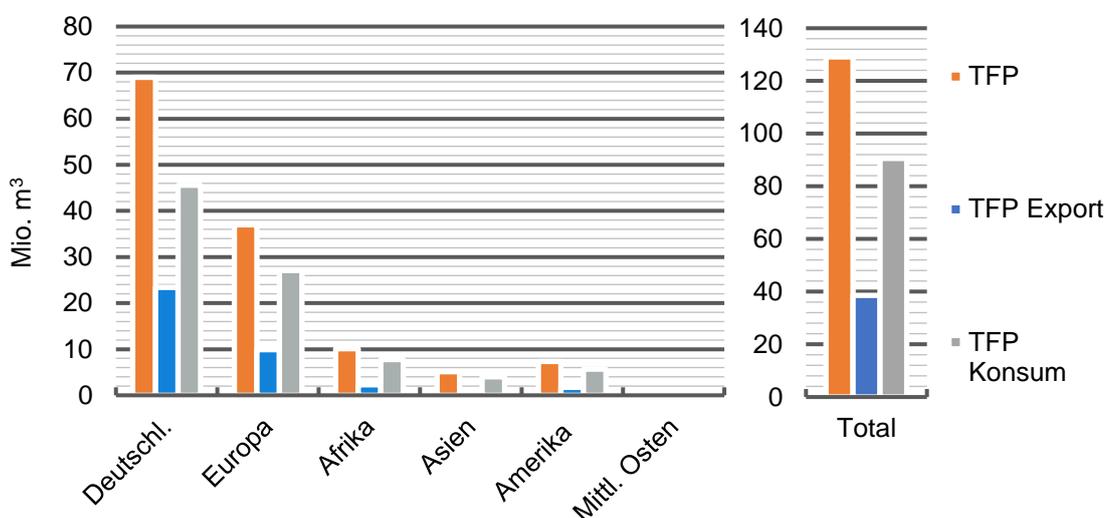


Abbildung 47 Timber Foot Print of Production (TFP = Rundholzäquivalente ohne Rinde) in Mio. m³ in Deutschland im Jahr 2015; „TFP“ = insgesamt verarbeitetes Holz; „TFP Export“ = exportiertes verarbeitetes Holz; „TFP Konsum“ = Verbrauch an verarbeitetem Holz [Egeneolf et al. 2021]

In Abbildung 47 ist der TFP von Deutschland im Jahr 2015 dargestellt. Ca. 69 Mio. m³ des TFP stammten aus Deutschland, das entspricht ca. 53 %. Weitere 29 % stammten aus Europa. Der Rest stammte aus anderen Regionen weltweit. Insgesamt wurde für 2015 ein TFP von ca. 129 Mio. m³ ermittelt. Davon wurden ca. 39 Mio. m³ wieder exportiert (TFP-Export ca. 30 %) und 91 Mio. m³ wurden in Deutschland verbraucht (TFP-Konsum ca. 70 %).

Was den Anteil von Nadel- und Laubholz an der verarbeiteten TFP anderer Regionen als Deutschland und Europa betrifft, so gibt es einen signifikanten Unterschied. Abbildung 48 zeigt den TFP und den Anteil der Exporte zwischen 1995 und 2015. Es wird deutlich, dass der Großteil des aus Afrika, Asien und dem Nahen Osten importierten Holzes aus Laubholz besteht. Die Menge an Nadelholz, die für Bauzwecke sowie für die Herstellung von Holzfaserdämmplatten relevant ist, stammt daher aus Deutschland und Europa.

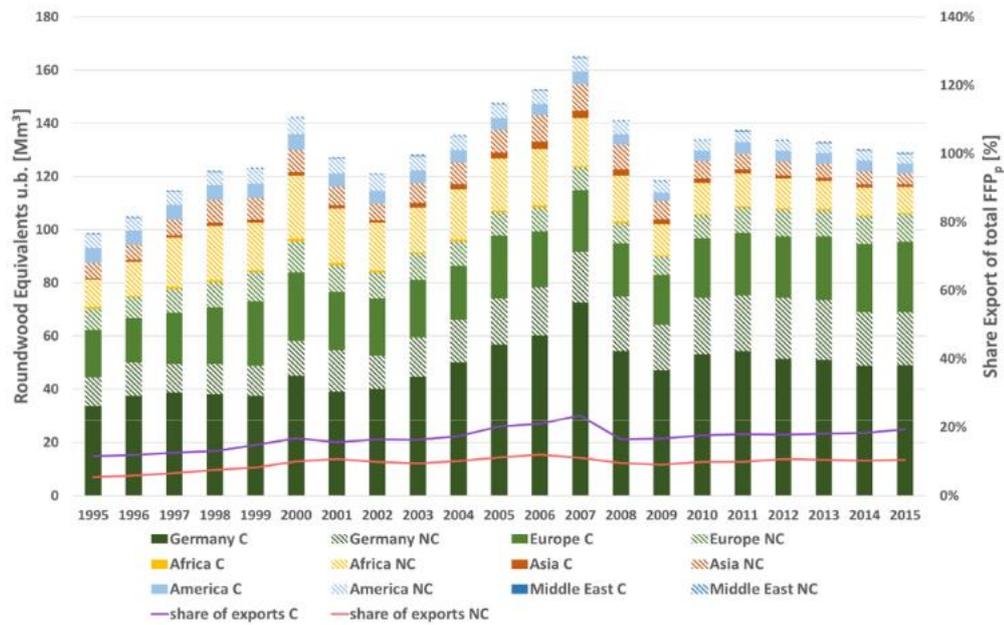


Abbildung 48 TFP und Anteil der Exporte zwischen 1995 und 2015 in Deutschland, C = Nadelholz, NC = Nicht Nadelholz (Laubholz) (Darstellung aus [Egenolf et al. 2021])

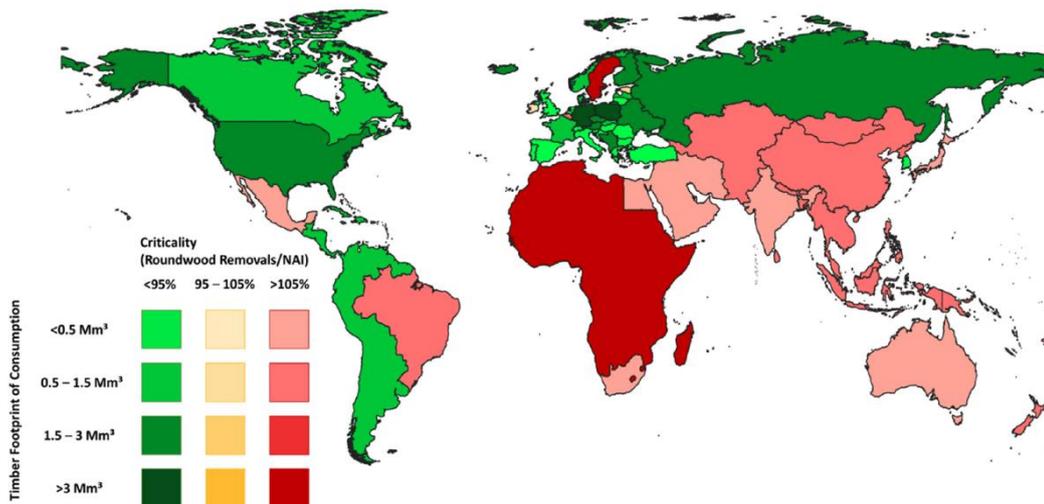


Abbildung 49 Herkunft des Holzes entsprechend dem mittleren „TFP Konsum“ in Deutschland für den Zeitraum von 2005 – 2015 und Darstellung des Verhältnis zwischen Entnahme und Nettozuwachs (Darstellung aus [Egenolf et al. 2021])

Eine nachhaltige Bewirtschaftung ist dadurch definiert, dass die Entnahme von Rundholz deutlich geringer ist als der jährliche Nettozuwachs. In Abbildung 49 werden drei Fälle unterschieden. Grüne Länder werden als "nachhaltige Herkunft" charakterisiert, gelbe Länder stehen für "fragwürdige Nachhaltigkeit" und rote Länder gelten als "vermutlich nicht nachhaltige Herkunft" für Holz. Es wird deutlich, dass die meisten Länder in Europa eine nachhaltige Quelle für Rundholz sind. Ausnahmen sind Irland und Estland (gelb) sowie Schweden und Belgien (rot). Regionen mit vermutlich nicht nachhaltigem Anbau sind Afrika, die meisten Teile Asiens und Ozeaniens sowie Teile Südamerikas.

Zusammenfassend zeigen die ermittelten Zahlen, dass die Produktion von Holzfaserdämmplatten derzeit von geringer Bedeutung für den Holzverbrauch ist. Das Volumen an Holzfaserdämmplatten von ca. 2 Mio. m³ pro Jahr entspricht ca. 0,7 Mio. m³ Massivholz (unter der Annahme von 155 kg/m³ für Dämmplatten und 470 kg/m³ als mittlere Rohdichte von Nadelholz). Unter diesem Gesichtspunkt und unter Berücksichtigung der derzeit ungenutzten Holzmengen ist kein Engpass in der Rohstoffversorgung zu erwarten. Anhand der Zahlen aus dem Jahr 2015 ist erkennbar, dass Deutschland ein Nettoimporteureur von Holz ist und somit auf Rundholz aus dem Ausland angewiesen ist. Dies gefährdet jedoch nicht die Nachhaltigkeit von Holzwerkstoffen im Baubereich, da die meisten der verwendeten Nadelhölzer aus Ländern mit nachhaltiger Waldbewirtschaftung stammen. Um den Selbstversorgungsgrad nicht zu gefährden, wäre es zudem möglich, die Rundholzproduktion auf Basis heimischen Holzes um 8 - 41 % zu steigern [Egenolf et al. 2021]. Allerdings ist aufgrund des Klimawandels in Zukunft mit einem Holzartenwechsel zu rechnen. Infolgedessen wird mehr Laubholz, insbesondere Industrierundholz aus Buche, zur Verfügung stehen. Was die Holzanatomie betrifft, so ist Laubholz durch kürzere Faserlängen gekennzeichnet. Um das künftige Holzangebot zu decken, sollte die Holzfaserdämmstoffindustrie Produktionsverfahren entwickeln, die einen größeren Anteil an Laubholz enthalten.

Hanf

Der Anbau von Hanf (*Cannabis sativa*) war in Deutschland von 1982 - 1996 verboten. Seit 1996 ist der Anbau unter strengen Auflagen und nur bei einem THC-Gehalt von unter 0,2 Prozent wieder erlaubt. Der Hanfanbau hat mit 5.362 Hektar Anbaufläche im Jahr 2020 in Deutschland seinen bisherigen Höchststand erreicht [BLE 2020]. Mehr als die Hälfte der Felder wird ökologisch bewirtschaftet.

Hanf wird seit 2010 in der statistischen Reihe 3.1.2 des Statistischen Bundesamtes in Deutschland [Destatis 2021a] geführt. Ab 2015 wird eine fortlaufende Zahlenreihe zur Verfügung gestellt. Für das Jahr 2020 wird mit 4462 ha Anbaufläche, verteilt auf 550 Betriebe, ein niedrigerer Wert angegeben als in [BLE 2020]. Von 2015 - 2020 ist sowohl die Anzahl der Betriebe als auch die Anbaufläche in Deutschland kontinuierlich gestiegen. (Abbildung 50)

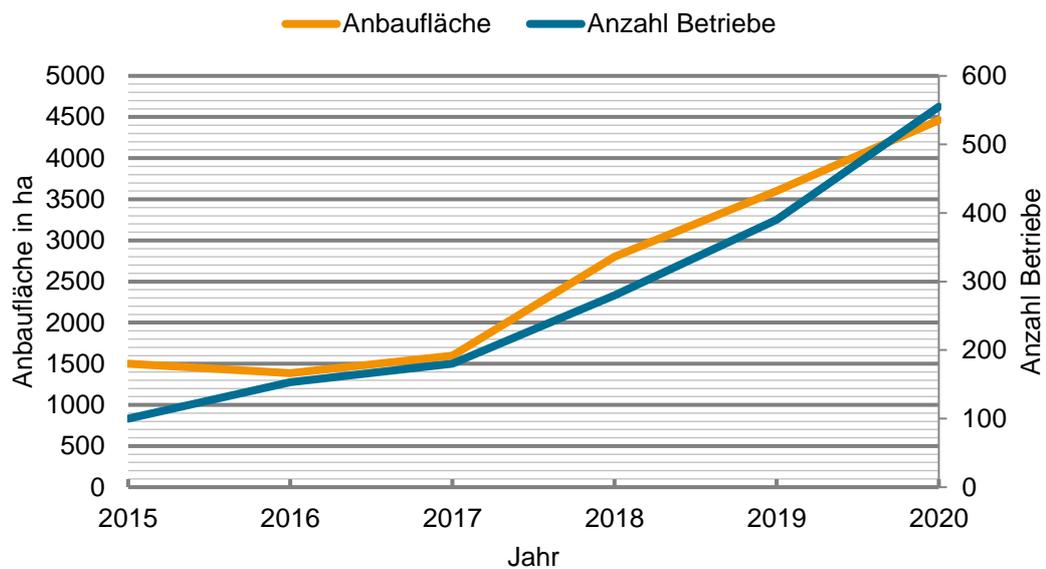


Abbildung 50 Anbaufläche und Anzahl der Betriebe mit Hanfanbau in Deutschland im Zeitraum von 2015 – 2020 [Destatis 2021a]

Zahlen zur Produktion von Hanf in anderen Ländern liefern die Statistiken der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO). Laut [FAOSTAT 2021] wird in Europa im Jahr 2019 eine Gesamtfläche von ca. 39.000 ha für den Anbau von Hanffasern genutzt (Abbildung 51). Die wichtigsten Erzeugerländer für Hanf in Europa sind Frankreich (14.550 ha), Litauen (6.000 ha), Deutschland (3.600 ha), die Russische Föderation (3.102 ha) und Österreich (2.010 ha). Weltweit betrug die Erntefläche für die Hanffaserproduktion im Jahr 2019 ca. 70.000 ha (Abbildung 51).

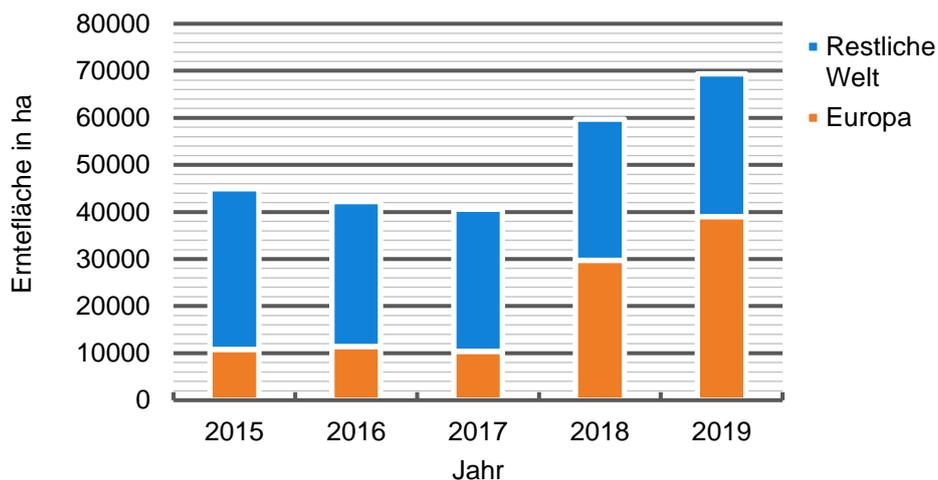


Abbildung 51 Hanfanbau in Europa und dem Rest der Welt im Zeitraum von 2015 – 2019 [FAOSTAT 2021]

Der Ertrag an geröstetem Stroh kann über 11 t/(ha·a) erreichen. In Jahren mit ungünstigen Witterungsbedingungen und schlechten Standorten kann er unter 5 t/(ha·a) fallen. In [nova-Institut 2008] wird der mittlere Ertrag von Hanfstroh in

Deutschland mit 6 bis 8 t/(ha·a) angegeben. Von diesem geernteten und getrockneten Stroh können ca. 28 % weiterverarbeitet werden. Das entspricht etwa 2 Tonnen pro Hektar Anbaufläche im Jahr. Die restlichen 72 % sind hauptsächlich Schäben, die in der Landwirtschaft, als Einstreu oder als Schüttgut in der Bauindustrie verwendet werden.

Ausgehend von diesen Parametern wurde eine grobe Berechnung des Potenzials von Hanfdämmstoffen in Deutschland vorgenommen. Der Marktanteil hanfbasierter Dämmprodukte in Deutschland liegt gemäß [B+L 2021] im Jahr 2020 bei ca. 113.000 m³. Unter der Annahme einer mittleren Rohdichte von 40 kg/m³ ergibt dies ca. 4.520 Tonnen Hanffasern. Die Anbaufläche von 4462 ha im Jahr 2020 in Kombination mit einem Hanffaserertrag von 2 t/ha würde zu ca. 8.924 t Hanffasern führen. Das bedeutet, dass derzeit etwa die Hälfte der in Deutschland gewonnenen Hanffasermenge für die Herstellung von in Deutschland verkauften Dämmstoffen aus Hanf verwendet wird. Die Herstellung von Hanffaserdämmstoffen ist damit ein dominanter Faktor hinsichtlich der zukünftigen Bereitstellung von Rohstoffen.

Da auch andere Anwendungen (Textilien, Stoffe, Gewebe) aus Hanffasern hergestellt werden, würde eine mögliche Erhöhung der Marktanteile eine Steigerung der Produktionsmenge oder den Import von Rohstoffen aus anderen Ländern erfordern. Beide Szenarien sind denkbar. Gemäß Abbildung 50 nimmt die Anbaufläche in Deutschland seit 2015 kontinuierlich zu. Darüber hinaus verfügt Frankreich als direkter Nachbar Deutschlands über die größte Anbaufläche für Hanf in Europa (ca. 14550 ha im Jahr 2020). Aufgrund der möglichen Entwicklung der verfügbaren Anbaufläche erscheint eine zukünftige Steigerung des Marktanteils vorerst möglich.

Zellulose

Detaillierte Angaben zur Produktion und Verbrauch von Papier und Altpapier liefert der Leistungsbericht der Deutschen Papierindustrie [VDP 2022]. In Deutschland wurden demnach 2021 insgesamt 23,1 Millionen Tonnen Papier produziert. Davon sind 6,6 Millionen Tonnen (28 %) grafische Papiere (Papier zum Drucken, Schreiben und Kopieren), die grundsätzlich als Rohstoff für die Weiterverarbeitung zu Zellulosedämmstoffen in Frage kommen. Zeitungsdruck, der für Altpapierflocken meist genutzte Ausgangsstoff macht davon lediglich 1,1 Mio. Tonnen (4,8 %) aus. Um eine Aussage über das Potenzial zur Erhöhung des Anteils an Zellulose als Dämmmaterial treffen zu können, ist es notwendig, die Entwicklung der produzierten Menge an grafischen Papieren näher zu betrachten.

GRAFISCHE PAPIERE | GRAPHIC PAPER

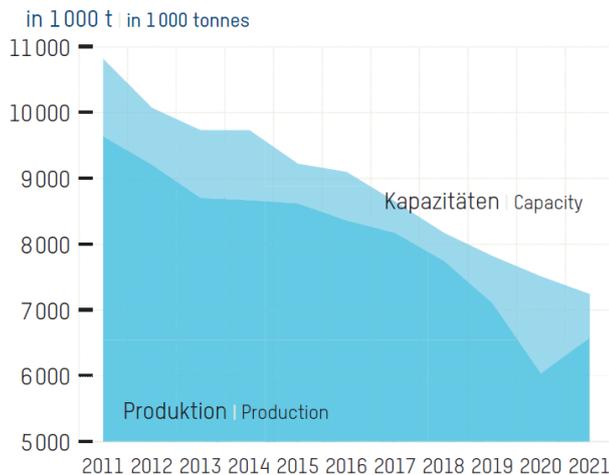


Abbildung 52 Produktion graphischer Papiere in Deutschland (Darstellung aus [VDP 2022])

In Abbildung 53 ist die jährliche Gesamtproduktion von grafischen Papieren in Deutschland im Zeitraum von 2011 bis 2021 dargestellt. Wie zu erkennen, ist die Produktion von grafischen Papieren in Deutschland in den letzten zehn Jahren kontinuierlich rückläufig, was auf die zunehmende Digitalisierung der Kommunikation und der Presse und Medien zurückzuführen ist.

Dieser Trend ist auch in Europa zu erkennen. Auf Basis von Zahlen der FAO zeigt Abbildung 54 die Produktion von Zeitungspapier sowie den Einsatz von Altpapier in der Papierindustrie in Deutschland und Europa in den Jahren von 2011 – 2021. Dabei ist auch zu erkennen, dass der Einsatz von Altpapier in der Papierindustrie insgesamt steigt.

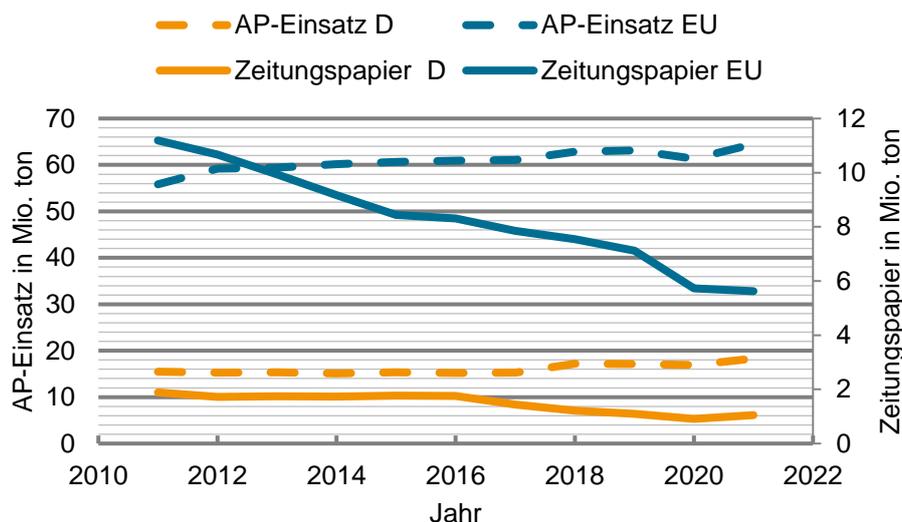


Abbildung 53 Altpapiereinsatz und Produktion von Zeitungspapier in Deutschland und Europa im Zeitraum von 2011 – 2021 [FAOSTAT 2022]

Basierend auf den in [VDP 2022] veröffentlichten Daten sind in Tabelle 16 das Altpapieraufkommen und der Altpapierverbrauch in Deutschland im Jahr 2021 zusammengefasst. Daraus wird deutlich, dass bereits jetzt der derzeitige

Altpapierverbrauch die Menge des in Deutschland anfallenden Altpapiers übersteigt. Der Bedarf kann also nur durch einen Importüberschuss gedeckt werden.

Tabelle 16 Altpapieraufkommen und -verbrauch in Deutschland im Jahr 2021 [VDP 2021]

Altpapieraufkommen 2019	14,470	Mio. t
Import von Altpapier	5,590	Mio. t
Export von Altpapier	1,763	Mio. t
Altpapierverbrauch in der Papierindustrie	18,297	Mio. t

Dämmstoffe aus Zellulose (Altpapierflocken) haben wie dargestellt gemäß [IC 2021] in Deutschland einen Marktanteil von ca. 2 %, was ca. 0,8 Mio. m³/a darstellt. Bei einer angenommenen Dichte von 40 kg/m³ für Einblasdämmstoffe entspricht dies ca. 0,032 Mio. ton/a. Bezogen auf den Altpapierverbrauch in der Papierindustrie von 18,297 Mio. ton/a sind dies 0,17 %.

Der Vergleich der Zahlen zum Altpapieraufkommen und -verbrauch mit der aktuell für die Produktion von Altpapierdämmstoffen eingesetzten Rohstoffmasse macht deutlich, dass die Anwendung als Dämmstoff für den Altpapiermarkt insgesamt von untergeordneter Bedeutung ist. Das Potenzial für ein signifikantes weiteres Wachstum von Zellosedämmstoffen hängt also eher an der Möglichkeit die benötigten Mengen zu wirtschaftlich abbildbaren Konditionen zu akquirieren. Durch die kontinuierlich sinkende Menge an Zeitungspapier und der hohen Einsatzquote von Altpapier in der Papierindustrie bleibt der Altpapiermarkt aber voraussichtlich langfristig angespannt.

Zusammenfassung

Der mittlerweile hohe Marktanteil von Holzfaser Dämmstoffen lässt sich wie einleitend erwähnt vor allem auf die gut diversifizierte Produktpalette zurückführen, die eine breite Anwendbarkeit gewährleistet. Am Markt verfügbar sind steife Platten mit hoher Rohdichte und entsprechenden mechanischen Eigenschaften, die als aussteifende Elemente im Holzrahmenbau, als Unterdeckplatten oder als WDVS eingesetzt werden können. Flexible Matten können als Gefachdämmung im Holzrahmenbau und als Zwischensparrendämmung verwendet werden. Während die meisten Nawaro-Dämmstoffe das Brandverhalten der Klasse E nachweisen, gibt es mittlerweile auch Holzfaser Dämmstoffe mit höherwertiger Brandklasse bis hin zur Euroklasse C,s1,d0, nicht glimmend, was der Anforderung „schwerentflammbar“ entspricht und damit einen Einsatz als Dämmstoff in der Gebäudeklasse 4 und 5 ermöglicht (<https://www.pyroresist.de/>). Zu beachten ist, dass diese Produkte jedoch einen hohen Anteil an Flammenschutzmittel (FSM) enthalten. Laut EPD (GTX-20220170-IBC1-DE) besteht dieses exemplarische Produkt aus 81,5 % Holzfaser, 13 % FSM, 4 %

PUR Harz und 1,5 % Paraffin. Verschlösener bleiben mit Ausnahme von Holzwole Leichtbauplatten, welche die Klasse A2 erreichen, alle Anwendungen die nicht-brennbare Dämmstoffe (Klasse A1, A2) erfordern. Ebenfalls nicht adressiert werden Anwendungen im Perimeter und Umkehrdach.

Neben den umfangreichen technischen Einsatzmöglichkeiten von Holzfaserdämmstoffen ist auch die gute Verfügbarkeit des Rohstoffs Holz einer der Gründe für die außerordentlich positive Marktentwicklung. Holz steht zumindest in Mitteleuropa aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern in großer Menge zur Verfügung und Koppelprodukte aus anderen Produktionen (bspw. der Schnittholzgewinnung) können verarbeitet werden. Aktuell übersteigt der Zuwachs der Wälder in Deutschland immer noch die Nutzung. Laut der Kohlenstoffinventur des (Thünen Institut 2017) lag der laufende Zuwachs in 2017 bei 117 Mio. Vfm/a und die Nutzung bei 89 Mio. Vfm/a (Vfm/a = Vorratsfestmeter pro Jahr). Zu beachten ist, dass diese Lücke zwischen Zuwachs und Nutzung der Wälder von verschiedenen Faktoren bestimmt wird. Der Wald übernimmt neben den wirtschaftlichen Aspekten auch ökologische und soziale Funktionen. Im Weiteren sind durch den Holzbau, Holzwerkstoffindustrie, Brennstoffgewinnung und ggf. Bioraffinerie Ansätze Nutzungskonkurrenzen gegeben, die sich in Zukunft verschärfen werden, wenn der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen auch in anderen Branchen forciert wird. Im internationalen Kontext werden diese Faktoren ggf. ergänzt durch die Rodung zur Gewinnung von Weideland und eine noch umfangreichere Nutzung von Holz als Energielieferant.

Zudem ist zu beachten, dass die in den letzten Jahren vorhandene Menge an Holz auf dem deutschen Markt auch durch umfangreiche Kalamitäten (Sturm- und Folgeschäden durch Insektenfraß) verursacht wurde. Vor diesem Hintergrund ist auch der Klimawandel mit einem generellen Anstieg von extremen Wetterereignissen und den Folgen des veränderten Temperatur- und Wasserangebots für bestimmte Baumarten zu berücksichtigen. Der dadurch notwendige, sogenannte „Waldumbau“ wird zu einer Verlagerung des Anbaus der bisher im Bauwesen überwiegend genutzten Nadelhölzer (vorwiegend der Fichte) in Richtung von Laubhölzern, bspw. der Buche führen. Unterschiede in der Holzanatomie (Faserlängen) und Holzinhaltstoffen (Extraktstoffe) werden die Eigenschaften daraus hergestellter Produkte, bzw. zumindest die notwendige Prozesstechnik, z. B. hinsichtlich Holzaufschluss und Verklebungstechnologie beeinflussen.

Die zweitwichtigste Gruppe der Nawaro-Dämmstoffe sind aktuell Zellulose/Altpapierflocken. Die Produkte sind bereits seit langem auf dem Markt und stellen bei der Anwendung als lose Einblasdämmung eine kostengünstige und etablierte Lösung zur Dämmung von Gefachen im Holzrahmenbau und zur Zwischensparrendämmung dar. Die verhaltene Marktentwicklung der letzten Jahre ist wahrscheinlich in erster Linie dem angespannten Altpapiermarkt zuzuschreiben. Papier hat eine sehr hohe Recyclingquote, aber bereits jetzt übersteigt der Bedarf an Altpapier in Deutschland das Angebot, weshalb auch Altpapier aus anderen Ländern zugekauft wird [VDP 2022].

Neben Holzfaserdämmstoffen zeigt auch Hanf eine sehr positive Entwicklung mit hohen Zuwachsraten, auch wenn die aktuelle Marktbedeutung gering ist. Für die zukünftige Entwicklung ist die momentan noch gegebene Limitierung in der Rohstoffverfügbarkeit zu beachten. In Europa im Jahr 2019 waren Frankreich (ca. 14.550 ha), Litauen (ca. 6.000 ha) und Deutschland (ca. 3.600 ha) die bedeutendsten Anbaugeländer. Der Vergleich mit ca. 11.000.000 ha Waldfläche in Deutschland verdeutlicht die Skalen. Im Weiteren ist auch die technische Anwendbarkeit von Hanffaserdämmstoffen aktuell noch begrenzt. Das Groß der Produkte sind flexible Matten für die Gefachdämmung. Harte Platten für WDVS wurden bereits produziert und werden in WDV-Systemen angeboten, konnten sich jedoch bis jetzt nicht etablieren.

Die Diskussion der Marktentwicklung im Bereich der Natur-Dämmstoffe spannt viele Themenfelder auf, die bei der Bewertung aller (konventioneller und alternativer) Dämmstoffe unter technischen und ökologischen Gesichtspunkten wichtig sind. Schlüsselthemen zur Bewertung sind hier die technische Bedeutung hinsichtlich der Anwendbarkeit, die notwendige technische/chemische Ausrüstung um bestimmte Materialanforderungen (meist Brand und Wasseraufnahme) einzuhalten und die generelle Bedeutung im Kontext der Energiewende hinsichtlich der Frage, inwieweit ein Material in nennenswertem Maß den Bedarf an Dämmstoffen decken kann.

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. mikroporöse Dämmstoffe und Aerogele). Diese Innovationen – hin zu deutlich dünneren und effektiveren Dämmungen – werden bisher allerdings zu wenig herausgestellt.

4.1 Physikalischer Hintergrund

Was hat sich in der Vergangenheit geändert, um den gestiegenen Anforderungen an die Energieeinsparung gerecht zu werden? Beispielsweise wurden die maximal zulässigen U-Werte bei der Sanierung im Bestand über die Jahre verschärft. Gegenüber dem Stand von 2002 mit $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ für Außenwände gilt seit 2009 und bis heute ein U-Wert von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, was eine Verschärfung um 40 % darstellt. Das hat natürlich Folgen: Bei den sogenannten konventionellen Dämmstoffen 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 gesteigener 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 Materials
- 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 hohen Temperaturdifferenzen und/oder sehr geringen Rohdichten).
- Kopplungseffekte, welche vor allem aus Punktkontakten loser Partikel resultieren

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 Einfluss 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 54 (Rohdichte) sowie Abbildung 55 (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.

