

Sonderdruck aus

Bauphysik Kalender

**Langzeitverhalten
von Dämmstoffen**

Wolfgang Albrecht
Stefan Koppold

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Company

2010

B 3 Langzeitverhalten von Dämmstoffen

Wolfgang Albrecht, Stefan Koppold

Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Albrecht
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München
Lochhamer Schlag 4, 82166 Gräfelfing

Jahrgang 1956, Studium der Physikalischen Technik an der Fachhochschule München. Seit 1981 im FIW München tätig in den Bereichen Messung der Wärmeleitfähigkeit, Dämmstoffprüfung und Forschung. Ab 2000 Abteilungsleiter „Dämmstoffe im Hochbau“. Mitarbeit in verschiedenen nationalen und internationalen Normungsausschüssen sowie in Sachverständigenausschüssen des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt und in der Expert Group des europäischen Keymark-Systems.



Dipl.-Ing. (FH) Stefan Koppold
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München
Lochhamer Schlag 4, 82166 Gräfelfing

Jahrgang 1974, Studium des Bauingenieurwesens an der Fachhochschule Augsburg. Seit 2007 im FIW München tätig in den Bereichen Messung der mechanischen Eigenschaften von Dämmstoffen und Forschung. Weitere Tätigkeitsbereiche ab 2008 sind die Fremdüberwachung im Bereich der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung der Dämmstoffe Mineralwolle, EPS, Holzwolleplatten und Vakuum-Isolationspaneele sowie im Rahmen des Neopor Quality Circle Italy (NQCI).



Inhaltsverzeichnis

1	Begriffe	189			
2	Wesentliche Anforderungen bei verschiedenen Anwendungen	191			
2.1	Anwendungsgebiete von Wärmedämmstoffen nach DIN 4108-10	192			
2.2	Nicht genormte Anwendungen	193			
2.3	Langzeitverhalten	194			
3	Laborversuche	194			
3.1	Übersicht	194			
3.2	Kurzzeittests	195			
3.2.1	Wärmeleitfähigkeit	195			
3.2.2	Druckfestigkeit/-spannung	197			
3.2.3	Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene	198			
3.2.4	Abmessungen/Maßhaltigkeit	198			
3.2.5	Brandverhalten	198			
3.3	Langzeittests	198			
3.3.1	Wärmeleitfähigkeit nach Ablagerungszeiten bis 3 Monate	199			
3.3.2	Wärmeleitfähigkeit nach längeren Lagerzeiten	199			
3.3.3	Zellgasänderung	199			
3.3.4	Druckfestigkeit nach Ablagerungszeiten	200			
3.3.5	Dimensionsänderung	201			
3.3.6	Dickenänderung über längere Zeiträume	201			
3.3.7	Brandverhalten	203			
3.4	Zeitraffende Tests	203			
3.4.1	Wärmeleitfähigkeit nach Alterung durch Verringerung der Dicke (Slicing)	203			
3.4.2	Wärmeleitfähigkeit nach Alterung durch erhöhte Temperatur	205			
3.4.3	Dimensionsstabilität bei definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen	206			
3.4.4	Verformung bei definierter Druck- und Temperaturbeanspruchung	207			
3.4.5	Wasseraufnahme durch teilweises und vollständiges Eintauchen	207			
3.4.6	Wasseraufnahme durch Diffusion	208			
3.4.7	Verhalten bei Frost-Tau-Wechselbeanspruchung	208			
3.4.8	Zyklische Belastung	209			
3.4.9	Langzeit-Kriechverhalten bei Druckbeanspruchung	209			
3.5	Extrapolation/Berechnungsmodelle	212			
3.5.1	Extrapolation des Kriechverhaltens bei Druckbeanspruchung nach <i>Findley</i>	212			
3.5.2	Berechnungsmodelle	212			
4	Objektuntersuchung	213			
4.1	Praxisobjekte	214			
4.2	Wasseraufnahme an Praxisobjekten	214			
4.3	Wärmeleitfähigkeit an Praxisobjekten (Gründach als Umkehrdach)	215			
4.4	Druckfestigkeit von XPS-Dämmstoffen in Umkehrdächern (Gründächer)	216			
5	Schlussbetrachtung	216			
6	Literatur	217			

1 Begriffe

In den letzten Jahren wird den Themen Langzeitverhalten und Dauerhaftigkeit deutlich mehr Beachtung geschenkt. Einerseits ist das Interesse der Endverbraucher an Wärmedämmstoffen durch die Preisentwicklung für Energie, die Diskussion um Versorgungssicherheit und die Klimadiskussion bedeutend gewachsen. Andererseits beschäftigt sich auch die Politik sehr stark mit dem Themenkomplex Energieeffizienz, CO₂-Einsparung und Abhängigkeit von Energielieferungen aus dem Ausland. Immer mehr Bauaufsichtsbehörden, aber auch Investoren und Bauträger fragen nach, wie lange behält ein Dämmstoff seine zugesicherten Eigenschaften oder mit welchen Beeinträchtigungen in den Eigenschaften muss im Laufe der Nutzungsdauer gerechnet werden. Auch die Frage, ob die übliche Nutzungsdauer deutlich länger ist, als die Amortisationszeit der anfänglichen Investition, beschäftigt viele Hausbesitzer und Investoren. Gleichzeitig gibt es aber keine Festlegung, wie lange ein Dämmstoff in einer bestimmten Anwendung seine Eigenschaften erfüllen muss.

Lifetime (Lebensdauer) / working life. Die EU-Kommission nähert sich diesem Thema im Leitpapier F (Guidance Paper F) [1] mit den Begriffen „working life“ – die Zeit, in der eine ausgeführte „Dämmarbeit“ inklusive Anschlüsse, Befestigung, Putz usw. die wichtigen Anforderungen (essential requirements) an das Bauteil erfüllt. Der zweite Begriff ist die Lebensdauer des Produkts (working life product), in unserem Fall des Wärmedämmstoffs. Damit ist die Lebensdauer gemeint, in der ein Dämmstoff eine Leistungsstufe beibehält, sodass eine einwandfrei geplante und ausgeführte Dämmmaßnahme die wesentlichen Anforderungen erfüllt oder eine Minimalanforderung überschreitet, ohne nennenswerte Kosten für Reparaturen oder Ausbau und Ersatz zu verursachen. Die Lebensdauer eines Produkts hängt damit nicht nur von der Lebensdauer (Lifetime) des Produkts selbst, sondern auch von einer gewissen Wartung und Pflege (Maintenance) ab.

Diese Definition macht einen klaren Unterschied zwischen der Lebensdauer der gesamten Dämmmaßnahme und der Lebensdauer des Dämmstoffs. Viele der Einflussfaktoren für die gesamte Dämmmaßnahme hängen von Faktoren ab, die der Hersteller nicht beeinflussen kann, wie der Planung, dem Ort der Ausführung (welchem Klima der Dämmstoff ausgesetzt ist), der Ausführung selbst und der Wartung und Pflege. Deshalb kann die Lebensdauer eines Produkts oder einer Ausführung nicht als Garantie interpretiert werden (Leitpapier F), die vom Hersteller abgegeben wird. Das Langzeitverhalten eines Dämmstoffs wird deshalb besser vom Begriff *Dauerhaftigkeit (Durability)* beschrieben. Die europäischen Dämmstoffnormen EN 13162 (Mineralwolle) bis EN 13171 (Holzfaserplatten) beschreiben diese Eigenschaft in den revidierten Normen, die ca. 2011 zur Abstimmung kommen sollen, nur ansatzweise und kommen nicht zu einheitlichen Definitionen. In Tabelle 1 sind einige Erfahrungswerte für die Lebens-

Tabelle 1. Lebensdauer von Dämmmaßnahmen in Bauteilen

Bauteil	Jahre	Durchschnitt (Jahre)
Wärmedämmung (im Flachdach / Warmdach)	30–60	45
Steildach	40–60	50
Umkehrdach	40–60	50
Decke, Fußboden	30–100	65
Außenwand hinter Bekleidung	30–100	45
Wärmedämmverbundsystem	30–60	40
Kerndämmung	30–60	45
Unter der tragenden Gründungsplatte	80–120	100
Perimeterdämmung	30–55	45
Technische Gebäudeausrüstung	10–25	15

Quellen: Leitfaden nachhaltiges Bauen [2], Herstellerangaben, Erfahrungswerte des FIW München

dauer von Wärmedämmmaßnahmen zusammengestellt. Die Angaben können je nach Einbausituation und Beanspruchung sehr unterschiedlich sein.

Die Zahlen zeigen, dass die mögliche Lebensdauer einer Wärmedämmmaßnahme sehr stark schwanken kann. Die Lebensdauer hängt auch sehr stark von der Zugänglichkeit der Wärmedämmung und den üblichen Renovierungs- und Umbauzyklen bzw. der Lebensdauer von anderen Stoffen wie Dachbahnen oder technischen Gebäudeausrüstungen ab.

Die Wärmedämmung unter der tragenden Gründungsplatte ist über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes nicht mehr zugänglich, während die tatsächliche Nutzungsdauer von technischen Gebäudeausrüstungen von der Lebensdauer von Heizkesseln, Kühlaggregaten usw. abhängen. Teilweise ist die tatsächliche Nutzungsdauer einer Dämmmaßnahme deutlich niedriger, da sich die Nutzung eines Gebäudes durch Umbauten, z. B. im Industriebau oder bei Verkaufsflächen, deutlich schneller ändert. Vor diesem Hintergrund, dass von Wärmedämmstoffen je nach Anwendung eine mittlere Lebensdauer von 15 bis 75 Jahren erwartet wird, müssen Verfahren entwickelt werden, die diese langen Zeiträume abdecken.

Grundsätzlich gibt es folgende Prüfmöglichkeiten für Wärmedämmstoffe:

- Kurzzeittests nach der Herstellung zur Beschreibung des Zustands nach der Fertigung.
- Langzeittests nach typischen Ablagerungszeiten z. B. 45 Tage – Wert der Druckfestigkeit bei XPS nach EN 13164, 90 Tage – Wert der Wärmeleitfähigkeit nach EN 13164 (XPS).
- Zeitraffende Tests z. B. Slicing-Verfahren durch Verringerung der Dämmschichtdicke z. B. EN 13164 (XPS)/ Schnellalterungstests durch erhöhte Temperatur z. B. EN 13165 (PUR) oder verschärfte Klima-

lagerung z. B. sogenannter „Floridatest“ (erhöhte Temperatur und Feuchte), „Autoklavtest“ (erhöhter Druck und Feuchte), EN 1604 (Verformung bei definierter Temperatur und Belastung).

- Extrapolation von Messwerten über kurze bis mittlere Zeiträume bis zum Faktor 30; z. B. Langzeitkriechversuch nach EN 1606 über 122 Tage bis zu 1,67 Jahre, die bis zu Zeiträumen zwischen 10 Jahren und 50 Jahren extra poliert werden können.
- Berechnungsprogramme zur Berechnung der Feuchteaufnahme oder der Wärmeleitfähigkeit durch Gasaustausch. Es stehen nur relativ wenige Programme zur Verfügung, von denen nur einzelne durch Praxis-tests über lange Zeiträume validiert sind. Zudem hängen die Ergebnisse sehr stark von den zur Berechnung verwendeten Daten (meist Messwerten) und Annahmen ab.

Tabelle 2. Bauaufsichtlich eingeführte europäische Dämmstoffnormen – Spezifikationen

DIN EN	Produkt	Kürzel
13162	Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle	MW
13163	Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol	EPS
13164	Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum	XPS
13165	Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyurethan-Hartschaum	PUR
13166	Werkmäßig hergestellte Produkte aus Phenolharzschaum	PF
13167	Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas	CG
13168	Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzwolle	WW
13169	Werkmäßig hergestellte Produkte aus Bläherlite	EPB
13170	Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Kork	ICB
13171	Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern	WF
14063	An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus Blähton-Leichtzuschlagsstoffe	LWA
14316	An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus expandiertem Perlite	EP
14317	An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus expandiertem Vermiculite	EV

- Objektuntersuchungen an eingebauten Wärmedämmstoffen und Untersuchungen an Wärmedämmstoffen, die unter Laborbedingungen über 3 bis 30 Jahre gelagert wurden.

Tabelle 3. Europäische Normen über allgemeine Prüfmethode an Wärmedämmstoffen

DIN EN	Titel
822	Bestimmung der <i>Länge und Breite</i>
823	Bestimmung der <i>Dicke</i>
824	Bestimmung der <i>Rechtwinkligkeit</i>
825	Bestimmung der <i>Ebenheit</i>
826	Bestimmung des Verhaltens bei <i>Druckbeanspruchung</i>
1602	Bestimmung der <i>Rohdichte</i>
1603	Bestimmung der <i>Dimensionsstabilität im Normklima</i> (23 ° C / 50 % relative Luftfeuchte)
1604	Bestimmung der <i>Dimensionsstabilität</i> bei definierten Temperatur- u. Feuchtebedingungen
1605	Bestimmung der <i>Verformung bei definierter Druck- u. Temperaturbeanspruchung</i>
1606	Bestimmung des <i>Langzeit-Kriechverhaltens</i> bei Druckbeanspruchung
1607	Bestimmung der <i>Zugfestigkeit</i> senkrecht zur Plattenebene
1608	Bestimmung der <i>Zugfestigkeit</i> in Plattenebene
1609	Bestimmung der <i>Wasseraufnahme</i> bei kurzzeitigem teilweisem Eintauchen
12085	Bestimmung der <i>linearen Maße</i> von Probekörpern
12086	Bestimmung der <i>Wasserdampfdurchlässigkeit</i>
12087	Bestimmung der <i>Wasseraufnahme</i> bei langfristigem Eintauchen
12088	Bestimmung der <i>Wasseraufnahme durch Diffusion</i>
12089	Bestimmung des Verhaltens bei <i>Biegebeanspruchung</i>
12090	Bestimmung des Verhaltens bei <i>Scherbeanspruchung</i>
12091	Bestimmung des Verhaltens bei <i>Frost-Tau-Wechselbeanspruchung</i>
12429	Einstellen der <i>Ausgleichsfeuchte</i> bei definierten Temperatur- u. Feuchtebedingungen
12430	Bestimmung des <i>Verhaltens unter Punktlast</i>
12431	Bestimmung der <i>Dicke</i> von Dämmstoffen <i>unter schwimmendem Estrich</i>
13793	Bestimmung des <i>Verhaltens unter zyklischer Belastung</i>
13820	Bestimmung des <i>Gehalts an organischen Bestandteilen</i>

Da neu- und weiterentwickelte Wärmedämmstoffe nicht beliebig lang geprüft werden können, um deren Markteinführung nicht zu verzögern, bedient man sich häufig einer Kombination von mehreren Methoden, um die Aussagewahrscheinlichkeit der Langzeiteigenschaften zu erhöhen. Häufig wird nach 6 bis 12 Monaten ein Programm von Kurzzeit- und Langzeitprüfungen abgeschlossen, dann wird ein Wärmedämmstoff im Rahmen von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen mit zunächst höheren Sicherheitsbeiwerten „geregelt“ und bei zunehmender Praxiserfahrung und weiterer Optimierung des Dämmstoffs können die Sicherheitszuschläge dann verringert werden. Um das Thema besser zu gliedern und dem Leser die Möglichkeit zu geben, die wesentlichen Anforderungen an die Langzeiteigenschaften in Abhängigkeit der Anwendung kennenzulernen, werden in den nächsten Abschnitten die Langzeitanforderungen für verschiedene Anwendungen dargestellt und dann die verschiedenen Eigenschaften, die für das Langzeitverhalten relevant sind, besprochen.

2 Wesentliche Anforderungen bei verschiedenen Anwendungen

In Tabelle 2 sind die bisher in Deutschland bauaufsichtlich eingeführten Dämmstoffnormen zusammengefasst. Diese Normen sind reine Spezifikationen und beschreiben einen Dämmstoff in unterschiedlichen Klassen und Stufen. Der Hersteller des Dämmstoffs kann diese Stufen und Klassen aus einer Vielzahl von Möglichkeiten frei wählen, um seinen Dämmstoff angemessen zu beschreiben. Angegeben werden diese Eigenschaften im sogenannten Bezeichnungsschlüssel (EN-Code), der bis zu 17 Eigenschaften umfassen kann.

Neben dem Bezeichnungsschlüssel müssen auf dem Etikett die grundlegenden Eigenschaften des Dämmstoffs wie Nenndicke, Länge, Breite, Anzahl der Platten (Rollbahnen), der Wärmedurchlasswiderstand bzw. der Nennwert der Wärmeleitfähigkeit und eine Brandklasse angegeben werden.

Der Hersteller erklärt mit dem CE-Zeichen die Übereinstimmung (Konformität) seines Produkts mit der entsprechenden EN-Norm.

Damit ist der Dämmstoff hinsichtlich seiner Eigenschaften klar beschrieben und kann in ganz Europa gehandelt und verkauft werden. Die harmonisierten europäischen Dämmstoffnormen waren die wichtigste Voraussetzung für den politisch angestrebten, freien, gemeinsamen Dämmstoffmarkt in Europa. Diese Normen stellen einen großen Fortschritt im Vergleich mit den früheren nationalen Normen dar. Auch für die Länder, die vorher keine nationalen Dämmstoffnormen oder technischen Richtlinien hatten, insbesondere die kleineren, neuen Beitrittsländer zur EU, sind die harmonisierten Normen ein nicht zu unterschätzender Vorteil.

Daneben muss aber auch die Anwendung der Dämmstoffe in den verschiedenen Ländern national geregelt

werden. Um den unterschiedlichen Bauarten, Bau Traditionen und klimatischen Verhältnissen in den verschiedenen EU-Ländern von Sizilien bis Skandinavien Rechnung zu tragen, haben viele Länder in der EU Anwendungsnormen oder Anwendungsregeln eingeführt, die aus der Vielzahl von Stufen der EN-Normen Mindestwerte für das betreffende Land festlegen.

In Deutschland werden die europäischen Dämmstoffnormen mit der *Anwendungsnorm DIN 4108-10: 2008-06* Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Anwendungsnorm für Dämmstoffe in Gebäuden, Mindestanforderungen und der *Bemessungsnorm DIN V 4108-4:2007-06*, Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Teil 4: Wärmeschutz und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, umgesetzt.

Die *Bemessungsnorm* schließt die Lücke zwischen dem Nennwert der Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{\text{Declared}}$) aus der EN-Norm, der auf einer $\lambda_{90/90}$ -Statistik beruht und dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit (λ_{Design}) mit dem der Planer die Bemessung (Auslegung) eines Gebäudes vornimmt.

Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit sind in DIN V 4108-4 in Kategorie I und II unterteilt.

Kategorie I regelt die Umsetzung des europäischen deklarierten Nennwerts λ_{D} in einen deutschen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit. Dazu wird der europäische λ_{D} -Wert mit einem Sicherheitsfaktor von 1,2 multipliziert. Dieser Sicherheitszuschlag von 20% soll gewährleisten, dass ein Bauwerk mit einer bestimmten Sicherheit einen bestimmten Dämmwert und die entsprechende Energieeinsparung erbringt.

Unter Kategorie II wird in DIN V 4108-4 der Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit λ_{Grenz} eingeführt, der in den europäischen Produktnormen nicht enthalten ist. Dieser Grenzwert kann z. B. mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) vom Hersteller beantragt werden. Mithilfe dieser Zulassung verpflichtet sich der Hersteller einen bestimmten Grenzwert immer einzuhalten und sich einer Fremdüberwachung durch eine bauaufsichtlich, anerkannte Überwachungs- und Zertifizierungsstelle zu unterziehen. Mit diesen beiden Voraussetzungen wird der Sicherheitsfaktor in den meisten Fällen auf 1,05 (5% Zuschlag) reduziert. Dieser verringerte Zuschlag wird mit λ_{Grenz} und $\lambda_{\text{Bemessungswert}}$ in einem Übereinstimmungszertifikat der Zertifizierungsstelle dokumentiert (Bild 1).

Mit den Anwendungsregeln DIN 4108-10, DIN V 4108-4 und den bauaufsichtlichen Zulassungen werden die europäischen Dämmstoffnormen seit 2003 ohne größere Probleme und mit einem hohen Maß an Vertrauen durch die Endverbraucher in Deutschland umgesetzt.

Sehr wichtig war es in diesem Zusammenhang, dass durch das gewohnte Ü-Zeichen und die bekannten Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit (früher Wärmeleitfähigkeitsgruppen) keine Verunsicherung der Hersteller, Anwender und Endverbraucher eintrat und neben neuen Angaben, die altvertrauten Angaben wiederzufinden sind.

