

Matthias Zöller, Ralf Spilker, Géraldine Liebert
Martin Oswald, Christoph Sprengard, Sebastian Tremel
Ramona Holland, Chiara Cucchi

Langzeitverhalten feuchter Dämmstoffe auf Flachdächern — Praxiserfahrungen und Wärmestrommessungen

F 3075

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0183-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

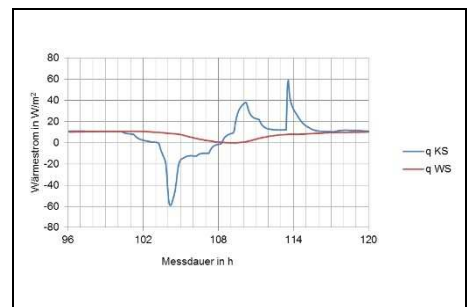
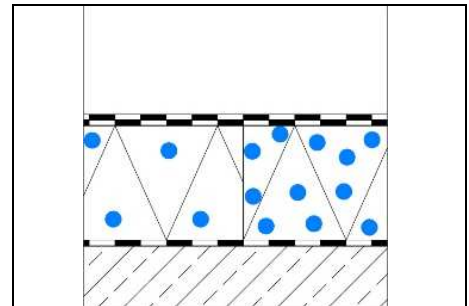
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Langzeitverhalten feuchter Dämmstoffe auf Flachdächern – Praxiserfahrungen und Wärmestrommessungen Abschlussbericht



Langzeitverhalten feuchter Dämmstoffe auf Flachdächern –**Praxiserfahrungen und Wärmestrommessungen**

Abschlussbericht

Gefördert mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn

Aktenzeichen: SWD – 10.08.18.7-15.27

Forschungspartner 1:**AIBAU**

Aachener Institut für Bauschadensforschung
und angewandte Bauphysik, gGmbH, Aachen

Projektleiter:

Prof. Dipl.-Ing. Matthias Zöller

Bearbeiter/Autoren:

Dipl.-Ing. Ralf Spilker
Dipl.-Ing. Géraldine Liebert
Prof. Dipl.-Ing. Matthias Zöller
Dipl.-Ing. Martin Oswald, M.Eng.

Forschungspartner 2:**FIW**

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., München

Projektleiter:

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard

Bearbeiter/Autoren:

Dr.-Ing. Sebastian Tremel
Ramona Holland, B.Eng.
Chiara Cucchi, M.Sc.

Bearbeitung rechtlicher Aspekte:

Rechtsanwalt Thomas Ziegler
Prof. Dipl.-Ing. Matthias Zöller

Aachen/Gräfelting, Mai 2018

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Inhalt

1.	Einleitung.....	7
2.	Dank	7
3.	Frühere Untersuchungen	8
3.1	Untersuchungen und Empfehlungen in den 1980er Jahren.....	8
3.2	EPS-Zusatzdämmung über feuchter Dämmung [AIBAU/FIW 2003].....	8
3.3	Feuchte Mineralwollendämmung [AIBAU/FIW 2012].....	9
3.4	Zusammenstellung von Feuchtegehalten in Praxisobjekten und abgeleitete Zielfeuchtegehalte	10
3.5	Einbaufeuchtegehalt und Befeuchtung	12
3.6	Zielfeuchtegehalte für die Laboruntersuchungen	13
4.	Fallbeispiele	14
4.1	Beispiel 1: Flachdach über einer Gewerbeeinheit.....	14
4.2	Beispiel 2: Terrassendächer	16
4.3	Beispiel 3: Dachfläche über Verbrauchermarkt nach Hagelschaden	17
4.4	Beispiel 4: Dachterrasse eines Wohngebäudes.....	18
4.5	Beispiel 5: Gewährleistungsfall Schulgebäude	18
4.6	Beispiel 6: Dachflächen eines Schulgebäudes (Schaumglas/EPS)	20
4.6.1	Dämmung aus Schaumglas	21
4.6.2	EPS - Zusatzdämmung	24
4.7	Beispiel 7: Befahrbare Dachfläche über Tiefgarage (Schaumglas)	25
4.8	Beispiel 8: Dachfläche über Verwaltungstrakt mit Mineralwolle-Dämmung	26
5.	Umfrage	27
5.1	Ergebnisse der Sachverständigenumfrage (AIBAU).....	27
5.1.1	Häufigkeit im Dachaufbau belassener, feuchter Dämmstoffe	28
5.1.2	Angaben zur Art der im Dachaufbau belassenen Dämmstoffe	28
5.1.3	Schadenshäufigkeit und -ursachen	29
5.2	Erfahrungsberichte.....	30
5.2.1	Fall 1: Hochhausdach.....	30
5.2.2	Fall 2: Gewerbehalle 80er Jahre	30
5.2.3	Fall 3: Wassereintrag während der Baumaßnahme	30
5.2.4	Fall 4: Leckagen durch Überdeckung der Dachhaut.....	31
5.2.5	Fall 5: Beibehalten der Dämmung nach handwerklichen Kriterien	31
5.2.6	Fall 6: Perforierung der alten Dachhaut	31
5.2.7	Fall 7: Technische Trocknung	32
5.2.8	Fall 8: Dachfläche mit Haustechnik-Aufbauten	32
5.2.9	Fall 9: Rissbildungen über Dämmplattenstößen	32
5.2.10	Fall 10: Trocknung durch offene Lagerung	33
5.2.11	Fall 11: Austrocknung durch Perforation	33
5.2.12	Fall 12: Austrocknung durch Lüfter in Kehlen	34
5.2.13	Fall 13: Beibehaltung feuchter Dämmstoffe	34
5.3	Zusammenfassung der Umfrageergebnisse	34
6.	Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit	35
6.1	Zusammenstellung von Messwerten 1984 [Achtziger/Cammerer 1984].....	35
6.2	Messverfahren mit instationären Randbedingungen.....	35
6.3	Andere Messverfahren.....	36
6.4	Ergebnisse von Wärmeleitfähigkeitsmessungen 1984.....	36

6.5	Rechnerische Ermittlung der Wärmeleitfähigkeitsänderungen	38
6.6	Validierungen für XPS-Dämmplatten [IBP/FIW 2014]	38
7.	Laboruntersuchungen	39
7.1	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe unter stationären und instationären Temperaturbedingungen	39
7.1.1	Der Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit	40
7.1.2	Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	42
7.1.3	Zur Auswertung der Messdaten bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an feuchten Dämmstoffen unter stationären Bedingungen	43
7.1.4	Zur Auswertung der Messdaten bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an feuchten Dämmstoffen unter instationären Bedingungen	44
7.2	Material	45
7.2.1	Material für die Untersuchung an neuen Dämmstoffproben	45
7.2.2	Material für die Untersuchung an Entnahmeprobe	46
7.3	Methoden	46
7.3.1	Probenvorbereitung	47
7.3.2	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären Bedingungen	48
7.3.3	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter instationären Bedingungen	49
7.4	Ergebnisse	51
7.4.1	Stationäre Messungen	51
7.4.2	Instationäre Messungen	58
7.5	Diskussion	67
8.	Verhalten typischer Dämmstoffe	73
8.1	Prüfverfahren und Anforderungen	73
8.1.1	Wasseraufnahme durch kurzzeitiges Eintauchen nach [DIN EN 1609:2103-05]	73
8.1.2	Wasseraufnahme durch langfristiges Eintauchen nach [DIN EN 12087:2013-06]	73
8.1.3	Wasseraufnahme durch Diffusion nach [DIN EN 12088:2103-06]	74
8.1.4	Anforderungen an die Begrenzung der Wasseraufnahme in Produktnormen	74
8.1.5	Anforderungen nach [DIN 4108-10:2015-12]	74
8.2	EPS – Expandierter Polystyrol-Hartschaum	75
8.2.1	Kurzfristige Wasseraufnahme	75
8.2.2	Langfristige Wasseraufnahme im eingebauten Zustand	75
8.2.3	Untersuchungen des FIW zur Feuchteaufnahme von EPS	76
8.2.4	Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit	77
8.4	XPS – Extrudierter Polystyrol-Hartschaum	79
8.4.1	Wasseraufnahme nach Norm	79
8.4.2	Veränderung der Wärmeleitfähigkeit	79
8.5	PUR – Polyurethan-Hartschaum	81
8.5.1	Wasseraufnahme nach Norm	81
8.5.2	Wasseraufnahme bei eingebauten Dämmstoffen	81
8.5.3	Veränderung der Wärmeleitfähigkeit	81
8.6	MW – Mineralwolle hoher Rohdichte	83
8.6.1	Untersuchungen des FIW zur Feuchteaufnahme von Mineralwolle	83
8.6.2	Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit	84
8.6.3	Strukturveränderungen bei Mineralwolle	86
8.7	MW – Mineralwolle geringer Rohdichte	86
8.8	SG – Schaumglas	87
9.	Rechtliche Aspekte	88
9.1	Neubau	89
9.2	Schadensfall innerhalb der Gewährleistungsfrist	91

9.3	Instandhaltung der Abdichtungsschicht nach Ablauf der Gewährleistungsfrist.....	91
9.4	Maßnahmen zur Erhöhung des Wärmeschutzes	94
10.	Praxisempfehlungen.....	95
10.1	Feststellung und Dokumentation des Feuchtegehalts	95
10.2	Lasterhöhung bei feuchten Dämmschichten	97
10.3	Bestandsaufnahme der eingebauten Dampfsperre.....	98
10.4	Vorgaben der EnEV	98
10.5	Absaugen von Wasser an Tiefpunkten	98
10.6	Austrocknung	98
	10.6.1 Dachabdichtungsbahnen mit geringem Diffusionswiderstand	98
	10.6.2 Austrocknung durch Lüfter	101
	10.6.3 Technische Trocknung durch Konvektion	102
10.7	Verklebte Dachaufbauten.....	102
10.8	Mechanische Befestigung	103
10.9	Perforation alter Dachhaut vor Überdämmung.....	103
10.10	Zusatzdämmung und -Abdichtung	103
10.11	Entwässerung	104
10.12	Weitere Entscheidungskriterien	106
11.	Zusammenfassung	107
12.	Ausblick.....	109
12.1	Weiterer Untersuchungsbedarf zu bauphysikalischen Kennwerten	109
12.2	Anreize zum Erhalt feuchter Dämmstoffe.....	109
12.3	Herstellerangaben.....	109
12.4	Nachhaltigkeit und Energieeinsparung.....	109
13.	Literaturverzeichnis.....	110
13.1	Fachbücher, Fachaufsätze und sonstige Veröffentlichungen	110
13.2	Normen, Richtlinien und Verordnungen	113

1. Einleitung

Bei Modernisierungsmaßnahmen im Bestand stellt sich häufig die Frage, inwieweit der Aufbau von Flachdachflächen erhalten werden kann oder zurückgebaut und gegebenenfalls ausgetauscht werden sollte. Ein Kriterium dabei ist der Zustand des Dämmstoffs. Feuchtigkeit ist häufig Anlass für Abriss und Entsorgung. Dabei sind eine überwiegende Anzahl der heute verwendeten Dämmstoffe auch über lange Zeiträume hinweg feuchtebeständig. Dies zeigen verschiedene Untersuchungen, die unter anderem auch von den Verfassern des vorliegenden Forschungsberichts durchgeführt wurden.

Die Druckstabilität (bzw. Druckspannung bei Prüfung mit festgelegter Stauchung) wird bei vielen Dämmstoffen nicht erheblich eingeschränkt. Der Wärmeschutz wird zwar durch Feuchtigkeit vermindert, er bleibt aber häufig noch immer so gut, dass er dem eines zwar dünneren, aber neuen, trockenen Dämmstoffs entspricht. Die durch die Feuchte veränderten Wärmeleitfähigkeiten können anhand von Grafiken oder rechnerisch durch Feuchtezuschläge ermittelt werden, die Ergebnisse von Wärmeleitfähigkeitsmessungen feuchter Dämmstoffe sind.

Zwar gibt es eine Reihe von Veröffentlichungen zur feuchtigkeitsbedingten Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Diese beschränken sich zumeist auf bestimmte Konstruktionsweisen – z. B. Zusatzdämmschicht über belassenem Dachaufbau – und auf einzelne Materialien, wie Hartschaumkunststoffe oder Mineralwolle. Auch beziehen sich Messwerte von Wärmeleitfähigkeiten feuchter Dämmschichten meistens auf ältere Produkte, die heute nicht mehr in gleichen Spezifikationen erhältlich sind.

Der vorliegende Forschungsbericht informiert über die aktuellen Erfahrungen feuchter Dämmschichten und über den allgemeinen Zustand von Flachdächern, bei denen feuchte Dämmschichten nicht ausgetauscht wurden. Dazu wurden neuere Veröffentlichungen ausgewertet. Die Wärmeleitfähigkeit von aus Dächern entnommenen sowie unter Laborbedingungen befeuchteten Dämmstoffen aus heutiger Produktion sind vom Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., München (FIW) unter normgemäßen stationären und zusätzlich unter instationären Randbedingungen festgestellt worden. Diese bestätigen und erweitern die bisher vorhandene Datengrundlage aus den 1980er Jahren.

Im folgenden Text werden für die untersuchten Dämmstoffe die gebräuchlichen Abkürzungen verwendet:

- EPS (expandiertes Polystyrol)
- XPS (extrudiertes Polystyrol)
- PUR (Polyurethan) bzw. PIR (Polyisocyanurat)
- MW (Mineralwolle) bzw. GW (Glaswolle) und SW (Steinwolle)
- SG (Schaumglas)

Der Bericht wurde in Zusammenarbeit zwischen dem AIBAU und dem FIW erarbeitet. Das FIW führte die Laboruntersuchungen durch und bearbeitete Kapitel 7 und die Kapitel über die Untersuchungen zur Feuchteaufnahme bei EPS und MW in Kapitel 8. Das AIBAU hat die Umfrage durchgeführt, die Praxisfälle ausgewertet und die übrigen Kapitel bearbeitet. Zusammenfassung und Ausblick wurden zusammen verfasst.

2. Dank

Für die fachliche Beratung sei insbesondere den Mitgliedern der begleitenden Arbeitsgruppe

- Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartwig Künzel, IBP Holzkirchen
- Herrn Dr.-Ing. Torsten Richter, IFBP Hannover
- Herrn Ludwig Held, Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks, Köln

gedankt.

Die konstruktiven Vorschläge und die engagierten Diskussionen waren uns eine wertvolle Hilfe bei der Erarbeitung des Berichts.

Forschungsarbeiten zu Praxiserfahrungen im Baubereich sind nicht möglich ohne die Mithilfe vieler Kollegen, die in ihrer Sachverständigentätigkeit entsprechende Erfahrungen dokumentieren und bewerten. Wir danken allen, die an der Befragung teilgenommen sowie uns geantwortet haben. Insbesondere sind wir denjenigen dankbar, die uns mit Informationen über Objekte weitergeholfen, in Gesprächen ihre Einschätzungen mitteilten und/oder durch Zusendung von Unterlagen aus ihrem Tätigkeitsbereich Informationen zur Verfügung gestellt haben.

Insbesondere möchten wir folgenden Personen für Ihre aktive Unterstützung danken

- Frau Dilanas, Bretten
- Herrn Fischer, Winnenden
- Herrn Gollwitzer, Neubiberg
- Herrn Haase, Bremen
- Herrn Hoffstadt, Overath
- Herrn Huesgen, Konstanz
- Herrn Kleis, Trier
- Herrn Knapp, Tettnang
- Herrn Könsen, Bremen
- Herrn Krafft, Münster
- Herrn Kümmel, Overath
- Herrn Möller, Mönchengladbach
- Herrn Nowitzki, Leipzig
- Herrn Saabel, Bad Driburg
- Herrn Schneider, Metten
- Herrn Schröder, Berlin
- Herrn Seidel, Augsburg
- Herrn Slomke, Dresden
- Herrn Vogelsang, Ruppertsberg
- Herrn Weise, Weimar

3. Frühere Untersuchungen

Inwieweit labortechnische Erkenntnisse zu Feuchteinflüssen bei Dämmstoffen praktisch relevant sind, wurde in Untersuchungen beschrieben, die im Folgenden zusammengefasst werden.

3.1 Untersuchungen und Empfehlungen in den 1980er Jahren

Schon in den 1960er Jahren [Cammerer/Achtziger 1964] wurden Erkenntnisse veröffentlicht, dass der Wärmeschutz bei Dämmstoffen durch Feuchtigkeit oft nur wenig eingeschränkt ist. Im Kommentar zur DIN 4108 haben [Cammerer/Neumann 1983] Zuschlagswerte auf die Wärmeleitfähigkeit benannt. Messergebnisse aus verschiedenen Untersuchungen wurden in [Achtziger/Cammerer 1984] als Grafiken dargestellt (s. Kap. 6.4). Auf diesen Bericht wird in Kap. 6.1 näher eingegangen. In [Götze/Frank/Hardell/Mahel/Steiner 1992] sind die Feuchtegrenzen benannt, für die Zuschlagswerte gelten.

Empfehlungen zum Erhalt feuchter Dämmschichten sind daher schon in den 1980er Jahren formuliert worden, z. B. in [Schild/Rogier/Lamers/Oswald/Schnapauff 1984], [Achtziger/Hoffmann 1990], [Dahmen 1990].

Untersuchungen zu instandgesetzten Flachdächern mit belassenen feuchten Dämmschichten sind in folgend genannten Berichten und Studien veröffentlicht worden.

3.2 EPS-Zusatzdämmung über feuchter Dämmung [AIBAU/FIW 2003]

Im Rahmen des Forschungsberichts „*Flachdachsanierung über durchfeuchteter Dämmschicht*“ [AIBAU/FIW 2003] sind von den Autoren auf Anregung der „*Forschungsvereinigung Styropor e.V. und im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e.V.*“ (AIF) insgesamt 34 Dachflächen dokumentiert worden, bei denen über feuchten Dämmschichten eine Zusatzdämmung aus expandiertem Polystyrol (EPS) und eine Zusatzabdichtung eingebaut wurden. Die verbliebenen Dämmschichten wiesen unterschiedlich hohe Durchfeuchtungsgrade auf.

Durch Probeöffnungen mit Entnahme der Dämmschichten – überwiegend aus Schaumkunststoffen – wurde der jeweilige Durchfeuchtungsgrad der alten und der neuen Dämmschichten ermittelt. Nur bei wenigen Dächern traten nach der Modernisierung durch die Zusatzdämmung und -abdichtung erneut Durchfeuchtungsschäden oder sonstige Funktionseinschränkungen auf. Die modernisierten Dachaufbauschichten waren zum Untersuchungszeitpunkt 5 bis 10 Jahre alt. Die Gebäude mit den ursprünglichen feuchten Dämmschichten hatten teilweise eine Standzeit von 30 Jahren. Zum Untersuchungszeitpunkt waren die festgestellten Zustände nicht problembehaftet.

Zwar waren bei vor der Modernisierung stark durchfeuchteten Dämmschichten zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch immer stark feucht. Teilweise trat im Dämmstoff vorhandenes Wasser durch Daumendruck aus, insbesondere bei Dämmstoffen aus Polyurethan. Druckspannungsmessungen im Labor zeigten aber, dass sich die ursprünglichen Festigkeiten der unterhalb der zusätzlichen Dachaufbauten belassenen Schaumkunststoffdämmungen nicht nennenswert geändert hatten.

Teilweise wiesen allerdings auch die zusätzlichen, neuen Dämmschichten erhöhte Feuchtegehalte auf. Diese waren nicht (nur) auf eventuelle Leckstellen in der neuen Abdichtung oder auf eingeschlossene Baufeuchte zurückzuführen, sondern (auch) auf Wasserdampfdiffusion aus alter in die neue Dämmschichten in Fällen, in denen die alte Abdichtung großflächig perforiert oder in Teilbereichen ganz entfernt worden war.

Die Wärmedurchlasswiderstände der feuchten Dämmschichten wurden gemittelt und anhand der Zusammenstellung von Messwerten in [Achtziger/Cammerer 1984] abgeschätzt, so dass der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient des modernisierten Daches bestimmt werden konnte.

Aus den Erfahrungen mit diesen Modernisierungen wurden im Bericht [AIBAU/FIW 2003] folgende Schlussfolgerungen und Empfehlungen abgeleitet:

- Eine Austrocknung von feuchten Dämmschichten findet im Flachdach in der Regel nicht statt.
- Feuchte Dämmschichten weisen einen verminderten, aber immer noch wirksamen Wärmeschutz auf.
- Flüssiges Wasser soll entfernt werden.
- Die Wirksamkeit von die Abdichtung durchdringenden Lüftern, die durch eine Luftverbindung zwischen Außenluft und Dämmschicht deren Austrocknung bewirken soll, beschränkt sich auf die unmittelbare Umgebung der Lüfter. Teilweise drang aber auch Wasser von außen durch die Lüfter in den Dachaufbau ein.
- Eine Perforation der Dachhaut ist in der Regel nicht und nur in Ausnahmefällen sinnvoll.
- Alte Dämmstoffe aus Schaumkunststoffen sollten erhalten bleiben, wenn nicht ein grundsätzlich anderer Dachaufbau gewählt wird, um z. B. eine Wasserunterläufigkeit auszuschließen.
- Der Feuchtegehalt belassener Dämmschichten sollte dokumentiert werden.

3.3 Feuchte Mineralwolledämmung [AIBAU/FIW 2012]

Der Forschungsbericht [AIBAU/FIW 2012] ging der Frage nach, inwieweit der Feuchtegehalt in Mineralwolledämmschichten in Flachdächern deren Druckfestigkeit beeinträchtigt. Die Studie wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn sowie der Deutschen Rockwool GmbH & Co. OHG, Gladbeck, unterstützt.

Der Studie lagen Erfahrungsberichte über insgesamt 566 Objekte zugrunde, die von den Sachverständigen untersucht worden waren. Die überwiegende Zahl der Sachverständigen empfahl bei einem Feuchteeintritt den Austausch der Dämmung. Nur bei geringen Feuchtegehalten oder der Aussicht auf einen Trocknungserfolg wurde die Dämmung belassen.

Insbesondere wurde auf die Beobachtung deutlicher Festigkeitsverluste hingewiesen. Ein direkter Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und Druckverlust konnte bislang jedoch nicht hergestellt werden.

Im Rahmen des Forschungsberichts wurden daher vom FIW Laboruntersuchungen zur Druckstabilität gemacht. An einem Dämmstofftyp wurde die Druckspannung bei 10 % Stauchung bei verschiedenen Feuchtegehalten gemessen. Als Ergebnis zeigte sich, dass die Druckstabilität zwar mit zunehmendem Feuchtegehalt abnimmt. Das größte Maß der Absenkung stellt sich jedoch bereits bei der Lagerung ein (hier: im Raumklima) und Feuchtegehalten bis zu etwa 5 Masse-% (bzw. 0,75 Vol.-% bei einer Rohdichte von 150 kg/m³). Bei höheren Feuchtegehalten bis zu 50 Masse-% (bzw. 7,5 Vol.-% bei gleicher Rohdichte) vermindert sich die Druckstabilität darüber hinaus nur noch geringfügig.

Dagegen sinkt die Druckspannung bei 10 % Stauchung deutlich, wenn Proben häufigen Druckwechselbelastungen ausgesetzt werden. Im Labor ließ sich das bei mehrmaliger Druckspannungsprüfung nachweisen; in der Praxis ist dies an Dachbereichen festzustellen, die häufiger begangen werden – z. B. an Leiteranlegestellen oder Dachausstiegen.

Um bei den Labormessungen die Feuchteverteilung im Dämmstoff realitätsnah herzustellen, wurden die Proben vor der Druckspannungsprüfung in Kunststoffbeutel verpackt, mit unterschiedlichen Wassermengen befüllt und in einem Wärmestrommessplattengerät jeweils 10 Tage mit instationären Außentemperaturen beaufschlagt. Zur Festlegung des Temperaturverlaufs auf der Kaltseite wurden langjährige Feuchteaufzeichnungen analysiert und ein jeweils typischer Verlauf für den Tagesgang im Winter und im Sommer ausgesucht.

Die Vorkonditionierung für die Druckspannungsprüfung wurde vergleichbar für die Probevorbereitung für die Messung der Wärmeströme angewendet.

3.4 Zusammenstellung von Feuchtegehalten in Praxisobjekten und abgeleitete Zielfeuchtegehalte

Anlässlich einer vorgesehenen Freilanduntersuchung mit Befeuchtung von Dämmstoffen wurden vom AIBAU Feuchtegehalte von 20 Objekten zusammengestellt, die sowohl im Rahmen der o. g. Untersuchung [AIBAU/FIW 2003] als auch bei Begutachtungen von Schadensfällen ermittelt wurden.

Bei Mineralwolle-Dämmstoffen wurde dabei differenziert nach Glaswolle (GW), die meist als Zwischensparrendämmung bei Holzdachkonstruktionen eingebaut war, und relativ druckstabiler Steinwolle (SW), die in der Regel als Aufdachdämmung bei Stahlbeton- oder Trapezblechdächern verwendet wird.

Die in Tabelle 1 und Tabelle 2 angegebenen Feuchtegehalte beziehen sich jeweils auf die gesamte Dämmstoffdicke. Je nach Klimarandbedingungen zum Zeitpunkt der Entnahme am Bauwerk konzentriert sich die Feuchte im Dämmstoff auf der raumabgewandten Seite (bei niedrigen Außentemperaturen) oder auf der raumzugewandten Seite (bei hohen Außentemperaturen). Die Feuchtigkeitsverteilung innerhalb der Dämmstoffschichten ist daher regelmäßig ungleichmäßig.

In Tabelle 1 sind die jeweils maximalen, gemessenen Feuchtegehalte an 20 verschiedenen Objekten aufgelistet und die verschiedenen möglichen Bezugsgrößen nebeneinandergestellt. Außerdem sind die Dämmstoffdicken und das Alter der Dämmstoffe bzw. die angenommene Einwirkungsdauer von Feuchtigkeit aufgeführt.

Tabelle 1

Zusammenstellung von Dämmstofffeuchten, die an 20 unterschiedlichen Flachdächern vorgelegen haben und aufgrund von Schadensfällen einen erheblichen Feuchtegehalt aufwiesen.

Objektbez.	Feuchtegehalt in Volumen-%	Feuchtegehalt in Masse-%	Rohdichte [kg/m³]	geschätzte Einwirkungsdauer [a]
EPS 1	22	737	29,5	12
EPS 2	12	538	22,5	29
EPS 3	20	1.072	19	25
EPS 4	8	353	22	38
EPS 5	7	329	20	32
XPS 1	4	122	33,5	26
XPS 2	1	32	30	25
PUR 1	40	1.307	32,4	23
PUR 2	42	1.540	27	25
PUR 3	21	754	27,3	25
PUR 4	49	1.388	35	33
PUR 5	2	47	32	0
GW 1 ¹⁾	0,04	4	10	2
GW 2 ¹⁾	0,45	45	10	6
GW 3 ¹⁾	0,05	5	10	6
GW 4 ¹⁾	0,02	2	10	3
SW 1	20	152	134	3
SW 2	28	168	170	1
SW 3		100		6
SW 4	2	17	140	0
¹⁾ Volumen- und flächenbezogene Angaben basieren auf einer angenommenen Rohdichte von 10 kg/m³				

Neben den oben genannten Feuchtegehalten, bei denen die Dämmung als leicht bis erheblich durchfeuchtet bezeichnet werden konnte, wurden auch gemessene Feuchtegehalte dokumentiert, die als trocken bezeichnet werden können. Sie sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2

Zusammenstellung von Dämmstofffeuchten, die bei 16 unterschiedlichen Flachdächern vorgelegen haben und als „trocken“ bezeichnet wurden.

Objektbez.	Feuchtegehalt in Volumen-%	Feuchtegehalt in Masse-%	Rohdichte in kg/m ³	Anzahl der Proben
EPS 1	0,07	3,70	20,0	3
EPS 2	0,05	2,50	22,1	1
EPS 3	0,03	1,60	18,0	3
EPS 4	0,04	1,90	22,0	2
EPS 5	0,02	0,96	25,9	4
EPS 6	0,01	0,58	19,6	2
EPS 7	0,01	0,64	19,1	3
XPS 1	0,14	4,08	33,7	4
PUR 1	0,09	2,70	32,4	1
PUR 5	0,13	4,12	32,0	2
GW 1 ¹⁾	0,0165	1,65	10,0	1
GW 2 ¹⁾	0,026	2,60	10,0	4
GW 3 ¹⁾	0,015	1,50	10,0	3
GW 4 ¹⁾	0,023	2,30	10,0	1
SW 1	0,21	1,50	134,0	23
SW 4	0,03	0,25	110,0	2
¹⁾ Volumen- und flächenbezogene Angaben basieren auf einer angenommenen Rohdichte von 10 kg/m ³				

Für den vorliegenden Bericht wurden Dämmstoffe aus Glaswolle nicht untersucht, weil deren Feuchtegehalte in der Regel für die Entscheidung, ob Dämmstoffe erhalten werden können oder nicht, nicht herangezogen werden: Mineralwolle geringer Rohdichte wird üblicherweise als Zwischensparrendämmung in Holzkonstruktionen eingebaut. Bei hohen Feuchtegehalten der Dämmstoffe, bei denen sich die Frage der Funktionstauglichkeit stellen würde, sind in der Regel auch die benachbarten Hölzer durch hohe Feuchtegehalte geschädigt (s. a. [AIBAU 2014]), so dass zur Reduzierung der Feuchte im Gefach auch die Dämmstoffe auszutauschen sind.

3.5 Einbaufeuchtegehalt und Befeuchtung

Die Eigenschaften der Dämmstoffe werden mit normierten Messverfahren ermittelt. Normklimabedingungen sind 23 °C, 50 % r. F. bzw. 23 °C, 80 % r. F. Der absolute Feuchtegehalt der Raumluft bei 23 °C beträgt im Falle der Sättigung (100 % r. F.) 20,54 g/m³, bei 50 % r. F. demnach 10,27 g/m³ und bei 80 % r. F. entsprechend 16,43 g/m³.

Die bei Praxisobjekten vorgefundenen Feuchtegehalte, bei denen der Dämmstoff noch als „trocken“ bezeichnet werden konnte, lagen z. B. bei EPS zwischen 0,01 und 0,07 Vol.-%, bei Steinwolle zwischen 0,03 und 0,65 Vol.-%. Bezogen auf eine Dämmstoffdicke von 10 cm entspricht das Feuchtegehalten bei EPS zwischen 10 und 70 g/m², bei Mineralwolle zwischen 30 und 210 g/m².

Das bedeutet, dass auch „lufttrockene“ Dämmstoffe einen deutlich höheren Feuchtegehalt aufweisen als die Raumluft, auch wenn sie zum großen Teil aus eingeschlossener Luft bestehen. Diese Feuchtegehalte könnten auch als „praktische Feuchtegehalte“ bezeichnet werden, wie es in früheren Ausgaben der DIN 4108-4 üblich war. Die Angaben in Tabelle 4 der [DIN EN ISO 10456:2010-05] weisen allerdings für alle der vier untersuchten Dämmstofftypen nur jeweils einen Feuchtegehalt von „0“ aus, was offenbar nicht den tatsächlichen Feuchtegehalten „trockener“ Dämmstoffe entspricht.

Feuchtegehalte von durch Schadensfälle stark durchfeuchteten Dämmstoffen wurden, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, z. B. bei EPS zwischen 7 und 22 Vol.-% entsprechend 7 und 22 kg/m² Fläche, bei PUR 2 bis 40 Vol.-% entsprechend 2 bis 40 kg/m² Fläche, bei Steinwolle 2 bis 28 Vol.-% entsprechend 2 bis 28 kg/m² Fläche (bezogen auf 10 cm Dämmstoffdicke) gemessen.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurden meist Feuchtegehalte zwischen etwa 2 und 10 Vol.-%, entsprechend 2 bzw. 10 kg/m² bei etwa 10 cm Dämmstoffdicke, untersucht, in Einzelfällen auch sehr hohe Feuchtegehalt von bis zu 40 kg/m³.

Tabelle 3
Feuchtegehalte einer 10 cm dicken Dämmstoffschicht in g/m²

Raumlufffeuchte bei 23 °C / 50 % r. F. bzw. 23 °C / 80 % r. F.	„Lufttrockene“ Dämmstoffe *)	Nach Schadensfällen durchfeuchtete Dämmstoffe *)
Feuchtegehalte in g/m ² bei 10 cm Dämmstoffdicke		
1 bzw. 1,6	10 – 70 (EPS)	700 – 55.000 (EPS)
	140 (XPS)	1.000 – 4.000 (XPS)
	90 – 130 (PUR)	2.000 – 40.000 (PUR)
	30 – 650 (MW)	2.000 – 28.000 (MW)
*) nach der Entnahme gemessene Werte		

3.6 Zielfeuchtegehalte für die Laboruntersuchungen

Die bei Schadensfällen festgestellten und in Tabelle 1 dokumentierten typische Feuchtegehalte sind in der mittleren Spalte der folgenden Tabelle 4 zusammengefasst. In der rechten Spalte sind die daraus abgeleiteten Zielwerte für die Laboruntersuchungen des FIW (s. Kap. 7) aufgeführt. Dabei wurden nicht die Extremwerte der Befeuchtung angestrebt, sondern Feuchtegehalte, die bei Schadensfällen im mittleren Bereich liegen.

Tabelle 4
Bei in Dachaufbauten vorgefundene Feuchtegehalte und daraus abgeleitete Zielfeuchtegehalte für die Labormessungen in Vol.-%

	AIBAU Praxismessungen	Vereinbarte Ziel- feuchtegehalte für Labormessungen
EPS	7 / 8 / 12 / 20 / 22	10
XPS	1 / 4	2 - 4
PUR	2 / 21 / 40 / 42 / 49	8 - 10
MW	2 / 20 / 28	8 - 12

Die nach der Befeuchtung im Labor tatsächlich erzielten und den Messungen zugrunde liegenden Feuchtegehalte sind in Kapitel 7 beschrieben.

4. Fallbeispiele

Zur Beantwortung der Frage, ob sich in der Praxis neuere Erkenntnisse und Erfahrungen ergeben haben, wurde auf Basis der in Kap. 5 beschriebenen Umfrage auch versucht, an typischen Objekten Dämmstoffproben zu entnehmen und messtechnisch untersuchen zu lassen. Leider konnten aus der Umfrage nur wenige Objekte generiert werden, bei denen Untersuchungen durch das AIBAU mit Probeentnahmen an Öffnungsstellen durchgeführt werden konnten. Häufig handelte es sich um Untersuchungen in gerichtlichen Verfahren, in anderen Fällen war die Bereitschaft der Eigentümern oder der Ausführenden, an ihren Dächern Öffnungen vorzunehmen, nicht vorhanden. In einigen Fällen konnten jedoch mit Unterstützung der jeweils tätigen Sachverständigen Vor-Ort-Untersuchungen durchgeführt und Dämmstoffproben entnommen sowie untersucht werden.

4.1 Beispiel 1: Flachdach über einer Gewerbeeinheit

Bild 1 zeigt die etwa 500 m² große Dachfläche, die vor ca. 18 Jahren modernisiert wurde. Über dem alten bituminösen Flachdachaufbau mit 12 cm EPS-Dämmschicht wurde eine Zusatzgefälledämmung aus EPS mit bis zu 26 cm Dicke und eine neue Polymerbitumenabdichtung aufgebracht. Der alte Dachaufbau war durchfeuchtet, die Feuchtegehalte wurden damals allerdings nicht gemessen. Bei den Modernisierungsarbeiten kam es erneut zu Durchfeuchtungen der neuen Dämmschicht. Das ca. 4 - 8 cm hoch anstehende Wasser in der neuen Dämmschicht wurde vor dem Aufbringen der neuen Abdichtung an den Tiefpunkten abgesaugt. Die neu eingebauten Dämmstoffe wurden hier also nicht ausgebaut, sondern nach der Begutachtung durch einen öffentlich bestellten und vereidigten Sachverständigen des Dachdeckerhandwerks beibehalten. Danach kam es zu keiner weiteren Beanstandung durch die (wechselnden) Nutzer bzw. den Eigentümer.



Bild 1
Dachfläche über Gewerbeeinheit

Die bituminöse Dachhaut ist nur durch einen leichten Oberflächenschutz aus Besplittung geschützt. Bei Sonneneinstrahlung weist sie demnach hohe Oberflächentemperaturen auf. Auf Grund der gefällegebenden Wärmedämmung ist keine übermäßige Pfützenbildung vorhanden. Von den Beteiligten wurde deswegen damals davon ausgegangen, dass die Dämmung wieder austrocknet.



Bild 2

Dachaufbau mit alter, 12 cm dicker EPS-Dämmung unten und neuer, an der Öffnungsstelle ca. 26 cm dicker EPS-Gefälledämmung oben.



Bild 3

Alte Dämmung mit deutlichen Verfärbungen aufgrund der Feuchteinwirkung

Bei der Untersuchung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurden vom AIBAU drei Öffnungsstellen angelegt, neue und alte Dämmstoffe entnommen (Bild 2 und Bild 3) und die Feuchtegehalte per Darr-Messung im Labor ermittelt. Die Entnahme erfolgte an einem warmen Sommertag früh morgens. Die sehr dicke, neue Dämmschicht wurde bei der Entnahme vor Ort jeweils in drei Schichten getrennt. Die Feuchtegehalte der einzelnen Schichten sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5

Feuchtegehalte entnommener Dämmstoffproben in Masse-%

		Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3
EPS neu	oben	93,90	0,64	0,76
	Mitte	153,36		0,66
	unten	208,40	0,72	0,77
EPS alt	oben	14,77	52,99	1,36
	unten	0,80	48,76	0,69

Tabelle 6

Feuchtegehalte entnommener Dämmstoffproben in Volumen-%

		Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3
EPS neu	oben	2,82	0,02	0,02
	Mitte	4,60		0,02
	unten	6,25	0,02	0,02
EPS alt	oben	0,44	1,59	0,04
	unten	0,02	1,46	0,02

Bei der ermittelten Rohdichte von 30 kg/m^3 entspricht dies den in Tabelle 6 aufgeführten volumenbezogenen Feuchtegehalten.

Anhand der Feuchtezuschläge in [DIN EN ISO 10456:2010-05] (für EPS, Rohdichte $10\text{--}50 \text{ kg/m}^3$, Feuchtegehalt bis 10 Vol.-%) ergeben sich die in Tabelle 7 aufgeführten Wärmeleitfähigkeiten, ausgehend von einer ursprünglichen Wärmeleitfähigkeit von $0,035 \text{ W/mK}$ des neuen Dämmstoffs und $0,040 \text{ W/mK}$ des alten Dämmstoffs (Zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten s. Kap. 6.5).

Tabelle 7

Wärmeleitfähigkeiten entnommener Dämmstoffproben in einzelnen Schichten in W/mK

		Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3
Neue Dämmung	oben	0,039	0,035	0,035
	Mitte	0,042		0,035
	unten	0,045	0,035	0,035
Mittelwert		0,042	0,035	0,035
Alte Dämmung	oben	0,041	0,043	0,040
	unten	0,040	0,042	0,040
Mittelwert		0,0405	0,0425	0,040

Tabelle 8

Wärmedurchlasskoeffizienten (U-Werte) des gesamten Dämmstoffaufbaus in $\text{W/(m}^2\text{K)}$ (alte, 12 cm dicke Dämmung und neue Gefälledämmung zusammen)

	Stelle 1 12+12 cm	Stelle 2 14+12 cm	Stelle 3 26+12 cm
Alte und neue Dämmung	0,168	0,144	0,095

Wird der Durchschnittswert der Wärmeleitfähigkeiten für die Gesamthöhe des Dachpakets angesetzt, ergeben sich die in Tabelle 8 aufgeführten Wärmedurchlasskoeffizienten (U-Werte) des Dachaufbaus (unter Vernachlässigung des Wärmedurchlasswiderstandes der Stahlbetondecke).

Der zum Zeitpunkt der Modernisierung laut [WSVO 1995] einzuhaltende Maximalwert des Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ist bei der Dachfläche auch unter Berücksichtigung der Durchfeuchtung deutlich unterschritten und damit erheblich günstiger. Die Werte genügen sogar den aktuellen Anforderungen der [EnEV 2014] für Bauteilschichten bei Maßnahmen im Bestand ($U_{\text{max}} = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

4.2 Beispiel 2: Terrassendächer

In einem anderen Fall waren EPS-Dämmstoffe stark durchfeuchtet. Sie waren ca. 1970 in ein Terrassenhaus mit neun Terrassenwohnungen unter den Gehbelägen eingebaut worden. Die auftretenden Undichtheiten führten zur mehrmaligen Überklebung der Dachabdichtung. Die Dämmstoffe wurden aber bislang nicht ausgetauscht. Sie wiesen auf der Oberseite Rillen als „Entspannungskanäle“ auf.

Die mit der Untersuchung beauftragte Architektin und der Dachdecker fanden im Jahr 2017 bei zwei von drei geöffneten Dachaufbauten eine trockene Wärmedämmung vor, die nur eine leichte Oberflächenfeuchte aufwies. Bei einem dritten Dachaufbau war der Dämmstoff allerdings erheblich feucht. Die entnommenen Probenstücke wurden dem AIBAU zur Bestimmung des Feuchtegehalts zugesandt.



Bild 4
Dachabdichtung aus Bitumenbahnen unter Plattenbelag



Bild 5
Die mehrfache Überklebung der Abdichtungsbahn hat im Laufe der etwa 40-jährigen Standzeit zu einer Schichtdicke von 5 cm Bitumenbahnen geführt.



Bild 6
Zur Feuchtemessung entnommene Dämmstoffprobe.

Die Ermittlung der Feuchtegehalte zweier Proben ergab die in Tabelle 9 aufgeführten Feuchtegehalte.

Tabelle 9

Feuchtegehalte entnommener EPS-Dämmstoffproben in Masse-% und Volumen-%

	Stelle 1	Stelle 2
Feuchtegehalt in Masse-%	1.347,4	1.174,13
Feuchtegehalt bei einer Rohdichte von 30 kg/m ³ in Vol.-%	40,42	35,22

In diesen Proben war demnach ein Wassergehalt vorhanden, der einer Anstauhöhe von etwa (40 % von 5 cm $\Rightarrow$) 2 cm entspricht.

Damit ist zwar eine relativ deutliche Einschränkung des ursprünglichen Wärmeschutzes gegeben. Eine Veränderung der Belagsoberfläche im Hinblick auf eine Druckfestigkeitsveränderung wurde aber nicht beobachtet.

Bei den Dachflächen ist vorgesehen, die alte Dämmung zu entfernen und den Dachaufbau inkl. Dämmung zu erneuern. Dies ist – neben anderen Randbedingungen, die für die Erneuerung sprechen, wie z. B. die Kleinteiligkeit der Dachflächen und die beschränkte Aufbauhöhe – bei diesem Durchfeuchtungsgrad sicherlich sinnvoll.

Nach Einschätzung der Architektin und dem Dachdecker müssen die übrigen Dachflächen nicht erneuert werden.

4.3 Beispiel 3: Dachfläche über Verbrauchermarkt nach Hagelschaden

Bei einer modernisierten Dachfläche, die bereits mit einer Zusatzdämmung aus EPS und einer Zusatzabdichtung aus PVC-P versehen war, trat infolge eines Hagelschadens und nach einer nur provisorischen Instandsetzung Wasser ein. Die Abdichtungsbahn musste vollständig ausgetauscht werden. Nach Einschätzung des beauftragten Sachverständigen war der Feuchtegehalt der EPS-Zusatzdämmung gering, so dass sie hätte weiterverwendet werden können. Gemäß EnEV wäre allerdings zur Erreichung der Mindestanforderungen für Maßnahmen im Bestand ($U_{\max} = 0,20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) eine weitere Zusatzdämmung erforderlich gewesen. Die Beteiligten einigten sich darauf, die Zusatzdämmung trotz der nur geringen Funktionseinschränkung auszutauschen. Außerdem wurde untersucht, ob die alte Dämmung ebenfalls hätte ausgebaut werden müssen. Bei der deswegen erfolgten Untersuchung wurden allerdings an der Öffnungsstelle keine erhöhten Feuchtegehalte festgestellt.



Bild 7
Feuchteintritte durch Hagelschaden haben nach ca. zwei Jahren zu Verfärbungen an den EPS-Dämmplatten geführt.



Bild 8
Zur Bestimmung des Feuchtegehalts und der Wärmeleitfähigkeit ausgebaute Dämmplatte aus EPS

Der Feuchtegehalt der Dämmplatte wurde dem FIW zur Feuchtemessung und Untersuchung zugesandt. Der Feuchtegehalt wurde im Labor per Darr-Messung zu 2,5 Vol.-% (bei einer Trockenrohichte von 19,5 kg/m³) bestimmt. Die Einschätzung des Sachverständigen zur Funktionstüchtigkeit der Dämmung kann daher bestätigt werden.

Das Beispiel steht exemplarisch auch für andere Dächer, bei denen im Falle von Fehlern der Zusatzabdichtung regelmäßig die Frage auftaucht, ob die alte Schichtenfolge beibehalten werden kann. In der Regel ist jedoch die Gebrauchstauglichkeit des gesamten Dachaufbaus nicht eingeschränkt und ein Ausbau der funktionstüchtigen Dämmschichten nicht erforderlich.

4.4 Beispiel 4: Dachterrasse eines Wohngebäudes

In der Wohnung unter einer Dachterrasse kam es, offenbar aufgrund undichter Anschlüssen an die Terrassentüren, zu Durchfeuchtungen. Bei der Untersuchung der mehr als sieben Jahre alten Dachterrasse wurde bis zu 1 cm hoch in der Dämmung auf der Dampfsperre stehendes Wasser festgestellt. Der hohe Feuchtegehalt der EPS-Dämmplatten konnte bereits vor Ort anhand des hohen Gewichts abgeschätzt werden.

Der Sachverständige hat die entnommene Dämmstoffprobe dem FIW zur Bestimmung des Feuchtegehalts sowie zur weiteren Untersuchung zugesandt. Der hohe Feuchtegehalt wurde im Labor des FIW per Darr-Messung mit einem Wert von 14,1 Vol-% (bei einer Trockenrohdichte von 23,2 kg/m³) bestätigt.

Die Empfehlung des Sachverständigen lautete, angesichts des hohen Durchfeuchtungsgrads die Dämmplatten auszutauschen vor dem rechtlichen Hintergrund, dass Mangelrechte bestehen.

Das Beispiel zeigt, dass eine über einen langen Zeitraum unentdeckte Leckage zu einem sehr hohen Feuchtegehalt der Schaumkunststoffe aufgrund des durch langjährigen Diffusionsstrom eingetragenen Wasserdampfs führen kann. Bestehen noch Gewährleistungsansprüche, wird der Dämmstoff oft ausgetauscht. Eine Bagatellogrenze dürfte den „praktischen Feuchtegehalt“, der bei „lufttrockenen“ Dämmstoffen¹ zu erwarten ist, nicht deutlich übersteigen. Eine unwesentliche Abweichung vom Feuchtegehalt eines neuen Dämmstoffs läge aber deutlich unter dem Feuchtegehalt, der im vorliegenden Fall festgestellt wurde.



Bild 9
Zweilagig verlegte Dämmung aus EPS-Platten auf der Dachterrasse



Bild 10
Nach der Entnahme der Dämmplatten nachsickerndes Wasser, das bis zu 1 cm hoch aufstaute.

4.5 Beispiel 5: Gewährleistungsfall Schulgebäude

Bei einem Schulgebäude aus den 1970er Jahren war im gefällelosen Flachdach eine zweilagige Dämmung aus Polyurethan, insgesamt 10 cm dick, eingebaut worden. Im Jahr 2003 wurde eine Bestandsaufnahme und im Jahr 2006 eine Modernisierung durchgeführt. Dabei wurden die alten Dämmstoffe im Dach belassen und ihr Durchfeuchtungsgrad dokumentiert. Das Dach war ehemals bekieselt, war aber im Laufe der Zeit abgeräumt und die oberste Lage durch eine beschieferte Bahn ersetzt worden. Auch hier waren die Bitumenbahnen mehrfach überklebt worden.

¹ Zu häufig gemessenen, „lufttrockenen“ Dämmstoffen und Angaben in Normen siehe auch Kapitel 3.4 und 3.5.

Bei der Modernisierung wurde der alte Dachaufbau weitestgehend belassen, Lichtkuppeln und Randanschlüsse, Abläufe und andere Durchdringungen hochgebaut, die Anschlüsse der alten Dachbahn entsprechend aufgeschnitten und nicht wieder neu dicht angeschlossen, und eine gefällegebende Wärmedämmung aus EPS sowie eine neue Kunststoffabdichtungsbahn eingebaut. Anschließend sollte die Fläche mit einer Extensivbegrünung versehen werden.

Bei der anschließenden Dichtigkeitsprüfung durch bis zu 20 cm hohen Wasseranstau kam es erneut zu Durchfeuchtungen an Lichtkuppeln und Dachrändern.



Bild 11
Öffnungsstelle in der Fläche mit stark durchfeuchteten PUR-Dämmstoffen



Bild 12
Öffnungsstelle am Anschluss einer Lichtkuppel mit gering durchfeuchteten PUR-Dämmstoffen



Bild 13
Langanhaltend und erheblich durchfeuchtete, mit Bitumenpapier kaschierte PUR-Dämmstoffe

Im Rahmen der Begutachtung des neuen Schadens durch den Sachverständigen im Jahr 2008 wurde festgestellt, dass die neu gemessenen Feuchtegehalte an einer vergleichbaren Stelle etwa 3-fach höher waren (statt 3,6 Vol.-% bei den alten Messungen, die 5 Jahre zuvor erfolgt waren, lagen die Werte jetzt bei 11 - 13 Vol.-%).

Die neuen Messungen wurden in der Regel an vermuteten Tiefpunkten der Dachfläche, d. h. in Feldmitte der Stahlbetondecke, durchgeführt. An insgesamt sieben Stellen wurden Werte von 0 bis zu 68,8 Vol.-%, im Mittel 26 Vol.-%, gemessen. Der alte, verbliebene Dämmstoff aus PUR war also stark durchfeuchtet. Die neue EPS-Dämmschicht wies vereinzelt leicht erhöhte Feuchtegehalte auf.

Tabelle 10

Feuchtegehalte entnommener Dämmstoffproben an 5 verschiedenen Öffnungsstellen in Volumen-%

	Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3	Stelle 4	Stelle 5
Neue EPS-Dämmschicht	0	2	0	0	3,3
Alte, obere PUR-Dämmschicht	10,7	28,4	44,6	45,8	36,0-
Alte, untere PUR-Dämmschicht	13,0	68,8	20,8	45,3	1,7

Die Feuchtegehalte waren in den beiden PUR-Dämmstofflagen nicht gleichmäßig verteilt, sondern differierten zum Teil erheblich zwischen dem oberen und dem unteren Teil. Die höheren Werte lagen stellenweise in der unteren und an anderen Stellen in oberen Dämmschicht vor. Die Ursache dafür konnte nicht ermittelt werden.

Aus der hohen Schwankung der Feuchtegehalte sogar zwischen benachbarten Platten ist zu schlussfolgern, dass sich die Feuchtigkeit nicht horizontal in den Dämmstoffebenen bewegt und nicht ausgleicht. Die höchsten Feuchtegehalte liegen häufig an Tiefpunkten vor, wo der Wasserstand des eingedrungenen Wassers am höchsten ist. Vergleichende Werte bei zeitlich verschiedenen Messungen können daher nur an unmittelbar benachbarten Stellen erfolgen und an Tiefpunkten der Dachfläche.

Bei der Diskussion um die Schadensursache kam auch das Argument auf, dass durch den Wasseranstau von bis zu 20 cm Höhe auf der Abdichtung das Wasser aus den alten Dämmplatten des alten, unteren Dachaufbaus herausgedrückt worden sei. Durch einen Versuch unter vergleichbarer Belastung konnte das nicht bestätigt werden, der Wasserdruck auf der Probe ließ nicht das Wasser aus dieser austreten (Bild 14).



Bild 14

Belastungsversuch bei feuchten PUR-Dämmstoffproben. Es wurde kein Wasseraustritt festgestellt.