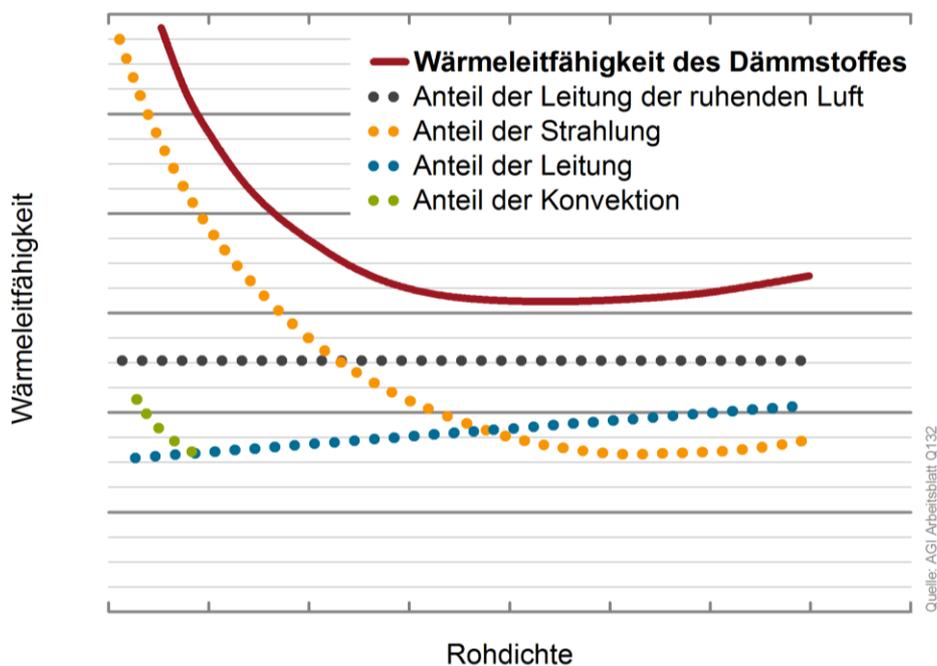


Abbildung 54: Prinzipielle Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte bei einer bestimmten Temperatur am Beispiel von Mineralwolle

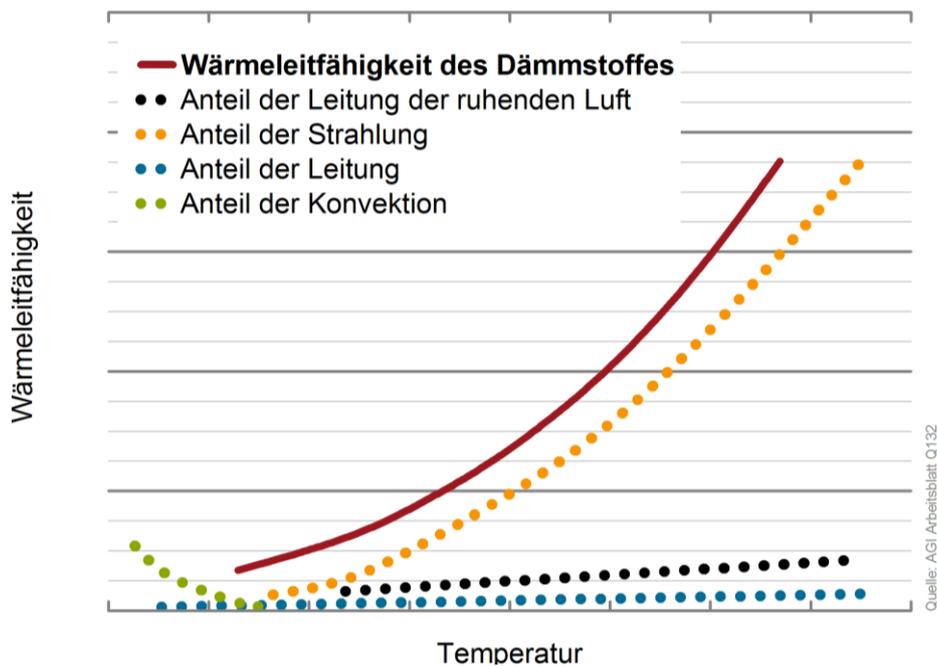


Abbildung 55: Prinzipielle Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur für eine bestimmte Rohdichte am Beispiel von Mineralwolle

4.2 Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit bei Dämmstoffen

Neue Werte bei der Mineralwolle

Nachfolgende Grafik (Abbildung 56) 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 beispielsweise durch die Kombination mit einem nanoporösen Dämmstoff wie beispielsweise mit Aerogelen möglich. In der Vergangenheit gab es solche Produktentwicklungen, die eine Wärmeleitfähigkeit von 0,019 W/(m·K) erreichten (Abbildung 56). Die Entwicklung konnte sich aber nicht auf dem Markt durchsetzen.

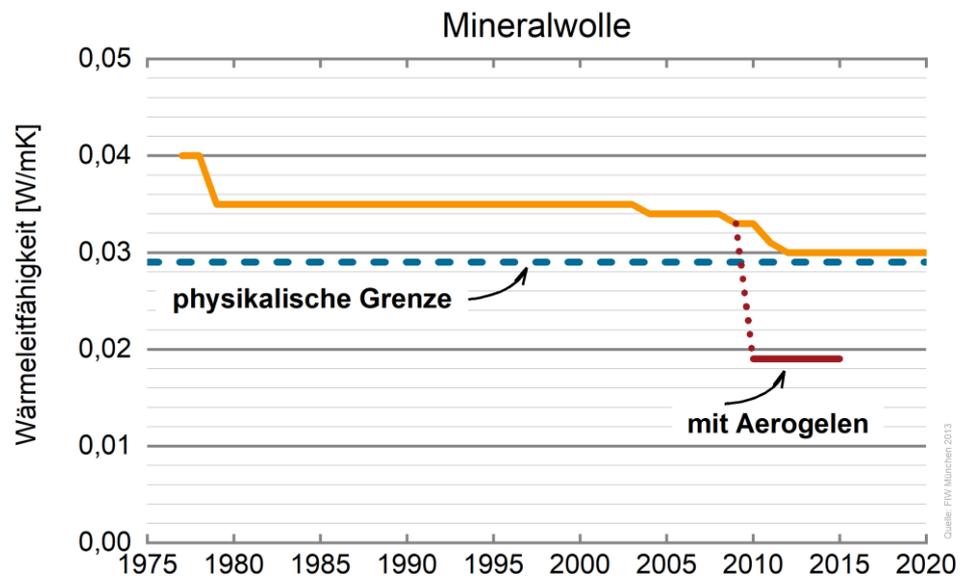


Abbildung 56: Darstellung der Weiterentwicklung von Mineralwolle hinsichtlich der Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit seit 1975 – Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Produkts mit der besten wärmetechnischen Performance im jeweiligen Jahr

Verbesserung bei EPS durch Wärmestrahlungsabsorber (graues EPS)

In Abbildung 57 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 57 werden die Komponenten der Wärmeleitfähigkeit gezeigt. Bei weißem EPS-Schaum erfolgt über 25 % des Wärmetransports durch Strahlung.

Die Entwicklung des mit Aluminiumpartikeln Infrarot-getrübten 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 nur wenig verringert, aber die Vorteile bei der Wärmeleitfähigkeit durch die IR-Trübungsmittel ausgenutzt. Die Infrarot-Trübung basiert auf der Trübung und Rück-Streuung von Wärmestrahlung an den Aluminium- bzw. Graphitpartikeln. Damit werden die dünnen Polystyrol-Wände der Poren weniger

„durchsichtig“ für Infrarotstrahlung, was die Dämmleistung insgesamt verbessert. 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/m³. Für Material mit einer Rohdichte von ca. 22 bis 28 kg/m³ können mit grauem EPS Bemessungswerte von bis zu 0,031 W/(m·K) erzielt werden.

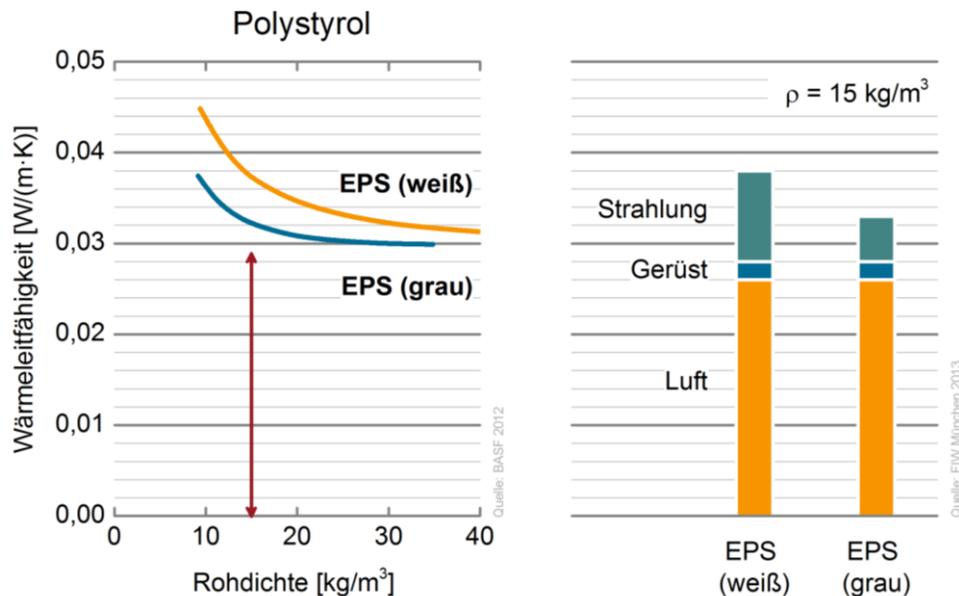


Abbildung 57: Innovationssprung bei Polystyrol - Einführung von grauem EPS

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 57 wird ersichtlich, dass Dämmstoffe aus grauem EPS mit der Rohdichte 15 kg/m³ beispielsweise eine Wärmeleitfähigkeit von 0,032 W/(m·K) erreichen können. Bei weißem EPS gleicher Rohdichte liegt die Wärmeleitfähigkeit bei 0,035 bis 0,037 W/(m·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 (einlagige) Platten, oder durch die Verbindung mehrerer dünner Platten mittels Verklebung oder Verschweißung realisiert wurden. Prinzipiell kommt auch eine mehrlagige Verlegung von dünneren XPS-Platten infrage.

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].

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 bzw. verschweißten 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) und für Flachdachanwendungen (z.B. für Bereiche mit hoher Wärmebelastung neben verblechten Anlagenkomponenten) 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.

Eine wichtige Entwicklung der letzten Jahre betrifft auch die Umstellung bei den verwendeten Flammschutzmitteln. Seit etwa 2013 wird kein HBCD mehr verwendet. Die Hersteller haben mittlerweile alle Produkte auf Polymer-FR umgestellt. Dabei handelt es sich um ein bromiertes Styrol-Butadien-Block-Copolymer, das im Produkt chemisch gebunden ist.

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 58).



Abbildung 58: 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 $0,023 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Theoretisch möglich sind Verringerungen der Wärmeleitfähigkeit bis hin zur physikalischen Grenze von etwa $0,012 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. An der hierfür notwendigen Verringerung der mittleren Zellgröße in Größenordnungen unter $1 \mu\text{m}$ 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 weiteres Beispiel für eine innovative Produktentwicklung in diesem Bereich ist Polyurethan-Aerogel, das als mechanisch stabile Platte hergestellt werden kann (Abbildung 59). Die Aerogelplatte ist offenzellig, damit wasserdampfdurchlässig und hat eine Wärmeleitfähigkeit von 0,018 W/(m K). An der Baustelle kann die Dämmplatte mit herkömmlichen Werkzeugen verarbeitet werden. Neuere Untersuchungen beschreiben Anwendungen in der Innendämmung [Günther et al. 2020] und zum Einsatz in einem Wandelement, Dachterrasse und Fensteranschlüssen [Stelzmann et al. 2022].



Abbildung 59: Polyurethan-Aerogel als Platte

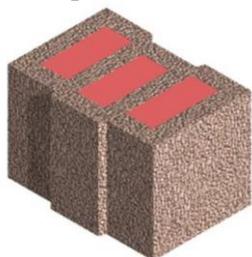
Die niedrige Wärmeleitfähigkeit resultiert aus dem sogenannten Knudsen-Effekt. Ab einer bestimmten Porengröße können Gasmoleküle nicht mehr durch Zusammenstöße untereinander Wärme übertragen. Die Gasmoleküle stoßen nur noch an die Zellwände, wenn die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle deutlich größer ist als die Abmessungen der Poren. Das Verhältnis von mittlerer freier Weglänge zum Abstand der Porenwände wird dabei 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 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].

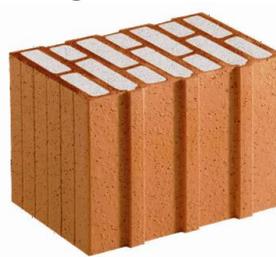
4.3 Verbesserung bei der dämmenden Wand

Die wärmetechnische Weiterentwicklung von Mauersteinen hat zu einer weiten Verbreitung gefüllter Steine, insbesondere gefüllter Ziegel geführt. 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 eigene neue Steinbilder, die von Anfang an für eine Füllung mit Dämmstoff vorgesehen waren (Abbildung 60). Nennenswerte Entwicklungen in dieser Richtung lassen sich z. B. bei den Herstellern von Leichtbeton-Hohlblocksteinen bis in die 1980er Jahre zurückverfolgen. Auf breiter Front durchsetzen 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 60: Abbildungen verschiedener gefüllter Mauersteine

Auch die Verwendung von Dämmstoffen auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen ist in Form von mit Holzfasern gefüllten Mauersteinen mittlerweile bei den massiven Wandbaustoffen angekommen, getrieben von dem Wunsch die Nachhaltigkeitsaspekte der Baumaterialien weiter zu optimieren.

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 verschiedenen Auflagen der EnEV und des GEG, ergab sich 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 oder auch Holzfasern.

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 Schlitzen 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 61). Zu erkennen sind Bereiche höherer Wärmestromdichte im Falschfarbenbild durch grüne, gelbe und rote Farbtöne. Bereiche mit geringer Wärmestromdichte sind blau oder sogar violett dargestellt.

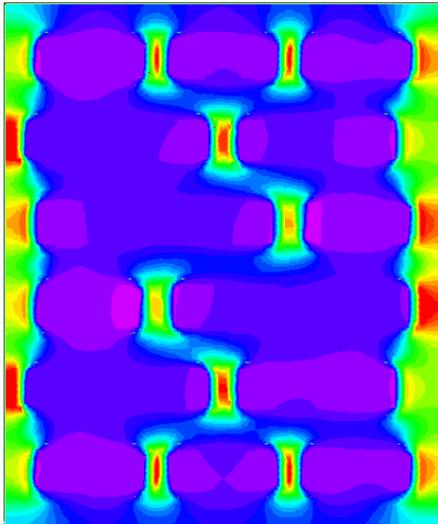


Abbildung 61: Wärmestromdichten in einem mit Dämmstoff gefüllten Mauerstein (Draufsicht)

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 62). 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.

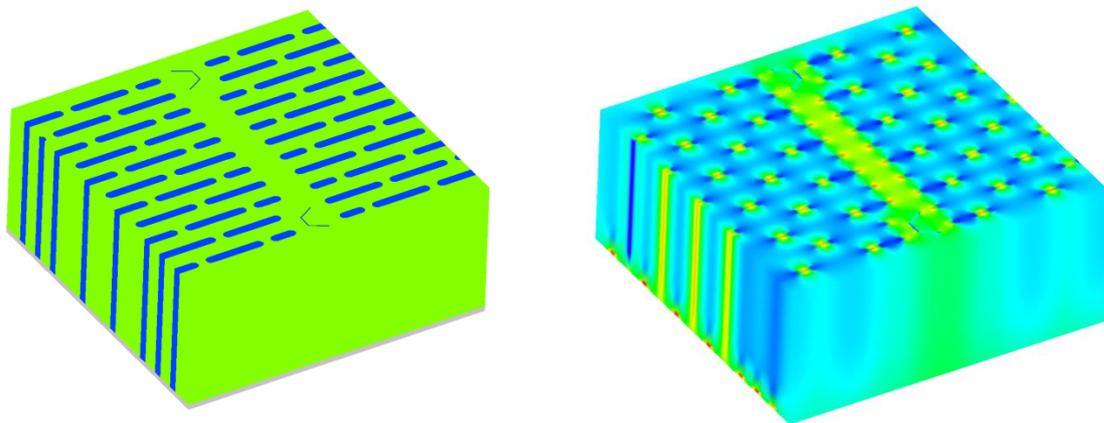


Abbildung 62: Wärmestromdichten in einem ungefüllten Leichtbetonstein mit Luftkammern
 links: dreidimensionales Modell
 rechts: Wärmestromdichten des ungefüllten Leichtbetonsteins

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.

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 vereinfachenden 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 Seite, 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 GEG-, KfW- und BEG-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 erreicht eine Wärmeleitfähigkeit von $0,070 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei einer Materialrohddichte von ca. $350 \text{ kg}/\text{m}^3$. Am Markt werden auch einzelne Produkte mit noch niedrigerer Rohddichte bis hin zu $240 \text{ kg}/\text{m}^3$ angeboten. 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 Dicke der Porenwände in der Produktion umgesetzt.

Bei den Porenbetonsteinen gibt es kaum Mischformen mit eingefüllten oder eingeschäumten Dämmstoffen. Nur wenige mehrschichtige Produkte sind am Markt bekannt, die eine Trennung der einzelnen Aufgaben der Wand vorsehen und eine tragende Innenschale höherer Rohddichte mit einer festen Außenschale verbinden. Innen- und Außenschale werden dabei direkt im Autoklaven mit einer dazwischen angeordneten Schicht hochwärmedämmenden Porenbetons zu einem homogenen Mauerstein verbunden (Abbildung 63). Der Stein verfügt bei einer Wanddicke von $41,5 \text{ cm}$ über einen äquivalenten Lambdawert von nur $0,060 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 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 63: 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 40 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 Wärmeleitfähigkeiten 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 64). Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit beträgt aktuell noch ca. 1/3 des Werts des Jahres 1975. Die Weiterentwicklung bei den Ziegeln wendet sich derzeit wieder einmal der Verminderung der Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens selber zu, ohne bei der Festigkeit Abstriche zu machen und ohne die Rohdichte des Scherbens weiter zu reduzieren. Damit eine Verbesserung trotzdem möglich ist, werden die Porengrößen reduziert (u.a. mit sehr fein verteilten organischen Partikeln, die nach dem Brennvorgang eine mikroskopisch kleine Pore hinterlassen) aber auch Mischungen mit feineren keramischen Tonen verwendet.

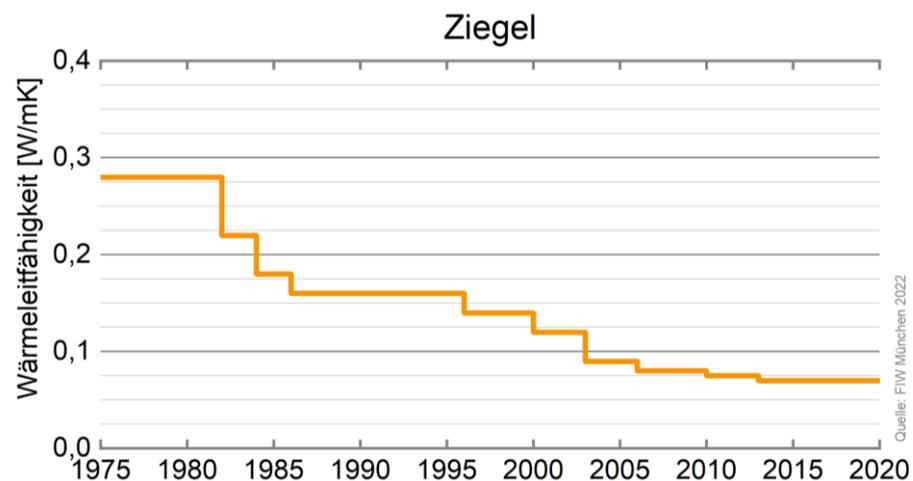


Abbildung 64: Verbesserungen der Wärmeleitfähigkeit von wärmedämmenden Ziegeln seit 1975 - die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks beträgt aktuell nur noch etwa ein Drittel gegenüber 1975

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 ihrer Produkte. Bedingt durch die dickeren Stege, und die im Gegensatz zum Ziegelscherben vorhandene Isotropie des Materials, ließen sich Bemessungswerte für den Leichtbeton über einen großen Rohdichtebereich leicht durch Messung gewinnen. Mit diesen rohdickeabhängigen Bemessungswerten standen verlässliche Eingangswerte für dreidimensionale Simulationen unterschiedlicher Rohdichteklassen zur Verfügung. Hier konnten bereits um das Jahr 2000 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 60). 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 Phenolharz­dämmstoff der WLS 022 nachgewiesen werden, was derzeit die Technologieführerschaft bei den bauaufsichtlich zugelassenen Mauersteinen in wärmetechnischer Hinsicht bedeutet (Abbildung 65).



Abbildung 65: 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-Panele (VIP)

Vakuum Isolations Panele (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, ersten europäisch technischen Zulassungen ETA (2009) und in Verbindung mit der Erarbeitung einer (derzeit noch nicht europäisch harmonisierten) Produktnorm (DIN EN 17140:2021-08).

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

- dem Stützkernmaterial und dessen Rohdichte und Feuchtegehalt
- 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 Lagerung der Paneele bei erhöhter Temperatur und erhöhter relativer Feuchte 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 statistisch bewertet (90/90) und ggf. mit einem Sicherheitsaufschlag versehen in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen verankert.

Weitere Innovations sprünge 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 einfachsten 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. Je nach Anwendung kommen heute meist Hochbarrierefolien zum Einsatz, die aus mehrlagigen metallisierten Polyester Folien bestehen. Für sehr hohe Anforderungen an die Dauerhaftigkeit bzw. bei entsprechend anspruchsvollen Randbedingungen des Einsatzes werden auch Kombinationen mit Aluminiumfolien verwendet. Zum Einsatz kommen auch Hybrid-Paneele, die auf der einen Seite eine hochdichte Aluminium-Verbundfolie haben und auf der anderen Seite eine Mehrlagige metallisierte Kunststoffolie. Dabei werden die Ränder so verschweißt und umgelegt, dass die Wärmebrückenwirkung der dickeren Aluminiumschicht in den Verbundfolien nicht die Wärmedämmebene überbrückt.

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

Jüngere Untersuchungen beschäftigen sich beispielsweise mit der Erprobung neuer Kernmaterialien, Weiterentwicklungen der Hüllfolien zur Optimierung des Permeationsverhaltens sowie der Ausrüstung der Paneeloberflächen mit Nanobeschichtungen [INNOVIP 2022] sowie der Dauerhaftigkeit von VIPs [Sprengard et al. 2017]. Laufende Forschungen untersuchen die Eignung von Kernmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen bzw. haben eine Verringerung der Umweltwirkungen im Sinne der Herstellung eines nachhaltigeren Bauprodukts zum Ziel. Ein Projekt der IEA EBC behandelt insbesondere das Langzeitverhalten von VIPs und sogenannten Advanced Porous Materials (APM). Die bekannteste Gruppe der APM sind Aerogele. In vier Subtasks wurden der Stand des Wissens zu Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten (Subtask 1), spezielle Themen zur hygrothermischen und mechanischen Charakterisierung (Subtask 2), Anwendungsmöglichkeiten

und praktische Aspekte bei der Gebäudesanierung (Subtask 3) und Nachhaltigkeitsaspekte (Subtask 4) untersucht. Die Ergebnisse aller Subtasks sind unter <https://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=65> abrufbar.

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.

Advanced Porous Materials – APMs

Die als Stützkerne für VIPs verwendeten mikroporösen Dämmplatten auf der Basis von pyrogener Kieselsäure in Pulverform können auch ohne Umhüllung als sehr guter Dämmstoff verwendet werden. Dabei muss die Kieselsäure der anorganischen nichtbrennbaren Platten mit einer Hydrophobierung behandelt und mit Stützfasern versetzt in Plattenform gepresst werden. Seit einigen Jahren sind solche Platten auch beidseitig mit Deckschichten ausgerüstet auf dem Markt erhältlich, um die Zugfestigkeit der Platten und damit auch die Verarbeitbarkeit zu verbessern. Hersteller und Eigenschaften dieser Platten sind ebenfalls in den Berichten zum IEA Annex 65 beschrieben und können unter <https://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=65> abgerufen werden. Weitere Informationen sind auch unter <https://www.calostat.com/de> vorhanden.

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 Silikatbasis am häufigsten sind. Die Porengröße liegt im Nanometerbereich und die inneren Oberflächen können mit bis zu 1000 m² 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 Aerogel-Pulver in Vliesbeutel gefüllt. Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für lose Füllmaterialien liegen im Bereich von 0,018 W/(m·K) bis 0,020 W/(m·K). Für Dämmprodukte auf der Basis von Vliesen können Wärmeleitfähigkeitswerte von 0,013 W/(m·K) bis zu 0,017 W/(m·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. Eine Marktübersicht, Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Aerogelen und APM sowie Überlegungen zur Rezyklierbarkeit finden sich in [Sprengard et al. 2019] sowie den bereits genannten Berichten des IEA EBC Annex 65.



Abbildung 66: Aerogel Pulver in Polyestervlies-Hüllen als Wärmedämmstoff für Gebäude

Mit Aerogelen als Zuschlagsstoffe wurden auch Hochleistungsdämmputze entwickelt, die wesentlich besser dämmen als ein herkömmlicher Dämmputz. Solche Putze bieten 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 Putze.

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.

Multifunktionalität / Serielles Sanieren

Neben den vorgestellten Innovationsansätzen auf Materialebene, gibt es viele interessante Lösungen, die auf Systemebene, d. h. im Materialverbund oder auf Bauteilebene, entweder einzelne Eigenschaften optimieren, oder im Sinne der Multifunktionalität Anforderungen aus der Bauphysik (Wärme-, Feuchte-, Schall, und Brandschutz) mit anderen Vorteilen verbinden. Dies kann die Integration von Technik (bspw. Versorgungstechnik), aber auch die Montagefreundlichkeit betreffen.

Am Fraunhofer ISE sind eine Reihe von Forschungsprojekten für diesen Ansatz unter dem Begriff „Fassadenintegrierte Heizung, Lüftung, Klima“ zusammengefasst. Das Projekt RetroKit [Anonymus 2023a] beschreibt in diesem Zusammenhang ein

Design von vorgefertigten Fassadenkomponenten für die Gebäudesanierung. Dabei wurden Lüftungs-, Heizungs- und Sanitärsysteme, zusammen mit der Wärmedämmung der Fassade eingebaut. Der Zugang zum Gebäude erfolgt über spezielle Fensterelemente die in bestehende Fensteröffnungen eingebaut werden. Durch die Auslagerung von Elementen der Haustechnik in die Fassade und die Nutzung bestehender Durchbrüche für die Leitungsführung zwischen Innen und Außen soll die Belastung der Bewohner im Rahmen der Sanierung möglichst gering gehalten werden. Zudem spart die Montage Zeit und Kosten und die Bausubstanz bleibt weitgehend unangetastet.

Das beschriebene Konzept wird in den letzten Jahren auch vermehrt unter dem Begriff der seriellen Sanierung weiterentwickelt. Dahinter steht der Gedanke nicht nur einzelne Bauelemente zur Verfügung zu stellen, sondern ein vollständig aufeinander abgestimmtes Konzept zur Sanierung anzubieten. Dabei soll der Eingriff in die bestehende Bausubstanz so effizient wie möglich erfolgen, um die Bewohner nur minimal zu beeinträchtigen. Dies gelingt vor allem durch einen sehr hohen Vorfertigungsgrad der zu verbauenden Elemente. Durch Einsatz moderner Vermessungstechnik wird der aktuelle Zustand der Gebäudehülle erfasst und es werden darauf aufbauend vorgefertigte Fassadenelemente und Haustechnikmodule geplant die mit verhältnismäßig geringem Montageaufwand verbaut werden können. Die effiziente Planung und der Einsatz möglichst standardisierter Module soll die Sanierungskosten senken. Im besten Fall wird so eine warmmietenneutrale Sanierung möglich, bei der sich die Sanierungskosten durch die eingesparten Energiekosten decken.

Ein bereits vor mehr als zehn Jahren entwickeltes Beispiel in dieser Richtung ist die TES Energy Facade [Lattke et al. 2009] [Lattke und Ott 2011]. TES steht für Timber-based Element System. Dabei werden nach einem präzisen dreidimensionalen Aufmaß der vorliegenden Bestandssituation, großformatige Holzrahmenelemente gefertigt, die vor die bestehende Fassade gesetzt werden.

Das Projekt RenoZEB [Anonymus 2023b] entwickelte unter dem Begriff der Plug & Play Facade einen ähnlichen Ansatz. Auch hier werden Fassadenelemente mit integrierter Haustechnik vor die bestehende Außenwand gesetzt. Dabei können unterschiedlichste Gestaltungsmöglichkeiten, einschließlich der Integration von Photovoltaik, umgesetzt werden.

Energiesprong (www.energiesprong.de) ist ein Sanierungsprinzip, das aus den Niederlanden stammt und derzeit in Europa in vielen Ländern erprobt wird. Zentrales Element sind auch hier vorgefertigte Elemente für die Sanierung von Außenwänden und Dächern von Wohngebäuden auf der Basis von Holzbau-, Stahlleichtbau- oder Sandwichelementen. Das Energiesprong-Konzept bietet neben der Umsetzung der technischen Aspekte auch ein Finanzierungsmodell, das eine warmmietenneutrale Sanierung zum Ziel hat. Energetisch wird der NetZero-Standard in Sanierungen realisiert; damit erzeugt das Gebäude über das Jahr gerechnet so viel Energie für Heizung, Warmwasser und Strom, wie es benötigt.

Dabei wird die Sanierung in sehr kurzer Zeit auf der Baustelle realisiert, da die Elemente in Fabriken vorgefertigt werden. Dafür ist ein digitalisierter Bauprozess notwendig, der hochwertige, standardisierte Lösungen mit seriell vorgefertigten Elementen vorsieht. Wobei jedes Gebäude trotzdem individuell digital vermessen und die jeweiligen Elemente individuell auf Maß gefertigt werden. In modernen flexiblen Industriefertigungen sind auch bei Serienfertigung umfangreiche individuelle Anpassungen möglich, bspw. beim Erscheinungsbild der Gebäude oder bei Maßanpassungen im cm Bereich. Trotzdem sinken durch den hohen Grad an Vorfertigung und optimierte Prozesse die Baukosten und die Sanierungszeit verkürzt sich auf wenige Wochen, so dass die Bewohner nur noch minimal beeinträchtigt werden.



Abbildung 67 **Serielles Sanieren.** Links: Energiesprung [dena 2019]; Rechts: RenoZEB [Anonymus 2023b]

4.5 Umstrittene Entwicklungen

Wärmedämmende Anstriche

„Wärmedämmende“ Anstriche werden weltweit vertrieben. Ihre Dämmwirkung soll auf hohlen Mikrogaskügelchen 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 sind solche Produkte daher 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 problematischer 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. Neueste Entwicklungen zielen auf die Verbesserung mehrerer Eigenschaften gleichzeitig durch Integration in Bauteile oder Multifunktionalität.

Neben technischen Verbesserungen und Entwicklungen zur Optimierung der Effizienz der Produktionsprozesse ist in den letzten Jahren vor allem auch das Thema der Nachhaltigkeit für die Vermarktung und Akzeptanz der Nutzer sehr wichtig geworden. Im Zuge der in den nächsten Jahren neu zu erarbeitenden Mandate (Standardisation Request) für Wärmedämmstoffe müssen in diesem Sinne auch Anforderungen an die Deklaration von Nachhaltigkeitsaspekten erarbeitet werden. Dies ist im Anhang I der Bauproduktenverordnung in der Grundanforderung 7 (BWR 7) verankert, welche die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen adressiert. Die Nachhaltigkeit von Bauprodukten wird anhand einer Ökobilanz (LCA) nach ISO 14040 und ISO 14044 ermittelt und in Form einer Umweltdeklaration (EPD) nach EN 15804 dargestellt. In diesem Zusammenhang werden in Zukunft auch Aspekte zum Nachweis einer langen Nutzungsdauer weiter an Bedeutung gewinnen. Das Thema der Dauerhaftigkeit und die damit zeitlich, und bezüglich der Qualität der Produkte am Ende der Lebensdauer der Primärnutzung als Dämmstoff, verbundene Frage des Rückbaus, der Wiederverwendung, des Recyclings und letztlich der Entsorgung bzw. thermischen Verwertung ist ein wesentlicher Punkt der gemäß den Vorgaben des Green Deal und der Circular Economy Strategie definierten Handlungsfelder. Eine zuverlässige und umfassende Antwort auf die Frage der Dauerhaftigkeit von Wärmedämmstoffen könnte somit zukünftig ein wichtiges Auswahlkriterium für die Anwender werden.

Anforderungen für die Energiewende

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 Reduzierung der Wärmeverluste der Hülle durch Verbesserungen des Wärmeschutzes. 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. Hier setzt beispielsweise das Konzept des individuellen Sanierungsfahrplans iSFP der dena und der Energieberaterverbände an.

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 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, der Erzeugung von Treibhausgasen 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 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 Erdgas 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 neben der Verbesserung der Energieeffizienz der gedämmten Konstruktionen in einer der für das elementare Bedürfnis der Menschen wichtigen

Funktion; nämlich der Herstellung eines wohnhygienisch einwandfreien und behaglichen Raumklimas. Dies betrifft sowohl den Fall des winterlichen als auch des sommerlichen Wärmeschutzes. Diese Sicherstellung der elementaren Bedürfnisse des Menschen wird jedoch im Rahmen einer Nachhaltigkeitsbewertung kaum berücksichtigt. Untersucht wird vor allem die Wirkung der Dämmstoffe auf die Reduzierung des Energiebedarfs für Heizung, Klimatisierung und Gebäudetechnik und damit die Reduzierung der klimaschädlichen Emissionen. Dem Herstellungsaufwand für die Dämmstoffe und energieeffizienten Baustoffe (energetisch, stofflich und in ihren Umweltwirkungen) für die Produktion wird der Nutzen, nämlich die eingesparte Heiz- oder Kühlenergie, gegenübergestellt. Berechnet wird dann neben der wirtschaftlichen Amortisationszeit auch eine energetische Amortisation und die Amortisationszeit für die bei der Herstellung, der Erneuerung und der Entsorgung anfallenden Treibhausgase. Diese Werte werden dann zum Vergleich verschiedener Materialien herangezogen. Bezieht man energieeffiziente Mauerwerksprodukte in die Überlegung mit ein, deren Hauptaufgabe die Erstellung von Außenwänden mit statischen, raumumschließenden und schützenden Aufgaben ist, dann springt eine rein energetische oder auch energetisch-wirtschaftliche Betrachtung in der Nachhaltigkeitsbetrachtung zu kurz.

Daher werden die möglichen Wechselwirkungen kategorisiert und auf drei wesentliche Schutzziele herunter gebrochen, 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 Schutzzielen 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].