Steildachdämmplatte nach DIN EN 13162 aus Mineralwolle mit Unterdeckbahn	
Inhalt : 10 Platten Nenndicke: 100 mm	
Abmessungen: 1000 mm x 500 mm	
$\lambda_D = 0,034 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	
Brandklasse nach EN 13501:E	
DIN EN 13162 : T4-CS(10/Y)20	
	Anwendungskurzzeichen DIN 4108-10 : DAD
	Wärmeleitfähigkeit Bemessungswert: 0,035 W/(m·K)
	Brandverhalten DIN 4102-B2
Hersteller: Anyone	Werk: Anywhere

Bild 1. Musteretikett

2.1 Anwendungsgebiete von Wärmedämmstoffen nach DIN 4108-10

Alle genormten Anwendungen sind für die gängigen Dämmstoffe in DIN 4108-10, nicht nach Anwendungen, sondern nach Dämmstoffen angeordnet, aufgeführt. Für jeden Dämmstoff enthält die DIN 4108-10

eine Tabelle, in der für alle gängigen Anwendungen, z. B. Dach, Decke oder Wand, die Mindestanforderungen hinsichtlich Dickentoleranz, Dimensionsstabilität, Druckfestigkeit, Wasseraufnahme usw. aufgeführt sind. Dabei sind die Anwendungsgebiete für alle Dämmstoffe nach EN 13162 bis EN 13171 gleich, aber nicht die

Tabelle 4. Anwendungsgebiete von Wärmedämmungen und Anwendungsbeispiele gemäß DIN 4108-10:2008-06

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

Tabelle 5. Differenzierung von bestimmten Dämmstoffeigenschaften – Auszug aus DIN 4108-10:2008-06

Produkt-eigenschaft	Kurz-zeichen	Beschreibung	Beispiele
Druck-belastbarkeit	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
Wasser-aufnahme	wk	keine Anforderung an die Wasseraufnahme	Innendämmung im Wohn- und Bürobereich
	wf	Wasseraufnahme durch flüssiges Wasser	Außendämmung von Außenwänden und Dächern
	wd	Wasseraufnahme durch flüssiges und/oder Diffusion	Perimeterdämmung, Umkehrdach
Zugfestigkeit	zk	keine Anforderung an Zugfestigkeit	Hohlraumdämmung, Zwischensparrendämmung
	zg	geringe Zugfestigkeit	Außendämmung der Wand hinter Bekleidung
	zh	hohe Zugfestigkeit	Außendämmung der Wand unter Putz, Dach mit verklebter Abdichtung
Schall-technische Eigen-schaften	sk	keine Anforderungen an schalltechnische Eigen-schaften	alle Anwendungen ohne schalltechnische Anfor-derungen
	sh	Trittschalldämmung, erhöhte Zusammendrückbarkeit	schwimmender Estrich, Haustrennwände
	sm	mittlere Zusammendrückbarkeit	
	sg	Trittschalldämmung, geringe Zusammendrückbarkeit	
Verformung	tk	keine Anforderungen an die Verformung	Innendämmung
	tf	Dimensionsstabilität unter Feuchte und Temperatur	Außendämmung der Wand unter Putz, Dach mit Abdichtung
	ti	Verformung unter Last und Temperatur	Dach mit Abdichtung

Mindestwerte für die jeweilige Anwendung. Diese Mindestwerte hängen nicht nur von der Anwendung ab, sondern auch von der Natur des Dämmstoffs. Für die Flachdachdämmung eines nicht genutzten Daches, Anwendungskurzzeichen DAA dm, wurde für Mineralwolle-Dämmstoffe beispielsweise ein Mindestwert der Druckspannung von 40 kPa festgelegt. Andere Dämmstoffe wie PUR-Hartschaum erfüllen von Haus aus mindestens 100 kPa, XPS-Dämmstoffe 300 kPa und Schaumglas-Dämmstoffe mindestens 400 kPa. Das heißt, dass diese Dämmstoffe ebenfalls für diese Anwendungen geeignet sind, aber eventuell noch andere Belastungen wie Begrünungen, Pflanzkübel oder Gehwegplatten für Wartungsarbeiten mit abdecken.

Um dem Leser die Wiedererkennung der Anwendung zu erleichtern, sind die Anwendungsgebiete mit Piktogrammen versehen. Weiterhin sind die Anwendungsgebiete noch nach Produkteigenschaften weiter unter-

gliedert, je nach Druckbelastbarkeit, Wasseraufnahme, Zugfestigkeit, schalltechnische Eigenschaften und Verformungen unter verschiedenen Belastungen.

2.2 Nicht genormte Anwendungen

Neben den in DIN 4108-10 genormten Bauanwendungen gibt es noch eine ganze Reihe von nicht genormten Anwendungen. Diese werden in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt.

Beispiele für diese nicht genormten Anwendungen sind:

- Wärmedämmverbundsysteme,
- Fassadendämmsysteme mit Schallschutzanforderungen,
- Umkehrdächer mit außen liegendem Dämmstoff wie bekiesete Umkehrdach, Gründach, Parkdach,
- Perimeterdämmung mit EPS- oder PUR-Dämmstoffen,

- Perimeterdämmung im drückenden Wasser (XPS und Schaumglas CG),
- Wärmedämmung unter lastabtragender Gründungsplatte.

Bei allen Anwendungen wird erwartet, dass der verwendete Dämmstoff zumindest die Minimalanforderungen über die gesamte Lebensdauer einer Dämmmaßnahme behält. Während des Herstellprozesses können üblicherweise nur die Kurzzeittests wie Druckfestigkeit oder Anfangswert der Wärmeleitfähigkeit geprüft werden. Das Langzeitverhalten kann üblicherweise nur durch spezielle Langzeittests oder Untersuchungen an Praxisobjekten nachgewiesen werden.

2.3 Langzeitverhalten

Wenn ein Produkt neu oder weiter entwickelt wird, versucht man nicht nur durch Prüfung der Anfangseigenschaften den Dämmstoff zu beschreiben. Vielmehr versucht man durch zeitraffende Tests Analogien zu bekannten Eigenschaftsänderungen zu finden. Diese zeitraffenden Prüfungen können sowohl mit erhöhten Temperaturen (Schnellalterung) als auch mit erhöhtem Feuchtegehalt (Floridatest, Autoklavtest, Diffusionstest, Frost/Tauwechsel) oder mit erhöhtem Druck (Verhalten unter definierten Lasten und Temperaturen) durchgeführt werden. In wenigen Fällen ist auch das Reduzieren der Dämmschichtdicke (sog. Slicing-Verfahren) ein bewährtes Mittel, um die Gasaustauschvorgänge bei der Schnellalterung der Wärmeleitfähigkeit zu beschleunigen.

Diese zeitraffenden Tests ergeben mit einer bestimmten Sicherheit ein Eigenschaftsbild für einen bestimmten Zeitraum unter festgelegten Laborbedingungen. Sie ersetzen aber nicht Praxisuntersuchungen unter natürlichen Klimabedingungen.

In den letzten Jahren versucht man auch verstärkt durch Rechenprogramme das Langzeitverhalten von Dämmstoffen zu simulieren. Nur für das Schnellalterungsverhalten von Dämmstoffen mit neuen Treibmitteln werden diese heute in größerem Maß angewandt (s. Abschn. 3.5.2). Für andere Eigenschaften wie das Druckverhalten sind solche Rechenprogramme nicht bekannt.

Das Feuchteverhalten in der Anwendung von Dämmstoffen kann heute mit instationären Rechenprogrammen wie z. B. „WUFI“ abgeschätzt werden. Allerdings benötigen die Programme eine ganze Anzahl von Eingabedaten, die nicht in allen Fällen hinreichend bekannt sind. In den nachfolgenden Abschnitten werden die wesentlichen Dämmstoffeigenschaften, die das Langzeitverhalten beschreiben, für eine Reihe von Dämmstoffen diskutiert und soweit vorhanden in Diagrammen dargestellt.

3 Laborversuche

3.1 Übersicht

Um ein Produkt für eine bestimmte Anwendung als geeignet befinden zu können, muss der Hersteller entweder durch eigene Prüfungen oder durch Prüfungen in einem bauaufsichtlich anerkannten Prüfinstitut einen Nachweis für die jeweilige Eignung des Dämmstoffprodukts erbringen. Da es sich bei Eignungs- und Verwendbarkeitsprüfungen, beispielsweise für eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, in der Regel um neuartige Produkte und Stoffe handelt, ist eine Aussage über eine bestimmte Eigenschaft über einen größeren Zeitraum manchmal nur schwer möglich. Verständlicherweise sind die Hersteller an den Eigenschaften und natürlich auch an einer raschen Markteinführung interessiert. Da somit eine langzeitige Prüfung eines Dämmstoffs vor der Einführung nicht möglich ist, versucht man in Verbindung mit zeitraffenden Alterungsmethoden auf das Langzeitverhalten des Dämmstoffs zu schließen. Hierbei unterscheidet man die jeweiliger Testverfahren ganz grob und ohne Anspruch auf Vollständigkeit in drei größere Bereiche:

1. Kurzzeittests,
2. Langzeittests,
3. zeitraffende Tests.

Die kurzzeitigen Testverfahren umfassen Prüfungen zur Beurteilung der wärmeschutztechnischen, mechanischen wie auch brandschutztechnischen Beurteilung eines produktionsfrischen Produkts. Dadurch erhält man zwar keine Aussagen über das Langzeitverhalten von Dämmstoffen, jedoch bilden diese Prüfmethode die Basis für die Messungen, mit denen natürlich oder künstlich gealterte Produkte letztlich beurteilt werden. Sie finden daher auch in anderen, später erläuterten Prüfungen ihre Verwendung.

Prüfungen in Bezug auf das Langzeitverhalten finden sich im Abschnitt 3.3. Langzeittests werden vor allem für die Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit, Zellgasänderung sowie Druckspannung durchgeführt. Außerdem wird kurz auf die Dimensionsänderungen verschiedener Dämmstoffe nach einer längeren Lagerung eingegangen. Dieser Abschnitt beschäftigt sich ausschließlich mit Prüfungen von unter Laborbedingungen gelagerten Proben und nicht an Proben aus einem Bauwerk, da somit Fremdeinflüsse wie Temperatur oder Feuchte ausgeschlossen sind. Dadurch ist der Vergleich mit anderen unter Laborbedingungen geprüften Proben möglich.

Abschnitt 3.4 beschreibt die sogenannten zeitraffenden Tests. Diese beinhalten Prüfungen, die am frisch hergestellten Dämmstoff eine simulierte „Alterung“ bewirken. Hierzu werden unter definierten Laborbedingungen Belastungen wie Temperatur und Feuchte auf ein Produkt aufgebracht, um sein individuelles Verhalten und Veränderungen gegen diese Fremdeinflüsse zu messen. Eine Dickenänderung bei einer definierten Luftfeuchte, ein Schrumpfen des Dämmstoffs unter Temperatur oder auch eine Erhöhung seiner Wärmeleit-

fähigkeit durch einen beschleunigten Zellgasaustausch bei Hartschaumprodukten mit Treibmitteln, die eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit als Luft aufweisen, sind nur einige der möglichen Prüfmethode. Durch derartige Belastungen durchläuft der Probekörper eine sogenannte Schnellalterung, die die Änderung eines Stoffs innerhalb der nächsten 25 bis 50 Jahre abbildet und somit innerhalb von wenigen Wochen und Monaten sein Langzeitverhalten simuliert. Eine Wiederholung der Prüfungen ist, da sie stets unter gleichbleibenden Bedingungen im Labor durchgeführt wird, damit auch bei geänderten Produkten oder bei Neuentwicklungen jederzeit möglich. Diese Reproduzierbarkeit ermöglicht somit einen Vergleich von Ergebnissen aus vorangegangenen und zukünftigen Untersuchungen. Abschließend zu den Laborprüfungen erfolgt in Abschnitt 3.5 noch eine kurze Erläuterung zu derzeit gängigen Extrapolationsmethoden und Berechnungsprogrammen.

3.2 Kurzzeittests

Unter kurzzeitigen oder besser unmittelbar Produktion durchgeführten Tests versteht man Messungen, denen keine längere Lagerzeit vorausgeht oder deren Prüfzeit innerhalb von wenigen Tagen abgeschlossen ist. Sie dienen zur Beurteilung des vorliegenden Materials im aktuellen Zustand. Diese gängigen Prüfungen umfassen beispielsweise die Messung der Wärmeleitfähigkeit bzw. des Wärmedurchlasswiderstands, Druckfestigkeit, Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene und des Brandverhaltens, um nur einige ausgewählte zu nennen. Solche Prüfungen an Dämmstoffen erfolgen beispielsweise beim Hersteller selbst im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle, aber auch stichprobenartig im Rahmen der Fremdüberwachung der Hersteller und in Verbindung mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, bei der aus der laufenden Produktion oder aus dem Zwischenlager Stichproben entnommen werden, um daran durch bauaufsichtlich anerkannte Prüfinstitute Messungen durchzuführen.

Das zur Messung vorgesehene Material wird vor jeder Prüfung konditioniert, d. h. es erfolgt vorab eine Lagerung des Dämmstoffs in einem Normklima bei einer Temperatur von $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(50 \pm 5)\%$. Diese Art der Probenvorbereitung schafft somit gleiche Prüfbedingungen für alle geprüften Produkte und soll so eine spätere Vergleichbarkeit von Messwerten zu früheren Ergebnissen oder zu weiteren Werken oder Produkten anderer Hersteller ermöglichen. Außerdem sind bestimmte Materialien besonders zu konditionieren. Beispielsweise muss bei expandiertem Polystyrol (EPS) eine verlängerte Trocknungszeit berücksichtigt werden, da eine gewisse Restfeuchte in den Platten verbleibt (Bild 2). Durch das Trocknen der EPS-Platten über mehrere Tage bei einer Temperatur von ca. 60°C bis zur Massekonstanz ergibt sich erst eine Vergleichbarkeit zu anderen Prüfergebnissen. Da mit diesen kurzzeitigen Prüfungen innerhalb

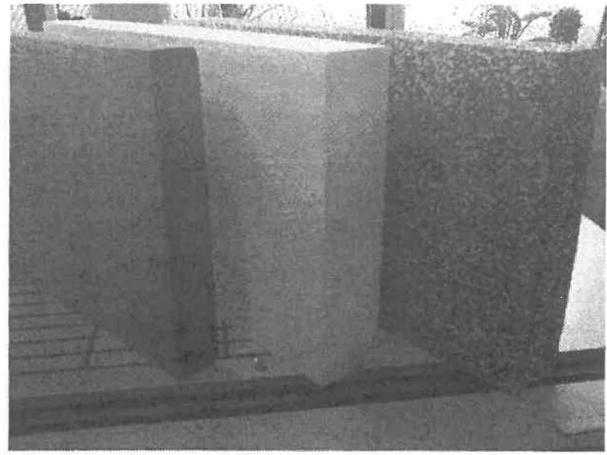


Bild 2. Graues, weißes und grau-weißes expandiertes Polystyrol (EPS)

von wenigen Tagen bereits Ergebnisse vorliegen, eignen sich diese auch zur werkseigenen Produktionskontrolle einzelner Hersteller, um rasch Rückschlüsse auf die Qualität der jeweiligen Charge zu erhalten und gegebenenfalls kurzfristig Korrekturen im Produktionsprozess umzusetzen. Deshalb ist auch bei der werkseigenen Produktionskontrolle eine exakte Probenvorbereitung einzuhalten.

3.2.1 Wärmeleitfähigkeit

In Zeiten weiter steigender Energieeffizienz rückt die Eigenschaft der Wärmeleitfähigkeit eines Produkts immer mehr in den Mittelpunkt. Die Eigenschaft wird mit λ bezeichnet, trägt die Einheit Watt je Meter mal Kelvin $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ und gibt die Wärmemenge an, die bei einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin einen Würfel von einem Meter Kantenlänge durchdringt. Die somit erhaltene Kenngröße ist die wichtigste Eigenschaft eines Dämmstoffs. Als Dämmstoff werden nur Produkte bezeichnet, deren Wärmeleitfähigkeit $0,10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ nicht überschreitet.

Technisch versteht man unter der Wärmeleitfähigkeit eine materialspezifische Eigenschaft, die im Gegensatz zum Wärmedurchlasswiderstand, von der Dicke eines Materials unabhängig ist. Hierbei kommt es je nach Material und Rohdichte zu unterschiedlichen Anteilen der beteiligten Arten der Energieübertragung wie Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass die Wärmeübertragung durch Strahlung bei steigender Rohdichte stetig abnimmt, die durch Wärmeleitung im Feststoffanteil, bedingt durch den höheren Feststoffanteil, zunimmt. Da diese Anteile sich nicht direkt proportional zueinander und zudem noch je nach Material von den Strahlungseigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit der Zellgase abhängig verändern, ergibt sich eine große Vielfalt von Dämmstoffen mit vielfältigen Entwicklungsmöglichkeiten. Aber auch materialtypische Besonderheiten machen sich hierbei bemerkbar. Solche Besonderheiten

sind beispielsweise die Faserorientierung bei Stein- und Glaswolle oder die Porengröße bei expandiertem Polystyrol.

Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12667

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit bei Dämmstoffen erfolgt in der Regel gemäß DIN EN 12667 sowie für dicke Produkte nach DIN EN 12939. In beiden möglichen Prüfgeräten, dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplattengerät, wird eine konstante und gleichmäßige Wärmestromdichte in eine Richtung eingestellt. Um Fremdeinflüsse zu vermeiden und eine geringe Messunsicherheit zu gewährleisten, erfolgt die Messung in der sog. Messfläche des jeweiligen Geräts. Die Messfläche befindet sich in der Mitte des Messgeräts, umgeben von einem umliegenden Schutzring. Normgerechte Prüfeinrichtungen erreichen heute aufgrund dieser konstruktiven Schutzmaßnahmen eine Messunsicherheit von maximal $\pm 2\%$ und eine Wiederholpräzision an zwei aufeinander folgenden Messungen am selben Prüfkörper ohne Änderungen der Prüfbedingungen von maximal $\pm 0,5\%$. Beide Unsicherheitstoleranzen werden aber von renommierten Prüfinstituten bei entsprechendem Aufwand teilweise noch unterschritten.

Die Messung an Dämmstoffen wird an ebenen, planparallelen Flächen durchgeführt. In Einzelfällen werden besonders dünne und flache Thermolemente der Heiz- bzw. Kühlplatte direkt auf dem Produkt aufgebracht, um Luftschichten zu vermeiden und die Messgenauigkeit nochmals zu erhöhen. Dies ist beispielsweise bei Vakuum-Isolationspaneelen der Fall (Bild 3).

Die derzeit üblichen Bemessungswerte für gängige Dämmstoffe sind in Bild 4 zu sehen. Es handelt sich hierbei um die jeweiligen Bemessungswerte der Dämmprodukte, nicht um einzelne Messwerte. Zusätzlich zu

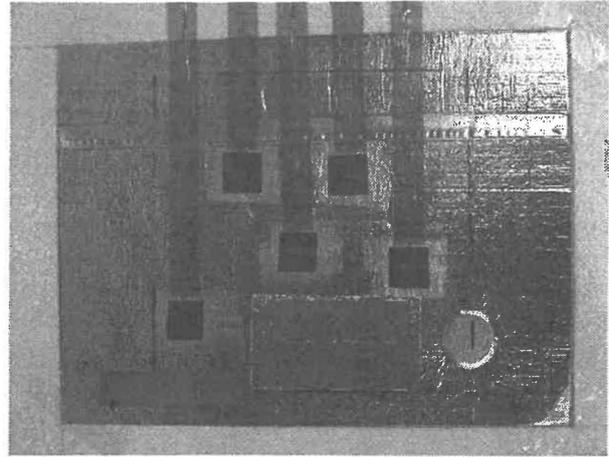


Bild 3. Vakuum-Isolationspaneel mit an der Probe befestigten Thermolementen

den genormten Dämmstoffen gemäß DIN EN 13162 bis DIN EN 13171 wurden außerdem noch die Vakuum-Isolationspaneelle (VIP) in die Übersicht aufgenommen, für die in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen ein Bemessungswert festgesetzt wurde.