4.6 Beispiel 6: Dachflächen eines Schulgebäudes (Schaumglas/EPS)

Die Flachdächer eines Schulgebäudes aus den 70er Jahren waren ursprünglich mit einem bituminösen Dachaufbau und einer Dämmschicht aus Schaumglas gedämmt. Einige der Dachflächen waren – vermutlich in den 80er Jahren – mit einer Zusatzdämmung aus (oberseitig gerilltem) EPS und einer neuen Abdichtung versehen. Bei Untersuchungen eines Sachverständigen vor etwa 15 Jahren wurde bereits festgestellt, dass die Dachflächen an einigen Stellen stark durchfeuchtet waren. Für 2018 ist eine umfangreiche Modernisierung der Gebäudetrakte sowie der Dachflächen vorgesehen. Vom AIBAU konnten im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts erneut Öffnungsstellen im Dachaufbau angelegt werden und

sowohl Untersuchungen am ursprünglich verlegten Dämmstoff aus Schaumglas als auch am teilweise später darüber eingebauten Polystyrol-Dämmstoff durchgeführt werden.

Die Dachabdichtung wies Beschädigungen in Form einer Durchwurzelung in der Fläche und in Form von Rissbildungen in der Randabdichtung, die aus ECB-Bahnen (Ethylencopolymerisat) bestand, auf. Die gefällelose Dachfläche war zum Teil in früherer Zeit mit einer Rinne (offenbar durch Ausnehmung des Dämmstoffs) versehen worden, in der Wasser stand.

Bei den Öffnungsarbeiten im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurden die in den Tabelle 11 und Tabelle 12 aufgeführten Feuchtegehalte in den Dämmschichten – ermittelt durch Darr-Messung im Labor – festgestellt.

Tabelle 11

Feuchtegehalte entnommener Dämmstoffproben in Masse-%

	Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3	Stelle 4	Stelle 5
Neue EPS-Dämmschicht	-	-	-	2.756	1.209
Alte Schaumglas-Dämmschicht	234	3 bis 227	125	0,5	-

Tabelle 12

Feuchtegehalte entnommener Dämmstoffproben in Volumen-%

	Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3	Stelle 4	Stelle 5
Neue EPS-Dämmschicht	-	-	-	55	24
Alte Schaumglas-Dämmschicht	35,1	0,5 bis 33,6	18,7	0,1	-

4.6.1 Dämmung aus Schaumglas

Die Materialstruktur der Schaumglas-Dämmschicht war zumindest an der Oberfläche zerstört, die Haftung der Bitumenbahnen auf dem Dämmstoff nicht mehr gegeben. Die Fugen zwischen den Dämmplatten waren nicht vollständig mit Heißbitumen verfüllt.

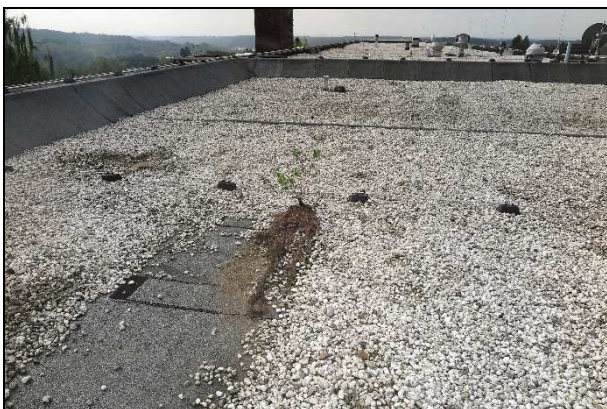


Bild 15

Dachfläche eines Schulgebäudes aus den 70er Jahren mit ursprünglicher Dämmschicht aus Schaumglas



Bild 16

Öffnungsstelle 1: Keine Anhaftung der Bitumenbahnabdichtung auf dem Schaumglas, nicht vollständig mit Bitumen gefüllte Dämmplattenfugen, Bruchstücke in der Oberseite der Dämmplatten



Bild 17

Öffnungsstelle 2: ca. 5 cm dicke Dämmschicht aus Schaumglas. Wasser sickert nach Entfernen des Dämmstoffs nach.

Da die Öffnung am (zunächst vermuteten) Tiefpunkt der Betondecke hergestellt wurde, lief nach Entfernen des Dämmstoffs das in das Dachpaket an den Fehlstellen eingedrungene Wasser nach. Die entnommenen Dämmstoffproben wiesen einen relativ hohen Feuchtegehalt (234 Masse-%) auf, was einem Feuchtegehalt von etwa 35 Vol.-% entspricht.

Dabei war festzustellen, dass an einer Öffnungsstelle teilweise sehr unterschiedliche Feuchtegehalte in den Proben gemessen wurden: Bei Öffnungsstelle 2 waren sowohl trockene Stücke mit 3 Masse-% und feuchte Stücke mit 86, 100 und 227 Masse-% vorhanden. Die Proben bestanden zum Teil aus kleineren Bruchstücken von rund 1 bis 3 cm Durchmesser. Die größten entnommenen Stücke wiesen Kantenlängen von etwa 15 bis 16 cm auf. Eine ganze Dämmplatte konnte trotz sorgfältigen Versuchen nicht entnommen werden, da der spröde Dämmstoff beim Versuch des großflächigen Ausbaus auseinanderbrach. Daher konnten die Wärmeleitfähigkeiten nicht gemessen werden. Die unterschiedlichen Feuchtegehalte konnten nicht der Kalt- oder der Warmseite zugeordnet werden, da jeweils Proben sowohl oben als auch unten stark feucht waren. Der höchste Wert mit 227 Masse-% (s. Tabelle 11, Zeile 3) wurde allerdings an einer zur Kaltseite gelegenen Probe gemessen.

Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass in Schaumglas aufgrund seiner geschlossenzelligen und nahezu dampfdichten Struktur kein erhöhter Feuchtegehalt in der Dämmung vorliegen kann. Bei der Entnahme von Materialproben an alten Dachflächen wurde aber wiederholt sowohl von den Verfassern als auch von Kollegen festgestellt, dass die Dämmstoffe doch Wasser enthalten können, wenn sie sehr lange, über mehrere Jahrzehnte, einer Wasserbelastung durch Leckagen oder eingeschlossener Baufeuchte ausgesetzt waren. In den oberen Dämmstoffschichten kommt es bei kaltem Wetter durch Frost zu Materialschädigungen.

Bei der Messung de im Dämmstoff ggf. eingeschlossenen Feuchte ist aber zu berücksichtigen, dass an der sehr rauen Oberfläche viel Wasser anhaften kann. Werden große Dämmstoffstücke mit in Bezug zum Volumen kleiner Oberfläche gemessen, wird die Wassermenge festgestellt, die im Dämmstoff, in der Struktur eingelagert ist. Bei kleineren Bruchstücken wird in erster Linie das an der relativ großen Oberfläche anhaftende Wasser gemessen. Entsprechend lang oder kurz ist die erforderliche Trocknungsdauer, wie die beiden folgenden Grafiken zeigen.

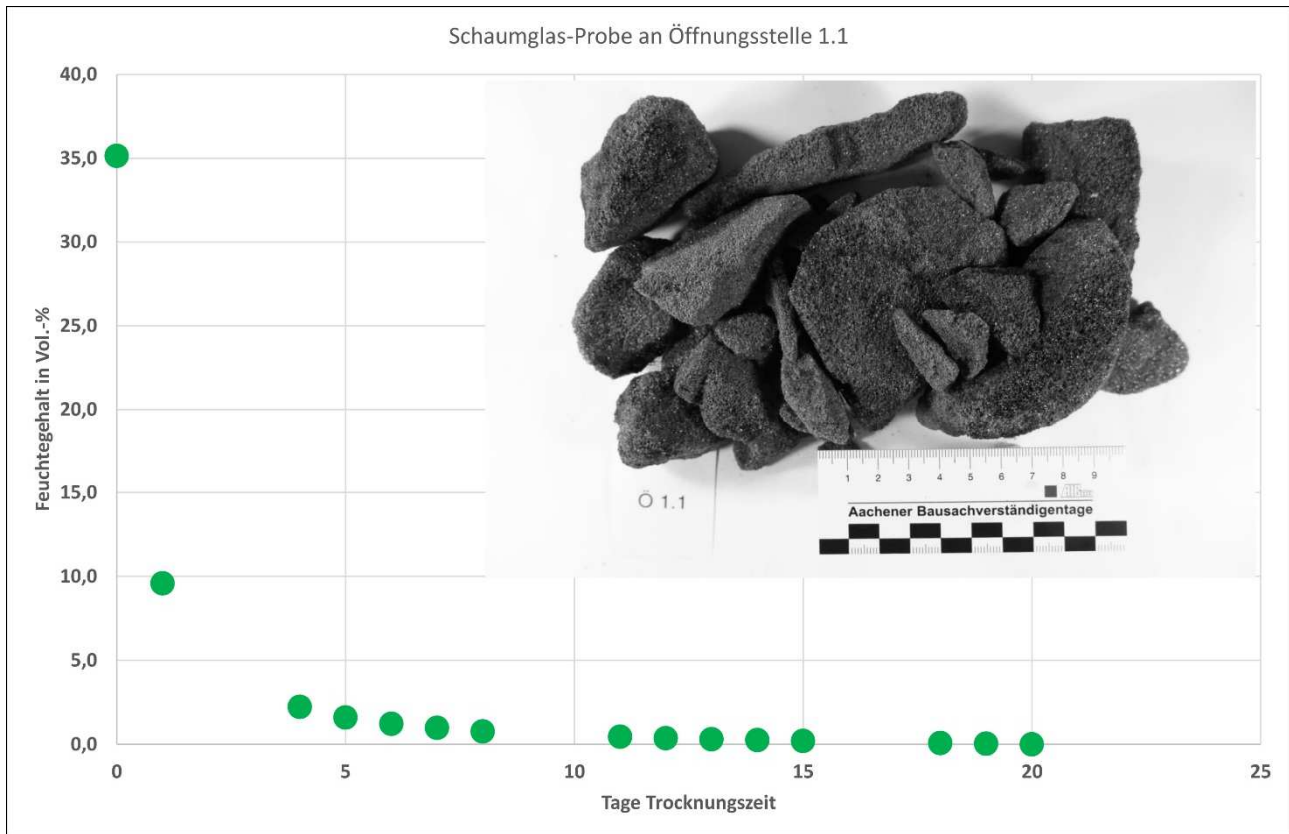


Bild 18

Sehr kurzer Trocknungsverlauf einer Schaumglas-Probe aus kleinen Bruchstücken

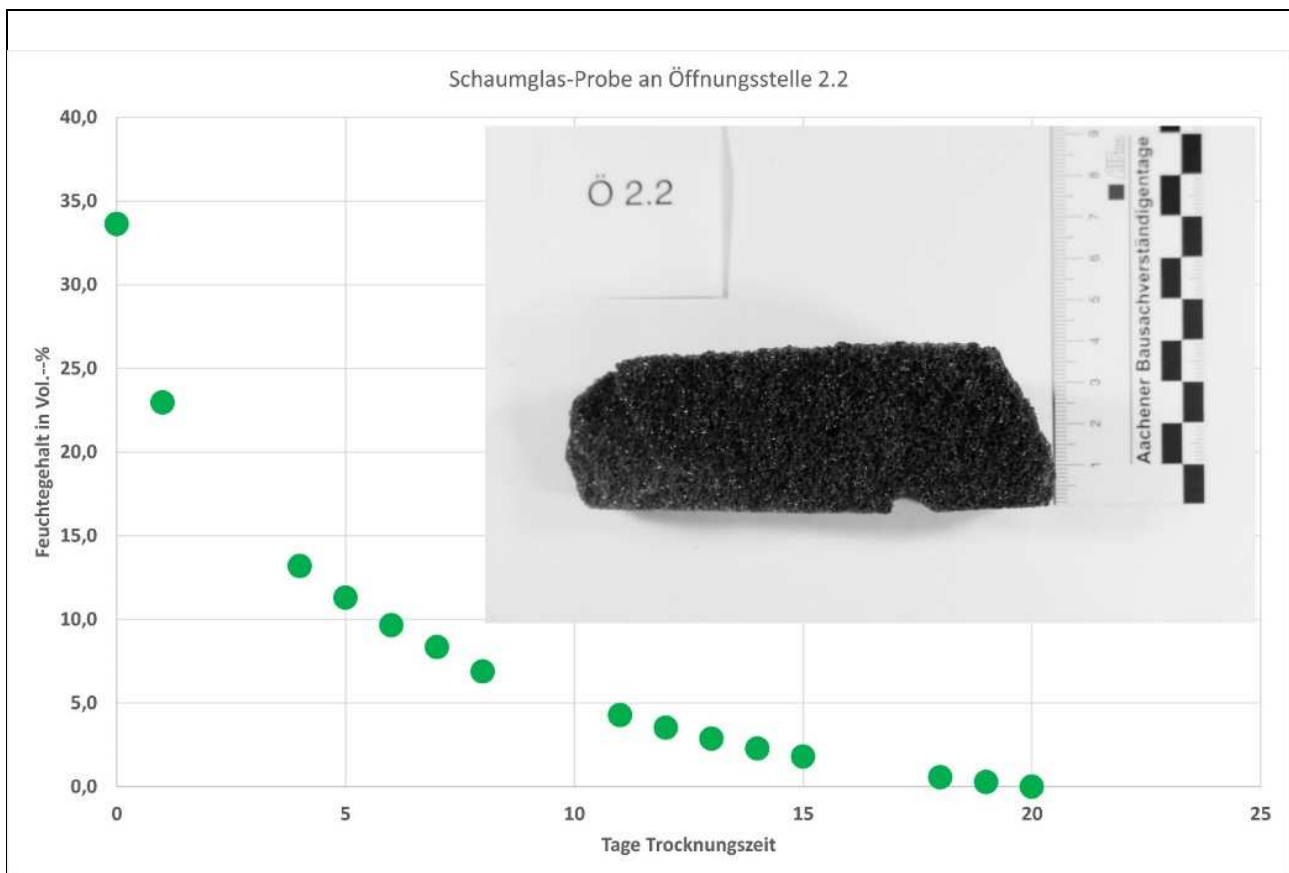


Bild 19

Langer Trocknungsverlauf einer Schaumglas-Probe aus einem größeren Stück

Für eine Abschätzung der durch Feuchteeinwirkung veränderten Wärmeleitfähigkeit gibt es zurzeit keine Kennwerte. In [DIN EN ISO 10456:2010-05] sind Materialkennwerte für Schaumkunststoffe, Mineralwolle und andere Stoffe angeführt, aber keine für Schaumglas. Auch in anderen Veröffentlichungen sind keine feuchtegehaltsabhängigen Wärmeleitfähigkeiten von Schaumglas beschrieben. Das kann daran liegen, dass eine zu Laborzwecken nötige Befeuchtung in angemessenen Zeiträumen kaum möglich ist. Größere Dämmplattenstücke, die für die Messung im Plattenmessgerät erforderlich sind, lassen sich aus Flachdächern meist nicht entnehmen, da diese üblicherweise in Bitumen eingeschwemmt und dadurch so verklebt sind, dass sie bei der Entnahme in viele Einzelstücke zerbrechen.

Inwieweit sich die Wärmeleitfähigkeit der Schaumglasdämmung durch Wasser erhöht, lässt sich daher nur sehr grob abschätzen, indem die Wärmeleitfähigkeiten von Schaumglas (z. B. $\lambda = 0,055 \text{ W/mK}$) und Wasser ($\lambda = 0,600 \text{ W/mK}$) ins Verhältnis der Volumenanteile gesetzt werden. Das bedeutete hier für den maximalen Feuchtegehalt:

35,1 Vol.-% Wasser bei 5 cm Dicke entspricht einem Wasserstand von 1,75 cm.

$$\begin{array}{ll} 0,0325 \text{ m} / 0,055 \text{ W/mK} = & 0,59 \text{ m}^2\text{K/W} \\ 0,0175 \text{ m} / 0,6 \text{ W/mK} = & 0,03 \text{ m}^2\text{K/W} \\ R = & 0,62 \text{ m}^2\text{K/W} \\ \lambda = 1/R = 0,05 \text{ m} / 0,62 \text{ m}^2\text{K/W} = & 0,08 \text{ W/mK} \end{array}$$

Die Wärmeleitfähigkeit erhöht sich nach dieser groben Abschätzung von 0,055 auf 0,08, d. h. um 45 %. Dies ist aber ein Maximalwert, der nur auf die am stärksten durchfeuchtete Stelle zutrifft. Die anderen Probestücke waren entweder weniger feucht oder trocken. Die Wärmeleitfähigkeit von 0,08 W/mK liegt also auf der sicheren Seite, wenn die verbleibende Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs abgeschätzt werden soll.

4.6.2 EPS - Zusatzdämmung

An zwei Dachflächen, die bereits vor mehr als 15 Jahren mit einer Zusatzdämmung aus 5 cm dickem EPS modernisiert worden waren, war Wasser in die neue Dämmschicht eingedrungen. Die Dämmplatten waren sehr stark feucht.



Bild 20
Öffnungsstelle 4 bei einer Dachfläche mit Zusatzdämmung aus EPS mit oberseitigen „Entspannungskanälen“. Die EPS-Dämmung war sehr stark feucht.



Bild 21
Öffnungsstelle 5 mit stark feuchter Zusatzdämmung und ca. 1 cm hohem Wasserstand auf der alten Abdichtung

Die EPS-Dämmplatte war ungewöhnlich schwer: Die ca. 30 x 30 cm große Platte, die nach Trocknung etwa 100 g wog (exakt 99,4 g), war bei der Entnahme 2,84 kg schwer, hatte also etwa 2,75 kg (exakt 2.756 g) Wasser aufgenommen, d. h. mehr als das 27-fache des eigenen Gewichts. Der Feuchtegehalt lag damit bei 2.756 Masse-% (s. Tabelle 11, Zeile 2). Die Umrechnung ergab für eine Rohdichte von 20 kg/m^3 einen volumenbezogenen Feuchtegehalt von 55,12 Vol.-%. Das bedeutet, dass das im 5 cm dicken Dämmstoff eingeschlossene Wasser außerhalb des Dämmstoffs einen Wasserstand von über 2,5 cm Höhe erreichte!

An einer der beiden Öffnungsstellen (Nr. 4) war die unter der alten Abdichtung liegende Schaumglas-Dämmung trocken und nicht von Wasser umgeben. Ihr Wärmeschutz war daher nicht beeinträchtigt worden. Der sehr hohe Feuchtegehalt der EPS-Dämmschicht hatte auch nicht durch Diffusion nach unten zur Durchfeuchtung der alten Dämmschicht geführt, was aufgrund des hohen Diffusionswiderstands der Abdichtung und der unbeschädigten Schaumglasdämmung auch nicht zu erwarten war.

Auch an Öffnungsstelle 5 war die neuere EPS-Dämmschicht stark feucht. Dort lief das Wasser nach der Entnahme nach und bildete einen Wasserstand von etwa 1 cm Höhe. Der Feuchtegehalt der entnommenen Probe wurde zu 1.209 Masse-% bzw. 24 Vol.-% ermittelt, was mit Verhältnis des Wasserstands von 1 cm zur Plattendicke von 5 cm korreliert.

Bei Öffnungsstelle 4 lief kein Wasser nach, was typisch gewesen wäre für den hohen Feuchtegehalt. Sehr wahrscheinlich ist frei fließendes Wasser zwischenzeitlich abgesaugt worden oder ist durch eine Lücke nach unten abgelaufen.

Aus dem Beispiel können nachfolgende Rückschlüsse gezogen werden:

Auch Dämmstoffschichten aus Schaumglas können hohe Wassergehalte enthalten. Dabei verteilt sich das Wasser sehr ungleichmäßig. Möglicherweise hängt die Wasserverteilung von Fehlstellen in der Dämmstoffstruktur ab, die durch Produktionsfehler oder durch Einwirkungen beim Einbau oder durch die Nutzung (Begehung, Befahrung) entstanden sind und die zumindest in den äußeren Schichten durch Frost weiter fortschreiten können bis zur Auflösung in eine feinsandige Struktur. Damit ist kein Haftverbund mehr zur Abdichtung gegeben, was bei Aufbauten ohne Schutzschichten zum Abriss der Dachhaut bei Sturm führen kann.

Die Wärmeleitfähigkeit, die durch die Wassereinlagerung in der Dämmstoffschicht erhöht ist, lässt sich zurzeit noch nicht ermitteln, allerdings liegt sie im vorliegenden Fall noch weit unter 0,08 W/mK. Die Schaumglasdämmung weist damit auch bei Durchfeuchtung einen noch guten Wärmeschutz auf. Die Dachaufbauten müssen nicht abgebrochen und entsorgt werden, sondern können erhalten bleiben, wenn ansonsten keine Schäden bestehen bzw. zu befürchten sind.

Darüber hinaus zeigt der Fall, dass auch ein zusätzlicher Aufbau über einem bestehenden Dachaufbau schadhaft werden kann. Daher ist es sinnvoll, beim Erhalt des alten Dachaufbaus die alte Abdichtung möglichst funktionstüchtig zu erhalten. Insbesondere bedeutet das, sie nicht zu perforieren, funktionstüchtige Abdichtungen nicht auszubauen und aufgeschnittene Abdichtungen wieder dicht zu verschließen.

4.7 Beispiel 7: Befahrbares Dachfläche über Tiefgarage (Schaumglas)

Der ebenerdige Dachaufbau einer in der zweiten Hälfte der 70er Jahre gebauten Tiefgarage war mit einer 3 cm dicken Schicht aus Schaumglas gedämmt worden. Die Dämmplatten waren ohne Dampfsperre unmittelbar auf der Rohbetondecke verlegt bzw. eingeschwemmt worden. Über der Bitumenabdichtung war ein Schutzestrich bzw. unter der Feuerwehrezufahrt eine Schutzbetonplatte eingebaut. An einer Dehnungsfuge lagen erhebliche Durchfeuchtungsschäden vor, ansonsten wurde kein Wassereintritt bemängelt.



Bild 22
Schaumglasdämmung unter Abdichtung, die mit einem befahrbaren Schutzbeton abgedeckt ist.



Bild 23
Öffnungsstelle mit Wasser in der Schaumglasschicht

Die im Jahr 2013 bei der Untersuchung der Dachfläche von einem Sachverständigen entnommenen Proben wurden per Darr-Messung im Labor des AIBAU untersucht. Die dabei ermittelten Feuchtegehalte lagen in der Größenordnung von 2,4 bis 7,1 Vol.-%, bezogen auf eine Rohdichte von 135 kg/m^3 (s. Tabelle 13, Zeile 2).

Die meist aus mehreren Bruchstücken bestehenden Proben wurden anschließend kurz mit Wasser benetzt und erneut getrocknet. Dabei ergaben sich ähnliche Feuchtegehalte (s. Tabelle 13, Zeile 3).

Tabelle 13
Feuchtegehalte entnommener kleinteiliger Schaumglasproben in Volumen-%

	Stelle 1	Stelle 2	Stelle 3
Per Darr-Trocknung nach Entnahme	6,12	7,12	2,42
Erneute Darr-Trocknung nach Wasserbenetzung	7,52	7,01	4,48

Die Feuchtigkeitsgehalte nach der Trocknung und anschließender oberflächiger Benetzung entsprechenden Entnahme-feuchtegehalten. Die Dämmstoffstücke waren daher nicht aufgrund langjähriger Diffusion feucht, an den Bruchstücken haftete lediglich Wasser an den sehr porösen Oberflächen an.

Die Feuchtemessung der Schaumglas-Proben an diesem Objekt deutet ebenfalls darauf hin, dass hohe Feuchtegehalte in erster Linie dadurch entstehen, dass Wasser an der Oberfläche von Bruchstücken anhaftet. Teilweise kann aber durch Fehlstellen wie z. B. Mikrorisse Wasser in die Schaumglasstruktur eindringen.

4.8 Beispiel 8: Dachfläche über Verwaltungstrakt mit Mineralwolle-Dämmung

Auf einem Flachdach zwischen zwei unmittelbar angrenzenden, höheren Klinikgebäuden war über der alten Stahlbetonrippendecke aus den 60er Jahren im Jahr 2011 ein neuer Dachaufbau mit einer Dämmung aus Mineralwolle, zweilagiger Polymerbitumenbahnabdichtung und Bekiesung verlegt worden. Anlässlich von Durchfeuchtungen und mehrfach vergeblicher Leckagesuche wurde der Kies vollständig entfernt. Im Juli 2015 wurde die Dachfläche von einem Sachverständigen untersucht. Dabei wurden mehrere Fehlstellen entdeckt. Der Dachaufbau wurde an mehreren Stellen geöffnet, Dämmstoffproben entnommen und Feuchtemessungen im Labor des AIBAU durchgeführt. Die Dämmstoffdicke lag bei ca. 30 cm. Die Proben wurden getrennt nach oberer, mittlerer und unterer Lage untersucht.



Bild 24
Offener Bahnenstoß bei Bitumenbahnabdichtung



Bild 25
Stark durchfeuchtete Mineralwollgedämmung und Wasser auf der Dampfsperrbahn

Eine Öffnungsstelle wurde bei einer eindeutigen Leckagestelle (offener Bahnenstoß) angelegt. Dort fand sich auf der Dampfsperrbahn stehendes Wasser. Der Dämmstoff aus Mineralwolle wies die in Tabelle 14 aufgeführten Feuchtegehalte auf. Bemerkenswert war, dass sich die Feuchte in der Mitte des Dämmstoffpakets konzentrierte. Die Öffnung erfolgte am späten Vormittag; die von Kies freigeräumte Dachbahn war bereits seit mehreren Stunden von der Sonne beschienen. Durch die Sonnenbestrahlung kann der obere Teil Dämmschichten bereits trockener geworden sein, Ein Diffusionsprozess ist allerdings zu langsam, um in einer so kurzen Zeit zu der gemessenen Feuchteverteilung zu führen.

Tabelle 14
Feuchtegehalte entnommener Dämmstoffproben in Masse-% und Vol.-%, Rohdichte ca. 150 kg/m³

		Masse-%	Vol.-%
MW	oben	134	20
	Mitte	363	54
	unten	181	27

Tabelle 15
Mittlere Feuchtegehalte von trockenen Dämmstoffproben, Rohdichte ca. 150 kg/m³

		Masse-%	Vol.-%
MW	1	0,37	0,06
MW	2	0,38	0,06
MW	3	0,31	0,05

Der Sachverständige empfahl, das Wasser von der Dampfsperrbahn abzusaugen und die feuchte Dämmung im Rahmen der Gewährleistungsverpflichtung des Dachdeckers gegen trockenen Dämmstoff auszutauschen, zudem der feuchte Dämmstoff auch keine nennenswerte Druckstabilität mehr aufwies.

An anderen Stellen der Dachfläche wurden ebenfalls Proben entnommen, die ebenfalls zum Teil feucht, aber auch zum Teil trocken waren. Ein vollständiger Austausch der gesamten Dämmung war daher nicht erforderlich. Die trockenen Dämmstoffe wiesen die in Tabelle 15 angegebenen Feuchtegehalte auf.

5. Umfrage

5.1 Ergebnisse der Sachverständigenumfrage (AIBAU)

Zur Ermittlung von Untersuchungsobjekten und zum Zusammentragen von Schadenserfahrungen an bereits ausgeführten Objekten wurde durch das AIBAU eine Umfrage unter 1.406 Sachverständigen durchgeführt. Es wurden öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige mit dem Bestellungsgebiet „Schäden an Gebäuden“ und Sachverständige des Dachdeckerhandwerks angeschrieben. 101 Antwortbögen wurden zurückgesandt (7,2 %).

5.1.1 Häufigkeit im Dachaufbau belassener, feuchter Dämmstoffe

66 Sachverständige (65% der Umfrageteilnehmer) haben in den letzten zehn Jahren keine Gebäude beurteilt, bei denen nach einer Instandsetzung feuchte Dämmstoffe im Dachaufbau belassen wurden.

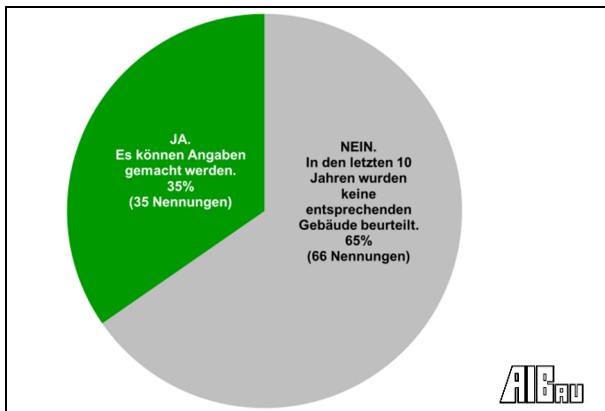


Bild 26

Verteilung der Erfahrungen mit belassenen, feuchten Dämmstoffen

35 Umfrageteilnehmer gaben an, dass sie zu insgesamt mehr als 182 Gebäuden mit feuchter Dämmung im instandgesetzten Flachdachaufbau Angaben machen können.

Die Anzahl der benannten Fälle schwankte hierbei zwischen einem und mehr als 10 Dächern pro Umfrageteilnehmer.

Die Auswertung der Umfrage zeigt, dass feuchte Dämmstoffe in den letzten 10 Jahren häufig ausgetauscht wurden. Als Gründe hierfür wurden von den Sachverständigen die unklare Rechtslage bei (Folge-)Schäden, eine unzureichende Erfahrung bezüglich der Langzeitbewährung dieser Konstruktion, ungenaue Materialkennwerte feuchter Dämmstoffe und die Bedenkenanzeigen der Ausführenden und Auftraggeber genannt.

Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den praktischen Erfahrungen der Verfasser: Relativ häufig wird die Entscheidung getroffen Dämmstoffe auszutauschen, wenn ein erhöhter Feuchtegehalt im Dachaufbau festgestellt wird.

5.1.2 Angaben zur Art der im Dachaufbau belassenen Dämmstoffe

Bei den im Dachaufbau belassenen Dämmstoffen (Bild 27) handelt es sich überwiegend (bei 89 der 99 Dächer mit Angaben zur Dämmstoffart, also ca. 90 %) um Schaumkunststoffe (EPS, XPS, PUR, PIR).

Mineralwolledämmungen sind bei mindestens acht Objekten im feuchten Zustand im Dachaufbau belassen worden (also bei ca. 8 % der 99 Dächer mit Angaben zur Dämmstoffart). Bei zwei Objekten wurden von den Sachverständigen „Sonstige Dämmstoffe“ angegeben, wobei es sich in einem Fall um eine Korkdämmung handelt. Zu den weiteren von den Umfrageteilnehmern benannten 83 Dächern liegen keine detaillierteren Angaben zur verwendeten Dämmstoffart vor.

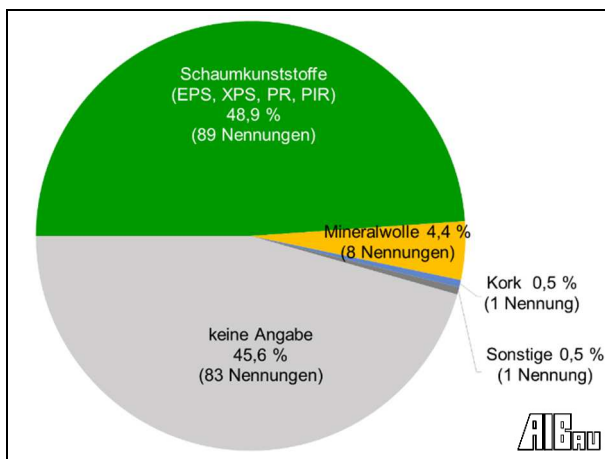


Bild 27

Im Dachaufbau belassene feuchte Dämmstoffe
(Angaben der Umfrageteilnehmer)

5.1.3 Schadenshäufigkeit und -ursachen

Schäden sind nach Angaben der Sachverständigen an ca. 8 % der insgesamt 192 instandgesetzten Dächer (15 Nennungen) von neun Umfrageteilnehmern festgestellt worden (Bild 28).

Als häufigste Ursache wurden für die erneuten Schäden (Bild 29) weitere, bislang unentdeckte/nicht abgedichtete Leckstellen in der alten Abdichtung angegeben (sieben Nennungen).

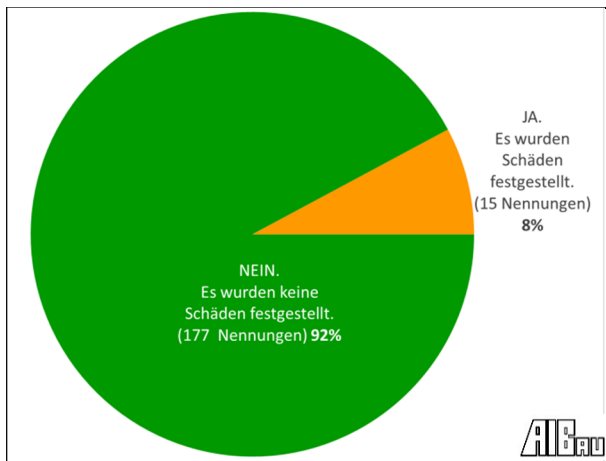


Bild 28
An den überdämmten Dächern traten in 8 % der Fälle erneut Schäden auf.

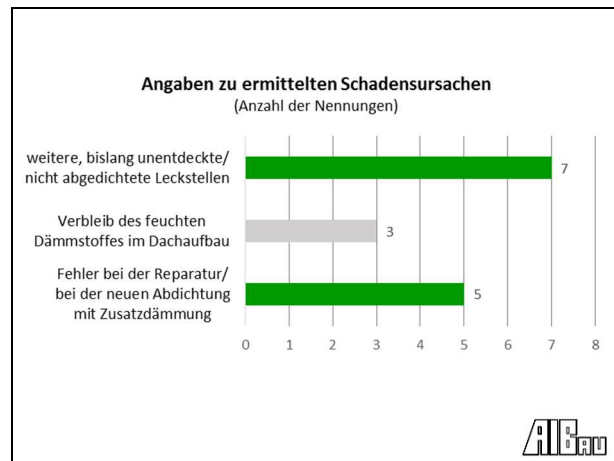


Bild 29
Von den Umfrageteilnehmern ermittelte Schadensursachen nach der Überdämmung

Des Weiteren sind Fehler bei der Reparatur bzw. bei der Überdämmung und Neuabdichtung der Flachdachflächen (fünf Umfrageteilnehmer) als Schadensursache ermittelt worden.

Auch der grundsätzliche Verbleib des feuchten Dämmstoffes im Dachaufbau wurde von drei Sachverständigen als Ursache benannt. Nach Rücksprache konnte geklärt werden, dass sich die Antworten auf folgende Fälle bezogen:

- ein Flachdach mit Zwischensparrendämmung mit Wasser auf der Dampfsperffolie
- drei verschiedene Schadensfälle eines Sachverständigen: in einem Fall hatte die Dampfsperrbahn verrottbare Einlagen, in einem zweiten Fall war der Trocknungserfolg durch Lüfter nach 2 Jahren gleich Null und erst die technische Trocknung brachte Erfolge, und auch im dritten Fall wurde eine fehlerhafte Dampfsperre festgestellt, durch die Wasser in den Innenraum eindringen konnte.
- Durchfeuchtungen traten an einem Flachdach aufgrund von Leckagen an Notüberläufen auf. Die stark durchfeuchtete Dämmung wurde anschließend vollständig abgeräumt.

Bei keinem dieser Fälle ging die Schadensursache vom durchfeuchteten Dämmstoff aus, sondern von neu aufgetretenen Leckagen oder nicht vollständig dichten Dampfsperrbahnen bzw. Notabdichtungen. In den letztgenannten Fällen kann es bei nicht überdämmten Dachaufbauten mit feuchten Dämmschichten durch Umkehrdiffusion weiter zum Ausfall von flüssigem Wasser auf der Dampfsperrebene kommen. Die Dampfsperre muss daher in diesen Fällen als Notabdichtung funktionstüchtig sein.

Nach Rückfragen bei den Umfrageteilnehmern wurden die oben genannten Objekte zum Teil untersucht (s. Kap. 3). An anderen Objekten konnten zwar keine eigenen Untersuchungen durchgeführt werden. Die Sachverständigen berichteten aber über ihre Erfahrungen, von denen einige im Folgenden dargestellt werden.

5.2 Erfahrungsberichte

5.2.1 Fall 1: Hochhausdach

Bei einem etwa 10 Jahre alten Verwaltungsgebäude war ein Flachdach mit PVC-Dachabdichtungsbahn ohne Gefällegebung ausgeführt. Die Dämmung bestand teils aus EPS, teils aus Mineralwolle. Das Gebäude war im PPP-Verfahren errichtet worden; es handelte sich also um einen Kommunalbau, der mit privaten Mitteln finanziert und errichtet wurde und bei dem die Kommune über einen Zeitraum von 20 Jahren Mieter ist, bevor das Gebäude dann an die Kommune als Eigentümer übergeben wird. Bei der Diskussion um den Feuchtezustand des Daches war daher auch der zukünftige Eigentümer bereits beteiligt.

Die Abdichtung hatte von Anfang an Mängel: es gab Rissbildungen und andere Fehlstellen sowie entsprechende Feuchtedurchtritte ins Gebäudeinnere. In Inspektionsöffnungen wurde ein Wasserstand von bis zu 2 oder 3 cm gefunden. Es wurde eine technische Trocknung durchgeführt. Durch eingebaute Feuchtesensoren sollte danach ein erneuter Wasserzutritt auf der Dampfsperrebene angezeigt werden. Das war nicht mehr der Fall. Die feuchte Dämmung sollte bei der geplanten Instandsetzung erhalten bleiben.

Untersuchungen vor Ort waren nicht möglich. Aufgrund der Komplexität des laufenden, gerichtlichen Verfahrens mit einer Vielzahl von Verfahrensbeteiligten konnten keine Unterlagen zur Verfügung gestellt werden.

Der Fall zeigt, dass es sinnvoll sein kann, durch den Einbau von Feuchtesensoren nachzuweisen, dass die Leckagen beseitigt sind und kein Wasser mehr nachströmt. Die Beobachtung kann auch durch den Einbau von Kontrollrohren und der regelmäßigen optischen Überprüfung der Dampfsperrebene an Tiefpunkten erfolgen, erfordert aber eine regelmäßige Begehung und Dokumentation der Feststellungen.

5.2.2 Fall 2: Gewerbehalle 80er Jahre

Das Dach einer Gewerbehalle aus den 80er Jahren besteht aus einem Stahltrapezblech mit einer Dämmung aus Mineralwolle und einer Abdichtung aus Kunststoffbahnen. Laut Auskunft des Eigentümers ist die Dämmung schon lange durchfeuchtet, aber immer noch druckstabil. Es ist vorgesehen, über der Mineralwollendämmung eine Zusatzdämmung und Zusatzabdichtung zu verlegen.

Es konnten weder Unterlagen eingesehen noch Untersuchungen am Objekt durchgeführt werden.

Bei einer Zusatzdämmung über Mineralwollendämmung würde es sich sicherlich um eine ungewöhnliche Maßnahme handeln. Die vorhandenen Werte der Druckspannung bei 10 % Stauchung sollten aber stichpunktartig gemessen und die entsprechenden Einsinktiefen dokumentiert werden, wie dies beispielhaft im Bericht [AIBAU/FIW 2012] gezeigt wurde. Auch die meist deutlich unterschiedliche Verteilung der Feuchtegehalte der Dämmung sollte im Sinne einer Bauzustandsdokumentation aufgenommen werden.

5.2.3 Fall 3: Wassereintrag während der Baumaßnahme

Bei einem im Jahr 2015 errichteten Neubau sind größere Mengen Wasser in die bereits verlegte Wärmedämmung aus EPS gelangt. Bei der Begutachtung wurde festgestellt, dass die Dämmung keine erheblichen Feuchtemengen aufgenommen hat. Zwar entsprach die verlegte Dämmung nicht der ausgeschriebenen Qualität. Eigentümer und Dachdecker konnten sich aber einigen. Die Dämmung wurde nicht ausgetauscht.

Die Zusendung von Unterlagen oder Gutachten konnte mangels Zustimmung der Beteiligten nicht erfolgen.

Erfahrungsgemäß nehmen Dämmstoffe aus Schaumkunststoffen alleine durch die zeitweise Wasserlagerung nur geringfügige Feuchtemengen auf (s. dazu auch Kap. 8). Eine erhebliche Feuchteaufnahme erfolgt meist erst durch den Diffusionsprozess über einen längeren Zeitraum. Daher sollte eingedrungenes Niederschlagswasser an den Tiefpunkten abgesaugt werden. Im Zuge der Abnahme kann der Feuchtegehalt an den entsprechenden Tiefpunkten kontrolliert und dokumentiert werden.

5.2.4 Fall 4: Leckagen durch Überdeckung der Dachhaut

Bei diesem Objekt wurden aus gestalterischen Gründen auf dem Flachdach, bestehend aus einer EPS-Gefälledämmung von 16 bis 24 cm Dicke und einer Kunststoffbahnabdichtung, Aluminium-Platten aufgeständert. Die einzelnen Befestigungspunkte wurden durch das Dachpaket bis zur Tragstruktur geführt. Diese Durchdringungsstellen waren allerdings offenbar nicht vollständig dicht, so dass bei der ersten Dachöffnung ein Wasserstand von ca. 2 cm auf der Dampfsperre vorgefunden wurde. Auch hier war die EPS-Dämmung noch nicht stark durchfeuchtet. Allerdings konnten die Leckstellen zunächst noch nicht vollständig detektiert werden.

Unterlagen konnten auf Grund des laufenden Verfahrens nicht zur Verfügung gestellt werden.

Bei jedem Schadensfall im Flachdachbereich ist selbstverständlich das Auffinden und Beseitigen von Leckstellen vorrangig, bevor über den Verbleib einer feuchten Dämmung im Einzelfall entschieden werden kann.

5.2.5 Fall 5: Beibehalten der Dämmung nach handwerklichen Kriterien

Ein Dachdecker berichtet von seinen Entscheidungskriterien zum Beibehalten der feuchten Dämmung auf dem Dach: Wenn auf der Dampfsperre Wasser steht, tauscht er die Dämmung aus, wenn nicht, kann sie nach seiner Auffassung beibehalten werden. Dann wird die neue Abdichtung über einer Zusatzdämmung mechanisch verankert.

Unterlagen zu den verschiedenen Objekten wurden nicht zugesandt.

Soll oder muss eine Zusatzabdichtung mechanisch verankert werden, wird dadurch die Dampfsperrebene durchstoßen. Das Wasser auf der Dampfsperrebene muss daher vorher entfernt werden und es muss sichergestellt sein, dass ggf. noch vorhandene Leckagen durch die neue Zusatzabdichtung vollständig beseitigt sind, d. h., dass ein Eintrag z. B. über Fußpunkte von Vormauerschalen oder ähnlichem ausgeschlossen ist.

5.2.6 Fall 6: Perforierung der alten Dachhaut

Ein Dachdecker berichtet von guten Erfahrungen bei verschiedenen Dachmodernisierungen über alten PUR-Dämmungen bei Dächern aus den 70er Jahren. Vor dem Aufbringen der Zusatzdämmung und -abdichtung führt er eine Perforierung der Dachhaut durch. Der Feuchtegehalt der alten PUR-Dämmung wurde allerdings nicht dokumentiert.

Neue Untersuchungen an den modernisierten Dächern, insbesondere im Hinblick auf eine Feuchteumlagerung vom alten in den neuen Dämmstoff, konnten nicht durchgeführt werden.

Im Bericht [AIBAU/FIW 2003] wurde empfohlen, auf eine Perforierung der alten Dachhaut zu verzichten, wenn eine neue Dämmschicht als Zusatzdämmung eingebaut wird. Diese Empfehlung ist in erster Linie im Hinblick auf die Gewährleistungsverpflichtungen des Dachdeckers gerichtet: Bei einer Perforation der alten Dachhaut muss davon ausgegangen werden, dass es einen nennenswerten Feuchtetransport über den Diffusionsweg von der alten, feuchten Dämmung in die neue, trockene Dämmschicht hinein gibt. Der Nachweis, dass die neue Zusatzabdichtung fehlerfrei verlegt wurde, ist dadurch erschwert. Für die Dämmwirkung des Gesamtpakets ist es allerdings nur von geringer Bedeutung, ob sich die eingeschlossene Feuchte nur auf die alte Dämmung beschränkt oder sich über das gesamte Dämmpaket aus alter und neuer Dämmschicht verteilt.

5.2.7 Fall 7: Technische Trocknung

Ein Sachverständiger empfiehlt häufig eine technische Trocknung bei Flachdächern sowie den Einbau von Dachlüftern zur Kontrolle des Wasserstands auf der Dampfsperrbahn. Bislang seien keine Rückmeldungen negativer Art bekannt geworden. Beim technischen Trocknen vor Ort wird dabei etwa alle 20 m² ein Trocknungsstutzen für das Einblasen bzw. Absaugen der Luft gesetzt und der Feuchtegehalt der austretenden bzw. abgesaugten Luft kontinuierlich gemessen.

Unterlagen zu Trocknungsprotokollen oder sonstige Dokumentationen des Trocknungserfolgs konnten allerdings nicht übermittelt werden.

Im Rahmen des Berichts [AIBAU/FIW 2012] wurden auch Trocknungsfirmen befragt, welche Erfahrungen sie mit der Trocknung von Mineralwolle in Flachdächern haben. Die Reaktionen waren eher verhalten. Eine Trocknung von Dämmstoffen in einem Flachdach erfordert einen hohen Energie- und Zeitaufwand und ist mit der Herstellung einer Vielzahl von Durchdringungen verbunden, die sowohl für den Zeitraum der Trocknung als auch nach Abschluss der Trocknung dauerhaft abgedichtet werden müssen. Dokumentationen über positive Trocknungserfolge konnten von den Trocknungsfirmen nicht vorgelegt werden. Der Trocknungserfolg hängt auch mit dem Strömungswiderstand innerhalb des Dachpakets zusammen. Es ist davon auszugehen, dass weder Mineralwollgedämmstoffe noch Schaumkunststoffe beim Trocknen in nennenswertem Umfang mit Luft durchströmt werden. Die Fugen zwischen Dämmplatten können aber zu einem Feuchteabtransport beitragen. Die Reduzierung des Feuchtegehalts der austretenden Luft bedeutet nicht zwingend, dass auch die Dämmplatten trocken sind. Stark durchfeuchtete Dämmplatten benötigen auch im Trockenofen im Labor bei 70 °C mehrere Tage, bis sie trocken sind. Immerhin kann man aber wohl davon ausgehen, dass bei einer technischen Trocknung vor Ort kein großes Wasserreservoir mehr auf der Dampfsperrebene verbleiben ist. Große Wassermengen können allerdings auch direkt – am besten an Tiefpunkten – abgesaugt werden.

5.2.8 Fall 8: Dachfläche mit Haustechnik-Aufbauten

Bei einem im Jahr 2008 errichteten Gebäude waren auf dem Flachdach Anlagen der Gebäudetechnik montiert. Nach einem Feuchteschaden wurde versucht, die feuchte EPS-Dämmung über Kontrollrohre zu entfeuchten und die Leckagestelle einzugrenzen. Im Rahmen der Untersuchung für ein Sanierungsgutachten hat man jedoch den immer noch hohen Feuchtegehalt der Dämmstoffe festgestellt. Die Dachabdichtung wurde inklusive der Dämmung vollständig erneuert.

Unterlagen zu dem Dach konnten nicht übermittelt werden.

Die Überbauung einer Flachdachfläche mit gebäudetechnischen Anlagen bedeutet nicht nur für die Instandhaltung der Dachabdichtung, sondern erst recht für eine vollständige Instandsetzung bzw. Erneuerung einen deutlich höheren Aufwand. Daher sollten alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden, um Abdichtung und Dämmung zu erhalten und die Leckagestelle, z. B. durch Beobachtungen über Kontrollrohre (s. Kap. 5.2.2) und den Einbau von Abschottungen, einzugrenzen. Wenn die Leckagestelle gefunden ist, kann der Aufbau auch mit einer feuchten Wärmedämmung und Abdichtung ggf. erhalten werden.

5.2.9 Fall 9: Rissbildungen über Dämmplattenstößen

Ein Dachdecker hat aus der Erfahrung, dass Rissbildungen über Dämmplattenstößen aufgetreten sind, die persönliche Konsequenz gezogen, als untere Lage einer bituminösen Abdichtung Polymerbitumenbahnen, die eigentlich als obere Lage eingesetzt werden, mit der Besplittungsseite nach unten einzubauen. Vor etwa 10 Jahren wurden auf diese Art zwei Dächer modernisiert mit Aufdachdämmung und Zusatzabdichtung. Die feuchten Altdächer wurden geöffnet, Wasser wurde abgesaugt, und es wurden Ventillüfter eingebaut zur Revision und Austrocknungsförderung.

Dokumentationen über die Dächer konnten nicht zugesandt werden.

Da die Dachflächen bekiest werden und kein Haftverbund zwischen Abdichtung und Dämmung erforderlich ist, ist die Verwendung einer Besplittungsschicht als Trennlage ungewöhnlich, aber sicher in gewisser Weise wirksam. Ein Vlies

wäre allerdings eine eindeutigere Trennlage. Inwieweit die Verwendung der unterseitig besplitteten Bahn eine Luftschicht bewirkt, die zur Entfeuchtung beiträgt, kann nicht beurteilt werden.

5.2.10 Fall 10: Trocknung durch offene Lagerung

Bei einem Holzflachdach war eine Aufdachdämmung aus PUR-Platten verlegt worden. Darüber war eine Flüssigkunststoffabdichtung aufgebracht worden. Die PUR-Dämmung war nach 2 - 3 Jahren deutlich durchfeuchtet. Die Abdichtung wurde entfernt, die Dämmplatten lagen daraufhin im Sommer bei Niederschlagsfreiheit mehrere Tage offen. Nach der Einschätzung des Dachdeckers war die Dämmung anschließend spürbar trockener. Als Dachabdichtung wurde erneut eine Flüssigkunststoffabdichtung eingebaut.

Unterlagen zu dem Objekt konnten nicht zugesandt werden.

Die beschriebene Erfahrung des Dachdeckers kann leider nicht durch Messwerte des ursprünglichen Feuchtegehalts und des Trocknungseffekts durch die offene Lagerung belegt werden. Diese ungewöhnliche Trocknungsmethode kann aber wirksam sein und ist insbesondere bei einer als Notabdichtung funktionstüchtigen Dampfsperbahn auch durchführbar, wenn die Windsogsicherung der Dämmplatten sichergestellt ist. Dämmungen aus Schaumkunststoffen sind allerdings nicht UV-stabil, so dass eine länger andauernde Trocknung an der Luft die Dämmplatten schädigen kann.

5.2.11 Fall 11: Austrocknung durch Perforation

Das Dach einer im Jahr 1985 errichteten Gewerbehalle wies über einem Trapezblech und einer Aluminium-Dampfsperbahn eine Wärmedämmung aus unkaschierten PUR-Platten sowie eine zweilagige bituminöse Dachabdichtung auf. Rissbildungen in der Abdichtung führten zur Durchfeuchtung des Dachaufbaus. Als Instandsetzungsmaßnahme des feuchten Dachaufbaus wurde empfohlen, dass die Dachabdichtung perforiert wird, so dass der Dämmstoff austrocknen kann, und anschließend mit einer Flüssigkunststoffabdichtung versehen wird. Da diese mit einem s_d -Wert von ca. 20 m einen für Abdichtungen relativ geringen Diffusionswiderstand aufwies, wurde eine Austrocknung der Dämmstoffe erwartet. Der Auftraggeber wurde allerdings darauf hingewiesen, dass es zur Blasenbildung der Abdichtung über den Perforationsstellen kommen kann. Dieser Effekt trat dann auch ein.

Der ursprüngliche Feuchtegehalt der Dämmplatten wurde nicht gemessen. Eine Dämmplatte wurde für den vorliegenden Untersuchungsbericht ausgebaut und zugesandt. Der Feuchtegehalt wurde per Darr-Messung im Labor zu 2,37 Masse-% bzw. 0,06 Vol.-% bei 25,75 kg/m³ Rohdichte bestimmt. Der zugesandte Dämmstoff kann demnach als trocken bezeichnet werden.

Weitere Unterlagen zum Objekt wurden nicht zugesandt.