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) vergeben. Die Berechnungsmethoden für die ökologischen Kennzahlen zu den betrachtenden Szenarien (Herstellung, Bauprozess, Nutzungsphase, Entsorgung/Recycling) sind in der EN 15804 beschrieben, so dass die Ergebnisse unterschiedlicher EPDs europaweit einheitlich ermittelt werden und damit vergleichbar sind.

Gemäß der überarbeiteten Version der EN 15804 (DIN EN 15804:2020-03) muss nun auch die Entsorgungsphase C1 –C4 verpflichtend abgebildet werden. Weiter unterscheidet der aktuelle Entwurf nun in einem gegenüber der Fassung von 2012 neu eingeführten Anhang C, hinsichtlich des für die Wirkungskategorie Klimawandel relevanten Treibhauspotenzials (GWP) in drei Kategorien. Diese sind das Treibhauspotenzial fossile Energieträger und Stoffe (GWP-fossil), Treibhauspotenzial biogen (GWP-biogen) und das Treibhauspotenzial Landnutzung und Landnutzungsänderung (GWP-luluc). Während früher also nicht direkt ersichtlich war, welche Menge an CO₂-Äquivalent der Produktion (positiver Beitrag) und den Rohstoffen (negativer Beitrag) zuzuordnen ist, wird nun die Senke des biogen gebundenen Kohlenstoffs explizit ausgewiesen. Die damit gewonnene Transparenz hinsichtlich der Wirkung von Quellen und Senken während unterschiedlicher Lebensphasen ermöglicht eine differenziertere Betrachtung hinsichtlich der ökologischen Wirkung unterschiedlicher Produktgruppen.

Eine EPD enthält außerdem 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 und der Entsorgung 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). Soll der Vergleich auf Basis der nicht-erneuerbaren oder gesamten Primärenergie erfolgen, so ist auch der zum Aufrechterhalten der Raumtemperatur eingesetzte Energieträger zu berücksichtigen – ggf. auch unter Ansatz weiterer Energiequellen und Wirkungsgrade der Anlagen.

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. Wobei die Bauteilbetrachtung hier nur ein Näherungsverfahren sein kann, unter Vernachlässigung aller anderen für Energieverluste und Energieeffizienz maßgeblichen Faktoren, wie Luftdichtheit und Lüftungswärmeverluste, interne und solare Gewinne, Effizienz des Heiz- und Warmwassersystems und gewählter Energieträger.

Bei der Bauteilbetrachtung wird vor allem deutlich, wie die Dämmschichtdicke die Transmissionswärmeverluste reduziert, weswegen sie für eine vereinfachte Betrachtung ideal ist. 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 68). Der Einfluss der Dämmschichtdicke auf die Höhe der Wärmeverluste ist also nicht linear, sondern regressiv ausgebildet.

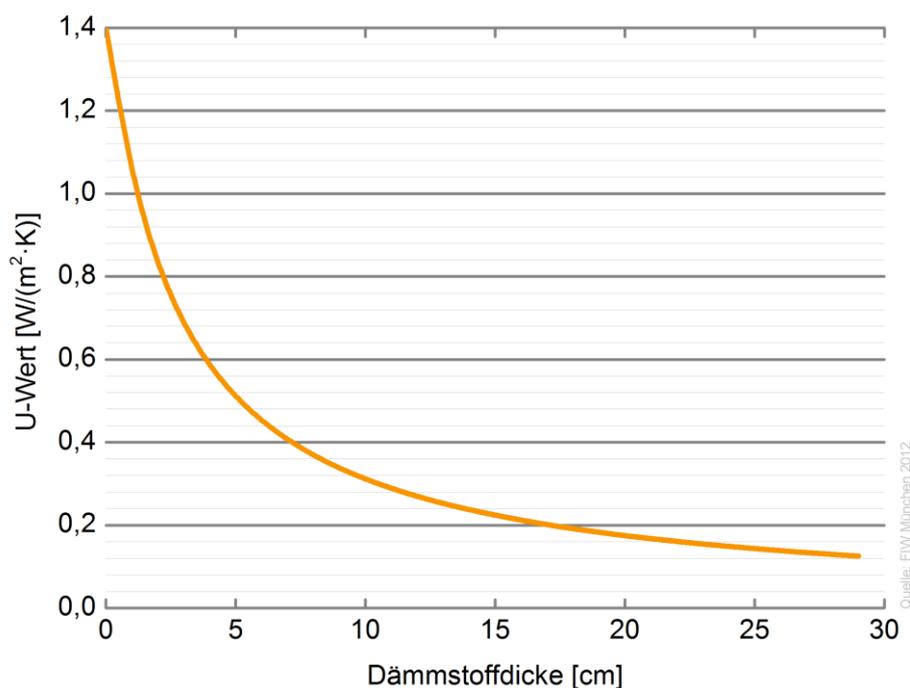


Abbildung 68: Einfluss der Dicke des Dämmstoffs ($\lambda = 0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) auf den U-Wert eines Wandbauteils mit einem U-Wert des Rohbauteils von $1,4 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

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. Dazu kommt noch die wärmedämmende Wirkung der bestehenden Wand. War diese schon vor der Dämmmaßnahme nicht allzu schlecht, dann sind auch die Einsparungen mit dem ersten Zentimeter Zusatzdämmung niedriger. Daher müssen bei solchen Betrachtungen immer die Ausgangs- und Zielzustände der Bauteile berücksichtigt werden.

Graue Energie und Treibhausgasemissionen für Dämmmaßnahmen

Die nachfolgende Zusammenstellung ist der Studie "Graue Energie und Graue Emissionen von Dämmstoffen im Vergleich zum Einsparpotential" entnommen, die das FIW München im Auftrag mehrerer Hersteller-Verbände von Wärmedämmstoffen und energieeffizienten Baustoffen für die Gebäudehülle angefertigt hat. Die Studie kann unter dem folgenden Link heruntergeladen werden:
https://buveg.de/wp-content/uploads/2021/09/202107019_FIW_GraueEnergie_vs._Einsparpotential.pdf

Als Graue Energie wird der kumulierte nicht erneuerbare Primärenergiebedarf für die Rohstoffgewinnung, Herstellung, Transport, Lagerung und Entsorgung eines

Produktes bezeichnet. Die im Rahmen dieser Prozesse freiwerdenden Treibhausgasemissionen bezeichnet man als Graue Emissionen. Diese Begrifflichkeiten sind in Deutschland jedoch weder normativ noch anderweitig definiert.

Um die Aufwendungen für den Primärenergiebedarf (gesamt) und den Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen, die sog. Graue Energie (nicht erneuerbar), sowie die entstehenden Treibhausgasemissionen (THG) für die Herstellung und den Rückbau von Dämmungen valide bewerten zu können, wurden die Umweltproduktdeklarationen (kurz: EPD für Environmental Product Declaration) verschiedener Dämmprodukte herangezogen. Damit wurden anhand unterschiedlicher Indikatoren die Einflüsse auf die Umwelt des jeweiligen Produktes über dessen gesamten Lebenszyklus bewertet.

In Abbildung 69 sind die Werte wichtiger Datenquellen (Ökobaudat, Hersteller, Verbände) für die Herstellung und den Rückbau (Lebenszyklusphasen A1 - A3, C3 und C4), für die Primärenergien sowie die Treibhausgasemissionen (Graue Emissionen) für Dämmstoffe aus EPS, PUR, XPS und Mineralwolle dargestellt. Die Daten wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf einen Dämmwert R von 1 (m²·K/W) normiert.

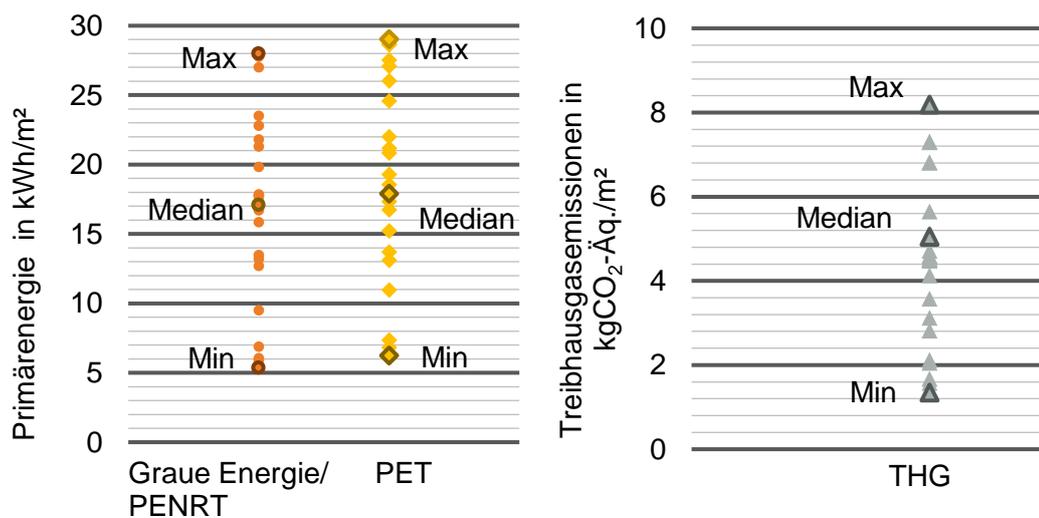


Abbildung 69: Ökobilanzdaten für Graue Energie (PENRT) und Primärenergie gesamt (PET), links, und Treibhausgasemissionen (THG, rechts) für die Herstellung und den Rückbau von Dämmmaßnahmen mit gleicher Dämmwirkung pro m²

Mit Hilfe dieser Auswertungen kann ein typischer Bereich für die drei zur Bewertung herangezogenen Umweltindikatoren definiert werden. Um diesen Bereich in den nachfolgenden Berechnungen abzubilden, wurde je Indikator der Minimal-, Maximal- und der Median-EPD- Datensatz ausgewählt.

Neben den Auswirkungen der Dämmstoffe auf die Umwelt müssen die thermischen Eigenschaften eines Bauteils vor und nach der Dämmmaßnahme definiert werden, um die erforderliche Dämmstärke zu ermitteln. Diese hängt wiederum von der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs ab. In Abbildung 70 ist der Zusammenhang der erforderlichen Dämmstärke in Abhängigkeit vom zu erreichenden U-Wert nach der

Dämmmaßnahme und der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs in $W/(m^2 \cdot K)$ für ein Bauteil mit einem U-Wert von $0,8 W/(m^2 \cdot K)$ dargestellt. Dies entspricht einer unsanierten Konstruktion mit einem Baujahr zwischen 1987 und 1995.

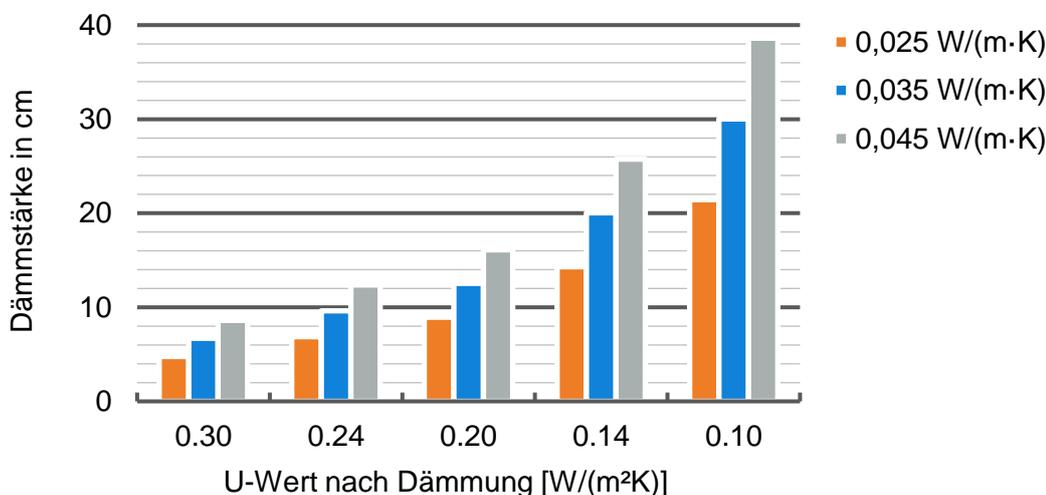


Abbildung 70: Erforderliche Dämmstärken bei einem Bestands-U-Wert von $0,8 W/(m^2 \cdot K)$ in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs

Für die jeweils erforderliche Dämmstärke können die Umweltauswirkungen der Grauen Energie und der Treibhausgasemissionen berechnet werden. Die gewählten Minimal, Maximal und Median-Werte für eine Dämmmaßnahme mit einem Bestands- U-Wert von $0,8 W/(m^2 \cdot K)$ sind in Abbildung 71 in Abhängigkeit vom gewählten Ziel-U-Wert nach der Sanierung abgebildet. Dabei wurde eine Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs von $0,035 W/(m \cdot K)$ angenommen.

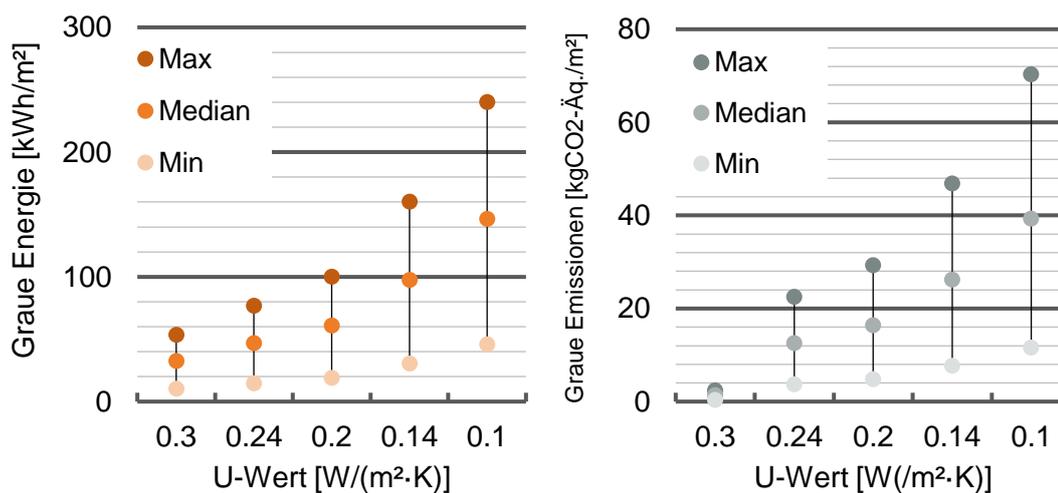


Abbildung 71: Bandbreite von Grauer Energie und Grauen Emissionen in Abhängigkeit des erzielten U-Wertes nach Dämmmaßnahme bei einem Bestands-U-Wert von 0,8 W/(m²·K)

Einsparungen durch Dämmmaßnahmen

Für die Berechnung der Heizenergieeinsparungen durch eine Dämmmaßnahme und um die daraus erzielbaren Einsparungen an Primärenergie und Treibhausgasemissionen zu berechnen, wird ein vereinfachter Ansatz unter alleiniger Berücksichtigung der Transmissionswärmeverluste angewendet. Lüftungswärmeverluste sowie interne und solare Gewinne werden dabei nicht berücksichtigt. Mit nachfolgender Formel können die Heizenergieeinsparungen pro m² Bauteil berechnet werden.

$$Q = U_1 \times F_{Gt,1} - U_2 \times F_{Gt,2}$$

wobei

- U₁ U-Wert vor der Dämmmaßnahme in W/(m²·K)
- U₂ U-Wert nach der Dämmmaßnahme in W/(m²·K)
- F_{GT,1} Gradtagszahlfaktor 84 kWh/a
- F_{GT,2} Gradtagszahlfaktor 66 kWh/a

Durch Anwendung unterschiedlicher Gradtagszahlfaktoren F_{Gt} wird der Tatsache Rechnung getragen, dass in der Regel durch eine Dämmmaßnahme die Raumtemperatur und die Heizgrenztemperatur ansteigen sowie die Heizperiode verkürzt wird.

In Abbildung 72 sind die durch diese Formel berechneten Heizenergieeinsparungen pro m² Bauteil in Abhängigkeit der U-Werte vor und nach der Dämmmaßnahme dargestellt.

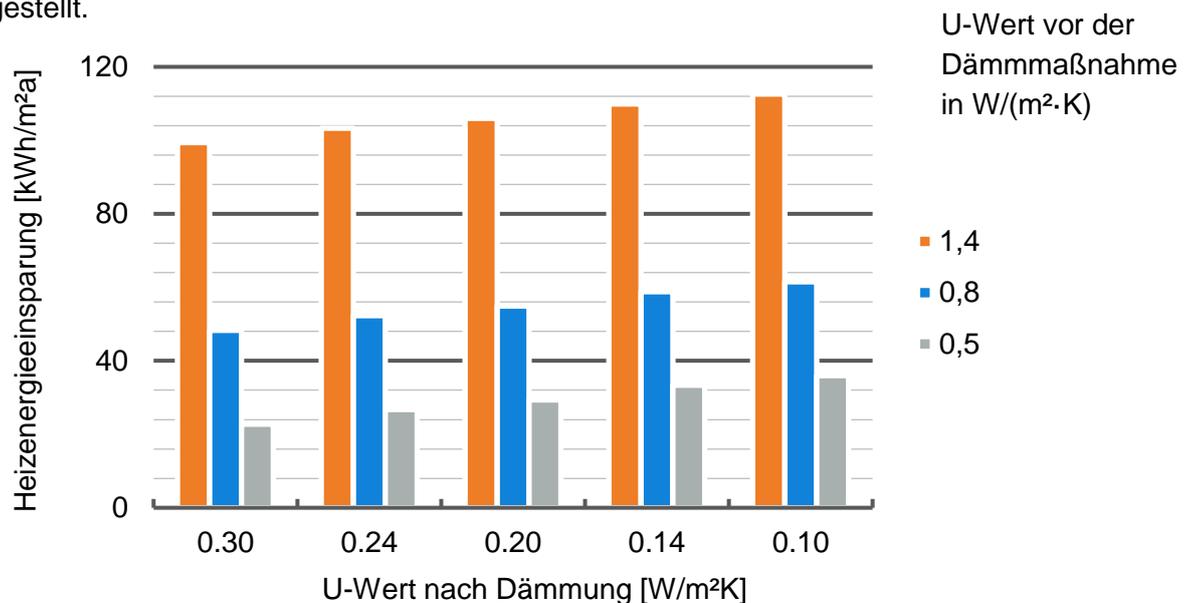


Abbildung 72: Mögliche Heizenergieeinsparungen pro m² Bauteil in Abhängigkeit des U-Wertes vor und nach der Dämmmaßnahme

Für die Umrechnung dieser Einsparungen in Primärenergie gesamt und nicht erneuerbar sowie der Treibhausgasemissionen muss der Energieträger für die Beheizung berücksichtigt werden. Dafür werden die Heizenergieeinsparungen mit den entsprechenden Faktoren aus nachfolgender Tabelle 17 multipliziert. Auch muss der Wirkungsgrad der Heizungsanlage bzw. die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe berücksichtigt werden.

Tabelle 17: Primärenergiefaktoren (f_P) gesamt und nicht erneuerbar sowie Kennwerte für die Berechnung der Treibhausgasemissionen für verschiedene Energieträger

Energie-träger	Wirkungsgrad Anlage ¹ $\eta[-]$	f_P gesamt ¹ [-]	f_P nicht erneuerbar ² [-]	Treibhausgas-emissionen ² [g/kWh]
Gas	0,9	1,1	1,1	240
Öl	0,9	1,1	1,1	310
Fernwärme	1,0	0,7	0,6	200
Pellets	0,8	1,2	0,2	20
Wärmepumpe (Strom)	4,0	2,3	1,8	560

¹ [BMWi 2020]

² Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Auswertung Aufwand zu Einsparungen für verschiedene Bestandssituationen

Durch die beschriebene Herangehensweise können die Aufwendungen für den Primärenergiebedarf (*gesamt*) und den Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen (Graue Energie) sowie die entstehenden Treibhausgasemissionen (THG) für die Dämmschicht in Abhängigkeit von der Dämmqualität des Bauteils vor und nach der Sanierung sowie die dadurch erzielbaren Einsparungen in Abhängigkeit des Energieträgers ermittelt werden. Dabei werden drei verschiedene Bestandssituationen betrachtet sowie ein Sanierungsziel auf Gebäudeenergiegesetz (GEG)-Niveau mit einem U-Wert von 0,24 W/(m²·K). Nachfolgend sind die angenommenen U-Werte für die Bestandssituationen und eine Zuordnung zur jeweiligen Baualterklasse zusammengefasst:

- U = 1,4 W/(m²·K): Baujahr vor 1978
- U = 0,8 W/(m²·K): Baujahr zwischen 1978 und 1995
- U = 0,5 W/(m²·K): Baujahr ab 2002

In Abbildung 73 sind die Ergebnisse für die Primärenergie gesamt (PET) und die Graue Energie (PENRT) zusammengestellt.

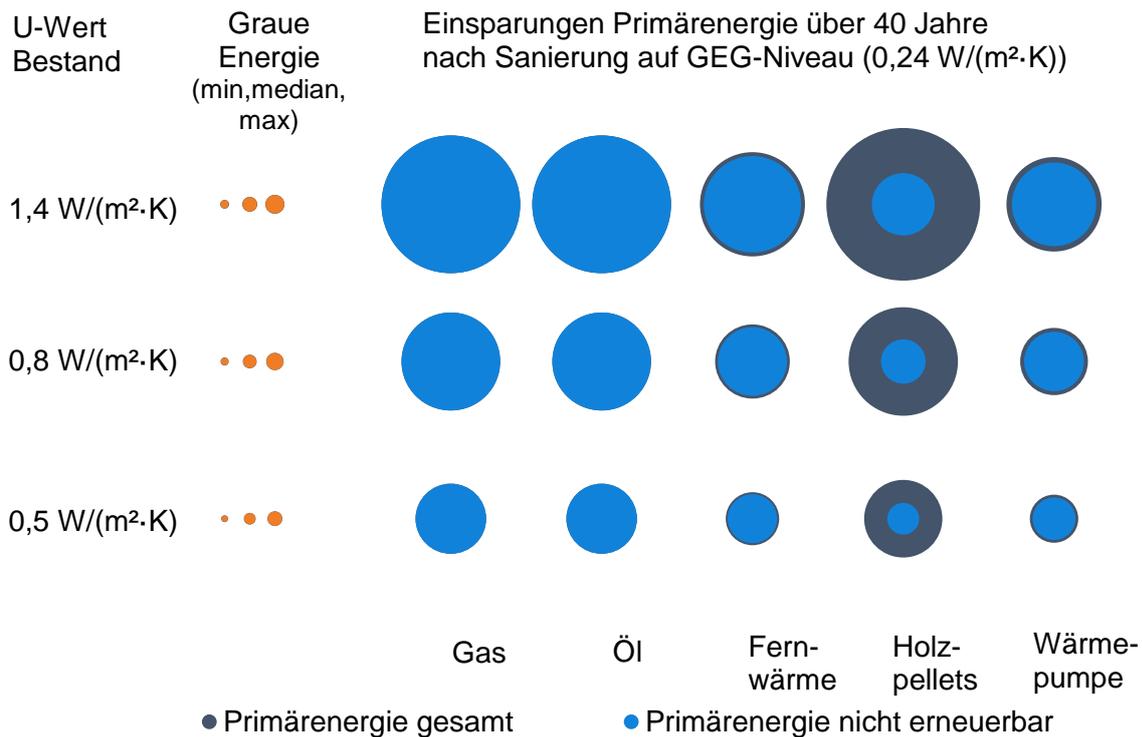


Abbildung 73: Vergleich Aufwand zu erzielbaren Einsparungen an Primärenergie gesamt und nicht erneuerbar über 40 Jahre bei Sanierung auf einen U-Wert von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ für verschiedene Bestandssituationen

Die Ergebnisse PET und PENRT sind für die einzelnen Varianten überlagert abgebildet. Die Aufwendungen für die Erstellung der Dämmschicht werden jeweils mit einem Minimal-, Median- und Maximal-Wert angegeben. So kann die Bandbreite der verschiedenen am Markt verfügbaren Dämmstoffe dargestellt werden (vgl. Abbildung 69). Aufgrund der Größenverhältnisse innerhalb dieser Darstellung sind die Unterschiede zwischen PET und PENRT bei den Aufwendungen für die Dämmung nicht erkennbar. Dem gegenüber sind die über eine Nutzungsdauer von 40 Jahren erzielbaren Einsparungen für verschiedene Energieträger dargestellt. Generell lässt sich der Zusammenhang ablesen, dass mit schlechterem Ausgangszustand höhere Dämmstärken und somit auch höhere Aufwendungen erforderlich sind. Gleichzeitig sind dort aber auch größere Einsparungen erzielbar. Für alle betrachteten Bestandsvarianten sind die Einsparungen für alle Energieträger für PET sowie PENRT deutlich größer als die für die Erstellung der Dämmschicht erforderlichen Aufwendungen.

Die Energieträger Gas und Öl sind zu 100 % nicht erneuerbar, daher sind die Ergebnisse für die Primärenergie gesamt und nicht erneuerbar gleich groß. Beim regenerativen Energieträger Holzpellets sind die Unterschiede am größten.

In Abbildung 74 sind die Ergebnisse für die Treibhausgasemissionen dargestellt. Prinzipiell sind die Zusammenhänge und Verhältnisse mit den Primärenergiedarstellungen vergleichbar. Deutliche Abweichungen gibt es für die regenerativen Holzpellets. Aufgrund der deutlich geringeren Treibhausgasemissionen pro kWh Heizenergieeinsparung sind die Emissionseinsparungen für diesen Energieträger im

Vergleich deutlich geringer. Doch auch hier überwiegen die Einsparung gegenüber den Aufwendungen deutlich.

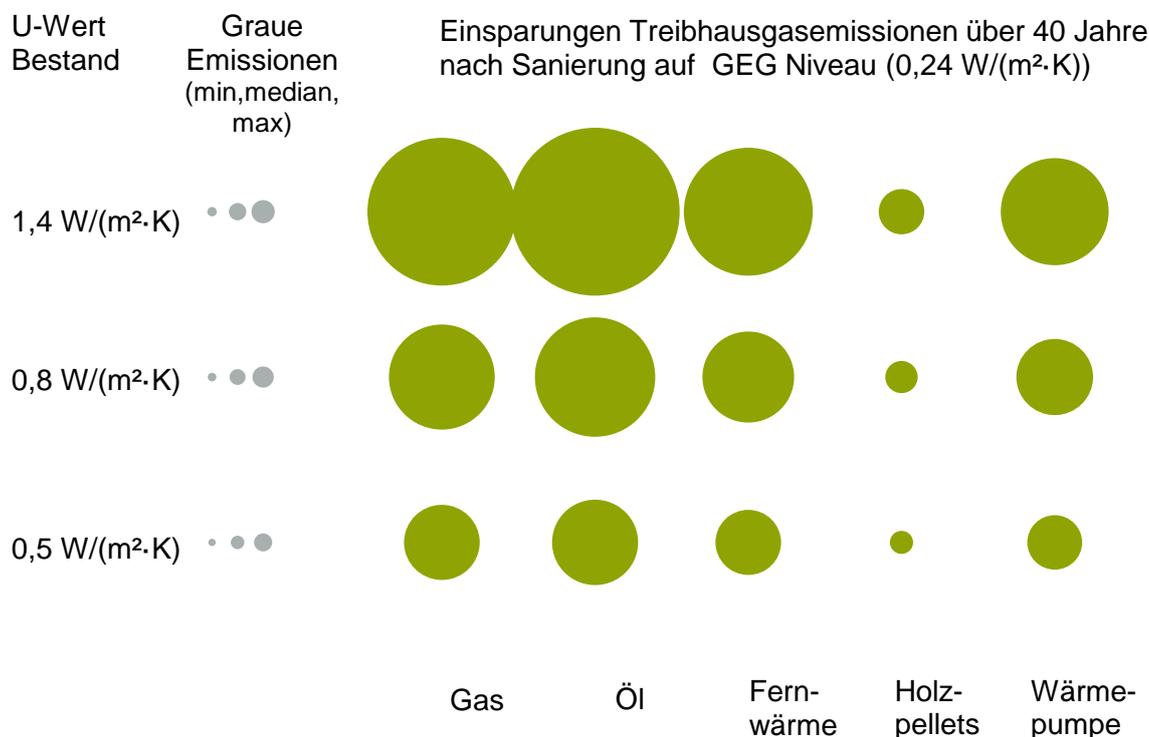


Abbildung 74: Vergleich Aufwand zu erzielbaren Einsparungen an THG über 40 Jahre bei Sanierung auf einen U-Wert von 0,24 W/(m²·K) für verschiedene Bestandssituationen

Amortisationszeiten

Aus den zuvor dargestellten Ergebnissen kann die energetische Amortisationszeit berechnet werden. Dies ist die Zeitspanne bis zu deren Erreichen die für die Erstellung der Dämmschicht aufgewendete Primärenergie durch die dadurch erzielbaren Einsparungen wieder ausgeglichen ist. In gleicher Weise kann eine Amortisation für die Treibhausgasemissionen errechnet werden. Diese sind in den nachfolgenden Abbildungen im Verhältnis zu einer Nutzungsdauer von 40 Jahren dargestellt. Für die Aufwendungen wurden jeweils die Medianwerte der Dämmstoffe angesetzt.

Prinzipiell werden die Amortisationszeiten mit zunehmender energetischer Qualität des Bestands etwas länger. Die ermittelten Amortisationszeiten variieren dabei für die drei betrachteten Umweltindikatoren für den jeweiligen Energieträger kaum. Eine Ausnahme stellen auch hier die Holzpellets dar. Für regenerative Energiequellen mit vergleichsweise geringem nicht erneuerbarem Anteil und Treibhausgasemissionen sind größere Zeitspannen zur Amortisation der Dämmmaßnahme nötig. Im Rahmen dieser beispielhaften Betrachtung wurden die längsten Amortisationszeiten für Holzpellets und einem Bestands-U-Wert von 0,5 W/(m²·K) ermittelt. Doch selbst für dieses ungünstige Szenario sind die energetischen Amortisationszeiten im Vergleich zur Lebensdauer einer Dämmung von 40 Jahren und mehr sehr gering.

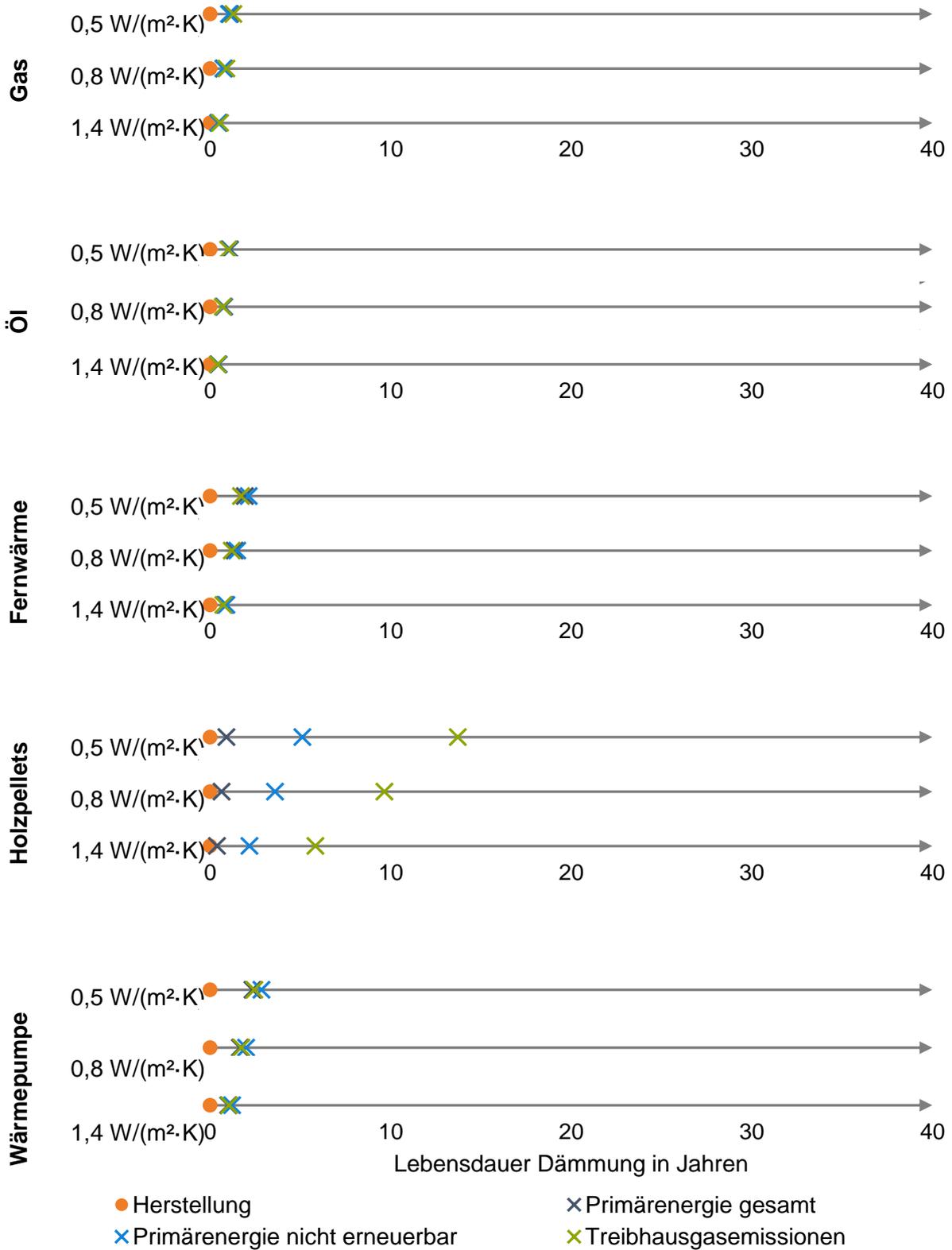


Abbildung 75: Zeitpunkte der Amortisation der Primärenergie gesamt, nicht erneuerbar und der Treibhausgasemissionen für verschiedene Bestandssituationen und Energieträger bei Sanierung auf GEG-Niveau (U-Wert = 0,24 W/(m²·K))

Die beispielhaften Berechnungen im Rahmen dieser Studie belegen: Dämmmaßnahmen sind aus nachhaltiger und gesamtenergetischer Sicht immer ein Gewinn. Diese Aussage ist unabhängig vom energetischen Zustand des Bauteils vor und nach der Dämmmaßnahme sowie vom Energieträger, welcher für die Beheizung verwendet wird. Im Laufe einer typischen Lebensdauer einer Dämmmaßnahme von 40 Jahren und mehr sind die erzielbaren Einsparungen immer größer als die für die Dämmstoffherstellung notwendigen Aufwendungen. Dies gilt für alle etablierten Dämmstoffe, welche im Rahmen dieser Studie berücksichtigt wurden.