Es zeigt sich, dass die gängigen Dämmstoffe eine Wärmeleitfähigkeit zwischen $0,024 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und $0,045 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ aufweisen. Die Dämmstoffe mit höherer Wärmeleitfähigkeit wie Holzwolle (engl. wood wool, daher WW) haben andere Stärken als die Wärmeleitfähigkeit wie z.B. Druckfestigkeit, aber auch schall-, brandschutztechnische oder optische Eigenschaften. Außerdem werden Holzwolleprodukte, sofern eine erhöhte Dämmung bei der Anwendung von Interesse ist, mit Mineralwolle oder EPS zu Sandwichpaneelen kombiniert, die dann die Vorteile beider Materialien vereinen (s. Bild 5).

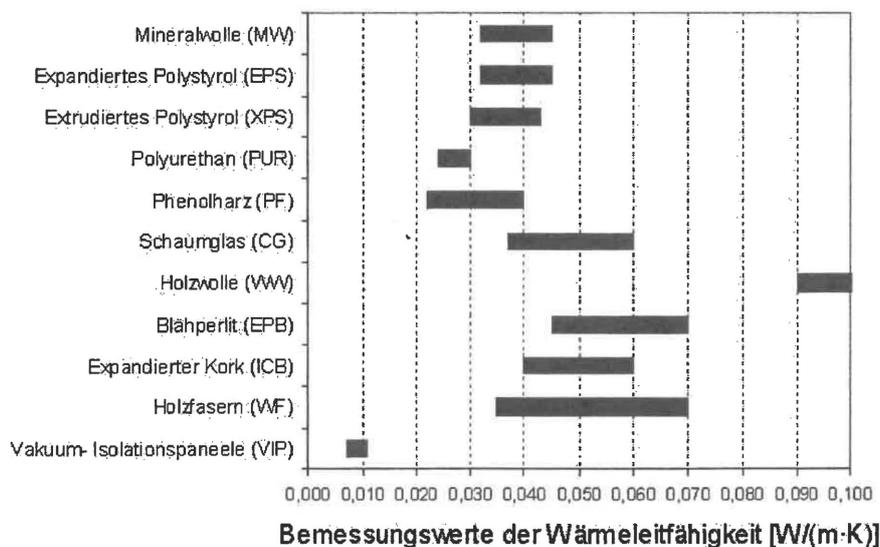


Bild 4. Typische Bereiche der Wärmeleitfähigkeit von Dämmprodukten



Bild 5. Nahaufnahme eines Sandwichpaneels aus Mineralwolle mit Holzwolledeckschicht

Die Vakuum-Isolationspaneelle (VIP) stellen das andere Extrem dar. Mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit zwischen $0,007$ und $0,011 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ sind diese Dämmstoffe mit Abstand führend in der Eigenschaft der Wärmedämmung, liegen jedoch wegen der hohen Produktionskosten und der maßgenauen Stückfertigung auch in einem überproportional höheren Preisniveau. Dafür jedoch birgt das VIP die Möglichkeit, mit geringsten Dämmdicken eine äußerst effiziente und inzwischen auch langlebige Dämmwirkung zu erzielen.

3.2.2 Druckfestigkeit/-spannung

Neben der eben beschriebenen Wärmeleitfähigkeit eines Produkts gibt es jedoch noch zahlreiche weitere, das Produkt beschreibende Eigenschaften, die ebenso entscheidend für die Beschreibung des Verhaltens eines Stoffs und dessen mögliche Verwendbarkeit und spätere Anwendung sind. Eine der diesbezüglich wichtigsten Eigenschaften ist das Verhalten eines Stoffs bei Druck-

beanspruchung gemäß DIN EN 826. Nach einer vorangegangenen Lagerung des Probekörpers bei Normklima ($23^\circ\text{C} / 50\% \text{ r. F.}$) erfolgt die Prüfung zentrisch zwischen zwei parallelen Platten einer Druckprüfmaschine, die sich mit einer Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Probendicke aufeinander zu bewegen. Die Prüfung endet mit dem Bruch des Probekörpers oder bei elastischen Stoffen spätestens nach einer Stauchung von 10% der ursprünglichen Dicke. Im ersten Fall spricht man dann von der Druckfestigkeit unter Angabe der erreichten Stauchung, im zweiten Fall von der Druckspannung, die folglich stets eine Stauchung von 10% aufweist. Die jeweilige Einheit wird in Kilopascal [kPa] angegeben und zeigt so die Widerstandsfähigkeit eines Produkts gegen kurzzeitig aufgebrachte Druckbeanspruchung.

Zur besseren Einordnung zeigt Bild 6 bezüglich des Druckverhaltens typische und zurzeit übliche Bereiche der jeweiligen Materialien. Die angegebenen Spannen stellen durch Hersteller deklarierte Mindestwerte dar und auch solche aus Zulassungen, die in Einzelfällen teilweise deutlich überschritten werden können.

Auffallend in dieser Grafik sind die sehr hohen Werte beim Schaumglas (CG) und beim extrudierten Polystyrol (XPS). Beide Materialien finden sich daher auch bei der Anwendung als Dämmung unter Druckbeanspruchung wie bei der Dämmung unter der Gründungsplatte von Gebäuden, da hier hohe Lasten abzutragen sind und eine entsprechend hohe Dauerdruckspannung notwendig ist, die in engem Zusammenhang mit der Kurzzeitdruckfestigkeit steht. Während Schaumglas eine hohe Druckspannung durch seine besondere Materialzusammensetzung erreicht, erreicht XPS die höheren Werte der Druckfestigkeit durch das spezielle Zellbild. Nach dem vollständigen Aushärten des Produkts wird erst nach einer ausreichenden Lagerzeit aufgrund von chemischen Prozessen und Diffusionsprozessen im Produkt, die „Langzeitdruckfestigkeit“ erreicht. Dies wird später noch genauer beschrieben.

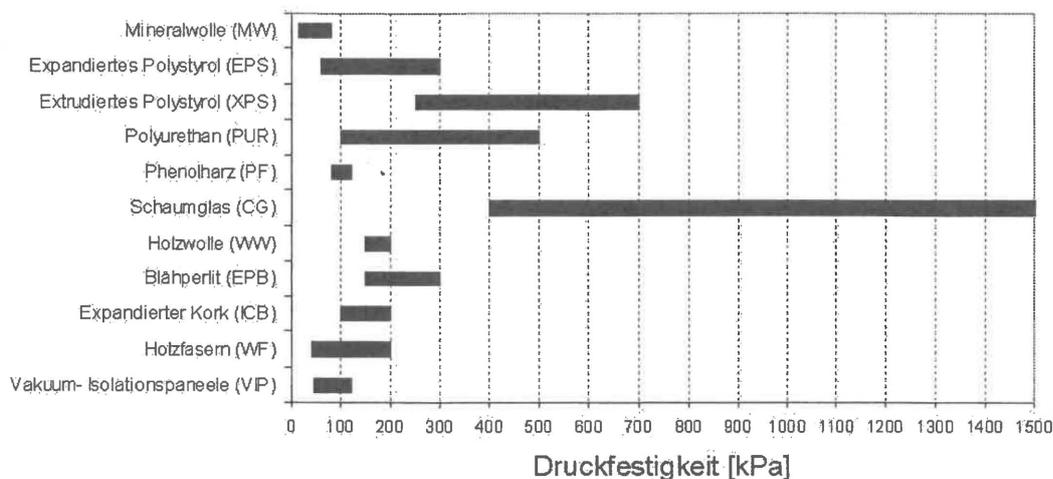


Bild 6. Typische Bereiche der Druckfestigkeit /-spannung (Kurzzeitversuch) nach DIN EN 826

3.2.3 Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene

Die Prüfung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach DIN EN 1607 erfolgt an Produkten, die aufgrund ihrer Anwendung Zug- bzw. Sogkräften ausgesetzt sind. Dies kann beispielsweise bei einer Anwendung im Fassadenbereich durch den Putz, wie auch im Dachbereich, der Fall sein, da es dort aufgrund der auftretenden Windlasten zu Windsog und damit zu nennenswerten Zugkräften auf die Dämmung kommt. Auch im Hinblick auf den zunehmenden Einsatz von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) ist diese Eigenschaft von großer Bedeutung. Die ebenfalls in Kilopascal [kPa] gemessene Kenngröße wird in umgekehrter Richtung wie die Druckspannung ermittelt. Hierzu werden die rechteckigen Probekörper auf spezielle Prüfplatten aufgeklebt. Diese werden anschließend solange auseinander gezogen, bis ein strukturelles Versagen der Probe eintritt. Eine Unterscheidung zwischen Zugfestigkeit und Zugspannung gibt es hierbei nicht. Eine Verdeutlichung der Bandbreite der verschiedenen Materialien findet sich in Bild 7.

3.2.4 Abmessungen/Maßhaltigkeit

Die Prüfungen der Abmessungen, Ebenheit und Rechtwinkligkeit nach DIN EN 822 bis DIN EN 825 gehören sicherlich nicht zu den komplizierten oder technisch aufwendigen Prüfungen, jedoch sind sie deshalb nicht minder wichtig für das Gesamtbild eines Produkts. Insbesondere bei der späteren Montage kann eine erhöhte Abweichung von den Soll- Maßen Wärmebrücken bewirken, die auch in kleinen Bereichen große Nachteile für das Gesamtsystem und seine Wirksamkeit als Isolierung bedeuten können. Gleiches gilt auch für eine zu große Unebenheit (Schüsseln von Platten) oder eine fehlende Rechtwinkligkeit, was zu Luftspalten in der Dämmung führt. Eine hohe Genauigkeit bei der Mes-

sung der Beschaffenheit eines Produkts ist daher notwendig.

3.2.5 Brandverhalten

Über das Brandverhalten von Dämmstoffen nach Produktion liegen, bedingt durch die jährlich durchgeführten Brandprüfungen, von allen genormten und durch allgemeine bauaufsichtlichen Zulassungen abgedeckten Materialien zahlreiche Prüfergebnisse und Nachweise vor. Einblicke zum Brandverhalten an älteren Dämmstoffen finden sich im Abschnitt 3.3.7.

Abschließend soll bei den kurzzeitigen Tests noch darauf hingewiesen werden, dass zahlreiche weitere kurzzeitige Prüfungen, je nach späterer Verwendung, zusätzlich an Dämmprodukten durchgeführt werden, um ein Produkt in seiner Gesamtheit zu beurteilen. Als Beispiele für weitere Eigenschaften sind hierbei der Dübeldurchzug, die Biegefestigkeit, die Scherfestigkeit oder auch die Punktlastprüfung anzuführen, jedoch sind diesbezüglich Langzeitbetrachtungen derzeit noch im Forschungsstadium. Daher wurde auf die Beschreibungen der Prüfmöglichkeiten bezüglich dieser Eigenschaften in diesem Beitrag verzichtet.

3.3 Langzeittests

Diese Art von Tests bezeichnet Prüfungen, die über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden. Die einzelne Messung ist hierbei nicht länger als bei den kurzzeitigen Tests, jedoch liegen zwischen dem Prüfbeginn und den einzelnen Messungen Zeiträume bis zu mehreren Jahren. Durch eine längere Lagerzeit ist es dadurch möglich, bei nicht zerstörenden Prüfungen wie beispielsweise der Prüfung der Wärmeleitfähigkeit dieselbe Probe mehrmals in einer Art Prüfserie zu messen und somit die Änderung der Wärmeleitfähigkeit über Jahre und Jahrzehnte zu erhalten.

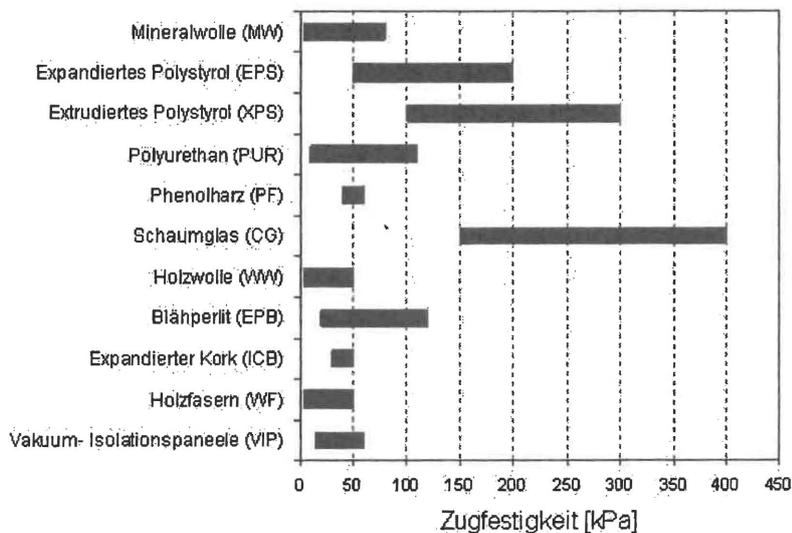


Bild 7. Typische Bereiche der Zugfestigkeit nach DIN EN 1607

3.3.1 Wärmeleitfähigkeit nach Ablagerungszeiten bis 3 Monate

Wie bereits erwähnt gibt es Materialien, die erst nach einer gewissen Ablagerungszeit ihre späteren Kennwerte erreichen. Diese Produkte sind z.B. Schaumkunststoffe, die mit einem Treibmittel hergestellt wurden. Das Treibmittel entweicht nach und nach und verändert somit die Wärmeleitfähigkeit des Produkts, da der Zellgasanteil mit seinen wärmedämmenden Eigenschaften (Pentan, Isobutan, HFKW) mit der Zeit kleiner wird. Typische Zeitpunkte für eine Messung der Wärmeleitfähigkeit sind: der Wert der Wärmeleitfähigkeit innerhalb weniger Tage nach der Produktion, der als „Frischwert“ bezeichnet wird. Ein weiterer Zeitpunkt für eine Prüfung, beispielsweise von XPS, ist nach einer Lagerzeit von 90 Tagen. Hierbei handelt es sich um eine erfahrungsbedingt festgelegte Zeitspanne z.B. für die Treibmitteltechnologie CO₂, die nach der Produktnorm vereinbart wurde, um den Zustand nach weitgehendem Gasaustausch zu messen.

3.3.2 Wärmeleitfähigkeit nach längeren Lagerzeiten

Als Beispiel soll hier die Änderung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des noch im Produkt verbliebenen Treibmittels von verschiedenen PUR-Schäumen gezeigt werden. Bild 8 zeigt verschiedene Arten von Polyurethan-Schäumen (PUR), die alle mit dem inzwischen verbotenen und ersetzten Treibmittel FCKW 11, aber mit unterschiedlicher Rohdichte und unterschiedlichen Herstellverfahren produziert wurden. Dieselben

Probekörper wurden nach der jeweiligen Messung bei Raumtemperatur wieder eingelagert und in einem Intervall von jeweils mehreren Jahren gemäß DIN 52612 (heute EN 12667) stets neu geprüft. Bei diesem Langzeitversuch handelt es sich daher nicht um Messwerte in der Anwendung, sondern um Messwerte des Dämmstoffs nach Lagerung unter Laborbedingungen, ohne weitere Belastungen oder Beeinflussungen. Die aktuelle Grafik zeigt somit den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit über 25 bis 30 Jahre und lässt damit erkennen, wie sich der Gasaustausch und die Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Lebensdauer entwickeln werden. Auffallend ist hierbei, dass es innerhalb der ersten 5 Jahre zu einem signifikanten Anstieg der Wärmeleitfähigkeit kommt, erst nach 10 Jahren hat der Wert ein Plateau erreicht und verbleibt innerhalb der weiteren 15 bis 20 Jahre auf nahezu demselben Niveau. Da man diesen langsameren Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei Polyurethan kennt, wird nur noch der sogenannte Frischwert gemessen und durch verschiedene Zuschläge für das verwendete Treibmittel und für die Deckschichten dann der „Langzeitwert“ der Wärmeleitfähigkeit für verschiedene PUR-Schäume berechnet.

Trotz des deutlichen Anstiegs am Anfang wird bei keinem der in Bild 8 dargestellten PUR-Schäume der damals geltende Bemessungswert 0,030 W/(m · K) überschritten.

3.3.3 Zellgasänderung

Neben der Änderung der Wärmeleitfähigkeit über die Zeit ist noch eine Anmerkung zum Gasaustausch bei Dämmprodukten aus PUR-Schaum zu machen. Selbst

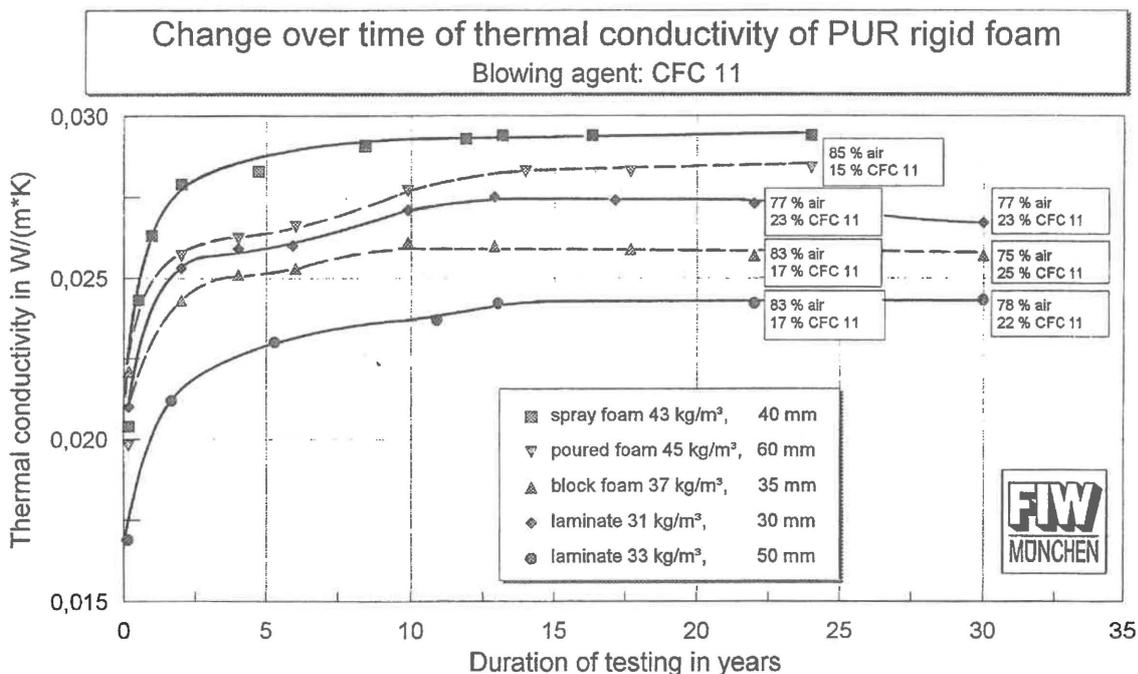


Bild 8. Änderung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Dicke und Herstellungsart mit Angabe der Zellgaszusammensetzung



Change of thermal conductivity in Polyurethane rigid foam at 10 °C mean temperature

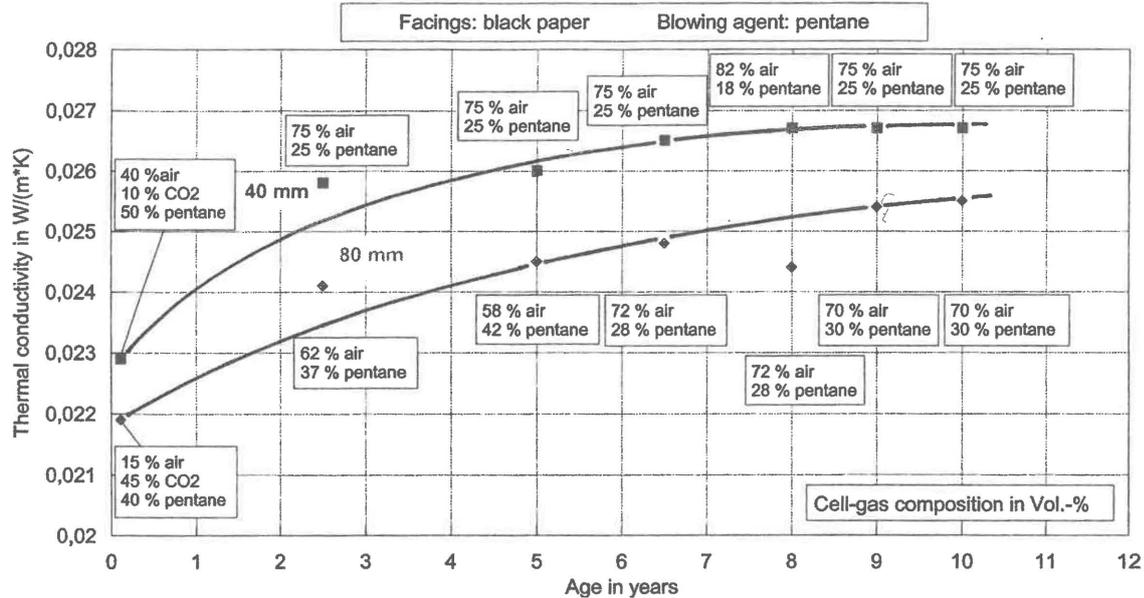


Bild 9. Änderung des Treibmittelanteils bei pentangetriebenem PUR-Schaum [4]

nach über 25 Jahren lässt sich mit dem Gaschromatographen noch ein Anteil des Treibmittels FCKW 11 zwischen 15 bis 25% nachweisen. Da sich dieser Wert ebenfalls nach ungefähr 10 bis 15 Jahren stabilisiert hat, verbleibt ein bedeutender Restanteil somit im Dämmstoff, der für den restlichen Lebenszyklus von bis zu hundert Jahren eine positive Auswirkung auf die Wärmeleitfähigkeit des Materials ausübt.