Da der ursprüngliche Feuchtegehalt nicht gemessen und dokumentiert wurde, kann der Umfang der Austrocknung nicht quantifiziert werden. Die gewählte Art der Trocknung ist auch mit einem hohen Ausführungsrisiko verbunden, weil die Flüssigabdichtung über den Perforationsstellen erheblich mechanisch beansprucht wird, wenn es dort zur Blasenbildung kommt. Auf die Trocknungserfolge, die alleine über die Diffusion durch Abdichtungsschichten hindurch zu erwarten sind, wird in Kap. 10.6.1 näher eingegangen. Im beschriebenen Fall müsste die perforierte Fläche mit der nicht perforierten Fläche ins Verhältnis gesetzt werden. Ein deutlicher Trocknungserfolg dürfte demnach nicht zu erwarten sein, weil durch die noch immer überwiegende Fläche mit der nicht perforierten Altabdichtung keine nennenswerte Diffusion erfolgt und die Vorstellung, dass sich der Diffusionsstrom zu den Flächen mit geringerem Diffusionswiderstand verlagert, offensichtlich nicht zutreffend ist: Bei Dachöffnungen werden immer wieder sehr unterschiedliche Feuchtegehalte in auch eng beieinander liegenden Dämmstoffen vorgefunden. Da der Diffusionsstrom lediglich durch den niedrigen Teildampfdruckunterschied zwischen zwei durch Temperatur und relativer Feuchte bedingte Klimabedingungen angetrieben und durch den Diffusionswiderstand der Dämmschicht begrenzt wird, sprechen sowohl der niedrige Teildampfdruckunterschied als auch

der hohe Diffusionswiderstand „langer“ Dämmschichtwege gegen einen nennenswerten Diffusionsstromtransport in horizontaler Richtung. Eine entsprechende „Nivellierung“ des Feuchtegehalts in langfristig durchfeuchteten Dächern konnte daher bislang nicht beobachtet werden.

5.2.12 Fall 12: Austrocknung durch Lüfter in Kehlen

Der Dachaufbau einer Gewerbehalle mit hohen Innenraumtemperaturen bestand aus einem Trapezblech, einer Dampfsperre, Mineralwolledämmung und einer Kunststoffbahnabdichtung. Es gab sehr viele Durchdringungen für Installationen. Aufgrund von Durchfeuchtungen wurde die Dachhaut vielfach nachgebessert. Die Durchfeuchtungen der Dämmplatten konzentrierten sich auf die Kehlbereiche. Dort wurden Dachlüfter installiert. Die Dämmungen seien nach Ablauf eines Jahres wieder trocken gewesen.

Unterlagen zum Objekt wurden nicht zugesandt.

Bei dem geschilderten Fall handelt es sich um eine typische Schadenssituation, auf die in der beschriebenen Art und Weise gut reagiert werden kann. Es ist davon auszugehen, dass bei einer entsprechenden Gefällegebung das im Dachpaket eingeschlossene Wasser im Sommer durch Umkehrdiffusion auf der Dampfsperrbahn kondensiert und nach und nach in Richtung Tiefpunkt sickert. Daher kann im Kehlbereich das eingetretene Wasser abgesaugt und so eine effektive Trocknung, die auch auf die restliche Dachfläche einwirkt, erzielt werden.

5.2.13 Fall 13: Beibehaltung feuchter Dämmstoffe

Mehrere Sachverständige berichten von vielfacher Beibehaltung feuchter Dämmstoffe und Aufbringen neuer Zusatzdämmung und -abdichtungen. In der Regel wurden aber keine Feuchtegehalte dokumentiert, insbesondere, wenn die Dämmung schon offensichtlich stark durchfeuchtet war und der Aufwand einer Messung daher nicht angemessen erschien. In den meisten Fällen wurden auch aus verschiedenen Gründen keine Unterlagen zu den Dächern zugesandt. Auch die Möglichkeit, bei den Dächern Probeöffnungen durchzuführen, war nur selten gegeben. Von Schäden, bei denen die Beibehaltung von feuchten Dämmstoffen als solche ursächlich war, wurde in der Umfrage nicht berichtet.

5.3 Zusammenfassung der Umfrageergebnisse

Die Umfrage hat ergeben, dass eine Beibehaltung durchfeuchteter Dämmstoffe immer noch nicht der Regelfall bei Dachinstandsetzungen oder Modernisierungen ist. Andererseits haben diejenigen, die über Erfahrungen mit Flachdächern verfügen, bei denen feuchte Dämmstoffe belassen wurden, weitaus überwiegend positiv berichtet.

Fälle, bei denen belegt werden konnte, dass ein Verbleib feuchter Dämmstoffe im Dachaufbau mit anschließender Überdämmung und Abdichtung zu neuen Schäden geführt hat, wurden nicht benannt. Sie sind den Verfassern auch aus eigener gutachterlicher Tätigkeit nicht bekannt.

Davon ausgenommen sind Fälle, bei denen die Schadensursache noch nicht festgestellt und die Entscheidung über den Verbleib noch nicht getroffen wurde.

Angaben zu Feuchtegehalten und zur Feuchteverteilung im Dach vor der Überdämmung konnten von keinem Umfrageteilnehmer gemacht werden, obwohl eine entsprechende Dokumentation sowohl in der Abdichtungsnorm [DIN 18531:2017-07] sowie in der [Flachdachrichtlinie 2016] gefordert ist, wenn feuchte Dämmstoffe belassen werden sollen.

Die Ergebnisse der Vor-Ort-Untersuchungen und Dämmstoff-Untersuchungen wurden bereits in Kap. 4 dokumentiert. Aus den Erfahrungsberichten der Umfrageteilnehmer und den damit im Zusammenhang stehenden Fragestellungen wurden die Praxisempfehlungen in Kap. 10 zusammengestellt.

6. Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit

Bei Baustoffen, die wärmedämmende Funktionen aufweisen, verringert sich der Wärmedurchlasswiderstand unter dem Einfluss von Feuchtigkeit. Zur Festlegung entsprechender Zuschlagswerte wurden schon in den 1960er Jahren die Änderungen der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt der Baustoffe untersucht.

6.1 Zusammenstellung von Messwerten 1984 [Achtziger/Cammerer 1984]

Eine erste umfassende Zusammenstellung entsprechender Laboruntersuchungen und -messungen ist in [Achtziger/Cammerer 1984] erfolgt. Dabei handelt es sich um unterschiedliche Quellen aus in- und ausländischen Veröffentlichungen, aus eigenen Messungen des FIW, aus Firmenaufträgen und aus eigenen Messungen der Hersteller.

Im Hinblick auf die Bestimmung von Rechenwerten für die Wärmeleitfähigkeit sind diese Messungen praktikabel und unmittelbar anwendbar. In dem Bericht wird erläutert: „Die in dieser Arbeit zusammengefassten Messergebnisse sind zum großen Teil im Bereich des hygroskopischen und praktischen Feuchtegehalts ermittelt worden, so dass der gefundene Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit auch für diesen Bereich gilt.“ Das bedeutet allerdings gleichzeitig, dass die Ergebnisse nur bedingt für höhere Feuchtegehalte, wie sie bei den in den Kapiteln 3.4 und 4 genannten, unplanmäßigen Feuchteinträgen zustande kommen, zu verwenden sind.

Es wird darauf hingewiesen, dass das Messverfahren der damals gültigen Norm [DIN 52612-1:1979-09] mit einer Temperaturdifferenz von 10 bis 20 K bei eingeschlossener Feuchte dazu führt, dass sich die Feuchte an der Kühlplatte anlagert. Die Messergebnisse führen so zu niedrigen Messergebnissen, die für die Praxis nicht zuträfen. Daher sei das Verfahren nur bei trockenen Dämmstoffen anzuwenden.

Zur Messung feuchter Dämmstoffplatten hatte das FIW ein eigenes Messverfahren entwickelt, bei dem nur ein Temperaturgradient von 0,2 bis 0,4 K/cm eingestellt wird, bei 5 cm Dämmstoffdicke entspricht dies 1 bis 2 Kelvin (K). Außerdem wurde nur das Einplattenverfahren mit dem Wärmestromverlauf von unten nach oben angewandt, um untypische Einflüsse der Schwerkraft auszuschließen.

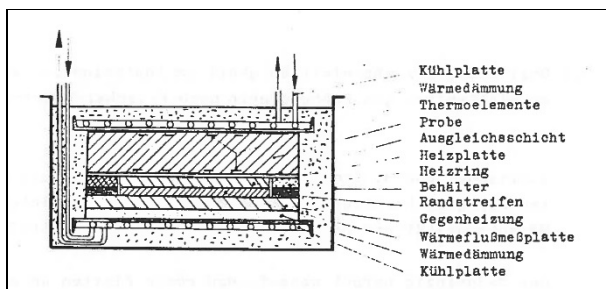


Bild 30

Messanordnung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von feuchten Stoffen (Einplattengerät mit kleinem Temperaturgefälle in der Probe) aus [Achtziger/Cammerer 1984]

Die Wärmestrommessung erfolgte an der unteren, d. h. der warmen Seite der Dämmstoffprobe. Die Temperaturrandbedingungen waren stationär.

6.2 Messverfahren mit instationären Randbedingungen

Instationäre Messverfahren wurden schon im Jahr 1955 von Krischer und Esdorn entwickelt ([Achtziger/Cammerer 1984], S. 6). Im trockenen Zustand der Proben wurden die gleichen Wärmeleitfähigkeiten wie mit dem Plattengerät gemäß [DIN 52612-1:1979-09] gemessen. Aus den Messungen im feuchten Zustand konnten keine eindeutigen Schlussfolgerungen gezogen werden.

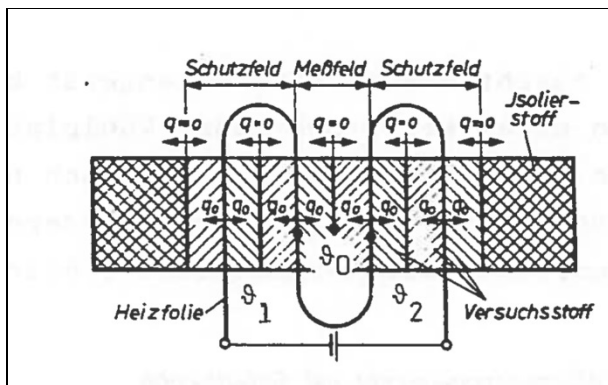


Bild 31

Messanordnung für instationäre Messungen aus [Achtziger/Cammerer 1984] bzw. [Krischer 1962]

Vergleichsmessungen von Paljak in Stockholm im Jahr 1967 an Porenbeton lieferten vergleichbare Ergebnisse zwischen stationären und instationären Messmethoden im feuchten Zustand, waren aber auch noch nicht aussagekräftig genug. Vergleichsmessungen zwischen Kurzzeitmethode und Einplattengerät an der TH Darmstadt und beim FIW München führten im Jahr 1968 zu der Erkenntnis, dass vergleichbare Messergebnisse zwar für einige mineralische Baustoffe zustande kamen, jedoch nicht für Dämmstoffe mit hohen Wasserdampf-Diffusionswiderständen. Daraus wurde gefolgert, dass die Kurzzeitmethode nur ein Anlaufstadium erfasse und daher die stationäre Methode mit dem Plattengerät eher die tatsächlichen Verhältnisse an ausgeführten Bauten abbilde.

6.3 Andere Messverfahren

In [Achtziger/Cammerer 1984] wird auch das Heizkastenverfahren nach [DIN 52611-1:1991-01] beschrieben, bei dem die Proben zwischen zwei Räumen mit unterschiedlichen, konstanten Temperaturen eingebaut werden. Die Feuchtigkeit kann dabei während des Messvorgangs sowohl zur kalten als auch zur warmen Seite hin austrocknen, da die Proben nicht mit Messplatten abgedeckt sind. Von (Schüle/Jenisch/Greulich 1976) wurden bei der Messung von feuchten Materialien mit relativ geringen Diffusionswiderständen höhere Wärmeleitfähigkeiten gemessen.

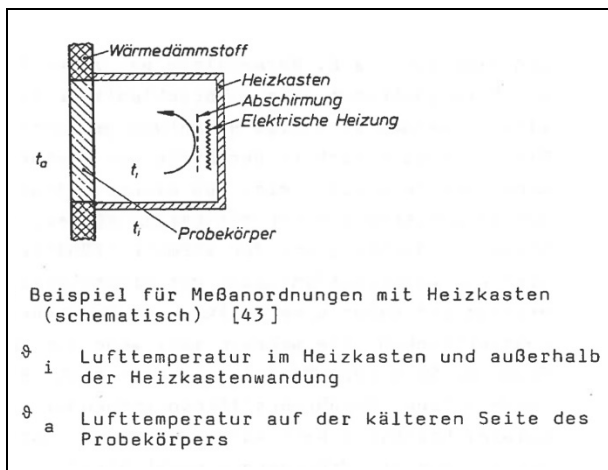


Bild 32

Messanordnung mit Heizkasten (schematisch) aus [Achtziger/Cammerer 1984] bzw. [DIN 52611-1:1991-01]

6.4 Ergebnisse von Wärmeleitfähigkeitsmessungen 1984

Die Darstellung der Messwerte erfolgt in [Achtziger/Cammerer 1984] auf verschiedene Weise. Der Feuchtegehalt wird entweder auf die Masse oder auf das Volumen des untersuchten Materials bezogen. Der Zusammenhang ist durch folgende Formel leicht herzustellen:

$$u_M = u_V \cdot \rho_W / \rho_R \quad \text{bzw.} \quad u_V = u_M \cdot \rho_R / \rho_W$$

mit

u_M : Feuchtegehalt, massebezogen

u_V : Feuchtegehalt, volumenbezogen

ρ_W : Rohdichte von Wasser (1.000 kg/m³)

ρ_R : Rohdichte des Probekörpers (Quotient aus der Masse und seinem Volumen einschließlich Poren, jedoch ausschließlich etwa vorhandener Hohlräume, wie Löcher, Mörteltaschen usw.)

Die Messwerte werden entweder in einem λ, u -Diagramm oder in einem λ, v -Diagramm dargestellt, d. h. die Wärmeleitfähigkeiten sind entweder auf die Masse oder das Volumen des Probekörpers bezogen. Durch statistische Analysen wird eine lineare Funktion ermittelt und als Kurvenverlauf dargestellt.

In Bezug auf die Wärmedämmstoffe werden die Ergebnisse als Grafiken dargestellt. In den Bildern Bild 33 bis Bild 36 werden die Kurvenverläufe der Wärmeleitfähigkeit in Bezug auf das Volumen der Dämmstoffe dargestellt.

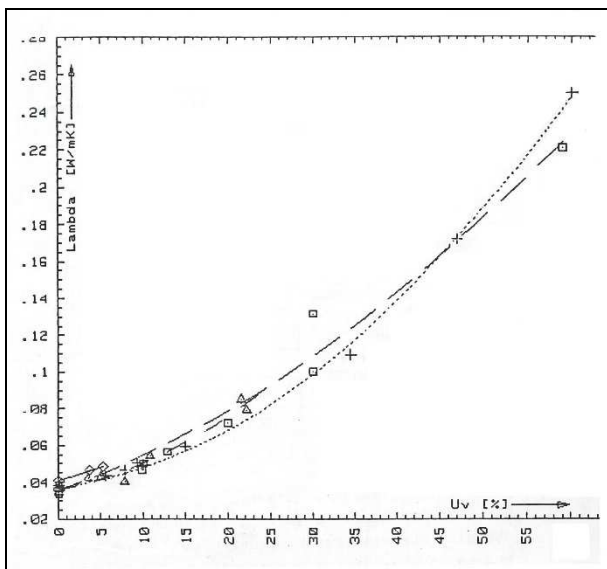


Bild 33
Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt bei Wärmedämmung aus EPS (expandiertem Polystyrol) aus [Achtziger/Cammerer 1984]

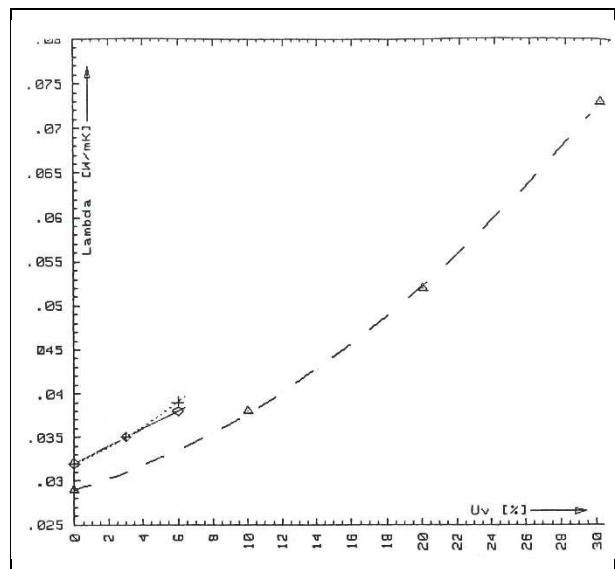


Bild 34
Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt bei Wärmedämmung aus XPS (extrudiertem Polystyrol) aus [Achtziger/Cammerer 1984]

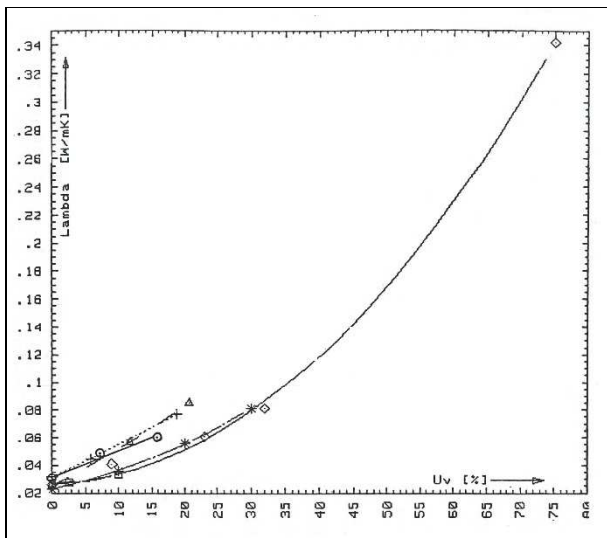


Bild 35
Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt bei Wärmedämmung aus PUR (Polyurethan) aus [Achtziger/Cammerer 1984]

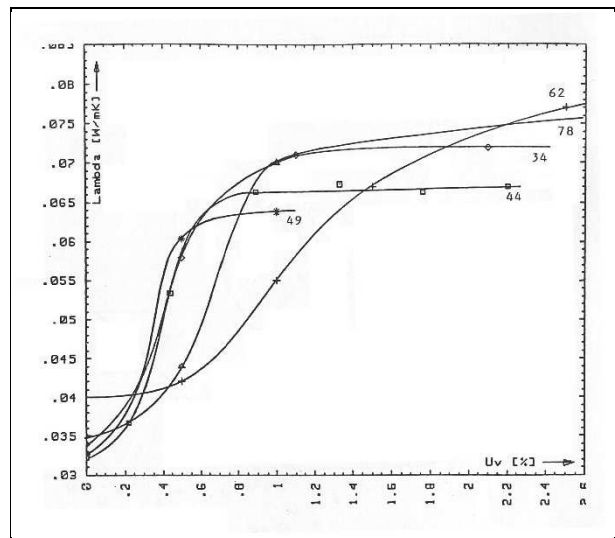


Bild 36
Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt bei Wärmedämmung aus Mineralwolle aus [Achtziger/Cammerer 1984]

6.5 Rechnerische Ermittlung der Wärmeleitfähigkeitsänderungen

Die Ergebnisse der Messungen an feuchten Dämmstoffen konnten zum Teil als mathematische Funktionen beschrieben werden, was zur Festlegung entsprechender Umrechnungsfaktoren führte. Diese wurden z. B. in [Götze/Frank/Hardell/Mahel/Steiner 1992] zusammengestellt und stehen auch im aktuellen Normenwerk zur Verfügung.

Mit Hilfe der [DIN EN ISO 10456:2010-05] kann die Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Dämmstoffs wie folgt abgeschätzt werden:

- a) Feuchtegehalt der Dämmstoffprobe in Masse-% ermitteln (durch Darren im Labor oder mittels Gewichtsvergleich zwischen trockenem und feuchtem Dämmstoff vor Ort.

- b) Umrechnung in Volumen-% nach folgender Formel:

Volumen-% = Masse-% des trockenen Baustoffs * Rohdichte des trockenen Baustoffs / Rohdichte von Wasser
oder

$$\chi = u \cdot \rho_0 / \rho_w$$

- c) Ermittlung des Feuchteumrechnungsfaktors F_m auf Grundlage des in Tab. 4 der Norm angegebenen Feuchteumrechnungskoeffizienten f_ψ anhand der Formel

$$F_m = e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)}$$

wobei als Differenz zwischen den beiden Feuchtegehalten ψ_2 und ψ_1 der Feuchtegehalt in Vol.-% eingesetzt werden kann.

- d) Multiplikation der Wärmeleitfähigkeit mit dem ermittelten Feuchteumrechnungsfaktor F_m .

Zu beachten ist dabei, dass diese Umrechnung bislang nur für Feuchtegehalte in einem definierten Rahmen gilt. Bei darüber hinausgehenden Feuchtegehalten müssen diese ggf. mit Werten aus entsprechenden Vergleichsmessungen verglichen werden.

Die so ermittelten Wärmeleitfähigkeiten sollten bei den vorliegenden Laboruntersuchungen daraufhin überprüft werden, ob sie sich auch bei der Untersuchung aktueller Dämmstoffe noch als gültig erweisen oder ob sie ggf. angepasst oder differenziert werden müssen.

Beispiele für die Umrechnung typischer Wärmeleitfähigkeiten und typischer Feuchtegehalte sind bei der Beschreibung der Dämmstoffe in Kap. 8 dieses Forschungsberichts enthalten.

6.6 Validierungen für XPS-Dämmplatten [IBP/FIW 2014]

In Freilandversuchen und mit daraus validierten hygrothermischen Berechnungen wurden die Feuchtezuschläge für XPS-Dämmplatten überprüft, die in DIN EN ISO 10456 aufgeführt und über 20 Jahre alt sind. Der Anlass dazu waren Untersuchungen an Umkehrdächern und die Frage, inwieweit sich die Wärmeleitfähigkeitseigenschaften aufgrund neuer Treibmittel für XPS sowie damit zusammenhängenden Verringerungen der sd-Werte verändert haben.

Die Dämmplatten wurden bei den Laboruntersuchungen gemäß [DIN EN 12088:2013-06] im Diffusionsverfahren auf bis zu 4,39 Vol.-% befeuchtet. Die Wärmeleitfähigkeitsmessung erfolgte bei einer Mitteltemperatur von 10 °C. Die angelegte, stationäre Temperaturdifferenz wurde bei der Referenzmessung im trockenen Zustand auf 15 K festgelegt und im feuchten Zustand auf 9,5 K reduziert, um den Einfluss von Feuchtetransportvorgängen im Dämmstoff zu minimieren.

Die Autoren der Untersuchung [IBP/FIW 2014] kommen zu dem Schluss, dass der Umrechnungskoeffizient f_ψ von 2,5 beibehalten werden kann, weil die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Wassergehalt auch bei den neueren

Dämmstoffen in einer entsprechenden Bandbreite liegt. Die Autoren weisen auch darauf hin, dass die Streuung der Feuchtegehalte bei Probenahmen in bestehenden Dächern je nach örtlichen Besonderheiten wie Pfützenbildung bzw. Wasseranstau an Überlappungsstößen der Dachbahnen oder zwischen verschatteten und unverschatteten Bereichen variiert. Daher sollte sich der Umrechnungskoeffizient nicht an Extremwerten orientieren sondern am praktischen Mittelwert, der durch den bestehenden Zuschlagskoeffizient gut abgebildet wird. Bei höheren Innenraumtemperaturen als in Wohn- und Büroräumen üblich müsse aber eine gesonderte Ermittlung der Zuschlagswerte erfolgen.

7. Laboruntersuchungen

Um die aus früheren Untersuchungen vorliegenden Ergebnisse (siehe Kapitel 6) zu validieren und ggf. zu erweitern, wurde an einer Reihe exemplarisch ausgewählter Flachdachdämmstoffe die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts unter stationären und instationären Bedingungen untersucht. Da im Schadensfall unter realen Bedingungen bei langfristig erhöhten Feuchtegehalten auch noch andere Alterungseffekte wie Zelldeformationen und Verschmutzungen auftreten können, werden ergänzend zu den Untersuchungen an neuen Dämmstoffproben bei unterschiedlichen Feuchtegehalten auch Entnahmeprobe aus realen Schadensfällen untersucht.

Im Folgenden werden zunächst Vorüberlegungen zur Wahl der Randbedingungen bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären und instationären Bedingungen vorgestellt. Im Anschluss werden das untersuchte Material und die angewendeten Methoden einschließlich der Auswertung beschrieben. Das Kapitel schließt mit der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse.

7.1 **Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe unter stationären und instationären Temperaturbedingungen**

Die natürliche Transportrichtung der Wärmeenergie verläuft stets gemäß des Fourierschen Gesetzes von der höheren zur niedrigeren Temperatur und ist auf drei Wärmeübertragungsmechanismen zurückzuführen. Diese sind die Wärmeleitung, also die Übertragung kinetischer Energie zwischen benachbarten Atomen und Molekülen im Feststoff ($\lambda_{c,s}$) und im gasgefüllten Porenraum ($\lambda_{c,g}$), die Wärmeströmung, also die mitgeführte innere Energie eines strömenden Fluids (λ_{co}) und die Wärmestrahlung, also elektromagnetische Wellen zwischen 0,8 – 800 μm (IR-Strahlung) die nicht an Materie gebunden ist (λ_r) [Schild und Willems 2011]. Das Zusammenwirken der drei Wärmetransportvorgänge in einem porigen Festkörper wird auch als äquivalente Wärmeleitfähigkeit (λ_{eq}) (1) bezeichnet, die neben den genannten Anteilen auch noch von Koppelungseffekten λ_{ce} bestimmt wird, die in den Zwickeln der punktuellen Kontakte, die dort wirkenden thermischen Widerstände durch enthaltene (Rest-) Luftmoleküle oder adsorbierte Wassermoleküle herabsetzen [Sprengard und Spitzner 2011].

$$\lambda_{eq} = \lambda_{c,s} + \lambda_{c,g} + \lambda_r + \lambda_{co} + \lambda_{ce} \quad (1)$$

Im Folgenden wird der Begriff Wärmeleitfähigkeit der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit gleich gesetzt.

Die den einzelnen Anteilen zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung sind in der Literatur einschlägig beschrieben. Dämmstoffe sind stets poröse Produkte – enthalten also viele kleine, möglichst gegeneinander abgeschlossene Kavitäten, die mit Luft (oder anderen Gasen) gefüllt sein können oder auch weitgehend evakuiert sind (z. B. Vakuum Isolations Paneele (VIP)). Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe haben nach [Cammerer 1995]:

- Wärmeleitfähigkeit der festen Bestandteile
- Porosität / Rohdichte
- Art, Größe, Anordnung der Poren und ggf. die anliegenden Temperaturdifferenzen
- Art des Porengases, Gasdruck in den Poren, Gasdurchlässigkeit der Porenwände

- Strahlungseigenschaften der Begrenzungswände der Poren
- Temperatur und Wasser-/Feuchtegehalt

Viele der genannten Einflussfaktoren auf die Wärmeleitfähigkeit können sich im Laufe der Nutzung je nach den Randbedingungen der Anwendung ändern. Durch Hydrolyse oder Temperatureinfluss kann sich die Struktur des Feststoffgerüsts ändern. Eventuell vorhandene Auflasten können die Rohdichte und damit auch die Größe der Porenräume beeinflussen. Durch die Anlagerung von Feuchtigkeit und auch durch Verschmutzungen können sich die Strahlungseigenschaften der Oberflächen verändern. Der unter baupraktischen Gesichtspunkten entscheidendste Einfluss ist jedoch der Feuchtegehalt des Dämmstoffs.

7.1.1 Der Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit

Eine Erhöhung des Feuchtegehalts ist dabei nicht nur im Schadensfall möglich, sondern kann auch je nach Innenraumnutzung, Konstruktion und Standort des Gebäudes einer jahreszeitlichen Schwankung unterworfen sein. Aus diesem Grund wird in Deutschland üblicherweise die Wärmeleitfähigkeit bei einem Ausgleichsfeuchtegehalt bei 23°C / 80 % r. F. (23/80), bzw. auf europäischer Ebene bei 23°C / 50 % r. F. (23/50) angegeben.

Eine Erhöhung des Feuchtegehalts beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen aufgrund unterschiedlicher Effekte. Dabei muss wieder unterschieden werden, ob sich das Material im temperatur- und feuchtetechnischen Gleichgewicht befindet, oder nicht. Im einen Fall liegen also stationäre, im anderen Fall instationäre Bedingungen vor.

Im Weiteren muss unterschieden werden ob Wasser am Feststoffgerüst adsorbiert ist, oder als freies flüssiges Wasser in den Porenräumen auftritt.

Unter stationären Bedingungen bewirkt die eingelagerte Feuchtigkeit in erster Linie eine Erhöhung der Wärmeleitung in den Zwickeln der Kontaktpunkte und setzt die dort herrschenden Wärmeübergangswiderstände herab, bzw. schließt bei Auffüllung kleinerer Kavitäten benachbarte Partikel wärmetechnisch kurz. In Bild 37 sind nochmal die Wärmeübertragungsmechanismen und der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Wärmeübertragung im Feststoffgerüst schematisch dargestellt.

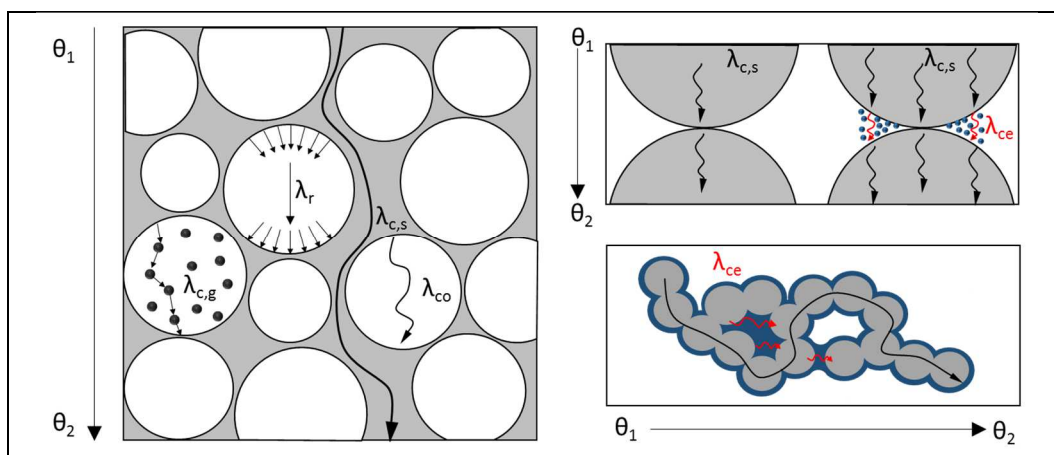


Bild 37

Links: Wärmeübertragung in einem porösen Material ($\lambda_{c,g}$ = Wärmeleitfähigkeit in der Gasphase, $\lambda_{c,s}$ = Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs, λ_r = Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung in den Porenräumen, λ_{co} = Wärmeübertragung durch Konvektion (in Anlehnung an Schild und Willems 2011);

Rechts oben: Verringerung des Wärmeübergangswiderstandes zwischen zwei Partikeln durch adsorbiertes Wasser;

Rechts unten: Kurzschluss zwischen Partikeln durch adsorbiertes oder flüssig vorliegendes Wasser

Liegt Wasser in den Porenräumen in flüssiger Form vor, so sind die oben beschriebenen Effekte verstärkt. Im Extremfall einer komplett unter Wasser stehenden Dämmstoffschicht nimmt der Dämmstoff in diesem Bereich schließlich die thermischen Eigenschaften von flüssigem Wasser an, einschließlich der Effekte durch latente Wärmen bei Phasenübergängen (bspw. beim Gefrieren) oder konvektive Effekte (bspw. bei der Unterspülung von Dämmschichten).

Absolut stationäre Bedingungen lassen sich auch in kontrollierten Experimenten nur mit hohem apparativen und zeitlichen Aufwand erreichen. Unter baupraktischen Bedingungen und auch während der sogenannten Einschwingphase bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Experiment, liegen demnach stets instationäre Bedingungen vor, bei denen zusätzliche Wirkeffekte auf die messbaren Wärmeströme auftreten.

Im Experiment zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, als auch unter realen Bedingungen liegen an einem Dämmstoff stets Temperaturdifferenzen an, die wie eingangs beschrieben einen Wärmestrom von der warmen zur kalten Seite des Materials bewirken. Geht man zunächst von einer über der Dicke des Materials gleichmäßigen Verteilung des Feuchtegehalts aus, so bewirkt das Anlegen eines Temperaturgradienten auf der Warmseite eine Trocknung und auf der Kaltseite eine Auffeuchtung des Materials. Der physikalische Prozess der Trocknung wird bei einem hygroskopischen Material als Desorption und die Auffeuchtung als Adsorption bezeichnet. Liegt Wasser in flüssiger Phase vor, spricht man von Verdunsten und Kondensieren.

Die Adsorption, bzw. die Kondensation sind exotherme Prozesse, d. h. es wird Wärme aus der sorptiven Bindung des Wasserdampfs an das Feststoffgerüst, bzw. der Bindung der Wassermoleküle untereinander frei. Konkret wird hierbei die Bewegungsenergie des Wasserdampfmoleküls verringert und dieser Enthalpieverlust wird in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Gleichzeitig findet ein Phasenwechsel von der Dampf- in die flüssige Phase statt, was die enthaltene latente Wärme freisetzt. Die jeweiligen Energiemengen sind entsprechend dem Typ der Bindungen unterschiedlich und unterscheiden sich demnach auch zwischen Adsorption und Kondensation.

Umgekehrt ist die Desorption, bzw. das Verdampfen auf der Warmseite ein endothermer Prozess, der Energie verbraucht.

Die Desorption eines Wassermoleküls auf der Warmseite verbraucht demnach Energie, die in Form von kinetischer Energie und der latenten Wärme für den Phasenwechsel im Molekül gespeichert ist. In Folge der Partialdampfdruckdifferenzen in der Gasphase diffundiert das Molekül durch einen Teil des Probenquerschnitts und adsorbiert in einem kälteren Bereich der Probe wieder am Feststoffgerüst, wobei die gespeicherte Energie wieder freigegeben wird. Durch diese Effekte wird also ein Wärmestrom induziert, der nicht direkt mit der Wärmeleitung des Materials zusammenhängt und zudem bei reversiblen Diffusionsströmen über einen Tag-/Nachtzyklus, respektive einen Jahreszyklus auch zu reversiblen Energieein- und Energieausträgen führt.

Neben den Trocknungs- und Auffeuchtungsvorgängen die zu Diffusionsströmen in der Gasphase führen, diffundieren auch Wassermoleküle auf der Oberfläche des Feststoffgerüsts bzw. im Feststoffgerüst selbst, entlang dem Wasserdampfpartialdruckgefälle. Auch diese Moleküle führen Energie mit sich und beeinflussen demnach den Wärmestrom in der Probe.

Die genannten Diffusionsvorgänge kehren sich wie bereits erwähnt bei instationären Temperaturbedingungen um. Aber auch unter stationären Bedingungen (bspw. während der Messung der Wärmeleitfähigkeit) können ggf. umgekehrte bzw. sich zeitlich abschwächende Diffusionsströme einstellen. Dies ist dann zu beobachten, wenn durch die voranschreitende Auffeuchtung der Probe auf der Kaltseite der zunächst temperaturgetriebene Wasserdampfpartialdruckunterschied durch den zunehmend größer werdenden Unterschied im Feuchtegehalt kompensiert wird. Exemplarisch betrachtet könnte im Extremfall auf der Warmseite ein absolut trockener, auf der Kaltseite ein gesättigter Zustand vorliegen, womit unter bestimmten Temperaturbedingungen ein Wasserdampfpartialdruckgefälle von der Kaltseite zur Warmseite entstehen würde, was zu einer Rückdiffusion führt. Unter realen Bedingungen ist ein vollständig umgekehrter Diffusionsstrom im stationären Fall zwar unwahrscheinlich, der genannte Effekt kann sich aber durchaus auf die gemessenen Wärmeströme auswirken und hierdurch zu zeitlichen Effekten (zyklischen Schwankungen) führen.

Ähnliche Effekte ergeben sich, sobald auf der Kaltseite für längere Zeit kondensierende Bedingungen vorliegen. In der Anwendung auf dem Flachdach liegen die Kaltseite oben und die Warmseite unten. Kommt es zu einer Kumulierung des kondensierten Wassers, so bilden sich immer größere Tropfen deren Gewichtskraft schließlich die Adhäsionskraft zum Partikel überwindet. In Folge löst sich der Tropfen und das Wasser rinnt in flüssiger Form zurück auf die Warmseite, bevor es dort angekommen wieder verdunstet und in Form von Wasserdampf in Richtung Kaltseite wandert.

7.1.2 Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wird für Dämmstoffe üblicherweise unter stationären Bedingungen in sogenannten Plattengeräten vorgenommen. Typische Prüfgeräte sind dabei das Wärmestrommessplattengerät (beschrieben in ISO 8301, DIN EN 12664, DIN EN 12667, DIN EN 12939 und DIN EN 1934) und das Zweiplattenverfahren (beschrieben in ISO 8302, DIN EN 12667 und DIN EN 12664).

Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile. Das Zweiplattenverfahren (Bild 38) wird in der Regel als Referenzverfahren herangezogen, weil es eine direkte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ermöglicht. Dabei wird die Probe zwischen einer elektrisch betriebenen Heizplatte und einer Kühlplatte eingespannt. Die Heizplatte ist außen von einem sogenannten Schutzring eingefasst, der auf die Temperatur der Heizplatte eingeregelt wird. Durch den Schutzring werden seitliche Wärmeströme und Randverluste ausgeglichen, womit die flächenspezifische Leistungsaufnahme der Heizplatte direkt dem Wärmestrom in W/m^2 durch die Probekörper bei der anliegenden Temperaturdifferenz entspricht. Zusammen mit der bekannten Dicke des Probekörpers kann anschließend die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden.

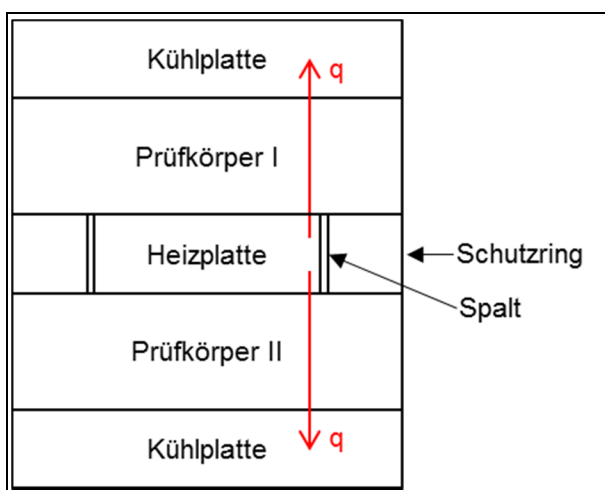


Bild 38
Prinzipskizze zum Zweiplattenverfahren

Das Wärmestrommessplattenverfahren (Bild 39) ist hingegen ein indirektes Messverfahren. Hierbei wird der Probekörper zwischen einer Heiz- und einer Kühlplatte eingespannt, die beide mittels Thermostaten auf eine bestimmte Temperatur eingestellt werden. Der entstehende Wärmestrom durch den Probekörper hindurch wird durch sogenannte Wärmestrommessplatten bestimmt. Wärmestrommessplatten geben in Abhängigkeit der anliegenden Temperaturdifferenz eine Thermospannung aus, die zum Wärmestrom proportional ist. Unter Kenntnis der Temperaturdifferenz und der Probendicke kann die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden. Die Wärmestrommessplatten müssen in einem separaten Verfahren kalibriert werden, weshalb es sich um ein indirektes Messverfahren handelt, womit eine gegenüber dem Zweiplattenverfahren größere Messungenauigkeit einhergeht. Ein Vorteil des Wärmestrommessplattenverfahrens ist jedoch, dass durch die Verwendung von Thermostaten an Heiz- und Kühlplatte beliebige Temperaturdifferenzen aufgeprägt werden können. Bei Anwendungen in denen die Einstellung einer möglichst exakten Temperaturdifferenz oder auch die Aufprägung instationärer Temperaturverläufe auf Warm- und Kaltseite wichtig sind, ist der Einsatz eines Wärmestrommessplattenverfahrens vorteilhaft.

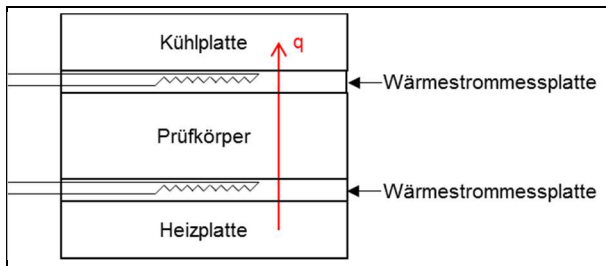


Bild 39
Prinzipskizze zum Wärmestrommessplattengerät

Im Sinne einer Abgrenzung der Begrifflichkeiten zu der in dieser Arbeit angewendeten Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter instationären Temperaturverhältnissen muss noch eine Reihe weiterer Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erwähnt werden, die oft als instationäre, transiente oder auch dynamische Verfahren bezeichnet werden.

Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit angewendeten Ansatz verwenden diese Messverfahren jedoch keine zyklisch schwankenden Temperaturdifferenzen, sondern prägen entweder eine konstante Heizrate (Hot Wire, Transient Hot Bridge, Hot disc), oder einen kurzen Temperaturpeak (Laser Flash) auf die Probe auf und messen die Antwort der Temperaturerhöhung am Sensor, bzw. in der Umgebung des Sensors, um daraus unter Kenntnis weiterer Größen (spezifische Wärmekapazität, Rohdichte, etc.) die Wärmeleitfähigkeit zu berechnen. Durch das indirekte Messprinzip nimmt die Messungenauigkeit insbesondere bei heterogenen Materialstrukturen wie Dämmstoffen stark zu. Zudem können meist nur kleine Prüfkörper gemessen werden, bzw. sind nur die Materialbereiche um den Sensor herum involviert, was bei Inhomogenitäten in Rohdichte und Struktur problematisch hinsichtlich der Repräsentativität ist.

7.1.3 Zur Auswertung der Messdaten bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an feuchten Dämmstoffen unter stationären Bedingungen

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wird das Wärmestrommessplattenverfahren angewendet. Als Ergebnis liegen zeitlich aufgelöste Messdaten zur mittleren Temperatur auf der Warm- und Kaltseite sowie den ermittelten Wärmeströmen in den Grenzschichten zwischen Prüfkörper und Heiz-/Kühlplatte vor.

Die Auswertung der Messdaten unter stationären Temperaturbedingungen erfordert zunächst in jedem Fall einen stationären Temperaturgradienten im Probenquerschnitt. Je nach Rohdichte und spezifischer Wärmekapazität (die auch wesentlich vom Feuchtegehalt abhängt) ist dieses Kriterium normalerweise in wenigen Stunden erreicht.

Bei der Messung von feuchten Stoffen verlagert sich aber wie beschrieben auch die Feuchteverteilung im Dämmstoff und es bildet sich ein Feuchtegradient mit niedrigeren Feuchtegehalten auf der Warmseite und höheren Feuchtegehalten auf der Kaltseite aus. Die Geschwindigkeit dieses Verlagerungsprozesses ist dabei von den Diffusionswiderständen im Prüfkörper abhängig. Für die Laufzeit der Messung und das Konzept der Auswertung ergeben sich damit unterschiedliche Fälle.

Bei diffusionsoffenen Materialien (z. B. faserförmige Dämmstoffe) findet eine schnelle Umlagerung des Feuchtegehalts statt, was praktisch von Anfang an auch die gemessenen Wärmeströme beeinflusst. In diesem Fall ist der gemessene Wärmestrom bei Erreichen eines ausgeglichenen Temperaturprofils also bereits von den beschriebenen Latentwärmeeffekten beeinflusst. Um einen Wert der Wärmeleitfähigkeit des feuchten Stoffes im Sinne eines physikalisch korrekten Messwerts zu erhalten muss demnach abgewartet werden bis in der Probe ein stationärer Feuchtegradient ausgebildet ist. Je nach Diffusionswiderstand und Sorptionsverhalten kann dies wenige Tage bis hin zu Wochen dauern.

Bei diffusionsoffenen, nicht hygroskopischen Dämmstoffen (beispielsweise Mineralwolle) können je nach Feuchtegehalt auch abweichende Muster der Wärmeströme auftreten. In Bild 40 ist ein möglicher Verlauf der Wärmeströme aus ISO 10051 abgebildet. Zunächst ist hier ein konstanter Wärmestrom zu beobachten (Phase A) in dem eine konstante Verdunstungsleistung auf der Warmseite und entsprechende Kondensation auf der Kaltseite zu gleichbleibenden, erhöhten Wärmeströmen führt. In einer Übergangsphase (Phase B) ebbt der Wärmestrom mit dem Voranschreiten der Umlagerung des

Feuchteprofils ab und erreicht schließlich in Phase C wieder ein konstantes Niveau. Wird unter diesen Bedingungen die Messung in Phase A abgebrochen, wird die Wärmeleitfähigkeit überschätzt.

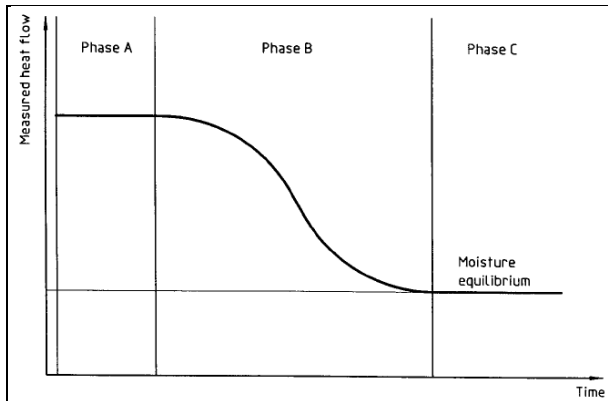


Bild 40

Exemplarischer Verlauf der Wärmeströme bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von feuchten Stoffen unter stationären Temperaturbedingungen (ISO 10051), Phase konstanter Verdunstung auf der Warmseite ohne Rücktransport (A), Übergangsphase (B) und Phase konstanter Wärmeströme bei abgeschlossener Umlagerung des Feuchteprofils (C)

Bei sehr diffusionsdichten Materialien (z. B. geschlossenzellige Hartschäume) findet aufgrund der hohen Diffusionswiderstände nur eine sehr langsame Umlagerung der Feuchtigkeit statt. In diesem Fall kann die Messung beendet werden, sobald die Probe einen stationären Temperaturgradienten aufweist, weil eine Beeinflussung der gemessenen Wärmeströme durch die sehr langsame Umlagerung der Feuchte zu vernachlässigen ist.

Ein Nachweis konstanter Wärmeströme kann beispielsweise durch die Anwendung geeigneter Regressionsmodelle und Vergleich der Koeffizienten mit den mittleren Messwerten der letzten Stunden erfolgen. In diesem Zusammenhang haben sich einfache exponentielle Abklingkurven bewährt.

Einschränkend muss bedacht werden, dass die unter stationären Bedingungen bei abgeschlossener Feuchteumlagerung ermittelten Werte stets eine mittlere Wärmeleitfähigkeit für eine Reihe von Schichten mit unterschiedlichen Feuchtegehalten darstellen. Unter Annahme einer linearen Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt ist dieser Mittelwert korrekt – liegt jedoch ein nicht lineares Verhalten oder der Fall einer vollständigen Austrocknung auf der Warmseite mit Wasser in flüssiger Phase in der Schicht auf der Kaltseite vor, sind die Mittelwerte unter Umständen nicht repräsentativ für den mittleren Feuchtegehalt der Probe.

7.1.4 Zur Auswertung der Messdaten bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an feuchten Dämmstoffen unter instationären Bedingungen

Unter instationären Temperaturbedingungen ändern sich die Intensität und ggf. auch die Richtung der Wärmeströme mit der Temperaturdifferenz. Bezüglich einer Auswertung muss hierbei beachtet werden, dass unter normalen Prüfbedingungen (d. h. ohne ein Slicen des Prüfkörpers) Informationen über thermische Zustände nur an den Grenzflächen zwischen Prüfkörper und Heiz-/Kühlplatten vorliegen. Dies führt zu der Problematik, dass die Berechnung einer zeitlich aufgelösten Wärmeleitfähigkeit zwangsläufig zu unsinnigen Werten führt.

Zur Veranschaulichung nehmen wir eine konstante Temperatur von 20°C auf der Warmseite und eine sinusförmige Temperaturkurve zwischen 20°C und 0°C auf der Kaltseite an. Erreicht der sinusförmige Temperaturverlauf auf der Kaltseite die 20°C liegt am Probekörper eine Temperaturdifferenz von 0 K an. Aufgrund der thermischen Trägheit des Prüfkörpers werden zu diesem Zeitpunkt aber noch Wärmeströme an den Grenzflächen zwischen Prüfkörper und Heiz-/Kühlplatte gemessen. Wird in diesem zeitlichen Schritt die Wärmeleitfähigkeit mit den vorliegenden Informationen berechnet ergeben sich unendlich hohe Werte. Im umgekehrten Fall, bspw. wenn sich Wärmeströme umdrehen kann sich auch eine Wärmeleitfähigkeit von Null ergeben. Beide Fälle sind rechentechnische Artefakte und physikalisch falsch, beeinflussen letztlich aber auch die Mittelwertbildung wenn dieser Zeitschritt eingeschlossen ist.

Der einzig sinnvolle Weg zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter instationären Temperaturbedingungen liegt daher in der Verrechnung mittlerer Wärmeströme und mittlerer Temperaturdifferenzen über einen kompletten Zyklus der Temperaturschwankung, beispielsweise im Rahmen einer tageweisen Betrachtung. Entsprechende Hinweise finden sich in der ISO 9869-1.

Das in vorliegender Arbeit angewendete Verfahren zur Auswertung der Prüfung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären und instationären Bedingungen ist in Kapitel 7.3.2 und 7.3.3 beschrieben.

7.2 Material

Im Folgenden wird das für die Untersuchung verwendete Material beschrieben. Zum Einsatz kamen neue Dämmstoffproben und Entnahmeproben aus Schadfällen.

7.2.1 Material für die Untersuchung an neuen Dämmstoffproben

Für die Untersuchung wurden typische Flachdachdämmstoffe ausgewählt. Konkret wurden Proben der Dämmstofftypen expandiertes Polystyrol (EPS 1 und EPS 2), extrudiertes Polystyrol (XPS), Polyurethan (PUR) und Mineralwolle (MW) untersucht. Die ausgewählten Produktgruppen unterscheiden sich hinsichtlich der eingesetzten Rohmaterialien (organisch, anorganisch), der Mikrostruktur (offen-/geschlossenzellig, faserförmig), der Wärmeleitfähigkeit ($0,021 - 0,039 \text{ W/(m K)}$) sowie des Sorptions- und Diffusionsverhaltens (diffusionsoffen – diffusionsdicht). Die Produkte EPS 1, XPS, PUR und MW sind laut Herstellerangaben für den Einsatz im Flachdach (DAA) geeignet und entsprechen den dahingehenden Vorgaben der DIN 4108-10.

Zu einem späteren Zeitpunkt im Projektverlauf wurden noch Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter instationären Temperaturbedingungen an einer Probe im Anlieferungszustand nach Herstellung durchgeführt. Da von dem Material EPS 1 keine trockenen Probekörper zurückgestellt wurden, mussten hierzu neue Prüfkörper hergestellt werden (EPS 2). Dieser Dämmstoff hat ähnliche thermische Eigenschaften, ist aber eine Mehrzweckdämmplatte für die Anwendungsgebiete (WI, DI, DZ, DEO, WAB und DAA).

Tabelle 16 gibt einen Überblick über die untersuchten Dämmstoffe und die wichtigsten thermischen und hygrischen Eigenschaften.