Mit der Ende Juni 2021 beschlossenen Änderung des Klimaschutzgesetzes will Deutschland bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral werden. Bereits bis zum Jahr 2030 sollen die Emissionen um 65 % gegenüber 1990 gesenkt werden. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, wurden die für den Gebäudebereich und andere Sektoren bislang geltenden CO₂- Minderungsziele angepasst.

Neben Effizienzsteigerung und Energieeinsparung ist auch die Umstellung auf hauptsächlich erneuerbare Energiequellen ein wichtiger Schritt zur Zielerreichung. Dadurch wird nicht nur der Verbrauch an Primärenergie und die dadurch entstehenden Treibhausgasemissionen für beispielsweise die Beheizung von Gebäuden eingespart. Diese Entwicklung der Dekarbonisierung der Energieversorgung wird sich auch positiv auf die Ökobilanz von Bauprodukten wie beispielsweise Dämmstoff auswirken.

Bei einer Nutzung von vermehrt regenerativen Energiequellen in der Produktion werden die Graue Energie und die Grauen Emissionen für die Herstellung von Dämmung gesenkt werden.

Es ist daher zu erwarten, dass auch in Zukunft die durch Dämmmaßnahmen erzielbaren Einsparungen größer sind als die Aufwendungen zur Herstellung (Graue Energie und Graue Emissionen) des Dämmstoffs.

Erzeugungsbedingungen von Energie und Rohstoffen zur Herstellung

Für die oben 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 Rohstoffe 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. 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.

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.

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

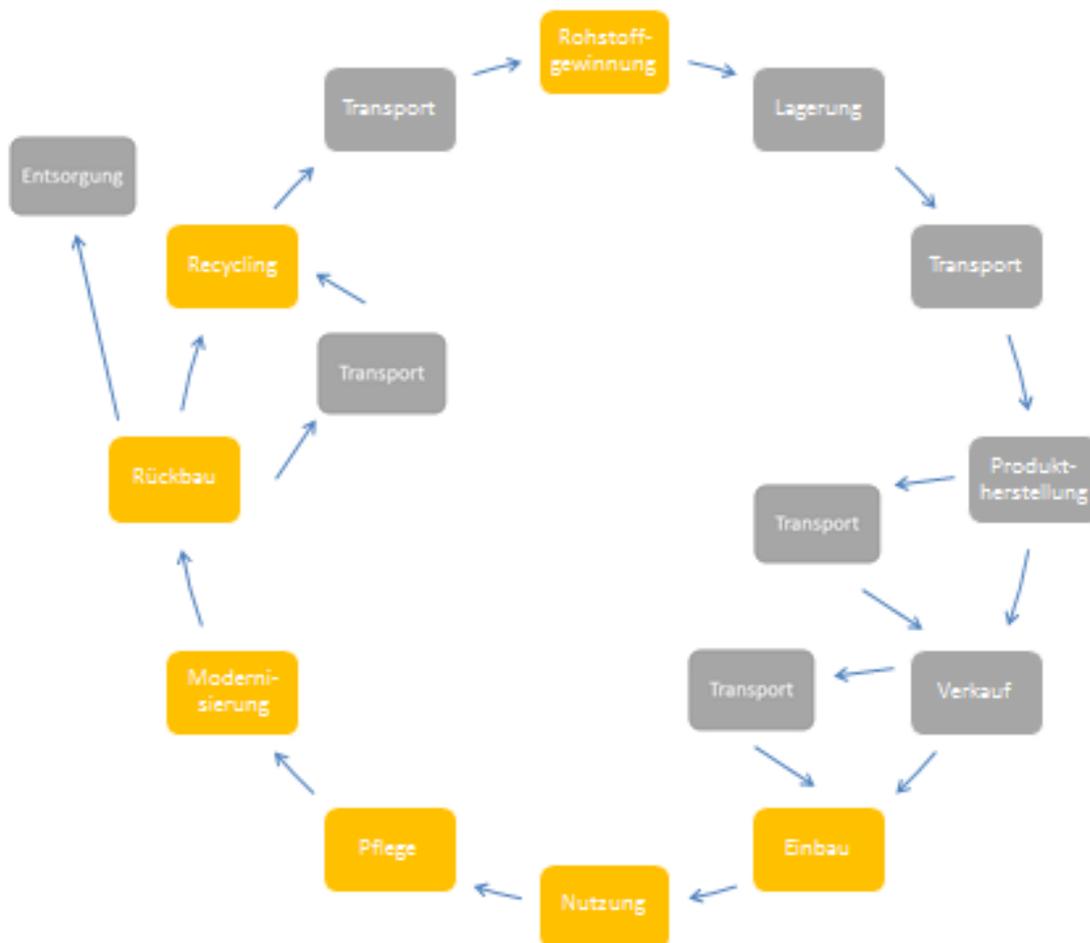


Abbildung 76: Lebenszyklus eines Dämmstoffes von der Rohstoffgewinnung, über die Herstellung bis hin zum Rückbau / Recycling

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, um beispielsweise Lock-In Effekte bei gedämmten Bauteilen zu vermeiden. Wird jetzt nur halbherzig saniert und gedämmt, dann ist das Bauteil für höherwertige Sanierungen erst einmal „verloren“, da es unwahrscheinlich ist, dass das modernisierte Bauteil bis zum angestrebten Zeitpunkt der Treibhausgasneutralität im deutschen Gebäudebestand (derzeit Zieljahr 2045) noch einmal angefasst wird.

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 derzeit sehr stark schwankenden Preisen für Energie und der anziehenden CO₂-Bepreisung 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.

Kosten für Dämmstoffe unterliegen teilweise erheblichen regionalen und zeitlichen Schwankungen. Durch die seit 2022 bestehende Energiekrise wurde die Produktion von bestimmten Produktgruppen nochmal deutlich teurer. 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 Wand- und Deckengefäße eingeblasen 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. Auch wenn die Zahlen die Kostensteigerungen insbesondere der letzten Jahre nicht abbilden, so sind sie doch eine detaillierte Grundlage für die Ermittlung des Aufwands bei unterschiedlichen Sanierungsansätzen. Eine Kostenkorrektur der Preise von 2011 kann über die Baupreisentwicklung und die Regionalfaktoren, bspw. unter Ansatz der Steigerungsraten und Faktoren des BKI erfolgen.

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 Mineralwolleplatten. 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 instandgehalten 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 Aufdopplung 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 18). 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 18: 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. 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. Um die Attraktivität zu verbessern, sind deshalb unterstützende Maßnahmenpakete durch die Politik nötig.

Auf der Seite der Einsparungen hat sich jedoch durch die gerade in den letzten Jahren zu sehenden Energiekostensteigerungen auch eine deutliche Veränderung ergeben. Die Energiekosten sind seit dem dritten Quartal 2021 stark gestiegen. Der Anstieg liegt dabei noch deutlich über dem ohnehin schon hohen allgemeinen Preisanstieg und beträgt für die Energiekosten im Juli 2022 im Vergleich zum Juli 2021 42,9 % [Destatis 2022]. Dazu kommt noch die begonnene Bepreisung der CO₂-Emissionen im Brennstoffhandelsgesetz. Beide Faktoren werden Einsparungen an Energie „wertvoller“ machen und die Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen verbessern. Dieser Verbesserung entgegen, stehen aber auch die deutlich gestiegenen Kosten für die Umsetzung der Maßnahmen, allen voran die seit 2019 zu sehenden Preissteigerungen bei den Materialien.

Die wieder eingeführte Möglichkeit der steuerlichen Abschreibung von energetischen Modernisierungsmaßnahmen verbessert gerade für Eigentümer, die ihre Immobilie nicht selbst nutzen, die Investitionsbereitschaft, da auf diese Weise der private Investor direkter an den getätigten Aufwendungen partizipiert. 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 geringer ausfallen können und damit u. U. zunächst durch die Mietpreiserhöhungen überkompensiert werden. Ein Vorteil gegenüber der Mietsituation in energetisch nicht modernisierten Gebäuden stellt sich u. U. erst nach langer Zeit ein. Derzeit werden andere Modelle zur fairen Lastenverteilung der Kosten zwischen Vermieter und Mieter untersucht, die im Idealfall Sanierungsbereitschaft stimulieren und gleichzeitig Mieter hinsichtlich der Wohnkosten entlasten. Dass das nicht ohne staatliche Unterstützung gehen wird, steht außer Frage. Weitere Informationen zu den untersuchten Modellen (bspw. Teil-Warmmietenmodelle) finden sich unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/kosten-der-energetischen-sanierung-von>.

Allen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten geführten Rentabilitätsbetrachtungen muss zunächst die Frage nach der richtigen Bezugsgröße zu Grunde gelegt werden. 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. Diese Kosten werden als energiebedingte Mehrkosten bezeichnet.

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-Nutzens erfolgen müsste. Ein Beispiel hierfür wäre der Austausch eines alten Fensters mit altersbedingt undichter Falzausbildung gegen ein neues, dichtes 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. Trotz steigender Energiepreise und der Einführung einer Bepreisung der Treibhausgasemissionen werden auch weiterhin förderpolitische Maßnahmen gebraucht, um die Wirtschaftlichkeit von energetischen Sanierungsmaßnahmen zu verbessern.

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 mitberücksichtigt 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 gegenübersteht, 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 flüchtige Inhaltsstoffe, während des Zuschnitts 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 $C_6 - C_{16}$) 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 wirkungsbezogener, begründeter Wert, bei dessen Erreichen besonders empfindliche Personen bei Dauerexposition 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.

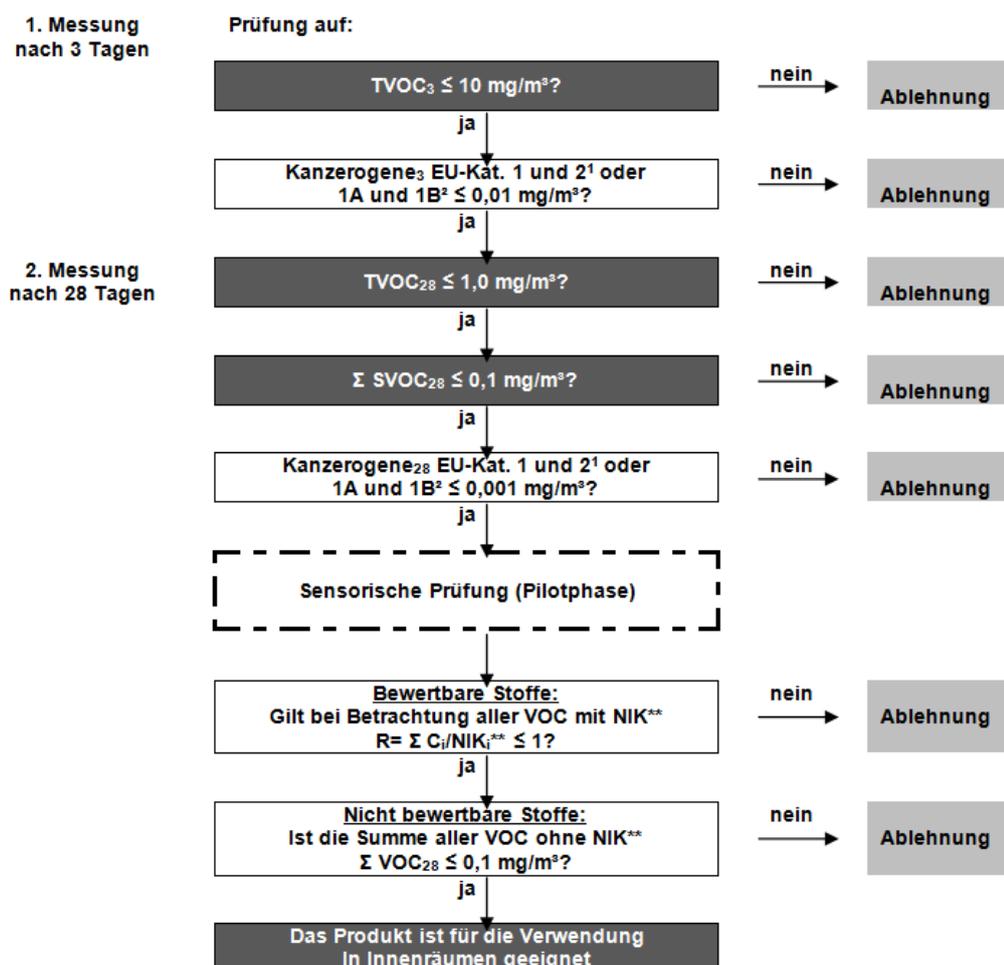
Die so ermittelten flächenspezifischen Emissionsraten E_{fl} [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] eines Bauproduktes werden auf eine Konzentration C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] umgerechnet, welche die Raumdimensionierung V [m^3], den zu erwartenden Luftaustausch n [$1/\text{h}$] und die emittierende 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 $0,5$ [$1/\text{h}$] 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 77 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 $\geq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 > C16 – C22

**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 77: 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 $\leq 10 \text{ mg/m}^3$ und nach 28 Tagen bei $\leq 1 \text{ mg/m}^3$. 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 \sum 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 Arbeitsplatz-Konzentration) 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 Raumluftkonzentrationen C_i ins Verhältnis zum jeweiligen NIK_i gesetzt. Der Quotient muss unter dem Wert 1 bleiben. Werden mehrere Verbindungen mit Konzentrationen $\geq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $\leq 0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 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 Innenraumluft sowie an Boden und Grundwasser definiert, die auch in Normen hinterlegt werden sollen. Änderungen an den harmonisierten Normen zu Bauprodukten sind jedoch derzeit schwierig umzusetzen. Eine Verbesserung bzw. Neubewertung wird sich daher sehr wahrscheinlich bis zum Vorliegen des Standardization Requests für Dämmstoffe verzögern.

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 beigegeben. 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 dem bis 2013 eingesetzten 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 (Innenraumlufte, 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 Innenraumlufte 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 19 die Eigenschaften und Umweltwirkungen einiger häufig eingesetzter Flammschutzmittel zusammengestellt. Dabei wurde aus den wichtigsten Stoffgruppen jeweils ein typisches Flammschutzmittel ausgewählt.

Tabelle 19: Eigenschaften und Umweltwirkungen ausgewählter Flammschutzmittel (Quelle: [Leisewitz et al. 2000], Aktualisierungen und Ergänzungen entsprechend Hersteller-/Literaturangaben)

Flammschutzmittel	HBCD Hexabromcyclodecan	Polymer-FR	TCPP Tris(chlorpropyl)phosphat	APP Ammoniumpolyphosphat	ATH Aluminiumtrihydroxid	Borax Natriumborat-decahydrat
Stoffgruppe	Halogenbasiert	Halogenbasiert	Organisch phosphorbasiert	Anorganisch phosphorbasiert	Mineralisch	Andere
Wirkprinzip	Chemisch	Chemisch	Chemisch Physikalisch	Physikalisch	Physikalisch	Physikalisch
Bindung an das Substrat	Additiv	Reaktiv	Additiv	Additiv	Additiv	Additiv
Anwendungsgebiet	Inzwischen verboten	EPS, XPS	PU	Holzfasern	Allgemein Kunststoffe	Zellulose, Holzfasern
Persistenz	Persistent	Nicht nachgewiesen	Persistent	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Ubiquitär vorhanden
Bioakkumulierend	Stark bioakkumulierend	Nicht nachgewiesen	Nicht bioakkumulierend	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Ubiquitär vorhanden
CMR ¹⁾	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Nein	Nicht nachgewiesen	Nicht nachgewiesen	Reproduktionstoxisch
Ökotoxizität	Für aquatische Lebewesen	Nicht nachgewiesen	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 19 gelisteten Flammschutzmittel wie folgt dar.

Zu den Stoffen, die 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. Seit dem 21.08.2015 gilt hierfür eine Zulassungspflicht. Bereits seit Mai 2013 wurde 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], verbunden mit einem weltweiten Herstellungs- und Verwendungsverbot. Auch wenn 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 festgeschrieben wurde haben trotzdem alle Hersteller von EPS und XPS bereits seit 2013 den HBCD-Ersatzstoff Polymer-FR verwendet (CAS Nummer 11959 78-93-8).

Bei Polymer-FR handelt es sich um ein bromiertes Styrol-Butadien-Block-Copolymer, das im Produkt chemisch gebunden ist. Die Produktionsmenge von Polymer-FR beträgt jährlich ca. 26.000 ton. Durch die gegenüber HBCD (Molekülmasse 642 Da) große Molekülmasse von >100.000 Da [Schlummer et al. 2015] ist davon auszugehen, dass Polymer-FR nicht bioverfügbar ist. Das Molekül ist zudem nicht wasserlöslich.

Eine neuere Studie untersuchte die Abbauprodukte von reinem Polymer-FR, bei längerfristiger Einwirkung von UV-Strahlung und erhöhter Temperatur von 60°C [Koch et al. 2019]. Im Ergebnis zeigten sich bei beiden Expositionen, insbesondere im Zusammenspiel mit Wasser, Abbauprodukte, die zu einem geringen Teil auch bromierte Verbindungen enthalten. Ausgewählte Abbauprodukte wurden hinsichtlich der Ökotoxizität und der Anreicherung in der Nahrungskette von aquatischen Lebewesen untersucht [Koch 2019]. Die Relevanz dieser Ergebnisse wird kontrovers diskutiert. Insbesondere ist zu beachten, dass die Studie an reinem Polymer-FR durchgeführt wurde. Durch die chemische Bindung des Produkts in der Polystyrolmatrix des Dämmstoffs kann der beobachtete Abbau geringer ausfallen. Auch die Verfügbarkeit von Wasser als Lösungsmittel, ist je nach Anwendung während der Nutzungsdauer des Dämmstoffs im Gebäude nur in sehr geringem Umfang vorhanden. Ggf. können aber bei der Deponierung von Polystyrolprodukten potentiell toxikologisch relevante Abbauprodukte entstehen. Auch unter diesem Aspekt ist die Etablierung geschlossener Stoffkreisläufe wichtig und wird auch bei Polystyrol-Dämmstoffen vorangetrieben (vgl. Kapitel 7).

TCPP wurde nach REACH registriert und darf ohne Einschränkungen verwendet werden. Für TCPP wurde im Jahr 2008 im Auftrag der Europäischen Kommission eine Risikobewertung 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 Voraussetzungen zur Herstellung eines behaglichen Wohnraumklimas unter dem Aspekt der soziokulturellen Qualität betrachtet werden.

Ein angenehmes, behagliches Raumklima wird von dem thermischen Klima und der Raumlufthausqualität 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 Raumlufthausemperatur, 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 78).

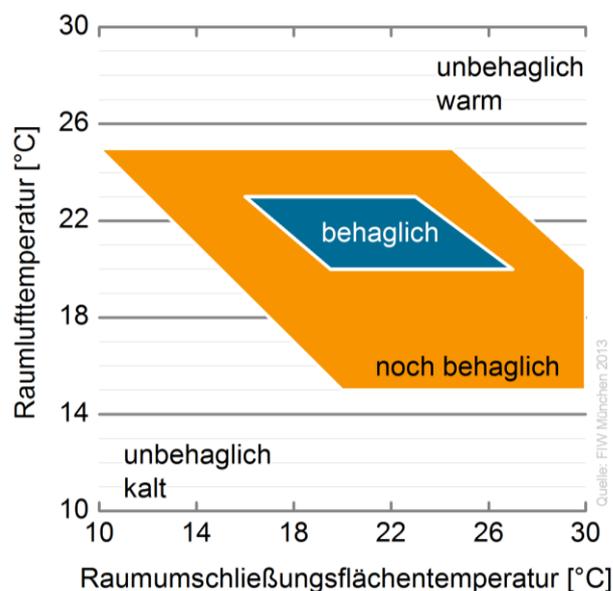


Abbildung 78: Behaglichkeitsfeld im Achsenkreuz von Raumlufttemperatur (Ordinate) und Temperatur der raumumschließenden Flächen (Abszisse) [Pistohl 1998]

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 Raumlufttemperatur 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 Raumlufttemperatur 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 Raumlufttemperatur 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 79.



Abbildung 79: 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 80, 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 80, rechts).



Abbildung 80: Mittels Innendämmsystem sanierte Jugendstilfassade (links), Mittels WDVS saniertes Stadthaus (rechts) (Bildnachweis: Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V.)

6 Kreislaufwirtschaft und Recycling von Wärmedämmstoffen

Unter den Stichworten Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft werden inzwischen zunehmend auch Baustoffe betrachtet. Die Bauwirtschaft benötigt für die von ihr erstellten, sehr langlebigen Bauwerke einen hohen Anteil der genutzten Ressourcen und Rohstoffe. Neben den klassischen mineralischen Baustoffen, wie Beton, Ziegel, Mörtel, Putze, werden in heutigen Bauwerken vermehrt auch Glas, Metalle und Kunststoffe eingesetzt. Wenn mehr unterschiedliche Materialien eingesetzt werden, dann muss man sich auch mit der Entsorgung und Trennung dieser Materialien auseinandersetzen.

Einige Dämmstoffe standen in den letzten Jahren im Fokus der Öffentlichkeit und die Abfallmengen sowie die Recyclingfähigkeit waren Kritikpunkte. Die betroffenen Dämmstoffe, aber auch alle anderen Dämmstoffhersteller, befassten sich in den letzten Jahren mit dem Thema Recycling und Entsorgung. Aus rein ökonomischen Gründen versucht man die Menge der bei der Produktion anfallenden Abfälle möglichst gering zu halten und sofort wieder dem Produktionsprozess zuzuführen. Weiterhin versucht man beim Einbau anfallende Dämmstoffreste wieder zurückzunehmen, da diese meist noch sortenrein und ohne Verschmutzung vorliegen. Deutlich schwieriger ist die Rücknahme und Wiederaufarbeitung von rückgebauten Abbruchabfällen, da diese meist nicht sortenrein vorliegen. Für Wärmedämmstoffe fehlt meist noch ein Logistikkonzept, wie diese gesammelt und zu Aufbereitungsanlagen gebracht werden können.

Für Wärmedämmstoffe auf Erdölbasis oder Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen bleibt dann nur die thermische Verwertung, bei der immer noch ein großer Teil der Energie, die für die Produktion aufgewendet wurde, wieder zurückgewonnen wird. Dämmstoffe auf mineralischer Basis werden meist im Straßen- und Landschaftsbau wiederverwendet. In diesem Beitrag sollen die im Bau verwendeten Wärmedämmstoffe, deren durchschnittliche Lebensdauer in verschiedenen Bauteilen, die Recyclingfähigkeit von Wärmedämmstoffen bzw. die heutigen Entsorgungspfade nach dem Rückbau von Gebäuden dargestellt werden.

6.1 Kreislaufwirtschaft, gesetzliche Rahmenbedingungen

Auf europäischer und nationaler Ebene werden seit Jahren die folgenden übergeordneten Ziele verfolgt:

- Energieeinsparung und Verringerung des CO₂-Ausstoßes
- Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung
- Umweltschutz

Zusätzlichen Schub bekamen diese übergeordneten Ziele 2019 durch den Green Deal der EU, mit dem man die Nettoemissionen von Treibhausgasen bis 2050 in der EU auf null reduzieren will. Praktisch umgesetzt werden diese Ziele mit dem zweiten EU-Aktionsplan, der im März 2020 verabschiedet wurde und sich in einer Vielzahl von Vorschriften, Gesetzen, Richtlinien usw. niederschlägt. In einem kurzen Überblick soll dargestellt werden, wie die heutigen gesetzlichen Grundlagen aussehen und wie sie im Hinblick auf das Recycling von Dämmstoffen im Einzelnen umgesetzt werden.

Europäische Ebene

Die Abfallgesetzgebung der Mitgliedsstaaten wird im ganzen EU-Raum sehr stark durch die zentrale Gesetzgebung der EU geprägt. Die EU gibt meist die rechtlichen Mindestanforderungen vor. Die Mitgliedstaaten sind für die konkrete Umsetzung vor Ort unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten zuständig. Deshalb werden zuerst die europäischen Richtlinien und dann die deutsche Umsetzung dargestellt.

EU-Abfallrichtlinie

Die EU-Abfallrichtlinie Richtlinie 2008/98 EG, AbfRRL [EU 2008] setzt den rechtlichen Rahmen für die Abfallgesetzgebung der EU-Mitgliedsstaaten. Sie wurde 2018 umfangreich geändert, um das 2015 veröffentlichte europäische Kreislaufwirtschaftspaket umzusetzen. Einer der Hauptgründe für die Einführung der EU-Abfallrichtlinie war, die Abfallmenge zu reduzieren und die Ressourcennutzung zu verbessern. Dazu müssen Abfälle getrennt gesammelt werden (Vermischungsverbot). Beim Abbruch von Gebäuden nach deren Nutzungsdauer bedeutet das die Förderung des selektiven Abbruchs, damit die verschiedenen Materialien, wie die mineralische Fraktion, Holz, Metalle, Glas, Kunststoffe und Gips wieder verwendet werden können. In der Abfallrichtlinie wurde für die Mitgliedstaaten die fünfstufige Hierarchie für den Umgang mit Abfällen festgelegt, die für die Mitgliedstaaten die Prioritätenfolge für die nationale Umsetzung vorgibt. Die Reihenfolge ist laut Artikel 4:

- Vermeidung
- Vorbereitung zur Wiederverwertung
- Recycling
- sonstige Verwertung, z. B. energetische Verwertung
- Beseitigung

Nach der fünfstufigen Abfallhierarchie hat die Wiederverwertung den Vorrang vor dem Recycling und vor allem vor der energetischen Verwertung. Bis 2015 musste die getrennte Sammlung von Papier, Metall, Kunststoffen und Metallen in allen Mitgliedstaaten umgesetzt werden. Ende 2020 mussten bestimmte Recyclingquoten, z. B. 50 Prozent für Papier, Metall, Kunststoffe, Glas und 70 Prozent für Bau- und Abbruchabfälle in den Mitgliedstaaten erreicht werden (Artikel 11).

Weitere Europäische Rahmenbedingungen

Neben der EU-Abfallrichtlinie sind beim Recycling von Dämmstoffen die Europäische Chemikalienverordnung REACH [EU 2006] (Registrierung und Bewertung von Stoffen wie Treibmittel oder Flammschutzmittel) und das Stockholmer Übereinkommen (POP-Konvention) [BMUB 2013] zu beachten. Das Stockholmer Übereinkommen ist eine völkerrechtlich bindende Übereinkunft, um besonders langlebige Schadstoffe (sog. POP Stoffe) zu verbieten oder zu beschränken. In der EU wird das Stockholmer Übereinkommen durch die Verordnung (EU) Nr. 2019/1021 [EU 2019] umgesetzt. Diese Verordnung enthält Verbote bzw. Beschränkungen für das Inverkehrbringen und Verwendungen von persistenten organischen Schadstoffen, sog. POPs. Außerdem regelt sie die Entsorgung von Abfällen, die persistente organische Schadstoffe enthalten (POP-Abfälle). Demnach müssen diese Abfälle so verwertet oder beseitigt werden, dass die in ihnen enthaltenen Schadstoffe zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden (Art. 7 Abs. 2). Von dem generellen Zerstörungsgebot gibt es zwei Ausnahmen. Zum einen können POP-haltige Abfälle, deren POP-Gehalt einen unteren Grenzwert unterschreitet, nach sonstigem EU-Recht entsorgt werden. Zum anderen können die Abfälle, die in Anhang V gelistet sind, auch bei Überschreitung der unteren Grenzwerte unter Tage in Salzstöcken, in Festgestein oder auf einer oberirdischen Deponie für gefährliche Abfälle nach vorheriger Verfestigung bzw. teilweiser Stabilisierung entsorgt werden.

Nationale Gesetze und Verordnungen

Der Rückbau von Gebäuden und das Recycling von Baustoffen unterliegt neben europäischen Regelungen einer Vielzahl von nationalen Gesetzen und Verordnungen. Anschließend werden die für das Recycling wichtigsten deutschen Gesetze aufgeführt.

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Mit dem KrWG [KrWG 2021] wurde die EU-Abfallrahmenrichtlinie in deutsches Recht umgesetzt, mit dem Gesetz zur Umsetzung der EU-Abfallrahmenrichtlinie geändert und das deutsche Abfallrecht umfassend modernisiert. Ziel des Gesetzes ist es, eine nachhaltige Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes, sowie der Ressourceneffizienz in der Abfallwirtschaft durch die Stärkung der Abfallvermeidung und des Recyclings von Abfällen, zu erreichen.

In § 3 KrWG sind die Begriffe Abfall, Verwertung, Recycling und Beseitigung wie folgt definiert:

Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung.

Besonders interessant sind in diesem Zusammenhang Dämmstoffreste und der Verschnitt von Dämmstoffen auf der Baustelle. Diese werden mittlerweile von den Dämmstoffherstellern nicht mehr als Abfälle betrachtet, sondern als Produkte, die sortenrein z.B. in Säcken zurückgenommen und wieder dem Produktionsprozess zugeführt werden. Damit wäre dann auch keine abfallrechtliche Genehmigung für den Transport und die Lagerung der Dämmstoffreste notwendig, da es sich um Dämmstoffe handelt und nicht um Abfälle.

Verwertung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen ..., oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen.

Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt ... aber nicht die energetische Verwertung ein.

Beseitigung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden.

„Kern des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist die **fünfstufige Abfallhierarchie** (§ 6 KrWG). Die Hierarchie legt die grundsätzliche Stufenfolge aus Abfallvermeidung, Wiederverwendung, Recycling und sonstiger, u. a. energetischer Verwertung von Abfällen und schließlich der Abfallbeseitigung fest. Vorrang hat die jeweils beste Option aus Sicht des Umweltschutzes. Die Kreislaufwirtschaft wird somit konsequent auf die Abfallvermeidung und das Recycling ausgerichtet.“

Abfallverzeichnisverordnung (AVV)

Die jeweilige Abfallart ist mit einer sechsstelligen Schlüsselnummer, nach dem Europäischen Abfallkatalog als EAK-Abfallschlüssel, bezeichnet. Die EAK-Abfallschlüssel sind seit 01.01.1999 gültig und wurden zuletzt am 30.06.2020 geändert [AVV 2020].

Die Abfälle werden nach einem sechsstelligen Code, der sich aus drei zweistelligen Codes zusammensetzt, herkunftsbezogen klassifiziert, wobei die Abfallherkunft von den Kapitelüberschriften hin zu den einzelnen Codes immer präziser beschrieben wird.

Tabelle 20: Zuordnung von Abfällen und Abfallschlüsseln

Kategorie		Beispiel EAK Abfallschlüssel-Nr.	
Obergruppe	2-stellige-Nr.	17	Bau- und Abbruchabfälle
Gruppe	4-stellige-Nr.	17 01	Beton, Ziegel, Fliesen, Keramik usw.
		17 06	Dämmmaterialien und asbesthaltige Baustoffe
Abfallart	6-stellige-Nr.	17 01 01	Beton
		17 06 04	Dämmmaterial mit Ausnahme...

Die Herkunft des Abfalls ist grundlegend bei der Zuordnung von Abfällen zu Schlüsselnummern des EAK.

Abfälle aus EPS-Dämmstoff waren bis September 2016 als nicht gefährliche Abfälle unter der EAK-Abfallschlüsselnummer 17 06 04 Dämmmaterialien eingestuft. Ab 30. September 2016 gilt die sog. POP-Verordnung [EU 2019], die in Art. 7(2) aussagt: „HBCD haltige Abfälle müssen so beseitigt und verwertet werden, dass die darin enthaltenen persistenten organischen Schadstoffe zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden“. Zu diesem Zeitpunkt war schon länger bekannt, dass HBCD-haltige Polystyrol-Abfälle in normalen Müllverbrennungsanlagen energetisch verwertet werden können und das darin enthaltenen HBCD praktisch vollständig zerstört wird [PlasticsEurope 2014].