Durch das beidseitige Anschäumen an gasdiffusionsdichte Deckschichten wie z. B. an Aluminiumfolien mit einer Mindestdicke von 50 µm bei der Produktion kann dieser Effekt des Gasaustauschs aufgrund des gasdiffusionsdicht, abgedeckten PUR-Hartschaums deutlich verlangsamt werden.

Die Änderung der Zellgaszusammensetzung sowie die korrespondierende Wärmeleitfähigkeit bei den heute üblichen Ersatztreibmitteln zeigt Bild 9. Hierbei handelt es sich um die Darstellung von Pentan-/CO₂-getriebenen PUR-Hartschaumplatten. Analog zu Bild 8 wurde in ungefähr zweijährlichem Intervall die Lagerung bei Raumklima kurz unterbrochen und eine Messung der Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52616 / EN 12667 durchgeführt. Die Rohdichte beider Platten lag bei den damals üblichen 34 kg/m³.

Auch beim Treibmittel Pentan zeigt sich ein Gasaustausch mit der umgebenden Luft und damit ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Dicke über die ersten 10 Jahre. Danach ist ein deutlich langsamerer Anstieg mit dem Erreichen eines Plateaus bei kleineren Dicken zu beobachten. Mittlerweile liegen Messwerte über 15 Jahre vor, die den weiteren Verlauf bestätigen.

3.3.4 Druckfestigkeit nach Ablagerungszeiten

Wie bereits erwähnt benötigen manche Produkte eine gewisse „Reifezeit“ nach ihrer Herstellung, in der sich wie eben beschrieben die Zellgaszusammensetzung noch erheblich ändert oder die innere Struktur eines Produkts noch weiter verfestigt. Letzterer Effekt tritt deutlich bei XPS-Produkten auf. In den Wochen nach der Herstellung erhöht sich die Druckfestigkeit des Produkts um ca. 10 bis 30%. Da das Verhalten in Abhängigkeit von Dicke, Zellbild und Treibmittel sehr unterschiedlich ist, wird daher in der Praxis eine Prüfung des Druckverhaltens von XPS erst nach einer Ablagerungszeit von mindestens 45 Tagen durchgeführt. Der Prozess der Nachhärtung und Versteifung der inneren Struktur ist zu diesem Zeitpunkt zwar noch nicht abgeschlossen, jedoch befindet man sich einerseits mit dem 45-Tagewert aufgrund der sich weiter erhöhenden Druckfestigkeit auf der sicheren Seite, andererseits sind 45 Tage noch eine Zeitspanne, um auf evtl. Änderungen der Messwerte im Produktionsprozess zeitnah reagieren zu können.

Bei expandiertem Polystyrol hingegen ist der Reifeprozess durch die offenzellige Struktur sehr viel früher abgeschlossen. Ist das Produkt einmal „ausgetrocknet“ und das Treibmittel entwichen, so ist beispielsweise in Bild 10 gut zu erkennen, dass es auch nach 35 Jahren weder zu einer Verbesserung noch einer Verschlechterung der Druckspannung kommt.

Da zwischen der Druckspannung und der Rohdichte des jeweiligen EPS-Produkts ein linearer Zusammenhang besteht, ist eine Darstellung auf eine normierte Roh-

Messwerte der Druckspannung bei 10% Stauchung an EPS in Abhängigkeit vom Plattenalter, normiert auf eine Rohdichte von 25 kg/m³

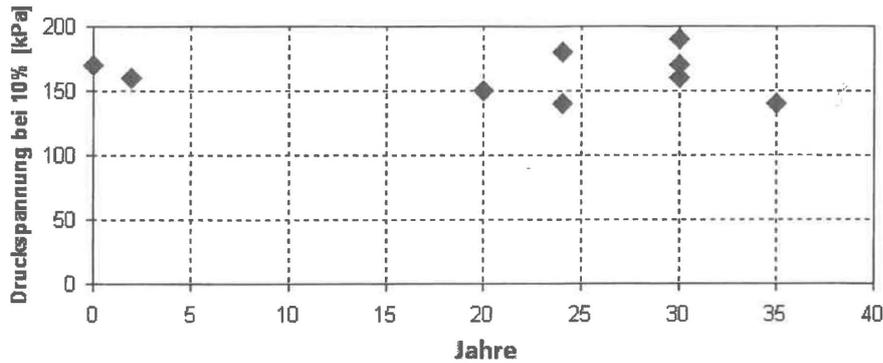


Bild 10. Messergebnisse an bis zu 35 Jahre alten EPS-Platten

dichte von 25 kg/m³ (weißer Rohstoff) möglich. Es zeigt sich hierbei deutlich, dass sich alle Messwerte innerhalb einer relativ geringen Toleranz befinden.

3.3.5 Dimensionsänderung

Ein wenig anders verhält es sich beim expandierten Polystyrol im Hinblick auf die Maßhaltigkeit und Beschaffenheit des Produkts. Bild 11 zeigt das Verhalten von 40 mm dickem weißem EPS in Bezug auf sein Verhalten bei Nachschwinden. Auffallend ist hierbei, dass es abhängig von der Rohdichte der EPS-Platte erst nach längerer Zeit zu einer Stabilisierung dieser nachträglichen Maßänderung durch das Austrocknen kommt.

Die Maßänderungen sind nicht sehr hoch und die Entstehung der Grafik liegt etliche Jahre zurück. Inzwi-

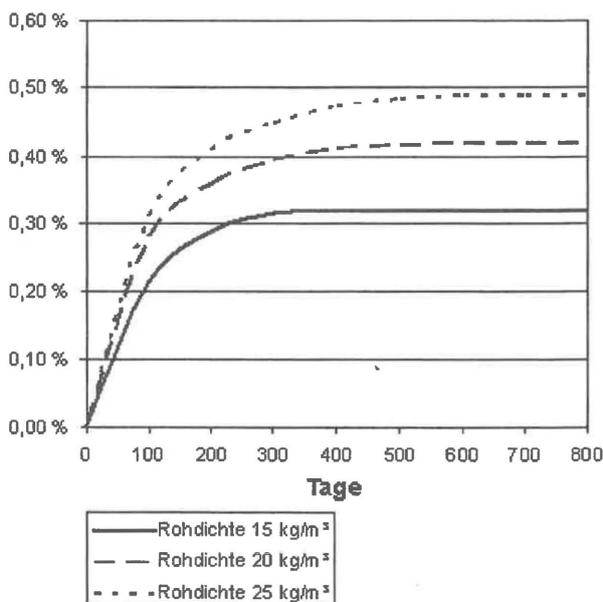


Bild 11. Nachträgliche Dimensionsänderung bei weißen, 40 mm dicken EPS-Platten in Abhängigkeit von der Rohdichte (Nachschwinden)

sehen ist der Effekt deutlich geringer, da das Produkt weiterentwickelt wurde.

Betrachtet man Dämmplatten aus Polyurethan, so zeigt sich ein solches Nachschwinden bei der Länge und Breite nicht. Eine 16-jährige Untersuchung an 4 verschiedenen Proben zeigt, dass es innerhalb dieses Zeitraums an den untersuchten Körpern zu keiner Verringerung der Abmessungen kam. Die für PUR über Jahre hinweg übliche, geringe Zunahme bei Länge und Breite verdeutlicht ansatzweise Bild 12.

3.3.6 Dickenänderung über längere Zeiträume

Der Dicke von Dämmstoffen kommt wegen des Zusammenhangs mit dem Wärmedurchlasswiderstand besonders große Bedeutung zu. Daher stellt sich die Frage, wie es sich mit der Dicke von Dämmstoffen über einen Zeitraum von mehreren Jahren verhält. Auch hier liegen wenige Versuchsdaten vor. Beispielsweise sind Daten von Platten aus Polyurethan über 16 Jahre hinweg bei einer zwischenzeitlichen Lagerung im Klima bei (23 ± 5) °C und (50 ± 20) % relativer Feuchte mit unterschiedlicher Dicke (40, 50 und 80 mm) und unterschiedlichen Treibmitteln (HFCKW 141 b, Pentan) gespeichert. Bild 13 zeigt hierbei die absolute Veränderung der Dicke in Millimeter innerhalb von 16 Jahren Beobachtungszeit, Bild 14 zeigt für dieselben Produkte die relative Abweichung in Prozent.

In diesem Zusammenhang fällt auf, dass keine signifikanten Entwicklungen nach 16 Jahren, insbesondere jedoch keine Dickenverringerung zu erkennen sind. Selbst Änderungen von 1 % nach ca. 5 Jahren bei einem Produkt gehen nach Jahren wieder zurück. Die beiden prozentual groß wirkenden Veränderungen der Dicke nach 16 Jahren (Bild 14, rechts) bei den dünneren Platten lassen daher vor diesem Hintergrund eher auf den Einfluss von äußeren Einwirkungen wie Temperatur und Luftfeuchte schließen, als auf eine tendenzielle Erhöhung der Dicke, zumal die absolute Änderung immer noch bei ca. 1 mm und damit noch immer sehr niedrig ist.

Generell ist bei den heute gängigen Dämmstoffen in Plattenform, sofern eine fehlerfreie Herstellung vorliegt

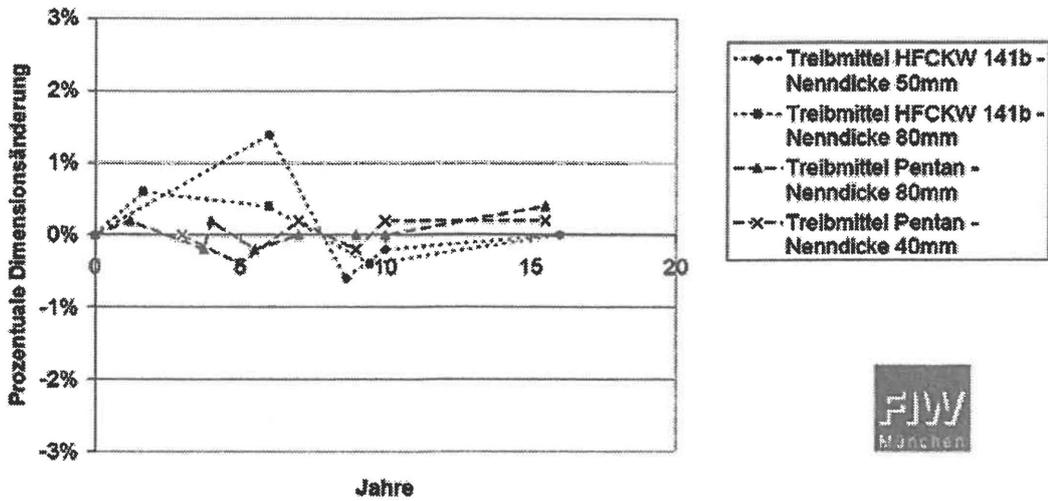


Bild 12. Veränderung der Länge und Breite innerhalb von 16 Jahren bei verschiedenen Treibmitteln und Plattendicken bei PUR

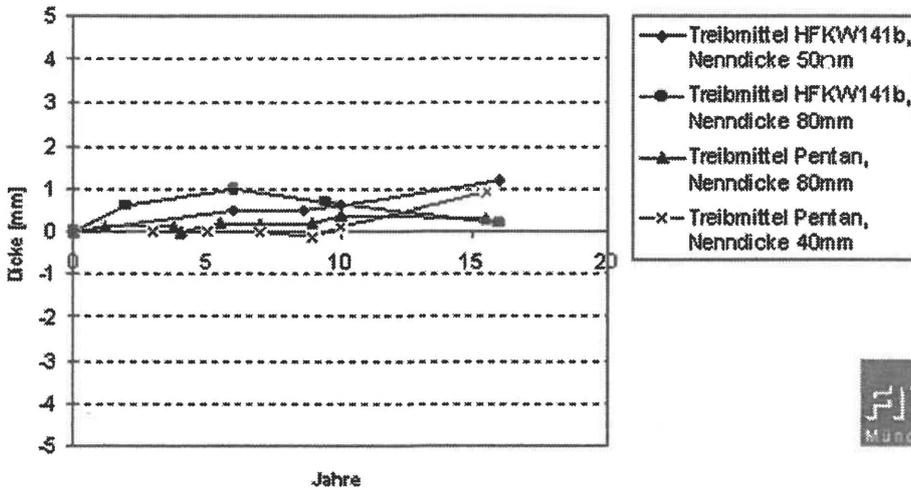


Bild 13. Absolute Veränderung der Dicke an PUR-Platten innerhalb von 16 Jahren

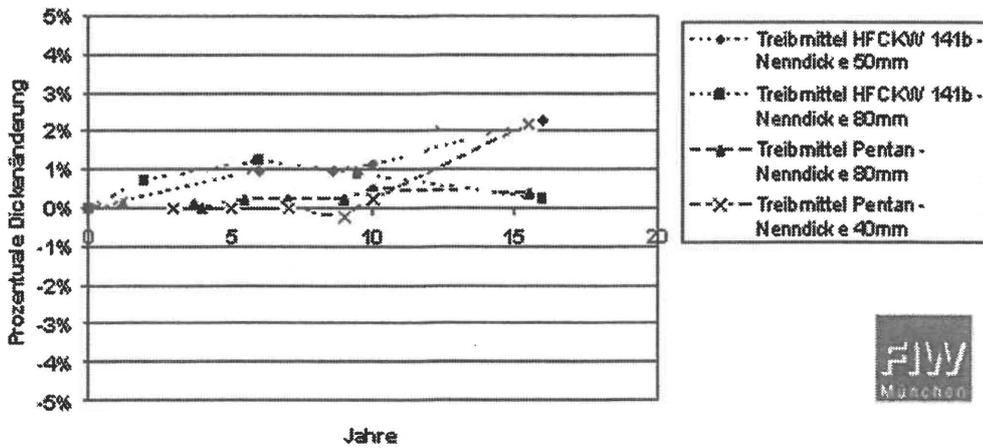


Bild 14. Relative Veränderung der Dicke an PUR-Platten innerhalb von 16 Jahren

und keine zusätzlichen Belastungen auftreten, nicht mit Dickenverminderungen außerhalb der angegebenen Toleranzen zu rechnen.

Schüttungen:

Bei Schüttungen und eingeblasenen Dämmstoffen wird der Dämmstoff erst an der Verwendungsstelle hergestellt (sog. In-situ-Dämmstoff). Hier kann es durch Setzung durchaus zu Dickenverminderungen und Luftschichten kommen (Bild 15). Bei diesen Dämmstoffen wird sowohl bei den Zulassungsprüfungen wie auch im Rahmen der Fremdüberwachung nach Zulassung das Setzungsverhalten regelmäßig überprüft und darf 10 bis 20 % nicht überschreiten.

3.3.7 Brandverhalten

Von gealterten Dämmprodukten liegen kaum öffentlich zugängliche Messungen oder Gutachten vor; weder von Objektentnahmen, aus denen natürlich gealterte Dämmstoffe bezogen werden könnten, noch an künstlich gealterten Dämmstoffen.

Berücksichtigen muss man bei dieser Betrachtung, dass es eine Reihe von Stoffen gibt, bei denen die Ausgangsstoffe nicht brennbar sind, wie Schaumglas, und deren Brandverhalten sich deshalb nicht ändern kann. Es gibt aber auch Stoffe, die einen variablen Anteil an organischem Bindemittel haben, wie bei Mineralwolle, Perliteplatten usw., deren Brandverhalten sich über die Zeit ändern kann. Daneben gibt es Dämmstoffe, die Flammenschutzmittel verwenden, wie Schaumkunststoffe und organische Faserdämmstoffe, bei denen auch ein Abbau des Flammenschutzmittelanteils über die Lebensdauer denkbar ist. Bei neuen organischen Faserdämmstoffen wird nach Ablauf der ersten Zulassungslaufzeit ein Nachweis des Brandverhaltens am Dämmstoff aus Praxisobjekten gefordert.

Für Polyurethan-Hartschaum-Dämmstoffe liegt ein Untersuchungsbericht vor, der aussagt, dass sich das Brandverhalten über längere Zeiträume im Rahmen der üblichen Messwertstreuungen nicht ändert.



Bild 15. Setzverhalten von geblähten Perliten im Praxistest

Bezüglich EPS-Dämmstoffen findet sich im „EPS white book“ [5] unter Kapitel 2.17.2.11: Durability of reaction to fire, der Hinweis, dass der Abbau der Flammenschutzmittel bei Produkten nach DIN 4102 – B1 innerhalb der durchschnittlichen Lebensdauer bzw. Verwendungsspanne zu vernachlässigen sei.

3.4 Zeitraffende Tests

Unter zeitraffenden Tests versteht man Prüfmethoden, die eine definierte, beschleunigte Alterung eines Produkts ergeben. Hierbei wird das Material verschiedenen Beanspruchungen wie Temperatur, Feuchte usw. ausgesetzt, um die während der Nutzungszeit von mehreren Jahren eintretende, natürliche Alterung zu simulieren und somit bereits kurze Zeit nach der Herstellung eine Beurteilung über das Langzeitverhalten des Produkts abgeben zu können. Zu solchen natürlichen Beanspruchungen kommt es beispielsweise durch den Einfluss der Witterung in Form von Temperaturschwankungen, den Einfluss von Wasser, Feuchte bzw. Frost, durch eine Dauerdruckbeanspruchung oder auch durch Kombinationen zwischen mehreren Beanspruchungen des Materials. Im Folgenden soll nun auf die jeweiligen beschleunigten „Alterungsmethoden“ näher eingegangen werden.

3.4.1 Wärmeleitfähigkeit nach Alterung durch Verringerung der Dicke (Slicing)

Wie bereits angesprochen, ist die Zusammensetzung des Gases innerhalb der Zellen und der Gasaustausch mit der umgebenden Luft bei Hartschäumen mitentscheidend für die jeweilige Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs. Als erstes Alterungsverfahren soll daher für XPS-Schaum auf die Bestimmung der gealterten Wärmeleitfähigkeit eingegangen werden. Dieses in der Norm DIN EN 13164 (XPS) im Anhang C beschriebene Verfahren ist bei der Verwendung von Treibmitteln, außer CO₂, anzuwenden, die eine nied-

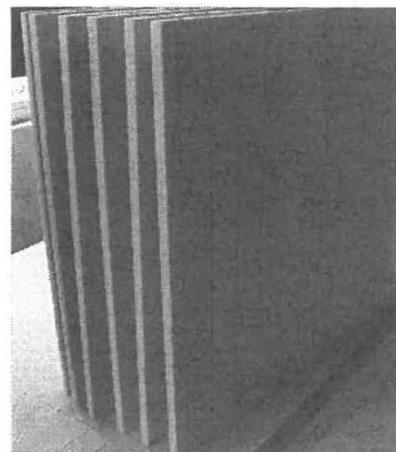


Bild 16. Probekörper nach Slicing in 10 mm dicken Scheiben

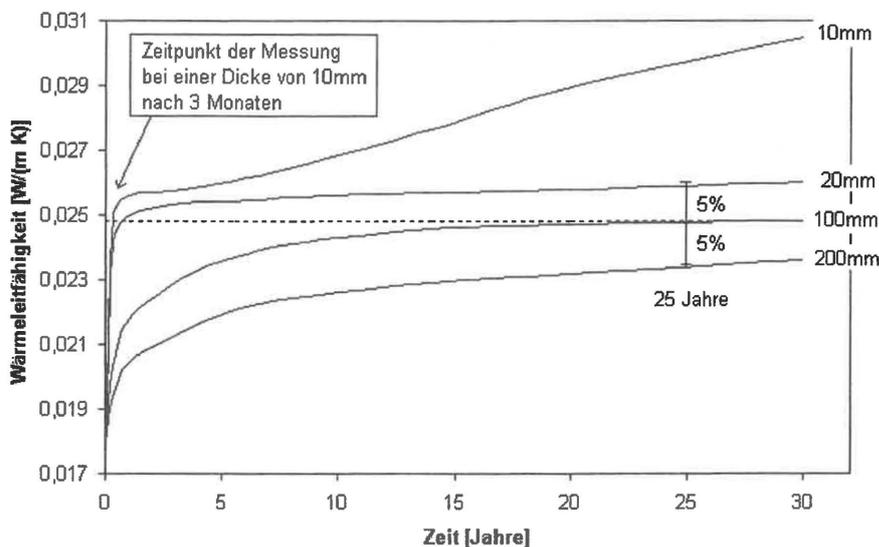


Bild 17. Berechnung von Wärmeleitfähigkeitskurven aus Diffusionskoeffizienten für homogene Dämmstoffe in verschiedener Dicke (sog. Nordtestmethode nach *Isberg* und *Sandberg* [6])

rigere Wärmeleitfähigkeit als Luft aufweisen. Nach einer Konditionierung der Produkte bei $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ und $(50 \pm 5)\%$ relativer Feuchte wird der Prüfkörper in Scheiben mit einer jeweiligen Dicke von 10 mm geschnitten (Bild 16).