Tabelle 16
Thermische und hygrische Eigenschaften der untersuchten Dämmstoffe (Neue Proben)

Eigenschaft	Einheit	EPS 1	EPS 2	XPS	PUR	MW
$\lambda_{10}^{1)}$	W/(m K)	0,0336	0,0356	0,0334	0,0210	0,0382
d ¹⁾	mm	101	100	80	81	101
$\rho^{1)}$	kg/m ³	18,9	19,1	37,0	39,8	159
$\mu^{2)}$	-	5 - 10	5 – 10	80 - 150	40 - 200	1
Struktur	-	offenzellig	offenzellig	geschl.zellig	geschl.zellig	faserförmig
Rohstoff	-	organisch	organisch	organisch	organisch	anorganisch

¹⁾ Messwert bei Anlieferung im trockenen Zustand

²⁾ Literaturwert

Von allen Varianten mit Ausnahme der Variante EPS 2 wurden aus einer einheitlichen Charge jeweils mindestens zwei Probekörper mit den Maßen 500 x 500 x d [mm] zugeschnitten. Die zu erwartenden Unterschiede in der Struktur und den Rohstoffeigenschaften zwischen den Einzelproben sind durch den benachbarten Zuschnitt aus einer Platte als vernachlässigbar einzuschätzen. Alle im Weiteren ausgewiesenen Ergebnisse zur Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Feuchtegehalten beziehen sich deshalb immer allgemein auf die Bezeichnung EPS 1, XPS, PUR und MW, auch wenn die Messwerte teilweise an unterschiedlichen Prüfkörpern ermittelt wurden.

7.2.2 Material für die Untersuchung an Entnahmeproben

Für die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit an Entnahmeproben aus schadhaften Objekten lagen drei Dämmstoffproben aus EPS vor. Das Material wurde jeweils in Folie eingepackt am FIW München angeliefert. Tabelle 17 enthält die verfügbaren Informationen zu den Materialmustern.

Tabelle 17

Eigenschaften der Entnahmeproben im Anlieferungszustand; Angaben entsprechen den Messwerten bei Anlieferung

Eigenschaft	Einheit	E1	E2	E3
Material	–	EPS	EPS	EPS
d	mm	60	80	50
$\rho^{1)}$	kg/m ³	19,5	23,2	20
ψ	Vol.-%	2,5	14,1	40,8
Entnahmestelle	–	Balkon	Flachdach	Flachdach
Maße bei Anlieferung	mm	500 x 480	Bruchstücke	300 x 300
Maße der Prüfkörper	mm	500 x 480	200 x 200	300 x 300
Dicke der Prüfkörper	mm	56	42	28

¹⁾ umgerechnet auf trockene Bedingungen

Das Material E1 konnte mit den angelieferten Maßen geprüft werden, aus den Materialien E2 und E3 mussten Prüfkörper mit kleineren Abmessungen zugeschnitten werden.

Das Material E2 wurde in Bruchstücken angeliefert, aus denen lediglich ein 200 x 200 [mm] großer Prüfkörper hergestellt werden konnte. Da die Messgenauigkeit auch von dem Verhältnis von Fläche und Dicke des Prüfkörpers beeinflusst wird, musste auch die Dicke des Materials auf 40 mm reduziert werden.

Bei dem Material E3 handelt es sich um ein EPS mit einer quadratischen Riffelstruktur. Da für die Messung der Wärmeleitfähigkeit eine plane Probenoberfläche erforderlich ist, wurde hier durch Entfernen der strukturierten Seite die Dicke des Prüfkörpers auf 30 mm reduziert.

Alle Muster wurden nach der Probenpräparation wieder in Folie eingepackt und luftdicht verklebt.

7.3 Methoden

Im Folgenden werden die verwendeten Prüfgeräte und die Auswertung der Messergebnisse bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären und instationären Bedingungen beschrieben.

7.3.1 Probenvorbereitung

Die Probenvorbereitung unterscheidet sich zunächst grundsätzlich für die Untersuchung an den neuen Dämmstoffen und die Untersuchung an Entnahmeproben. Während die Wärmeleitfähigkeit an den Entnahmeproben im jeweils angelieferten Feuchtezustand gemessen wurde, wurden die Prüfkörper aus dem Material gemäß Tabelle 16 zunächst im trockenen Zustand gemessen und anschließend gezielt aufgefuechtet.

Je nach Materialgruppe wurden unterschiedliche Zielfeuchten definiert. Tabelle 18 zeigt die Sollwerte der Feuchte.

Tabelle 18

Stufen der Sollfeuchte für die untersuchten Materialgruppen gemäß Tabelle 16

Material	Stufe 1 in Vol.-%	Stufe 2 in Vol.-%	Stufe 3 in Vol.-%	Stufe 4 in Vol.-%
EPS 1	1,5	5,0	10	20
EPS 2	Prüfung im Anlieferungszustand (trocken)			
EPS (E1-E3)	Prüfung bei Feuchtegehalt im Anlieferungszustand			
XPS	0,5	1,0	2,0	4,0
PUR	1,5	5,0	10,0	–
MW	1,5	8,0	15	–

Um eine Austrocknung der Proben während der Messung zu verhindern, wurden die Prüfkörper in PE Folie eingepackt und mittels Klebebändern luftdicht verschlossen. Über Wiegen ist so eine einfache Kontrolle möglich, ob während der Messung Feuchtigkeit verloren geht.

Die Befeuchtung der Proben erfolgte materialspezifisch unterschiedlich. Die Schaumkunststoffe wurden in einem sogenannten Diffusionsversuch aufgefuechtet. Dies ist insbesondere erforderlich bei Materialien mit hohen Diffusionswiderständen. Dabei wird der Prüfkörper über einem auf 50°C beheiztem Wasserbad montiert und auf der Oberseite mittels einer Kühlplatte auf 1°C gekühlt. Durch die entstehende Wasserdampfpartialdruckdifferenz dringt die Feuchtigkeit durch Diffusion in den Prüfkörper ein. Um eine gleichmäßige Verteilung der Feuchtigkeit im Querschnitt sicherzustellen wird der Prüfkörper regelmäßig gewendet.

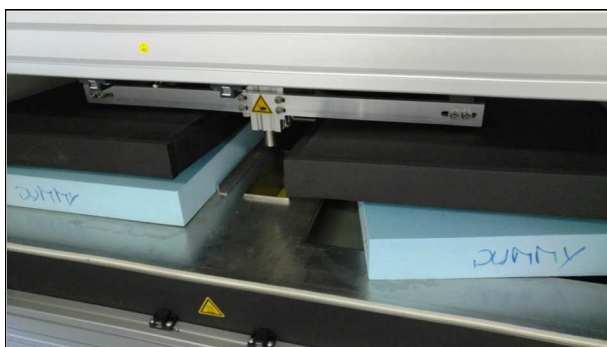


Bild 41

Diffusionsversuch mit unter dem Prüfkörper liegendem Wasserbad und aufliegender Kühlplatte

Die Mineralfaserproben können mittels Hinzufügen flüssigen Wassers in die partiell aufgeschnittene PE Verpackung und anschließendem Verschluss mittels Klebebändern aufgefuechtet werden. Dabei ist ebenfalls darauf zu achten, dass sich die Feuchtigkeit gleichmäßig im Prüfkörper verteilt, was durch regelmäßiges Wenden während einer Zeitdauer von einigen Tagen sichergestellt werden kann.

Die Prüfkörper wurden auf diese Weise ausgehend vom trockenen Zustand sukzessive befeuchtet. Im Anschluss an jede Befeuchtung wurde die Wärmeleitfähigkeit im Wärmestrommessplattengerät wie unter 7.3.2 und 7.3.3 beschrieben geprüft.

Bei einem Teil der Messungen wurde exemplarisch ein Ansatz zur Verkürzung der Messdauer im Wärmeleitfähigkeitsmessgerät angewendet. Bei Dämmstoffen mit einem erhöhten Feuchtegehalt dauert es lange bis sich entsprechend den bestehenden Temperaturbedingungen ein stabiler Feuchtegradient ausbildet. Durch die Anwendung einer einfachen Vorkonditionierung der Proben außerhalb des eigentlichen Wärmeleitfähigkeitsmessgeräts soll die notwendige Messdauer im Wärmeleitfähigkeitsmessgerät verkürzt werden.

Hierzu wurden die Prüfkörper in einem einfachen Apparat ohne weitere Messtechnik zwischen einer Heiz- und einer Kühlplatte auf die während der eigentlichen Messung angewendeten Temperaturen konditioniert (Bild 42).

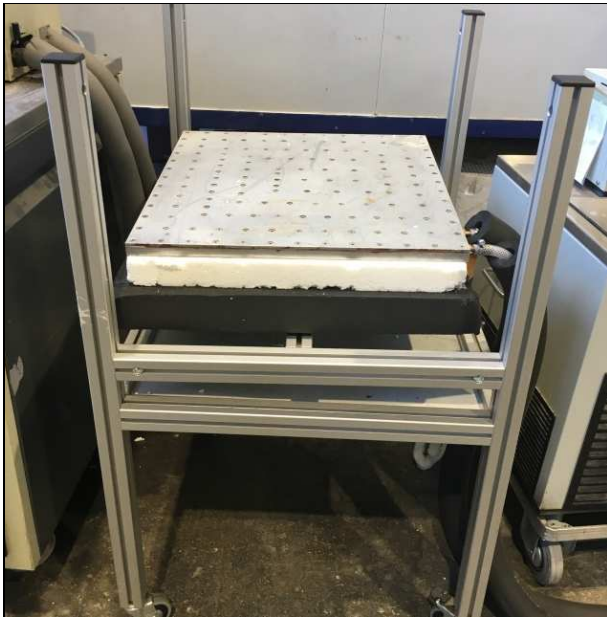


Bild 42

Einfache Apparatur mit Heiz- und Kühlplatte zur Vorkonditionierung eines ausgeprägten Temperatur- und Feuchteprofils im Prüfkörper vor der Messung

7.3.2 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären Bedingungen

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären Bedingungen erfolgte in einem Wärmestrommessplattengerät mit je nach Probengröße geeigneten Abmessungen von Heiz-, Kühl- und Messplatten. Bei allen Versuchen wurde eine einheitliche Probenmitteltemperatur von 10°C und eine Temperaturdifferenz von 1 K je cm Probendicke gewählt.

Die Bestimmung der Temperaturdifferenz wurde mittels Thermoelementen auf der Kalt- und Warmseite durchgeführt, die jeweils fest an der Heiz-, bzw. Kühlplatte angebracht waren. Hierdurch geht die Wärmeleitfähigkeit der PE Folie in das Messergebnis mit ein, was aber im Rahmen der allgemeinen Messungenauigkeit vernachlässigt werden kann.

Wie unter 7.1.3 beschrieben, werden während der Messung typischerweise exponentiell abklingende Wärmeströme registriert. Die Anwendung programmatisch hinterlegter Abbruchkriterien die für die Messung an trockenen Materialien geeignet sind, funktionieren hier aufgrund der gegen Ende der Messung teilweise sehr geringen aber voranschreitenden Änderungsraten nicht zufriedenstellend. Aus diesem Grund empfiehlt es sich die Messdaten kontinuierlich aufzuzeichnen und eine manuelle Auswertung mittels eines einfachen exponentiellen Regressionsmodells durchzuführen. Bild 43 zeigt die Messdaten der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit bei einer Messung an einer EPS 1 Probe mit 1,94 Vol.-% und den Verlauf der zugehörigen Regression zum Ansatz entsprechend Gleichung (2).

$$\lambda = a * e^{\frac{-t}{\tau}} + b \quad (2)$$

mit

λ	Wärmeleitfähigkeit in W/(m K)
a	$\lambda(t = 0) - \lambda(t \rightarrow \infty)$
b	$\lambda(t \rightarrow \infty)$
t	Messdauer in Tagen
τ	Abklingkonstante

Die Messung läuft nun solange, bis der Unterschied zwischen dem Koeffizienten b und der mittleren Wärmeleitfähigkeit der letzten drei Stunden einen Grenzwert von 0,5 % unterschreitet. Im vorliegenden Beispiel ist dieses Kriterium nach ca. 6 Tagen Messdauer mit einem Endwert von 36,7 mW/(m K) erreicht.

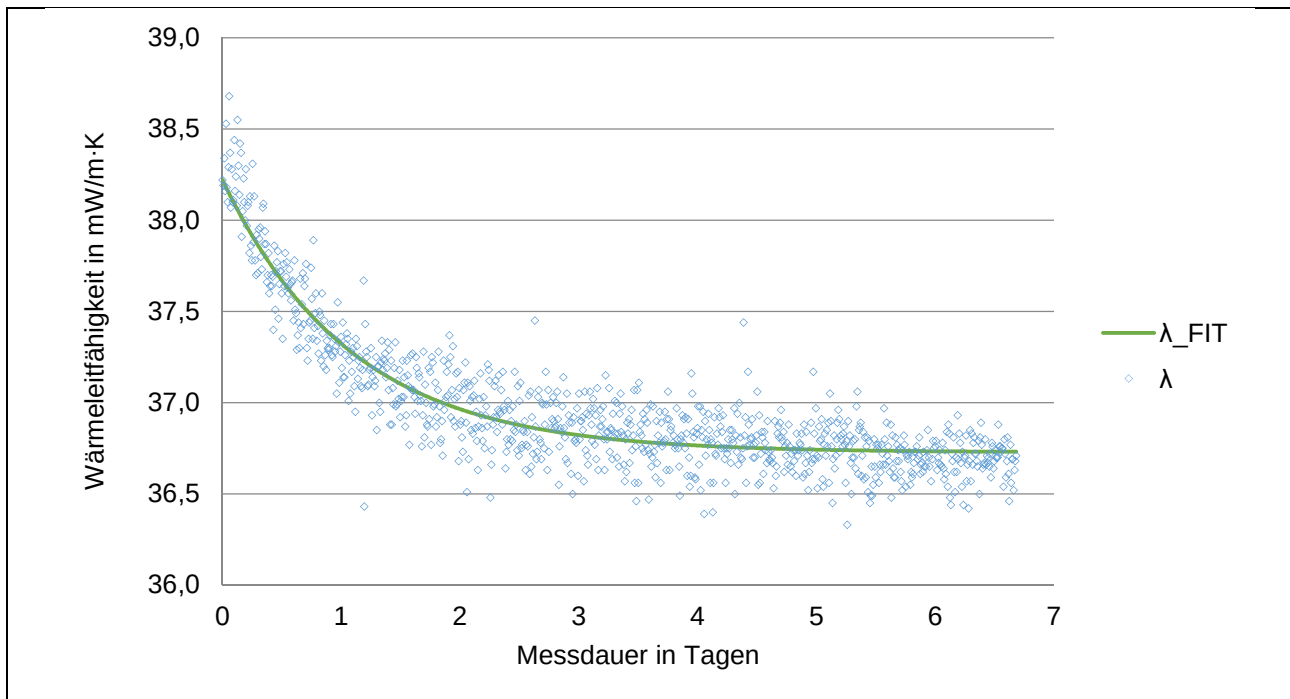


Bild 43

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit und Regression bei Messung an einer EPS 1 Probe mit einem Feuchtegehalt von 1,94 Vol.-%

Die beschriebene Auswertelogik wurde sinngemäß bei allen stationären Messungen angewendet. Lagen wie in 7.1.3 beschrieben abweichende, z. B. sigmoidale Verläufe vor, so wurde das Regressionsmodell nur auf einen Teil der Daten angewendet.

7.3.3 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter instationären Bedingungen

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter instationären Bedingungen erfolgte in einem Wärmestrommessplattengerät. Die Warmseite wurde mit einer konstanten Temperatur von 20°C betrieben. Auf der Kaltseite wurde hingegen ein Temperaturprofil als 24 h Zyklus zwischen -11,5°C und +21,0°C angelegt (Bild 44).

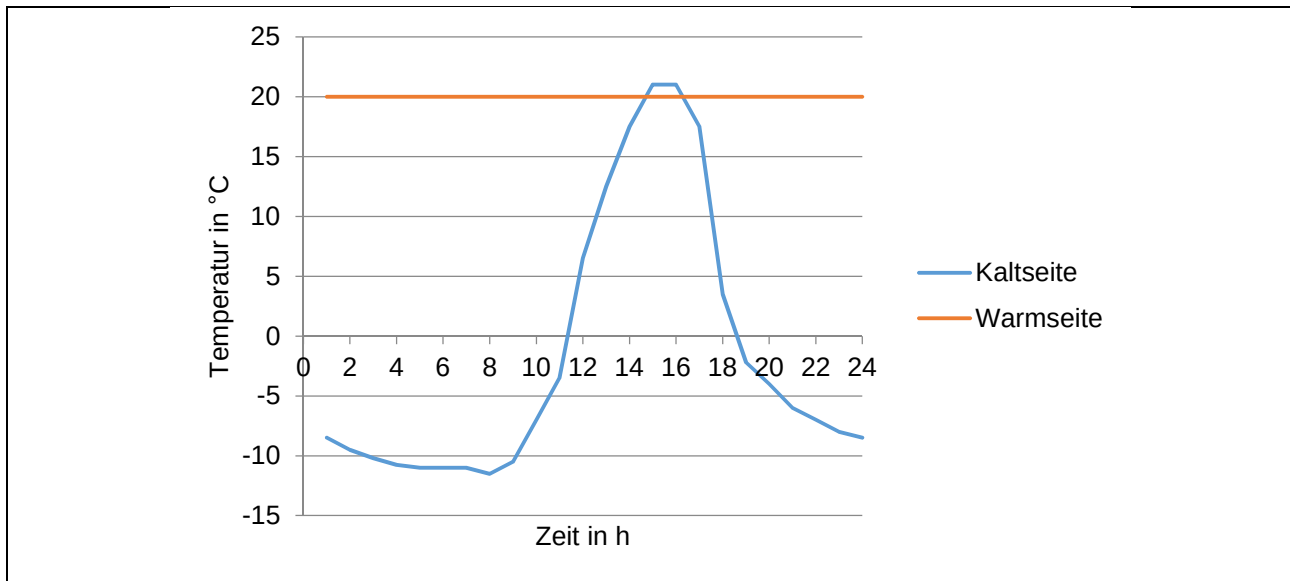


Bild 44

Temperaturprofil bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter instationären Temperaturbedingungen.

Da die Temperatur der Kaltseite die Temperatur der Warmseite kurzfristig überschreitet, dreht sich der Wärmestrom für eine bestimmte Zeitspanne um. Hieraus entstehen bei einer Auswertung der Wärmeleitfähigkeit in diskreten Zeitabschnitten < 24 h wie unter 7.1.4 beschrieben unrealistisch hohe (gegen ∞) und niedrige (gegen 0) Werte der Wärmeleitfähigkeit.

Die letztlich gewählte Auswertung der Messdaten entspricht deshalb dem Mittelwertverfahren nach ISO 9869-1. Dabei werden jeweils über einen Zyklus von 24 h zunächst die Mittelwerte der absoluten Wärmeströme und absoluten Temperaturdifferenzen ermittelt und daraus zunächst entsprechend Gleichung (3) der Wärmedurchlasswiderstand errechnet.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^m (T_{s,i,j} - T_{s,e,j})}{\sum_{j=1}^m q_j} \quad (3)$$

mit

R	Mittlerer Wärmedurchlasswiderstand über 24 h in (m ² K)/W
$T_{s,i,j}$	Temperatur der Warmseite zum Zeitpunkt j
$T_{s,e,j}$	Temperatur der Kaltseite zum Zeitpunkt j
q_j	Wärmestrom zum Zeitpunkt j

Unter Kenntnis der Prüfkörperdicke wurden die Werte anschließend in eine mittlere Wärmeleitfähigkeit während dem Zyklus von 24 h umgerechnet.

Die Auswertung wurde zunächst unter ausschließlicher Berücksichtigung der Wärmeströme auf der Warmseite durchgeführt. Sobald die Ergebnisse im zeitlichen Verlauf über mehrere Tage annähernd konstante Werte zeigten, wurde die Messung beendet. Im Gegensatz zum Vorgehen zur Auswertung bei den Messungen unter stationären Temperaturbedingungen konnte aufgrund der Diversifizierung des Verlaufs der Tagesmittel kein standardisiertes Abbruchkriterium definiert werden.

7.4 Ergebnisse

Zunächst werden getrennt für die stationären und instationären Messungen typische Verläufe der Wärmeleitfähigkeit, bzw. der registrierten Wärmeströme gezeigt. Anschließend werden die Ergebnisse in tabellarischer und graphischer Form aufbereitet und abschließend zusammenfassend diskutiert.

7.4.1 Stationäre Messungen

In Tabelle 19 sind die Ergebnisse der stationären Messungen gegliedert nach den untersuchten Materialgruppen zusammengefasst. Jede Zeile zeigt die Daten einer Einzelmessung bei einer Probenmitteltemperatur von 10°C und einer Temperaturdifferenz von 1 K/cm Probendicke. Dabei wird jeweils die Dauer der gesamten Messung t_M , die ausgewertete Zeitspanne t_A , die ermittelten Koeffizienten der Regression (a , b , τ), die Zeitspanne in welcher der Kurvenverlauf der e-Funktion auf 0,2 % vom Endwert abgeklungen ist $t_{\Delta\lambda\leq 0.2\%}$, der Mittelwert der gemessenen Wärmeleitfähigkeit während der letzten drei Stunden der Messdauer λ_{3h} sowie die Standardabweichung der Einzelwerte im gleichen Zeitraum s_{3h} ausgewiesen.

Tabelle 19

Zusammenfassung und Auswertung der Messzeiträume, der ermittelten Fit Parameter sowie der Messwerte der jeweils letzten drei Stunden der Messung

Mat.	ψ	t_M	t_A	a	b	τ	$t_{\Delta\lambda\leq 0.2\%}$	λ_{3h}	s_{3h}
-	in Vol.-%	in d	in d	in mW/(m K)	in mW/(m K)	in d	in d	in mW/(m K)	in mW/(m K)
EPS 1	1,9	7,0	6,8	1,49	36,7	1,09	6,73	36,7	0,10
	5,0	6,8	6,4	1,65	41,1	0,88	5,46	41,1	0,23
	10	6,9	6,8	1,06	48,7	0,88	5,48	48,7	0,15
	20	3,7	3,6	10,65	66,3	0,10	0,62	66,5	0,08
EPS 2	0,005	1,0	1,0	3,05	35,7	0,03	0,19	35,6	0,06
XPS	0,5	6,0	5,9	2,17	33,9	0,03	0,21	34,0	0,12
	1,0	6,0	6,0	1,32	33,9	0,30	1,86	33,9	0,17
	2,0	7,0	7,0	4,52	35,1	0,07	0,46	35,0	0,22
	4,0	18,7	18,6	12,71	37,2	0,12	0,72	37,0	0,16
PUR	1,5	7,1	6,9	1,11	23,2	0,11	0,71	23,2	0,15
	5	5,0	4,8	1,73	26,5	0,36	2,22	26,5	0,16
	10	10,0	9,8	5,14	32,4	0,40	2,49	32,5	0,25
MW	1,5	28,0	6,3	7,69	52,5	2,55	15,82	52,9	0,23
	8,0	13,9	2,2	0,94	83,0	1,05	6,50	83,32	0,15
	15,0	21,0	3,7	1,06	93,1	0,70	4,32	92,96	0,19

Zunächst ist festzustellen, dass die Werte des Koeffizienten τ und damit die mindestens notwendige Zeitspanne der Auswertung ($t_{\Delta\lambda\leq 0.2\%}$) zwischen den Materialien deutlich differenziert sind. Während bei EPS 1 (bei erhöhten Feuchtegehalten) als offenzelliges Material mit entsprechend niedrigerem Diffusionswiderstand aufgrund der innerhalb der Messzeit deutlichen Feuchteumlagerung ein Abklingverhalten über einen Zeitraum von ca. 6 – 7 Tagen abgewartet werden muss, könnte die Messung für die geschlossenzelligen und deutlich diffusionsdichteren Materialien XPS und PUR bereits nach ca. 0,2

– 2,5 Tagen abgeschlossen werden. Durch den hohen Diffusionswiderstand kann sich die in den Zellen eingelagerte Feuchtigkeit nur sehr langsam verlagern – die mit der Feuchteumlagerung verbundenen Effekte auf die Erhöhung der Wärmeströme sind demnach vernachlässigbar.

Die teilweise deutlich längeren Mess- und Auswertzeiträume (bei XPS und PUR im Bereich von 6 – 18 Tagen) wurden zur Absicherung der Werte angelegt und zeigen dementsprechend auch über einen entsprechend langen Zeitraum konstante Messergebnisse (Bild 45).

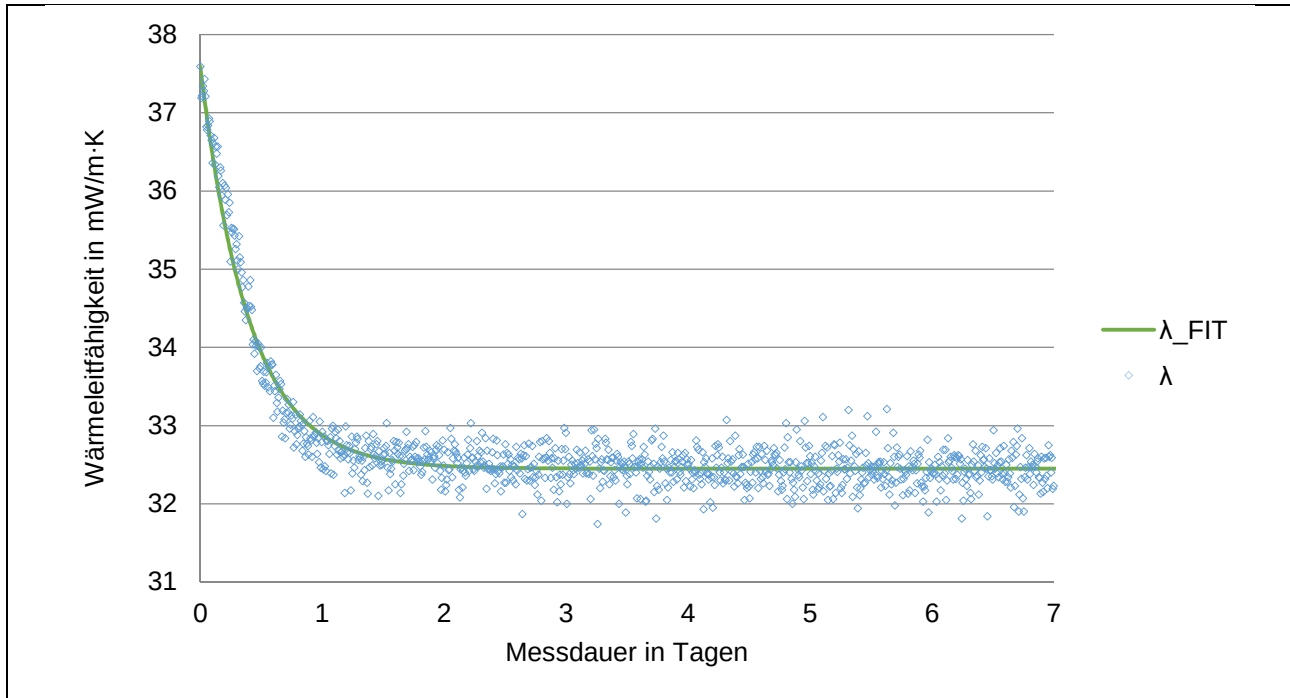


Bild 45

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit und Regression bei Messung an einer PUR Probe mit einem Feuchtegehalt von 10 Vol.-%

Sehr kurze Messzeiten von ca. 0,2 Tagen, sind außerdem bei dem im Anlieferungszustand gemessenen Dämmstoff EPS 2 (0,005 Vol.-%) möglich (Bild 46). In diesem Fall werden aussagekräftige Messwerte erzielt, sobald ein stabiler Temperaturgradient anliegt.

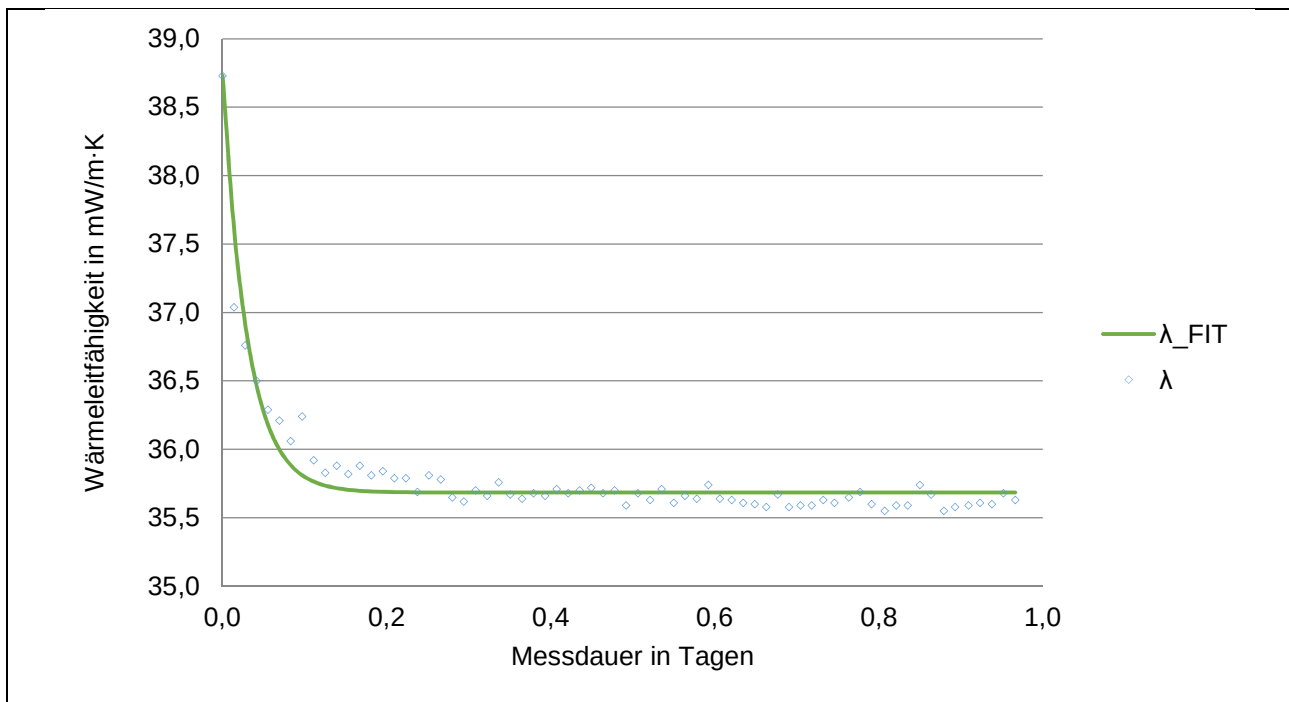


Bild 46

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit und Regression bei Messung an einer EPS Probe (EPS 2) mit einem Feuchtegehalt entsprechend dem Anlieferungszustand

Im Weiteren fällt auf, dass der Unterschied zwischen der gesamten Messdauer (t_M) und der ausgewerteten Zeitspanne (t_A) bei den untersuchten Hartschäumen (EPS 1, EPS 2, XPS, PUR) gering ist, während sich bei den Mineralwolleproben deutliche Unterschiede zeigen. Die untersuchten Hartschäume folgen also von Beginn der Messung an gut dem Verlauf der gewählten Fit-Funktion. Lediglich die Werte der ersten Stunden müssen für die Auswertung verworfen werden; in diesem Zeitraum liegt noch kein ausgeprägtes Temperaturprofil an, was zu physikalisch nicht sinnvollen Werten der Wärmeleitfähigkeit führt.

Bei den sehr diffusionsoffenen Mineralwolledämmstoffen hingegen liegt ein ausgeprägt anderes Verhalten vor, da aufgrund der sehr geringen Diffusionswiderstände in sehr kurzen Zeiträumen die unter Kapitel 7.1 beschriebenen zyklischen Vorgänge wie Abfließen des an der Kaltseite kondensierten Wassers und Rückdiffusion, bzw. -verdampfung auftreten können.

Wie unter 7.1.3 beschrieben können während einer ausreichend langen Messdauer unterschiedliche Phasen beobachtet werden, in denen zunächst konstante (erhöhte) Wärmeströme durch einen anhaltenden Verdunstungsvorgang zu verzeichnen sind (Phase A). Während der Umlagerungsphase (Phase B) sinken die Wärmeströme, weil die Probe auf der Warmseite austrocknet, bzw. einen stabilen Feuchtezustand im hygroskopischen Bereich erreicht, was mit einer abnehmenden Verdunstungsleistung einhergeht. In der letzten Phase (Phase C) erreicht die Probe schließlich einen stabilen eingeschwungenen Zustand, der in der Regel durch niedrigere Wärmeleitfähigkeit gegenüber der Phase A gekennzeichnet ist. Je nach Prüfkörper, Feuchtegehalt und Randbedingungen der Messung ist eine sehr lange Messdauer nötig um diesen Vorgang abschließend aufzunehmen. Einen exemplarischen Datensatz einer Messung mit einer Laufzeit von 28 Tagen zeigt Bild 47. Hierbei wurden zwei Messungen an dem gleichen Produkt bei identischen Feuchtegehalten, aber jeweils unterschiedlichen Probengeometrien durchgeführt.

Bei der Bestimmung an einem Prüfkörper der aus vier Einzelprüfkörpern mit jeweils 25 x 25 cm zusammengesetzt war (blaue Kurve) werden zunächst für etwa 7 Tage konstante Werte auf einem Niveau von ca. 75 mW/(m K) gemessen, bevor die Werte in Phase B deutlich absinken und sich schließlich in Phase C auf einem Niveau von ca. 53 mW/(m K) stabilisieren. Der unterbrochene Kurvenverlauf mit den in Phase B zwischenzeitlich wieder ansteigenden Werten erklärt sich aus

einer Öffnung des Prüfgeräts und Entnahme der Probe zu Inspektionszwecken, ob bspw. aufgrund einer Leckage in der Folienumhüllung der Prüfkörper austrocknet. Dies war nicht der Fall, weshalb der Prüfkörper direkt im Anschluss wieder eingebaut wurde. Es ist zu erkennen, dass selbst diese kurze Unterbrechung der Messung und die damit einhergehende mechanische Manipulation und Temperaturänderung an der Probe, den Feuchtegradienten im Prüfkörper massiv beeinflusst. Vor diesem Hintergrund ist es fraglich, ob sich unter realen Bedingungen mit ständigen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur, eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit entsprechend der Phase C ausprägen kann.

Bei der Bestimmung an einem Prüfkörper des gleichen Produkts bei identischem Feuchtegehalt mit den Maßen 50 x 50 cm (rote Kurve) zeigt sich, dass die Phase A deutlich verkürzt ist. Trotzdem werden in Phase C schließlich identische Werte von ca. 53 mW(m K) ermittelt.

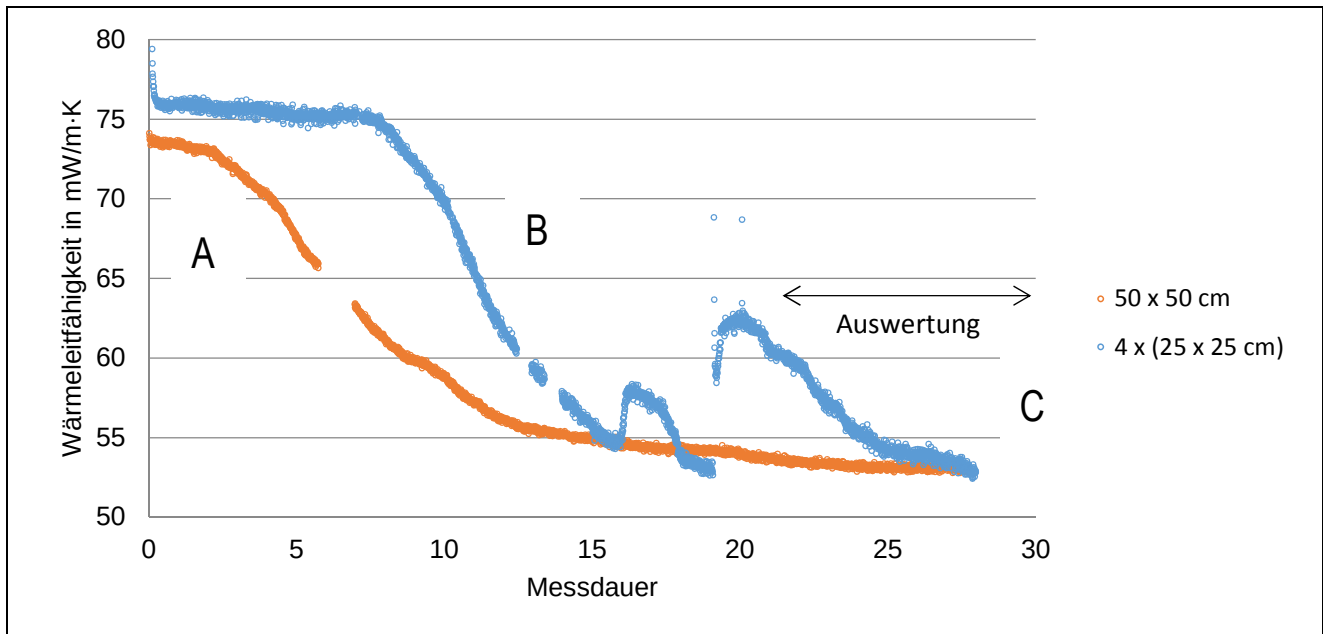


Bild 47

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit bei Messung an einer Mineralwolle Probe mit einem Feuchtegehalt von 1,5 Vol.-% und Zuordnung zu den Phasen nach ISO 10051, Phase konstanter Verdunstung auf der Warmseite ohne Rücktransport (A), Übergangsphase (B) und Phase konstanter Wärmeströme bei abgeschlossener Umlagerung des Feuchteprofils (C); Blaue Messpunkte: Bestimmung an einem aus vier Einzelproben mit jeweils 25 x 25 cm zusammengesetzten Prüfkörper; Rote Messpunkte: Bestimmung an einem Prüfkörper mit den Maßen 50 x 50 cm (Proben wurden nicht vorkonditioniert)

Der Unterschied im zeitlichen Verlauf der Phase A bei den unterschiedlichen Prüfkörpern kann verschiedene Gründe haben. Einerseits ist die Feuchteverteilung vor Beginn der Messung entscheidend, andererseits könnte sich aufgrund der kleineren Probenmaße und der damit leichteren Rückführung von auf der Kaltseite kondensierten Wassers auf die Warmseite evtl. ein länger andauernder Heat-Pipe Effekt einstellen, der erst nach einer längeren Zeit durch die im Zuge wiederholter Umlagerung gleichmäßigere Verteilung der Feuchtigkeit in der Struktur zum Erliegen kommt. Sollten derartige Effekte eine Rolle spielen, wäre die Konsequenz, dass im realen Einbaufall einer theoretisch unendlich ausgedehnten Probe die Phase A wesentlich kürzer wäre als dies in der Messung der Fall ist. Zur abschließenden Beurteilung liegen jedoch zu wenige Messdaten und Informationen über die Diffusionsströme in der Probe vor.

Aus laborpraktischen Gründen sind Messzeiten von fast 30 Tagen nicht für alle Proben umsetzbar. Um die Messzeit im Wärmeleitfähigkeitsmessgerät zu reduzieren, wurde daher exemplarisch an der Mineralwolleprobe mit 8 Vol.-% und der EPS 1 Probe mit 20 Vol.-% ein einfaches Verfahren zur Verkürzung der Messzeit im Wärmeleitfähigkeitsmessgerät erprobt.

Hierbei wird durch Lagerung in einer einfachen Apparatur mit einem Temperaturgradienten entsprechend der Messung versucht, die benötigte Zeit im Messgerät zu verkürzen. Während diesem im Weiteren „Vorkonditionierung“ genannten

Verfahren, soll die in den Phasen A und B zu erwartende Feuchteumlagerung vorangetrieben, bzw. abgeschlossen werden, so dass die Probe, nur noch durch den Umbau in das eigentliche Messgerät beeinflusst, in einer kürzeren Messdauer konstante Werte entsprechend der Phase C erreichen sollte.

Entsprechend ergab sich für die untersuchte Materialvariante der Mineralwolle mit 8 Vol.-% eine kürzere Messzeit von etwa 14 Tagen. Die Verläufe der Wärmeleitfähigkeit sind aber auch hier nicht konstant, sondern unterliegen zyklischen Schwankungen mit leicht veränderlicher Amplitude (Bild 48).

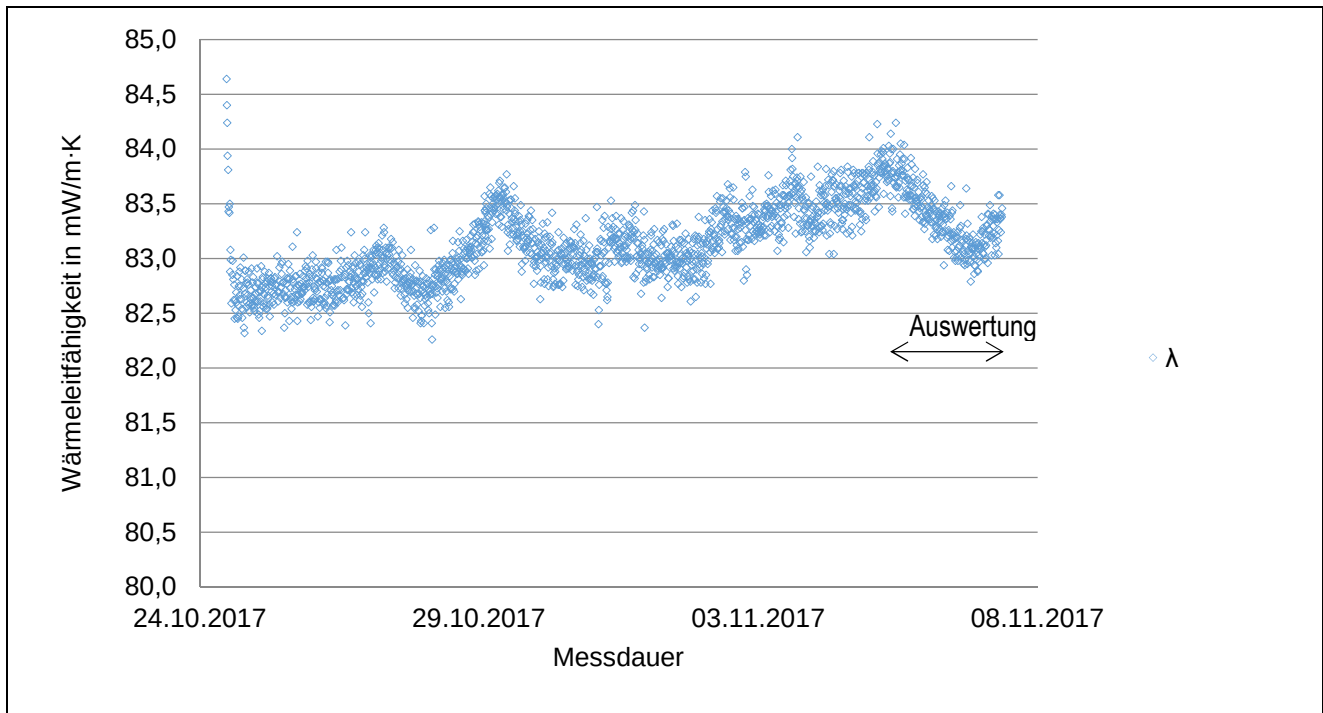


Bild 48

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit bei Messung an einer Mineralwolle Probe mit einem Feuchtegehalt von 8 Vol.-% (Probe wurde vorkonditioniert)

Die registrierbaren Schwankungen sind vermutlich ebenfalls zyklischen Effekten der (partiellen) Umlagerung von Feuchtigkeit geschuldet, bewegen sich aber auf einem im Rahmen der Messunsicherheit vernachlässigbaren Niveau.

Für die Auswertung wurde bei den Mineralwollgedämmstoffen die Regression der abklingenden e-Funktion lediglich auf den jeweils letzten Teil der Rohdaten innerhalb eines Zyklus angewendet (siehe markierten Bereich in Bild 47). Verglichen mit einer Mittelwertbildung über die gesamte Messdauer ergeben sich dabei nur unwesentliche Unterschiede. Aus Gründen der Stringenz und um die ermittelten Koeffizienten auswerten zu können, wurde die Auswertelogik mit der abklingenden e-Funktion trotzdem beibehalten. Die Auswertung der Fit-Parameter entsprechend Tabelle 19 ist deshalb aber nur bedingt mit den Werten bei den Hartschaumstoffen vergleichbar.

Grundsätzlich fällt auf, dass bei den Varianten aus Mineralwolle bei höheren Feuchtegehalten auch nach sehr langer Messdauer kein ausgeprägter Abfall der Messwerte und damit eine Differenzierung der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte entsprechend den Phasen A, B und C verzeichnet wird. Die Messung bei 8 Vol.-% ist durch die angewendete Vorkonditionierung in dieser Hinsicht nicht auswertbar. Während der Messdauer von 21 Tagen bei der Messung von Mineralwolle mit einem Feuchtegehalt von 15 Vol.-% konnten jedoch ebenfalls keine deutlich differenzierten Phasen entsprechend dem Verlauf bei 1,5 Vol.-% Feuchtegehalt beobachtet werden. Nach einigen Tagen in denen die Messwerte stabil bleiben, steigen die Werte der Wärmeleitfähigkeit deutlich an und es lassen sich in der Folge zyklische Schwankungen ähnlich dem Verlauf bei der Messung mit 8 Vol.-% Feuchtegehalt unter Anwendung der Vorkonditionierung beobachten (Bild 49).

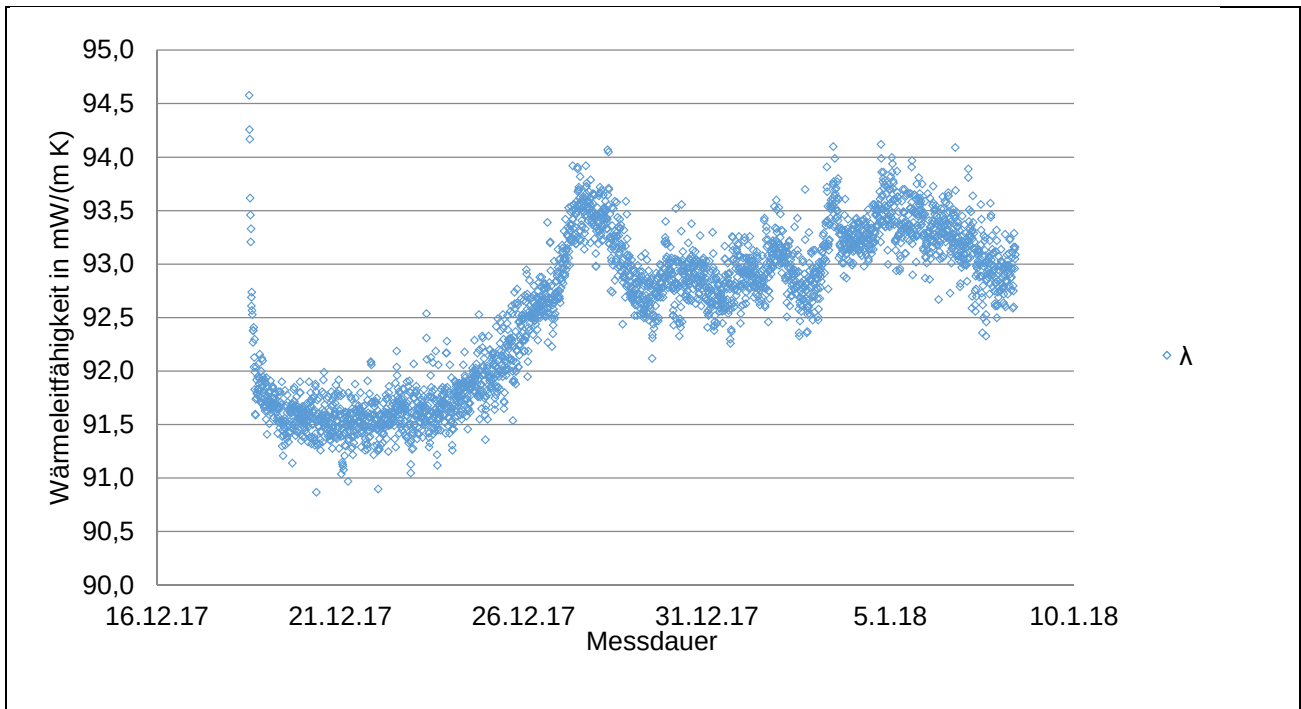


Bild 49

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit bei Messung an einer Mineralwolle Probe mit einem Feuchtegehalt von 15 Vol.-% (Probe wurde nicht vorkonditioniert)

Das fehlende Abklingverhalten der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte entsprechend einer Phase B könnte bei den hohen Feuchtegehalten in einem anhaltenden Heat-Pipe Effekt auf Grundlage eines ständig im Kreislauf von Verdunstung und Rückkondensation geführten Wassergehalts erklärt werden, der sich ab einem bestimmten Feuchtegehalt einstellt.

Die EPS Probe EPS 1 mit 20 Vol.-% erreichte nach Anwendung der Vorkonditionierung im Vergleich mit den Varianten bei niedrigerem Feuchtegehalt bereits sehr früh einen stabilen eingeschwungenen Zustand. Entsprechend der Auswertung der Fit Parameter hätte die Messung bereits nach ca. 0,6 Tagen beendet werden können (Bild 50).

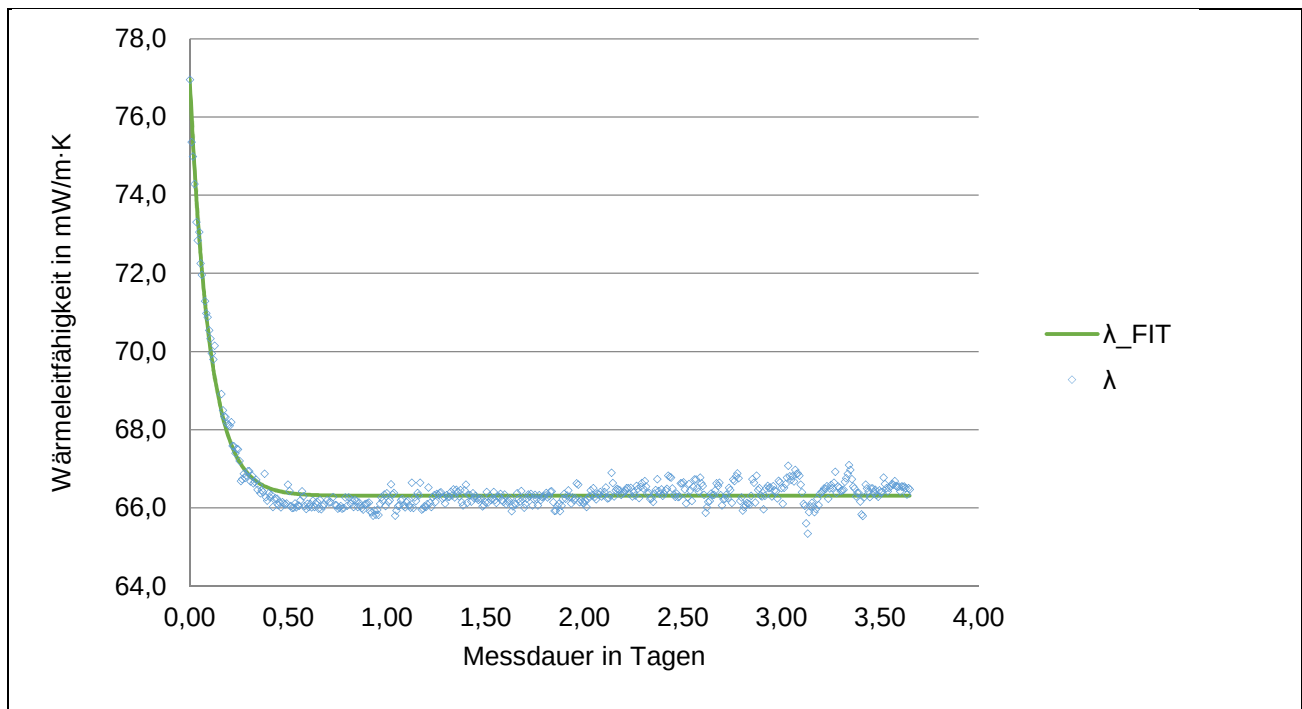


Bild 50

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit und Regression bei Messung an einer EPS Probe (EPS 1) mit einem Feuchtegehalt von 20 Vol.-%

Auch wenn der Ansatz der Vorkonditionierung der Proben grundsätzlich funktioniert (insbesondere bei unkompliziert zu messenden Materialien wie EPS), ergeben sich insbesondere bei der Messung an unbekannten Materialien oder in unbekannten Feuchtezuständen Probleme bei der Bewertung der Messergebnisse. Ohne Zuordnung zu einem Datensatz mit weiteren Messwerten ist es unter Umständen nicht möglich zu beurteilen ob die an die Vorkonditionierung angeschlossen ermittelten Messwerte im Bereich der Phase A oder C liegen.