Da aber die Sammlung, der Transport und die Vermischung HBCD-haltiger EPS-Abfälle z. B. mit dem Hausmüll nicht geregelt war, führte das zum Zusammenbrechen der Entsorgung von EPS-Abfällen aus dem Rückbau mit enormen Folgen für die betroffenen Handwerker, Abbruchbetriebe und Entsorger, bei denen sich Berge von nicht entsorgbarem EPS und XPS bildeten. Erst mit dem Beschluss der Bundesregierung und mit Zustimmung des Bundesrates zur „Verordnung zur Überwachung von nicht gefährlichen Abfällen mit persistenten organischen Schadstoffen zur Änderung der AVV (POP-Abfall-Überwachungsverordnung) vom 17.07.2017“ [BGBl. 2017] und mit der Einführung zum 01.08.2017 löste sich der Entsorgungstau auf. Die POP-Abfall-Überwachungsverordnung regelt in § 3, dass HBCD-haltige EPS-Abfälle mit der Abfallschlüsselnummer 170604, getrennt gesammelt, befördert und nicht vermischt werden dürfen. Die technisch notwendige Vermischung mit anderen Abfallarten, zur Steuerung des Heizwerts in der Müllverbrennungsanlage, ist nur in zugelassenen Müllverbrennungsanlagen zulässig, die sicherstellen können, dass das frühere Flammschutzmittel HBCD schadlos verwertet und beseitigt wird. In § 4 und § 5 werden die Nachweis- und Registrierpflichten der Entsorger geregelt.

6.2 Recyclingquote und Kreislaufwirtschaft am Bau

Aus den heute geltenden gesetzlichen Vorschriften, insbesondere aus der EU-Abfallrichtlinie [EU 2008] und dem deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz [KrWG 2021],

ergeben sich bereits für Kunststoffverpackungen konkrete Handlungszwänge. Bis 2020 musste die Recyclingquote bei Kunststoffverpackungen laut EU Abfallrichtlinie mindestens 50 % betragen, von der Bundesregierung wurden 63 % angestrebt. Aber auch bei den Bau- und Abbruchabfällen soll laut EU-Abfallrichtlinie eine Recyclingquote von 70 % erreicht werden. In vielen Bereichen, insbesondere bei Wärmedämmstoffen, liegt Deutschland noch deutlich unter den angestrebten 70 %.

Abfallaufkommen Bau

In Deutschland werden die Abfallmengen durch die Betreiber von Abfallentsorgungsanlagen, wie Deponien, Müllverbrennungsanlagen, Bauschuttzubereitungsanlagen usw. erfasst und durch die Statistischen Landesämter erhoben. Das statistische Bundesamt führt alle Ergebnisse der Bundesländer zusammen und veröffentlicht jährlich eine Abfallstatistik. 2019 betrug das gesamte Abfallaufkommen 417 Mio. Tonnen [Destatis 2021].

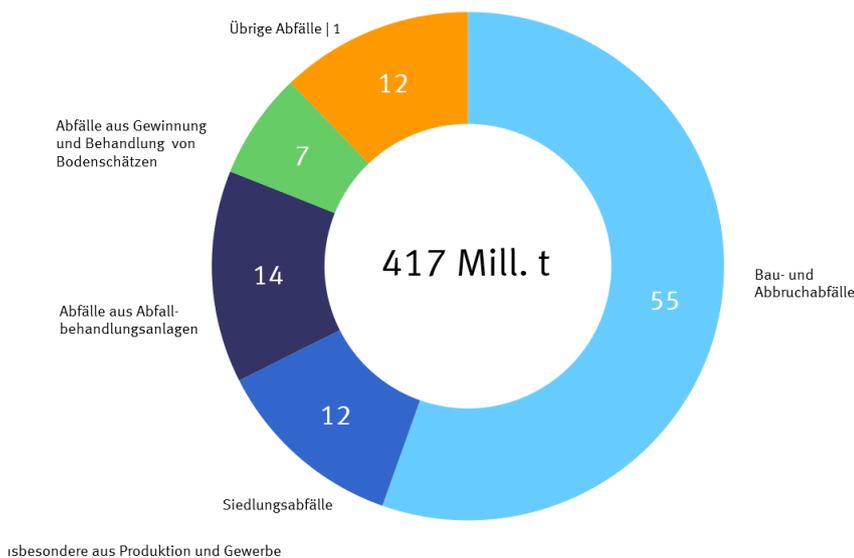


Abbildung 81: Abfallaufkommen 2019 [Destatis 2021]

Der Anteil der Bau- und Abbruchabfälle am gesamten Abfallaufkommen betrug dabei 221 Mio. Tonnen oder 55 %.

Die Bau- und Abbruchabfälle (Input im Inland angeliefert, plus im eigenen Betrieb erzeugte Abfälle) setzen sich aus den folgenden Abfallarten zusammen:

Tabelle 21: Bau- und Abbruchabfälle

Abfallart	Menge in Mio. Tonnen
Bodenaushub und Baggerabfälle	123
Mineralische Abfälle wie Beton, Ziegel, Fliesen usw.	59
Dämmmaterial Abfallschlüssel 170603 und 170604 *)	0,371
Kunststoffabfälle	0,124
Sonstige Abfälle (Holz, Glas, Metalle usw.)	38,5
Gesamt	221

*) Da es sich bei den beiden Abfallschlüsselnummern um gemischte Abfallarten handelt, können die erfassten Mengen nicht einem Dämmstoff zugeordnet werden. Die erfassten Dämmstoffe liegen normalerweise nicht sortenrein vor, sondern enthalten auch Verunreinigungen wie Mörtel, Putze, Sand, Dachabdichtungen, Befestigungselemente usw. Deshalb werden sie meist als Baumischabfälle bezeichnet und zusammen mit den Verunreinigungen erfasst und üblicherweise thermisch verwertet.

Der größte Teil des Bodenaushubs und der Baggerabfälle werden fast vollständig wieder im Straßenbau, zu Geländeaufschüttungen usw. verwendet [Destatis 2019]. Damit erklärt sich eine sehr hohe Verwertungsquote, die das Bundesamt für Statistik [Destatis 2019] mit rund 88 % für die Bau- und Abbruchabfällen insgesamt angibt. Für die Dämmstoffe ergibt sich eine Verwertungsquote von 88 % nur deshalb, weil der Recyclinganteil und der Anteil an Abfällen, der in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet wird, zusammengezählt wird [Bendix et al. 2021].

Der Anteil der Dämmstoffe insgesamt (mineralische Dämmstoffe und Dämmstoffe aus Kunststoffen oder nachwachsenden Rohstoffen) an den Abbruchabfällen ist immer noch sehr klein (geschätzt ca. 0,2%) im Vergleich zu den gesamten Abbruchabfällen.

Betrachtet man nur die sonstigen Dämmstoffabfälle mit der Abfallschlüsselnummer 170604 zwischen 2006 und 2016 [Destatis 2019, Destatis 2021] so schwanken diese zwischen ca. 50.000 t und 85.000 t. Das heißt, dass erste Dämmstoffe aus dem Abbruch von Gebäuden bei den Müllverbrennungsanlagen (organische Dämmstoffe) und anorganische Dämmstoffe bei den dafür zugelassenen Deponien ankommen. aber diese wegen der mengenmäßig kleinen Anteile derzeit noch ohne weiteres bewältigt werden können.

Verarbeitungsmenge Kunststoffe am Bau

In den letzten Jahren werden Dämmstoffe aus Kunststoff im Bau in Teilen der Medien und der Bevölkerung sehr kritisch diskutiert. Deshalb soll hier besonders auf die Kunststoffe im Einsatz am Bau und die Dämmstoffe auf Kunststoffbasis eingegangen werden. In der Conversio Studie 2020 [Lindner et al. 2020] (Abbildung 82) sind die 2019 in Deutschland hergestellten Kunststoffe nach Sorten und Einsatzfeldern zusammengestellt.

Kunststoffverarbeitung Kunststoffarten und Branchen

Struktur der verarbeiteten Kunststoffe (inkl. Neuware und Rezyklat) innerhalb der Branchen: Überblick

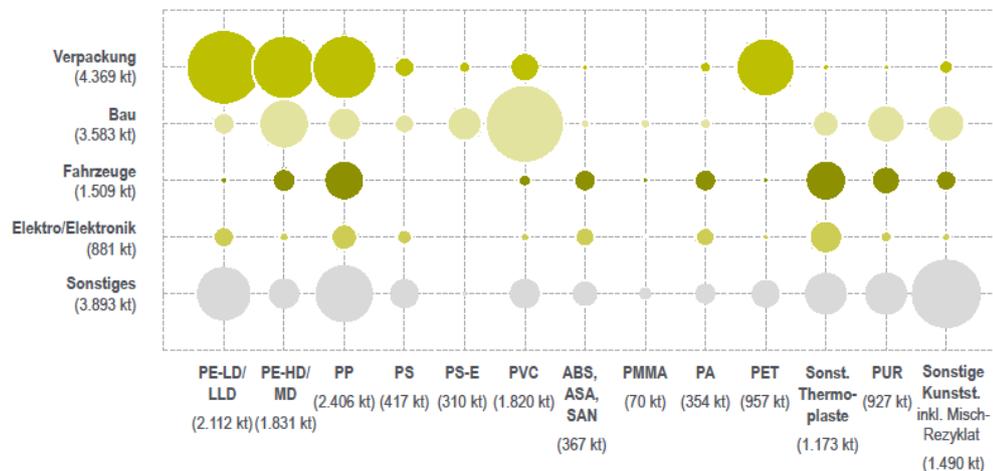


Abbildung 82: Kunststoffe insgesamt und ihre Einsatzfelder (Bildnachweis: Conversio GmbH)

Betrachtet man die im Bau eingesetzten Kunststoffmengen 2019 so tragen PVC und Polyethylen (PE) den Hauptanteil dazu bei (Abbildung 82). Die Gesamtmenge der in Deutschland produzierten Kunststoffe für den Baubereich betrug 2017 etwa 3,30 Millionen Tonnen [Bendix et al. 2021]. Nach den Anwendungsbereichen aufgeteilt ergeben sich folgende Mengen und prozentuale Anteile:

Tabelle 22: In Deutschland produzierte Kunststoffmenge 2017 nach Anwendungsgebieten ohne Importe oder Exporte nach [Bendix et al. 2021]

Anwendung	Produzierte Menge t (Tonnen)	Prozentualer Anteil %
Rohre	1.028.000	31
Profile	906.000	27
Sonstige	881.000	27
Wärmedämmstoffe	485.000	15
Gesamt	3.300.000	100

Die Rohre werden hauptsächlich aus Polyethylen und PVC hergestellt, die Profile hauptsächlich aus PVC. Der Anteil der Wärmedämmstoffe an der Gesamtmenge Kunststoffe im Baubereich ist mit etwa 15 % deutlich kleiner als in den Medien häufig dargestellt. Die in Deutschland hergestellten und verbauten Schaumkunststoffe als Dämmstoffe sind in Tabelle 23 dargestellt [Bendix et al. 2021].

Tabelle 23: Verbaute Schaumkunststoffe als Wärmedämmung 2017 ohne Importe oder Exporte [Bendix et al. 2021]

Schaumkunststoff	Produzierte Menge t (Tonnen)	Prozentualer Anteil %
EPS	248.000	51
XPS	75.000	15
PU	162.000	33
Gesamt	485.000	99

Betrachtet man dagegen das Abfallaufkommen von Kunststoffen nach Sorten, so sieht man, dass die Mengen an PVC und PE nach wie vor den Hauptanteil bilden, aber die Mengen an EPS und XPS sowie PU langsam steigen [Bendix et al. 2021]. Die Kunststoffprodukte im Bau sind in der Regel sehr langlebige Produkte. So beträgt die Nutzungsdauer von Kunststoffböden etwa 25 – 30 Jahre, Kunststoffens-tern 40 – 50 Jahre und Kunststoffrohren mehr als 80 Jahre. Da Kunststoffe im Bau aber erst seit etwa 40 Jahren verstärkt eingesetzt werden, führt das dazu, dass die jährlichen Verbrauchsmengen und Abfallmengen sehr deutlich auseinander liegen [Bendix et al. 2021].

Recycling der Kunststoffabfälle aus Bau- und Abbruchabfällen

Die EU-Ziele zur Reduzierung des Kunststoffmülls und zur Erhöhung des Recyclinganteils zeigen auch Auswirkungen auf den Einsatz von Kunststoffen im Baubereich. Im Baubereich werden etwa 86 – 88 % der Abfälle wiederverwertet [Destatis 2021], wobei der Hauptanteil Boden, Steine, Baggergut, Beton Ziegel und Keramik betrifft. Laut der Conversio Studie und der Studie des Umwelt Bundesamts werden je nach Betrachtungsweise etwa 23 % [Lindner et al. 2020] – 48 % [Bendix et al. 2021] der Kunststoffabfälle recycelt, mit steigender Tendenz. Auch hier werden die Verarbeitungsmengen nach unterschiedlichen Kunststoffen getrennt betrachtet, aber die Abfall- und Recyclingmengen nur insgesamt angegeben. Aufgrund der Anwendung sind PVC- Rohre und -Profile sowie PE-Schläuche leichter zu demontieren und sortenreiner beim Abfall zu sammeln als EPS-, XPS-, oder PU-Abfälle, die mit bautypischen Fremdstoffen vermischt und häufig innig miteinander verbunden sind.

6.3 Recycling von Dämmstoffen

Recycling bedeutet im Deutschen Aufbereitung und Wiederverwendung von bereits benutzten Rohstoffen. In Einzelfällen können Wärmedämmstoffe nach dem ersten Produktleben z. B. durch Aufdoppeln beim WDVS oder dem Rückbau aus Gebäudeteilen z. B. Rohrschalen aus Mineralwolle oder PU oder Schläuche aus PE nach Änderungen an der Heizungsanlage, wiederverwendet werden. Das dürften aber sehr seltene Einzelfälle sein. In manchen Fällen kommt es zum sogenannten

Downcycling, dem Wiederverwenden des Dämmstoffs, aber als geringerwertiges Produkt aufbereitet. Beispiele dafür sind z. B. das Aufbereiten von Produktionsabfällen aus Mineralwolle, die zu Dämmstofflocken zerkleinert werden und dann als Einblasdämmung in den Hohlraum von zweischaligem Mauerwerk eingeblasen werden. Anzustreben ist eine Aufbereitung von Dämmstoffen in hochwertige neue Dämmstoffe, bei denen durch Modifikationen die neuen Eigenschaften des Dämmstoffs entsprechend den neuen Anforderungen eingestellt werden können.

Wichtig ist bei allen Arten des Recyclings immer, dass der benutzte Rohstoff als möglichst reiner Abfall ohne unerwünschte Beimengungen vorliegt, da sonst aufwendige Aufbereitungsschritte notwendig werden.

Dämmstoffabfälle treten an unterschiedlichen Stationen des Lebenszyklus eines Dämmstoffs auf:

- Produktionsabfälle (weitgehend sortenrein)
- Baustellenzuschnitte (teilweise sortenrein). Die Folienverpackungen können über das Interseroh-System (kostenfreie Abholung und Verwertung von Transportverpackungen) entsorgt werden.
- Reparaturarbeiten (verschmutzte Dämmstoffe, meist nicht sortenrein)
- Abbrucharbeiten (Mischabfälle)

Da Produktionsabfälle direkt beim Schneiden, Fräsen, Anfahren oder Abstellen der Produktion entstehen, sind diese in der Regel sortenrein und können bei Mineralwolle-Abfällen (Stein- oder Glaswolle) nach dem Sintern (Anschmelzen zu sog. Fritten) oder Verpressen zu Briquets wieder dem Produktionsprozess zugefügt werden. Thermoplaste, wie Polystyrol oder Polyethylen, lassen sich wieder einschmelzen und zu Partikeln (meist ganze Perlen) verarbeiten und zu bestimmten Prozentsätzen wieder dem Produktionsprozess zusetzen. Aufwendiger gestaltet sich die Verarbeitung von Produktionsabfällen von sogenannten Duroplasten wie Polyurethan oder Phenolharz, die nicht schmelzen, sondern ihre sprödharte Struktur bis zum Verkohlen oder Verbrennen beibehalten. Dabei müssen die langen Kettenmoleküle durch Wasser (Hydrolyse), Alkohole (Alkoholyse) oder Glykole (Glycolyse) aufgespalten werden [Bauer 1995, Behrendt et al. 2000].

Baustellenabfälle werden von manchen Herstellern zurückgenommen, wenn sie unverschmutzt, sortenrein und gut verpackt vorliegen und wenn ein entsprechendes Logistikkonzept vorhanden ist. Deutlich schwieriger ist es, für Abfälle aus Reparaturarbeiten oder Abbrucharbeiten Abnehmer für ein Recycling zu finden, da diese Abfälle häufig mit Klebern, Abdichtungen aber auch mit Mörtel, Putzanhaftungen, Dübeln oder Befestigern fast untrennbar verbunden sind. In diesen Fällen übersteigen die Kosten für die Einsammellogistik und die Reinigungsschritte bei Weitem den Wert der Abfälle, sodass derzeit die Thermische Verwertung oder die Deponierung als Entsorgung bevorzugt wird. In den folgenden Abschnitten wird auf die material-spezifischen Besonderheiten der Dämmstoffe und heutige sowie künftig mögliche Entsorgungspfade eingegangen.

Steinwolle

Steinwolle-Dämmstoffe werden aus den mineralischen Grundstoffen Diabas, Feldspat, Sand und Dolomit bei Betriebstemperaturen von ca. 1500 °C hergestellt. Sie enthalten weiterhin Kalkstein und bis zu 30 % Recyclingsteine [Tenzler 2021]. Diese Recyclingsteine werden durch Verpressen der Zerfaserungsabfälle, Schnittabfälle, Anfahrstücken und Staub, der bei der Produktion anfällt, mit Zement als Bindemittel hergestellt. Das bei der Produktion eingesetzte Bindemittel muss vorher durch Ausheizen entfernt werden. Weiterhin können bei diesem Verfahrensschritt Eisen (z.B. aus natürlichen Quellen bei der Zementherstellung oder zur Chromatreduktion mittels Eisensulfat [Anonymus 2011]) und andere Metalle abgeschieden werden sowie andere Mineralien zugegeben werden, um die Steinwolle Rezeptur optimal einzustellen. Diese Recyclingsteine behindern durch ihre Größe und das Format nicht die Luftzirkulation in den Kupolöfen, sorgen so für eine gute Luftzirkulation im Ofen und ermöglichen mit der notwendigen Sauerstoffversorgung den Schmelzprozess. Durch das Recycling der Produktionsabfälle entstehen praktisch kaum Abfälle in der Produktion von Steinwolle.

Rückgeführte Steinwolle von Baustellen

Bei rückgeführter Steinwolle muss man zwischen sogenannter alter Wolle (vor dem 01. Juli 2000 hergestellte Steinwolle) und neuer Wolle (nach dem 01. Juli 2000 hergestellt) unterscheiden. „Alte Wolle“ wird als gefährlicher Abfall in den Abfallschlüssel 17 06 03* eingestuft, „neue Wolle“, sogenannte „freigezeichnete Wolle“ wird unter dem Abfallschlüssel 17 06 04 (ungefährlicher Abfall) eingestuft. Als freigezeichnete Mineralwolle bezeichnet man Mineralwolle, die mit einer gleichbleibenden Zusammensetzung hergestellt wird, die den deutschen und europäischen Kriterien in Hinblick auf die Biolöslichkeit entsprechen. Grundsätzlich wäre die Aufarbeitung sowohl von „alter wie auch von neuer Wolle“ als Rohstoffquelle möglich. Jedoch stellt die Aufarbeitung von „alter Wolle“ ein Problem dar, da diese in luftdichten Räumen zerkleinert und verarbeitet werden muss, damit keine Mineralfasern, die nicht den Freizeichnungskriterien entsprechen, in die Umwelt gelangen. Prinzipiell ist es möglich, diese Anforderungen einzuhalten, so dass man davon ausgeht, dass man in einigen Jahren unter erhöhtem Aufwand auch „alte Wolle“ wieder für den Produktionsprozess nutzen kann. Ein großes Hemmnis stellt in Deutschland dar, dass Unternehmen in Deutschland für die Lagerung und Verarbeitung von Abfällen eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung und Zulassung als Abfallbehandlungsanlage benötigen. Wenn „alte Wolle“ gelagert und verarbeitet wird, erhöht sich der Aufwand. Es ist aber möglich als Hersteller oder Entsorger diese Genehmigungen zu erhalten.

Einige Steinwolle Hersteller bieten auch heute schon für Baustellenverschnitt und einzelne Sanierungsarbeiten Rücknahmesysteme an, um Steinwolle Abfälle wieder dem Produktionsprozess zuzuführen.

Seit etwa 1993 bietet die dänische Rockwool Gruppe das sogenannte ROCK-CYCLE® System an, bei dem Dämmstoffverschnitt von der Baustelle in Big Bags gesammelt wird und bei der nächsten Lieferung zurückgenommen und der Wiederverwertung zugeführt wird.

Für die etwas häufiger als andere Dämmmaßnahmen durchzuführende Flachdachsanierung, bietet ROCKWOOL seit 1994 die Rücknahme ihrer Flachdach-Dämmplatten unter folgenden Voraussetzungen an:

- nur ROCKWOOL-Dämmstoffe unabhängig vom Alter,
- sortenrein ohne Beimengungen,
- fachgerecht verpackt in Big Bags, Presscontainer oder Großraum Container,
- nach vorheriger Termin- und Mengenabsprache.

2021 hat die Deutsche Rockwool nach eigenen Angaben ca. 12.000 Tonnen rückgeführte Steinwolle [Anonymus 2022b] zu neuen Dämmstoffen verarbeitet. Nach Angabe der Deutschen Rockwool kommt es dabei zu keinerlei Qualitätsverlusten und stellt damit einen echten Kreislauf dar.

Unter der Bezeichnung „ISOVER Return“ bietet die ISOVER Saint Gobain Gruppe an Baustellenverschnitte von WDVS-Verarbeitern oder Abfälle von Weiterverarbeitern ihrer Mineralwolle Produkte zurückzunehmen, wenn diese sortenrein und unverschmutzt sind.

In der Schweiz bietet die FLUMROC AG 200 Liter Foliensäcke zum Kauf für die sichere Verpackung und zum Transport der Steinwolle zum Mineralwolle Hersteller an. Die Firma holt die Foliensäcke, aber auch eingeschrumpfte Einwegpaletten oder gepresste Ballen, kostenlos in der Schweiz beim Händler ab, wenn es sich um von FLUMROC hergestellte Steinwolle, die frei von Kaschierungen, Metallen oder Anhaftungen ist, handelt. In Deutschland wäre das System wahrscheinlich rechtlich nicht umsetzbar, da die Rückgabe nicht an Händler, sondern nur an speziell zugelassene Entsorgungsbetriebe erfolgen darf, die für Abfallstoffe mit der EAK Nr. 17 06 03* (gefährliche Abfallstoffe) zugelassen sind. Die zurückgenommenen Steinwolle Abfälle müssen in einer Aufbereitungsstufe von Fremdstoffen, aber auch in einem Pyrolyseschritt vom Bindemittel (heute meist noch Harnstoff-Formaldehyd-Phenolharz) befreit werden. Danach können die zu Briketts gepressten Mineralwolle Abfälle in Schacht- oder Rinnenöfen wieder zu neuer Steinwolle eingeschmolzen und versponnen werden. Selbstverständlich muss die Zusammensetzung der Schmelze fortlaufend kontrolliert und durch Mineralienzufuhr so eingestellt werden, um zum einen die technologischen Eigenschaften der Fasern zu erreichen, aber auch damit sich die Faserzusammensetzung im freigezeichneten Bereich bewegt.

Verwertung von Steinwolle Abfällen als Bergversatz

Versatz nennt man im Bergbau das Verfüllen von ausgebeuteten Untertage-Bergwerken mit bergbaufremden Abfällen. Dies macht man im Bergbau, um Senkungen an der Erdoberfläche oder im Bergwerk zu minimieren, um z.B. Bergwerke optimal

ausbeuten zu können oder Baugebiete an der Erdoberfläche zu stabilisieren oder zu sichern. Die Methode „Selbsthärtender Versatz“ in sogenannten Versatzbergwerken, verwendet man auch, um gefährliche Abfälle, wie Mineralwolle mit dem Abfallschlüssel 17 06 03* zu verwerten. Sie wird z.B. bei der Sicherung von ausgebeuteten Salzbergwerken oder von Erzbergwerken angewendet, wenn dort kein Grundwasser vorkommt und dadurch ein Ausspülen von gefährlichen Substanzen weitgehend ausgeschlossen werden kann. Eine relativ neue, patentierte Methode ist das kontrollierte Einlagern von mit Mineralwolle gefüllten Bigbags mit Planierraupen (mechanisches Verfüllen) und das Komprimieren und Verfüllen der Luftzwischenräume mit Wasser und Zement als Bindemittel. Das Ergebnis ist ein sehr druckfestes, Magerbeton ähnliches Material, das die Freisetzung von Mineralfasern verhindert und nicht mehr kennzeichnungspflichtig nach TRGS 905 nach EU-Verordnung 1272/2008 [TRGS 905] ist. Dazu wird gerade ein Abfallbehandlungsbetrieb gebaut, der einerseits die Verwertung der Mineralwolle als Stapelversatz im Bergbau betreibt und in einem zweiten Schritt künstliche Mineralwolle Abfälle zu pulverförmigen Abfällen verarbeiten soll, die dann wieder dem Produktionsprozess zugeführt werden können.

Die Verwertung von Mineralwolle Abfällen setzt das Verwertungsverfahren R5 gemäß Anhang II der EU-Abfall Richtlinie 2008/98 über das KrWG § 6 und § 7 Verwertung vor Beseitigung und die Berg-Versatzverordnung vom 24.07.2002 [BGBl 2012] um.

Glaswolle

Zur Herstellung von Glaswolle werden etwa 50 bis 80 % Altglas [Tenzler 2021], Sand und Dolomit eingesetzt. Deshalb kann dem Produktionsprozess relativ einfach Sekundärrohstoff aus Zuschnitten, Sägestäuben aber auch aus der Flachglas Produktion oder zerkleinerten Scherben zugesetzt werden. Glaswolle Flocken oder – Abschnitte werden dazu gemahlen und können in kleineren Mengen < 10 % direkt dem Gemenge zugegeben werden. Sollen größere Mengen von Produktions- oder Verschnitt Abfällen in der Schmelzwanne eingesetzt werden, so werden Glaswolle Abfälle in Flocken zermahlen und von Fremdstoffen wie Beschichtungen und Kaskierungen befreit und zu sogenannten Fritten eingeschmolzen. Dabei wird auch das störende Bindemittel entfernt. „Fritten“ sind eine grobkörnige Vorstufe zur Glasherstellung, die durch Anschmelzen und Zusammenbacken der Glasabfälle bei einer Schmelztemperatur von 750 °C entstehen. Diese „Fritten“ können leicht gemahlen werden und als Pulver oder Glasscherben dem Produktionsprozess wieder beigemischt werden. Durch Zugabe verschiedener Minerale wird die „freigezeichnete Glasrezeptur“ eingestellt und regelmäßig kontrolliert.

Rückgeführte Glaswolle von Baustellen

Auch hier gilt die vorher beschriebene Unterteilung in „alte“ und „neue“ vor und nach dem 1. Juli 2000 hergestellte Glaswolle. Für saubere Baustellenabschnitte und

Abfälle von Weiterverarbeitern haben einzelne Glaswolle Hersteller Vereinbarungen mit ihren Verarbeitern geschlossen und nehmen die sauberen Abschnitte und Abfälle bei der Neulieferung als Rücktransport wieder ins Herstellwerk mit zurück. So ist die Sortenreinheit und gleichmäßige Zusammensetzung gewährleistet.

Prinzipiell wäre auch das Einschmelzen von sauberen Glaswolle Abfällen (z.B. aus dem Trockenbau) von verschiedenen Herstellern und verschiedenen Alters möglich. In der Praxis scheitert das meist an den Genehmigungen für die Einsammellogistik, den weiten Fahrstrecken und den vermehrten Analysen der eingesammelten Abfälle und des späteren Sekundärrohstoffs. Da für die Produktion von neuer Glaswolle bis zu 80 % Altglas eingesetzt werden kann, gibt es positive Versuche auch große Mengen an Altglas bekannter Herkunft in Gas-Sauerstoff-Schmelzwannen oder z.B. Schmelzzyklonen einzuschmelzen. Hierbei entsteht ein Glasgries („Fritten“), der ohne Probleme wieder in den Produktionsprozess eingeschleust werden kann. Diese sekundären Schmelzanlagen sind unter den Namen Oxi-Melt- Submerged Burner Anlagen bekannt [Tenzler 2021].

Rücknahme von Glaswolle-Abfällen von Kleinunternehmen und Do-it-Yourself Kunden

Da noch keine einheitliche Sammellogistik der Glaswolle Hersteller existiert, bieten kommunale und überregionale Abfallentsorger entsprechend gekennzeichnete Abfallsäcke an, in denen Glaswolle Abfälle staubdicht gelagert und eingesammelt werden. Ein Beispiel hierfür ist z.B. die online-Plattform „ecoservice24“, die entsprechende Abfallsäcke und Container in Zusammenarbeit mit regionalen Entsorgern bundesweit zur Verfügung stellt. Da der Entsorger meist nicht unterscheiden kann, ob die Mineralwolle vor 2000 hergestellt wurde und damit unter Krebsverdacht steht, oder ob sie aus einer freigezeichneten Rezeptur nach 2000 stammt, werden derzeit praktisch alle Stein- oder Glaswolle Abfälle in die gleichen Kunststoff Big Bags mit der Aufschrift „Mineralwolle, Faserstäube TRGS 521, Achtung: Inhalt kann krebserregende Faserstoffe freisetzen“ oder in die Großcontainer mit entsprechender Kunststoffverpackung und Aufschrift verladen, transportiert und in entsprechenden Deponien eingelagert. Ob dieser Entsorgungsweg bei knapper werdendem und damit teurem Deponieraum so aufrechterhalten wird, wird die Zukunft zeigen. Eine Alternative wäre die vorher im Kapitel Steinwolle beschriebene Verwertung von Glaswolle Abfällen als Bergversatz.

Expandierte Polystyrol (EPS)-Dämmstoffe

Der zur Herstellung des EPS-Dämmstoffs notwendige, perlenförmige, glasähnliche PS- Rohstoff wird von Chemieunternehmen hergestellt und enthält bereits das Flammschutzmittel, teilweise Farben oder Graphit (graues EPS) und das Treibmittel Pentan. Der Rohstoff wird dezentral in Verarbeitungsbetrieben in einem zweistufigen Prozess mit Wasserdampf unter Druck meist in Blöcke aufgeschäumt und in Platten oder Formteile zugeschnitten. Von Anfang an wurden die bei der Produktion

anfallenden Schnittabfälle in Silos gesammelt und kontrolliert dem Produktionsprozess wieder zugeführt. Da EPS ein Thermoplast ist, können ganze Perlen den vorgeschäumten EPS-Partikeln zugegeben werden und werden dann im Schäum-Prozess mit den neuen Partikeln thermisch fest verschweißt. Je nach Qualitätsanspruch enthalten EPS-Dämmplatten zwischen 5 und ca. 25 % rückgeführtes EPS. In Einzelfällen ist der Anteil auch deutlich höher und kann bis zu 100 % betragen. EPS, das vor 2015 hergestellt wurde, enthält meist das Flammenschutzmittel HBCD, das nach dem Stockholmer Übereinkommen (POP-Konvention) [BMUB 2013] bei der Entsorgung von Abfällen zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden muss. Deshalb ist der gängigste Entsorgungsweg von verschmutzten oder vermischten Abfällen, heute die energetische Verwertung von EPS-Abfällen. Dabei wird einerseits das HBCD vollständig zerstört [Plastics Europe 2014] und andererseits etwa 50 % der zur Produktion und Logistik hinein gesteckten Energie wieder zurückgewonnen.

Werksstoffliche Verwertung

Fast alle EPS-Dämmstoffhersteller nehmen Baustellenabfälle zurück, wenn diese bei dem Dämmstoffhersteller vorher gekauft wurden und keine Beimengungen enthalten. Dazu werden PE-Säcke auf die Baustelle geliefert und die Mitarbeiter der Endkunden und Bauunternehmen geschult. Darüber hinaus gibt es Vereinbarungen mit WDVS-Systemanbietern über die Rücknahme von Verschnitt-Abfällen und Dämmstoff-Resten. Aber auch einzelne Handwerker oder Do-it-Yourself-Kunden können EPS-Abfälle über örtliche Wertstoffhöfe oder über regionale Entsorger (ecoservice24) an EPS-Verarbeiter zurückgeben. Fast alle EPS-Verarbeiter sehen die Abfallverwertung von EPS-Abfällen inzwischen als wertvolle Rohstoffquelle. Voraussetzung dafür ist wie bei allen Dämmstoffen eine Abfalllogistik mit relativ kurzen Wegen und eine saubere Trennung nach Dämmstoffen und möglichst auch nach der Farbe (weiß, grau oder eingefärbt).

Wärmedämmplatten mit kleiner 25 % rückgeführten EPS-Abfällen

Aus der Vergangenheit ist bekannt, dass bei der Produktion von EPS-Dämmstoffen, Produktionsabfälle und Verschnitt-Abfälle von Baustellen wieder mit eingesetzt werden. Die Recyclingmengen, die bei der Produktion eingesetzt werden, hängen erheblich von den Anforderungen für das spätere Einsatzgebiet ab. Bei Fassadendämmplatten darf laut Qualitätsrichtlinie des IVH und des VDPM [IVH/VDPM 2016] der Anteil an Recycling-EPS 5 Gew.-% nicht überschreiten. Bei Anwendungen mit geringeren technischen Anforderungen, wie Fußbodendämmungen vom Typ DEO nach DIN 4108-10 oder Flachdach-Dämmplatten vom Typ DAA nach DIN 4108-10 werden teilweise deutlich höhere Recyclingmengen bis ca. 25 % zugesetzt. Der hohe Recycling-Anteil ist leicht an unterschiedlichen Zellgrößen, farbigen Einlagerungen und glasig spröder Struktur an den mit dem Glühdraht geschnittenen Schnittkanten zu erkennen. Die Verantwortung über die Menge, Art des eingesetzten Recyclinganteils sowie über die Einhaltung der späteren zugesicherten Eigenschaften liegt beim Schäum-Betrieb der EPS Wärmedämmplatten.