Die Scheiben werden im Anschluss an den Zuschnitt je nach Produktdicke zwischen 30 bis 90 Tagen bei $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ und $(50 \pm 5)\%$ gelagert und anschließend die Wärmeleitfähigkeit gemessen. Das Zuschneiden in Scheiben und das anschließende Lagern der Probekörper ermöglicht durch die Verringerung des Diffusionsweges einen schnelleren Gasaustausch. Durch mathematische Simulation und durch einzelne Kontrollmes-

sungen (siehe Bild 18) konnte gezeigt werden, dass die Lagerung von 90 Tagen einer mittleren, natürlichen Alterung bei Raumtemperatur über 25 Jahre entspricht (s. Bild 17). Durch diesen Zusammenhang sind durch eine Verlängerung der Diffusionszeit an den 10 mm dicken Scheiben auch Aussagen über Zeitspannen von deutlich mehr als 25 Jahren möglich, die aber in der Praxis nicht gebräuchlich sind. Diese Methode funktioniert nicht oder nur bedingt bei gasdiffusionsdichten Deckschichten und inhomogenem Diffusionsverhalten über die Dicke. Deshalb wurden dafür andere Methoden entwickelt (s. DIN EN 13165 (PUR) Anhang C und DIN EN 13166 (PF) Anhang C).

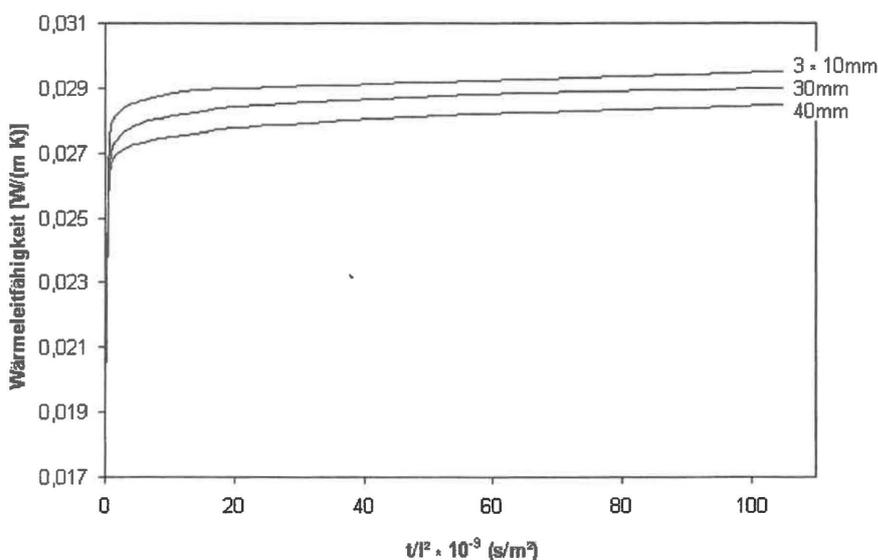


Bild 18. Veränderung der Wärmeleitfähigkeit von XPS-Dämmstoffen in Abhängigkeit von der Dicke des Probekörpers und der Ablagerungszeit nach Zuschnitt (Messungen von *Isberg*) [6]

Ergänzend hierzu zeigt Bild 18 den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Probedicken als eine Funktion aus experimentellen Messungen. Die 3×10 mm und die 30 mm dicken Proben wurden aus der Plattenmitte einer 80 mm starken XPS-Platte geschnitten wurden (keine Schäumhaut), die 40 mm dicke Probe behält einseitig eine Schäumhaut. Der Einfluss der angeschnittenen Zellen beim Slicing und der Einfluss der Schäumhaut sind zu erkennen.

3.4.2 Wärmeleitfähigkeit nach Alterung durch erhöhte Temperatur

Eine weitere sehr verbreitete Methode zur beschleunigten Alterung ist die Erhöhung der Temperatur. Sie ist für PUR-Hartschaum-Dämmstoffe, Phenolharz-Dämmstoffe (PF), aber auch Vakuum-Isolationspaneel sehr weit verbreitet und basiert auf dem physikalischen Prinzip, dass sich mit steigender Temperatur die Diffusionsvorgänge der einzelnen Zellgase stark beschleunigen. Diese Methode eignet sich auch für Platten mit gasdichtungsdeckenden Deckschichten und für Platten mit inhomogener Zellstruktur und Rohdichtevertelung über die Dicke der Platten. Da die Methode bei der 70°C-Alterung eine Beschleunigung um den Faktor von ca. 8 bis 15 gegenüber der 23°C-Lagerung ergibt, ist die Alterung nach (175 ± 5) Tagen noch nicht abgeschlossen, sondern strebt einem leicht steigenden Plateau entgegen. Für diesen weiteren Anstieg wurden sogenannte Sicherheitszuschläge in Abhängigkeit vom Treibmittel und den Deckschichten eingeführt. Die ermittelten Werte nach 175 Tagen Schnellalterung inkl. Sicher-

heitszuschlag repräsentieren den mittleren Anstieg der Wärmeleitfähigkeit über 25 Jahre. Da die Prüfdauer mit 175 Tagen doch sehr lange ist und viele Hersteller den technischen Aufwand für diese Lagerung scheuen, wurde als Option die Methode der festen Zuschläge für PUR-Hartschaum eingeführt. Diese Methode kann angewandt werden, wenn der Hersteller gezeigt hat, dass sein Schaum einen sogenannten Normalitätstest bestanden hat, und sich somit wie die überwiegende Mehrheit der geschlossenzelligen, mit bestimmten Treibmitteln geschäumten PUR-Hartschaumstoffe verhält.

Beim Normalitätstest wird durch einen einfachen Test (eine 20 mm dicke Schicht aus dem Kern wird 21 Tage bei 70°C gelagert und anfangs und nach Abschluss die Wärmeleitfähigkeit gemessen) bestimmt, ob der PUR-Hartschaum eine ausreichende Geschlossenheit aufweist und genügend Treibmittel enthält, um mit den festen Zuschlägen realistische Langzeitwerte zu erzielen.

Beide Methoden ergeben nach den Erfahrungen der letzten 7 Jahre weitgehend vergleichbare gealterte Werte der Wärmeleitfähigkeit und nur in ganz wenigen Fällen Vorteile für die eine oder andere Methode.

Bild 19 zeigt den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von PUR-Blockschaum bei verschiedenen Temperaturen von 23°C bis 100°C. Hierbei wurden Proben aus derselben Charge (Rohdichte 32 kg/m³, Nenndicke 100 mm, Treibmittel Pentan) bei unterschiedlichen Temperaturen über 1 Jahr gelagert. Wie zu erwarten, erhöht sich bei steigender Temperatur die Wärmeleitfähigkeit schneller, da es zu einem beschleunigten Ausdiffundieren des Pentans kommt. Bei allen Temperaturen des Beispiels nähert sich die Wärmeleitfähigkeit mit

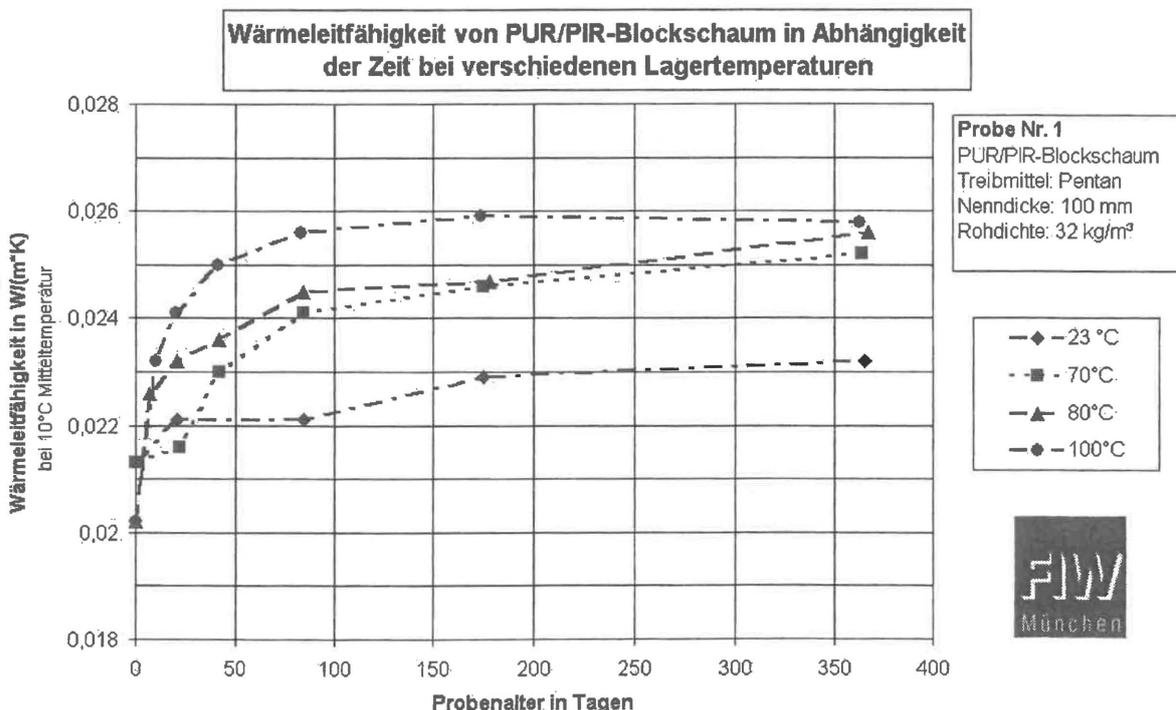


Bild 19. Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Lagertemperatur [7]

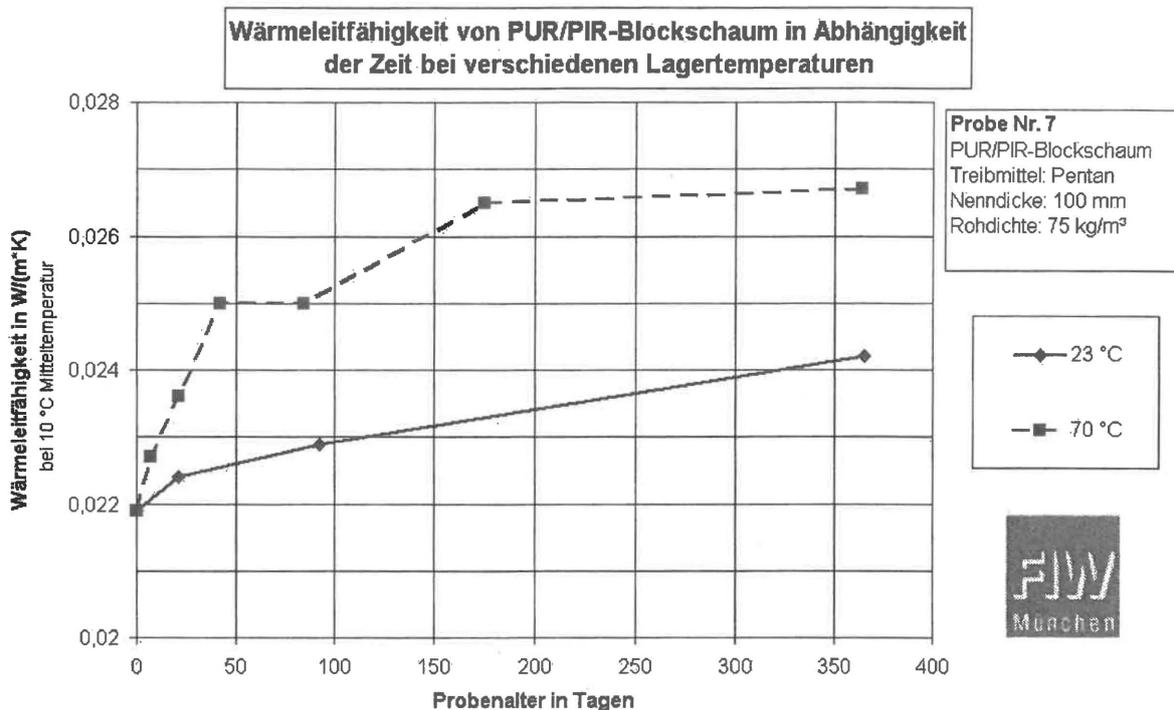


Bild 20. Unterschied bei der Veränderung der Wärmeleitfähigkeit in Bezug auf eine Lagerung bei 23 °C im Vergleich zu 70 °C

zunehmendem Probenalter praktisch einem Endwert (hier ca. 0,026 W/(m · K), welcher mit höherer Temperatur schneller erreicht wird. Anzumerken ist, dass es bei einer Temperatur über 70 °C bei Polyurethan neben dem beschleunigten Austreten des Treibmittels auch zu messbaren Dimensionsänderungen und stofflichen Umwandlungsprozessen kommt, weshalb die 70-°C-Alterungsmethode bevorzugt wird.

In Bild 20 wird der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei 70 °C gegenüber 23 °C für einen PUR-Blockschaum höherer Rohdichte gezeigt, die zu einer stärkeren Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führt.

3.4.3 Dimensionsstabilität bei definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen

Die Bestimmung der Dimensionsstabilität umfasst die DIN EN 1603, die eine mögliche Verformung eines Prüfkörpers bei Normklima (23 ± 2) °C und (50 ± 5) %

relative Feuchte nach mindestens 28 Tagen erfasst. Im Gegensatz dazu sind die möglichen Beanspruchungen nach der DIN EN 1604 deutlich variantenreicher und auch den jeweils vorgesehenen späteren Anwendungen des Dämmprodukts flexibler anpassbar. Je nach Wunsch des Herstellers oder Anwendungsgebiet können Prüfbedingungen von -40 °C bis +70 °C ohne oder mit einer Festlegung der relativen Luftfeuchte vereinbart und gemessen werden. Die bevorzugte Dauer der Klimabeanspruchung ist (24 ± 1) oder (48 ± 1) Stunden. An vorher definierten und vermessenen Punkten findet im Anschluss an die Klimalagerung eine Rückvermessung der Probekörper statt. Hierbei werden die Länge, Breite und Dicke erneut vermessen und die jeweiligen Mittelwerte der Maßänderungen $\Delta\epsilon_l$, $\Delta\epsilon_b$ und $\Delta\epsilon_d$ auf 0,1 % gerundet angegeben. Die entsprechenden Grenzwerte ergeben sich aus den jeweiligen Typen der Anwendungsnorm DIN EN 4108-10, der Produktnorm sowie der Deklaration des Herstellers. Außerdem ist

Tabelle 6. Maximale, materialtypische Maßänderungen bezüglich der Länge, Breite und Dicke durch Schnellalterung bei definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen

Dämmstoff	Maßänderung bei der		
	Länge $\Delta\epsilon_l$	Breite $\Delta\epsilon_b$	Dicke $\Delta\epsilon_d$
Mineralwolle	± 1 %	± 1 %	± 1 %
EPS	± 1 %	± 1 %	± 1 %
XPS	± 5 %	± 5 %	± 5 %
PUR	± 0,5 % bis ± 5 %	± 0,5 % bis ± 5 %	± 2 % bis ± 10 %

dieses Dämmstoff-Prüfverfahren nicht wie bisher beschrieben auf einen bestimmten Materialtyp zugeschnitten, sondern ist als Prüfnorm für alle Materialien entsprechend einer späteren Anwendung verwendbar. Die maximalen Maßänderungen sind für die genormten Produkte in der Tabelle 6 aufgeführt.

Auffällig ist der große Unterschied zwischen offenzelligen Dämmstoffen, wie Mineralwolle und EPS, die von Natur aus keine größeren Dimensionsänderungen aufweisen. Die geschlossenzelligen Dämmstoffe wie XPS und PUR reagieren wegen des Zellgasdrucks naturgemäß empfindlicher auf Temperatur- und Feuchteänderungen, deshalb die große Anzahl von möglichen Typen bei PUR-Hartschaum.

Die gemessenen Werte der Dimensionsänderungen unter Laborbedingungen geben Hinweise auf das Langzeitverhalten bei Temperatur- und Feuchteeinwirkung und damit auf die Anwendbarkeit z. B. im Dach. Die ermittelten Prozentwerte sind aber reine Laborwerte zur Klassifizierung und nicht zur Übertragung auf die tatsächliche Anwendung geeignet, da z. B. 70 °C und 90 % relative Luftfeuchte ein extrem hartes Klima im Bauwesen darstellt.

3.4.4 Verformung bei definierter Druck- und Temperaturbeanspruchung

Eine weitere Variante der beschleunigten Alterung ist die Bestimmung der Verformung bei definierter Druck- und Temperaturbeanspruchung nach der Prüfnorm DIN EN 1605. Eine Prüfung besteht hierbei in einer Kombination von aufgebrachter Last je nach gewählter Prüfbedingung 1, 2 oder 3 von 20, 40 oder 80 kPa (Prüfstufe A) und einer nach 48 Stunden zusätzlich aufgebrachten Temperatur von 80, 70 oder 60 °C (erneut analog zu den Prüfbedingungen 1, 2 oder 3, Prüfstufe B). Diese zweite

Prüfstufe dauert je nach Prüfbedingung entweder (48 ± 1) Stunden (Prüfbedingung 1) oder (168 ± 1) Stunden (Prüfbedingung 2 bzw. 3). Im Anschluss an die zweite Prüfstufe erfolgen unter aufgebrachter Last eine Messung der Probendicke und eine Umrechnung in eine prozentuale Abweichung. Diese Abweichung darf bei Dämmprodukten aus expandiertem Polystyrol (EPS), bei extrudiertem Polystyrol (XPS) sowie Polyurethan (PUR) 5 % nach Temperatur- und Lastbeanspruchung nicht überschreiten.

Als Beispiel zeigt Bild 21 das Verhalten von PUR-Hartschaumplatten bezüglich ihrer Dickenänderung bei einer Temperatur von 80 °C und einer statischen Last von 20 kPa. Hierfür wurden verschiedene Produkte über einen Zeitraum von insgesamt 15 Jahren gelagert, um daran in regelmäßigen Zeitabständen von 1 bis 3 Jahren Probekörper zuzuschneiden und diese über die Jahre unter Laborbedingungen gealterten Produkte einem Belastungstest nach DIN EN 1605 zu unterziehen.

Das Beispiel zeigt, dass bei PUR-Hartschaum, unabhängig von der Art der Herstellung, kaum Änderung zu erwarten sind. Alle Dickenänderungen blieben deutlich unter 5 %.

Anwendung findet diese Prüfmethode insbesondere bei EPS, XPS und Blähperlite für den Einsatz im Dachbereich und unter Estrich.

3.4.5 Wasseraufnahme durch teilweises und vollständiges Eintauchen

Für die Prüfung der Wasseraufnahme eines Dämmstoffs gibt es je nach Material und Anwendung verschiedene Prüfmethoden.