Die Ergebnisse zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären Temperaturbedingungen sind in Tabelle 20 und Bild 51. zusammengefasst. Bei der graphischen Aufbereitung fällt zunächst der qualitative Unterschied im Verlauf der Werte beim Vergleich zwischen den Schaumkunststoffen und der Mineralwolle auf. Während die Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Schaumkunststoffe EPS 1, XPS und PUR eine leicht progressive Abhängigkeit vom Feuchtegehalt zeigt, entwickelt sich der Werteverlauf bei der Mineralwolle degressiv.

Tabelle 20

Ergebnisse der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an den Materialien EPS 1, XPS, PUR und MW nach Tabelle 19 bei Messung im stationären Zustand

EPS 1	ψ	Vol.-%	0	1,9	5,0	10	20
	λ_{10}	mW/(m K)	33,6	36,7	41,1	48,7	66,5
XPS	ψ	Vol.-%	0	0,5	1,0	2,0	4,0
	λ_{10}	mW/(m K)	33,5	34,0	33,9	35,0	37,0
PUR	ψ	Vol.-%	0	1,5	5,0	10	-
	λ_{10}	mW/(m K)	21,0	23,2	26,5	32,5	-
MW	ψ	Vol.-%	0	1,5	8,0	15	-
	λ_{10}	mW/(m K)	38,2	52,9	83,3	93,0	-

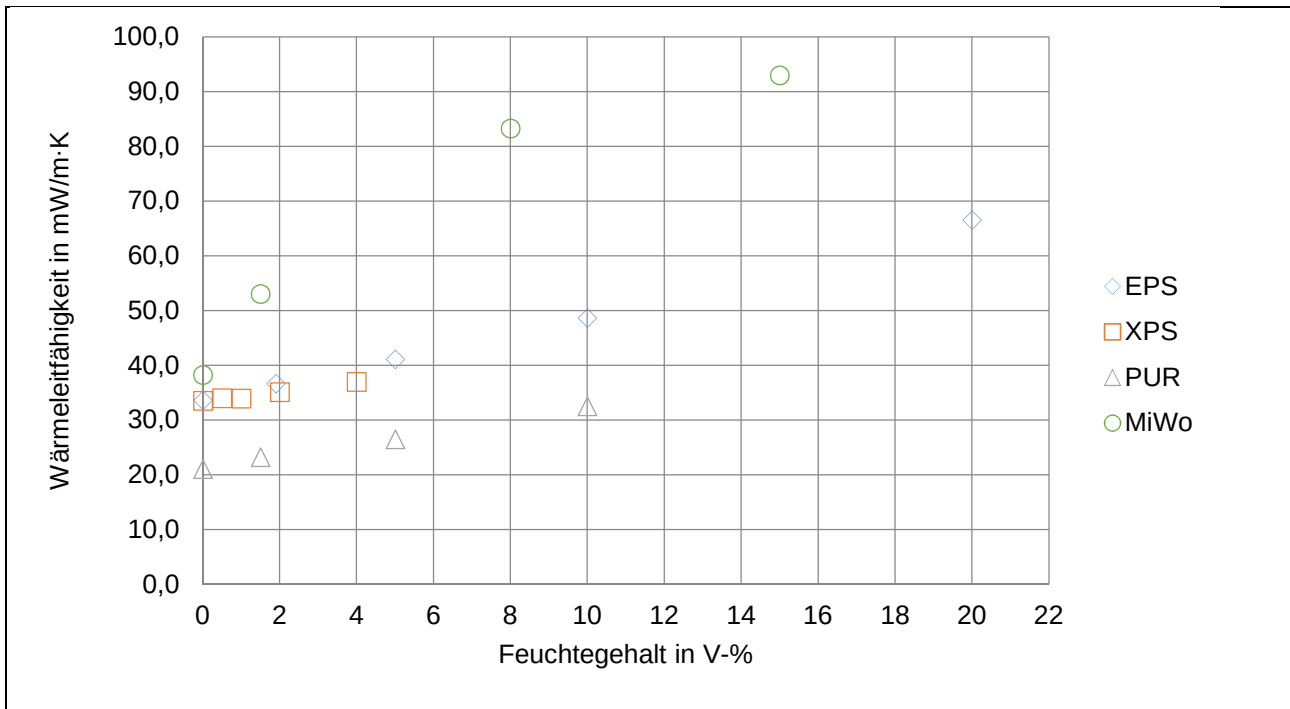


Bild 51

Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an den Materialien EPS 1, XPS, PUR und MW nach Tabelle 19 bei Messung im stationären Zustand

7.4.2 Instationäre Messungen

Die Auswertung der instationären Messungen erfolgte wie unter 7.1.4 beschrieben nach dem Mittelwertverfahren nach ISO 9869-1, jeweils über einen 24 h dauernden Zyklus der Temperaturänderungen gemäß Bild 44. Neben den Messungen an den Materialien gemäß Tabelle 16 wurden unter den instationären Bedingungen auch die Entnahmeproben nach Tabelle 17 untersucht.

In Tabelle 21 sind die Ergebnisse der instationären Messungen, gegliedert nach den untersuchten Materialgruppen zusammengefasst. Jede Zeile zeigt die Daten einer Einzelmessung. Dabei wird jeweils die Dauer der gesamten Messung t_M , der Wert der mittleren Wärmeleitfähigkeit des letzten ausgewerteten 24 h Zyklus $\lambda_{\text{letz.Tag}}$, der Mittelwert aller ermittelten mittleren Wärmeleitfähigkeiten über den ausgewerteten 24 h Zyklus $m_{\lambda, tM}$, die Standardabweichung dieser Werte $s_{\lambda, tM}$ sowie der Variationskoeffizient V ausgewiesen. Im Weiteren soll der Begriff der Wärmeleitfähigkeit bei den instationären Messungen immer mit der mittleren Wärmeleitfähigkeit über einen 24 h Zyklus gleichgesetzt werden.

Die Ergebnisse der an dem Material E2 durchgeführten Messungen sind nicht dargestellt, da die maximal erreichbare Probengröße von 200 x 200 mm für eine Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter den gegebenen Randbedingungen zu klein war. Vermutlich aufgrund von Randeffekten konnten bei dieser Probe keine belastbaren Werte ermittelt werden.

Tabelle 21

Zusammenfassung und Auswertung der Messzeiträume und Messwerte

Mat.	ψ	t_M	$\lambda_{\text{letz.Tag}}$	$m_{\lambda,tM}$	$s_{\lambda,tM}$	V
-	in Vol.-%	in d	in mW/(m K)	in mW/(m K)	in mW/(m K)	in %
EPS 1	1,7	14	37,1	37,1	0,13	0,3
	5	6	41,6	41,5	0,10	0,2
	10	6	50,9	50,9	0,05	0,1
	20	12	74,1	74,5	0,43	0,6
EPS 2	0,005	5	36,4	36,3	0,31	0,9
XPS	0,5	5	33,5	33,6	0,04	0,1
	1	7	33,8	33,8	0,02	0,1
	2	7	34,1	33,9	0,22	0,7
	4	9	36,0	36,0	0,09	0,2
PUR	1,5	4	23,2	23,2	0,01	0,0
	5	9	25,0	24,8	0,66	2,7
	10	5	31,7	31,6	0,14	0,4
MW	1,5	7	41,6	47,0	9,40	20,0
	8	14	92,8	87,7	3,11	3,5
	15	25	117,1	111,1	3,42	3,1
E1	2,5	9	52,4	54,4	1,57	2,9
E2	14	-	-	-	-	-
E3	41	14	168	199	30,3	15,2

Die realisierten Messzeiträume liegen in einem Bereich von 4 – 25 Tagen. In den meisten Fällen ließ sich im Verlauf der Wärmeleitfähigkeit keine große Änderung während der Messdauer feststellen, was sich auch darin zeigt, dass die Werte $\lambda_{\text{letz.Tag}}$ und der Mittelwert über den Messzeitraum, $m_{\lambda,tM}$ zumindest bei den Schaumkunststoffen annähernd gleich sind.

Nur bei den Mineralwollgedämmstoffproben und auch bei den Entnahmeprobe aus EPS (E1 und E3) bestehen hier größere Unterschiede, was auf einen gewissen Einschwingvorgang zu Beginn der Messung und auch eine größere Variation der Messwerte im Verlauf des Messzeitraums schließen lässt.

Wie beschrieben konnte bei der Auswertung der instationären Messungen kein einheitliches Abbruchkriterium definiert werden, weshalb die Messungen normalerweise beendet wurden wenn der Verlauf der Tagesmittelwerte annähernd konstant war. Für die meisten Materialien wurde dies nach einer Messdauer von ca. 4 – 14 Tagen erreicht. Da sich bei den Mineralwollgedämmstoffen mit 15 Vol.-% Feuchtegehalt bei den stationären Messungen nach einer Phase relativ konstanter Werte über 5 Tage, anschließend doch wieder ein deutlicher Anstieg der Messwerte und im Weiteren zyklische Schwankungen beobachten ließen (Bild 49), wurde bei dieser Variante exemplarisch auch bei den instationären Messungen ein längerer Messzeitraum von insgesamt 25 Tagen untersucht (Bild 52).

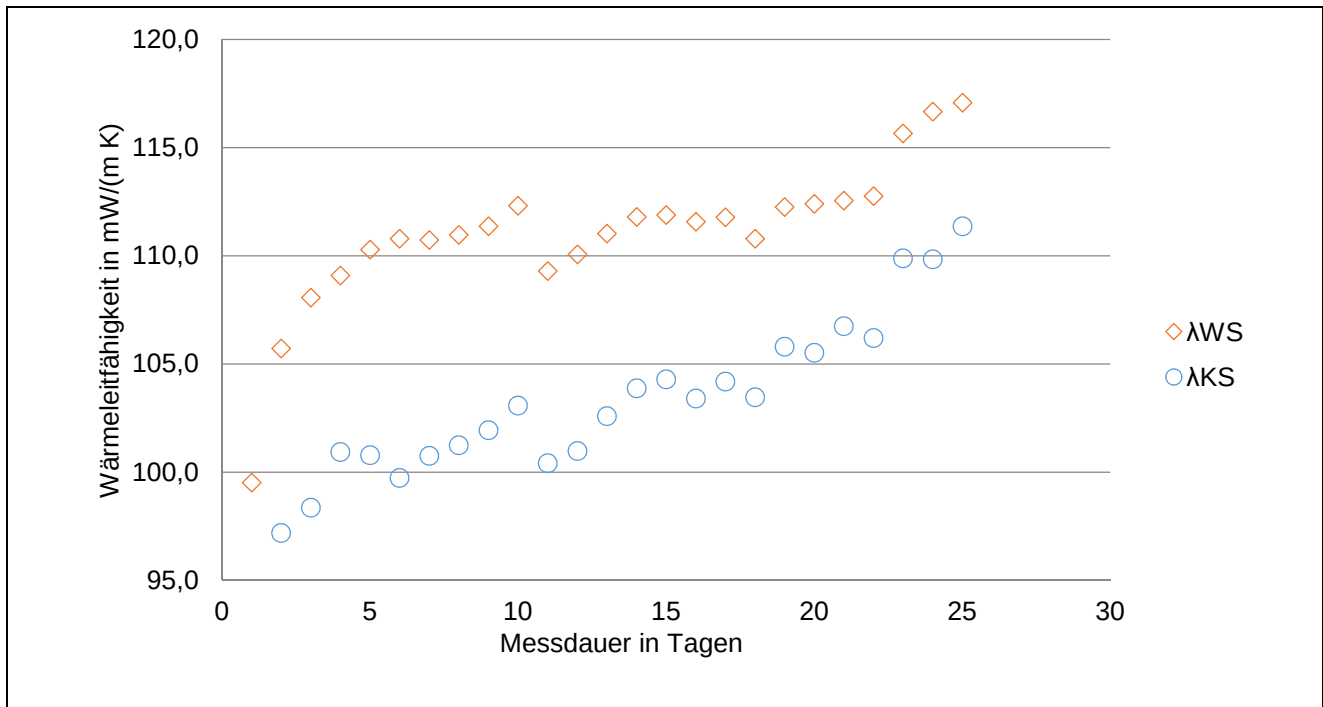


Bild 52

Tagesmittelwerte der Wärmeleitfähigkeit bei getrennter Auswertung auf Grundlage der Wärmeströme der Warmseite (λ_{WS}) und Kaltseite (λ_{KS}) als Funktion der Zeit, bei Messung an einer Mineralwolle Probe mit einem Feuchtegehalt von 15 Vol.-% unter instationären Temperaturbedingungen

Zunächst fällt auf, dass die Tagesmittelwerte auf Grundlage der Wärmeströme der Warmseite (λ_{WS}) innerhalb der ersten fünf Tage auf ein Niveau von ca. 111 mW/(m K) ansteigen und dort für etwa drei Tage konstant bleiben. Dieses Verhalten zeigte sich in ähnlicher Form bei den meisten untersuchten Dämmstoffen. Die Messung wurde deshalb anschließend im Normalfall beendet.

Bei der deutlich längeren Messdauer zeigen sich jedoch im weiteren Verlauf erneut ansteigende Werte der Wärmeleitfähigkeit, die am Tag elf der Messung zunächst wieder sinken um anschließend erneut anzusteigen. Dieser Zyklus wiederholt sich, wobei kein einheitliches Muster hinsichtlich Länge des Zyklus und relativem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit innerhalb eines Zyklus identifiziert werden kann.

Bisher wurden die Tagesmittelwerte ausschließlich auf Grundlage der Wärmeströme der Warmseite (λ_{WS}) ausgewertet. Die so ermittelten Werte zeigen gegenüber den Wärmeströmen auf der Kaltseite insgesamt stabilere zeitliche Verläufe, was auch in Bild 52 gut zu erkennen ist. Zudem könnten instationäre Ein- und Ausspeichervorgänge auf der Kaltseite sich je nach Variation der Temperaturprofile im Tagesgang unter realen Bedingungen positiv oder negativ auf die mittleren Wärmeströme auf der Kaltseite der Dämmung auswirken, weshalb die Wärmeströme auf der Warmseite unter Umständen auch für den für den Nutzer relevanten Heizenergieverbrauch repräsentativer sind.

Bei einem Vergleich der Tagesmittelwerte der Wärmeleitfähigkeit auf Basis der Wärmeströme auf Warm- und Kaltseite in Bild 52 fällt auf, dass die Werte auf der Kaltseite zu Beginn der Messung deutlich niedriger liegen als die Werte auf der Warmseite; im Verlauf der Messung gleichen sich die Werte jedoch sukzessive an.

Ob sich bei längerer Messdauer auch bei den untersuchten Schaumkunststoffen und Mineralwollendämmstoffen mit niedrigeren Feuchtegehalten ein ähnliches Verhalten zeigt, kann aus den vorliegenden Daten nicht abgeleitet werden, weil die Messungen im Normalfall mit dem Erreichen eines ersten konstanten Niveaus beendet wurden.

Im Folgenden werden jeweils für die Messungen mit den Feuchtestufen EPS 1 1,7 Vol.-%, XPS 0,5 Vol.-%, PUR 1,5 Vol.-% und MW 1,5 Vol.-%) die grundsätzlichen Verläufe von Temperaturen und Wärmeströmen auf der Warm- und Kaltseite im eingeschwungenen Zustand gezeigt.

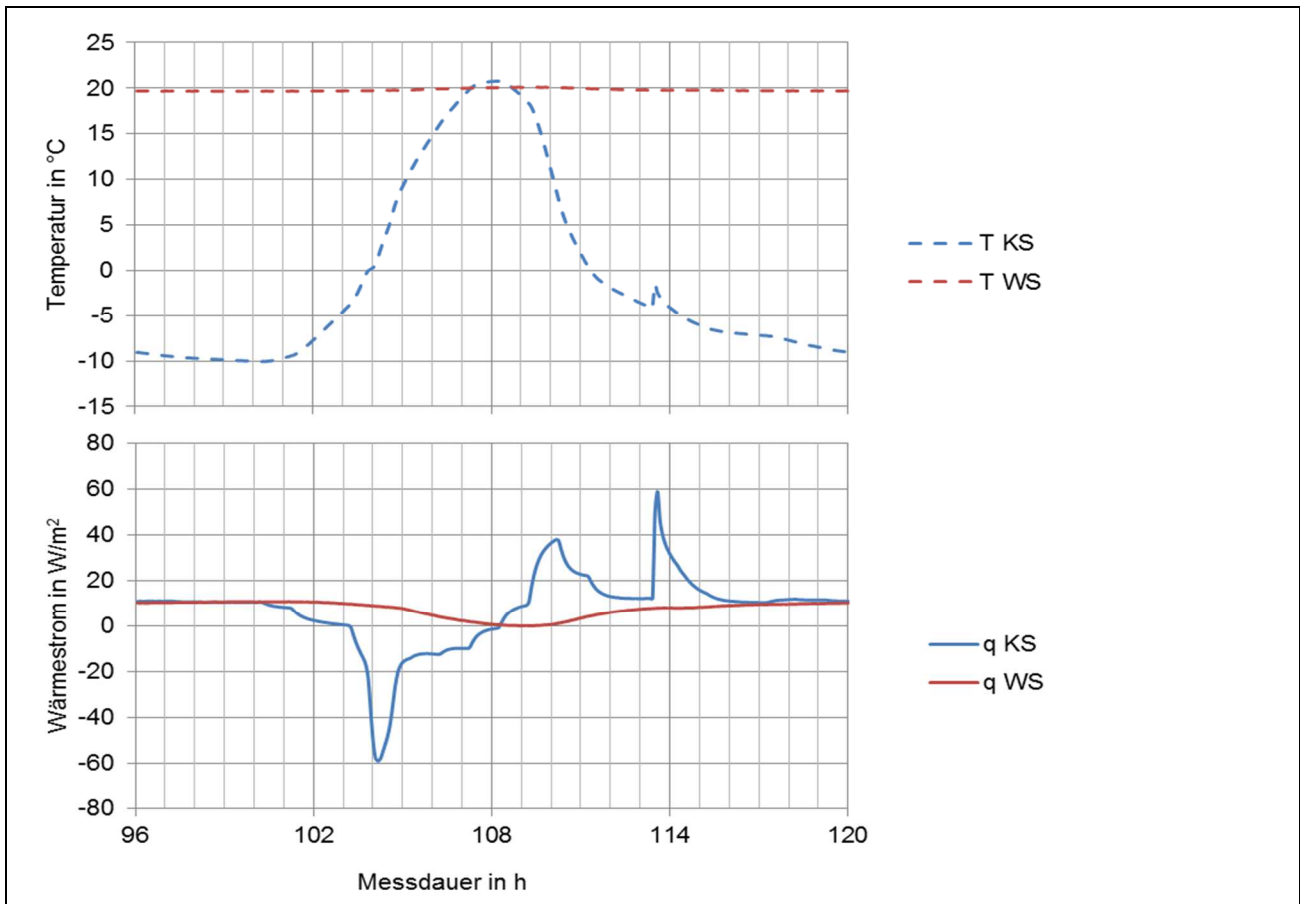


Bild 53

Messdaten zu Wärmestrom und Temperatur auf der Kalt- und Warmseite bei Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im instationären Zustand für das Material EPS 1 bei einem Feuchtegehalt von 1,7 Vol.-%; Oben: Temperaturen; Unten: Wärmeströme; jeweils für Kaltseite (KS) und Warmseite (WS)

Für die folgenden Abschnitte gilt die sprachliche Konvention „Warmseite entspricht der Innenseite“ und „Kaltseite entspricht der Außenseite“ eines imaginären Dachaufbaus. Wärmeströme mit positivem Vorzeichen entsprechen im Versuchsaufbau einer Wärmestromrichtung von Warmseite zu Kaltseite; Wärmeströme mit negativem Vorzeichen entsprechend dem umgekehrten Fall.

Zunächst fällt in Bild 53, unten, auf, dass der Wärmestrom der Warmseite ausschließlich positiv ist und nur im Bereich zwischen 12:00 - 14:00 Uhr (108 - 110 h im Messverlauf) gegen Null tendiert, da sich die Temperaturen von Warm- und Kaltseite in diesem Zeitbereich weitgehend angleichen.

Auf der Kaltseite hingegen liegen komplexere Verläufe der Wärmeströme vor. Mit den im Tagesverlauf steigenden Temperaturen drehen sich auf der Kaltseite die Wärmeströme ab ca. 07:00 (103 h im Messverlauf) bei einer Temperatur auf der Kaltseite von -4°C um und werden erst ab ca. 12:00 (108 h im Messverlauf) wieder positiv. In dieser Zeit wird also ein Wärmestrom von der Kaltseite in die Probe hinein verzeichnet, was heißt, dass in diesem Zeitraum die Temperaturen in der Dämmschicht kälter sind, als auf der Kühlplatte. Dies kann damit erklärt werden, dass der (fallende) Temperaturgradient auf der Kaltseite die aufgrund der thermischen Trägheit in der Probe nur zeitverzögert ansteigende Temperatur überholt.

In der zweiten Tageshälfte sinken die Temperaturen auf der Kaltseite wieder in einem hyperbolischen Verlauf. Mit der dabei steigenden Temperaturdifferenz geht eine Erhöhung des Wärmestroms einher – nun wieder von der Dämmschicht in die Kaltseite hinein. Nach dem Wendepunkt des Anstiegs der Temperaturdifferenz um ca. 14:00 (110 h im Messverlauf) sinken die Wärmeströme wieder, bevor bei ca. -4°C Temperatur auf der Kaltseite wieder ein sprunghafter Anstieg erfolgt, der sich bei den Temperaturen als auch bei den Wärmeströmen auf der Kaltseite ausgeprägt abzeichnet (113,5 h im

Messverlauf). Dieser Effekt ist auf die freiwerdende Kristallisationswärme beim Gefrieren des in der Probe enthaltenen Wassers zurückzuführen. Die Zuordnung des Gefrierens zu einer Kaltseitentemperatur von -4°C könnte folgendermaßen erklärt werden.

Da die Temperaturen auf der Kaltseite um die Mittagszeit (108 h im Messverlauf) 21°C erreichen, könnte die oberste Schicht der Probe in dieser Zeitspanne wieder trocknen. Das heißt, das oberflächennahe Wasser würde wieder in eine Schicht in Richtung Probenmitte wandern. Sinken nun die Temperaturen auf der Kaltseite ist in der oberflächennahen Schicht nur wenig Wasser vorhanden, weshalb hier bei Erreichen des Gefrierpunkts keine relevante Kristallisationswärme frei wird. Erst wenn die tiefer liegende Schicht mit einer relevanten Menge an Wasser aufgrund der thermischen Trägheit der Probe zeitverzögert den Gefrierpunkt erreicht, wird die Kristallisationswärme frei, die schließlich zu einer Temperaturerhöhung auf der Probenoberfläche führt und die Erhöhung des Wärmestroms auf der Messplatte induziert.

Der sprunghafte Anstieg der Wärmeströme ist auf den ersten Blick erstaunlich und legt Vermutungen nahe, dass dieser Effekt auf eine sprunghafte Eisbildung unterkühlten Wassers zurückzuführen ist. Naheliegender ist jedoch eine Zuordnung des Effekts zu der Abtastrate von 5 min – eine in diesem Zeitraum voranschreitende Eisbildung bewirkt dann durch die zeitliche Skalierung den Eindruck eines sprunghaften Anstiegs.

Um zu untersuchen, ob bei einem Dämmstoff im Anlieferungszustand (lufttrocken) grundsätzlich andere Wärmeströme vorliegen als bei den aufgefuehteten Varianten, wurde exemplarisch an dem Material EPS 2 auch im Anlieferungszustand nach Herstellung (Feuchtegehalt 0,005 Vol.-%) ohne weitere Vorbehandlung im Labor die Wärmeleitfähigkeit unter instationären Temperaturbedingungen bestimmt (Bild 54).

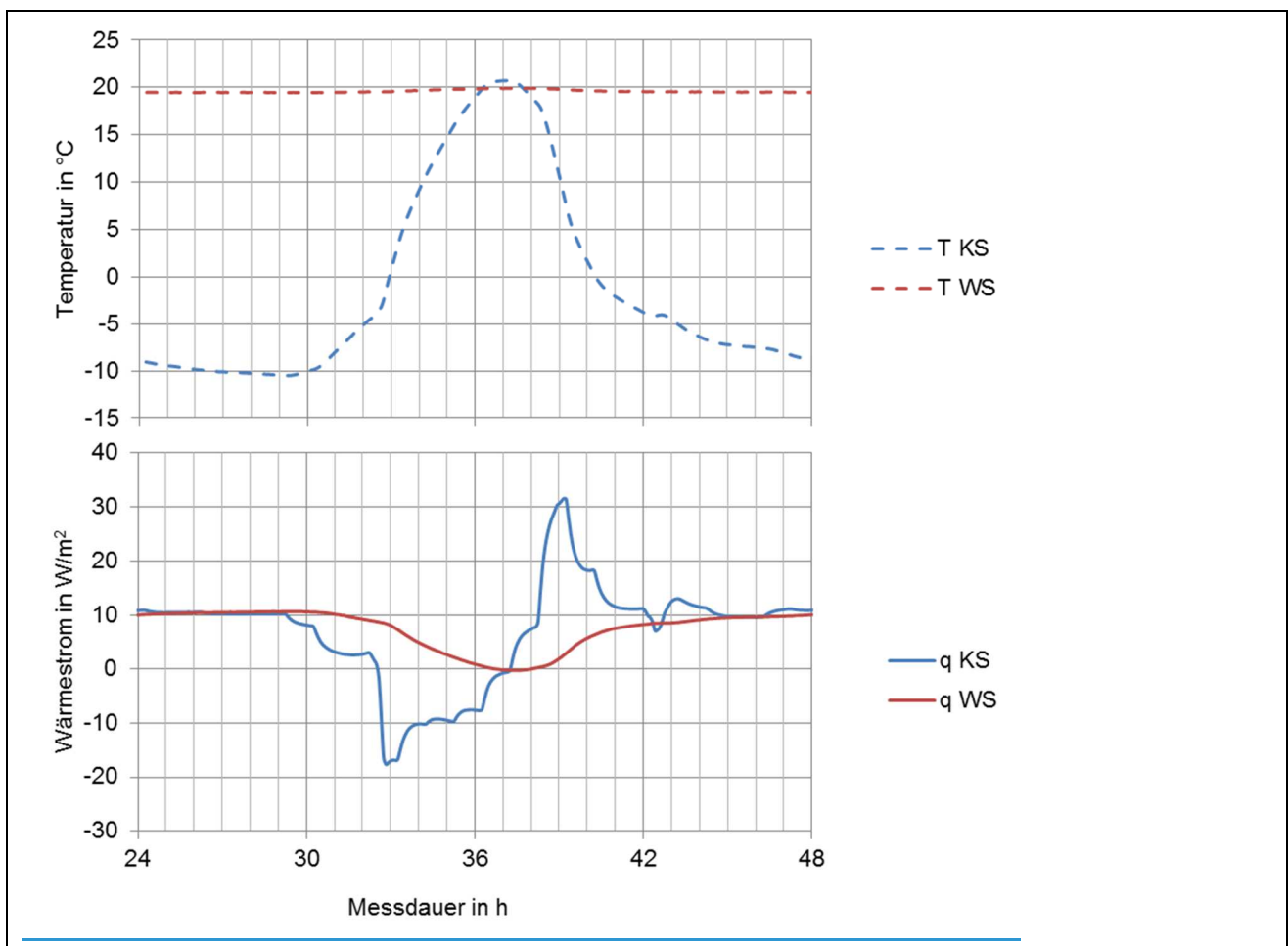


Bild 54

Messdaten zu Wärmestrom und Temperatur auf der Kalt- und Warmseite bei Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im instationären Zustand für das Material EPS 2 bei einem Feuchtegehalt entsprechend der Anlieferung (lufttrocken, 0,005 Vol.-%); Oben: Temperaturen; Unten: Wärmeströme; jeweils für Kaltseite (KS) und Warmseite (WS)

Im Vergleich mit den Wärmestromverläufen in Bild 54 zeigen sich ähnliche Muster. Interessant ist, dass auch hier bei einer Temperatur von annähernd -4°C auf der Kaltseite ein gewisser Einfluss der Kristallisationswärme beim Gefrieren auftritt, obwohl das Material nur einen sehr geringen Feuchtegehalt von 0,005 Vol.-% (entspricht 0,26 Masse-%) aufweist.

Eine mögliche Erklärung könnte darin gefunden werden, dass auf der Kaltseite des Prüfkörpers aus der in der Folienumhüllung enthaltenen und ggf. über Fehlstellen in der Verklebung eindringenden Luft Kondensat ausfällt, welches anschließend in die oberste Materialschicht diffundiert, so dass beim Gefrieren eine entsprechende Kristallisationswärme erzeugt wird, die an den Wärmestrommessplatten registriert wird.

Dieser Effekt kann natürlich auch bei den Prüfkörpern mit höherem Feuchtegehalt auftreten. Der Effekt ist wahrscheinlich trotzdem signifikant mit dem initialen Feuchtegehalt des Prüfkörpers verbunden, was sich aus den bei sukzessive erhöhten Feuchtegehalten ansteigenden Flächeninhalten in diesem Bereich des Kurvenverlaufs der Wärmeströme ableiten lässt (vgl. auch Bild 58).

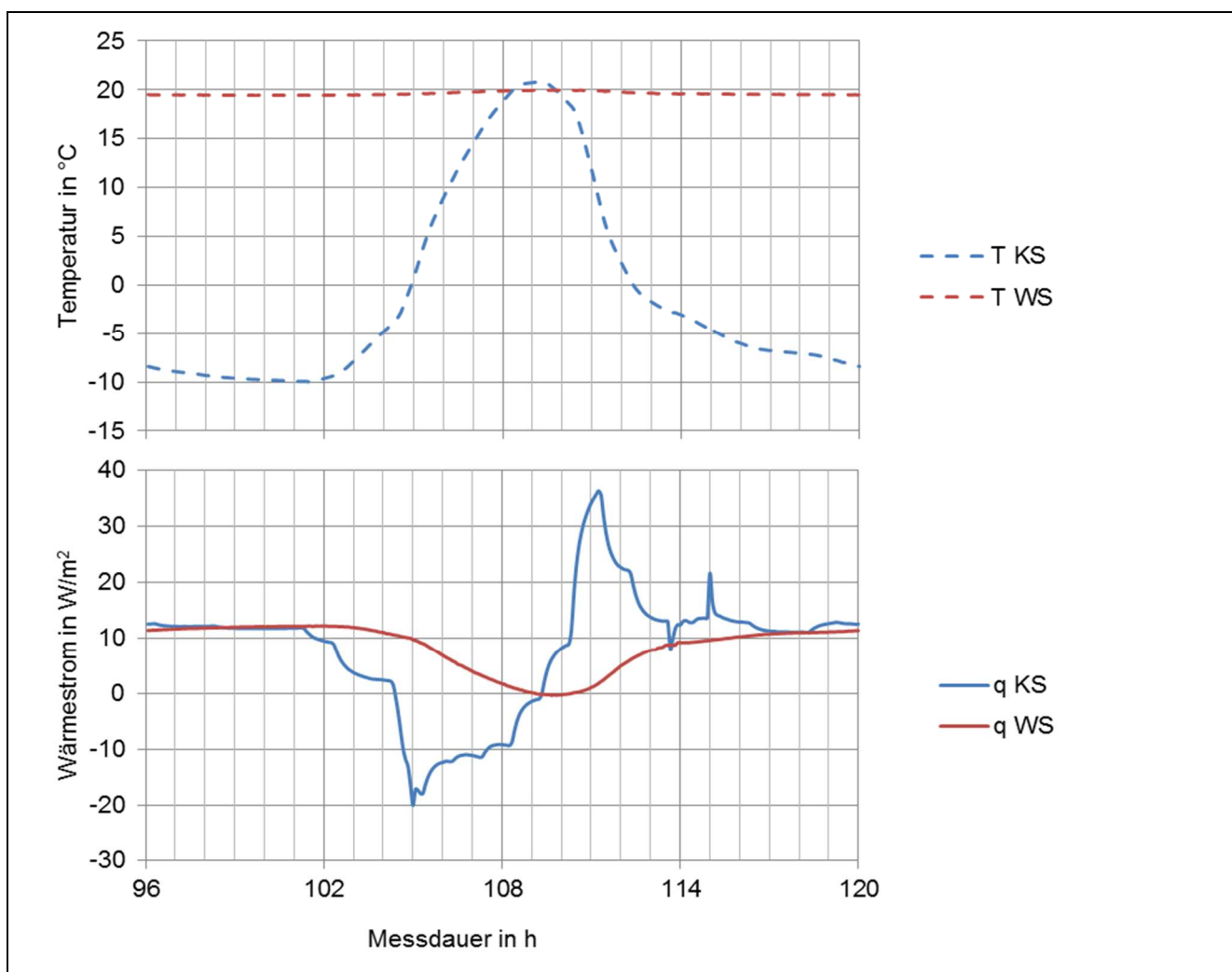


Bild 55

Messdaten zu Wärmestrom und Temperatur auf der Kalt- und Warmseite bei Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im instationären Zustand für das Material XPS bei einem Feuchtegehalt von 0,5 Vol.-%; Oben: Temperaturen; Unten: Wärmeströme; jeweils für Kaltseite (KS) und Warmseite (WS)

In Bild 55 ist der entsprechende Verlauf für das Material XPS bei einem Feuchtegehalt von 0,5 Vol.-% abgebildet. Der Verlauf ist qualitativ ähnlich dem diskutierten Verhalten bei EPS 1: Ein augenscheinlicher Unterschied ist die deutlich geringer ausgeprägte Temperaturänderung aufgrund der Gefrierwärme. Hier zeigt sich nur ein abflachen der Temperaturkurve, gleichwohl relevante Ausschläge im Wärmestrom zu beobachten sind. Im Gegensatz zu dem Verhalten bei EPS 1 (Bild 53) treten hier Effekte in einem Bereich von ca. -2°C bis -5°C auf (113,5 – 114 h im Messverlauf).

Die Streuung des Effekts über einen breiteren Temperaturbereich und die insgesamt unklarere Ausprägung, bspw. entstehen zu Beginn auch entgegengesetzte Ausschläge im Wärmestrom (113,5 h im Messverlauf), könnten auf eine gleichmäßigere Verteilung des Wassers über den Querschnitt der Probe und die insgesamt geringere Menge an Wasser in der Probe erklärbar sein. Da XPS einen deutlich größeren Diffusionswiderstand als EPS aufweist, ist die Feuchteumverteilung während der Messung wahrscheinlich zeitverzögert. Die dann über den Querschnitt breiter verteilte Feuchtigkeit könnte aufgrund der zeitlich verzögerten Temperaturentwicklung im Material entsprechend geringere Kristallisationswärmen über einen längeren Zeitraum abgeben.

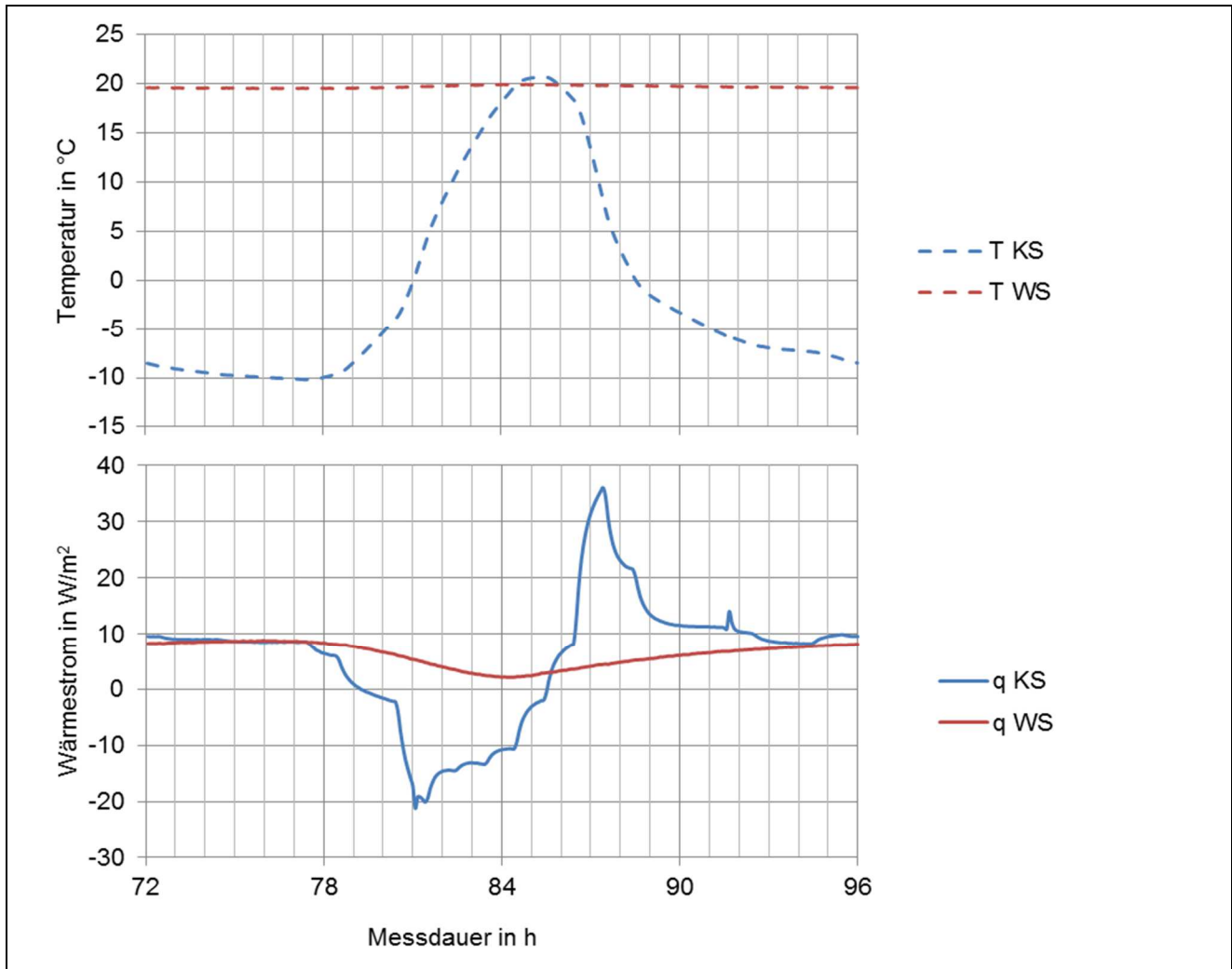


Bild 56

Messdaten zu Wärmestrom und Temperatur auf der Kalt- und Warmseite bei Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im instationären Zustand für das Material PUR bei einem Feuchtegehalt von 1,5 Vol.-%; Oben: Temperaturen; Unten: Wärmeströme; jeweils für Kaltseite (KS) und Warmseite (WS)

Die Verläufe für PUR bei einem Feuchtegehalt von 1,5 Vol.-% (Bild 56) und MW bei einem Feuchtegehalt von 1,5 Vol.-% (Bild 57) zeigen qualitativ das diskutierte Verhalten.

Im zeitlichen Verlauf fällt auf, dass bei PUR der Wärmestrom auf der Kaltseite bereits ab dem Überschreiten einer Kaltseitentemperatur von ca. -8°C negativ wird (Bild 56, 79 h im Messverlauf), während dies bei allen anderen Dämmstoffen bei ca. -3°C erfolgt (exemplarisch Bild 53, 103 h im Messverlauf). Eine Erklärung könnte in der deutlich niedrigeren Wärmeleitfähigkeit von PUR im Vergleich mit den anderen Dämmstoffen liegen. Die sich hieraus ergebende zeitliche Verzögerung des Temperaturanstiegs im Dämmstoff gegenüber der Temperatur auf der Kaltseite führt dann zu einem früheren Richtungswechsel des Wärmestroms.

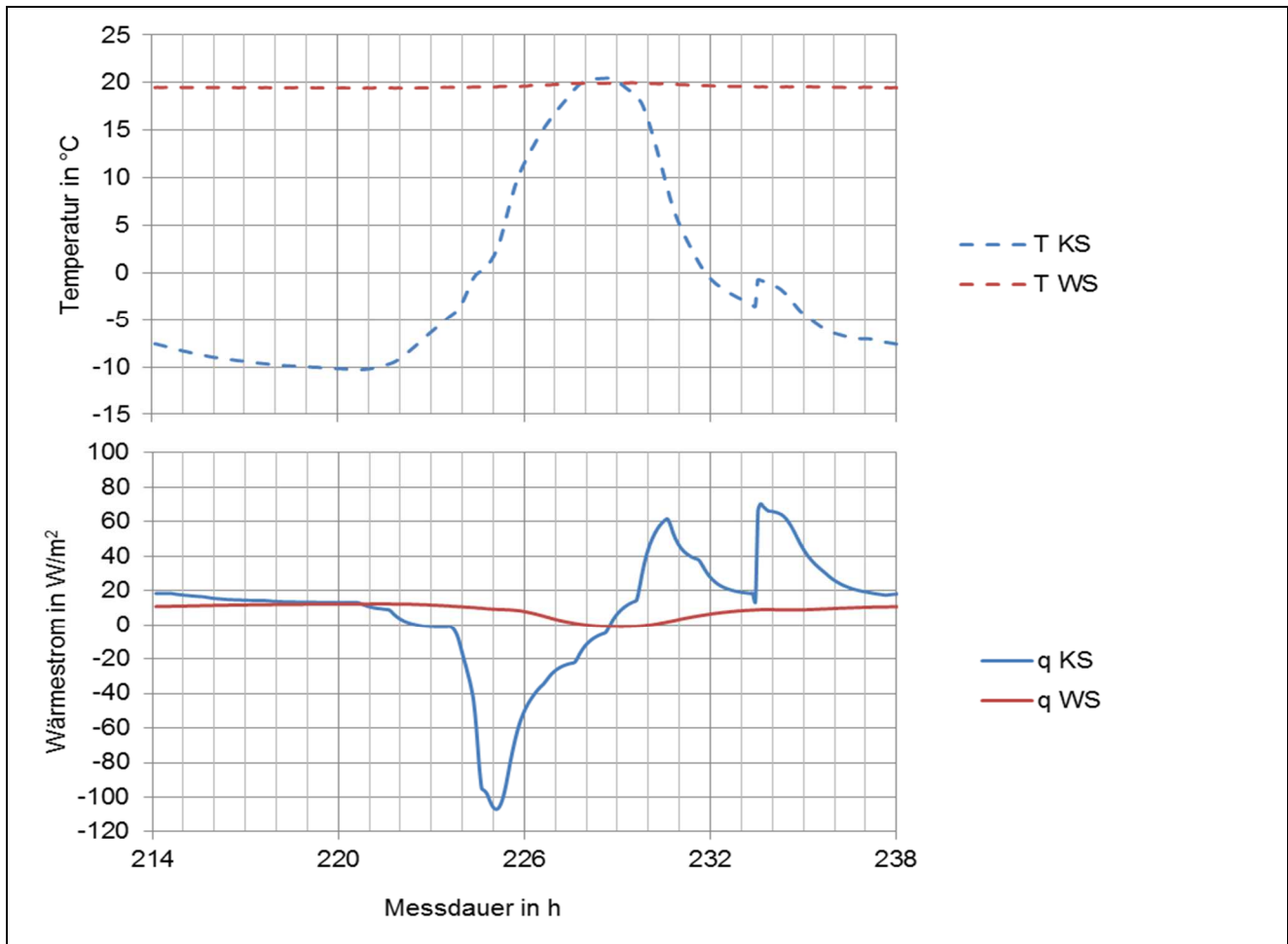


Bild 57

Messdaten zu Wärmestrom und Temperatur auf der Kalt- und Warmseite bei Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im instationären Zustand für das Material MW bei einem Feuchtegehalt von 1,5 Vol.-%; Oben: Temperaturen; Unten: Wärmeströme; jeweils für Kaltseite (KS) und Warmseite (WS)

Um die Auswirkung eines steigenden Feuchtegehaltes auf die Wärmeströme darzustellen wurde in Bild 58 jeweils der Wärmestrom der Kaltseite für das Material PUR bei einem Feuchtegehalt von 1,5 Vol.-%, 5 Vol.-% und 10 Vol.-% über der gleichen Zeitachse aufgetragen.

Dabei fällt auf, dass der Verlauf qualitativ gleich bleibt. Die Höhe der Peaks der Kristallisations- und Schmelzwärme nehmen jedoch mit steigendem Feuchtegehalt zu und ordnen sich zeitlich früher ein. Der zeitliche Versatz ist plausibel, weil die mit steigendem Feuchtegehalt steigende Wärmeleitfähigkeit dazu führt, dass sich die oberflächennahen Schichten bei fallenden Temperaturen auf der Kaltseite früher abkühlen.

Der Wärmestrom aufgrund der Kristallisationswärme beim Gefrieren wird betragsmäßig beim Auftauen der Probe wieder in entgegengesetzter Richtung frei. Ein Vergleich der Mittelwerte der Wärmeströme auf Kalt- und Warmseite zeigt geringe Unterschiede in einem Bereich von ca. 5 %. Für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit werden die Wärmeströme auf der Warmseite herangezogen, die im Mittel höher sind.

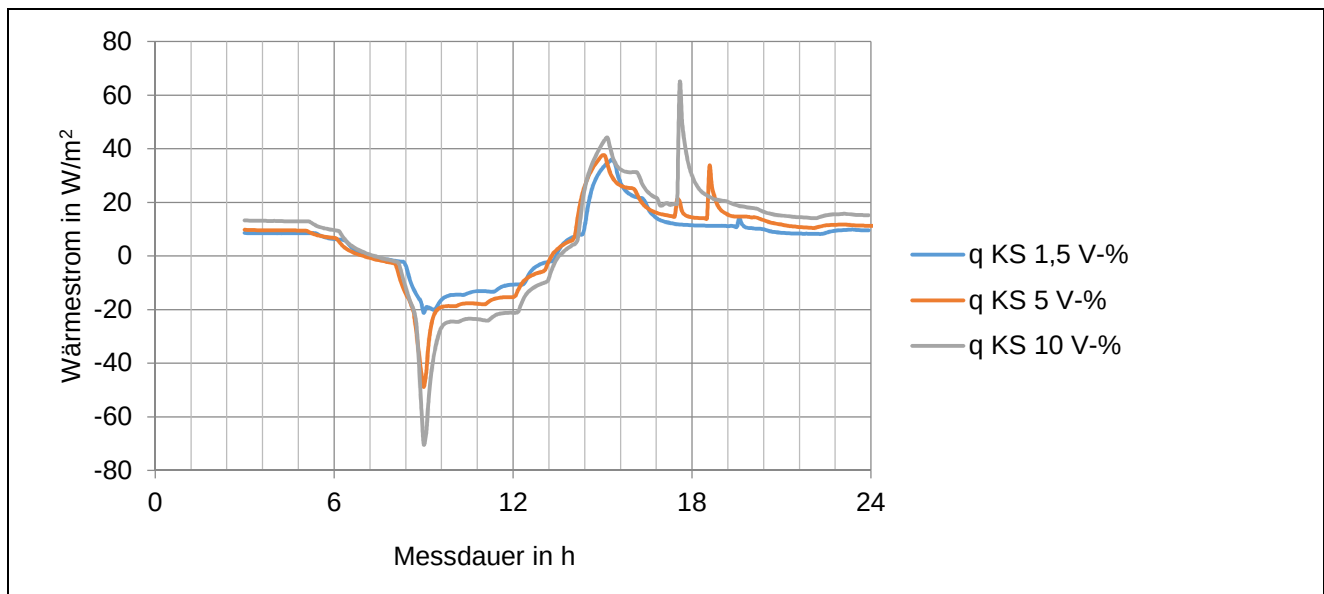


Bild 58

Messdaten zum Wärmestrom der Kaltseite bei Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im instationären Zustand für das Material PUR bei einem Feuchtegehalt von 1,5 Vol.-%, 5 Vol.-% und 10 Vol.-%

Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 und Bild 59 zusammengefasst. Im Vergleich mit den Messwerten bei Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im stationären Zustand ergeben sich qualitativ die gleichen funktionalen Zusammenhänge.

Tabelle 22

Ergebnisse der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an den Materialien EPS 1, XPS, PUR und Miwo nach Tabelle 16 sowie der beiden Entnahmeprobe E1 und E3 nach Tabelle 17 bei Messung im instationären Zustand

EPS 1	ψ	Vol.-%	1,7	5,0	10	20
	λ_{10}	mW/(m K)	37,1	41,6	50,9	74,1
XPS	ψ	Vol.-%	0,5	1,0	2,0	4,0
	λ_{10}	mW/(m K)	33,5	33,8	34,1	36,0
PUR	ψ	Vol.-%	1,5	5,0	10	-
	λ_{10}	mW/(m K)	23,2	25,0	31,7	-
MW	ψ	Vol.-%	1,5	8,0	15	-
	λ_{10}	mW/(m K)	41,5	92,8	117,1	-
E1	ψ	Vol.-%	2,5	-	-	-
	λ_{10}	mW/(m K)	52,4	-	-	-
E3	ψ	Vol.-%	40	-	-	-
	λ_{10}	mW/(m K)	169	-	-	-

Interessant ist die Einordnung des Messwerts der Entnahmeprobe E3 (EPS) bei 40 Vol.-% in die Reihe der Messungen an EPS 1 bei niedrigeren Feuchtegehalten. Der Messwert passt gut in die ermittelte Reihe und könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Beschreibung der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt auch für einen deutlich erweiterten Feuchtebereich Gültigkeit hat.

Im Gegensatz dazu zeigt der Messwert der Entnahmeprobe E1 bei einem Feuchtegehalt von 2,5 Vol.-% gegenüber den Messungen an den neuen Proben einen deutlich höheren Messwert der Wärmeleitfähigkeit.