Wärmedämmplatten mit bis zu 100 % rückgeführten EPS-Abfällen

Bis 2015 kamen sogenannte „EPS-Recyclingplatten“ auf den Markt, die aus unterschiedlichen EPS-Abfällen gefertigt wurden. Diese Recyclingplatten enthielten weißes, graues sowie eingefärbtes EPS und erscheinen nach der Fertigung meist weißgrau, wobei die Perlengrenzen durch den hohen Staubanteil nicht mehr exakt zu sehen sind. Nach dem HBCD-Verbot, haben diese Platten aber keine Marktbedeutung mehr, da die Rohstoffbasis weitgehend weggebrochen ist.

Dämmestrich und sogenannter Styroporbeton

Ein relativ großes Einsatzgebiet für rückgeführte EPS-Abfälle stellt die Wärmedämmung aus EPS-Granulat und Zement als Bindemittel dar. Für diese Anwendung als Estrich und Ausgleichsschicht gibt es eine ganze Reihe von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen z.B. [DIBt 2020, DIBt, 2021a, DIBt 2022]. Der Vorteil dieser Verwertungsmethode ist, dass neben Neumaterial auch EPS-Granulat aus Verpackungsabfällen und leichtverschmutzte Baustellenabfälle als EPS-Anteil verwendet werden kann. Auch zerstörte Perlen oder gepresster EPS-Abfall können in der EPS-Zementmischung verwendet werden. Der Rohdichtebereich des abgebundenen Dämmstoffs schwankt etwa von 175 kg/m^3 bis 550 kg/m^3 und damit schwanken auch die Druckfestigkeiten von 120 kPa bis 500 kPa und die Wärmeleitfähigkeit von $0,070 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bis $0,18 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Bezüglich des Brandverhaltens ist die Klasse A2-s1,d0 nach EN 13501 erreichbar.

Mechanisches Recycling

Beim mechanischen Recycling werden von spezialisierten Recycling Unternehmen die gesammelten Baustellenabschnitte, aber auch Post Consumer Abfälle wie EPS-Verpackungen in einer Mühle vorzerkleinert, entstaubt, von Metallen befreit und in großen Chargen homogenisiert. Dadurch erhält man größere Chargen mit gleichen Eigenschaften und einer einheitlichen Reinheitsstufe. Dieses sortenreine Mahlgut wird in einem sogenannten Recycling Extruder aufgeschmolzen und in einem Extruder Strang wieder granuliert (Abbildung 83). Das entstandenen Regranulat hat die gleichen Eigenschaften wie der eingesetzte Sekundärrohstoff und wurde hinsichtlich seiner chemischen Beschaffenheit nicht verändert. Daher kommt der Name mechanisches Recycling im Gegensatz zum chemischen Recycling. Dieses EPS-Regranulat wird heute üblicherweise nicht zu 100 % zur Neuproduktion eingesetzt, sondern z.B. zu 10 % mit neuem EPS-Rohstoff verschnitten. Das hat den Vorteil, dass man Aditive zusetzen und die gleiche Qualität, wie bei Neuware sicherstellen kann, aber trotzdem den „CO₂-Fußabdruck“ verringert. Der Anteil an rezykliertem EPS kann noch deutlich erhöht werden. Das macht aber derzeit noch keinen Sinn, da wegen der langen Lebensdauer von EPS in Bauanwendungen, noch nicht genügend EPS-Abfälle zur Verfügung stehen. Bereits heute bietet ein EPS-Rohstoffhersteller einen EPS-Rohstoff mit einem zertifizierten Anteil von 10 % [BASF 2022] auf dem Markt an, dessen Rezyklat-Anteil hauptsächlich aus dem Abfallströmen des Verpackungsbereichs stammt, da aus dem Bausektor noch nicht genügend Abfälle zurückkommen.



Abbildung 83: Regranulat (Bildnachweis: www.polystyreneloop.eu)

Selektive Extraktion

Bereits 1988 wurde von Kampouris et al. ein Modell zum Recycling von Polystyrol mit Lösungsmitteln wie Toluol und Benzol vorgestellt [Kampouris et al. 1988]. Der Begriff „selektive Extraktion“ nach dem CreaSolv®-Verfahren des Fraunhofer IVV [Sieber et al. 2013] beschreibt ein rohstoffliches Recyclingverfahren für Kunststoffe, die aufgrund ihrer spezifischen Löslichkeit in hoher Reinheit wiedergewonnen werden können. Das besondere Potenzial des Verfahrens liegt in der Besonderheit, dass die Polystyrol-Polymere, die HBCD-Moleküle und Störstoffe in der Lösung als einzelne Verbindungen vorliegen. Die Störstoffe werden deshalb schonend und unter Erhalt der Polystyrol-Polymereigenschaften entfernt.

Die drei Hauptschritte dabei sind:

- Auflösen des Zielkunststoffes mit einem selektiven Lösemittel; andere Bestandteile der Abfallfraktion bleiben ungelöst,
- Abtrennen von Fremdstoffen aus der gewonnenen Polymerlösung,
- Ausfällen des Zielkunststoffes aus der gereinigten Polymerlösung.

Ergänzt werden die Hauptschritte bei Bedarf durch eine vorgeschaltete Zerkleinerung und Vorreinigung sowie durch eine nachgeschaltete Konfektionierung zum mechanischen Konzentrieren, Trocknen und Compoundieren.

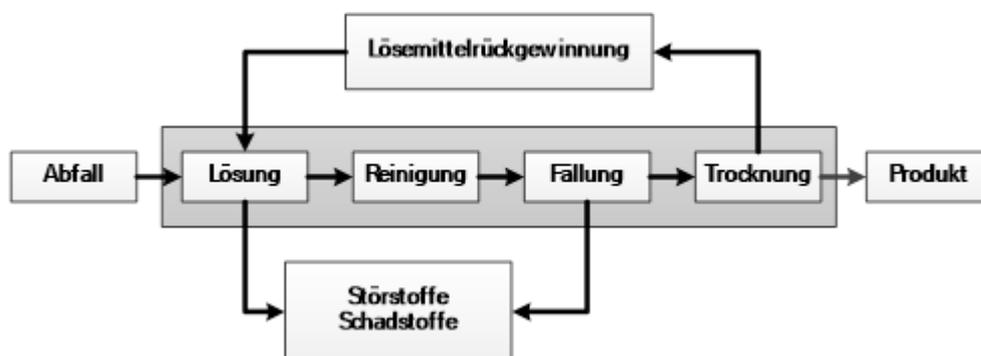


Abbildung 84: Prozessschema des CreaSolv®-Verfahrens [Sieber et al. 2013]

Nach Aussagen des Fraunhofer IVV bietet das CreaSolv-Verfahren folgende Vorteile:

- Verwendung von organischen Lösungsmitteln bei denen keine Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen entstehen,
- Trennung des gelösten Polymer Polystyrols im Falle von EPS vom Flammenschutzmittel HBCD,
- Gewinnung von Rezyklat mit Flammenschutzmittelkonzentrationen < 30 ppm,
- Rückgewinnung von Brom in einem separaten Prozess.

Eine Pilotanlage mit der Kapazität von 500 t/a bis 1000 t/a wurde von einem Industriepartner (nicht genannt) des Fraunhofer IVV erprobt.

Polystyrene Loop

Unter dem Namen PolyStyreneLoop lief ab 2017 ein von der EU gefördertes Projekt, in dem das CreaSolv® Verfahren in einem größeren Maßstab getestet und praktisch umgesetzt werden sollte [van Dijk und Reichenecker 2020]. Im niederländischen Terneuzen wurde deshalb 2018 eine Demonstrationsanlage aufgebaut, die pro Jahr ca. 3000 Tonnen EPS aufarbeiten sollte. Parallel wurden der Rückbau, die Transportlogistik und die Qualitätskontrolle der Inputströme aufgebaut. Ziel war es, das Polystyrol möglichst hochwertig zurückzugewinnen und andererseits das reglementierte Flammenschutzmittel HBCD auszuschleusen und das darin enthaltene Brom wieder zu verwenden. Terneuzen eignet sich als Standort dafür besonders gut, da dort bereits ein größerer Chemiestandort besteht, der mit dem Recycling-Brom wieder neue polymere Flammenschutzmittel (sog. Polymer-FR) herstellen kann. Das EPS aus dem Recyclingprozess wird mit dem CreaSolv-Verfahren nach der Reinigungs- und Trocknungsstufe wieder zu neuem Polystyrol-Granulat aufgearbeitet. Im Juni 2021 ging die Anlage in Terneuzen in Betrieb und hat gezeigt, dass der Kreislauf für rückgebautes EPS auch im industriellen Maßstab funktioniert. Stand 2021 war in etwa, dass die dezentral gesammelten EPS-Abfälle, zerkleinert, in sogenannten Walzenpressen zu Briketts gepresst wurden mit einer Rohdichte von etwa 400 – 450 kg/m³. Diese Stränge von gepresstem EPS wurden in die Anlage nach Terneuzen transportiert, dort aufgelöst, HBCD und andere Verunreinigungen entfernt und wieder zu PS-Regranulat verarbeitet. Dieses EPS-Regranulat wurde in EPS-Schäumbetrieben wieder zu EPS-Dämmstoffen verarbeitet. So wurde gezeigt, dass die Kreislaufwirtschaft für EPS auch im industriellen Maßstab funktioniert. Die niederländische Trägergesellschaft ging im März 2022 wegen Bauverzögerungen und Energiepreissteigerungen in Insolvenz. Seit Juni 2022 führt die GEC Group GmbH & Co. KG. (German EPS Converters Group) den Betrieb des PolyStyrene Loop Projekts weiter [IVH 2022].



Abbildung 85: EPS-Platte nach dem PolystyrolLoop Verfahren produziert (Bildnachweis: [www. PolyStyreneLoop.eu](http://www.PolyStyreneLoop.eu))

Rückbaumethoden für EPS an der Fassade

Ein äußerst wichtiger Punkt in der öffentlichen Diskussion ist, woher eigentlich die Mengen an Rückbau-EPS kommen, die später wieder in den Kreislauf eingeschleust werden sollen und vor allem wann und in welchen Mengen diese zum Recycling anfallen. Zu diesem Thema führten das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) und das FIW München ein Forschungsvorhaben [Albrecht und Schwitalla 2014] durch, in dem die Abfallströme betrachtet und für die Zukunft abgeschätzt werden sollten, aber auch die praktischen Erfahrungen und Probleme beim Rückbau von EPS aus Fassaden dargestellt werden sollten, da das WDVS und die daraus resultierenden Abfallmengen seit Jahren im öffentlichen Interesse stehen. Die Rückbaumöglichkeiten von WDVS wurden auf dem Gelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) sowie an realen Objekten begleitet. Zur Anwendung kamen praxisübliche Verfahren wie das Abschälen des Putzes und des Hartschaums mit einem Schepseisen und mithilfe von Großgeräten wie eines Baggers mit einem Schaber oder einem Greifer. Grundsätzlich konnte bei allen Abschälversuchen gezeigt werden, dass die Ablösung der Putzschicht von der darunter liegenden Hartschaumlage nahezu vollständig möglich ist.

Mechanisches Abschälen

Relativ mühsam ist das Abschälen von Hand. Deshalb wird es auch nur bei relativ kleinen Flächen angewandt, bei denen ein WDVS zurückgebaut werden soll. Freilandversuche an Versuchshäusern des IBP zeigten, dass es beim Rückbau der Putz/ Gewebe/ Armierungsmasse-Lage auf den Abzugswinkel und die Abzugsgeschwindigkeit ankommt. Die freiliegenden EPS-Platten können dann mit einem Schepseisen (großer Schaber) relativ leicht von der Punkt-Wulst-Verklebung abgelöst werden. Etwaig verbleibende Dübel werden von Hand oder mithilfe eines Bohrhammers entfernt.



Abbildung 86: Abschälen der Decklage aus Putz und Gewebe (Bildnachweis IBP)

Maschinelles Abschälen

Die Versuche mit den auf der Baustelle üblichen Großgeräten wie Schaufelbagger zeigten, dass ein selektives Ablösen der einzelnen Lagen ebenfalls möglich ist. In der Praxis kommt diese Vorgehensweise jedoch nicht zum Einsatz (siehe Abbildung 87, rechts). Üblicherweise wird der gesamte Verbund von der Gebäudefassade abgeschabt. Die selektive Vorgehensweise, bei der die einzelnen Lagen nacheinander abgelöst werden, hat den Vorteil, dass keine zusätzliche Vermischung der einzelnen Fraktionen des Verbundmaterials beim Rückbau erfolgt. In der Praxis wird der abgeschabte Verbund einer Baumischabfalltrennanlage zugeführt. Hier wird die mineralische von der organischen Fraktion abgetrennt. Zurzeit wird die abgetrennte organische Fraktion einer energetischen Verwertung durch eine kontrollierte Verbrennung zugeführt.



Abbildung 87: Selektives Abschälen der einzelnen Lagen im IBP-Versuch: Links: Oberputz, Mitte: Dämmstoff, Rechts: teilselektives Abschälen in der Praxis



Abbildung 88: Maschineller Rückbau eines WDVS in Dortmund (Bildnachweis: Carsten Hördemann 2009)

Ein selektiver Rückbau von WDVS ist bereits jetzt mit den üblichen Baumaschinen (hydraulischer Bagger mit Schaufel oder Sortiergreifer) möglich. Im Gegensatz zum Pilotversuch wird eine Entschichtung Lage für Lage aus zeitlichen Gründen derzeit auf der Baustelle nicht durchgeführt.

Beispiele: Versuchsweiser Rückbau eines Gebäudes

Bei dem dokumentierten maschinellen Rückbau des WDVS (Gebäude Liguster- gang, Ludwigshafen) kratzte ein Bagger mit einem hydraulischen Sortiergreifer den gesamten Materialverbund inklusive Dübel von der Wand (Abbildung 89). Das Abschaben der Wandfläche (ca. 500 m²) dauerte 2,5 Stunden. Die Entsorgung des Gemisches aus Dämmstoff, Kleber, Armierungsgewebe, Armierungsmasse und Oberputz erfolgte als Baumischabfall mit der Abfallschlüsselnummer 17 09 04 gemäß der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV). Bei dem Rückbau entstanden 4230 kg Baumischabfall. Der berechnete Massenanteil an Dämmstoff lag bei 450 kg, bezogen auf die Fläche von ca. 500 m², die Dämmstoffdicke von 6 cm und die Dichte von 15 kg/m³. Das entspricht einem Masseverhältnis Dämmstoff zu mineralischer Fraktion von 1 zu 8,5. Die Baumischabfälle wurden anschließend einer energetischen Verwertung über eine kommunale Müllverbrennungsanlage zugeführt.



Abbildung 89: Rückbau eines Gebäudes (Ligustergang, Ludwigshafen) (Bildnachweis: IBP)

Tabelle 24: Gegenüberstellung der in unterschiedlichen Quellen genannten Abfallmengen in Kilotonnen (kt) aus dem Rückbau von Dämmmaterialien

WDVS-Hersteller	Entsorger	EPS/XPS-Hersteller	Statistisches Bundesamt
0,1 kt (EPS)	1 kt (WDVS)	9 kt (EPS/XPS)	85 kt (Dämmmaterial)

Prognose über Rückbaumengen von EPS aus WDVS

Die Abfallmengen an EPS-Hartschaumstoffen [Albrecht und Schwitalla 2014] bestimmen die zukünftige Entwicklung von Verfahren, mit denen der Rückbau und die Verwertung ökonomisch und ökologisch zu betreiben sind. Da Schätzungen über die in Zukunft zu erwartenden Abfallmengen an rückgebautem EPS zwischen Entsorgern, EPS-Herstellern und statistischem Bundesamt sehr unterschiedlich erfasst werden, streuen die Mengen sehr stark. Deshalb wurde ein Prognosemodell gewählt, das sehr große Streubreiten zulässt.

Nachfolgend sind die Prognosen für die Rückbauquoten an EPS gesamt dargestellt. Als Basis für diese Prognosen wurden die jährlichen EPS-Absatzmengen für WDVS für den Zeitraum von 1977 bis 2012 und für alle Bauanwendungen für den Zeitraum von 1960 bis 2012 herangezogen. Für die Abschätzung wurde eine mittlere Lebensdauer von EPS von 40 bzw. 50 Jahren angenommen. Der angenommene Rückbau erfolgt über ± 20 Jahre respektive ± 25 Jahre.

Für die Berechnung der Rückbaumengen wurden zwei Modelle verwendet:

- a) Rückbau mit einer konstanten Rückbaurrate r über einen Zeitraum z
- b) Rückbau, der einer Normalverteilung entspricht.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

mit

- x Jahr, in dem der Rückbau beginnt
- μ Lebensdauer des WDVS in [a]
- σ Standardabweichung der Lebensdauer in [a]

Für die Berechnung der zukünftigen Rückbauquoten nach Modell (a) wurden Rückbauraten von 2 % über einen Zeitraum von 50 Jahren und eine Rückbauquote von 2,5 % über einen Zeitraum von 40 Jahren angenommen.

Die Berechnung der zu erwartenden Rückbaumengen nach Modell (b) erfolgte unter den folgenden Annahmen (Abbildung 90):

- c) $\mu = 50, \sigma = 8,33$
- d) $\mu = 50, \sigma = 12,75$
- e) $\mu = 40, \sigma = 6,67$

Das mögliche Rückbauaufkommen wurde für eine Lebensdauer von 40 Jahren von EPS bis zum Jahr 2032 berechnet. Bei einer Lebensdauer von 50 Jahren kann die rückgebaute Menge im Jahr 2037 bereits 120.000 t betragen.

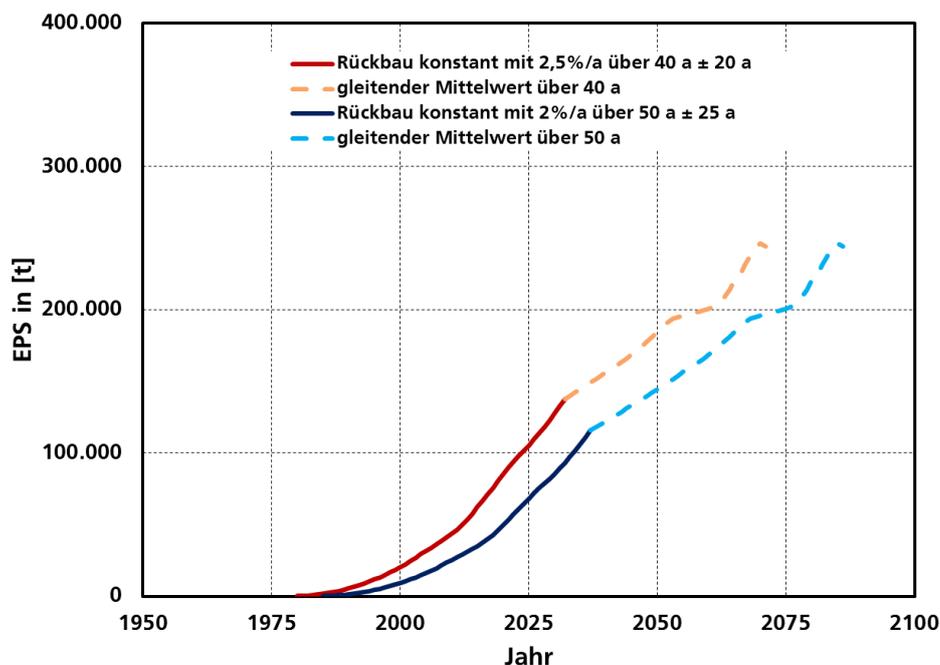


Abbildung 90: Prognostizierte Rückbaumengen an EPS aus Bauanwendungen

Die Prognosen zeigen, dass in 40 bis 50 Jahren die jährlichen Abfallmengen des rückgebauten EPS aus WDVS sich auf dem Niveau der Jahresproduktionsmengen von EPS für WDVS bewegen werden. Sollte die Prognose zutreffen, könnte die Produktion von EPS für den Bereich WDVS mit steigenden Rezyklatmengen ganz oder teilweise gedeckt werden und dadurch die Kreislaufanteil für EPS deutlich gesteigert werden.

Chemisches Recycling von EPS durch Pyrolyse

Bei Glas, Papier und Metallen ist die Recycling Quote auch heute schon sehr hoch und liegt bei über 70 %. Der Grund dafür ist, dass die Einsammellogistik und die Recyclingprozesse etabliert sind und gut laufen. Bei Kunststoffabfällen liegt die Recyclingquote nach Schätzungen weit darunter und deshalb landet ein Großteil der Kunststoffabfälle außerhalb Deutschlands nach wie vor auf Deponien, in Deutschland in der Müllverbrennung oder wird exportiert. Um den Anteil am Kunststoff Recycling zu erhöhen, benötigt man ergänzende Recyclingwege, um auch verschmutzte, vermischte oder schwer zu trennende Kunststoff Abfälle recyceln zu können, die beim mechanischen Recycling schwer zu handhaben sind. Eine zukunftsweisende Alternative ist deshalb das chemische Recycling bei dem man unerwünschte Aditive und Verunreinigungen abtrennen und qualitativ hochwertige Grundstoffe wiedergewinnen kann. Üblicherweise wird für das chemische Recycling das „Pyrolyse“ Verfahren verwendet. Unter Pyrolyse versteht man das thermochemische Aufspalten von organischen Verbindungen. Bei Temperaturen von 300 °C – 700 °C werden unter Ausschluss von Sauerstoff die großen Moleküle aufgebrochen und kleinere Moleküle erzeugt, ohne dass weitere Chemikalien zugesetzt werden müssen. Beim Recycling von Kunststoffen entstehen neben Feststoffen und Gasen vor allem Pyrolyseöl, aus dem man Monomere, wie Styrol zu großen Anteilen wiedergewinnen kann. Da die Pyrolyse ein endothermer Vorgang ist, muss zur Aufspaltung der Isomere Energie zugeführt werden. Dafür kann unter anderem das entstehende Pyrolysegas verwendet werden. Insgesamt ist aber zum Betrieb einer Pyrolyseanlage zusätzlich Energie notwendig.

Seit 2021 sind erste Polystyrol-Rohstoffe mit Anteilen aus dem chemischen Recycling unter den Zusatz-Bezeichnungen „Chemcycling/Ccycled“ [Anonymus 2021] für Verpackungszwecke auf dem Markt erhältlich. Die Herkunft und Menge des recycelten Pyrolyseöls als Input, sowie die verkauften Mengen an PS-Rohstoff als Output werden über einen sogenannten Massebilanzansatz von einem unabhängigen Zertifizierer überwacht. Das System funktioniert ähnlich wie beim Ökostrom aus regenerativen Quellen.

Extrudiertes Polystyrol (XPS)

Im Gegensatz zu EPS-Dämmstoffen werden XPS-Dämmstoffe durch Schmelzen von Polystyrol-Granulat unter Druck und dem Zusatz von Treibmitteln und anderen Aditiven in Extrudern produziert. Durch Schlitzdüsen entsteht nach dem Extruder ein

plattenförmiger Endlosstrang, der geschlossene Zellen und eine Schäumhaut aufweist. Beim Fräsen der Kantenprofilierung, der Schäumhaut, von Rillen, bei Anfahrtsabfällen usw. entstehen größere Mengen von XPS-Abfällen, die im XPS-Herstellwerk gleich beim Entstehen abgesaugt oder zerkleinert werden. Danach wird das Mahlgut gesiebt und entstaubt und in Silos gelagert. Aus diesen Silos werden dann die XPS-Partikel in einer bestimmten Korngrößenfraktion und in unterschiedlichen Massenanteilen wieder dem Extruder zugeführt. Nach erneutem Extrudieren entstehen wieder qualitativ gleichwertige XPS-Dämmplatten. Der prozentuale Anteil des wieder eingesetzten XPS-Abfalls ist je nach Qualitätsanforderungen für das Endprodukt begrenzt, liegt aber im zweistelligen Prozent-Bereich. Die Wiederverwertung im Herstellwerk kann sehr genau gesteuert und kontrolliert werden, da der Rohstoff, die Farbe, das Treibmittel und die Additivzusammensetzung genau bekannt sind und Verunreinigungen ausgeschlossen werden können.

Baustellenabfälle

Zumindest zwei XPS-Hersteller bieten ihren Kunden PE-Säcke an, um Baustellenabfälle zu sammeln und bei entsprechend großen Mengen und sortenreiner Sammlung, diese zurückzunehmen. Ein XPS-Hersteller nutzt dazu sein Händlernetz (nur XPS mit einem bestimmten farblich erkennbaren Aufdruck), da diese von den Liefer-LKWs regelmäßig angefahren werden. Die zurückgenommenen XPS-Abfälle werden in Recyclingbetrieben oder beim Hersteller vorzerkleinert, Metalle abgeschieden, entstaubt und in größeren Chargen homogenisiert. So kann man größere Chargen mit bekannten Eigenschaften herstellen mit geringen störenden Verunreinigungen. Diese Recyclingchargen können wie beim EPS-Recycling in einem Recycling Extruder geschmolzen und in einem bestimmten Prozentsatz dem Regranulat ohne Qualitätsverluste beigegeben werden. Das regranulierte EPS wird als sogenanntes GPPS (General Purpose Polystyren) in verschiedenen Qualitätsstufen von glasklar bis farblich verändert, unter Zugabe von Treibmittel und Aditiven wieder dem Produktionsprozess zugegeben. Damit lassen sich z.B. XPS-Dämmplatten für Anwendungen nach DIN 4108-10 herstellen. Für Anwendungen mit allgemeinen Bauartgenehmigungen (z.B. Perimeterdämmung, Gründach oder Parkdeck, sowie als lasttragende Dämmung unter Gründungsplatten, können diese Regranulate meist nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden, da das Regenerat meist nicht genau der hinterlegten Rezeptur und Spezifikation für diese Anwendungen, entspricht.

Die meisten XPS-Baustellenabfälle werden nicht getrennt gesammelt und enthalten baustellenübliche Verunreinigungen wie Kleber-, Abdichtungs-, Mörtel-, Putzanhaftungen, Sand oder sonstige Beimengungen. Wegen der Verunreinigungen sind diese Abfälle nur unter hohem Aufwand zu sortieren und wiederzuverwerten. Da bisher auch keine einheitliche Sammellogistik besteht, um die Baustellenabfälle wieder zum Hersteller oder einem Recycling Betrieb zurück zu transportieren, werden XPS-Abfälle auf Baustellen meist in Kunststoffsäcken gesammelt und thermisch verwertet.

Abfälle aus Dachsanierungen und Abbruchabfälle

Die Abfallmengen aus Dachsanierungen mit XPS sind noch relativ gering, da die meisten Umkehrdächer erst in den letzten 10 bis 40 Jahren gebaut wurden und noch nicht zum Abbruch anstehen. Einzelne bekieste und als Parkdach ausgeführte Umkehrdächer wurden bereits saniert oder wegen Umbauten wieder rückgebaut. Bei Parkdächern kann der Rückbau je nach Fahrbahnbelag unterschiedlich erfolgen. Pflastersteine, Splitt, aufgestellte Betonplatten oder Kies aus bekiesten Dächern lassen sich gut von den lose verlegten XPS-Platten trennen und werden gesondert von den mineralischen Bauabfällen entsorgt. Die Dämmplatten werden getrennt gesammelt und meist thermisch verwertet. XPS-Platten unter Ortbeton-Fahrbahnbelägen werden meist beim Ausbau stark beschädigt und daher auch thermisch verwertet. Die thermische Verwertung ist häufig auch deshalb notwendig, da XPS-Platten, die vor dem Jahr 2002 produziert wurden, oft noch FCKW- oder HFCKW-Treibmittel enthielten. Genauso verhält es sich mit XPS-Platten, die vor 2015 hergestellt wurden, da diese mit dem Flammschutzmittel HBCD hergestellt wurden, welches ausgeschleust werden muss und nicht mehr in die Umwelt gelangen darf. Abbrucharbeiten von XPS-Dämmstoffen aus Kellerwänden, Kellerböden oder unter der lastabtragenden Gründungsplatte fallen bisher nur in sehr kleinen Mengen an, da bei Gebäudenutzungsdauern von 50 bis 100 Jahren, die Lebensdauer von Gebäuden, bei denen XPS im Erdreich eingebaut wurde, noch nicht erreicht ist.

PolyStyreneLoop

Um auch XPS-Platten recyceln zu können, die FCKW/HFCKW-Treibmittel, und/oder HBCD-Flammschutzmittel enthalten, wurden Versuche unternommen, diese ebenfalls im PolyStyreneLoop Verfahren aufzuarbeiten. Dazu wurde ein Voruntersuchungsverfahren entwickelt, um mittels XRF-Scanner (Röntgenfluoreszenz-Analyse) [van Dijk und Reichenecker 2020] chlorhaltige Treibmittel auch in alten XPS-Platten erkennen zu können und diese dem richtigen Entsorgungsstrang zuzuführen. Für XPS mit chlorhaltigen Treibmitteln (FCKW und H-FCKW), die teilweise bis 2001 in Deutschland eingesetzt wurden, musste eine Vorbehandlungsstufe (pre-treatment) für XPS-Dämmstoffe entwickelt werden, um die (H)-FCKW-Treibmittel abzutrennen. Dazu wurden in gasdichten Kammern der XPS-Schaum zerkleinert, die XPS-Zellen mit Lösemitteln geöffnet, und in Brikettpressen zu Strängen mit Rohdichten von 100 – 450 kg/m³ gepresst. Diese Brikettstränge können auf Paletten gelagert und transportiert werden (Abbildung 91) und dann dem PolyStyreneLoop Verfahren wieder zugeführt werden. Die abgetrennten Treibmittel werden in einer Kühlfalle, ähnlich wie beim Kühlschranks-Recycling, abgeschieden und anschließend verbrannt. In ersten Versuchen an Abbruchabfällen aus XPS oder neuen Anfahrversuchen konnte gezeigt werden, dass das Verfahren quantitativ, mit ≥ 95 % Abscheidung [van Dijk und Reichenecker 2020] funktioniert. Aus den im Kapitel EPS genannten Gründen stand die Anlage seit März 2022 still und wird unter Führung der GEC Group GmbH & Co. KG. (German EPS Converters Group) fortgeführt [IVH 2022].



Abbildung 91: XPS oder EPS zu Stangen gepresst, wird mit dem LKW transportiert. (Bildnachweis: www.PolyStyreneLoop.eu)

Polyurethan-Hartschaum (PU)

Polyurethan (PU)-Hartschaum-Dämmstoffe werden in der Form von Blockschäumen ohne Deckschichten, Bandschäumen mit flexiblen Deckschichten und als Sandwichpaneele mit starren Stahl- oder Aluminium- Deckschichten hergestellt. Als sogenannter In-situ-Schaum oder PU-Ortschaum wird Polyurethan-Hartschaum als Dachspritzschaum zur Sanierung von Dächern oder als Gießschaum zur Wärmedämmung von Behältern und Rohrleitungen eingesetzt. Abfälle aus der Produktion werden meist in Briketts gepresst und später zu Recyclingplatten verarbeitet oder in Müllverbrennungsanlagen energetisch verwertet. Die energetische Verwertung wird auch genutzt, wenn PU-Dämmplatten aus dem Flachdach, dem Steildach oder dem Fußboden rückgebaut werden, da diese durch Anhaftungen von Dachabdichtungen, Unterspannbahnen, Befestigern oder Estrichen meist verschmutzt und damit nicht sortenrein vorliegen.

PU-Recyclingplatten

Einige Hersteller pressen PU-Produktionsabfälle unter Zugabe von Isocyanat-Klebern zu hochfesten PU-Recyclingplatten, die eine hohe Druckfestigkeit, eine niedrige Wärmeleitfähigkeit und eine relativ niedrige Wasseraufnahme aufweisen. Für die PU-Recyclingplatten liegen eine Europäische Technische Bewertung (ETA) und eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung [DIBt 2021b, DIBt 2021c] vor. Die PU-Recyclingplatten werden z. B. im Fensterrahmenbau, für Türen und im Küchenbau eingesetzt, wo hohe Druckfestigkeiten und eine niedrige Wasseraufnahme gefordert werden. Sie werden aber auch zur Vermeidung von Wärmebrücken verwendet, wenn Fenster in die Dämmebene verlagert werden sollen, als Einbauzarge für Dachflächenfenster, für hochbelastete Parkettböden oder im Fahrzeugbau

eingesetzt. In diesem Bereich scheint die Nachfrage hoch zu sein, so dass Produktionskapazitäten ausgebaut werden.

PU-Dosenrecycling

Ein Recycling-Betrieb in Oberfranken organisiert deutschlandweit das Recycling von PU-Schaumdosen. In Deutschland werden nach Angabe etwa 23 Millionen PU-Schaumdosen jährlich als Baukleber, Tür- und Fensterzargen-Schaum oder zur Dämmung kleiner Fugen verwendet. Beim Kauf einer PU-Schaumdose entrichtet der Kunde automatisch einen Beitrag mit dem das spätere Recycling der zurückgegeben Dosen organisiert wird. Der Kunde kann die Dosen beim Handel zurückgeben, Handwerker und Bauunternehmer können die Dosen selbst sammeln und ab sechs Kartons die Dosen kostenlos vom Recycling-Betrieb abholen lassen. Nach Angabe des Recyclingbetriebs werden sowohl die verbliebenen Restinhalte der Dosen, wie auch das Treibgas und die Metalldosen zu etwa 95 % verwertet.