Die Bestimmung der Wasseraufnahme bei langfristigem Eintauchen gemäß DIN EN 12087 unterteilt sich in Prüfungen mit vollständigem und Prüfungen mit teil-

Dickenänderung von PUR in [%]

mit Belastung von 80°C/20kPa über 48 Std. nach Lagerung bei Normal klima (23°C/50%r.F.) an bis zu 15 Jahre alten Proben, Treibmittel FC KW 11

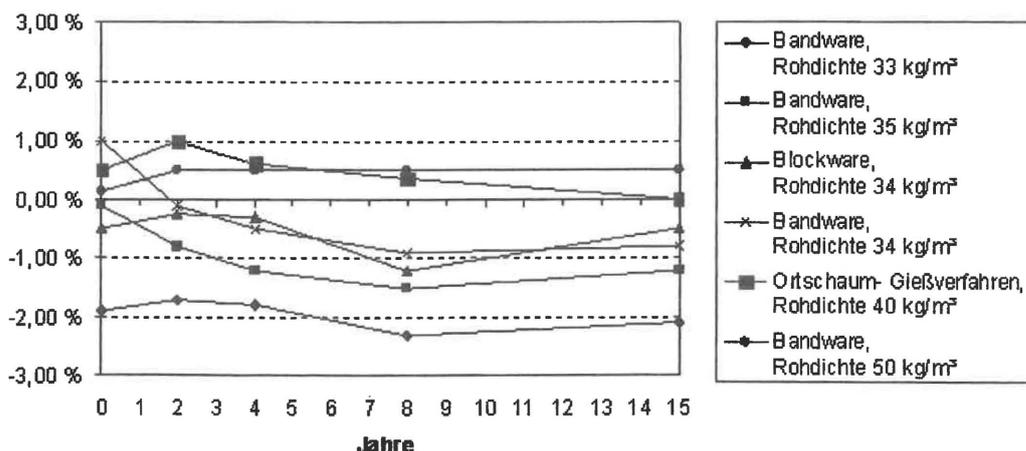


Bild 21. Dickenänderung bei PUR unter einer Belastung von 80 °C und 20 kPa [4]

Tabelle 7. Maximale Wasseraufnahme nach DIN EN 12087

Dämmstoff	Langzeitige Wasseraufnahme bei vollständigem Eintauchen nach DIN EN 12087 in [Vol.-%]
EPS	je nach deklariertes Stufe von $\leq 0,7\%$ bis $\leq 5\%$
XPS	je nach deklariertes Stufe von $\leq 0,7\%$ bis $\leq 3\%$
PUR	je nach deklariertes Stufe bis zu 5%

weisem Eintauchen eines Probekörpers in einen Wasserbehälter mit entsprechenden Abmessungen. Außerdem wird je nach späterer Anwendung zwischen verschiedenen Prüfverfahren unterschieden. Nach der 28-tägigen Untertauchphase erfolgt eine Rückwägung. Die aufgenommene Wassermenge wird auf das Volumen des Probekörpers bezogen und in Vol.-% angegeben. Hierbei ist im Allgemeinen mit den in Tabelle 7 dargestellten Maximalwerten zu rechnen.

Für Mineralwolle ist von der Anwendung abgeleitet keine Prüfung bei vollständigem langzeitigem Eintauchen vorgesehen, sondern nur bei einseitiger Feuchtebelastung, wie sie z. B. bei der Kerndämmung oder an der Fassade hinter Bekleidungen vorkommen kann. Deshalb sind nur Anforderungen an ein teilweises Eintauchen, sowohl langzeitig als auch kurzzeitig vorgesehen. Die Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem, teilweisem Eintauchen nach DIN EN 1609 beschreibt die Durchführung einer Messung der 24-stündigen Wasseraufnahme bei teilweisem Eintauchen. Das Prüfergebnis w_p wird in Kilogramm je Quadratmeter ausgewiesen. Grenzwerte für Mineralwolle liegen hierbei bei $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ bei kurzzeitigem, teilweisem Eintauchen, und bei langzeitigem, teilweisem Eintauchen nach DIN EN 12087-1 bei maximal $3,0 \text{ kg/m}^2$. Eine Übersicht über gängige Bereiche der Feuchteaufnahme von Dämmstoffen, an denen diese Eigenschaft geprüft wird, zeigen die Tabellen 8 und 9.

3.4.6 Wasseraufnahme durch Diffusion

Die Bestimmung der Wasseraufnahme durch Diffusion gemäß DIN EN 12088 simuliert die Wasseraufnahme von Produkten, die einseitig oder beidseitig einer relativ hohen Luftfeuchte (bis zu 100%) sowie über einen längeren Zeitraum einer Wasserdampfdruckdifferenz ausgesetzt werden und bei denen es zu einer Taupunktunterschreitung im Produkt kommt. Dies ist insbesondere in Bereichen wie beim Umkehrdach und bei ungeschützter Wärmedämmung im Erdreich (Perimeterdämmung) der Fall. Die Prüfung erfolgt an einer im Querschnitt ungestörten Probe. Eventuelle Schäumhüte, Kaschierungen oder Beschichtungen werden daher nicht entfernt, um das Produkt später als Gesamtheit im Hinblick auf sein Diffusionsverhalten beurteilen zu können. Für 28 Tage wird der Probekörper einer Tem-

Tabelle 8. Maximale Wasseraufnahme nach DIN EN 1609

Dämmstoff	Kurzzeitige Wasseraufnahme bei teilweisem Eintauchen nach DIN EN 1609 in $[\text{kg/m}^2]$
MW	$\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$
PF	je nach deklariertes Stufe von $\leq 0,25 \text{ kg/m}^2$ bis $\leq 1,25 \text{ kg/m}^2$
CG	$\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$ ¹⁾
ICB	$\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$
WF	je nach deklariertes Stufe von $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$ bis $\leq 2,0 \text{ kg/m}^2$

1) Bei Schaumglas (CG) ist die Wasseraufnahme auf die angeschnittenen Zellen an der Oberfläche beschränkt.

Tabelle 9. Maximale Wasseraufnahme nach DIN EN 12087-1

Dämmstoff	Langzeitige Wasseraufnahme bei teilweisem Eintauchen nach DIN EN 12087-1 in $[\text{kg/m}^2]$
MW	$\leq 3,0 \text{ kg/m}^2$
PF	je nach deklariertes Stufe von $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$ bis $\leq 3 \text{ kg/m}^2$
CG	$\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$ ¹⁾

1) Bei Schaumglas (CG) ist die Wasseraufnahme auf die angeschnittenen Zellen an der Oberfläche beschränkt.

peratur- und Wasserdampfdruckdifferenz ausgesetzt. Dies erfolgt auf der einen Seite durch ein auf $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ erwärmtes Wasserbad, auf der anderen Seite durch eine Kühlplatte einer Temperatur von $(1 \pm 1)^\circ\text{C}$. Die Probekörper werden hierbei alle 7 Tage gewendet. Die Wasseraufnahme durch Diffusion, W_{dv} wird volumenbezogen in Prozent angegeben. Eine Übersicht hierfür liefert Tabelle 10.

3.4.7 Verhalten bei Frost-Tau-Wechselbeanspruchung

Das Prüfverfahren gemäß DIN EN 12091 simuliert das Verhalten eines Dämmstoffs bei zyklisch wechselnden Umgebungsbedingungen durch einen Wechsel der Temperatur bei „Frost“-Bedingungen bei -20°C und

Tabelle 10. Maximale Wasseraufnahme nach DIN EN 12088

Dämmstoff	Wasseraufnahme durch Diffusion gemäß DIN EN 12088 in [Vol.-%]
EPS	je nach deklariertes Stufe von $\leq 3\%$ bis $\leq 15\%$
XPS	je nach deklariertes Stufe von $\leq 0,5\%$ bis $\leq 5\%$

einer feuchten Umgebung bei +20 °C („Tau“). Die Frost-Tau-Wechselbeanspruchung bestimmt daher die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften und den Feuchtegehalt. Die Anwendungsbereiche sind Dämmstoffe, die direkt mit Wasser und Frost in Berührung kommen, wie das Umkehrdach und eine ungeschützte Wärmedämmung im Erdreich (Perimeterdämmung). Da letztlich die Auswirkungen auf die mechanischen und wärmeschutztechnischen Eigenschaften bei dieser Belastung bzw. „Alterung“ des Dämmstoffs im Vordergrund stehen, wird am Originalprodukt vor dem Versuch der Wasseraufnahme das Druckverhalten ermittelt, um dadurch einen Vergleichswert zu erhalten. Nach Durchlaufen einer langzeitigen Wasseraufnahme durch Diffusion nach DIN EN 12088 oder durch völliges Eintauchen gemäß DIN EN 12087 (je nachdem, ob es sich um XPS- oder EPS-Dämmstoffe handelt; siehe Produktnorm) finden 300 Frost-Tau-Zyklen an den Probekörpern statt. Die vorangegangene Prüfung der Wasseraufnahme (Diffusions- oder Unterwasserlagerung) wird eingesetzt, um einer höheren Beanspruchung durch Wasser und Eis in den Zellen von Anfang an zu gewährleisten. Im Anschluss erfolgt dann an einem Satz von Prüfkörpern eine Messung des Druckverhaltens im feuchten, an einem anderen Satz eine Messung der Druckverhaltens im rückgetrockneten Zustand. Ein Auszug aus einem Forschungsbericht des FIW München zum Thema „Wasseraufnahme von Perimeterdämmung aus EPS-Vergleich der Prüfverfahren nach Zulassung bis 2003 und EN 13163“ aus dem

Jahr 2007 zeigt in Abhängigkeit von der aufgenommenen Feuchte die jeweiligen Unterschiede von feuchten und rückgetrockneten Proben (Bild 22). Die getroffene Unterscheidung in Block- und Automatenware kann vernachlässigt werden, die Regressionsgeraden der feuchten und rückgetrockneten Proben verdeutlichen die Verringerung der Druckspannung bei 10% Stauchung von durchschnittlich 3 bis 8% in Abhängigkeit von der aufgenommenen Feuchte.

3.4.8 Zyklische Belastung

In manchen Anwendungen wie Fußböden, Decken und Parkdecks sind Dämmstoffe auch dynamischen und zyklischen Belastungen ausgesetzt. Hierfür gibt es einige Prüfverfahren wie beispielsweise die nach EN 13793. Leider gibt es bisher wenige Erfahrungen mit diesen Prüfungen. Hinweise auf das Kriechverhalten unter zyklischer Belastung bietet die Arbeit von *Krollmann* [8], in der XPS-Dämmstoffe auf ihr Verformungsverhalten unter verschiedenen zyklischen Belastungen in Abhängigkeit von der Zeit untersucht werden.

3.4.9 Langzeit-Kriechverhalten bei Druckbeanspruchung

Sehr wichtig für Anwendungen unter dauerhaften, statischen Belastungen ist die Kenntnis des Langzeit-Kriechverhaltens eines Dämmstoffs. Diese Anwendungen sind vor allem Dämmstoffe unter Fußböden, Industrieböden, Parkdecks und unter der tragenden Gründungsplatte von

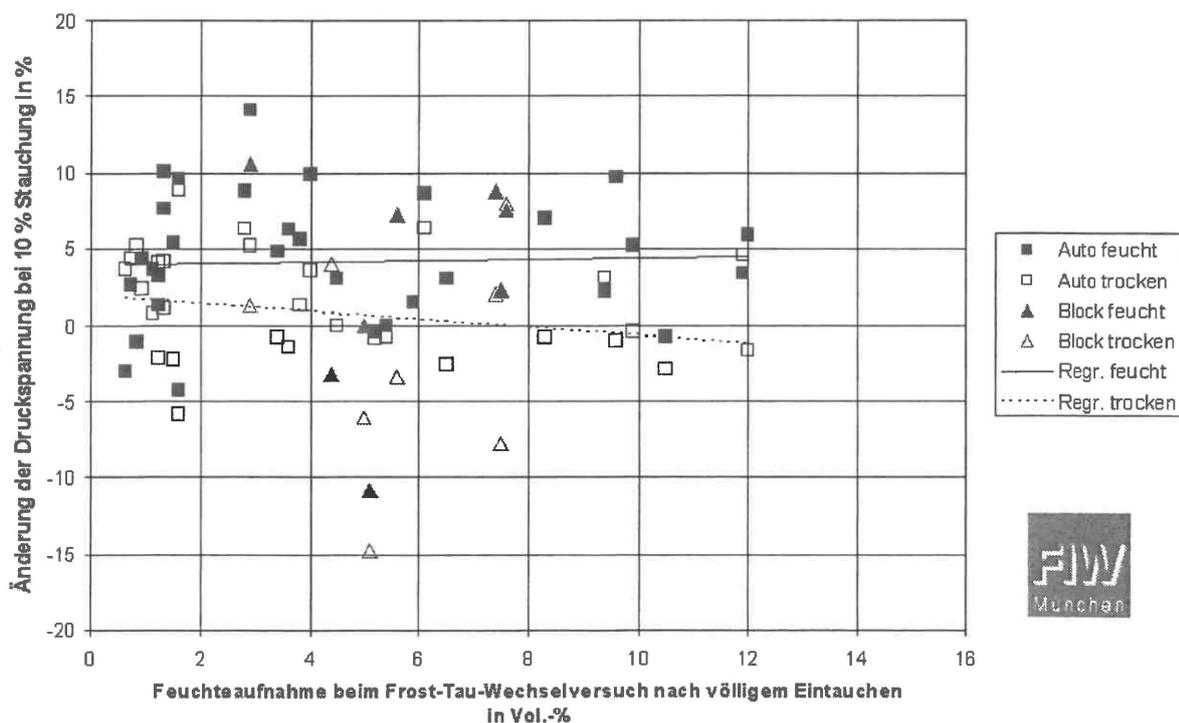


Bild 22. Prozentuale Änderung der Druckspannung bei 10% Stauchung nach Frost-Tau-Wechselbeanspruchung in Abhängigkeit von der Feuchteaufnahme beim Frost-Tau-Wechselversuch [14]

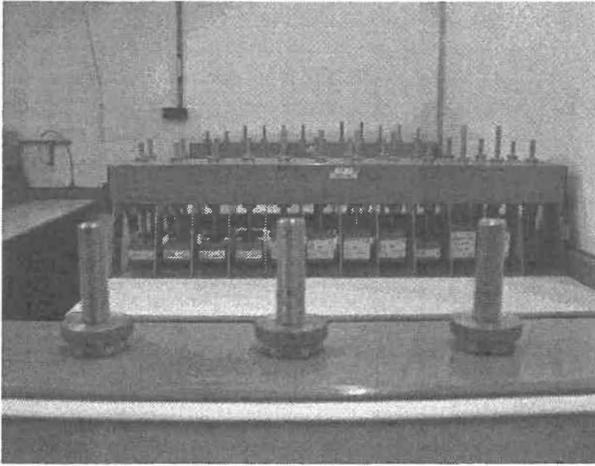


Bild 23. Prüfstände zur Ermittlung des Kriechverhaltens

Gebäuden, bei denen eine statische Dauerlast über die gesamte Lebensdauer zu erwarten ist.

Üblicherweise wird das Langzeitkriechverhalten nach EN 1606 geprüft, in dem auf Dämmstoffproben aus einer Herstellcharge 3 verschiedene Lasten (statische Druckspannungen) bei definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen aufgebracht werden. In genau definierten Zeitabständen wird die Dickenverminderung gemessen und logarithmisch gegen die Zeit aufgetragen. Die Versuche werden 4 Monate bis 1,67 Jahre lang durchgeführt und können nach der Theorie von *Findley* [9] bis zum Faktor 30 extrapoliert werden. Das bedeutet, dass Messwerte über 122 Tage auf einen Zeitraum von 10 Jahren und Messwerte von 1,67 Jahren auf Zeiträume von 50 Jahren extrapoliert werden können. Die 3 Laststufen sind sinnvoll, um für einen unbe-

kannten Stoff einen größeren Druckspannungsbereich abdecken zu können. Aus wärmeschutztechnischen Gründen sind nur Verformungen von max. 2 bis 3 % akzeptabel.

Hinweis: Die in den folgenden Bildern gezeigten Beispiele zeigen das Verhalten einzelner Dämmstoffe unter statischen Lasten. Im konkreten Anwendungsfall muss durch statische Berechnungen die Eignung im Einzelfall nachgewiesen werden unter Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten für dynamische Belastungen, Horizontallasten, Einflüssen von Temperatur und Feuchte usw.

Bei den Dämmstoffen unterscheidet man zwischen sprödharten Dämmstoffen wie Schaumglas, die praktisch kein Kriechverhalten zeigen und elastischen Dämmstoffen wie XPS-, EPS und PUR.

Diese Dämmstoffe zeigen im betrachteten Druckspannungsbereich nach einer Anfangsverformung ein geringes Kriechverhalten, das aber aus statischen und wärmeschutztechnischen Gründen abgeschätzt und nach oben hin begrenzt sein muss.

XPS-Dämmstoffe erreichen je nach Rohdichte und Kurzzeitdruckfestigkeit Dauerdruckspannungen von 100 bis 250 kPa bezogen auf einen extrapolierten Zeitraum von 50 Jahren und eine Verformung von 2 %.

Bei Schaumglas-Dämmstoffen können je nach Rohdichtebereich und Kurzzeitdruckfestigkeit Dauerdruckspannungen von 120 bis 400 kPa erreicht werden.

Beispielhaft für die Messung und Durchführung einer Prüfung des Zeitstand-Druckverhaltens zeigt Bild 24 die Ergebnisse einer Messung von PUR-Hartschaum sowie der anschließenden Extrapolation nach *Findley* anhand eines logarithmischen Maßstabs der Zeitachse. Beim untersuchten PUR-Material handelte es sich hierbei um Platten aus Polyurethan-Bandschaum mit Alu-

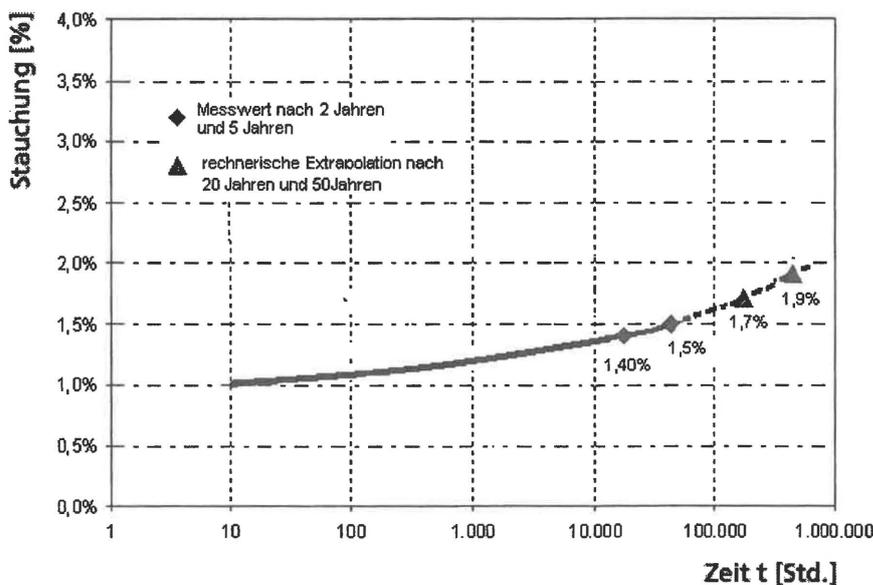


Bild 24. Zeitstand-Druckkurven von PUR-Hartschaum-Dämmplatten nach Klimalagerung 23 °C/50 % r.F. unter Dauerlast, Prüfspannung 40 kPa

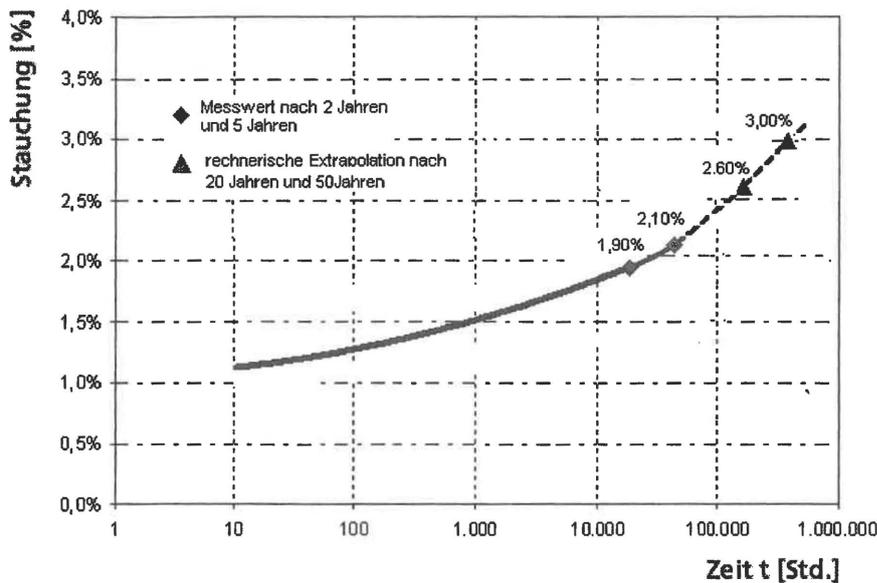


Bild 25. Zeitstand-Druckkurven von PUR-Hartschaum-Dämmplatten nach Klimalagerung 23 °C/50 % r.F. unter Dauerlast, Prüfspannung 200 kPa

miniumfolie kaschiert mit einer Rohdichte von 33 kg/m³ und der Wärmeleitfähigkeitsstufe 025, die in der Praxis als druckbelastete Fußbodendämmung verwendet wird. Die Druckspannung des Produkts wurde vorab mit 285 kPa bestimmt, die Dauerprüflast wurde auf 40 kPa festgelegt [10].