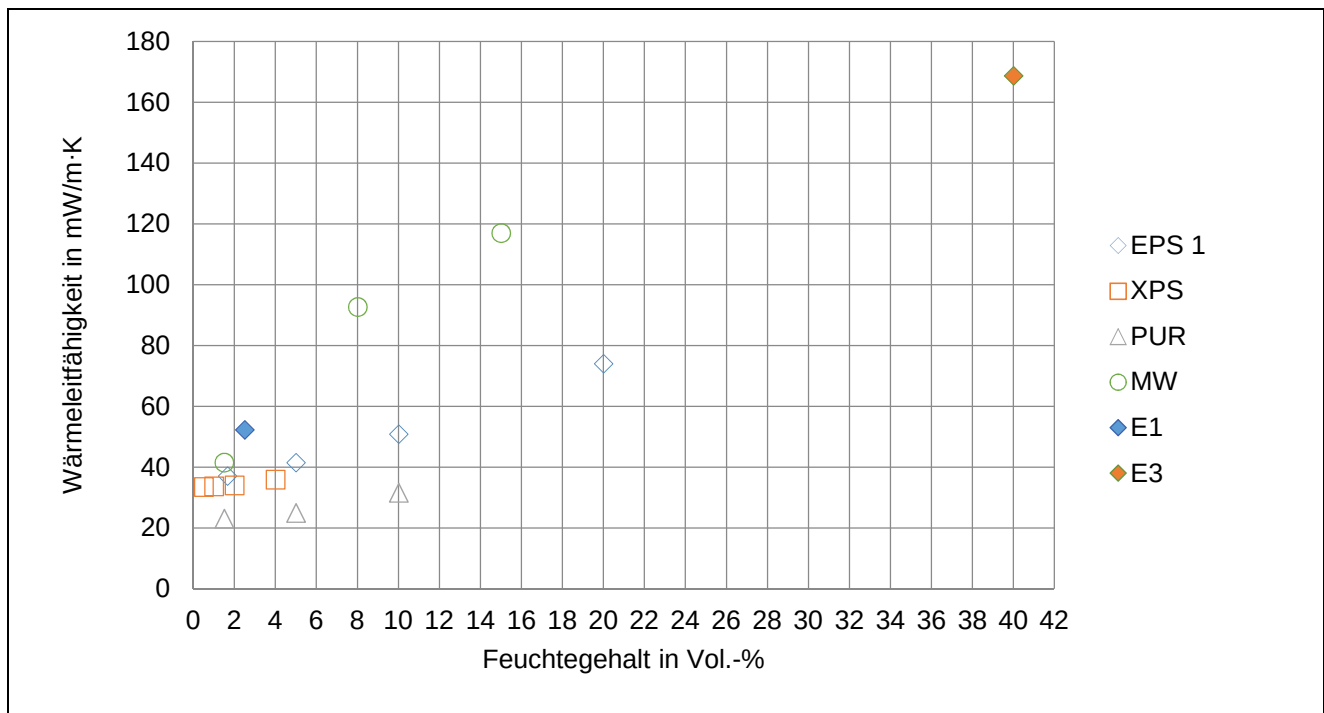


Bild 59

Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an den Materialien EPS 1, XPS, PUR und MW nach Tabelle 16 sowie der beiden Entnahmeprobe E1 und E3 nach Tabelle 17 bei Messung im instationären Zustand

7.5 Diskussion

Gemäß DIN EN ISO 10456, Tabelle 4 gelten für die untersuchten Produktgruppen folgende Umrechnungsfaktoren für den Feuchtegehalt (Tabelle 23).

Tabelle 23

Feuchteumrechnungsfaktoren gemäß DIN EN ISO 10456, Tabelle 4

Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt ^b		
Werkstoff	Feuchtegehalt ψ in m^3/m^3	f_ψ
EPS	< 0,10	4
XPS	< 0,10	2,5
PUR	< 0,15	6
MW	< 0,15	4 ^c

^b Die Auswirkungen der Masseübertragung über flüssiges Wasser und Wasserdampf sowie die Auswirkungen der Änderungen des Aggregatzustandes des Wassers sind durch diese Daten nicht abgedeckt. Der Feuchtegehalt ist der Bereich, für den die Koeffizienten gelten

^c Die Daten gelten nicht, wenn die warme Seite der Dämmung möglicherweise dauerhaft mit Feuchte versorgt wird

Bei Anwendung der zitierten Feuchteumrechnungsfaktoren sind zunächst die Fußnoten b und c zu beachten. Gemäß den Ausführungen in Fußnote b beziehen sich die angegebenen Feuchteumrechnungsfaktoren also auf einen Zustand entsprechend Phase C nach ISO 10051 (vgl. Bild 40). Im Fall von Mineralwolle wird weiter darauf verwiesen, dass bei einer gegebenenfalls dauerhaften Versorgung der Warmseite mit flüssigem Wasser ebenfalls kein Zustand gemäß Phase C zu erwarten ist und unter diesen Umständen auch höhere Messwerte ermittelt werden können.

Eine dauerhafte Versorgung der Warmseite mit flüssigem Wasser kann nun einerseits im praktischen Anwendungsfall durch Diffusion oder Feuchteintrag durch Konvektion erfolgen, andererseits kann auch im Fall der Messung wie bereits an anderer Stelle beschrieben durch zyklisch zurücklaufendes Wasser ein Heat-Pipe Effekt entstehen, der ebenfalls zu anhaltend erhöhten Messwerten der Wärmeleitfähigkeit führt. Sinkende Messwerte in Phase B und ein konstant niedriges Niveau der Wärmeleitfähigkeit in der Phase C während der Messung bedeuten dabei übrigens auch nicht notwendigerweise ein vollständiges Erliegen der beschriebenen Wärmeübertragung durch zyklische Verdunstungs- und Kondensationsvorgänge, sondern können auch auf eine Abschwächung dieser Effekte zurückzuführen sein.

Mit den Feuchteumrechnungsfaktoren f_ψ wird nach DIN EN ISO 10456, Abschnitt 7.3 ein Feuchteumrechnungsfaktor F_m berechnet, mit dem anschließend durch Multiplikation mit dem Wert der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand die Wärmeleitfähigkeit bei einem Feuchtegehalt innerhalb der angegebenen Grenzen ausgerechnet werden kann (Gleichung (4))

$$F_m = e^{f_\psi \cdot (\psi_2 - \psi_1)} \quad (4)$$

mit

F_m	Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt
f_ψ	Faktor gemäß DIN EN ISO 10456, Tabelle 4
ψ_1	Feuchtegehalt im Zustand 1
ψ_2	Feuchtegehalt im Zustand 2

Der funktionale Zusammenhang gemäß Gleichung (4) ergibt stets einen progressiven Verlauf der Feuchteumrechnungsfaktoren bei steigendem Feuchtegehalt. Damit ist bereits bei einem qualitativen Vergleich mit den Werteverläufen entsprechend 57 und 65 klar, dass mit diesem Modell eine Beschreibung der unter den Randbedingungen der Messung ermittelten Werte der Mineralwolle nicht möglich ist.

Für die weitere Darstellung wurden je Materialgruppe gemäß Tabelle 16 alle ermittelten Messwerte bei Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären (Tabelle 20) und instationären (Tabelle 22) Bedingungen zusammengefasst und auf diese Datenbasis eine Regression zum Ansatz gemäß Gleichung (5) angewendet. Die Koeffizienten $\lambda_{tr,Reg}$ und $f_{\psi,Reg}$ werden mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt.

$$\lambda_{Reg} = \lambda_{tr,Reg} \cdot e^{f_{\psi,Reg} \cdot (\psi_2 - \psi_1)} \quad (5)$$

Tabelle 24 enthält die Ergebnisse der mit dem Regressionsverfahren ermittelten Werte von $\lambda_{tr,Reg}$ und $f_{\psi,Reg}$ und zum Vergleich die Feuchteumrechnungsfaktoren aus der DIN EN ISO 10456.

Tabelle 24

Anhand der Messwerte ermittelte Koeffizienten $\lambda_{tr,Reg}$, $f_{\psi,Reg}$ und Feuchteumrechnungsfaktoren gemäß EN ISO 10456, Tabelle 4

Werkstoff	$\lambda_{tr,Reg}$ in mW/(m K)	$f_{\psi,Reg}$	f_ψ , EN ISO 10456
EPS 1	34,6	3,6	4
XPS	33,2	2,2	2,5
PUR	21,4	4,0	6
MW ¹	45,8	5,7	4 ^c

¹Regressionsmodell nach EN ISO 10456 (siehe Gleichung (6)) passt nicht zu den ermittelten Daten

Zunächst fällt auf, dass bei den untersuchten Hartschaumstoffen die ermittelten Werte von $f_{\psi,Reg}$ im Vergleich mit den Feuchteumrechnungsfaktoren nach DIN EN ISO 10456 niedriger (EPS 1, PUR), bzw. leicht höher (XPS) ausfallen. Der Wert von $f_{\psi,Reg} = 5,7$ bei Mineralwolle ist zwar höher als der Literaturwert; es ist hier aber grundsätzlich festzuhalten, dass der herangezogene Ansatz für die Regression gemäß Gleichung (5) nicht zu den ermittelten Messdaten passt. Hier wäre ein degressiver oder hyperbolischer Funktionsansatz zu wählen. Um hier ein geeignetes Regressionsmodell aufzusetzen, müssten aber weitere Messungen an Mineralwollgedämmstoffen mit einem breiteren Spektrum von Rohdichten und Feuchtegehalten durchgeführt werden.

Im Folgenden werden für jede Produktgruppe (EPS 1, XPS, PUR und MW) in einer Graphik alle ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeit (stationär und instationär) dem Verlauf der Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Feuchtegehalts entsprechend den Zuschlagswerten der DIN EN ISO 10456 gegenübergestellt. Ebenfalls aufgetragen ist die anhand der Messdaten ermittelte Regressionskurve (Koeffizienten gemäß Tabelle 24).

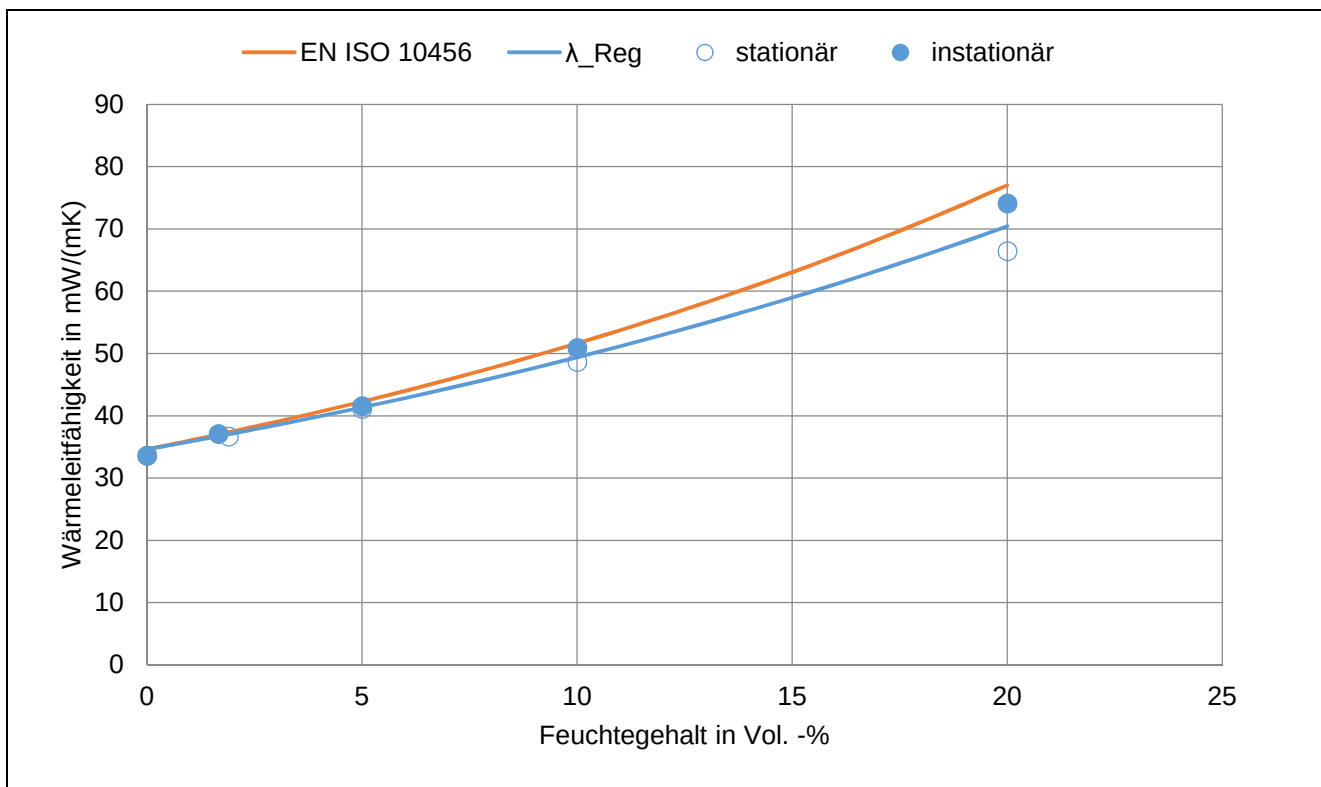


Bild 60

Abbildung 1 Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei Anwendung der in dieser Untersuchung (blaue Kurve) und nach DIN EN ISO 10456 (rote Kurve) ermittelten Feuchteumrechnungsfaktoren für das Material EPS 1

In Bild 60 zeigt sich, dass für das untersuchte Material EPS 1 die unter stationären und instationären Bedingungen ermittelten Messwerte zumindest im Bereich niedriger Feuchtegehalte gut zusammenpassen. Mit steigendem Feuchtegehalt nimmt der Unterschied zu. Die Regressionskurve auf Grundlage der ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeit liegt leicht unterhalb des Werteverlaufs bei Anwendung der Feuchteumrechnungsfaktoren nach DIN EN ISO 10456.

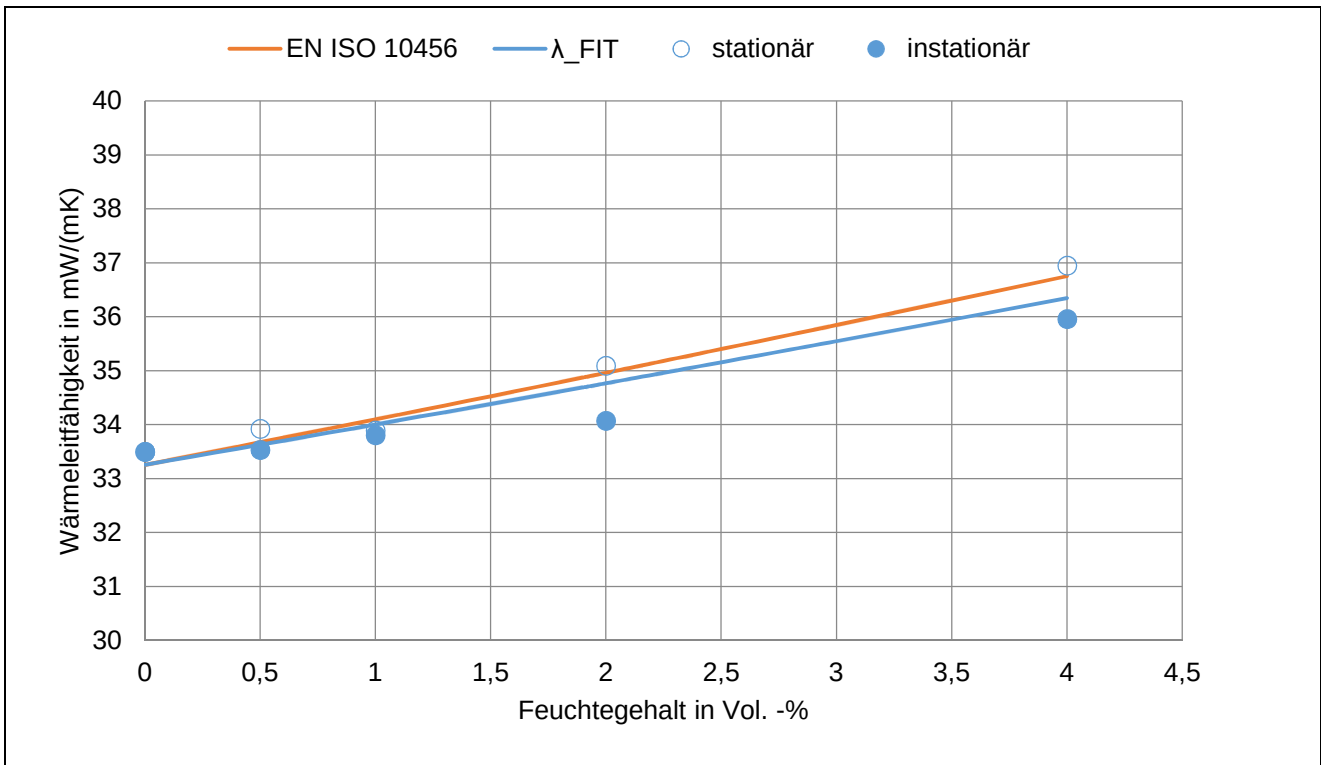


Bild 61

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei Anwendung der in dieser Untersuchung (blaue Kurve) und nach DIN EN ISO 10456 (rote Kurve) ermittelten Feuchteumrechnungsfaktoren für das Material XPS

In Bild 60 zeigt sich, dass für das untersuchte Material XPS die unter stationären und instationären Bedingungen ermittelten Messwerte gut zusammenpassen. Die Abweichungen sind mit maximal 1 mW/(m K) gering. Die Regressionskurve auf Grundlage der ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeit liegt leicht unterhalb des Werteverlaufs bei Anwendung der Feuchteumrechnungsfaktoren nach DIN EN ISO 10456.

In Bild 62 zeigt sich, dass für das untersuchte Material PUR die unter stationären und instationären Bedingungen ermittelten Messwerte gut zusammenpassen. Die Abweichungen sind mit < 1 mW/(m K) sehr gering. Die Regressionskurve auf Grundlage der ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeit liegt deutlich unterhalb des Werteverlaufs bei Anwendung der Feuchteumrechnungsfaktoren nach DIN EN ISO 10456.

In Bild 63 zeigt sich, dass für das untersuchte Material MW die unter stationären und instationären Bedingungen ermittelten Messwerte über den gesamten untersuchten Feuchtebereich hinweg deutliche Abweichungen zeigen. Die Gründe hierfür liegen vermutlich in dem niedrigen Diffusionswiderstand der Mineralwolle, die damit zu insgesamt flinkeren Änderungen des Feuchtegradienten neigt. Die damit insgesamt instabilere Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt kann somit durch Latentwärmeeffekte und zyklisch schwankende Diffusionsströme das thermische Verhalten leichter beeinflussen, als dies bei den insgesamt trägeren Hartschaumstoffen der Fall ist.

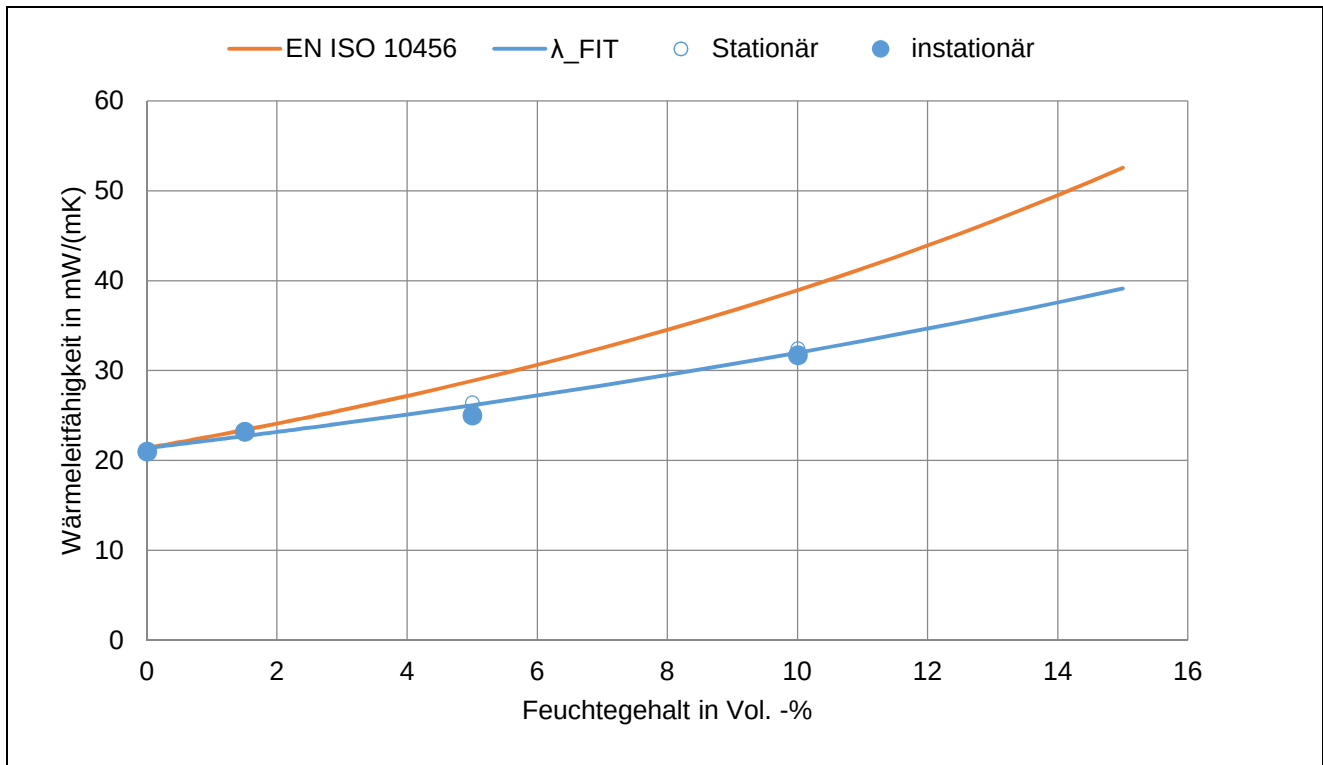


Bild 62

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei Anwendung der in dieser Untersuchung (blaue Kurve) und nach DIN EN ISO 10456 (rote Kurve) ermittelten Feuchteumrechnungsfaktoren für das Material PUR

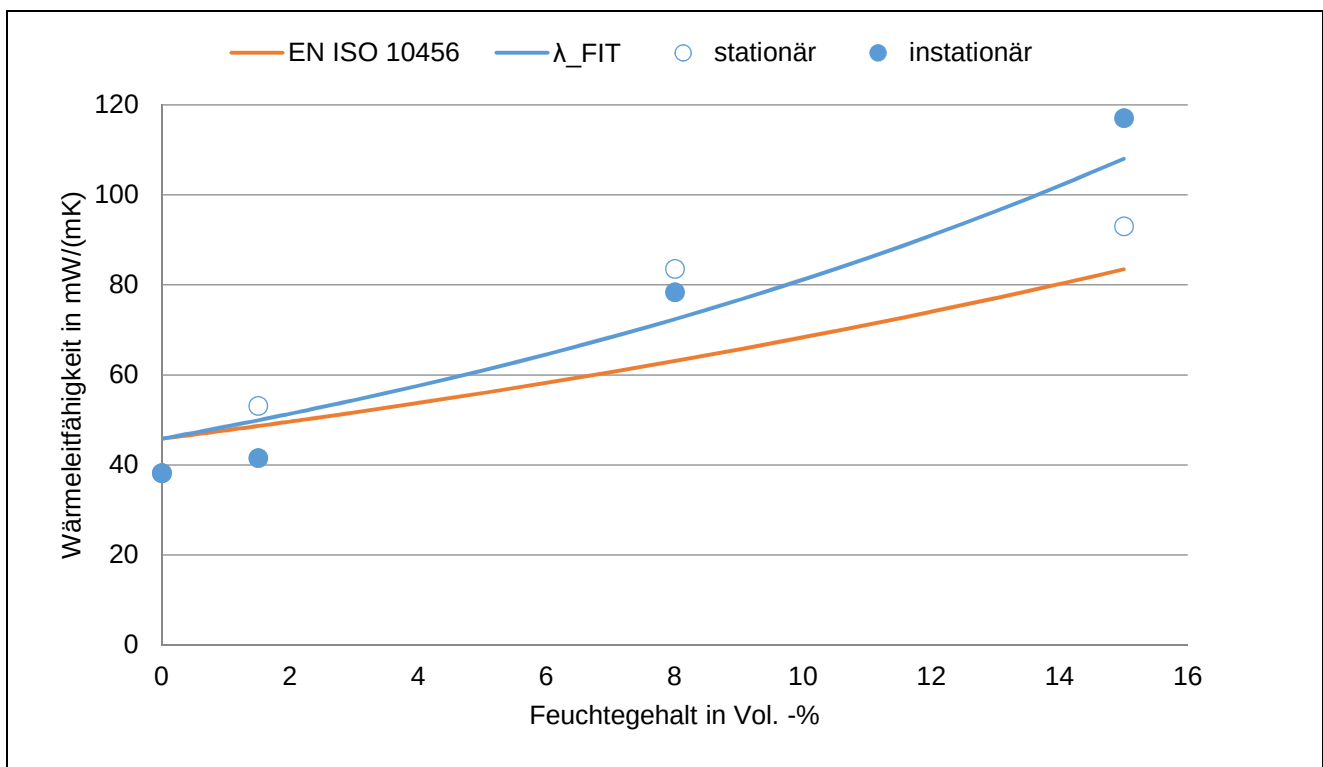


Bild 63

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei Anwendung der in dieser Untersuchung (blaue Kurve) und nach DIN EN ISO 10456 (rote Kurve) ermittelten Feuchteumrechnungsfaktoren für das Material MW

In den Darstellungen des Bild 60 wurden nur die ermittelten Regressionskurven mit den Werteverläufen nach Norm verglichen. Da jeder Messwert einer Messunsicherheit unterworfen ist, müsste zur genaueren Absicherung der Feuchteumrechnungsfaktoren eigentlich eine statistische Auswertung unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten Typ A (Streuung der Messwerte) und Typ B (systematische Messfehler) erfolgen.

Exemplarisch wurde mit den Messwerten des untersuchten Materials EPS 1 für die ermittelte Regressionskurve ein Vertrauensband zu einem Signifikanzniveau von $P = 95\%$ ermittelt. Berücksichtigt wurden dabei alle Messwerte (stationär und instationär) und die Annahme einer Messunsicherheit von $\pm 5\%$ (des Messwerts – Typ B) für die Werte der Wärmeleitfähigkeit und $\pm 5\%$ (des Messwerts – Typ B) für die Werte des Feuchtegehalts (Bild 64).

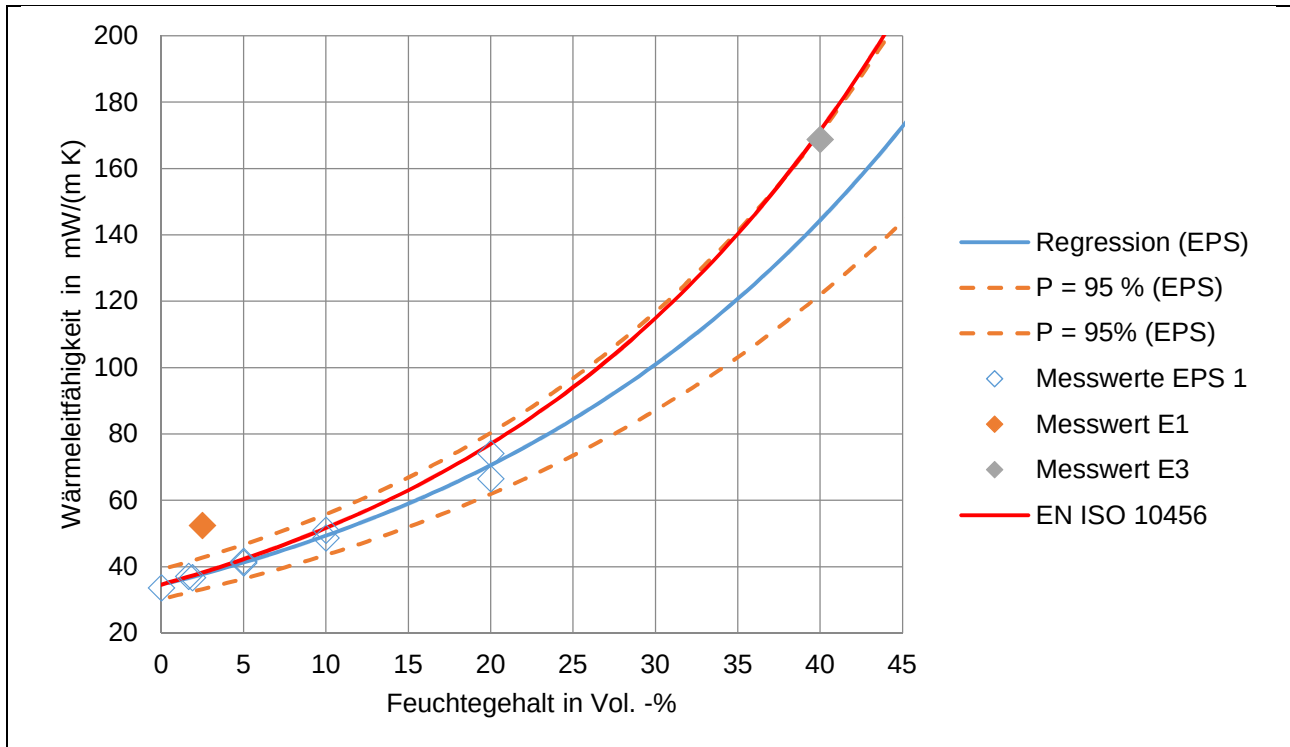


Bild 64

Regressionskurve und 95 % Vertrauensintervall unter Annahme einer Messunsicherheit von $\pm 5\%$ für die Werte der Wärmeleitfähigkeit und $\pm 5\%$ für die Werte des Feuchtegehalts basierend auf den Messwerten des Materials EPS 1 und Gegenüberstellung mit den Werten der Entnahmeprobe aus EPS, E1 und E3 sowie der Kurve basierend auf dem Feuchtezuschlagsfaktor für EPS gemäß EN ISO 10456

Im Bereich niedriger Feuchtegehalte unterschätzt die Kurve nach DIN EN ISO 10456 die obere Grenze des Vertrauensbereiches auf Grundlage der ermittelten Messwerte deutlich. Erst bei sehr hohen Feuchtegehalten gleichen sich die Werte wieder an, wobei anzumerken ist, dass der Feuchteumrechnungsfaktor nach DIN EN ISO 10456 für EPS intentionsgemäß nur bis 10 Vol.-% Feuchtegehalt anwendbar ist.

8. Verhalten typischer Dämmstoffe

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse auf die unterschiedlichen Dämmstoffe zusammengefasst. Vorausgesetzt werden die Kurzbeschreibung der Prüfverfahren und die Anforderungen zur Wasseraufnahme, um einen Bezug zu „üblichen“ Feuchtegehalten herstellen zu können.

Bei der Feuchteaufnahme üblicher Dämmstoffe sind im Wesentlichen zwei unterschiedliche Transportwege zu unterscheiden. Einerseits wird Wasser tropfbar flüssig durch strömendes Wasser bei äußeren Druckdifferenzen oder in Kapillarporen durch Kapillarität transportiert. Andererseits bewegt sich Wasser innerhalb eines Stoffs beim Wechsel der Aggregatzustände durch Diffusion mit verdampfen von flüssigem Wasser an der warmen Seite und kondensieren von Wasserdampf zu Tauwasser an der kalten Seite.

Die Auswirkungen von Strömen und Kapillarität werden durch die Prüfung der Wasseraufnahme durch Eintauchen der Proben bestimmt. Dafür gibt es zwei Verfahren: Das kurzfristige Eintauchen wird gemäß [DIN EN 1609:2013-05] untersucht, das langfristige Eintauchen nach [DIN EN 12087:2013-06]. Der zweite Transportvorgang kann nach dem Verfahren der [DIN EN 12088:2013-06] ermittelt werden.

8.1 **Prüfverfahren und Anforderungen**

8.1.1 Wasseraufnahme durch kurzzeitiges Eintauchen nach [DIN EN 1609:2013-05]

Bei diesem Verfahren wird eine 200 x 200 mm große Probe in jeweiliger Lieferdicke über 24 h lang mit seiner Unterseite in Wasser eingetaucht und die Änderung ihrer Masse gemessen. Die Berücksichtigung des anhaftenden, abtropfenden Wassers wird unterschiedlich (Verfahren „A“ oder „B“, auf die hier nicht näher eingegangen wird) gehandhabt. Der Probekörper wird so eingetaucht, dass seine Unterseite 10 mm (± 2 mm) unter dem Wasserspiegel liegt. Das Ergebnis der Wasseraufnahme wird in kg/m² ausgegeben. Die Probendicke entspricht der Lieferdicke, 10 cm dicke Dämmstoffe werden auf die gleiche Art und Weise geprüft wie 30 cm dicke, weswegen die an den Oberflächen anhaftende Wassermengen den flächenbezogenen Messwert nicht nur unwesentlich beeinflussen. Bei einer bei unterschiedlichen Dicken gleich bleibenden Struktur des Dämmstoffs wird die Wasseraufnahme in der Dämmstoffstruktur bei unterschiedlichen Dicken gleich bleiben. Bei größeren Dämmstoffdicken ergibt sich in diesem Verfahren eine geringere volumenbezogene Wasseraufnahme.

Richtigerweise wird daher in der Norm ausdrücklich festgelegt, dass die Ergebnisse über einen Volumenanteil nicht auf andere Dicken umgerechnet werden sollten.

Eine kurzzeitige Befeuchtung während des Einbaus, z. B. durch Beregnung gelagerter Dämmplatten oder durch Beregnung des bereits eingebauten Dämmstoffs vor dem Verlegen der Abdichtung, wird bei größeren Dämmstoffdicken weniger Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit haben als bei kleineren Dicken.

(Als zukünftige Fassung der Norm liegt z. Zt. [E DIN EN ISO 29767:2017-12] vor.)

8.1.2 Wasseraufnahme durch langfristiges Eintauchen nach [DIN EN 12087:2013-06]

Auch hierbei wird eine Dämmstoffprobe von 200 mm x 200 mm Grundfläche und der Lieferdicke eingesetzt. Die Prüfzeit beträgt 28 Tage. Es wird in zwei Verfahren unterschieden: Beim teilweisen Eintauchen („Prüfverfahren 1“) wird nur die Unterseite, beim vollständigen Eintauchen („Prüfverfahren 2“) die ganze Probe so eingetaucht, dass der Wasserspiegel 50 mm über der Probe liegt. Die Berücksichtigung des anhaftenden, abtropfenden Wassers wird unterschiedlich (Verfahren „A“ oder „B“) gehandhabt. Das Ergebnis des teilweisen Eintauchens wird auf die Flächengröße der Probe bezogen und in kg/m² angegeben, das Ergebnis des vollständigen Eintauchens wird auf das Volumen des Probekörpers bezogen und in Volumen-Prozent angegeben. (Als zukünftige Fassung der Norm liegt z. Zt. [E DIN EN ISO 16535:2017-12] vor.)

8.1.3 Wasseraufnahme durch Diffusion nach [DIN EN 12088:2103-06]

Die Prüfung ist zur Anwendung von außenliegenden Wärmedämmungen konzipiert worden, d. h., für Dämmstoffe, die außerhalb der Bauwerksabdichtung liegen, also für Umkehrdachkonstruktionen oder Perimeterdämmungen im Erdreich. Für die Verwendbarkeit der im Flachdach weitaus überwiegend verwendeten Dämmungen unter Abdichtungen wird sie daher nicht zugrunde gelegt.

Es werden in der Regel Proben mit einer Grundfläche von 500 mm x 500 mm sowie der Lieferdicke untersucht. Sie werden 28 Tage lang über einem Behälter mit 50 °C warmen Wasser und einer oberseitigen Temperatur von 1 °C gelagert. Alle 7 Tage wird der Probekörper gewendet. Das Ergebnis der Wasseraufnahme kann auf die Grundfläche in kg/m² bezogen werden oder auf das Volumen in Volumen-%.

(Als zukünftige Fassung der Norm liegt z. Zt. [E DIN EN ISO 16536:2017-12] vor.)

8.1.4 Anforderungen an die Begrenzung der Wasseraufnahme in Produktnormen

In den Produktnormen (DIN EN 13162 bis 13165) wird die Bezugnahme auf die Wasseraufnahme nach den o. g. Verfahren unterschiedlich gehandhabt. Für Mineralwolle wird ein Grenzwert, bezogen auf die Grundfläche, gesetzt. Für EPS beschränkt sich die Anforderung auf folgenden Satz: „Kein Prüfergebnis darf die angegebene Stufe überschreiten“. Bei XPS werden unterschiedliche Stufen definiert. Für PUR beschränkt sich die Anforderung wiederum auf den oben bereits zitierten Satz. Gibt der Hersteller für sein Produkt einen Nennwert an, so muss der also über allen Prüfergebnissen, d. h. auf der sicheren Seite liegen. Die Anforderungen sind in Tabelle 25 zusammengestellt.

Tabelle 25
Anforderungen an die Begrenzung der Wasseraufnahme in den Produktnormen

	DIN EN		Kurzfristiges Eintauchen nach DIN EN 1609	Langfristiges Eintauchen nach DIN EN 12087	Wasseraufnahme durch Diffusion nach DIN EN 12088
EPS	13163		-	-	-
XPS	13164			Verfahren 2 ≤ 3 Vol-% ≤ 1,5 Vol-% ≤ 0,7 Vol-%	≤ 1 Vol-% ≤ 2 Vol-% ≤ 3 Vol-% ≤ 4 Vol-% ≤ 5 Vol-%
PUR	13165		-	-	-
MW	13162		≤ 1,0 kg/m ²	≤ 3,0 kg/m ² Verfahren 1	

8.1.5 Anforderungen nach [DIN 4108-10:2015-12]

Für den hier beschriebenen Anwendungsfall von Dämmstoffen unter Abdichtungen (DAA) werden in Bezug auf die Wasseraufnahme keine Anforderungen an die Dämmstoffe gestellt.

8.2 EPS – Expandierter Polystyrol-Hartschaum

8.2.1 Kurzfristige Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme von EPS ist gering, solange das Wasser nicht über den Diffusionsweg in den Dämmstoff gelangt. Eine kurzzeitige Beaufschlagung mit Wasser – z. B. wenn es während der Baumaßnahme zu Niederschlägen kommt, bevor die Abdichtung über der Dämmung vollständig verlegt wurde – erhöht den Feuchtegehalt im Dämmstoff nur unerheblich.

Allerdings geben die Hersteller in den Produktinformationen keine Werte für die Wasseraufnahme an. Auch die Produktnorm stellt keine Anforderungen (s. Kap. 8.1.4).

Selbst wenn mit dem Attribut „geringe Wasseraufnahme“ geworben wird, taucht ein Wert entsprechend einer der o. g. Normen meist nicht in den technischen Datenblättern auf.

Eine Ausnahme bildet z. B. die Schweizer Firma Fa. Swisspor, die in [Swisspor 2000] für Flachdachdämmplatten (EPS 30) eine Wasseraufnahme nach 7 Tagen von 2,0 Vol.-% und nach einem Jahr von 3,5 Vol.-% angibt.

Nach [BASF 2005] ist die Wasseraufnahme von EPS in Abhängigkeit von der Rohdichte unterschiedlich, wie in Bild 65 dargestellt ist. Selbst bei Dämmstoffen geringer Rohdichte ist offenbar nicht mit einem Anstieg über 5 Vol.-% zu rechnen.

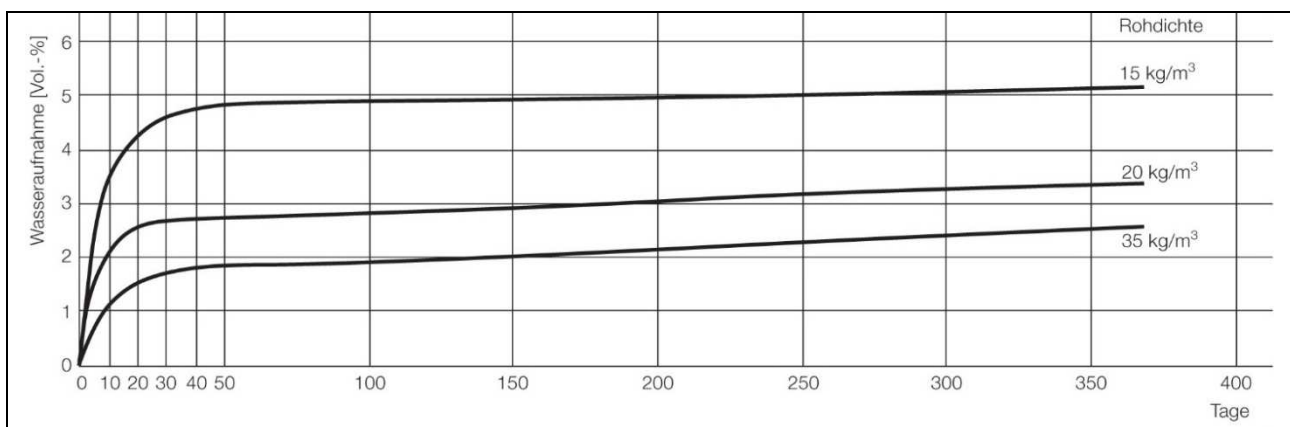


Bild 65

Wasseraufnahme von EPS nach Unterwasserlagerung aus [BASF 2005]

Liegt ein EPS-Dämmstoff z. B. durch Niederschläge während der Bauzeit über mehrere Tage vollständig von Wasser umhüllt, erhöht sich nach der obigen Grafik entsprechend der Feuchtegehalt. Offenbar steigt der Feuchtegehalt über diese Art des Wassereindringens aber zunächst nicht über 5 Vol.-% an.

(Zum Vergleich: Für die Perimeter-Dämmung werden in entsprechenden bauaufsichtlichen Zulassungen Maximalwerte von 5 Vol.-% (bei langfristigem völligem Eintauchen nach [DIN EN 12087:2013-06]), bzw. 10 Vol.-% beim Diffusionsversuch nach [DIN EN 12087:2013-06] gefordert, die von den speziell für diesen Einsatzzweck hergestellten Platten erfüllt werden. Die entsprechenden Bezeichnungen entsprechend der [DIN EN 13163:2017-02] lauten dann WL(T)5 (für den Eintauchversuch) und WD(V)10 (für den Diffusionsversuch)).

8.2.2 Langfristige Wasseraufnahme im eingebauten Zustand

Wie die Messungen an ehemals verbauten Dämmstoffen zeigen, können die Feuchtegehalte von Dämmstoffen, die langanhaltend einer hohen Feuchtebelastung, insbesondere bei nachströmender Feuchte, ausgesetzt sind, sehr hohe Werte annehmen. Häufig werden in Schadensfällen Werte von deutlich über 10 Vol.-% gemessen. Der von den Verfassern gemessene Spitzenwert liegt bei 55 Vol.-%.

8.2.3 Untersuchungen des FIW zur Feuchteaufnahme von EPS

Um eine orientierende Aussage zum Feuchtezustand in Anlieferung und der kurz- und langfristigen Wasseraufnahme eines EPS Dämmstoffs zu erhalten, wurde das Material EPS 2 vom FIW entsprechend untersucht. Der Feuchtegehalt im Anlieferungszustand war mit 0,26 Masse-%, respektive 0,0049 Vol.-% vernachlässigbar gering. Die Wasseraufnahme nach kurzfristigem Eintauchen für 24 h entsprechend [DIN EN 1609:2013-05] betrug 0,08 kg/m², was umgerechnet auf die vorliegende Materialstärke 0,08 Vol.-% entspricht. Nach Durchlaufen der Prüfung zur Ermittlung der Wasseraufnahme durch langfristiges Eintauchen über 28 Tage nach [DIN EN 12087:2013-06] erhöhte sich die Wasseraufnahme auf lediglich 0,09 kg/m², was umgerechnet auf die vorliegende Materialstärke 0,09 Vol.-% entspricht.

Die Auswertung einer breiteren Datenbasis von EPS Dämmstoffen ist in Bild 66 enthalten. Insgesamt wurden 576 Versuche zum kurzfristigen Eintauchen nach [DIN EN 1609:2013-05] und acht Versuche zum langfristigen Eintauchen nach [DIN EN 12087:2013-06] ausgewertet. Zum besseren Vergleich mit den Angaben bei den Wärmeleitfähigkeitsuntersuchungen in diesem Bericht wurden die Werte von kg/m² in Vol.-% umgerechnet. Weitere Versuche die ermittelten Feuchtegehalte in Vol.-% oder kg/m² mit der Rohdichte und/oder der Dicke der Prüfkörper zu korrelieren, ergaben keine eindeutigen statistischen Zusammenhänge.

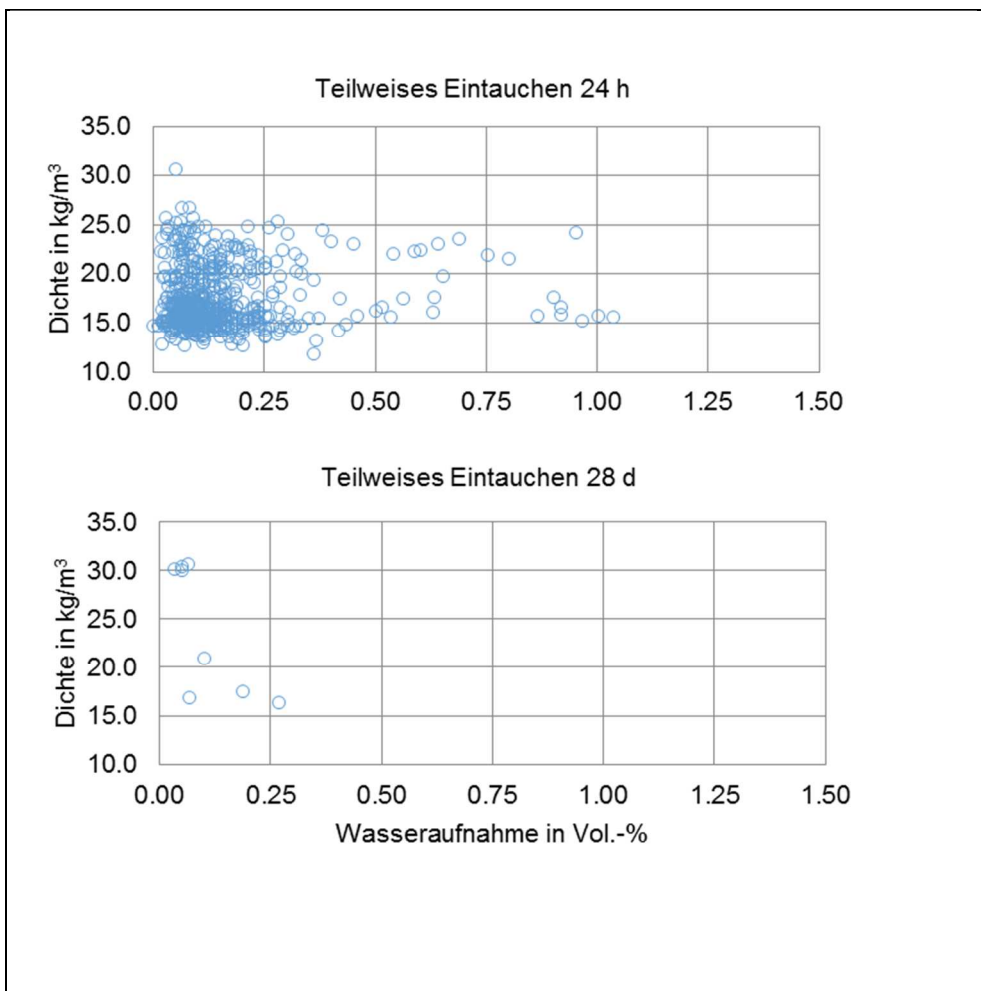


Bild 66

Feuchtegehalt von EPS Dämmstoffen in Vol.-% nach teilweisem Eintauchen für 24 h [DIN EN 1609:2013-05] und 28 Tagen [DIN EN 12087:2013-06]

Auch wenn die Fallzahlen für die langfristige Wasseraufnahme gering sind, so sind die ermittelten Werte insgesamt auf einem sehr niedrigen Niveau. Der Großteil der Werte ist einem Bereich < 0,2 Vol.-%, sowohl für das kurzfristige, als auch das langfristige Eintauchen. Eine relevante Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist bei diesen Feuchtegehalten entsprechend

den Feuchtezuschlagsfaktoren der [DIN EN ISO 10456:2010-05] und auch auf Basis der durchgeführten Untersuchungen nicht zu erwarten.

8.2.4 Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeitsmessungen des FIW an einem EPS-Dämmstoff aktueller Produktion unter verschiedenen Feuchtezuständen haben Wärmeleitfähigkeiten ergeben, die sehr gut mit den aus [DIN EN ISO 10456:2010-05] ermittelbaren Wärmeleitfähigkeiten zusammenpassen.

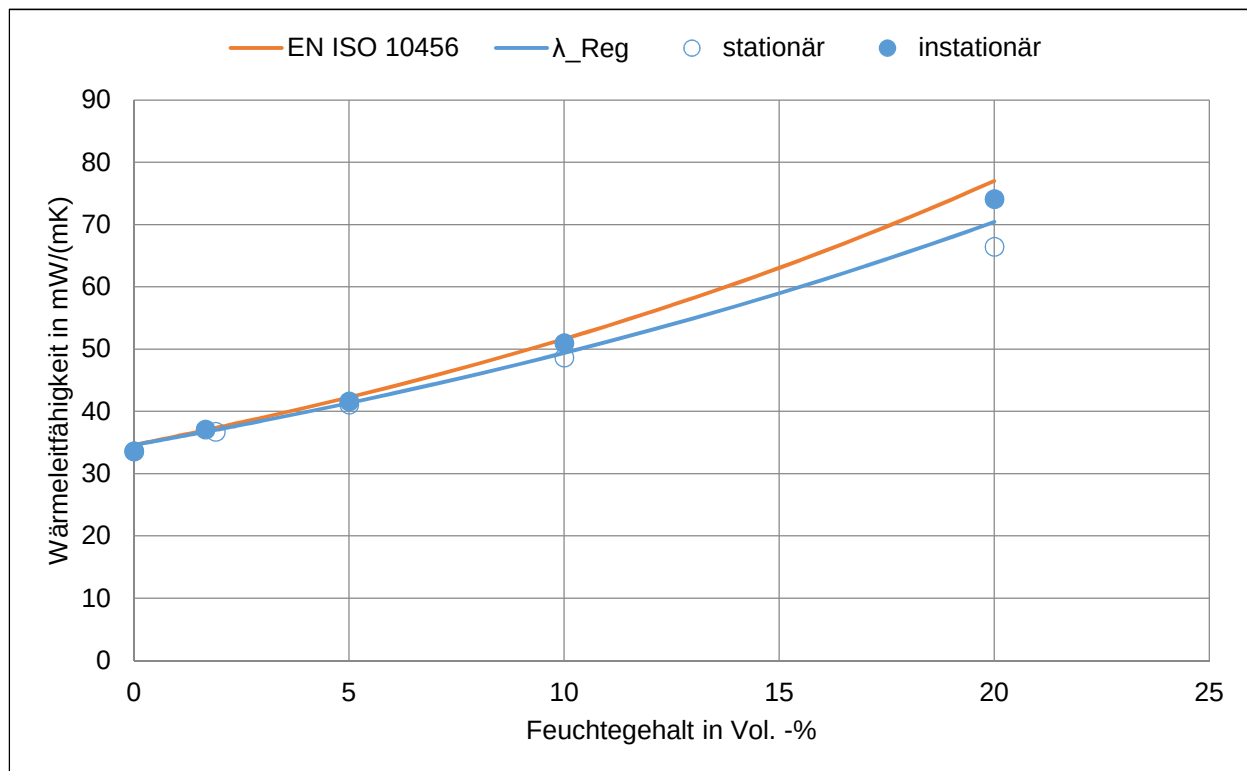


Bild 67

Abbildung 2 Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei Anwendung der in dieser Untersuchung (blaue Kurve) und nach [DIN EN ISO 10456:2010-05] (rote Kurve) ermittelten Feuchteumrechnungsfaktoren für das Material EPS 1

Aus den im Rahmen der vorliegenden Untersuchung gemessenen Wärmeleitfähigkeiten kann geschlossen werden, dass auch die Wärmeleitfähigkeit zeitgemäßer Dämmstoffe mit inzwischen weiter entwickelten Herstellungsverfahren, Treibmitteln und Rohdichten keine wesentlichen Änderungen in Bezug auf die Feuchteabhängigkeit erfahren haben. Die aus den 80er Jahren stammenden Zuschlagswerte können daher weiterhin verwendet werden.

Als Beispiel für die Größenordnung, in der sich die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt ändert, soll die Tabelle 26 dienen, die für eine Wärmeleitfähigkeit von 0,034 W/(mK) im trockenen Zustand gilt. Dieser Tabelle kann schnell die von dem ermittelten Feuchtegehalt verursachte Veränderung entnommen werden.