Baustellen-Verschnitt Abfälle

Seit einigen Jahren können Handwerker oder Do-it-Yourself Kunden auf der Internetplattform „ecoservice24.com“ unter Angabe der Postleitzahl Kunststoffsäcke und/oder Container bestellen, die dann dezentral von lokalen Entsorgern abgeholt und gesammelt werden. Die Kosten für das Abholservice bezahlt der Endkunde, also der Handwerker oder Do-it-Yourself Kunde. Wie viel PU-Abfälle tatsächlich wieder recycelt werden, kann an dieser Stelle nicht gesagt werden. Die meisten dieser PU-Abfälle dürften aber thermisch verwertet werden.

Biomasse-Bilanz-Ansatz als Sekundärrohstoff

Ein Rohstoffhersteller vertreibt seine PU-Rohstoffe, für deren Produktion als Sekundärrohstoffquelle, erneuerbare Rohstoffe aus der Landwirtschaft verwenden wurden, unter dem Namenszusatz „Biomasse-Bilanz-Ansatz BMB“. Das heißt, dass landwirtschaftliche Abfälle zuerst in chemische Grundstoffe, wie Methanol oder Naphtha (Rohbenzin) umgewandelt werden. Die biobasierten, chemischen Grundstoffe durchlaufen den üblichen Produktionsprozess [Anonymus 2022c] mit den gleichen Qualitätsanforderungen bis zu den PU-Rohstoffen Isocyanat oder Polyol. Der Kunde kann die Rohstoffe nicht unterscheiden, bekommt aber ein Zertifikat vom Rohstoffhersteller, dass seine Rohstoffcharge aus der biobasierten Menge von Rohstoff stammt. Eine unabhängige Zertifizierungsstelle kontrolliert und bescheinigt regelmäßig, dass nicht mehr „BMB“-Rohstoff verkauft wird, als durch den Einsatz von biobasierten Grundstoffen produziert werden konnte. Der Verarbeiter der „BMB-Rohstoffe“ bescheinigt zum Schluss mit einem weiteren Zertifikat, dass der Auftrag mit „BMB- Rohstoff“ ausgeführt wurde. Laut Angabe der Hersteller kann so der CO₂-Abdruck der Wärmedämmung deutlich verringert werden. Der gleiche Weg über einen Pyrolyseschritt oder chemisches Recycling über die Solvolyse [Bauer 1995, Behrendt et al. 2000] wäre auch für Abbruchabfälle aus Polyurethan möglich und wird derzeit im Rahmen von Forschungsvorhaben erprobt.

Phenolharz- Hartschaum (PF)

Obwohl Phenolharz schon 1907 erfunden wurde [Anonymus 2011b], wurden erst etwa 1970 offenzellige Phenolharzschäume auf den europäischen Markt gebracht. Geschlossenzellige Phenolharzschäume, sind erst seit etwa 1990 auf dem europäischen Markt. Phenolharz- Hartschaum ist ein Duroplast und lässt sich deshalb mit heutigen Mitteln weder lösen noch schmelzen. Deshalb ist ein werkstoffliches Recycling derzeit nicht möglich. Die Produktionsabfälle und Abfälle vom Einbau werden deshalb thermisch verwertet. Bauherren und Handwerkern steht die Internetplattform ecoservice24 zur Abholung von Baustellen Abfällen zur Verfügung. Lokale Entsorger übernehmen dann die Lieferung und den Abtransport der Container. Abfälle aus dem Abbruch fallen wegen der relativ kurzen Zeit, die diese Stoffe auf dem Markt sind, kaum an. Nach Angabe von Herstellern von Phenolharzschäumen wird an zukünftigen Recyclingkonzepten gearbeitet.

Holzfaserdämmstoffe (WF)

Eine ebenfalls junge Produktgruppe stellen die Holzfaser-Dämmstoffe dar. Die Holzfaserdämmstoffe kamen etwa 1980 auf den Markt. Produktionsabfälle (Pre-Consumer-Waste) können klein gemahlen werden und im Produktionsprozess wieder verarbeitet werden. Die in einigen Holzfaser-Dämmstoffen mit niedrigen Rohdichten enthaltenen Kunststoff-Stützfasern und Mineralsalze (diese werden häufig als Flammschutzmittel verwendet) [Sprengard et al. 2013] stören den Wiederaufarbeitungsschritt nicht. Auch die beim Trockenverfahren (einer der beiden üblichen Produktionsprozesse) eingesetzten Polyurethan-Bindemittel und -Kleber können für die Aufarbeitung im Produktionsprozess belassen werden. Baustellenabschnitte können, wenn sie sortenrein sind, wieder dem Produktionsprozess zugeführt werden [Anonymus 2023c]. Üblicherweise werden sie thermisch verwertet. Abbruchabfälle und Abfälle aus dem Rückbau fallen derzeit noch nicht in relevanten Mengen an. Auch diese Abfälle sind selbstverständlich thermisch verwertbar.

Mineralische Dämmplatten

Diese Dämmstoffe werden aus Kalk, Sand, Zement und Wasser hergestellt. Produktionsabfälle, Bruch und Verschnitt werden gemahlen und können im Herstellwerk als Sekundärrohstoff wieder vollständig dem Herstellprozess zugeführt werden. Um auch sortenreine Baustellenabfälle einzusammeln und zurückzuführen, hat die Firma Xella bereits 2015 ein „Big Bag-Rücknahmesystem“ eingeführt, mit dessen Hilfe die Rücknahme der Baustellenabfälle einfach durchzuführen ist [Anonymus 2023d]. Abbruchabfälle können mit dem Bauschutt entsorgt und z.B. in Bauschutt Recyclinganlagen aufgearbeitet werden. Diese Recyclingstoffe werden zum Großteil wieder als Füll- und Befestigungsmaterial im Straßen-, Wege- oder Landschaftsbau

eingesetzt, was aber im Gegensatz zum Einsatz als Sekundärrohstoff für die Neuproduktion eher ein Downcycling [Anonymus 2023d] bedeutet.



Abbildung 92: Big Bag-Rücknahmesystem der Firma Xella (Bildnachweis: Xella)

6.4 Weitere Entwicklung und Ausblick

In den vorherigen Abschnitten wurde exemplarisch gezeigt, wie das Recycling von Dämmstoffen für bestimmte Stoffgruppen heute schon funktioniert. Produktionsabfälle stellen meist kein Problem beim Recycling dar, da die Abfälle sortenrein vorliegen und die genaue Zusammensetzung bekannt ist. Diese Abfälle können zerkleinert oder zu Briketts gepresst und meist direkt dem Produktionsprozess wieder zugegeben werden. Dadurch, dass die Zusammensetzung der Abfälle sehr genau bekannt ist, können auch Aditive, Produktionshilfsmittel oder Flammschutzmittel in der Konzentration zugegeben werden, um beim Endprodukt wiederum bestimmte Eigenschaften zu erzeugen. Bei Zuschnitts-Abfällen auf der Baustelle ist die sortenreine, teilweise sogar herstellereinspezifische Erfassung notwendig und die Schulung der Handwerker am Bau wäre hilfreich. Den Rücktransport der Zuschnitts-Abfälle zum ursprünglichen Dämmstoffhersteller könnte die Politik wesentlich erleichtern und fördern, in dem diese als werthaltiger Dämmstoff eingestuft werden und nicht wie bisher als Abfall. Durch die Umwidmung von Dämmstoff in Abfall ist in Deutschland eine Genehmigung für den Transport und die Lagerung der Zuschnitts-Abfälle notwendig. In Zeiten von knappen und deutlich teureren Rohstoffen, aber auch in Zeiten von unsicheren Versorgungssituationen und Transportwegen müsste ein großes Interesse an einer unabhängigen Rohstoffversorgung bestehen. In diese Richtung geht auch die politische Forderung nach mehr Kreislaufwirtschaft und Unabhängigkeit von ausländischen Rohstoffquellen. Ermutigend ist, dass für die weit verbreiteten Mineralwolle-, EPS-, XPS- und PU-Dämmstoffe Verwertungsmöglichkeiten bestehen, deren Machbarkeit zu mindestens im kleinen Maßstab gezeigt und erprobt wurden. Eine große Herausforderung ist immer noch eine Sammellogistik, vor allem für alte Abbruchabfälle, deren Zusammensetzung nicht bekannt ist und die noch inzwischen reglementierte Inhaltsstoffe enthalten können. In diesen Fällen ist die thermische Verwertung in modernen Müllheizkraftwerken oder bei mineralischen

Dämmstoffen die Deponierung in speziellen Bauschuttdeponien oder der Versatz in Bergwerken der einzig mögliche Entsorgungspfad. Die thermische Verwertung oder Deponierung ist manchmal auch deshalb der sinnvollste Entsorgungspfad, weil ein Transport der voluminösen Dämmstoffe über mehrere hundert Kilometer ökologisch nicht vertretbar wäre. Eine weitere Herausforderung ist, dass recycelte Rohstoffe und Dämmstoffe bei gleichen Eigenschaften teurer sind als Dämmstoffe aus neuen Rohstoffen, da Einsammeln, Transport und das Aufarbeiten personal- und energieaufwendig sind. Wenn man die Recyclingquote deutlich anheben möchte, wäre eine dezentral arbeitende Logistik mit relativ kurzen Wegen zu Recyclinganlagen oder Herstellwerken notwendig. Das wird ohne staatliche Anreize oder staatliche Steuerungsmechanismen, vergleichbar mit einem Dosenpfand oder einer Abfallabgabe, nicht möglich sein. Aber auch die thermische Verwertung kann sinnvoll sein, wenn die Dämmstoffe nach einem langen Dämmstoffleben, bei dem sie ein Vielfaches der für die Herstellung eingesetzten Energie eingespart haben, zur thermischen Verwertung kommen, und die in den Dämmstoffen steckende Energie zusätzlich genutzt wird.

7 Verpflichtende und freiwillige Systeme zur Feststellung der deklarierten Leistung und der Qualitätssicherung

Der Begriff Qualität wird nach DIN EN ISO 9000 als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“ beschrieben. Im Sinne der europäischen Bauproduktenverordnung werden die Merkmale von Bauprodukten und Methoden zu deren Bestimmung in den sogenannten harmonisierten technischen Spezifikationen (hEN, EAD/ETA) definiert. Auf dieser Basis deklariert der Hersteller im Rahmen der CE-Kennzeichnung Eigenschaften (Declaration of Performance = DoP), wobei anzumerken ist, dass nicht alle in einer hEN oder EAD gelisteten Eigenschaften bestimmt werden müssen. Die Auswahl richtet sich nach den geplanten Anwendungsgebieten und kann innerhalb Europas je nach den Bauvorschriften der Mitgliedsstaaten, auch unterschiedlich sein. Die Anforderungen an Bauprodukte ergeben sich in Deutschland aus den Bauvorschriften der Bundesländer. Für eine CE-Kennzeichnung muss zumindest eine Eigenschaft, entsprechend der jeweiligen harmonisierten technischen Spezifikation deklariert sein. So wäre theoretisch auch eine CE-Kennzeichnung für einen Dämmstoff möglich, die als einzige Eigenschaft das Brandverhalten der Klasse F (= keine Anforderung an das Brandverhalten) ausweist. Ein solches Produkt könnte in Europa verkauft werden, wäre aber in keinem europäischen Land anwendbar. Das Beispiel zeigt also, dass die CE-Kennzeichnung zunächst nichts über die Eignung eines Produkts für einen bestimmten Anwendungsfall aussagt und auch kein Qualitätszeichen darstellt.

Für Dämmstoffe die in Deutschland durch nationale Zulassungen oder Genehmigungen geregelt sind, werden die vom Hersteller deklarierten Merkmale in den durch das DIBt ausgestellten Dokumenten spezifiziert. Dies sind die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ), die allgemeine Bauartgenehmigung (aBG), die Zustimmung im Einzelfall (ZiE) sowie die vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG).

Zur Feststellung der Leistung werden zunächst Prüfungen zur initialen Feststellung des Produkttyps (ITT = initial type testing) durchgeführt. Auf dieser Basis werden die Werte deklariert (DoP, bzw. nationale Zulassungen, etc.). Weiterführende Maßnahmen zur Qualitätssicherung werden mittlerweile weitgehend in Herstellerverantwortung als werkseigene Produktionskontrolle (FPC = Factory Production Control) durchgeführt. Nur für bestimmte Eigenschaften sind je nach System zur Überprüfung und Bewertung der Leistungsbeständigkeit (AVCP = Assessment and Verification of Constancy of Performance) externe, notifizierte Stellen hinzuzuziehen. Eine Überwachung ist nur noch in wenigen Fällen vorgeschrieben.

Damit liegt die bauaufsichtlich verpflichtende Qualitätsüberwachung inzwischen weitgehend auf Seiten der Hersteller, weshalb die Bedeutung und Verbreitung

freiwilliger Qualitätszeichen, die durch unabhängige und notifizierte Prüf- und Zertifizierungsstellen vergeben und überwacht werden, in den letzten Jahren gestiegen ist. Im Folgenden werden Anforderungen an unabhängige Drittstellen, die im Rahmen der Qualitätssicherung in unterschiedlicher Funktion (Prüfung, Überwachung, Zertifizierung) auftreten können sowie die verpflichtenden und freiwilligen Systeme zur Feststellung der deklarierten Leistung und zur Qualitätssicherung beschrieben.

7.1 Unabhängige Drittstellen

Wie einleitend beschrieben müssen bei der Produkttypfeststellung und dem laufenden Nachweis zur Leistungsbeständigkeit in bestimmten Fällen unabhängige Drittstellen eingeschaltet werden. Prüfinstitute die als Drittstelle tätig werden wollen, benötigen eine Anerkennung durch das DIBt.

Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen (PÜZ-Stellen)

Die Aufgaben der sogenannten PÜZ-Stellen sind in Deutschland in den Landesbauordnungen geregelt und lassen sich entsprechend der Bezeichnung in drei Aufgabengebiete unterteilen.

Prüfstellen (P-Stellen) übernehmen Aufgaben im Bereich der Prüfung von Bauprodukten vor der Bestätigung der Übereinstimmung, d.h. beispielsweise im Rahmen von Zulassungsprüfungen. Die Zertifizierungsstellen (Z-Stellen) bescheinigen anschließend die Konformität der ermittelten Leistung mit den Anforderungen der Regelungsgrundlage. Die Überwachungsstellen (Ü-Stellen) übernehmen Aufgaben im Bereich der Fremdüberwachung.

Um als PÜZ-Stelle anerkannt zu werden, muss ein Prüfinstitut nachweislich unparteilich, technisch und fachlich kompetent und von der technischen Ausstattung her in der Lage sein die geforderten Aufgaben durchzuführen. Eine Anerkennung als PÜZ-Stelle erfolgt durch das DIBt und wird im Verzeichnis der PÜZ-Stellen veröffentlicht.

<https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/P4/LBO/PUEZ-Verzeichnis.pdf>

Notifizierte Stellen (Notified body)

Notifizierte Stellen übernehmen Aufgaben im Rahmen der CE-Kennzeichnung von Bauprodukten. Die Aufgaben sind in der Bauproduktenverordnung geregelt.

Notifizierte Stellen prüfen die Leistung von Bauprodukten (AVCP System 3), überprüfen und zertifizieren die werkseigene Produktionskontrolle (AVCP System 2+)

und bescheinigen die Leistungsbeständigkeit des Bauprodukts (AVCP System 1 und 1+).

Die Anforderungen an notifizierte Stellen sind in §43 der Bauproduktenverordnung geregelt. Ähnlich den Anforderungen an die PÜZ-Stellen ist vor allem Unparteilichkeit, technische und fachliche Kompetenz sowie die apparative Ausstattung zur Durchführung der Prüfungen erforderlich. Die Registrierung als notifizierte Stelle erfolgt in Deutschland durch das DIBt. Notifizierte Stellen in anderen europäischen Ländern werden durch die dort jeweils ansässigen Baubehörde autorisiert. In Deutschland ist die Voraussetzung für eine Notifizierung, die Akkreditierung durch die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS). Neben der Überprüfung der allgemeinen Anforderungen aus der Bauproduktenverordnung, gibt es gesonderte Akkreditierungen für Prüflabore (DIN EN ISO/IEC 17025) und Zertifizierungsstellen (DIN EN ISO/IEC 17065). Dabei muss das Vorhandensein eines geeigneten Qualitätsmanagementsystems, entsprechender Verfahrensanweisungen sowie die fachliche Kompetenz der Mitarbeiter und die Kalibrierungen der Prüfeinrichtungen nachgewiesen werden. Die Einhaltung dieser Anforderungen wird durch die DAkkS in regelmäßigen Abständen in Form von Audits überprüft.

Notifizierten Stellen werden im Verzeichnis der notifizierten Stellen der Europäischen Kommission, der sogenannten NANDO-Liste, geführt.

https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=directive.notifiedbody&dir_id=33

7.2 Verpflichtende Systeme

Die verpflichtenden Vorgaben zur Qualitätssicherung unterscheiden sich je nachdem ob ein Dämmstoff einer harmonisierten technischen Spezifikation unterliegt oder ob es sich um ein Material handelt, das durch nationale Zulassungen oder Genehmigungen geregelt wird.

Dämmstoffe die einer harmonisierten technischen Spezifikation unterliegen

Sowohl harmonisierte europäische Produktnormen als auch die Europäischen Bewertungsdokumente (EAD) und daraus abgeleiteten Europäischen Technischen Bewertungen (ETA) enthalten einen eigenen Abschnitt, in dem die Maßnahmen zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit beschrieben sind. Dieser Passus zur sogenannten AVCP (Assessment and Verification of Constancy of Performance) enthält einen Hinweis auf das jeweils anzuwendende System zur Konformitätsbewertung. Die unterschiedlichen Systeme 1 – 4 sind in Anhang V der Bauproduktenverordnung beschrieben (Tabelle 25).

Tabelle 25: Zuordnung der Aufgaben zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit (AVCP)

System	Aufgabe	Ausführende Stelle	Bescheinigung
1+	Werkseigene Produktionskontrolle (FPC) Zusätzliche Prüfung von im Werk entnommenen Proben	Hersteller	Leistungserklärung
	Typprüfung (ITT) Erstinspektion des Werks und der FPC Laufende Überwachung, Bewertung, Evaluierung der FPC Stichprobenprüfung (Audit testing)	Notifizierte Stelle	Bescheinigung der Leistungsbeständigkeit
1	Werkseigene Produktionskontrolle (FPC) Zusätzliche Prüfung von im Werk entnommenen Proben	Hersteller	Leistungserklärung
	Typprüfung (ITT) Erstinspektion des Werks und der werkseigenen Produktionskontrolle Laufende Überwachung, Bewertung, Evaluierung der FPC	Notifizierte Stelle	Bescheinigung der Leistungsbeständigkeit
2+	Typprüfung (ITT) Werkseigene Produktionskontrolle (FPC) Zusätzliche Prüfung von im Werk entnommenen Proben	Hersteller	Leistungserklärung
	Erstinspektion des Werks und der FPC Laufende Überwachung, Bewertung, Evaluierung der FPC	Notifizierte Stelle	Konformität mit der FPC
3	Werkseigene Produktionskontrolle (FPC)	Hersteller	Leistungserklärung
	Typprüfung (ITT) (Probennahme durch Hersteller)	Notifizierte Stelle	-
4	Typprüfung (ITT) Werkseigene Produktionskontrolle (FPC)	Hersteller	Leistungserklärung
	-	Notifizierte Stelle	-

Wie in Tabelle 25 zu erkennen, nehmen die Aufgaben der notifizierten Stelle vom System 1+ bis System 4 kontinuierlich ab. Die früher im Rahmen der Vergabe des sogenannten Ü-Zeichens für Dämmstoffe etablierte Überwachung durch Stichprobenprüfungen von Proben aus der Produktion durch eine notifizierte Stelle, findet nur noch im System 1+ Anwendung.

Die Auswahl der anzuwendenden AVCP-Systeme erfolgt gemäß Artikel 28 der Bauproduktenverordnung unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Gesundheit und Sicherheit von Menschen und Umwelt und ist in sogenannten delegierten Rechtsakten dokumentiert. Dabei werden zwar Erfahrungen der einzelstaatlichen Behörden in Bezug auf die Marktüberwachung berücksichtigt – intentionsgemäß sollen jedoch jeweils die am wenigsten aufwändigen Systeme gewählt werden, mit denen eine Erfüllung der Grundanforderungen an die Sicherheit von Bauwerken noch gewährleistet werden kann.

Die meisten Wärmedämmstoffe werden nach diesem Verfahren dem System 3 zugeordnet. Hierbei übernimmt die notifizierte Stelle nur noch die Aufgabe ausgewählte Prüfungen im Rahmen der Typprüfung durchzuführen. Die Probennahme und teilweise auch Prüfungen können durch die Hersteller vorgenommen werden. Lediglich im Falle von Verwendungen, die Vorschriften zum Brandverhalten unterliegen, wird für Produkte mit der Brandklasse A1, A2, B und C eine Einordnung in System 1 vorgenommen, falls das Herstellungsverfahren die Brandklasse beeinflusst.

Die Qualitätssicherung hinsichtlich der in der Leistungserklärung rechtsverbindlich deklarierten Werte liegt also bei Anwendung des Systems 3 ausschließlich in der Verantwortung der Hersteller. Die notifizierte Stelle übernimmt hierbei keine Aufgaben zum Nachweis der Leistungsbeständigkeit, sondern unterstützt lediglich bei der Feststellung des Produkttyps im Rahmen des ITT.

Erst bei Anwendung des Systems 1, erfolgt eine Zertifizierung durch die notifizierte Stelle in Form einer Bescheinigung der Leistungsbeständigkeit, die dann aber auch nur für die unter System 1 geregelten Eigenschaften gilt. Konkret heißt das, dass die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffs grundsätzlich nicht von externen zertifizierten Stellen zertifiziert, sondern lediglich vom Hersteller deklariert werden muss.

Dämmstoffe die durch nationale Zulassungen oder Genehmigungen geregelt sind

Dämmstoffe für die keine harmonisierte europäische Produktnorm (hEN) existiert, oder deren Eigenschaften nicht von einer hEN erfasst sind und für die keine Europäische Technische Zulassung (ETA) erteilt wurde, können in Deutschland auf Basis einer nationalen Zulassung geregelt werden.

Nationale Zulassungen für Bauprodukte werden durch das DIBt als sogenannte allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) ausgestellt. Die abZ regelt dabei die bauaufsichtlich relevanten Eigenschaften, den Verwendungsbereich und Vorschriften zur Verarbeitung, Transport, Lagerung, Kennzeichnung und die Erteilung der Übereinstimmungsbestätigung. Die Übereinstimmungsbestätigung wird durch bauaufsichtlich anerkannte Zertifizierungsstellen ausgestellt. Diese nach den Bauordnungen der Länder (LBO) anerkannten Zertifizierungsstellen sind im sogenannten PÜZ (= Prüf-, Überwachungs-, Zertifizierungs)-Stellen-Verzeichnis des DIBt registriert.

Die Aufgaben der PÜZ-Stelle liegen in der Durchführung von Prüfungen im Rahmen der Fremdüberwachung und schließlich der Zertifizierung, d.h. der Bestätigung der Konformität der ermittelten Ergebnisse mit den Anforderungen der abZ. Überwachungsprüfungen werden dabei üblicherweise zweimal jährlich durchgeführt und prüfen den vollständigen in der abZ definierten Umfang an Produktprüfungen ab. Auf Grundlage des Übereinstimmungszertifikats kann der Hersteller sein Produkt mit

dem Übereinstimmungszeichen (sog. Ü-Zeichen) entsprechend der Verordnung über das Übereinstimmungszeichen (ÜZVO) kennzeichnen.

Die sogenannte allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) regelt in Ergänzung zu den reinen Produkteigenschaften, das Zusammenfügen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen oder Teilen von baulichen Anlagen. Da sich die aBG über die reinen Materialkennwerte hinaus mit dem Aspekt der Planung, Auslegung und Ausführung befasst, können im Rahmen einer aBG sowohl Bauprodukte auf Basis einer harmonisierten technischen Spezifikation (hEN, ETA) als auch Bauprodukte auf Basis einer nationalen Zulassung berücksichtigt werden. Damit kann auch die Eignung von CE gekennzeichneten Bauprodukte für die Verwendung in bestimmten Baukonstruktionen entsprechend den nationalen Anforderungen an die Bauwerkssicherheit nachgewiesen werden.

Informationen zu Zulassungen auf nationaler und europäischer Ebene finden sich auf den Seiten des DIBt (www.dibt.de).

7.3 Freiwillige Systeme

Freiwillige Qualitätszeichen oder Gütesiegel wurden in der Vergangenheit und werden auch heute umfänglich verwendet. Sie werden, zumindest soweit es sich um private Zeichen handelt, 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.

Europäisches Zertifizierungssystem KEYMARK

Auf Initiative der Europäischen Normungsorganisationen CEN und CENELEC entstand das sogenannte KEYMARK Qualitätszeichen, das ein freiwilliges europäisches Zertifizierungssystem darstellt. Voraussetzung für die Zertifizierung nach KEYMARK ist eine harmonisierte Produktnorm (hEN) auf deren Grundlage sogenannte Scheme Rules erstellt werden, in denen der Umfang der durchzuführenden Prüfungen festgelegt ist. Prüfungen können dabei nur von akkreditierten und zugelassenen Stellen durchgeführt werden. Die Zertifizierung kann nur von einer sogenannten ermächtigten Stelle (empowered body) durchgeführt werden.

Die "Insulation KEYMARK" Scheme Rules fordern eine Erstprüfung sowie einmal jährlich die Prüfung aller nach der hEN deklarierten Eigenschaften. Die Proben für die Prüfungen werden von den sogenannten ermächtigten Stellen im Herstellwerk entnommen. An Dämmstoffen für technische Gebäudeausrüstung und industrielle Anwendung sind alle Eigenschaften an jedem zertifiziertem Produkt nachzuweisen

(Produktzertifizierung). Bei Dämmstoffen für Gebäude werden alle deklarierten Nennwerte, Stufen und Klassen innerhalb einer Produktgruppe einmal jährlich geprüft.

Informationen zu KEYMARK Zertifikaten und ermächtigten Stellen sind im Internet-auftritt von KEYMARK abrufbar (<https://certificates.keymark.eu/#/>)

Freiwillige Zertifizierungsprogramme des FIW München und Q-Zeichen

Das Q-Zeichen ist eine eingetragene Europäische Gewährleistungsmarke, die die umfangreiche Zertifizierung und die Zuverlässigkeit eines Dämmstoffes demonstriert.

Das Q-Zeichen ist als Gewährleistungsmarke (Certification Mark) beim EUIPO, dem Europäischen Amt zum Schutz geistigen Eigentums, registriert (https://fiw-muenchen.de/media/pdf/Q-Zeichen_Eintragungsurkunde.pdf).

Details zur Vergabe und den damit verbundenen Verpflichtungen für die Aussteller sind in einer Satzung geregelt, die vor Eintragung der Marke einer detaillierten juristischen Prüfung unterzogen wird. Diese verweist stets auf die Festlegungen in den verschiedenen Zertifizierungsprogrammen des FIW München. Eine Zertifizierung nach einem freiwilligen Zertifizierungsprogramm ist somit stets eine Grundvoraussetzung zur Kennzeichnung von Wärmedämmstoffen mit dem Q-Zeichen.

Die dem Q-Zeichen zugrunde liegenden Zertifizierungsprogramme beinhalten immer:

- Mindestens zwei Werksinspektionen jährlich durch einen von der Zertifizierungsstelle entsandten Auditor mit Produktentnahme, wobei mindestens eine unangemeldet erfolgt oder durch alternative Maßnahmen eine zufällige Entnahme gesichert wird
- Die zweimal jährlich stattfindende Prüfung aller für die Anwendung des Wärmedämmstoffes relevanten Eigenschaften an der gleichen Charge, entnommen während der Werksinspektionen
- Eine mindestens zweimal jährliche Auditierung der werkseigenen Produktionskontrolle auf Zuverlässigkeit der Durchführung und zu den Prüfergebnissen, auf Grundlage der Europäischen Produkt- und Konformitätsnorm und zusätzlichen anwendungsbezogenen Anforderungen
- Den transparenten und konsequenten Zertifizierungsablauf mit Vergabe von zeitlich befristeten Zertifikaten und/oder Registrierung der Zertifikate auf der FIW-Homepage

Das Q-Zeichen kann von der Zertifizierungsstelle des FIW München oder einer Partnerstelle, die sich für die Durchführung der Zertifizierung qualifiziert hat, vergeben werden. Durch Rundversuche und einen regelmäßigen Erfahrungsaustausch der

beteiligten Zertifizierungs- und Prüfstellen ist sichergestellt, dass die Vergabe des Q-Zeichens stets auf dem gleichen hohen Niveau erfolgt.

Bisher wurden Zertifizierungsprogramme für eine Reihe von Wärmedämmstoffen für WDVS, Wärmedämmung außerhalb der Gebäudeabdichtung sowie für bestimmte Anwendungen nach DIN 4108-4/-10 entwickelt (Abbildung 93).

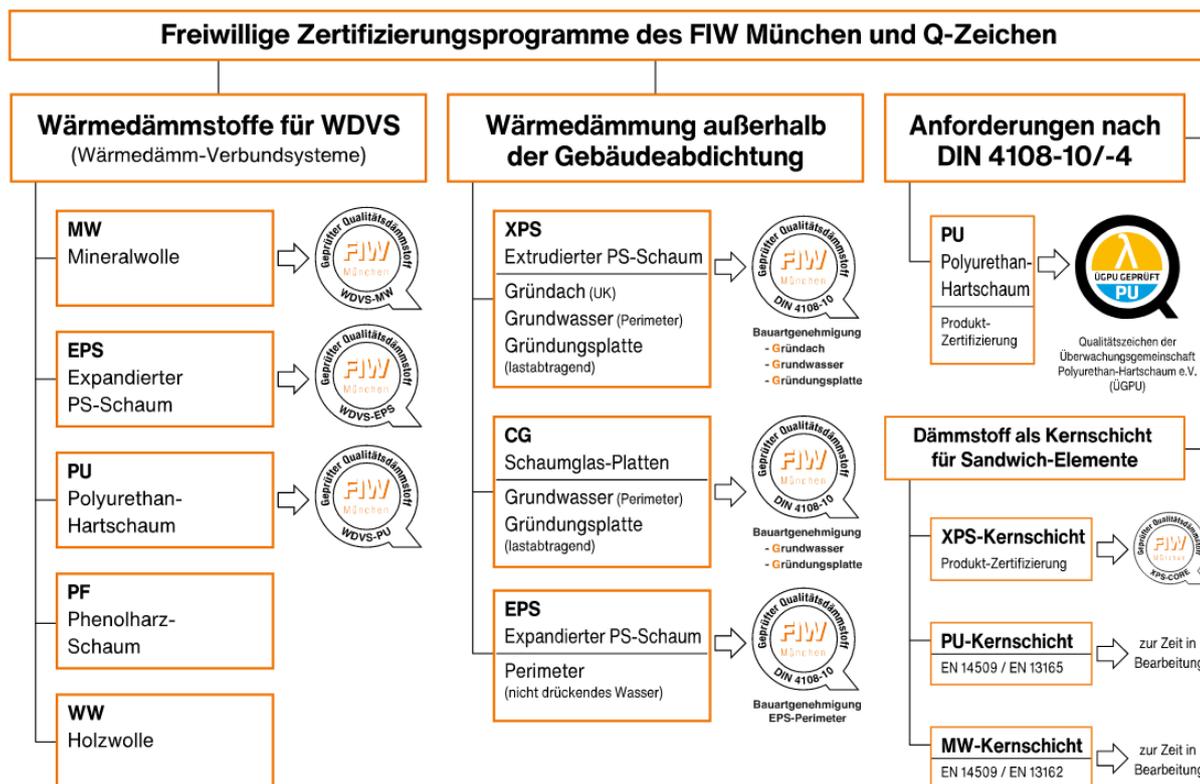


Abbildung 93: Übersicht über die aktuell verfügbaren freiwilligen Zertifizierungsprogramme des FIW München

Das Q-Zeichen der ÜGPU für Wärmedämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum (PU)

Das Q-Zeichen der Qualitätsgemeinschaft Polyurethan-Hartschaum e.V. (ÜGPU) in Stuttgart ist, wie das Q-Zeichen des FIW München, eine eingetragene Europäische Gewährleistungsmarke. Die Eintragung des Q-Zeichens als Gewährleistungsmarke (Certification Mark) erfolgt beim EUIPO, dem Europäischen Amt zum Schutz geistigen Eigentums, und ist begleitet von einer detaillierten juristischen Prüfung zur Satzung.

Grundlage für die Vergabe des Q-Zeichens durch die ÜGPU ist das freiwillige „Zertifizierungsprogramm für Wärmedämmstoffe für Gebäude aus Polyurethan-Hartschaum (PU)“, das bereits im Jahr 2016 vom FIW München und der ÜGPU gemeinsam nach den Regeln der DIN EN ISO/ICE 17067 entwickelt wurde. Darin wird die zweimal jährliche Inspektion der Herstellwerke mit Auditierung der werkseigenen

Produktionskontrolle und Entnahme von Dämmstoffproben gefordert. Die Überprüfung aller zertifizierten Eigenschaften an den entnommenen Proben durch die akkreditierte Prüfstelle bietet eine hohe Zuverlässigkeit für alle anwendungsrelevanten Eigenschaften der PU-Dämmstoffe (Produkt-Zertifizierung). Neben der bei PU-Dämmstoffen sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit werden an jedem Produkttyp die Druck- und Zugfestigkeit, die Dimensionsstabilität sowie das Brandverhalten überprüft. Eine Untersuchung des Zellgases in dem geschlossenzelligen Dämmstoff schließt die Verwendung von verbotenen oder nicht deklarierten Treibmitteln aus.