Nach zweijähriger Prüfdauer wurde eine Stauchung von 1,4 % bestimmt, nach fünfjähriger Prüfdauer ergeben sich 1,5 % Stauchung am Probekörper. Eine rechnerische Extrapolation auf 50 Jahre (gängiger Zeitraum für die Bemessung von Bauwerken) nach *Findley* ergibt eine Stauchung von 1,9 %.

Eine weitere Zeitstand-Druckkurve für ein anderes, bautypisches Produkt aus Polyurethan-Hartschaum zeigt Bild 25. Hierbei handelt es sich um einen PUR-Blockschaum mit einer Rohdichte von 80 kg/m³ und der

Wärmeleitfähigkeitsstufe 030, der häufig bei hoch belasteten Hallenböden eingesetzt wird. Wegen der vorgesehenen höheren Beanspruchung wurde ein Produkt mit Druckspannung von 850 kPa ausgesucht und die Prüflast wird mit 200 kPa angesetzt. In diesem Beispiel ist nach einer Anwendung von 50 Jahren eine Stauchung von 3 % zu erwarten. Beispiele für das Verhalten von expandiertem Polystyrol bei einer Prüflast von 50 kPa in Abhängigkeit der Rohdichte zeigt Bild 26. Dieser lineare Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der aufnehmbaren Druckfestigkeit bzw. Druckspannung findet sich ebenso beim Zeitstand-Druckverhalten wieder. Je höher die Rohdichte einer EPS-Platte ist, desto größer ist die Druckspannung und desto geringer ist die auftretende Stauchung bei Langzeitbeanspruchung.

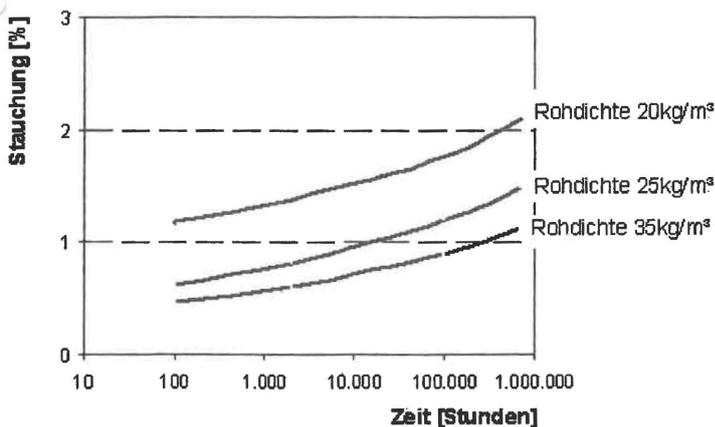


Bild 26. Kriechkurven in Abhängigkeit von der Rohdichte der EPS-Platte [8], Prüflast 50 kPa

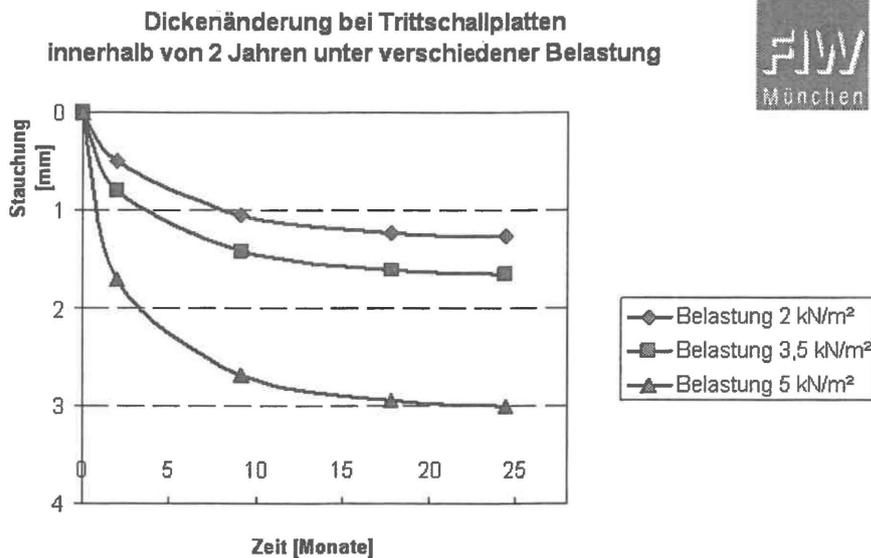


Bild 27. Dickenänderung bei EPS-Trittschallplatten [11]

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung der Langzeit-Kriechversuche mit Extrapolation sind Dämmstoffe unter schwimmenden Estrichen zur Trittschalldämmung. Hierfür werden hauptsächlich Mineralwolle und elastifizierte EPS-Dämmstoffe verwendet.

Bild 27 verdeutlicht den Verlauf der Dickenverminderung von Trittschalldämmplatten in Abhängigkeit von der Zeit für eine Belastung von 2 bis 5 kN/m² an 85 mm dicken EPS-Platten (unbelastet) mit einer Rohdichte von 8,8 kg/m³ über 24 Monate.

Zu beachten ist dabei, dass es sich um einen nicht-logarithmischen Maßstab der Zeitachse handelt. Anfangs führt die Belastung zu einer raschen Stauchung des Probekörpers und mit fortschreitender Dauer der Prüfung wird die Zunahme der Kriechverformung pro Zeiteinheit immer geringer und nähert sich asymptotisch einem Langzeitwert.

3.5 Extrapolation/Berechnungsmodelle

3.5.1 Extrapolation des Kriechverhaltens bei Druckbeanspruchung nach *Findley*

Obwohl bislang noch keine fundierten physikalischen Grundlagen über molekulare Vorgänge und Veränderungen von dauerdruckbeanspruchten Materialien vorliegen, muss aus Kosten- und Kapazitätsgründen bei Zeitstanduntersuchungen der Zeitraum auf maximal 2 bis 5 Jahre beschränkt werden. Daher ist eine Betrachtung mittels einer geeigneten Extrapolationsmethode (wie bereits kurz im vorigen Abschnitt beschrieben) durch ein geeignetes mathematisches Modell nötig. Unter zahlreichen Modellen hat sich besonders der Ansatz nach *Findley* als geeignet erwiesen und findet aufgrund seiner einfachen Verwendung sowie seiner sehr guten Anpassung an die Messwerte zahlreiche Anwendung.

3.5.2 Berechnungsmodelle

WUFI

Das am Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelte EDV-Programm WUFI (Wärme und Feuchte instationär) dient zur realitätsnahen Berechnung des wärme- und feuchteabhängigen Verhaltens von ein- und mehrschichtigen Bauteilen. Hierbei ist neben natürlichen Klimabedingungen auch eine Simulation von Schlagregen, Sonneneinstrahlung, Kapillartransport und sommerliche Kondensation möglich. Das Programm eignet sich somit beispielsweise zur Bestimmung der Austrocknungszeit von Baufeuchte in einer Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem, eine Abschätzung der Tauwassergefahr in Bauteilen, Schlagregenfeuchte in Sichtmauerwerk mit Innendämmung oder zu einer Beurteilung eines nachträglich gedämmten Steildachs bezüglich seines instationären hygrothermischen Verhaltens.

Auch die jahreszeitlichen Verläufe des Feuchtegehalts in Bauteilen können dargestellt werden.

Wie bei allen Rechenmodellen hängen die Ergebnisse sehr stark von den ausgewählten Annahmen und Stoffparametern ab und verlangen einige Erfahrung bei bauphysikalischen Beurteilungen.

Berechnungsmodelle zum Langzeitverhalten der Wärmeleitfähigkeit

Es gibt schon sehr lange Ansätze, das Langzeitverhalten der Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen mit anderen Zellgasen als Luft mit Rechenmodellen zu simulieren. Beispiele sind die grundlegenden Arbeiten von *Ostrogorsky*, *Glicksman* und *Reitz* [12] oder *Isberg* und *Sandberg* [6]. Alle Rechenmodelle hatten anfangs Probleme, da exakte Diffusionskoeffizienten für die einzelnen Zellgase wie z.B. permanente Zellgase

(FCKW, HFCKW, HFKW, Pentan, Isobutan) aber auch CO₂, N₂ und O₂ kaum zu erhalten waren. Erst mit dem politischen Druck, aus der Generation der FCKW- und HFCKW-Zellgase in relativ kurzer Zeit aussteigen zu müssen, wurden vermehrt Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet durchgeführt. Zudem zeigte sich, dass die Schaumkunststoffe hinsichtlich Zellstruktur und Diffusionskoeffizienten nicht homogen waren. Weiterhin werden bestimmte „permanente“ Zellgase in der Schaumstoffmatrix gelöst und später verzögert wieder an die Gasphase der Zellen abgegeben. Eine Methode die Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit vom Ort und unter Berücksichtigung der Löslichkeit zu bestimmen beschrieben *de Nazelle* und *Bart* an der TU Delft [13].

Weitergeführt wurden die Arbeiten zum Alterungsverhalten von Schaumkunststoffen durch *Karrer* vom FIW München. Anhand von mehreren Forschungsvorhaben wurde das Diffusionsverhalten von verschiedenen Zellgasen bei Temperaturen von 23 bis 100 °C untersucht, um die Änderung der Wärmeleitfähigkeit von Polyurethan-Hartschaum (PUR/PIR) und extrudiertem Polystyrol-Hartschaum (XPS) bestimmen zu können. Hierfür werden an einer kleinen Probe die zeitlich veränderlichen Komponenten, wie die Wärmeleitfähigkeit der vorhandenen Zellgase, deren Partialdrücke nach Produktion des Dämmstoffs und den „effektiven Diffusionskoeffizienten D_{eff} “ (ein Maß für die Geschwindigkeit eines stattfindenden Gasaustauschs auf Basis von *de Nazelle*) gemessen. Mit diesen Kennwerten lassen sich Langzeitvorhersagen der Wärmeleitfähigkeit mit verschiedenen Treibmitteln, Deckschichten und Abmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen treffen [17].

Da aber die Dämmstoffeigenschaften sehr stark streuen und von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängen, beschreiben die Rechenmodelle nur den Verlauf der Langzeitwärmeleitfähigkeitskurven, sagen aber nur mit großen Unsicherheiten die exakte Höhe der Wärmeleitfähigkeit nach 25 oder 50 Jahren voraus. Um aber auch die Vielzahl von möglichen Rezepturen, Zellgasmischungen und Verarbeitungsparametern bei der Herstellung abbilden zu können, werden Rechenmodelle und experimentelle Alterungsmethoden weiterhin parallel angewandt werden und sich ergänzen. Bei Parallelmessungen der Wärmeleitfähigkeit nach Schnellalterungsmethoden und Messung der effektiven Diffusionskoeffizienten mit den entsprechenden Berechnungen haben die beiden Methoden gute Übereinstimmung gezeigt.

4 Objektuntersuchung

Nach den zahlreich beschriebenen, unterschiedlichen Möglichkeiten, Dämmstoffe hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens durch Schnellalterungsverfahren künstlich unter Laborbedingungen zu altern und zu beurteilen, soll im Folgenden ein Blick auf die in der Anwendung gealterten Dämmprodukte den Bereich der Mes-

sungen abrunden. Die Idee, verschiedene Dämmstoffe in einer Art „Feldversuch“ in Versuchsaufbauten einzubauen, um durch eine überwachte Montage und eine Aufzeichnung der vorherrschenden Klimadaten einen Einblick in die tatsächliche Alterung eines Dämmstoffs zu erhalten, kann jedoch aufgrund der sehr langen Vorhaltezeit der Messeinrichtungen sowie der langen Gesamtzeit der Prüfung und der damit verbundenen hohen Kosten nur beschränkt durchgeführt werden. So gibt es zwar durchaus Langzeitversuche unter Realbedingungen über 5 Jahre, in denen beispielsweise verschiedene Dachaufbauten, Montagearten oder der Einfluss verschiedener Vliese miteinander verglichen werden, längere kontrollierte Versuchsreihen kommen jedoch nicht im großen Stil zum Einsatz. Außerdem erfolgt an Produkten stets eine kontinuierliche Weiterentwicklung und was heute noch eine bahnbrechende Neuentwicklung ist und auf den Dämmstoffmarkt drängt, ist morgen durch technischen Fortschritt bereits wieder überarbeitet und verbessert. Somit würden die Ergebnisse der meisten Produkte, die einen 15- oder 20-jährigen Test durchlaufen, bei Prüfende seit Jahren bereits vom Markt in der geprüften Variante wieder verschwunden sein.

Daher nutzt man andere Wege, um an Messdaten von eingebauten Produkten in ihrer jeweiligen Anwendung zu gelangen. Durch Abriss und Umbauten von Gebäuden und Anlagen werden in unregelmäßigen Abständen Dämmstoffe ausgebaut, die bisweilen ein Alter von bis zu 20 Jahren oder mehr aufweisen. Diese können dokumentiert, demontiert und bei entsprechender Anwendung diffusionsdicht verpackt werden, um daran im Labor mit den bereits erwähnten Prüfmethode den Feuchtegehalt, die Wärmeleitfähigkeit oder die Druckspannung im feuchten und somit näherungsweise im eingebauten Zustand zu ermitteln. Durch eine Rücktrocknung der Platten kann außerdem auf die ursprünglichen Kennwerte des Dämmprodukts ein direkter Vergleich gezogen werden. Es liegen meist keine „Anfangswerte“ bei Einbau der Platten vor, jedoch kann aufgrund historischer Produktbezeichnungen ein zugehöriger Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit oder eine deklarierte Mindestdruckfestigkeit ermittelt werden.

Eine Beurteilung der Messwerte muss im Hinblick auf die Einbausituation sehr sorgfältig erfolgen. Beispielsweise kann es durch Montagefehler oder eine nicht anwendungsgerechte und daher „falsche“ Beanspruchung des Produkts zu einer Schädigung des Dämmstoffs während seiner Nutzungsphase gekommen sein. Nachträglich sind Montagefehler, falsche Anwendung oder eine zwischenzeitlich nicht anwendungskonforme Belastung, wie beispielsweise eine kurzzeitig zu hohe Last, jedoch oft nur schwer zu ermitteln. Daher können diese nur direkt beim Ausbau der gealterten Dämmstoffe vor Ort durch einen Sachverständigen oft zusammen mit dem Nutzer beurteilt werden.

Trotz dieser Unwägbarkeiten stellt eine solche Art von Versuchen eine wichtige Datenbasis für die Bestätigung

oder Korrektur von Schnellalterungsversuchen dar, jedoch wohl wissend, dass alle real gealterten Produkte stets objektbezogen behandelt werden müssen und nur durch mehrere verschiedene Versuchsreihen und Ergebnisse verallgemeinert werden können.

4.1 Praxisobjekte

Wahrscheinlich gibt es für alle gängigen Dämmstoffe eine Reihe von Praxiserfahrungen, die aber nur zum Teil der Öffentlichkeit zugänglich sind. Besonders viele untersuchte Praxisobjekte, die veröffentlicht wurden, gibt es für XPS-Produkte. Hierbei informieren insbesondere die Hersteller selbst über Langzeituntersuchungen, die mit ihren Produkten an realen Bauprojekten durchgeführt wurden. Nach Jahren der Nutzung erfolgt durch einen Sachverständigen oder Gutachter der Ausbau einzelner Platten aus dem gewählten Objekt. Bild 28 zeigt hierbei exemplarisch die Freilegung sowie den Ausbau einer XPS-Platte aus einem Gründach, das als Umkehrdach ausgeführt wurde.

Unter einem Gründach versteht man ein Dach, das während seiner Nutzung als Grünfläche in Form von beispielsweise Dachgärten genutzt wird und heutzutage als ein Teil des ökologischen Bauens verstanden wird. Eine Dachbegrünung unterscheidet sich in extensiver Nutzung (dünnere Schichtaufbau mit Substrat, in der Regel mit Moosen und Gräsern) und intensiver Nutzung (Aufbau mit Mutterboden, neben Rasen sind auch Büsche bis hin zu flach wurzelnden Bäumen pflanzbar). Gründächer können sowohl als konventionelles Dach mit der Begrünung außerhalb der Dachabdichtung als auch als sogenanntes Umkehrdach ausgeführt werden. Einen schematischen Dachaufbau mit intensiver Begrünung als Umkehrdach findet sich in Bild 29.



Bild 28. Freilegung einer XPS-Dämmstoffplatte in einem Gründach

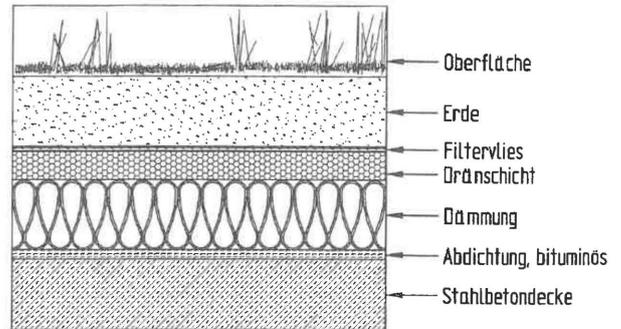


Bild 29. Schematischer Aufbau eines „Gründachs“

Neben Gründächern gibt es auch noch andere Varianten, z. B. das bekieste Umkehrdach. Der Aufbau ist hierbei ähnlich dem des Gründachs; auf eine Begrünung wird anstelle einer aufgetragenen Kiesschicht verzichtet.

4.2 Wasseraufnahme an Praxisobjekten

In beiden Fällen unterliegt der Dämmstoff jedoch trotzdem Witterungsschwankungen wie Temperatur und Feuchte. Daher ist es bezüglich des Langzeitverhaltens eines Dämmstoffs von Interesse, ob bei XPS-Platten eine langzeitige, sich anreichernde Feuchteaufnahme in regenreichen Zeiten stattfindet und ob diese Feuchte über die warmen Sommermonate wieder vollständig oder teilweise abgegeben werden kann. Beispielhaft sollen einige Untersuchungen an Gründächern, die als Umkehrdächer ausgeführt wurden, Ergebnisse der Feuchteaufnahme, der Wärmeleitfähigkeit im eingebauten Zustand und der Druckfestigkeit im eingebauten Zustand dargestellt werden [15].

Im Bild 30 ist erkennbar, dass es bei begrünten Umkehrdächern mit XPS-Dämmstoffplatten über 22 Jahre zu keiner übermäßigen Anreicherung von Feuchte in der Platte kommt. Aus der Grafik kann jedoch auch kein Feuchteverlauf abgelesen werden. Die Proben sind unabhängig voneinander in verschiedenen, europäischen Bauprojekten zum Einsatz gekommen. Daher kann kein Vergleich untereinander vorgenommen werden. Auch ist der höhere Feuchtegehalt nach ca. 10 Jahren kein produkttypisches Verhalten. Die ausgewählten Beispiele stellen mit maximal 4,5% Feuchteaufnahme einen typischen Bereich dar. Diese höhere Feuchteaufnahme wird in einem Zuschlag zum Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit in den Zulassungen berücksichtigt.