Tabelle 26

Feuchtegehalte und entsprechend geänderte Wärmeleitfähigkeit eines EPS-Dämmstoffs am Beispiel der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,034 \text{ W/mK}$ gemäß Berechnung nach [DIN EN ISO 10456:2010-05]

Ermittlung der durch erhöhten Feuchtegehalt geänderten Wärmeleitfähigkeit			
für Dämmstoff:	EPS	(expandierter Polystyrol-Hartschaum)	
entsprechend DIN EN ISO 10456:2010-05			
Rohdichte		10-50	kg/m³
Wärmeleitfähigkeit trocken (Beispiel)		0,034	W/(mK)
Feuchteumrechnungskoeffizient f_{ψ}		4	-
Wassergehalt [Vol.-%]	Wassergehalt [kg/m³]	Feuchte- umrechnungs- faktor F_M [-]	Feuchtebezogene Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN ISO 10456 [W/mK]
0	0	1,000	0,034
0,1	1	1,004	0,034
0,2	2	1,008	0,034
0,3	3	1,012	0,034
0,4	4	1,016	0,035
0,5	5	1,020	0,035
0,6	6	1,024	0,035
0,7	7	1,028	0,035
0,8	8	1,033	0,035
0,9	9	1,037	0,035
1	10	1,041	0,035
1,1	11	1,045	0,036
1,2	12	1,049	0,036
1,3	13	1,053	0,036
1,4	14	1,058	0,036
1,5	15	1,062	0,036
1,6	16	1,066	0,036
1,7	17	1,070	0,036
1,8	18	1,075	0,037
1,9	19	1,079	0,037
2	20	1,083	0,037
3	30	1,127	0,038
4	40	1,174	0,040
5	50	1,221	0,042
6	60	1,271	0,043
7	70	1,323	0,045
8	80	1,377	0,047
9	90	1,433	0,049
10	100	1,492	0,051

8.4 XPS – Extrudierter Polystyrol-Hartschaum

8.4.1 Wasseraufnahme nach Norm

Dämmstoffe aus XPS finden sich in einigen älteren Flachdächern. Aktuell werden sie nicht mehr als Dämmstoffe unter Abdichtungen (DAA) sondern als Dämmstoffe außerhalb von Abdichtungen, d. h. im Flachdach oberhalb der Abdichtungsschicht als Umkehrdachdämmung (DUK) eingesetzt.

Sie sind für diese Anwendung besonders geeignet, weil ihre Wasseraufnahme sehr gering ist. Entsprechend der Normprüfungen werden z. B. Werte von max. 0,7 Vol.-% [DIN EN 12087:2013-06] angegeben.

In Bezug auf den Diffusionsversuch nach [DIN EN 12088:2013-06] werden z. B. folgende Werte angegeben:

- max. 1 Vol.-% (Dämmstoffdicke größer 80 mm)
- max. 2 Vol.-% (Dicke zwischen 50 und 80 mm)
- max. 3 Vol.-% (Dicke maximal 50 mm)

8.4.2 Veränderung der Wärmeleitfähigkeit

Auch die an einem XPS-Dämmstoff aktueller Produktion unter verschiedenen Feuchtezuständen durchgeführten Wärmeleitfähigkeitsmessungen des FIW haben Wärmeleitfähigkeiten ergeben, die sehr gut mit den aus [DIN EN ISO 10456:2010-05] ermittelbaren Wärmeleitfähigkeiten zusammenpassen.

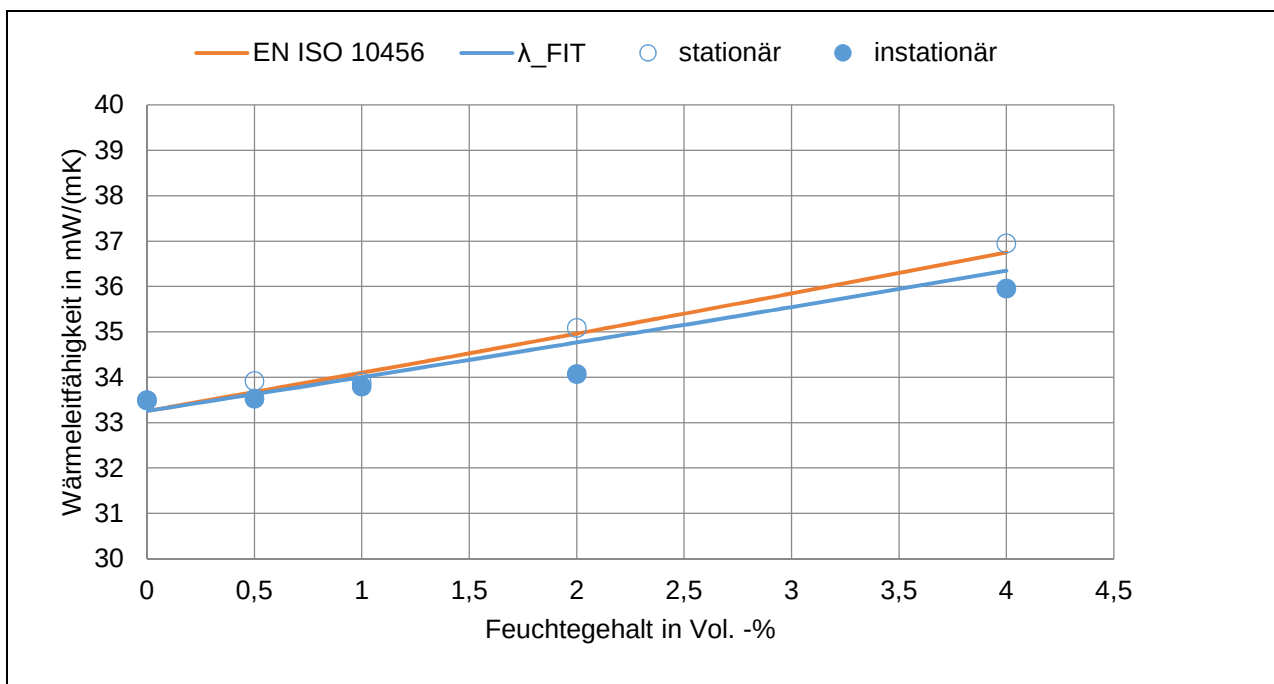


Bild 68

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei Anwendung der in dieser Untersuchung (blaue Kurve) und nach [DIN EN ISO 10456:2010-05] (rote Kurve) ermittelten Feuchteumrechnungsfaktoren für das Material XPS

Aus den im Rahmen der vorliegenden Untersuchung gemessenen Wärmeleitfähigkeiten kann geschlossen werden, dass auch die Wärmeleitfähigkeit zeitgemäßer Dämmstoffe mit inzwischen weiter entwickelten Herstellungsverfahren, Treibmitteln und Rohdichten keine wesentlichen Änderungen in Bezug auf die Feuchteabhängigkeit erfahren haben. Die aus den 80er Jahren stammenden Zuschlagswerte können daher weiterhin verwendet werden.

Als Beispiel für die Größenordnung, in der sich die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt ändert, soll die Tabelle 27 dienen, die für eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$ im trockenen Zustand gilt. Dieser Tabelle kann schnell die von dem ermittelten Feuchtegehalt verursachte Veränderung entnommen werden.

Tabelle 27

Feuchtegehalte und entsprechend geänderte Wärmeleitfähigkeit eines XPS-Dämmstoffs am Beispiel der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ gemäß Berechnung nach [DIN EN ISO 10456:2010-05]

Ermittlung der durch erhöhten Feuchtegehalt geänderten Wärmeleitfähigkeit			
für Dämmstoff:	XPS	(extrudierter Polystyrol-Hartschaum)	
entsprechend DIN EN ISO 10456:2010-05			
Rohdichte		20-65	kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit trocken (Beispiel)		0,035	W/(mK)
Feuchteumrechnungskoeffizient		2,5	-
Wassergehalt [Vol.-%]	Wassergehalt [kg/m ³]	Feuchteumrechnungsfaktor F_M [-]	Feuchtebezogene Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN ISO 10456 [W/mK]
0	0	1,000	0,035
0,1	1	1,003	0,035
0,2	2	1,005	0,035
0,3	3	1,008	0,035
0,4	4	1,010	0,035
0,5	5	1,013	0,035
0,6	6	1,015	0,036
0,7	7	1,018	0,036
0,8	8	1,020	0,036
0,9	9	1,023	0,036
1	10	1,025	0,036
1,1	11	1,028	0,036
1,2	12	1,030	0,036
1,3	13	1,033	0,036
1,4	14	1,036	0,036
1,5	15	1,038	0,036
1,6	16	1,041	0,036
1,7	17	1,043	0,037
1,8	18	1,046	0,037
1,9	19	1,049	0,037
2	20	1,051	0,037
3	30	1,078	0,038
4	40	1,105	0,039
5	50	1,133	0,040
6	60	1,162	0,041
7	70	1,191	0,042
8	80	1,221	0,043
9	90	1,252	0,044
10	100	1,284	0,045

8.5 PUR – Polyurethan-Hartschaum

8.5.1 Wasseraufnahme nach Norm

Typische Werte der Wasseraufnahme nach den o. g. Prüfverfahren können den technischen Datenblättern oder Informationen des Herstellerverbands [IVPU 2017] entnommen werden. Sie liegen z. B. bei:

- max. 3 Vol.-% [DIN 12087:2013-06] (PIR)
- 1 - 2,5 Vol.-% [DIN 12087:2013-06] (PUR)
- ca. 1,3 Vol.-% bei einer 60 mm dicken Dämmplatte mit einer Rohdichte von 35 kg/m³
- max. ca. 6 Vol.-% beim Diffusionsversuch gemäß [DIN EN 12088:2013-06]

8.5.2 Wasseraufnahme bei eingebauten Dämmstoffen

Dämmstoffe aus Polyurethan können im eingebauten Zustand und bei hoher Feuchtebelastung, insbesondere bei andauernd nachströmendem Wasser, sehr hohe Feuchtegehalte annehmen. Der von den Verfassern bislang gemessene Spitzenwert liegt bei 68,8 Vol.-%.

8.5.3 Veränderung der Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeitsmessungen des FIW an einem PUR-Dämmstoff aktueller Produktion unter verschiedenen Feuchtezuständen haben Wärmeleitfähigkeiten ergeben, die deutlich unter den aus [DIN EN ISO 10456:2010-05] anhand der dort angegebenen Zuschlagswerte ermittelbaren Wärmeleitfähigkeiten liegen.

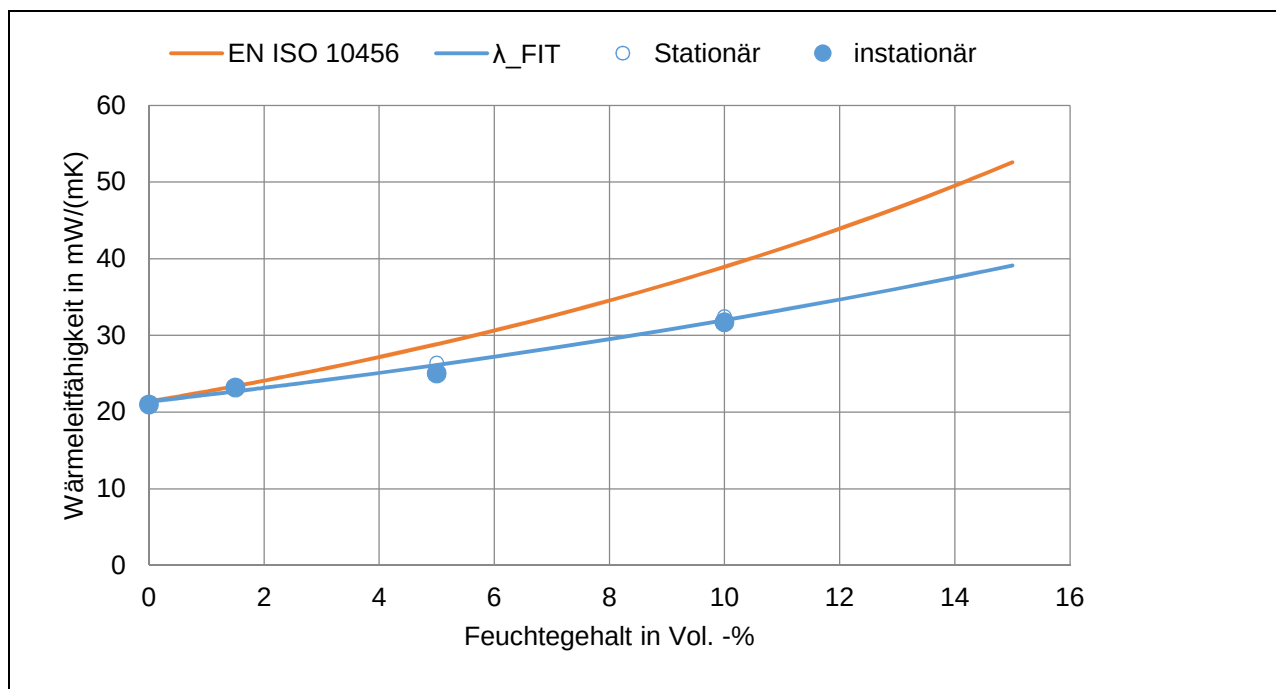


Bild 69

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei Anwendung der in dieser Untersuchung (blaue Kurve) und nach [DIN EN ISO 10456:2010-05] (rote Kurve) ermittelten Feuchteumrechnungsfaktoren für das Material PUR

Aus den aktuellen Messwerten kann geschlossen werden, dass auch neuere, aktuelle Dämmstoffe mit inzwischen weiter entwickelten Herstellungsverfahren, Treibmitteln und Rohdichten keine wesentlichen negativen Änderungen in Bezug auf die Feuchteabhängigkeit erfahren haben, sondern eher, wie der gemessene Dämmstoff, auch deutlich unter den theoretisch ermittelbaren Zuschlägen bleiben. Die aus den 80er Jahren stammenden Zuschlagswerte können daher weiterhin, auf der sicheren Seite liegend, verwendet werden.

Als Beispiel für die Größenordnung, in der sich die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt ändert, soll Tabelle 28 dienen, die für eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,026 \text{ W/(mK)}$ im trockenen Zustand gilt. Dieser Tabelle kann schnell die von dem ermittelten Feuchtegehalt verursachte Veränderung entnommen werden.

Tabelle 28

Feuchtegehalte und entsprechend geänderte Wärmeleitfähigkeit eines PUR-Dämmstoffs am Beispiel der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,026 \text{ W/mK}$ gemäß Berechnung nach [DIN EN ISO 10456:2010-05]

Ermittlung der durch erhöhten Feuchtegehalt geänderten Wärmeleitfähigkeit			
für Dämmstoff:		PUR	(Polyurethan-Hartschaum)
entsprechend DIN EN ISO 10456:2010-05			
Rohdichte		28-55	kg/m³
Wärmeleitfähigkeit trocken (Beispiel)		0,026	W/(mK)
Feuchteumrechnungskoeffizient		6	-
			Feuchtebezogene Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN ISO 10456 [W/mK]
Wassergehalt [Vol.-%]	Wassergehalt [kg/m³]	Feuchteumrechnungsfaktor F _M [-]	
0	0	1,000	0,026
0,1	1	1,006	0,026
0,2	2	1,012	0,026
0,3	3	1,018	0,026
0,4	4	1,024	0,027
0,5	5	1,030	0,027
0,6	6	1,037	0,027
0,7	7	1,043	0,027
0,8	8	1,049	0,027
0,9	9	1,055	0,027
1	10	1,062	0,028
1,1	11	1,068	0,028
1,2	12	1,075	0,028
1,3	13	1,081	0,028
1,4	14	1,088	0,028
1,5	15	1,094	0,028
1,6	16	1,101	0,029
1,7	17	1,107	0,029
1,8	18	1,114	0,029
1,9	19	1,121	0,029
2	20	1,127	0,029
3	30	1,197	0,031
4	40	1,271	0,033
5	50	1,350	0,035
6	60	1,433	0,037
7	70	1,522	0,040
8	80	1,616	0,042
9	90	1,716	0,045
10	100	1,822	0,047
11	110	1,935	0,050
12	120	2,054	0,053
13	130	2,181	0,057
14	140	2,316	0,060
15	150	2,460	0,064

8.6 MW – Mineralwolle hoher Rohdichte

8.6.1 Untersuchungen des FIW zur Feuchteaufnahme von Mineralwolle

In Bild 70 sind die Ergebnisse einer größeren Grundgesamtheit von Versuchen zur Wasseraufnahme von Mineralwolledämmstoffen in einem großen Rohdichtespektrum enthalten. Insgesamt wurden 153 Versuche zum kurzfristigen Eintauchen nach [DIN EN 1609:2013-05] und 237 Versuche zum langfristigen Eintauchen nach [DIN EN 12087:2013-06] ausgewertet. Zum besseren Vergleich mit den Angaben bei den Wärmeleitfähigkeitsuntersuchungen in diesem Bericht wurden die Werte von kg/m^2 in Vol-% umgerechnet. Weitere Versuche, die ermittelten Feuchtegehalte in Vol-% oder kg/m^2 mit der Rohdichte und/oder der Dicke der Prüfkörper zu korrelieren, ergaben keine eindeutigen statistischen Zusammenhänge.

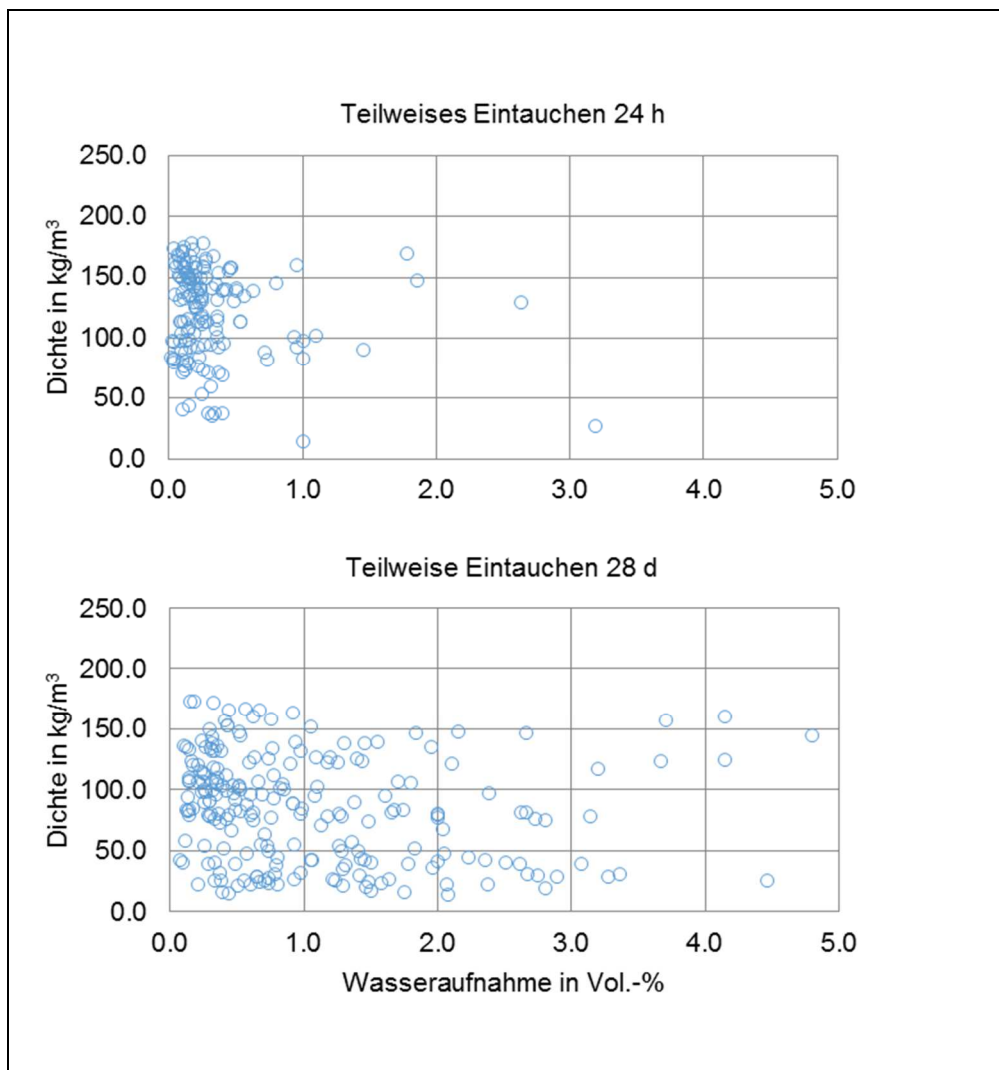


Bild 70

Feuchtegehalt von MW Dämmstoffen in Vol-% nach teilweisem Eintauchen für 24 h [DIN EN 1609:2013-05] und 28 Tagen [DIN EN 12087:2013-06] (um eine sinnvolle Auflösung der Verteilung der Werte zu erreichen ist die Darstellung auf 5 Vol-% als Maximalwert der Wasseraufnahme skaliert; beim kurzzeitigen Eintauchen erreichen 4 von 153 Werten eine Wasseraufnahme > 5 Vol-%, beim langfristigen Eintauchen erreichen 14 von 237 Werten eine Wasseraufnahme > 5 Vol-%)

Die ermittelten Werte sind insgesamt auf einem niedrigen Niveau. Beim kurzfristigen Eintauchen bleibt ein Großteil der Werte in einem Bereich < 0,4 Vol-%. Nach längerfristigem Eintauchen werden typische Werte in einem Bereich von ca. 0,4 – 1,7 Vol-% ermittelt.

8.6.2 Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurden Wärmeleitfähigkeitsmessungen an einem Dämmstoff mit der Rohdichte von 159 kg/m^3 durchgeführt. Der Dämmstoff ist für die Verwendung in Flachdächern unmittelbar unter Abdichtungen (Anwendungstyp „DAA“ nach [DIN 4108-10:2015-12]) vorgesehen (zu Mineralwollgedämmstoffen geringerer Rohdichte unterhalb von Schalungen (Anwendungstyp „DZ“ nach [DIN 4108-10:2015-12]) s. Kap. 8.7). Der Feuchtezuschlagskoeffizient in der [DIN EN ISO 10456:2010-05] bezieht sich allerdings auf Rohdichten von 10 bis 200 kg/m^3 . Es muss bezweifelt werden, ob dieser einheitliche Zuschlagswert tatsächlich für alle Mineralwollgedämmstoffe gültig ist, obwohl die Strukturunterschiede in den Dämmstoffen erheblich sind und zu sehr unterschiedlichem Feuchteverhalten führen dürften.

Die Wärmestrommessungen unter stationären Randbedingungen führen zu Wärmeleitfähigkeitswerten, die deutlich über den Werten liegen, die sich aus den Zuschlagswerten in der [DIN EN ISO 10456:2010-05] ergeben. In Bild 71 sind die Abweichungen ablesbar.

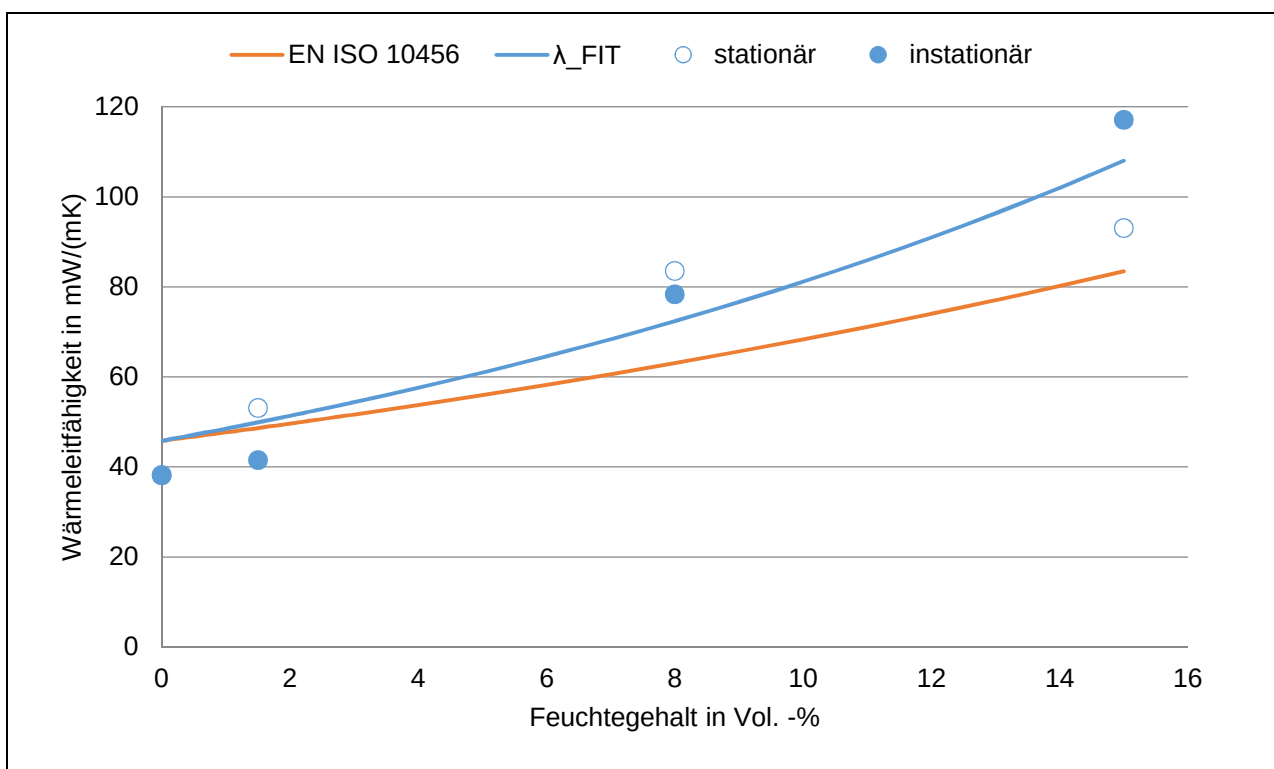


Bild 71

Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei Anwendung der in dieser Untersuchung (blaue Kurve) und nach [DIN EN ISO 10456:2010-05] (rote Kurve) ermittelten Feuchteumrechnungsfaktoren für das Material MW

Das deutet darauf hin, dass der in der Norm angegebene Zuschlagskoeffizient bei Mineralwolle durch weitere Untersuchungen ggf. angeglichen werden muss. Fraglich ist auch, ob die Angabe des Zuschlagskoeffizienten tatsächlich für alle Mineralwollgedämmstoffe von 10 bis 200 kg/m^3 gelten soll. Die Wassertransportvorgänge bei feuchter Mineralwolle sind zurzeit noch nicht ausreichend untersucht worden, um zum Feuchteverhalten bzw. zum dadurch beeinflussten Wärmetransport allgemeingültige Aussagen machen zu können. Daher können auch Abschätzungen der veränderten Wärmeleitfähigkeiten nur grob sein und sollten jeweils auf der sicheren Seite liegend den Beurteilungen verbleibender Dämmstoffe zugrunde gelegt werden.

Die Tabelle 29 zeigt noch die Werte entsprechend des aktuellen Zuschlagskoeffizienten

Tabelle 29

Feuchtegehalte und entsprechend geänderte Wärmeleitfähigkeit eines MW-Dämmstoffs am Beispiel der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$ gemäß Berechnung nach [DIN EN ISO 10456:2010-05]

Ermittlung der durch erhöhten Feuchtegehalt geänderten Wärmeleitfähigkeit			
für Dämmstoff:	MiWo	(Mineralwolle)	
entsprechend DIN EN ISO 10456:2010-05			
Rohdichte		10-200	kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit trocken (Beispiel)		0,039	W/(mK)
Feuchteumrechnungskoeffizient		4	-
Achtung Norm-Fußnote: gilt nicht im Falle dauerhaften Feuchtenachschubs!			
Wassergehalt [Vol.-%]	Wassergehalt [kg/m ³]	Feuchteumrechnungsfaktor F_M [-]	Feuchtebezogene Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN ISO 10456 [W/mK]
0	0	1,000	0,039
0,1	1	1,004	0,039
0,2	2	1,008	0,039
0,3	3	1,012	0,039
0,4	4	1,016	0,040
0,5	5	1,020	0,040
0,6	6	1,024	0,040
0,7	7	1,028	0,040
0,8	8	1,033	0,040
0,9	9	1,037	0,040
1	10	1,041	0,041
1,1	11	1,045	0,041
1,2	12	1,049	0,041
1,3	13	1,053	0,041
1,4	14	1,058	0,041
1,5	15	1,062	0,041
1,6	16	1,066	0,042
1,7	17	1,070	0,042
1,8	18	1,075	0,042
1,9	19	1,079	0,042
2	20	1,083	0,042
3	30	1,127	0,044
4	40	1,174	0,046
5	50	1,221	0,048
6	60	1,271	0,050
7	70	1,323	0,052
8	80	1,377	0,054
9	90	1,433	0,056
10	100	1,492	0,058
11	110	1,553	0,061
12	120	1,616	0,063
13	130	1,682	0,066
14	140	1,751	0,068
15	150	1,822	0,071

8.6.3 Strukturveränderungen bei Mineralwolle

Die Struktur von Mineralwollendämmungen kann durch äußere Einflüsse in ihrer Struktur irreversibel geschädigt werden. Beobachtungen an Schadensfällen und Messungen der Druckspannungen bei 10 % Stauchung weisen darauf hin, dass dies häufig auf eine hohe punktuelle und wiederkehrende Belastung zurückzuführen ist (z. B. im Bereich von Zugängen auf die Dachfläche, wie z. B. Leiterausstiege, durch häufiges Begehen der Dachfläche zu Wartungszwecken, durch Begehen der Dachfläche mit hohen Lasten, z. B. bei der Montage von PV-Anlagen etc.) und nicht ausschließlich auf der im Dachaufbau eingeschlossenen Feuchte beruht, was durch Untersuchungen in [AIBAU/FIW 2012] bestätigt wurde. Dort wurden Fallbeispiele dokumentiert, bei denen Mineralwollendämmstoffe mit hohen Feuchtegehalten auch noch hohe Druckfestigkeiten aufwiesen. Es wurde aber darauf hingewiesen, dass über die langfristige Auswirkung hoher Feuchtegehalte noch keine Aussage möglich ist. Sehr weiche Dämmstoffe bei nachgewiesenermaßen hoher Feuchtebelastung und eher geringer mechanischer Belastung lassen aber auch vermuten, dass die Struktur langfristig alleine durch hohe Feuchtebelastung geschädigt werden kann (s. Fallbeispiel 4.8). Da im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts keinen Hinweisen auf nachgewiesenermaßen langfristig durchfeuchtete Dämmstoffe aus Mineralwolle, die immer noch gebrauchstauglich sind, nachgegangen werden konnte, ist kein Nachweis über die Langzeitbewährung stark durchfeuchteter Mineralwollendämmstoffe möglich. Es muss daher im Einzelfall entschieden werden, inwieweit ein durch langjährige Feuchteeinwirkung zu erwartender Verlust der Druckstabilität für den Dachaufbau eine wesentliche Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit bedeutet. Eine Überdämmung sehr feuchter Mineralwolle-Dämmungen kann zurzeit nicht empfohlen werden.

8.7 MW – Mineralwolle geringer Rohdichte

Mineralwolle geringer Rohdichte von etwa 10 bis 30 kg/m³ – es handelt sich dabei in der Regel um Glaswolle – wird meist in Zwischensparrendämmungen verwendet. Inwieweit die Zuschlagswerte der [DIN EN ISO 10456:2010-05] auch auf diese Form der Mineralwolle zutreffen, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts nicht überprüft. Dies hat seine Ursache darin, dass eine starke Durchfeuchtung von Mineralwolle in Zwischensparrendämmungen selten auftritt: Zwar können die unmittelbar an die begrenzenden Bauteile anstoßenden Bereiche „klitschnass“ sein, der gesamte Dämmstoff ist es aber in der Regel nicht, da flüssiges Wasser sich innerhalb des Dämmstoffs kaum anlagern kann. Bei deutlich nassen Dämmstoffen im Bereich von Zwischensparrendämmung stellt sich auch in der Regel nicht die Frage nach Erhaltungsmöglichkeiten des Dämmstoffs, sondern es geht eher darum, inwieweit angrenzende, meist tragende Holzbauteile geschädigt sind. Ein Austausch deutlich feuchter Mineralwolle in Zwischensparrenbereichen ist daher in den meisten Fällen angeraten, um Austrocknungs- oder Ausbaubedingungen für betroffenes Holz zu schaffen.

8.8 SG – Schaumglas

Eine Wasseraufnahme gilt aufgrund der geschlossenzelligen Glasstruktur bei Schaumglas als ausgeschlossen. Entsprechend werden keine Prüfungen der Wasseraufnahme durchgeführt. Für Schaumglas ist daher in [DIN EN ISO 10456:2010-05] auch kein Feuchteumrechnungskoeffizient angegeben.

Dennoch kann die Problematik eingeschlossenen Wassers auch Flachdächer mit Schaumglas-Dämmung betreffen. Die Dämmstoffe sollen zwar vollflächig in Heißbitumen eingebettet verlegt werden, und es sollte darüber ein Deckabstrich mit Heißbitumen erfolgen, so dass theoretisch keine Hohlräume zwischen den Dämmplatten verbleiben. Auch die Abdichtungsbahnen werden vollflächig aufgeschweißt, so dass auch zwischen Bitumenbahn und Dämmstoff ein Verbund entsteht. Daher wird für solche Konstruktionen auch der Begriff „Kompaktdach“ verwendet. Im Gegensatz zu den erwarteten Eigenschaften ist jedoch eine Wasserführung zwischen den Schichten nicht unmöglich, eine Durchfeuchtung der Dämmschicht und eine Unterläufigkeit sind nur in der Theorie ausgeschlossen, weil es in der Praxis offenbar nicht immer gelingt, eine vollständige Füllung mit Heißbitumen zu erreichen. Zudem können die spröden Dämmplatten möglicherweise beim Einbau Risse bekommen. Bei einigen Schadensfällen zeigt sich, dass Wasser in der Dämmschicht steht und die Dämmstoffe bei der Entnahme deutlich schwerer sind als es die Rohdichte erwarten lassen würde.

Die Folge ist – im Gegensatz zu den Schaumkunststoffen und zur Mineralwolle –, dass das eingeschlossene Wasser bei Frost zur Zerstörung der Dämmstoffstruktur führen kann. Entsprechend kann bei Probeöffnungen festgestellt werden, dass die Dämmstoffe auf der Außenseite absanden und dass die Abdichtungsbahn nicht mehr an der Schaumglasplatte anhaftet. Die Bruchstruktur beim Abreißen liegt in der Dämmung knapp unter deren Oberkante.

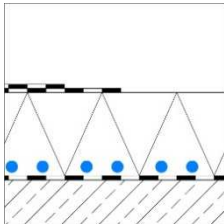
In den Kapiteln 4.6 und 4.7 sind beispielhaft zwei Schadensfälle beschrieben. In beiden Fällen handelt es sich um über 40 Jahre alte Dachflächen, die offenbar schon sehr lange einer Durchfeuchtung ausgesetzt waren. Durch Darr-Messung im Labor wurde ein Feuchtegehalt von bis zu 35 Vol.-% gemessen! Allerdings muss dabei die besondere Oberflächenstruktur von Schaumglas berücksichtigt werden: an der Oberfläche haftet sehr viel Feuchtigkeit an, so dass beim Trocknungsprozess zunächst diese Feuchte wegtrocknet. Je kleiner die Bruchstücke, desto höher ist der Gewichtsverlust beim Trocknen, wenn die Probestücke im Wasser lagen. Wenn größere, einzelne Probenstücke nur über einen langen Zeitraum getrocknet werden können, muss man aber davon ausgehen, dass dieses Wasser nicht nur an der Oberfläche, sondern tatsächlich im Dämmstoff selbst eingelagert wurde. Inwieweit dies durch Diffusion erfolgt ist oder durch Kapillarität transportiert wurde, die beim Verarbeitungsprozess oder durch mechanische Überlastung entstanden ist, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt konnte bisher nicht gemessen werden, da keine entsprechend großen Probestücke aus den Dachflächen entnommen werden konnten. Eine erste grobe Abschätzung kann durch das Verhältnis zwischen den festgestellten Feuchtegehalten und den Wärmeleitfähigkeiten von Wasser ($\lambda = 0,6 \text{ W/mK}$) und Schaumglas getroffen werden. Bei einem der untersuchten Beispielfälle wurde so z. B. für die Stelle mit dem höchsten Feuchtegehalt eine Wärmeleitfähigkeit von $0,08 \text{ W/mK}$ abgeschätzt.

9. Rechtliche Aspekte

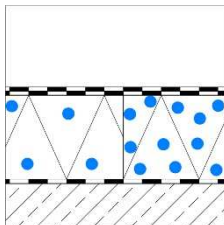
Der Feuchtegehalt von Dämmstoffen führt regelmäßig zu rechtlichen Fragestellungen, da der Zustand üblicherweise nicht der Erwartung des Auftraggebers an die Funktionstauglichkeit übereinstimmt. Daher werden im Folgenden vier typische Situationen unterschieden und die juristischen Aspekte diskutiert. Die Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf die Funktion „Wärmedämmeigenschaften“ der Dämmstoffe und die mögliche Verantwortlichkeit der ausführenden Bauunternehmen. Dabei wird, sofern nicht ausdrücklich abweichend angegeben, von dem Regelfall ausgegangen, dass die Wärmedämmung und die darüber liegende Abdichtung von einem einzigen Auftragnehmer ausgeführt werden.

1. Neubau – Feuchtigkeit im Dämmstoff vor oder bei Abnahme



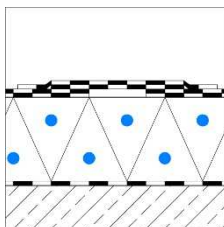
Wie viel Feuchte darf im Dämmstoff vorhanden sein?

2. Feuchtigkeit nach der Abnahme innerhalb der Gewährleistungsfrist:



Wie viel Feuchte darf im Dämmstoff vorhanden sein?

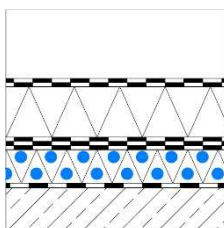
3. Instandhaltung der Abdichtung nach Ablauf der Gewährleistungsfrist:



Muss die Untergrundprüfung des Dachdeckers eine Feststellung des Feuchtegehalts einer vorhandenen Dämmung umfassen?

Gibt es eine vertragliche oder gesetzliche Notwendigkeit der Prüfung der Wärmeleitfähigkeit der vorhandenen Dämmung beim Austausch der Abdichtung?

4. Maßnahmen zur Erhöhung des Wärmeschutzes



Kann im Falle der Modernisierung die vorhandene Dämmung verbleiben?

Auch bei den folgenden rechtlichen Betrachtungen muss berücksichtigt werden, dass der Feuchtegehalt von Dämmstoffen innerhalb einer Dachfläche (d. h. horizontal in der Ebene der Dämmung) stark schwanken kann. Es können großflächig feuchte Bereiche vorliegen wie auch lediglich eine Durchfeuchtung eines genau eingrenzbaeren Bereichs. Im Einzelfall ist daher in der Regel, ausgehend vom konkreten Schadensbild und den Vorgaben hinsichtlich der auszuführenden Arbeiten, der Umfang der notwendigen Prüfungen zu bestimmen. Geht es um die Frage, ob eine großflächige Durchfeuchtung vorliegt, wird üblicherweise stichprobenartig die Verteilung der Feuchte in der Dachfläche überprüft.

Dieses Vorgehen entspricht auch den Anforderungen, die im Regelwerk seit längerem festgeschrieben und aktuell in der Neufassung der [DIN 18531-4:2017-07] *Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen – Teil 4: Nicht genutzte und genutzte Dächer – Instandhaltung* formuliert sind. Dort ist im Kapitel 5.4.1 und 5.4.2 aufgeführt:

„...Instandsetzungsarbeiten werden erforderlich, wenn Schäden an der vorhandenen Abdichtung behoben werden müssen.

Ziel der Instandsetzung ist die Wiederherstellung einer den [DIN 18531-1:2017-07] bis [DIN 18531-3:2017-07] entsprechenden Abdichtung. Die dazu erforderlichen Arbeiten müssen auf den vorhandenen Zustand des Daches und die festgestellten Schäden abgestimmt werden.

Vor der Instandsetzung ist eine Voruntersuchung durchzuführen. Sie beinhaltet Bestandsaufnahme, Zustandsfeststellung und, bei Vorliegen von Schäden, Ursachenermittlung.

Art und Umfang der Voruntersuchung sind u. a. abzustimmen auf

- *die Art und den Aussagewert vorliegender Planungs- und Ausführungsunterlagen,*
- *das Schadensbild,*
- *die Ziele und die Art der geplanten Maßnahmen.*

Folgende Untersuchungen können z. B. erforderlich werden:

- *Überprüfung des vorhandenen Dachaufbaues hinsichtlich seiner Funktionsfähigkeit;*
- *sollen die vorhandenen Dachschichten auf dem Dach verbleiben, so ist zu untersuchen, ob sie weiterhin funktionsfähig sind oder sich zumindest im Schichtenpaket nicht schädigend auswirken werden und ob sie untereinander und mit der Tragunterkonstruktion lagesicher verbunden sind;*
- *lässt das Schadensbild eine Durchfeuchtung der vorhandenen Dämmschicht erwarten, so ist, soweit die Dämmschicht nicht entfernt werden soll, der Durchfeuchtungsgrad stichprobenartig zu untersuchen;*
- *Überprüfung der Gefälle- und Entwässerungssituation.*

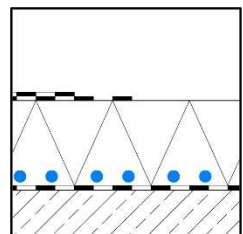
Die Ergebnisse der Voruntersuchung sind zu dokumentieren.“

Die Unterstreichungen erfolgten durch die Autoren. Die so gekennzeichneten Formulierungen sind auch nahezu identisch in der [Flachdachrichtlinie 2016] – dort im Kapitel 5.2 Pflege und Wartung, Voruntersuchungen – verwendet worden.

Weitergehende Angaben sind in diesem Normenteil nicht enthalten. Die anderen Teile beziehen sich zwar definitionsgemäß ebenfalls auf „die Planung und Ausführung der Abdichtung bei Neubauten, Instandhaltung und Erneuerung“, geben aber keine expliziten Hinweise auf den Umgang mit feuchten Dämmschichten.

9.1 Neubau

Bei Lagerung im Handel, beim Transport, bei der Lagerung auf Dachflächen, bei der Verarbeitung der Wärmedämmung oder vor Abschluss der Verarbeitung der Abdichtung kann Niederschlagswasser in den Dämmstoff gelangen. Je nach Gefälle des Untergrunds kann dieses Wasser zu Tiefpunkten sickern oder sammelt sich, wenn der Untergrund kein deutliches Gefälle aufweist, an der Oberfläche aufgrund von Unebenheiten oder verteilt sich großflächig.



Vertragliche Vorgaben

Technische Erläuterung: Wärmedämmstoffe können nicht ohne jegliche Abweichungen hergestellt werden. Um die deklarierten Eigenschaften sicherzustellen, werden sogenannte Quantilen ermittelt, also übliche und produktionsbedingt unvermeidbare Abweichungen. Die deklarierten Grenzwerte werden an der ungünstigen Grenze der Quantile festgesetzt. Damit soll sichergestellt werden, dass der deklarierte Wert eingehalten wird. Gleichzeitig bedeutet dies, dass regelmäßig die tatsächlichen Eigenschaften günstiger als die deklarierten Werte sind. So wird regelmäßig auch die Wärmedämmeigenschaft günstiger sein als der jeweils deklarierte Wert.

Wenn Feuchtigkeit im Dämmstoff vorhanden ist, die nicht dazu führt, dass der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit überschritten wird, liegt diesbezüglich kein Mangel vor.

Aufgrund der oben genannten Sicherheitspuffer werden nicht schon durch Feuchtigkeit alleine die als vertraglich vereinbarten Werte der Wärmeleitfähigkeit überschritten. Auch die Wärmeleitfähigkeit eines trockenen Dämmstoffs ist nicht zwingend besser als der deklarierte Wert, da dieser an der Grenze einer Quantile angesetzt wird und damit auch ein trockener Dämmstoff die gleiche Wärmeleitfähigkeit haben kann wie ein feuchter Dämmstoff.

In vertraglichen Unterlagen, zu denen auch Leistungsverzeichnisse gehören, wird üblicherweise ein Rechenwert als maximaler „Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit“ und ein Wert einer Druckfestigkeit vereinbart. Wenn Dämmstoffe den als vereinbarten maximalen Wert der Wärmeleitfähigkeit überschreiten, fehlt ihnen eine vertragliche Beschaffenheit. Das Gleiche gilt, wenn sie den vereinbarten Wert der Druckfestigkeit unterschreiten. Vor der Abnahme ist grundsätzlich der Auftragnehmer für die Mangelfreiheit beweisbelastet.

Dabei ist zu beachten: Der (i. d. R. vereinbarte) Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich vom Nennwert, den der Hersteller für sein Produkt in der Leistungserklärung angibt. Auf Grundlage des (vereinbarten) Bemessungswerts kann der Nennwert rechnerisch ermittelt werden. Ob der erforderliche Nennwert erreicht ist, lässt sich durch eine Entnahme von Dämmmaterial mit Wärmeleitfähigkeitsmessungen ermitteln, die auch für die Untersuchungen bei der vorliegenden Forschungsarbeit eingesetzt wurden. Um den oft im Bezug zur Fragestellung unverhältnismäßig hohen Messaufwand zu vermeiden, können die in der vorliegenden Forschungsarbeit veröffentlichten Werte herangezogen werden, um die rechnerische Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffs abzuschätzen. Damit ist aber noch nicht die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit ermittelt, die aufgrund der oben beschriebenen Abweichungen bei der Produktion von Rechenwerten abweichen können. In der Regel wird der rechnerisch ermittelte Wert ungünstiger sein als der tatsächlich gemessene.

Folgen einer Mangelhaftigkeit in einer Situation, in der der Auftraggeber noch Erfüllung verlangen kann.

Der Auftragnehmer kann die Erfüllung verweigern, soweit sie einen Aufwand erfordert, der unter Beachtung des Schuldverhältnisses und der Gebote von Treu und Glauben in einem groben Missverhältnis zum Leistungsinteresse des Auftraggebers steht (§ 275 (2) BGB). Dabei ist zu berücksichtigen, ob der Auftragnehmer die negative Abweichung vom Sollzustand zu vertreten hat.

Ob der Auftragnehmer die Nacherfüllung verweigern kann, ist damit einer abwägenden Beurteilung des Einzelfalles vorbehalten.

Wenn der Mangel auf einen unzureichenden Schutz der Wärmedämmung während der Bauausführung zurückzuführen ist, dürfte dies beim VOB/B-Vertrag vom Auftragnehmer zu vertreten sein (§ 4 Abs. 5 Satz 1 VOB/B).

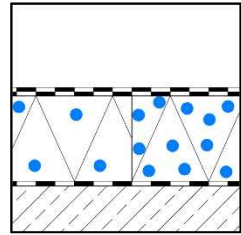
Grundsätzlich entfällt der Anspruch auf eine Vergütung, wenn die Leistung nicht erbracht wird. Bei erbrachten Teilleistungen ist der Werklohn in dem Verhältnis herabzusetzen, in welchem zur Zeit des Vertragsschlusses der Wert der Sache in mangelfreiem Zustand zu dem wirklichen Wert gestanden haben würde (§ 326 (1) Satz 1 i.V. § 441 (3) BGB). Daneben können Schadensersatzansprüche treten (§ 283 BGB). Allerdings kann der Auftraggeber auch vom Vertrag zurücktreten (§ 323 (1) BGB), ohne dass er sein Recht verliert, Schadensersatz zu verlangen (§ 325 BGB).

Unabhängig von der rechtlichen Bewertung kann folgende praktische Lösung im Einzelfall vorgeschlagen werden: Die Wärmeleitfähigkeit kann nachträglich durch zusätzliche Dämmstoffschichten auf das vereinbarte Niveau hergestellt werden. Alternativ kann durch die Ermittlung von Minderwerten in Bezug zu Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung der sonstigen Eigenschaften ein Minderungsbetrag abgeschätzt werden. Da aber Minderungsüberlegungen in der Rechtsprechung nicht erstrangig in Betracht kommen, sollten Substitutionsmaßnahmen durch zusätzliche Wärmeschutzmaßnahmen ermittelt werden, um den vertraglich vereinbarten Zustand nachträglich zu erreichen. Nur selten wird es notwendig sein, den Dachaufbau abzubauen und gegen einen gleichartigen zu ersetzen, der wiederum Gefahr läuft, von vertraglichen vereinbarten Zuständen abzuweichen.

9.2 Schadensfall innerhalb der Gewährleistungsfrist

Tatsächlicher Befund:

Zeigt sich Feuchtigkeit oder wird sie bei Kontrollöffnungen festgestellt und sind Dämmstoffe durchfeuchtet, können eingeschlossene Baufeuchte, Eintrag von Wasser über Leckagen von oben oder Wasserdampfeintrag infolge von Konvektionsströmen durch Leckagen der unterseitigen Luftdichtheitsschichten und damit verbundener Tauwasserbildung ursächlich sein. Die Ursachenfeststellung ist von Bedeutung, wenn die unterschiedlichen Ursachen verschiedenen Auftragnehmern zugeordnet werden können.



Vertragliche Vorgaben

Siehe oben zu 1.)

Nachweis des Mangels

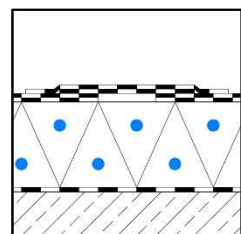
Sie oben zu 1.) Nachweis der Mangelfreiheit, mit dem wesentlichen Unterschied, dass nunmehr der Mangel vom Auftraggeber zu beweisen ist.

Folgen der Mangelhaftigkeit:

Der Auftraggeber kann zunächst Nacherfüllung verlangen. Der Auftragnehmer kann sie unter der oben zu 1.) bei Folgen der Mangelhaftigkeit genannten Umständen verweigern. Darüber hinaus steht ihm das Recht zu, die Nacherfüllung zu verweigern, wenn sie nur mit unverhältnismäßigen Kosten möglich ist (§ 635 Abs. 3 BGB). Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch bei erheblichem Aufwand für die Mängelbeseitigung eine Unverhältnismäßigkeit dann nicht gegeben ist, wenn ein objektiv berechtigtes Interesse des Auftraggebers an einer mangelfreien Leistung besteht (BGH Urteil vom 10.11.2005 – VII ZR 64/04). Dies vorausgesetzt, dürfte es bei der Feuchtigkeit auf deren Folgen ankommen: Ergibt sich unter Berücksichtigung der vorliegenden Forschungsergebnisse kein Einfluss der Feuchtigkeit, der den vertraglich geschuldeten Erfolg beeinträchtigt, dürfte bereits das Vorliegen eines Mangels zu verneinen sein. Ergibt sich eine Beeinträchtigung, kommt es naturgemäß auf deren Ausmaß an: Wenn dadurch der Nachweis nach der EnEV beeinträchtigt wird, sollte ein objektives Interesse des Bestellers gegeben sein. Wenn aber die Wärmebedarfsberechnung des Gesamtgebäudes nicht oder nur unwesentlich beeinflusst wird, dürfte das objektive Interesse fehlen.

9.3 Instandhaltung der Abdichtungsschicht nach Ablauf der Gewährleistungsfrist

Der Begriff „Instandhaltung“ wird unterschiedlich verstanden. Eine Instandhaltung kann vorliegen, wenn eine übliche Abnutzung oder Alterung ausgeglichen werden soll, ohne dass bereits ein Schaden ersichtlich ist. Eine Instandsetzung dagegen beseitigt einen Schaden. Die Abgrenzung zwischen beiden Sachverhalten ist nicht immer eindeutig. Die Neueinführung des § 650a Abs. 2 BGB könnte die Abgrenzung beim Bauvertrag zusätzlich erschweren.