Nur PU-Dämmstoffe, die über ein gültiges Zertifikat in Bezug auf das Zertifizierungsprogramm verfügen, sind berechtigt, das Q-Zeichen der ÜGPU zu führen. Eine aktuelle Auflistung dieser Produkte sowie weitere Informationen zum Q-Zeichen der ÜGPU und der Zertifizierung von PU-Dämmstoffen finden Sie auf der Homepage der ÜGPU. In der Zertifikatsdatenbank auf der Homepage des FIW München kann ebenfalls die Gültigkeit der Zertifikate überprüft werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die für die Umsetzung der Energiewende notwendige Reduzierung der Wärmeverluste und die für die Einhaltung der Klimaziele notwendige Verringerung der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor kann nur mit Dämmstoffen und hochwärmedämmenden Baustoffen erreicht werden. Gedämmte Bauteile reduzieren die für die Beheizung notwendige Energie und verringern damit die Heizkosten, unabhängig vom Energieträger. Gleichzeitig ist ein guter Wärmeschutzstandard auch der Gesundheit und dem Wohlbefinden der Bewohner zuträglich, da die Anfälligkeit der Wohnungen für Bauschäden und Schimmel durch gute Dämmung zurückgeht und ein angenehmes Raumklima - im Sommer wie im Winter - mit geringem Energieverbrauch realisierbar ist. Damit sorgt der Wärmeschutz der Hülle für eine gute Wertstabilität für Neubauten und verbessert den Werterhalt energetisch sanierter Bestandsgebäude maßgeblich.

Der Umstieg auf regenerative Heizenergie reduziert ebenfalls die Treibhausgasemissionen der Gebäude und ist damit aus der Sicht des Klimaschutzes sinnvoll. Auch technisch wären Wärmepumpen in gering sanierten oder unsanierten Altbauten machbar. Allerdings besteht ohne gleichzeitige Reduzierung der Heizwärmebedarfe der Gebäude die Gefahr, dass steigende Preise bei Strom für Wärmepumpen oder nachwachsenden Energieträgern, aufgrund des dann extrem hohen Stromverbrauchs zur Deckung des Wärmebedarfs der energetisch unsanierten Gebäude, zu Energiearmut bei den Bewohnern führen. In der Gesamtbetrachtung für die deutsche Gesellschaft kommen zu den steigenden Strombedarfen für Wärmepumpen auch noch die Strommengen für die zunehmende Elektrifizierung im Verkehrssektor hinzu, bei gleichzeitiger Umsetzung des Atomausstiegs und dem geplanten Ende der Kohleverstromung. Die Stromerzeugung aus Wind und Sonne wird zwar massiv ausgebaut, es existieren dabei aber sehr große regionale Unterschiede in Deutschland und ein Stromnetz, was noch nicht ausreichend für die schnell steigende Strommenge ausgelegt ist. An der energetischen Ertüchtigung der Gebäudehüllen im Bestand führt damit kein Weg vorbei. Für die Reduzierung der Energiebedarfe sind wärmedämmende und luftdichte Außenbauteile unabdingbar. Sie sind somit die Grundlage für eine sinnvolle Versorgung der Gebäude mit regenerativer Energie, z.B. über für die Beheizung mit Wärmepumpen oder über dekarbonisierte Fernwärme.

Nicht erst seit der Ukraine Krise ist Gassparen angesagt, aber erst die hohen Preise für Strom, Öl und insbesondere Gas haben die Menschen dazu gebracht die Temperatur in den Räumen abzusenken. Eine solche Absenkung geht jedoch bauphysikalisch nur sinnvoll in gedämmten Gebäuden, da sonst Schimmel droht und die Räume schnell unbehaglich werden. Damit wird das Thema Dämmung noch vorranglicher denn je. Hier muss man Gebäude mit ihrer Hülle und Anlagentechnik auch im Zusammenspiel mit der Elektrifizierung im Verkehrssektor sehen. So wie die Auto-Akkus über bidirektionales Laden aktiv Stromspitzen entschärfen und Netze stabilisieren können, können auch gedämmte Gebäude netzdienlich sein.

Wird ein gedämmtes Gebäude mit Wärmepumpe beheizt, kann diese auch in Spitzenlastzeiten ohne Probleme für die Raumtemperatur einige Stunden ausgeschaltet werden. Die Trägheit des Gebäudes bei gleichzeitig guter Wärmedämmung verhindert hier ein merkliches Auskühlen der Räume. Hierfür ist ein vernünftiges Dämmniveau notwendig, damit längere Zeiten ohne Beheizung auch ohne Komfortverlust für die Bewohner überbrückt werden können, beispielsweise dadurch, dass der Stromnetzbetreiber die Wärmepumpe in Spitzenlastzeiten für einige Stunden abschaltet. Die Dämmung ermöglicht hier erst das sinnvolle Ausnutzen der thermischen Trägheit des Gebäudes. Zukünftig könnte man sich auch eine geplante Überhöhung der Raumtemperaturen vorstellen, wenn z.B. überschüssiger Strom aus regenerativen Quellen zur Verfügung steht, um damit die Flexibilität für Abschaltzeiträume noch zu vergrößern.

Die Produkte, Komponenten und Systeme für hochwärmedämmende Neubauten und energetische Sanierungen sind seit Jahren und Jahrzehnten vorhanden und etabliert. Passende Dämmstoffe und Dämmsysteme gibt es für alle Anwendungen am Gebäude und bei technischen Anlagen. Die physikalischen Eigenschaften der Produkte, v.a. deren mechanische, wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften wurden dabei durch die Hersteller für die unterschiedlichsten Anwendungen optimiert. Die Leistungsfähigkeit ist unbestritten und die Notwendigkeit des Einsatzes ist offensichtlich. Um Ressentiments potenzieller Anwender zu begegnen, wurden in den letzten Jahren umfangreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen seitens der Industrie umgesetzt. Dabei finden zunehmend freiwillige Qualitätssicherungssysteme Anwendung, die oftmals von unabhängigen dritten Stellen überwacht werden. Diese Qualitätszeichen umfassen dabei typische mechanische, wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften für die Feststellung der Leistungsfähigkeit der Produkte, genauso wie Begrenzungen umweltschädlicher Inhaltsstoffe bzw. Aussagen zur Dauerhaftigkeit der Produkte in der Anwendung.

Bei der Betrachtung der Umweltwirkungen von Dämmstoffen und gedämmten Gebäuden zeigt sich ganz eindeutig, dass während der Nutzungsphase von Dämmstoffen immer deutlich mehr Energie eingespart wird, als diese für die Herstellung benötigen. Die Bilanz der Grauen Energie und der Grauen Emissionen ist über der Nutzungsdauer deutlich positiv. Das gilt auch für Bauteile auf einem sehr guten Wärmedämmstandard, wie beispielsweise für Effizienzhäuser EH 40 oder Passivhäuser. Die Dauer für die energetische Amortisation einer Dämmmaßnahme hängt dabei von einer ganzen Reihe von Randbedingungen ab. Ein wichtiger Einflussfaktor ist der Ausgangszustand des Bauteils, denn je schlechter der U-Wert vor der Sanierung ist, desto schneller amortisiert sich die Maßnahme. Ebenso hat der Zielzustand auf den saniert wird, einen Einfluss. Hier macht sich die Nichtlinearität des U-Werts in Abhängigkeit der Dämmdicke bemerkbar, bei der jeder zusätzliche Zentimeter Dämmung nicht mehr die gleiche zusätzliche Einsparung bringt, wie der vorherige Zentimeter. Trotzdem ist die energetische Amortisation für die meisten eingesetzten Heizenergieträger mit typischen Wirkungsgraden der Heizanlage auch für sehr gut gedämmte Zielzustände innerhalb von wenigen Monaten bzw. wenigen

Heizperioden realistisch. Dabei gilt diese Aussage unabhängig vom eingesetzten Dämmstoff, denn der Unterschied der Grauen Energie bei verschiedenen Dämmstoffen ist im Verhältnis zur Einsparung über die Lebensdauer sehr gering. Auch für sehr ungünstige Fälle (Beheizung mit regenerativen Energien, bereits moderat gedämmter Ausgangszustand und sehr ambitionierter Ziel-U-Wert) ist die energetische Amortisation noch weit unterhalb der erwarteten Lebensdauer der Bauteile erreicht. Dämmen spart somit viel mehr Energie als für die Herstellung, den Transport, die Verarbeitung, die Erneuerung und die Wiederverwertung am Lebensende verbraucht wird.

Dabei sind die in Dämmstoffen und hochwärmedämmenden Baustoffen enthaltene Energie und THG-Emissionen im Vergleich zu den anderen Bauteilen absolut gesehen gering. Trotzdem ist eine Begrenzung der Grauen Energie und der Grauen Emissionen natürlich sinnvoll. Dies gilt aber nicht nur für Dämmstoffe, sondern für alle in Gebäuden verwendeten Stoffe, die in Roh- und Ausbau eingesetzt werden. Die deutlich größeren Anteile und damit auch größeres Verbesserungspotential in dieser Hinsicht, haben die massiven Bauteile, wie Keller, Fundamente, Decken, Innen- und Außenwände.

Durch die Erforschung und Weiterentwicklung von Dämmstoffen konnten auch weitere Umweltwirkungen reduziert werden. Ein Beispiel ist die Entwicklung neuer, polymer fest verbundener Flammenschutzmittel in EPS, die das früher enthaltene HBCD ersetzen. Das neue Flammenschutzmittel verhindert, dass halogenierte Verbindungen in der Umwelt freigesetzt werden. Ein weiteres wichtiges Thema ist die Etablierung geschlossener Stoffkreisläufe, das jedoch noch nicht für alle Dämmstoffe zufriedenstellend gelöst ist. Ein Grund dafür ist auch, dass bisher nur sehr geringe Mengen an Dämmstoffen im Recycling anfallen. Ein weites Feld für zukünftige Entwicklungen ist die Verbesserung des Rückbaus, der Trennung und die verschiedenen Arten der Wiederverwertung, denn auch wenn die Dämmungen oft länger halten als vorsichtige Schätzungen in der Vergangenheit vermuteten, steht irgendwann ein Anstieg der Abfallmengen bevor, der sich aus den in den 80er und 90er Jahren deutlich gestiegenen Mengen an verbautem Material ableiten lässt. Bisher setzen Wiederverwertungs- und Recycling Konzepte oft beim Material an, welches – z.B. nach Abbruch und mehr oder weniger sortenreiner Trennung – als hochwertiger Abfall vorliegt. Hier sollte im Sinne eines zukunftssicheren „Design for Recycling“ auch die Betrachtung des im System verbauten Dämmstoffs berücksichtigt werden. Chancen bieten sich hier beim seriellen Bauen mit vorgefertigten Elementen (siehe „Energiesprung“), die darauf ausgelegt sind am Ende ihres Benutzungszeitraums wieder zerlegt und getrennt verwertet zu werden.

Eine herstellereinspezifische Untersuchung der Umweltwirkungen von Dämmstoffen ist bisher noch kaum möglich, da die Umweltproduktdeklarationen überwiegend generisch oder auf Verbandsbasis erstellt wurden (bspw. für „Mineralwolle“ oder für „EPS“, aber nicht für ein bestimmtes Produkt eines bestimmten Herstellers. Damit enthalten sie aber auch Sicherheitszuschläge auf die deklarierten Werte, die bei

einer spezifischen Betrachtung für ein Werk oder eine Herstellungslinie reduziert werden könnten. Solche spezifischen Werte wären auch für genauere Vergleiche der Leistungsfähigkeit und der dafür anfallenden Umweltwirkung unbedingt notwendig. Eine bessere Vergleichbarkeit der Berechnungen zu den Umweltwirkungen könnte auch dadurch erreicht werden, dass die Hersteller von Wärmedämmstoffen spezifischere Leistungsmerkmale in die Umweltproduktdeklarationen aufnehmen. Hierbei wäre es wichtig, vor allem die Nenn- bzw. Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit der Produkte in Verbindung mit einer enger gefassten Rohdichte bereitzustellen, anstelle einer sehr breiten Spanne an Werten, aus denen man sich bei der Erstellung einer LCA beliebige Werte herausuchen kann.

Lebenszyklusbetrachtungen hängen stark von der angenommenen Lebensdauer der Materialien in verschiedenen Bauteilen ab. Um hier zu genaueren Werten für eine echte Voraussage zur Lebensdauer in einer spezifischen Anwendung zu kommen sind viele weitere Forschungsarbeiten zum Alterungsverhalten und den Alterungsmechanismen der verschiedenen Dämmstoffe nötig. Das bisherige Konzept der künstlichen Alterung von Dämmstoffen zielt auf Schwellenwerte für einzelne Eigenschaften, die nach der künstlichen Alterung noch vorhanden sein müssen, damit das Produkt noch verwendet werden kann (Schwellenwerte-Konzept). Dabei stehen die zur Alterung eingesetzten Belastungen (meistens Temperatur und erhöhte Luftfeuchte) – mit ganz wenigen Ausnahmen – nicht in Beziehung zu den tatsächlich an der Verwendungsstelle auftretenden thermischen und hygrischen Einwirkungen. Somit fehlt der Bezug zur Degradation der Eigenschaften über der Zeit. Echte Beschleunigungsfaktoren für die Bedingungen der künstlichen Alterung gegenüber der Alterung in der spezifischen Anwendung sind somit nicht ableitbar. Diese wären aber nötig, um eine Hochrechnung der Lebensdauer eines Dämmstoffs in der Anwendung durchzuführen, z.B. als Lebensdauer-Abschätzung im Rahmen einer LCA oder um Wartungszeiträume in BIM zu optimieren. Um sinnvollere künstliche Schnellalterungsverfahren festlegen zu können, aus denen auch Beschleunigungsfaktoren ableitbar sind, ist ein tieferes Verständnis für die Alterungsmechanismen der verschiedenen Dämmmaterialien nötig.

9 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 2021a]

AGEB (2021): Auswertungstabellen zur Energiebilanz in Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 – 2020. Stand September 2021 (endgültige Ergebnisse bis 2019, vorläufige Daten für 2020)

[AGEB 2021b]

AGEB (2021): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken. Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2019 und 2020 sowie zusammenfassende Zeitreihen zum Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken für Jahre von 2010 bis 2020.

[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 und Schwitalla 2014]

Albrecht, W., Schwitalla, Ch. (2014) Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS: „Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung“. IBP-Bericht BBHB 019/2014/214, Stuttgart

[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 2011]

KRONOS ecochem.com TI-6_01_DE_-Chromatreduktion-im-Zement.pdf

[Anonymus 2011b]

Gewerbemuseum Winterthur, BJ 2011, Phenol-Formaldehydharze, Recycling [online] www. Materialarchiv.ch (Abruf am 20.02.2023)

[Anonymus 2021]

Gemeinsame Presseinformation von BASF, VARTDAL PLAST und EKORNES P 367/21 vom 04.11.2021: Styropor Ccyceld für Stressless- bewährtes Verpackungsmaterial mit verbesserter CO2-Bilanz für hochwertige Designmöbel.

[Anonymus 2021a]

Wenn Wald wieder wild wird: Europas Naturerbe. Online: <https://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/wenn-wald-wieder-wild-wird-europas-naturerbe> (Letzter Abruf am 04.03.2022)

[Anonymus 2021b]

Vielfalt erfassen. Waldfunktionsplanung. Online: <https://www.stmelf.bayern.de/wald/waldfunktionen/waldfunktionsplanung/index.php> (Letzter Abruf am 04.03.2022)

[Anonymus 2022a]

Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen (Kurzfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung - EnSikuMaV), Ausfertigungsdatum: 26.08.2022, <https://www.gesetze-im-internet.de/ensikumav/EnSikuMaV.pdf> (abgerufen am 19.01.2023)

[Anonymus 2022b]

Allgemeine Bauzeitung online: Menge an recycelter Steinwolle in nur einem Jahr verdoppelt. Ausgabe vom 29.08.2022-06:00

[Anonymus 2022c]

circular-technology.com/basf-treibhausneutraler-polyurethan-grundstoff/ vom 10. Februar 2022

[Anonymus 2023a]

www.retrokitproject.eu (abgerufen am 03.02.2023)

[Anonymus 2023b]

<https://renozeb.eu/> (abgerufen am 03.02.2023)

[Anonymus 2023c]

Verband Holzfaser Dämmstoffe e.V. Wuppertal. www.holzfaser.org: Anwendungsbereiche, Holzfaser WDVS, Eigenschaften (Abruf am 20.02.2023)

[Anonymus 2023d]

https://www.xella.de/de_DE/services/kreislaufwirtschaft-bigbag-system (Abruf am 20.02.2023)

[AVV 2020]

Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV) vom 30. Juni 2020 (BGBl. I S. 1533)

[B+L 2021]

B+L Marktdaten GmbH (2021): B+L Outlook Dämmstoffe Deutschland 2015-2023.

[BASF 2022]

Pressemitteilung vom 11.03.2022: BASF schließt EPS-Recyclingkreislauf und bringt Neopor Mcycled mit Rezyklatanteil auf den Markt

[Bauer 1995]

Bauer, G.: Chemisches Recycling von Kunststoffen mit Hilfe der Solvolyse. Automobilrecycling. Springer Verlag 1995

[Behrendt et al. 2000]

Behrendt, G., Pohl, M., Wagner, P., Huth, H., Schmidt, K.: Drei neue Synthesewege zur Herstellung von Polyol für Polyurethane. Wissenschaftliche Beiträge Technische Hochschule Wildau 1/2000.

[Bendix et al. 2021]

Bendix, P. et al: Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im

Sinne der europäischen Kunststoffstrategie. Umweltbundesamt Texte 151/202, November 2021

[BGBl 2012]

Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung-VersatzV) vom 24. Febr. 2012 BGBl. I S. 212

[BGBl. 2017]

Verordnung über die Getrenntsammlung und Überwachung von nicht gefährlichen Abfällen mit persistenten organischen Schadstoffen (POP- Abfall-Überwachungs-Verordnung-POP-Abfall-ÜberwV) vom 17.07.2017 (BGBl. I S. 2644)

[BLE 2020]

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (29.09.2020): Nutzhanfanbau erreicht mit 5.362 Hektar Höchstwert.

[BMEL 2012]

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2012): Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Online verfügbar unter www.bundeswaldinventur.de.

[BMU 2021]

Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes. BMU, Berlin

[BMU/UBA 2019]

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Umweltbundesamt (2019): Umweltbewusstsein in Deutschland 2018. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, Berlin und Dessau-Roßlau.

[BMUB 2013]

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Stockholmer Übereinkunft über persistente organische Schadstoffe, Mai 2013

[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

[BMWi 2015]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude, Berlin

[BMWi 2017]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017): Gesamtwirtschaftliche Einordnung der ESG, Berlin, Basel, Freiburg, Düsseldorf

[BMWi 2019]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019): Energieeffizienzstrategie 2050, Berlin.

[BMWi 2020]

BMWi (2020): Analyse von spezifischen Dekarbonisierungsoptionen zur Erreichung der Energie- und Klima-ziele 2030 und 2050 bei unterschiedlichen Wohn- und Nichtwohngebäudetypologien

[BMWi 2020a]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan, Berlin.

[BMWi 2020b]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Langfristige Renovierungsstrategie der Bundesregierung, Berlin

[BMWi 2021]

Die Energie der Zukunft. 8. Monitoring-Bericht zur Energiewende – Berichtsjahre 2018 und 2019. Berlin, BMWI, 2021.

[BMWi 2021a]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): Neue Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG), Online: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2021/09/14-neue-bundesforderung-fur-effiziente-gebäude.html> (abgerufen am 22.12.2021)

[BMWi 2021b]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): Neue Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG), Online: <https://www.deutschland-machts-effizient.de/KA-ENEF/Redaktion/DE/Dossier/beg.html> (geprüft: 22.12.2021)

[Böck und Treml 2013]

Böck, A.; Treml, 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

[Bundesgesundheitsblatt 1996]

Bundesgesundheitsblatt (1996): Richtwerte für die Innenraumluft: Basisschema.
Bundesgesundheitsblatt 11/96

[Bundestag 2019]

Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften. KSG, vom 12.12.2019. Fundstelle: Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 48.

[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

[C2C 2013]

http://c2ccertified.org/products/search_results/YTo0OntzOjg6lmtleXdvcvcmRzljtzOjE-wOiJJbnN1bGF0aW9uljtzOjExOiJzZWZyY2hfbW9kZSI7czozOiJhbG-wiO3M6MTE6InJlc3VsdF9wYWdlIjtzOjI-zOiJwcm9kdWN0cy9zZWZyY2hfcvVzdWx0cyI7czoxMDoiY29sbGVjdGlvbil7Y-ToxOntpOjA7czoxOjI7fQ , 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.

[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

[dena 2019]

<https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2019/serielles-sanieren-erstes-energiesprong-projekt-in-hameln/>

[Destatis 2019]

Statistisches Bundesamt. Umwelt, Abfallentsorgung: DESTATIS; Fachserie 19 Reihe 1, 2019 www.destatis.de

[Destatis 2021]

Statistisches Bundesamt. Umwelt, Abfallbilanz 2019: 30.06.2021

[Destatis 2021a]

Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Fachserie 3, Reihe 5.1)

[Destatis 2021b]

Forstwirtschaftliche Bodennutzung - Holzeinschlagsstatistik. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Fachserie 3, Reihe 3.3)

[DIBt 2020]

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-2108 vom 18 August 2020, ausgestellt vom Deutschen Institut für Bautechnik

[DIBt 2021]

Anonymus (2021) <https://www.dibt.de/de/wir-bieten/technische-baubestimmungen>, zuletzt abgerufen am 30.11.2021

[DIBt 2021a]

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-2119 vom 18. Juni 2021, ausgestellt vom Deutschen Institut für Bautechnik

[DIBt 2021b]

Europäische Technische Bewertung ETA-18/0604 vom 9. November 2021, ausgestellt vom Deutschen Institut für Bautechnik

[DIBt 2021c]

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-1952 vom 12. Januar 2021, ausgestellt vom Deutschen Institut für Bautechnik

[DIBt 2022]

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-1450 vom 1. Februar 2022, ausgestellt vom Deutschen Institut für Bautechnik

[dpa 2023]

dpa-infocom, dpa:220310-99-456113/3, <https://www.sueddeutsche.de/politik/konflikte-ex-bundespraesident-auch-einmal-frieren-fuer-die-freiheit-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-220310-99-456113> (abgerufen am 19.01.2023)

[Egenolf et al. 2021]

Egenolf, V.; Vita, G.; Distelkamp, M.; Schier, F.; Hübner, R.; Bringezu, S. (2021): The Timber Footprint of the German Bioeconomy. State of the Art and Past Development (Sustainability). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.3390/su13073878>.

[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 2006]

Verordnung (EU) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), Amtsblatt der EU, 30. Dezember 2006. Bd. L 396/1

[EU 2008]

Richtlinie 2008/98/EG vom 19. November 2008 über Abfälle (Abfallrahmenrichtlinie)

[EU 2010]

Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (ABl. L 153 vom 18.6.2010, S. 13).

[EU 2018]

Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013

[EU 2018a]

Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (ABl. L 328 vom 21.12.2018, S. 82).

[EU 2018b]

Richtlinie (EU) 2018/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Änderung der Richtlinie 2012/27/EU zur Energieeffizienz.

[EU 2018c]

Richtlinie (EU) 2018/844 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz.

[EU 2019]

Verordnung (EU) Nr. 2019/1021 über persistente organische Schadstoffe, Amtsblatt der EU, 20. Juni 2019. L 169/45

[EU 2019a]

Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschaft- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Der europäische Grüne Deal. COM(2019)640 final, Brüssel

[EU 2019b]

[EU 2020]

Mehr Ehrgeiz für das Klimaziel Europas bis 2030. In eine klimaneutrale Zukunft zum Wohl der Menschen investieren. COM(2020) 562 final

[EU 2021a]

Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“)

[EU 2021b]

Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschaft- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Arbeitsprogramm der Kommission für 2021. Eine vitale Union in einer fragilen Welt.

[EU Risk Assessment TCPP 2008]

EU Risk Assessment TCPP (2008): European Union Risk Assessment Report (TCPP), May 2008, Ireland (lead) and United Kingdom

[FAOSTAT 2022]

Abfrage zur Produktionsmenge der Items „Newsprint 1671“ und „Recovered Paper 1669“ im Zeitraum von 2010 – 2020 für die Regionen „Europe 150“ und „Germany 276“, abgerufen am 26.01.2023

[Fengel und Wegener 1989]

Fengel, D.; Wegener, G. (1989): Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. New York: de Gruyter, 1989

[Fuehres und Faul 2000]

Fuehres, M.; Faul, L. (2000): Bewertung natürlicher, organischer Faserdämmstoffe. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2000

[FV ID 2016]

Praxis-Handbuch Innendämmung: Planung – Konstruktion- Details – Beispiele. Herausgeber: Fachverband Innendämmung e. V. (FVID), Verlag Rudolf Müller, Köln, <https://d-nb.info/1064337848>

[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

[Günther et al. 2020]

Günther, E.; Bichlmair, S.; Latz, S.; Fricke, M. (2020), Internal wall insulation with a new aerogel panel: SLENTITE for energetic retrofit in historic buildings. E3S Web of Conferences 172, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017201006>

[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 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.

[Hoffmann 2012]

Hoffmann, R. (2012): Häuser richtig energieeffizient bauen. [Schimmelbildung vermeiden ; Energieeffizientes und kostenbewusstes Bauen ; Brandschutz und Einbruchversicherungen ; Pfusch verhindern und Kosten sparen ; Dämmstoffvergleich]. Haar bei München: Franzis.

[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 und Sprengard 2013]

Holm, A.; Sprengard, C. (2013): Dämmstoffe als Baustein der Energiewende. Energieeffizienz in Gebäuden. Jahrbuch 2013. VME-Verlag und Medienservice Energie, 2013

[IC 2021]

IC-Market Forecast Dämmstoffe in Deutschland 2021. Interconnection Consulting.

[INNOVIP 2022]

Innovative multi-functional Vacuum-Insulation-Panels (VIPs) for use in the building sector. <https://cordis.europa.eu/project/id/723441>

[IVH 2022]

Styropor aktuell: Newsletter des Industrieverbands Hartschaum e.V. vom Juli 2022 und IVH Homepage: Drei IVH-Mitglieder starten PolyStyrene Loop neu- geschlossene Kreislaufwirtschaft mit EPS-Dämmstoffen

[IVH/VDPM 2016]

Qualitätsrichtlinie IVH/ VDPM: Dämmstoffe aus EPS für WDVS vom 04.08.2016 und persönliche Mitteilung Herr Meier/ IVH

[Kampouris et al. 1988]

Kampouris, E. M., Papaspyrides, C.D und Lekakou, C.N.: A model process for the solvent recycling of polystyrene. Polymer Engineering & Science. 1988, 28(8), S. 527-534

[Koch 2019]

Koch, C. (2019): Abiotic degradation of the brominated polymeric flame retardant “Polymeric FR” and ecotoxicity of generated decomposition products. Dissertation, Fakultät der Biologie, Universität Duisburg-Essen, 2019

[Koch et al. 2019]

Koch, C.; Nachev, M.; Klein, J.; Köser, D.; Schmitz, O.J; Schmidt, T.C.; Sures, B. (2019): Degradation of the Polymeric Brominated Flame Retardant „Polymeric FR“ by Heat and UV Exposure, Environ. Sci. Technol. 2019, 53, 1453-1462

[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): Flammenschutzmittel in Polystyrol-Dämmstoffen. Weltweites Verbot von HBCD. Informationsdienst Bauen + Energie, Ausgabe Juni 2013, S. 10-12

[KrWG 2021]

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz-KrWG) vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436).

[Lattke et al. 2009]

Lattke, F.; Larsen, K.E.; Ott, S.; Cronhjort, Y. (2009): TES EnergyFacade - prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope. funded by Woodwisdom Net, Research project from 2008 - 2009.
<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1355420/287313.pdf>

[Lattke und Ott 2011]

Lattke, F.; Ott, S. (2011): Begleitende Untersuchung der Gebäudemodernisierung der Realschule Buchloe mit vorgefertigten Holzbauerelementen. Abschlussbericht, DBU Forschungsprojekt, Az. 27835-25, <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-27835.pdf>

[Leisewitz et al. 2000]

Leisewitz, A.; Kruse, H.; Schramm, E. (2000): Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammenschutzmittel. 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 – Probenahme, 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.

[Lindner et al. 2020]

Lindner, C., Schmitt, J., Hein, J.: (2020): Conversio Studie: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019, August 2020

[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]

Neizel, M.; Schulze Darup B. (2011): Energieeffizienz mit städtebaulicher Breitenwirkung. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt AZ: 26422 – 25 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), 2011

[nova-Institut 2008]

Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaserwerkstoffen (Deutschland und EU). Unter Mitarbeit von Michael Carus (Gülzower Fachgespräche, Band 26).

[Pehnt et al. 2021]

Pehnt, M.; Mellwig, P.; Lempik, J.; Werle, M.; Schulze Darup, B.; Schöffel, W.; Drusche, V. (2021) Neukonzeption des Gebäudenergiegesetzes (GEG 2.0) zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes. Heidelberg, Berlin, Weimar, September 2021.

[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.

[PlasticsEurope 2014]

End-of-life treatment of HBCD-containing polystyrene insulation foams: Large-scale demonstration of the treatment of EPS and XPS containing HBCD as a flame-retardant by co-incineration in the Würzburg Municipal Solid Waste Incinerator. Technical Summary report, PlasticsEurope 2014

[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

[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.

[Schlummer et al. 2015]

Schlummer, M.; Vogelsang, J.; Fiedler, F.; Gruber, L.; Wolz, G. (2015): Rapid identification of polystyrene foam wastes containing hexabromocyclododecane or its alternative polymeric brominated flame retardant by X-ray fluorescence spectroscopy. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, Volume 33, Issue 7, <https://doi.org/10.1177/0734242X15589783>

[Sieber et al. 2013]

Sieber, T., Schlummer, M. und Mäurer, A. (2013) Bioverpackungen wiederverwerten. Kunststoffe. 2013/7, S. 79-82

[Sprengard et al. 2017]

Sprengard, C.; Treml, S.; Engelhard, M.; Simon, H.; Kagerer, F. (2017): Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) in der Bauanwendung: vom Dämmstoff zum Dämmsystem. Verarbeitung, Befestigung, Dauerhaftigkeit. Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 3036, 2017, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-7388-0023-4

[Sprengard et al. 2019]

Sprengard, C.; Regauer, S.; Kokolsky, C.; Treml, S.; Engelhardt, M. (2019): Programm zur wissenschaftlichen Begleitung der Produktentwicklung und Markteinführung von Dämmstoffen auf Basis von Aerogelen und Advanced Porous Materials Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 3174, 2019, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN: 978-3-7388-0409-6

[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.

[Sprengard et al. 2013]

Sprengard, C.; Treml, S.; Holm, A. (2013): Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe – Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen. Bericht FO-12/12. Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München, 2013

[Stelzmann et al. 2022]

Stelzmann, M.; Kirschke, M.; Fricke, M.; Tietze, M.; Kahnt, A. (2022) Validierung eines Polyurethan-basierten Aerogel im Realbetrieb. Bauphysik 44, H.1, S. 1-10.
<https://doi.org/10.1002/bapi.202100041>

[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

[Tenzler 2021]

Tenzler T.: Kreislaufwirtschaft Mineralwolle, Vortrag beim Fachdialog Re-Use und Recycling von Dämmstoffen bei Gebäuden. Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität Verbraucher und Klimaschutz Berlin am 06.10.2021

[Thünen-Institut 2017]

Ergebnisse der Kohlenstoffinventur 2017. Online verfügbar unter <https://www.thuenen.de/de/wo/projekte/waldmonitoring/projekte-treibhausgasmonitoring/kohlenstoffinventur-2017/>.

[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

[TRGS 905]

TRGS 905: Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS): Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe, Ausgabe März 2016 nach der Verordnung (EU) Nr. 1272/2008 vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen.

[Tröger 2001]

Tröger, J (2001) Setzungsverhalten von Schüttdämmstoffen. *Mikado* 1/2001, pp 66–70

[Tuschinski 2021]

Tuschinski, M. (2021) Neues GebäudeEnergieGesetz anwenden GEG 2020 – kompakt und praktisch. Ergänzte Ausgabe: 18. Dezember 2021.

[UBA 1999]

Umweltbundesamt (1999): Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC. Erich Schmidt Verlag, 1999

[UBA 2021]

Emissionsübersichten in den Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes. Umweltbundesamt. Online. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/emissionsuebersichten-in-den-sektoren-des>, zuletzt geprüft am 17.06.2020.

[Uni Bayreuth 2013]

[van Dijk und Reichenecker 2020]

van Dijk, J. und Reichenecker, A. 2020: Leitfaden für die Sammlung und Vorbehandlung von Polystyrol-Schäumen von Abbruch-Baustellen für PolyStyreneLoop vom 24.07.2020

[VDP 2022]

DIE PAPIERINDUSTRIE – Leistungsbericht PAPIER 2022

[Winterling und Sonntag 2011]

Winterling, H.; Sonntag, N. (2011): Polystyrol-Hartschaumstoff (EPS, XPS). *Kunststoffe* 10/2011; Carl Hanser Verlag, München, 2011

[Wolf et al. 2020]

Wolf, T.; Untergutsch, A.; Wensing, C.; Mittelbach, H.; Lu-Pagenkopf, F.; Kellenberger, D.; Kubowitz, P. (2020): Potentiale von Bauen mit Holz. Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise. Hg. v. Umweltbundesamt.

[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.

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 Bauschadensanierung 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.



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