Die Messung des Feuchtegehalts sowie die wärmeschutztechnischen und mechanischen Eigenschaften an Platten aus Praxisobjekten kann erfolgen, wenn solche wie in Bild 31 ausgebauten Platten sofort nach dem Ausbau diffusionsdicht verpackt werden und möglichst unmittelbar in einem Labor auf ihren Feuchtegehalt hin untersucht werden. Daran anschließend findet eine Messung der Wärmeleitfähigkeit sowie der Druckfes-

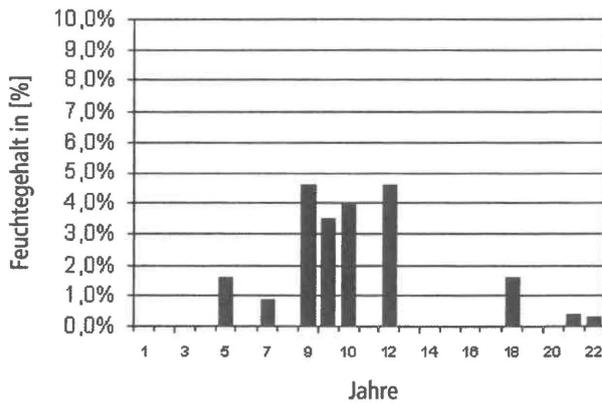


Bild 30. Feuchtigkeitsaufnahme von XPS-Platten in Gründächern

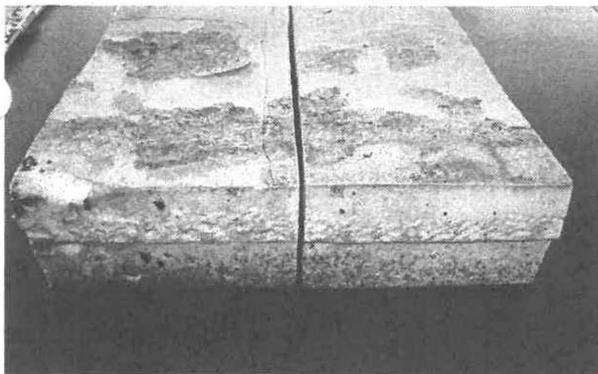
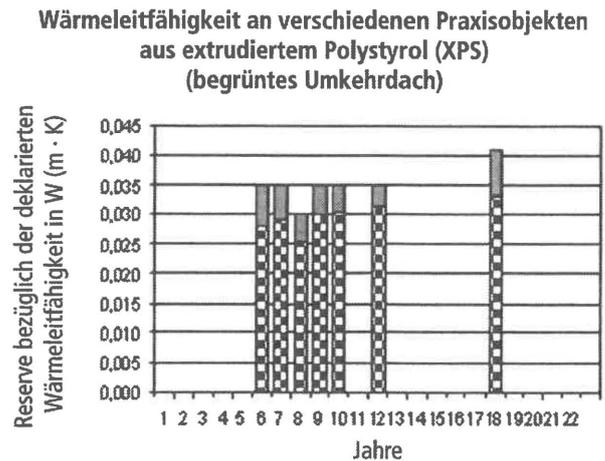


Bild 31. Ausgebaute PUR-Hartschaum-Dämmplatten

tigkeit im feuchten, sprich annähernd im eingebauten Zustand statt. Im Anschluss an die Messungen mit erhöhtem Feuchtegehalt erfolgt eine Trocknung der restlichen ausgebauten Platten und des Probekörpers der Wärmeleitfähigkeit. Nach vollständiger Rücktrocknung werden beide Prüfungen wiederholt, um den Einfluss der Feuchte ermitteln zu können.



- Bemessungswert / Rechenwert
- ▣ Messwerte im Ausbauzustand (feucht)

Bild 32. Sicherheitsreserve bei der Wärmeleitfähigkeit in $[W/(m \cdot K)]$

4.3 Wärmeleitfähigkeit an Praxisobjekten (Gründach als Umkehrdach)

Die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und der Druckfestigkeit im Vergleich zu den deklarierten Bemessungswerten geben Rückschlüsse, ob die festgesetzten Zuschlagswerte ausreichend bemessen sind und die anwendungsbedingten Feuchteaufnahmen sowie Wärmebrücken durch Luftspalte und Abweichungen von den idealen Abmessungen ausreichend berücksichtigen. Bild 32 zeigt einige ausgewählte Messwerte (gepunktete Säule) der Wärmeleitfähigkeit an verschiedenen XPS-Produkten mit Angabe der Nutzungsdauer des jeweiligen Produkts. Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit wurde hierbei im feuchten Zustand gemessen. Der Abstand zum individuellen Bemessungswert des Produkts ist auf die jeweilige Säule oben angefügt. Je größer der graue Bereich ist, desto mehr Sicherheitsreserve weist ein Produkt hinsichtlich seines Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit auf.

Prozentualer Unterschied der Wärmeleitfähigkeit zum Bemessungswert

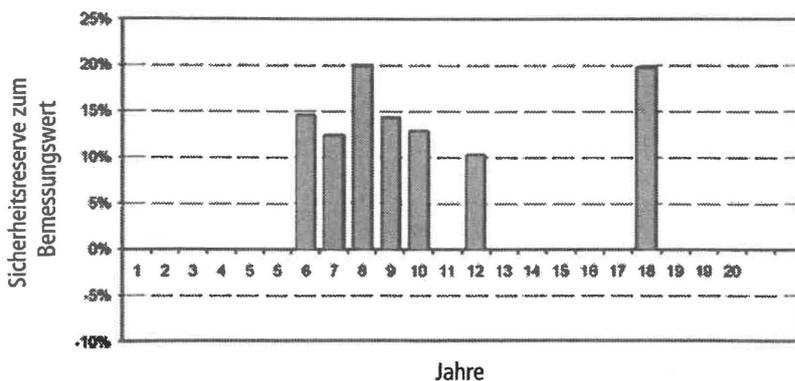


Bild 33. Sicherheitsreserve bei der Wärmeleitfähigkeit in [%]

Hierbei zeigt sich, dass auch die 18 Jahre alte Probe trotz der aufgenommenen Feuchte und einer jahrelangen Nutzung noch eine ausreichende Sicherheitsreserve zu seinem Bemessungswert aufweist. Bild 33 verdeutlicht den zugehörigen prozentualen Unterschied zwischen dem Messwert an der gealterten, feuchten Probe und dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit. Unabhängig vom jeweils deklarierten Wert sind im Durchschnitt 10 bis 20 % Sicherheitsreserve noch vorhanden. Ein deutlicher Anstieg der Wärmeleitfähigkeit ist nicht zu erkennen.

4.4 Druckfestigkeit von XPS-Dämmstoffen in Umkehrdächern (Gründächern)

Wie auch bei den vorangehenden Untersuchungen zeigen auch die Messwerte der Druckspannung/-festigkeit in Bild 34 ein ähnliches Verhalten.

In allen Fällen ist eine deutliche Sicherheitsreserve vorhanden, wie im prozentualen Vergleich (Bild 35) zu sehen ist.

Neben den beispielhaft dargestellten Messwerten an XPS-Dämmstoffen aus Umkehrdächern, die als Gründach ausgeführt wurden, gibt es auch eine ganze Reihe von Untersuchungen an XPS-Dämmstoffen aus bekiessten Umkehrdächern [16, 17], Parkdecks als Umkehrdach [18, 19] und Perimeterdämmungen mit und ohne Einwirkung von drückendem Wasser (Grundwasser) [20]. Veröffentlicht wurden aber auch Praxisuntersuchungen über WDVS-Systeme mit EPS- und Mineralwolle-Dämmstoffen [21].

Für Flachdächer, die unter der Dachabdichtung mit Polyurethan-Hartschaum gedämmt wurden, gibt es eine

Studie, in der bis zu 20 Jahre alte Dämmstoffe untersucht wurden [22].

Auch zur Anwendung von EPS-Dämmstoffen und PUR-Hartschaumplatten in der Perimeterdämmung gibt es Praxisuntersuchungen, die im Großen und Ganzen die in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen festgelegten Zuschläge bestätigten.

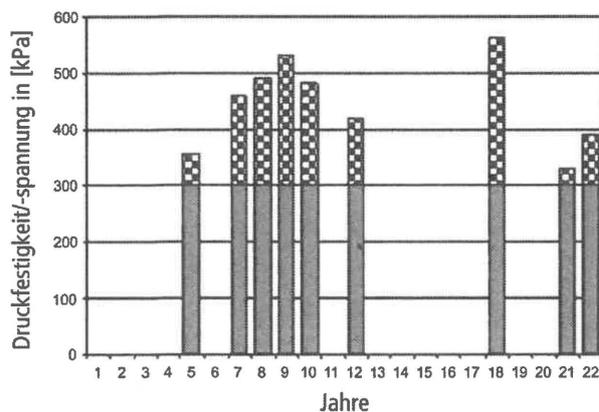
Wenn neue Dämmstoffe auf den Markt kommen, die nicht genormt sind, werden diese meist in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt. In der ersten Geltungsdauer dieser Zulassungen werden vom DIBt in Berlin Untersuchungen an Praxisobjekten gefordert, in denen der Dämmstoff mindestens 3 Jahre eingebaut war. Bei diesen Praxisobjekten wird meist die Dämmschichtdicke, die Wärmeleitfähigkeit im eingebauten Zustand, das Brandverhalten und wo gefordert, die Druckfestigkeit überprüft und gegebenenfalls die Zulassung angepasst.

Auch bei der Anwendung von Schüttdämmstoffen, z. B. im zweischaligen Mauerwerk, wurden Untersuchungen über das Setzungsverhalten von Dämmstoffen durchgeführt.

5 Schlussbetrachtung

Für alle Dämmstoffe liegt eine Fülle von Anfangswerten nach der Herstellung vor. Diese werden im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle und im Rahmen externer Prüfungen durch Überwachungs- und Zertifizierungsstellen fortlaufend geprüft und sind durch verschiedene Veröffentlichungen bekannt und leicht zugänglich.

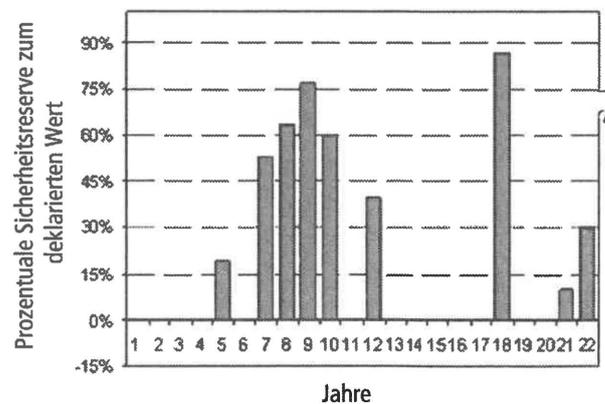
Verhalten bei Druckbeanspruchung an verschiedenen, natürlich gealterten Praxisobjekten aus extrudiertem Polystyrol (XPS)



- Am gealterten Dämmstoff im feuchten Zustand gemessener Wert
- deklarierter Wert

Bild 34. Sicherheitsreserve bezüglich des Druckverhaltens in [kPa]

Prozentualer Unterschied der Druckbeanspruchung bei verschiedenen Praxisobjekten aus extrudiertem Polystyrol (XPS)



- Sicherheitsreserve des gealterten Dämmstoffs im feuchten Zustand

Bild 35. Sicherheitsreserve bezüglich des Druckverhaltens in %

Reifeprozess

Viele Materialien unterliegen aber auch einem bestimmten „Reifeprozess“ bis sie durch Trocknung, Vernetzung, Gasaustausch usw. ihre endgültigen Eigenschaften erreichen. Dieser Reifeprozess ist zwar zumeist dem Hersteller bekannt, aber nicht dem Anwender oder Nutzer. Der „Reifeprozess“ kann bei manchen Materialien wenige Tage dauern, bei einigen Materialien, besonders bei großen Dämmschichten und hoher Rohdichte aber auch bis zu zwei Jahren. Darüber liegen praktisch keine Publikationen vor. Meist vergehen zwischen Herstellprozess und Einbau einige Wochen für Lagerzeit beim Hersteller, Transport und Lagerzeiten beim Händler oder auf der Baustelle, sodass bis zum Einbau der „Reifeprozess“ weitgehend abgeschlossen ist. Es gibt aber Fälle, bei denen Dämmstoffe zu früh ausgeliefert wurden und es zu Luftspalten in der Fassade oder Verformung bei Dachplatten kam. Dies wird oft durch hohe Temperatur im Sommer oder tiefe Temperaturen im Winter begünstigt. In diesen Fällen wären mehr Informationen über das Mindestalter beim Einbau, Lagerbedingungen in Abhängigkeit von der Dämmschichtdicke und der Rohdichte für den Anwender hilfreich.

Einige Stoffe mit anderen Zellgasen als Luft, wie XPS-Hartschaum, PUR-Hartschaum und PF-Hartschaum gehen während des „Reifeprozesses“ durch ein Zellgas-Gesamtdruckminimum, bei dem auch die Druckfestigkeit ein Minimum erreicht. Der Hersteller gewährleistet mit der Konformitätserklärung, dass die deklarierte Druckfestigkeit jederzeit erreicht wird. Nach Durchschreiten des Druckfestigkeitsminimums steigt die Druckfestigkeit wieder an und bleibt dann stabil oder steigt bei einigen Dämmstoffen über längere Zeiträume leicht an (bewegt sich also zur sicheren Seite). Das gilt auch für die Druckspannung unter statischen Lasten, die vom Langzeitkriechverhalten beschrieben wird.

Änderungen während der Anwendung

Während der Anwendung unterliegen Dämmstoffe vielfältigen Belastungen wie Temperaturänderungen, statischen und dynamischen Lasten und in manchen Anwendungen auch einer gewissen Wasseraufnahme.

Einige dieser Belastungen wie Temperatureinflüsse, sich daraus ergebende kleine Luftspalte, Änderungen der Wärmeleitfähigkeit durch Feuchteaufnahme aufgrund der Luftfeuchte sowie geringfügige Dickenänderungen aufgrund von Setzungen sind in den Zuschlägen zur Wärmeleitfähigkeit nach DIN 4108-4 und den deutschen Zulassungen (meist 5%) abgedeckt.

Dickenverminderung aufgrund des Langzeitkriechens durch statische Lasten sollten auf 2 bis 3% begrenzt bleiben, da sonst der Wärmeschutz beeinträchtigt wird und durch weitere Zuschläge berücksichtigt werden müsste. Größere Dickenverminderungen können aber auch bei Anschlüssen von Versorgungsleitungen oder Estrichen oder bei Dachabdichtungen Probleme bereiten und Bauschäden hervorrufen. Bei Dämmstoffen, die außerhalb der Bauwerksabdichtung angewendet werden

und damit der Bodenfeuchte, Regenwasser oder drückendem Wasser ausgesetzt werden (etwa bei der Perimeterdämmung oder im Umkehrdach), werden die höheren Werte der Wasseraufnahme durch Zuschläge im Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit oder durch ΔU -Werte berücksichtigt. Zum Nachweis der langzeitigen Wasseraufnahme dieser Dämmstoffe (hauptsächlich XPS, aber auch EPS und PUR) wurden deshalb Praxisobjekte untersucht. Gleichzeitig wurden die Druckfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand untersucht. In fast allen Fällen, in denen der Dämmstoff den Spezifikationen des Herstellers entsprach und richtig angewendet wurde, konnten die Zuschläge und die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit bestätigt werden. Durch die Einführung der $1\text{-mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ -Stufen aufgrund der europäischen Produktnormen, werden aber die Abstände zwischen den Wärmeleitfähigkeitsstufen kleiner und damit die Gesamtsicherheit zwischen Messwert und Bemessungswert. Deshalb werden auch hier die Zuschläge überdacht und den Praxiserfahrungen und den feineren Abstufungen angepasst.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass heute viele Informationen über Dämmstoffe im frischen Zustand vorliegen und durch Extrapolationen und Rechenmodelle eine Abschätzung der Bemessungswerte möglich ist. Trotzdem ist durch die fortlaufende Weiterentwicklung zu niedrigeren Wärmeleitfähigkeitsstufen und größeren Dämmschichtdicken bei immer feineren Abstufungen ein großer Informationsbedarf vorhanden, die Praxisbewährung nachzuweisen und vor allem die gewonnenen Erfahrungen an die Anwender, Planer und Nutzer weiterzugeben.

6 Literatur

- [1] EUROPEAN COMMISSION: Enterprise and Industry Directorate General (Revision December 2004). Guidance paper F (2009). <http://ec.europa.eu/enterprise/construction/internal/guidpap/f.htm>.
- [2] Bundesministerium für Verkehr-, Bau und Wohnungswesen: Leitfaden nachhaltiges Bauen (2001), Anlage 6, S. 6.16, Pkt. 34. http://www.bmvbs.de/Anlage/original_8183/Leitfaden-Nachhaltiges-Bauen.pdf.
- [3] Zehendner, H.: Polystyrol-Hartschaum (o. J.) Materialien für den Wärme- und Feuchteschutz, Quelle: FIW München.
- [4] Albrecht, W.: Cell-gas Composition – An Important Factor in the Evaluation of Long-term Thermal Conductivity in Closed-cell Foamed Plastics, Cellular Polymers, Vol. 19, No. 5 (2000).
- [5] Eumeps Construction European Manufacturers of EPS: EPS White Book – EUMEPS Background Information on Standardisation of EPS, Eumeps Construction (2003).
- [6] Isberg, J.: Thermal Insulation – Conditioning of rigid cellular plastics containing a gas with lower thermal con-

ductivity than air prior to determination of thermal resistance and related properties, Nordtest project No. 603-86, No. 698, Publ. 88:3, Chalmers University of Technology, Division of Building Technology, Göteborg, Dez. 1988.

[7] Albrecht, W.; Karrer, C.: Ermittlung von wärmeschutztechnischen Bemessungswerten von geschlossenzelligen Schaumkunststoffen durch zeitraffende, thermische Alterungsmethoden, AIF-Forschungsvorhaben 12883 (2003).

[8] Krollmann, N.: Verhalten von EPS-Hartschaumstoffen unter langzeitiger Druckbeanspruchung, Bauphysik 28 (2006), Heft 3.

[9] Findley, W. N.: Creep Characteristics of Plastics. Symposium on Plastics. Am. Soc. Testing Mats, 1944.

[10] IVPU – Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e. V.: Aus Forschung und Technik, 2002, Zeitstand-Druckverhalten, Nr. 2, IVPU (2002).

[11] Achtziger, J.: Polystyrol-Hartschaum als Dämmstoff im Hochbau – 25 Jahre Forschung im Dienst der Qualitätssicherung. Veröffentlichung der Güteschutzgemeinschaft Hartschaum GSH (1987).

[12] Ostrogorsky, A. G.; Glicksman, L. R.; Reitz, D. W.: Aging for polyurethane foams. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, No. 8, pp.1169–1176 (1986).

[13] du Cauze de Nazelle, G. M. R.; Bart, G. C. J.; Dammers, A. J.: Thermal Conductivity Ageing of rigid Polyurethane foams. Delft University of Technology, Seminar 25. October 1990.

[14] Karrer, C.: Wasseraufnahme von Perimeterdämmung aus EPS – Vergleich der Prüfverfahren nach Zulassung bis 2003 und EN 13163. FIW München (2007).

[15] DOW Deutschland Inc.: Es grünt so grün ... auf den Umkehrdächern – Ein Erfahrungsbericht von DOW (o. J.). <http://building.dow.com/europe/at/tech/lit/umk.htm>.

[16] DOW Deutschland Anlagengesellschaft mbH: 32 Jahre Umkehrdach... und hier ist die gutachterliche Bewertung (2005). <http://building.dow.com/europe/at/tech/lit/umk.htm>

[17] Boy, E.; Merkel, H.: Vorteile durch „verkehrte Bauweise“ (1997) Sonderdruck Fachzeitschrift DDH 7/97.

[18] Zimmermann, G.: Gutachten über das Langzeitverhalten extrudierter Hartschaumplatten Floormate 500 in Umkehr-Parkdächern, Oktober 1997, im Auftrag der DOW Deutschland Inc.

[19] Oswald, R.: Langzeitverhalten von Parkdecks mit Umkehrdach-Wärmedämmung – Floormate. Gutachten Juni 1998, im Auftrag der DOW Deutschland Inc.

[20] Zimmermann, G.: Zum Langzeitverhalten von Perimeterdämmungen. Deutsches Architektenblatt, Heft 6/95.

[21] Künzel, H.; Zirkelbach, D.: Feuchteverhalten von Holzständerkonstruktionen mit WDVS – Sind Erfahrungen aus amerikanischen Schadensfällen auf Europa übertragbar? wksb 58/2007 (2007). http://www.ibp.fhg.de/literatur/fachz/WKSB58_WDVS_auf_Holzkonstruktionen.pdf.

[22] Götze, H.: Untersuchung des Langzeitverhaltens von Polyurethan-Hartschaum im Flachdach, Gutachten Juni 1988, im Auftrag des IVPU Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e. V.

Sonderdruck – Nicht im Handel

© 2010 Ernst & Sohn

Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm, oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprint, microfilm, or any other means — nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Satz: Dörr & Schiller, Stuttgart

Druck und Bindung: Scheel Print-Medien GmbH, Waiblingen

Printed in Germany