[DIN 18531-4:2017-07] Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen – Teil 4: Nicht genutzte und genutzte Dächer – Instandhaltung unterscheidet in Anlehnung an [DIN 31051:2012-09] Grundlagen der Instandhaltung nach folgenden Begriffen. Unter Instandhaltung werden die Stufen Inspektion – Wartung – Instandsetzung verstanden, die sich von einer Modernisierung eines Dachaufbaus mit Austausch aller Teilschichten desselben absetzen. Inspektion bedeutet die Untersuchungen zur Feststellung des Ist-Zustands, Wartung Maßnahmen zur Bewahrung des Soll Zustands und Instandsetzung die Wiederherstellung des Soll-Zustands unter Beibehaltung von

Bauteilschichten des Dachaufbaus. Die Instandsetzung wird nach kleinen, mittleren und umfangreicheren Maßnahmen differenziert.

Vertragliche Aspekte zur Inspektion

Gibt es eine vertragliche oder sonstige Verpflichtung, dass ein Dachdeckerunternehmer im Zusammenhang der Untergrundprüfung auch den Feuchtigkeitsgehalt einer vorhandenen Dämmung feststellen muss?

Wenn eine zusätzliche Abdichtungslage unmittelbar auf eine vorhandene aufzubringen ist, also im Zuge der Arbeiten die bestehende Abdichtungsschicht nicht geöffnet werden soll, erscheint die grundsätzliche Annahme einer solchen vertraglichen Verpflichtung abwegig. Sie ergibt sich auch nicht aus den Vorgaben der VOB/C.

Wenn sich bei der Prüfung des unmittelbaren Untergrundes Anhaltspunkte ergeben, dass auch darunterliegende Schichten geschädigt und deshalb instandsetzungsbedürftig sein könnten, trifft den Unternehmer die Pflicht, den Auftraggeber hierauf vor Ausführung der Arbeiten hinzuweisen. Dazu zählt auch die grundsätzliche Verpflichtung des Auftragnehmers, den Auftraggeber im Rahmen der eigenen Fachkompetenz über den Zustand des Untergrunds aufzuklären.

Aus praktischer Sicht sollten grundsätzlich tragende und allseitig abgedeckte Holzbauteile an potenziellen Schadensstellen untersucht werden, wozu z. B. Deckenaufleger in Mauerwerkswänden oder Dachdurchführungen zählen. Auch an Stahlkonstruktionen können in verdeckten Bereichen Korrosionen die Standsicherheit einschränken, sodass auch dort Inspektionen zu empfehlen sind. Wenn Wasserlaufspuren an einer Unterseite einer Decke zu sehen sind, sollten deren Ursachen geklärt werden. Dann sollte der Auftraggeber Untersuchungen durch andere kompetente Personen veranlassen.

Soll die vorhandene Abdichtung entfernt werden, kommt es darauf an, ob eine Erneuerung der Dachabdichtung auf durchfeuchtetem Dämmstoff technisch möglich ist. Wird dies, was wohl häufig so sein wird, bejaht und ist damit der Austausch der Dämmschichten für Funktionsfähigkeit der neuen Abdichtung nicht erforderlich, besteht - neben der oben genannten grundsätzlichen Verpflichtung, den Auftraggeber über eine negative Beschaffenheit des Untergrunds aufzuklären, keine weitergehende vertragliche Prüfpflicht des Unternehmers (vgl. VOB/C ATV Dachdeckungs- und Dachabdichtungsarbeiten Ziff. 3.1.2.).

Öffentlich-rechtliche Anforderungen zur Inspektion

Trifft das ausführende Unternehmen eine gesetzliche Verpflichtung, den Feuchtegehalt der vorhandenen Dämmung bei der Instandsetzung der Abdichtung zu prüfen?

Der Feuchtegehalt hat einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen. Daraus könnte sich eine Verpflichtung mittelbar aus § 9 Energieeinsparverordnung [EnEV 2014] ergeben, der in Bezug auf Flachdächer über beheizten oder gekühlten Räumen in seinem Absatz 1 Satz 1 Folgendes regelt:

Soweit bei beheizten oder gekühlten Räumen von Gebäuden Änderungen im Sinne der Anlage 3 Nummer 1 bis 6 ausgeführt werden, sind die Änderungen so auszuführen, dass die Wärmedurchgangskoeffizienten der betroffenen Flächen die für solche Außenbauteile in Anlage 3 festgelegten Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nicht überschreiten. Diese Vorschrift betrifft auch Dachflächen, wie sich aus der Anlage 3 ergibt, die in § 9 Abs. 1 Satz 1 [EnEV 2014] in Bezug genommen wird.

Aus Anhang 3, Nummer 4, Satz 2, Punkt b) ergibt sich Folgendes:

Soweit Dachflächen „in der Weise erneuert werden, dass eine Abdichtung, die flächig (zum Beispiel mit geschlossenen Nähten und Stößen) das Gebäude wasserdicht abdichtet, durch eine neue Schicht gleicher Funktion ersetzt wird (bei Kaltdachkonstruktionen einschließlich darunterliegender Lattungen), sind für die betroffenen Bauteile die Anforderungen nach Tabelle 1 Zeile 4b einzuhalten.“

Die genannte Tabellenzeile lautet:

Zeile	Bauteil	Maßnahme nach	Wohngebäude und Zonen von Nichtwohngebäuden mit Innentemperaturen $\geq 19^\circ\text{C}$	Zonen von Nicht-Wohngebäuden mit Innentemperaturen von 12 bis $< 19^\circ\text{C}$
			Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{\max}$	
4b	Dachflächen mit Abdichtung	Nr. 4, 2 b	$0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

In der Fußnote 1 zur Tabelle, die sich auf die Zeile „Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten...“ bezieht, wird klargestellt:

„Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils unter Berücksichtigung der neuen und der vorhandenen Bauteilschichten; für die Berechnung der Bauteile nach den Zeilen 5a und b ist DIN V 4108-6: 2003-06 Anhang E und für die Berechnung sonstiger opaker Bauteile ist DIN EN ISO 6946: 2008-04 zu verwenden.“

§ 9 Abs. 1 ist nicht anzuwenden auf Änderungen von Außenbauteilen, wenn die Fläche der geänderten Bauteile nicht mehr als 10 vom Hundert der gesamten jeweiligen Bauteilfläche des Gebäudes betrifft (§ 9 Abs. 3 [EnEV 2014]).

Die Anforderungen des § 9 Abs. 1 Satz 1 [EnEV 2014] sind nicht zwingend zu erfüllen, da § 9 Abs. 1 Satz 2 [EnEV 2014] eine alternative Form des Nachweises vorsieht.

Die [EnEV 2014] richtet sich grundsätzlich an den Bauherrn und nicht an den Unternehmer. Die Anforderungen der [EnEV 2014] sind zu komplex, um von ausführenden Unternehmen ohne weitere Planungsangabe deren Einhaltung erwarten zu können. Nach § 26 Abs. 1 [EnEV 2014] ist für die Einhaltung der Bauherr verantwortlich, soweit nicht ausdrücklich ein anderer Verantwortlicher bezeichnet ist. Das ist hier nicht der Unternehmer. Allerdings regelt § 26 Abs. 2 [EnEV 2014], dass die Personen, die im Auftrag des Bauherrn bei der Errichtung oder Änderung von Gebäuden tätig werden, „im Rahmen ihres jeweiligen Wirkungskreises“ verantwortlich sind. Eine vorsätzliche oder leichtfertige Missachtung von § 9 Abs. 1 [EnEV 2014] ist eine Ordnungswidrigkeit (§ 27 Abs. 1 Ziff 3 [EnEV 2014]). Diese Verantwortlichkeit bedarf daher einer genaueren Betrachtung.

§ 26 Abs. 2 [EnEV 2014] wird ergänzt durch § 26a [EnEV 2014]. Danach muss derjenige, der geschäftsmäßig an oder in bestehenden Gebäuden Arbeiten zur Änderung von Außenbauteilen im Sinne des § 9 Abs. 1 Satz 1 durchführt, dem Eigentümer unverzüglich nach Abschluss der Arbeiten schriftlich bestätigen, dass die von ihm geänderten oder eingebauten Bau- oder Anlagenteile den Anforderungen der [EnEV 2014] entsprechen. Auch ein Verstoß gegen diese Vorschrift ist eine Ordnungswidrigkeit (§ 27 Abs. 3 Ziff. 3 [EnEV 2014]).

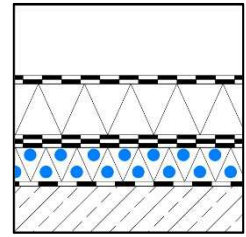
Die Umsetzung der [EnEV 2014] in den Bundesländern ist uneinheitlich. Teilweise fehlt es an einer Umsetzungsverordnung, wie z.B. in Rheinland-Pfalz. In anderen Bundesländern gibt es sehr unterschiedliche Umsetzungsverordnungen. Diejenige in Nordrhein-Westfalen enthält in Anlage 3 das Muster einer Unternehmererklärung.

Wenn es darum geht, vorhandene Dämmung im Gebäude zu belassen, liegt für den ausführenden Unternehmer die brisante Problematik darin, wie er eine aus seiner Sicht richtige Erklärung über die Einhaltung der Anforderungen der [EnEV 2014] abgeben vermag, um nicht eine Ordnungswidrigkeit zu begehen.

Es wäre deshalb sinnvoll, wenn die betroffenen Berufsverbände ihren Mitgliedern diesbezüglich eine Handreichung geben würden.

9.4 Maßnahmen zur Erhöhung des Wärmeschutzes

Auch hier gilt zunächst das zu 3. Gesagte. Allerdings sollten Wege gefunden werden, um die meist noch guten Wärmeschutzeigenschaften feuchter Dämmstoffe nicht durch Entsorgung zu vernichten, sondern sie zur nachhaltigen Nutzung im Dachaufbau zu belassen. Sie tragen grundsätzlich auch bei zusätzlich aufgebrachtem Wärmeschutz zur Energieeinsparung bei. Dabei bestehen die grundsätzlichen Möglichkeiten, entweder auf die vorhandene Abdichtung zunächst Dämmschichten und darüber eine weitere Abdichtungsschicht anzubringen oder die Abdichtungsschicht zu verbessern und darauf Umkehrdachdämmplatten (mit schwerem Oberflächenschutz) zu verlegen. Dabei ist zu prüfen, ob ein Tragwerksnachweis erforderlich ist. Der Unternehmer ist gehalten, auf die Notwendigkeit dieser Prüfung hinzuweisen.



Für einen energetischen Nachweis des Bauteils oder nach § 9 Abs. 1 Satz 2 [EnEV] kann der verbleibende Wärmeschutz der durchfeuchteten Dämmplatten mit Hilfe der im vorliegenden Bericht dokumentierten Wärmeleitfähigkeiten, die vom jeweils festzustellenden Feuchtigkeitsgehalt abhängen, bemessen werden. Da nicht an allen Stellen einer Dachfläche der Feuchtigkeitsgehalt durch gravimetrische Untersuchungen festgestellt werden kann, muss die Feuchteverteilung in der Dachfläche abgeschätzt werden. Die Untersuchungsstellen sowie die Ergebnisse der Feuchtigkeitsmessungen sind zu dokumentieren, damit die noch vorhandene Wärmeleitfähigkeit nachvollzogen werden kann, die in einem Nachweis gemäß [EnEV 2014] angesetzt wird.

Wenn die Problematik des öffentlich-rechtlichen Nachweises gelöst werden kann, kann die Frage der vertraglichen Verantwortung wie folgt beantwortet werden:

Wenn eine neue Dämmschicht auf eine funktionsfähige, vorhandene Abdichtung über der alten Dämmschicht aufgebracht wird, wie im Bericht [AIBAU/FIW 2003] beschrieben, ergeben sich für die Erfüllungs- und Gewährleistungsverpflichtungen des Unternehmers keine Besonderheiten gegenüber oben 1. und 2.

Wenn allerdings die alte Dachabdichtung durch den Unternehmer perforiert oder in Teilen entfernt wird sowie der vorhandene, feuchte Dämmstoff verbleibt, muss Sorge getragen werden, dass die vorhandene Feuchtigkeit sich nicht auf den neuen Dämmstoff überträgt und dessen Wärmeschutzeigenschaften gemindert werden. Derzeit bestehen hierfür keine eingeführten, bewährten technischen Ausführungsregeln. Dadurch ergeben sich für den Unternehmer erhebliche Risiken, da ihm der Vorwurf gemacht werden kann, nicht erprobte Bauweisen angewandt zu haben. Um diesem Vorwurf entgegenzuwirken, hat er seinen Auftraggeber auf Bedenken gegenüber der gewählten Ausführungsart hinzuweisen und dessen Entscheidung abzuwarten.

Dies gilt entsprechend in Fällen, in denen die Abdichtung an Rändern und Durchdringungen aufgeschnitten wird, um Kontraktionen des neuen Aufbaus durch möglichen Schrumpfen der alten Dachbahnen zu vermeiden. In praktischer Hinsicht wäre in diesen Fällen denkbar, eine zusätzliche diffusionshemmende Trennlage als Schleppstreifen über den Schnitten anzubringen, um die Gefahr zu minimieren, dass Feuchtigkeit aus der unteren Dämmebene in die obere aufsteigen kann.

10. Praxisempfehlungen

Da die Gebrauchstauglichkeit feuchter Dämmstoffe in der Regel nicht nennenswert oder nur gering eingeschränkt ist, können die Dämmstoffe sowohl in der Phase der Leckagesuche als auch nach der Instandsetzung bzw. Modernisierung des Dachaufbaus in den meisten Fällen erhalten werden. Zur Leckagesuche und zur evtl. Gewährleistungsabgrenzung ist es sinnvoll, den Feuchtegehalt der Dämmstoffe an jeweiligen Öffnungsstellen möglichst genau und die Untersuchungsstellen nachvollziehbar festzustellen und zu dokumentieren, wie dies auch [DIN 18531-4:2017-07] sowie die [Flachdachrichtlinie 2016] fordern. Für Hauseigentümer ist es ratsam, diese Dokumentation für spätere Beurteilungen der Dachfläche, z. B. im Rahmen von Umbaumaßnahmen oder auch zur Veräußerung, aufzubewahren.

10.1 **Feststellung und Dokumentation des Feuchtegehalts**

Die Untersuchungen und Dokumentationen sollten wie folgt vorgenommen werden:

1. Öffnungsstellen festlegen

Festlegung einer in Bezug auf die Dachfläche angemessenen Zahl von Öffnungsstellen, wobei dies nicht von vorneherein pauschal, sondern in Rückkopplung erster Untersuchungen zu empfehlen ist. An z. B. kleinen Dachterrassen können eine bis zwei Öffnungsstellen ausreichend sein. Bei größeren Dachflächen sollten entsprechend der Größe und Unterschieden hinsichtlich Gefälleaufbau und möglichen Schwachstellen mehr Öffnungsstellen angelegt werden, um ausreichende Informationen zum Zustand der Dämmplatten und das Maß der Durchfeuchtung zu gewinnen.

2. Bauteilöffnung

Entfernen der Schutzschichten und Öffnen der Abdichtungsschicht an zuvor und im Rückkopplungsprozess zusätzlich festgelegten Stellen.

3. Entnahme von Dämmstoffproben

Dämmstoffproben sollten durch vorsichtiges Heraustrennen mit einem Messer entnommen werden. Sie können auch mit Hohlraumbohrvorsätzen mit großen Durchmessern entnommen werden, wenn durch das Bohren keine in Bezug zur Probengröße nennenswerte Temperaturerhöhung an den Bohrflanken auftritt, die Wasser in nennenswerten Mengen verdunstet.

Die Lage der Öffnungsstellen sollte in einer Grundrisssskizze eingetragen oder mittels Fotos, die eine eindeutige Ortsbestimmung zulassen, dokumentiert werden.

4. Größe der Proben

Die Größe der Dämmstoffproben richtet sich nach den Prüfmöglichkeiten. Soll der Feuchtegehalt im Labor gravimetrisch (Darr-Messung, durch wiederholtes, bis zur Gewichtskonstanz wiegen, trocknen und erneutes wiegen gemäß [DIN EN ISO 12570:2013-09]) ermittelt werden, reichen Stücke in einer Größe von ca. 10 cm x 10 cm. Die entnommenen Proben sind (mittels Beschriftung oder Kontrollzettel im Beutel) zu kennzeichnen. Es sollten Angaben zum Gebäude, der Entnahmestelle, des Entnahmezeitpunkts und ggf. Hinweise auf bestimmte Randbedingungen erfolgen sowie die Adresse des Absenders der Proben. Wenn die Proben in ein Labor transportiert werden, müssen sie luftdicht, bei längeren Transportwegen auch möglichst dampfdicht verpackt werden.

Soll der Feuchtegehalt vor Ort mittels relativ groben Waagen und Vergleich mit der Rohdichte abgeschätzt werden, sollten deutlich größere Stücke mitgenommen werden.

Für Proben, an denen weitere Untersuchungen durchgeführt werden sollen, wie die Feststellung der Wärmeleitfähigkeit oder der Druckfestigkeit, sind die Abmessungen zuvor mit dem Prüflabor abzustimmen. In Abhängigkeit der jeweiligen Schichtdicken können dafür Proben in der Größenordnung von 40 cm x 40 cm oder größer erforderlich werden.

5. Messung durch elektronische Messgeräte

Messungen vor Ort mit Feuchtemessgeräten, die die elektrische Leitfähigkeit mit Einstechnadeln oder die elektrische Kapazität, die Dielektrizitätskonstante, mit einem Kugelsensors messen, sind sehr ungenau, da keine Korrelation zwischen Anzeige und tatsächlichem Feuchtegehalt im Dämmstoff herstellbar ist.

Auch Mikrowellen-Messgeräte und Messungen der Luftfeuchte im Dämmstoff liefern in der Regel keine brauchbaren Ergebnisse über den Gesamtfeuchtegehalt des Dämmstoffs, weil die Feuchte sich im Dämmstoff ungleichmäßig in Abhängigkeit der jeweiligen Klimarandbedingungen verteilt.

6. Verschließen der Öffnungsstellen

Die Öffnungsstellen sollten unmittelbar nach der Entnahme mit Dämmstoff verschlossen und abgedichtet werden oder ggf. zusätzlich mit Kontrollrohren (s. Kap. 10.6.2) ergänzt werden.

7. Ermittlung des Feuchtegehalts:

a) grobe Abschätzung vor Ort: Das Gewicht einer möglichst großen, entnommenen Dämmstoffprobe sollte mit dem vermuteten Trockengewicht verglichen werden. Die Differenz im Verhältnis zum Trockengewicht ergibt den Feuchtegehalt in Masse-%. Wird z. B. eine EPS-Probe von 30 cm x 30 cm x 10 cm entnommen, so errechnet sich daraus ein Volumen von $0,3 \times 0,3 \times 0,1 \text{ m} = 0,009 \text{ m}^3$. Bei einer angenommenen Rohdichte von 20 kg/m^3 läge das Trockengewicht bei $20 \text{ kg/m}^3 \times 0,009 \text{ m}^3 = 0,18 \text{ kg}$ bzw. 180 g.

Wird ein Gewicht der Probe mit z. B. 1.000 g gemessen, so beträgt der Feuchtegehalt

$u_M = (\text{Nassgewicht} - \text{Trockengewicht}) / \text{Trockengewicht} = (1.000 \text{ g} - 180 \text{ g}) / 180 \text{ g} = 4,56$ bzw. 456 Masse-%.

Wegen des geringen Volumengewichts von Dämmstoffen führen so große Zahlen zu einem falschen Bild, weswegen bei leichten Dämmstoffen der Feuchtigkeitsgehalt nicht in Bezug auf das Trockengewicht, sondern auf das Volumen angegeben wird.

Die Umrechnung auf den besser verständlichen Bezugswert Volumen-% erfolgt nach folgender Formel:

$$u_V = u_M \times \rho_R / \rho_W$$

mit

u_V : Feuchtegehalt, volumenbezogen

u_M : Feuchtegehalt, massebezogen

ρ_R : Rohdichte des Probekörpers (Quotient aus der Masse und seinem Volumen einschl. Poren, jedoch aussch. etwa vorhandener Hohlräume, wie Löcher, Mörteltaschen usw.)

ρ_W : Rohdichte von Wasser (1.000 kg/m^3).

Im Beispiel errechnet sich aus der 1kg schweren EPS-Dämmstoffprobe ein Feuchtegehalt von $456 \times 20 / 1.000 = 9,1 \text{ Vol.-%}$.

Vereinfacht kann der volumenbezogene Feuchtegehalt durch Multiplikation des massebezogenen Feuchtegehalts mit dem spezifischen Trockengewicht der Probe (hier $0,02 \text{ kg/m}^3$) ermittelt werden.

Für das Beispiel bedeutet dies: $u_V = 456 \text{ Masse-%} \times 0,02 = 9,1 \text{ Volumen-%}$.

8. Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

Die durch den ermittelten Feuchtegehalt veränderte Wärmeleitfähigkeit kann grob im Vergleich zu den in Kap.8 dargestellten Grafiken und Tabellen abgeschätzt werden. Eine genauere rechnerische Ermittlung, bezogen auf die – sofern ermittelbar – konkrete Wärmeleitfähigkeit des vorgefundenen Dämmstoffs erfolgt durch die Formel

$$F_m = e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)}$$

mit

f_ψ Feuchteumrechnungskoeffizient (nach [DIN EN ISO 10456:2010-05], Tab. 4)

ψ_1 Anfangsfeuchtegehalt

ψ_2 Endfeuchtegehalt,

wobei als Differenz zwischen den beiden Feuchtegehalten ψ_2 und ψ_1 der Feuchtegehalt in Vol.-% eingesetzt werden kann.

Die Feuchteumrechnungskoeffizienten sind auch den Tabellen in Kap. 8 zu entnehmen.

10.2 Lasterhöhung bei feuchten Dämmschichten

Anhand des Feuchtegehalts sollten die Zusatzlasten abgeschätzt und das Tragwerk überprüft werden, ob eine entsprechende Lastreserve besteht.

Neben den bauphysikalischen Veränderungen ist auch die zum Teil sehr deutliche Gewichtserhöhung durch im Dämmstoff eingeschlossene Feuchte bei der Planung zu berücksichtigen. Durchfeuchtete Schaumkunststoffe weisen ein Vielfaches ihres ursprünglichen Gewichts auf. Diese zusätzlichen Lasten müssen auch bei Extrembedingungen, z. B. zusätzlich hoher Schneelast, noch sicher abgetragen werden können.

Langfristig einwirkende Nässe kann zu einer deutlichen Erhöhung des Dachgewichts führen. Zum Beispiel wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ein EPS-Dämmstoff ausgebaut, der einen Feuchtegehalt von ca. 55 Vol.-% aufwies. Der Dämmstoff war 5 cm dick, so dass man überschlägig mit etwa 2,5 cm hoch stehendem Wasser innerhalb des Dachaufbaus rechnen muss. Bei dem betroffenen Dach handelte es sich um eine Schule der 70er Jahre aus Stahlbeton. Dabei kann man davon ausgehen, dass dort für diese Last genügend Lastreserven zur Verfügung stehen. In Einzelfällen kann aber eine genauere Überprüfung erforderlich sein. Insbesondere sehr leichte Dachkonstruktionen, z. B. über Gewerbehallen, weisen oft keine größeren Lastreserven auf.

In der europäischen Norm für Traglasten [DIN EN 1991-1:2010-12] werden keine Flächenlasten für heute gebräuchliche Mineralwolle-Platten aufgeführt. Diese sind aber sehr unterschiedlich: Auf Trapezblech- und Betondecken sind hochfeste Mineralwollendämmungen üblich, die immerhin Rohdichten von 150 kg/m³ oder höher aufweisen können. Zwischensparrendämmungen bei Flachdächern aus Holz sind allerdings in der Regel deutlich leichter und liegen meist in der Größenordnung zwischen 10 und 40 kg/m³.

Bei der in der Richtlinie [VDI 6200:2010-02] beschriebenen regelmäßigen Überprüfung der Standsicherheit wird zwar nicht grundsätzlich eine Kontrolle des Durchfeuchtungsgrads der Wärmedämmung gefordert. Es wird aber in der Checkliste in Anhang D in Zeile 3.2.6 für Flachdächer beispielhaft auf eine übermäßige Durchbiegung infolge erhöhter Dachlasten z. B. aus „*wasserdurchtränkter Isolierung infolge beschädigter Dachdichtung, verstopfter Regenabläufe bzw. Notüberläufe*“ hingewiesen.

10.3 Bestandsaufnahme der eingebauten Dampfsperre

Im Rahmen der Bestandsaufnahme einer vorhandenen Dachfläche ist auch die Art der Dampfsperrbahn zu untersuchen. Von Umfrageteilnehmern wird berichtet, dass diese z. B. aus Bitumenbahnen mit verrottbaren Bestandteilen (z. B. Jute) bestanden. Auch korrodierte Aluminiemeinlagen wurden vorgefunden. Bei Leichtbaudächern sind häufig nur überlappte PE-Folien als Dampfsperre eingebaut. In all diesen Fällen ist davon auszugehen, dass die Dampfsperrbahn nicht wasserdicht ist, also keine Funktion (mehr) als Notabdichtung hat. Es muss bei der Entscheidung für eine bestimmte Maßnahme dafür gesorgt werden, dass keine neue Wasserbelastung an der Dampfsperrbahn stattfindet.

Überlappt verlegte Bahnen sind nicht luftdicht. Wenn die Abdichtungsschichten darüber auch nicht luftdicht sind, kann es zu Luftkonvektionsströmungen mit entsprechendem Tauwasserausfall innerhalb des Aufbaus kommen.

10.4 Vorgaben der EnEV

In Kap. 9 sind rechtliche Hinweise enthalten zur Verpflichtung des Planers bzw. Unternehmers, die Einhaltung der [EnEV 2014] zu bestätigen.

Der Wärmeschutz der feuchten Dämmstoffe soll in die EnEV-Bewertung einbezogen werden. Damit kann eine ggf. erforderliche Zusatzdämmung entsprechend reduziert werden. Sie muss nicht alleine die Anforderungen erfüllen.

10.5 Absaugen von Wasser an Tiefpunkten

Damit der Wärmeschutz feuchter Dämmstoffe nicht weiter abnimmt, soll flüssiges Wasser aus dem Dachaufbau entfernt werden. Dazu können Kontrollrohre am Tiefpunkt der Dampfsperrebene eingebaut werden (s. Kap. 10.6.2) und das dort sich sammelnde Wasser mehrfach so lange abgesaugt werden, bis kein Wasser mehr nachsickert. Je nach Gefällesituation kann sich dieser Prozess über mehrere Wochen erstrecken. Ändert sich die Wassermenge nicht oder steigt gar wieder an, sind sehr wahrscheinlich noch nicht beseitigte Leckstellen in der Abdichtung vorhanden. Zu berücksichtigen ist ggf. anfallendes Tauwasser in Kontrollrohren.

10.6 Austrocknung

Die Möglichkeiten, dass feuchte Dämmschichten in Flachdächern wieder austrocknen, sind sehr beschränkt. Im Folgenden werden häufig diskutierte Varianten der Trocknungsmaßnahmen beschrieben.

10.6.1 Dachabdichtungsbahnen mit geringem Diffusionswiderstand

Hersteller von Dachbahnen mit geringem Diffusionswiderstand werben damit, dass feuchte Dächer mithilfe ihrer Produkte schnell wieder austrocknen. Grundsätzlich ist es richtig, dass Abdichtungen mit niedrigem s_d -Wert (Wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke) eine höhere Wasserdampfdiffusionsstromdichte und damit einen höheren Wasserdampftransport ermöglichen als solche mit höherem s_d -Wert. Allerdings lassen auch Abdichtungsbahnen mit niedrigerem Diffusionswiderstand im Verhältnis zu den im Schadensfall möglichen Feuchtegehalten nur in begrenztem Umfang eine deutliche Austrocknung erwarten. Das zeigen die folgenden Abschätzungen.

Die Wasserdampfdiffusionsstromdichte g , die der Diffusionswiderstand einer Abdichtungsschicht ermöglicht, kann rechnerisch – auf der Grundlage des vom Hersteller angegebenen s_d -Werts – ermittelt werden. Unter der Annahme annähernd gleicher Temperaturen auf der Unterseite und Oberseite der Dachabdichtung, einem Sättigungsdampfdruck auf der Unterseite (100 % relative Feuchte) 50 % relativer Feuchte auf der Außenseite ergeben sich für drei unterschiedliche Temperaturen die in Tabelle 30 genannten Werte für die Wasserdampfdiffusionsstromdichte. Für die Annahme eines 1 mm hohen Wasserfilms an der Unterseite der Abdichtungsbahn (1.000 g/m^2), der sich theoretisch bei einem Feuchtegehalt

von 1 Vol.-% bei einer 10 cm dicken Dämmschicht dort anlagern könnte, sind dazu auch die entsprechenden Zeiten aufgeführt, die zu einer vollständigen Austrocknung erforderlich wären.

Tabelle 30

Wasserdampfdiffusionsstromdichte und Austrocknungszeit bei unterschiedlichen Dachoberflächentemperaturen und sehr geringem s_d -Wert der Abdichtung.

Temperatur der Dachoberfläche	20 °C	40 °C	60 °C
s_d -Wert der Abdichtung	15 m	15 m	15 m
Wasserdampfdiffusionsstromdichte (g)	0,06 g/(m ² ·h)	0,18 g/(m ² ·h)	0,48 g/(m ² ·h)
Wassermenge unter der Abdichtung	1.000 g/m ²	1.000 g/m ²	1.000 g/m ²
Austrocknungsdauer	743 Tage	236 Tage	87 Tage

Hieraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass selbst bei dem angenommenen, sehr niedrigen s_d -Wert von 15 m ein hoher Feuchtegehalt erst nach langer Zeit austrocknen kann. Da die oben angenommenen Temperaturen nicht über 24 h und nicht über das ganze Jahr vorliegen, ist mit deutlich längeren Austrocknungszeiten zu rechnen.

Realistischer kann man das Austrocknungsverhalten mit einer hygrothermischen Berechnung (z. B. mit dem Programm WUFI) abschätzen. Dazu wurden drei Dachaufbauten mit unterschiedlich diffusionsdichten Dachbahnen, einer 10 cm dicken EPS-Dämmschicht mit einem Feuchtegehalt von 1 Vol.-% und einer Dampfsperrbahn (mit einem s_d -Wert = 100 m) simuliert. Als Außenklimabedingungen wurde das Testreferenzjahr von Potsdam 2014 mit extremem Sommer (einem der in WUFI hinterlegten Klimadatensätze) zugrunde gelegt, als Innenklima entsprechend [DIN EN 15026:2007-07] eine „normale Feuchtelast“. Verglichen wurde die Entwicklung des Wassergehalts des Aufbaus über einen Zeitraum von 10 Jahren bei Dachbahnen mit s_d -Werten von 15 m, 40 m und 200 m. Von entscheidender Bedeutung für das Austrocknungsverhalten ist die Einstrahlung auf der Dachoberfläche und damit die Temperatur auf der Dachbahn. Es wurde eine kurzweilige Strahlungsabsorptionszahl von 0,8 gewählt, die für dunkle Dachbahnen gilt. Würde die Dachhaut durch Kies oder anderes abgedeckt, verlangsamte sich der Austrocknungsprozess deutlich!

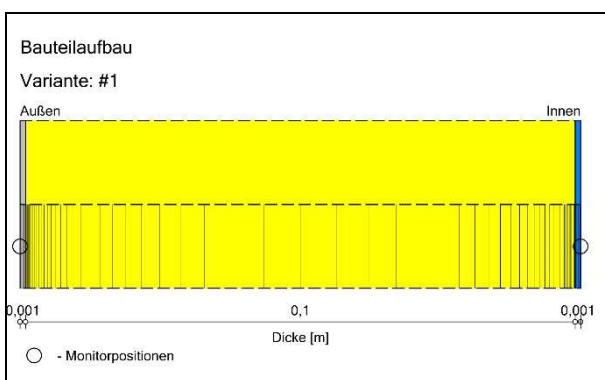
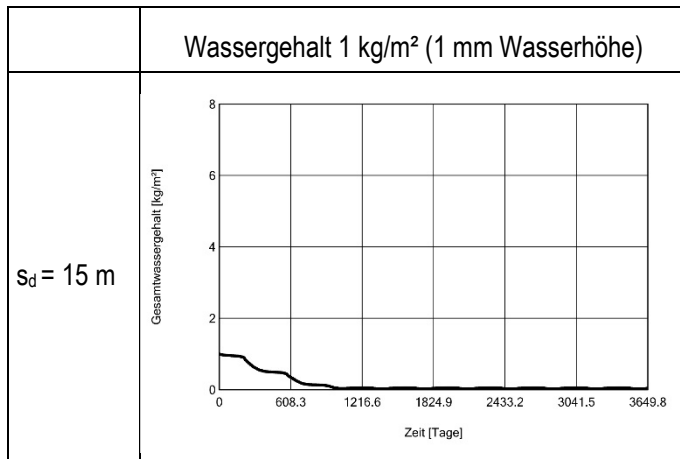


Bild 72

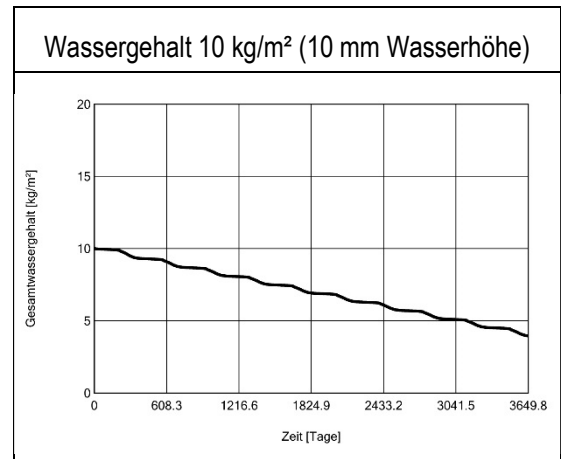
Mit WUFI simulierter Bauteilaufbau aus Dampfsperrfolie, EPS-Wärmedämmung und Abdichtung. Die s_d -Werte der Abdichtung wurden variiert.

Tabelle 31

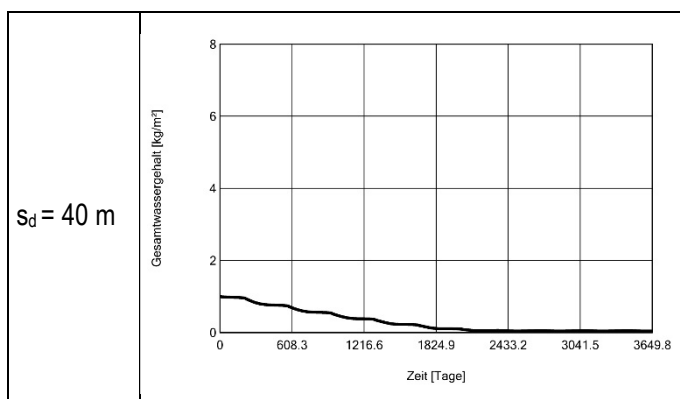
Austrocknungsdauer in Abhängigkeit von s_d -Wert der Dachbahn und Feuchtegehalt in einem Dämmstoff von 10 cm Dicke, dargestellt ist ein Berechnungszeitraum von 10 Jahren



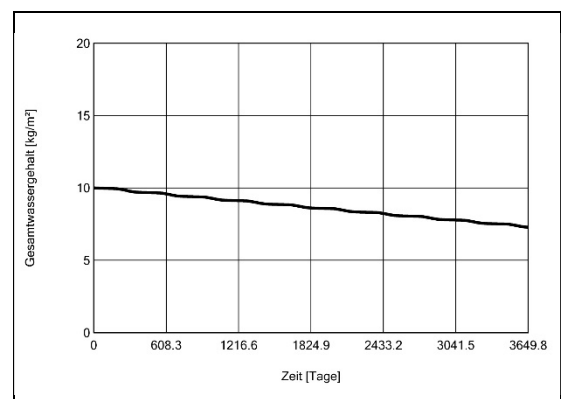
Bei einem s_d -Wert der Abdichtung von 15 m erfolgt die Absenkung des Feuchtegehalts von 1 kg/m² auf etwa 0,1 kg/m² in ca. 3 Jahren.



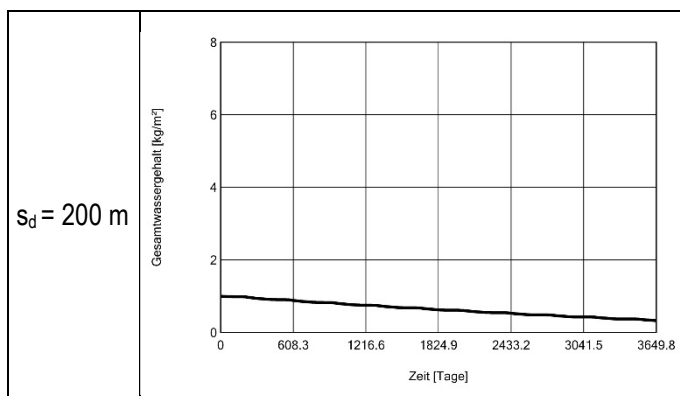
Bei einem s_d -Wert der Abdichtung von 15 m erfolgt in ca. 10 Jahren die Absenkung des Feuchtegehalts von 10 kg/m² auf etwa 5 kg/m².



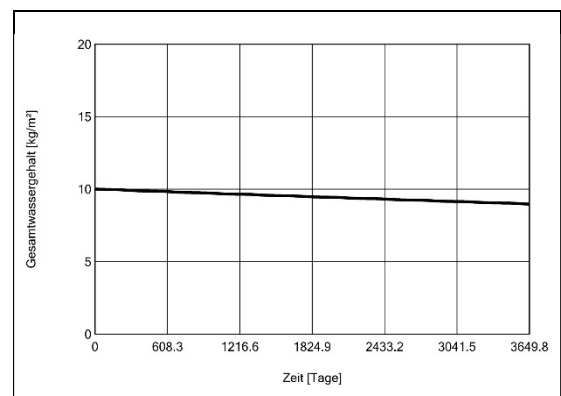
Bei einem s_d -Wert der Abdichtung von 40 m erfolgt innerhalb von 6 Jahren eine Absenkung des Feuchtegehalts von 1 kg/m² auf etwa 0,1 kg/m².



Bei einem s_d -Wert der Abdichtung von 40 m erfolgt in 10 Jahren eine Absenkung des Feuchtegehalts von 10 kg/m² auf etwa 8 kg/m².



Bei einem s_d -Wert der Abdichtung von 200 m erfolgt innerhalb von 10 Jahren eine Absenkung des Feuchtegehalts von 1 kg/m² auf etwa 0,3 kg/m².



Bei einem s_d -Wert der Abdichtung von 200 m erfolgt in 10 Jahren eine Absenkung des Feuchtegehalts von 10 kg/m² auf etwa 9 kg/m².

Allerdings sind sowohl die Berechnung des Diffusionswiderstands als auch die Berechnung mittels WUFI nur noch bedingt anwendbar, wenn die s_d -Werte infrage gestellt werden müssen: Die normgemäße Prüfung der Wasserdampfdiffusionswiderstände erfolgt bei trockenen Baustoffen. Sowohl die hier untersuchten Dämmstoffe als auch Abdichtungswerkstoffe werden aber, sobald die Baustoffe Feuchte einlagern, ein deutlich verändertes Feuchtetransportverhalten aufweisen. Für diese beiden Baustofftypen – Dämmstoffe und Abdichtungen – geben weder die Normen Auskunft über das Feuchtetransportverhalten noch die Werte, die hygrothermischen Berechnungen zugrunde gelegt werden. In dieser Hinsicht besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf. Geht man davon aus, dass durch Materialien mit erhöhter Feuchteeinlagerung deutlich größere Feuchtemengen transportiert werden können, kann auch ein entsprechend verändertes Abdichtungsmaterial zu einer höheren Austrocknung führen, als es zurzeit mit den vorliegenden Kennwerten zu erwarten wäre.

10.6.2 Austrocknung durch Lüfter

Theoretisch denkbar ist auch die Möglichkeit, durch den Einsatz von Lüftern bzw. Kontrollrohren eine Austrocknung durchfeuchteter Dämmschichten zu erreichen. Dabei werden als einfachste Variante Rohrstutzen mit Deckel und Anschlussflansch oder -manschette in die Dachabdichtungsebene eingeklebt, so dass eine Verbindung zwischen Dämmschicht und Außenluft hergestellt wird. Teilweise werden auch Lüfter mit Ventilatoren eingesetzt, die, vom Wind angetrieben, Luft aus dem Dachaufbau absaugen sollen.

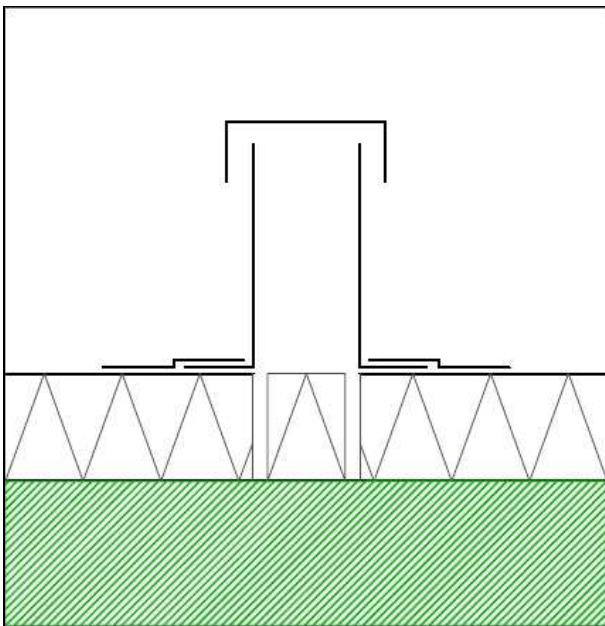


Bild 73

Temporäre Kontrollrinne mit herausnehmbaren Dämmstoff zur Kontrolle der Dampfsperreebene bzw. zum Absaugen flüssigen Wassers wirken nur im unmittelbaren Umfeld trocknend

Berichte über Trocknungserfolge, die mit diesen Maßnahmen erreicht werden, müssen allerdings kritisch hinterfragt werden. Dokumentationen über Feuchtemessungen vor dem Einbau und nach längerem Betrieb liegen den Verfassern nicht vor. An einem Objekt konnte in der Vergangenheit sogar nachgewiesen werden, dass nach mehreren Jahren des Einsatzes eines Lüfters (ohne Ventilator) im Abstand von etwa 2 m immer noch ein ähnlich hoher Feuchtegehalt der (EPS-) Dämmschicht vorgefunden wurde wie beim Einbau. Auch bereits in einer älteren Untersuchung des FIW [Achtziger/Cammerer/Korff 1991 und 1995] wurde kein nennenswerter Effekt festgestellt. Allgemein wird davon ausgegangen, dass sich der Trocknungseffekt eines Lüfters in der Regel auf das unmittelbare Umfeld von etwa 1 m beschränkt. Ventilatorgetriebene Lüfter können ggf. einen etwas größeren Wirkungskreis erfassen. In einem weiteren Beispiel konnte nachgewiesen werden, dass die Dämmschicht unmittelbar unter einem solchen Lüfter gleich feucht war wie in einem Abstand von ca. 1 m, während an einer zweiten Stelle die Dämmschicht unmittelbar unter dem Lüfter deutlich mehr Wasser enthielt als in einem Abstand von 1 m. Offensichtlich war Wasser durch den Lüfter in den Dachaufbau gelangt.

Ursache der geringen Trocknungsleistung ist die nicht vorhandene Konvektion, die in nennenswerten Mengen Wasser transportieren könnte. Für eine Diffusion sind die Widerstände der Bauteilschichten parallel zur Dachebene zu hoch, als dass Wasser austrocknen könnte. So könnten bestenfalls nur die unmittelbar unter einer Öffnung liegenden Bereiche des Dämmstoffs abtrocknen. Allerdings besteht offensichtlich auch die Gefahr, dass – z. B. durch Tauwasserausfall oder Schneeverwehungen – durch die Öffnungen Wasser in den Dachaufbau gelangt.

Allgemein sollten solche Lüfter bei Dächern mit nicht funktionstüchtiger Luftdichtheitsschicht – z. B. lediglich überlappt verlegte Folien als Dampfsperrschichten über Trapezblechdächern oder Folien auf der Innenseite von Holzflachdächern – nicht eingesetzt werden. Sonst können sich in der Dämmschicht erhebliche Mengen Tauwasser bilden, wenn durch den Konvektionsstrom feucht-warme Innenluft an die Unterseite der kalten Abdichtung gelangt.

10.6.3 Technische Trocknung durch Konvektion

Wie bei feuchten Estrichdämmschichten besteht auch bei Flachdachschichten die Möglichkeit, durch den Dachaufbau trockene Luft einzublasen.

Allerdings konnten einzelne Berichte über entsprechende Trocknungserfolge bislang nicht belegt werden. Auch Erfahrungen von Trocknungsfirmen zeigen, dass eine technische Trocknung kaum erfolgreich ist. Sie ist mit einem sehr hohen insbesondere energetischen Aufwand verbunden und erreicht im besten Falle die Austrocknung der Oberfläche und des frei verfügbaren Wassers unter, neben und ggf. oberhalb des Dämmstoffs. Das im Dämmstoff eingelagerte Wasser kann, vor allem bei Schaumkunststoffen (aber auch bei druckfester Mineralwolle), nicht zuverlässig entfernt werden, da die Diffusionswiderstände innerhalb der Dämmplatten zu hoch sind und die Trocknung unter baupraktischen Bedingungen in der Regel ein sehr langwieriger Prozess ist. Die an den Austrittsstellen der Luft enthaltene Feuchtigkeit ist daher kein zuverlässiger Indikator, dass der Dachaufbau vollständig trocken ist.

Zudem müssen aufgrund des hohen Strömungswiderstands der Dämmschichten in relativ kurzem Abstand viele Löcher für die Transportschläuche in die Dachhaut gebohrt und abgedichtet werden. Neben den hohen Installations- und Energiekosten spricht daher auch das erhöhte Leckagerisiko gegen diese Art der Trocknung.

10.7 Verklebte Dachaufbauten

Kleber können unter Feuchtigkeitseinwirkung ihre Festigkeit verlieren. Dadurch kann die Windsogsicherung bei verklebten Dachaufbauten eingeschränkt werden. Verbleibt nach einer Prüfung Zweifel an der erforderlichen Haftzugfestigkeit, sollte die Dachfläche häufiger inspiziert werden, um Veränderungen der Anhaftung frühzeitig zu erkennen.

Bei der Verklebung des neuen Dachaufbaus auf dem vorhandenen Flachdach müssen folgende Fragen geklärt werden:

- Gibt es Materialunverträglichkeiten zwischen dem Kleber und der belassenen, alten Abdichtung?
- Wie verhält sich eine Verklebung auf der belassenen, alten Abdichtung, insbesondere in Abhängigkeit vom Werkstoff (Kunststoff- oder Elastomerdachbahn bzw. Bitumendachbahn)?
- Wie verhält sich eine Verklebung auf einem bewitterten Dach?
Anmerkung: Die Angaben aus den Prüfzeugnissen beziehen sich meist auf eine Verklebung auf neuen Materialien. Auf einem Bestandsdach sind die Materialien aber z. B. spröder und es gibt Algen und sonstige Ablagerungen.
- Wie verhalten sich die Klebstoffe bei im Dachaufbau eingeschlossener Feuchte?

Da diese Fragen in der Regel nicht endgültig geklärt werden können, sollte verklebte Dachaufbauten häufiger inspiziert und gegebenenfalls instandgesetzt werden.

Eine Verminderung der Zugfestigkeit zwischen Abdichtungsschicht und feuchten Dämmstoffschichten ist insbesondere bei Mineralwolle und Schaumglas anzunehmen. Der Bruch tritt hier in der Regel in der Oberfläche des Dämmstoffs statt im Kleber auf.

Bei Dachflächen mit zusätzlicher Lagesicherung durch Auflast oder mechanischen Befestigungen ist eine Veränderung der Zugfestigkeit unproblematisch.

10.8 Mechanische Befestigung

Mechanische Befestigungen können durch Feuchtigkeitseinwirkungen korrodieren, wobei davon nicht nur korrosionsschutzte, sondern auch korrosionsbeständige Befestigungsmitteln in Stahltrapezblechen betroffen sein können. Sie sind im Rahmen von Inspektionen auf Korrosion zu prüfen. Bei Korrosion einzelner Befestiger ist die Modernisierung des Dachaufbaus nicht zwingend erforderlich. Daher sollte an mehreren Stellen untersucht werden, ob und inwieweit Korrosion fortgeschritten ist. Die geschädigten Befestiger können entweder ausgetauscht oder durch zusätzliche ergänzt werden. Wenn der Grad der Korrosion gering ist, ist nach einer Instandsetzung der Dachabdichtung nicht mit einer nennenswerten weiteren Ausweitung der Korrosion zu rechnen, wenn die Feuchtigkeit nicht mehr an diesen Stellen einwirken kann. Nicht nur deswegen sollte frei bewegliches, flüssiges Wasser aus dem Dachaufbau entfernt werden.

Die mechanische Befestigung von neuen Dämmschichten über einem belassenen Dachaufbau hat eine Perforation des alten Dachaufbaus zur Folge, die möglichst gering gehalten werden sollte. Die Dübel müssen korrosionsbeständig sein, weil ein oberflächiger Korrosionsschutz beim Eindübeln (insbesondere durch Bitumenbahnen) beschädigt oder zerstört werden kann.

10.9 Perforation alter Dachhaut vor Überdämmung

Einige Umfrageteilnehmer berichten, dass sie empfehlen, vor der Überdämmung des feuchten Altdaches die vorhandene Abdichtung zu perforieren, bzw. an den Rändern und Durchdringungsanschlüssen einzuschneiden. Dies ist nach den langjährigen Praxiserfahrungen der Verfasser nicht empfehlenswert.

Zum einen kann die verbliebene Abdichtung über der alten Dämmung dann nicht mehr als Notabdichtung, z. B. gegen während der Überarbeitung der Dachfläche eindringendes Niederschlagswasser dienen. Zum anderen wirken ggf. Schrumpfprozesse der alten (meist Kunststoff-) Dachabdichtungsbahn zusätzlich auf die neue und alte Dämmschicht ein.

Außerdem kann Feuchte aus dem Altdach in den neuen Dachaufbau übertragen werden, was unter anderem auch eine Abgrenzung von ggf. neuen Durchfeuchtungen zu beibehaltenen Feuchten unmöglich macht. Da die neu eingebauten Dämmstoffe in der Regel eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als die verbleibenden feuchten Dämmstoffe, bewirkt der Feuchteeintrag in die neuen Dämmstoffe auch dort eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Auch aus diesem Grund sollte die alte Dachbahn möglichst unversehrt bleiben.

10.10 Zusatzdämmung und -Abdichtung

Beim Aufbringen einer Zusatzdämmung und -abdichtung sollte die alte Abdichtung als Abdichtung inkl. Anschlüsse an Abläufe, Durchdringungen und Dachränder während der Durchführung der Maßnahmen zum Schutz des Gebäudes und aus Gründen der Gewährleistungsabgrenzung möglichst unversehrt bleiben. Kunststoffbahnen sollten nur bei starken Verformungen, z. B. an Randanschlüssen, oder starken Schrumpfungen entweder instandgesetzt oder entfernt werden.

10.11 Entwässerung

Bei einer Überarbeitung der Dachfläche ist das Entwässerungssystem nach Kriterien aktueller Anforderungen zu prüfen. Entwässerungsnachweise werden häufig von Systemherstellern von neuen Abläufen erbracht. Dächer sind zu prüfen, ob Notablauf- oder -überlaufsysteme zum Schutz gegen Jahrhundertregenereignisse vorhanden sind, die auch gegen andere Folgeschäden bei Überstauungen schützen können.

Diese Prüfungen sollen aber nicht nur bei Überarbeitungen von Dachflächen, sondern bei regelmäßigen Inspektionen vorgenommen werden, da bei unzureichender Entwässerung auch Standsicherheitsfragen tangiert sein können.

Spätestens aber bei einer Dachmodernisierung ist die erforderliche Abflussleistung anhand der aktuellen Bemessungsregeln zu überprüfen. In vielen Fällen ist die Ablaufleistung an Dächern zu erhöhen und zusätzliche Abläufe oder Notüberläufe einzusetzen.

Beim Einbau einer Zusatzdämmung müssen die Abläufe regelmäßig in der Weise verändert werden, dass die Abläufe der neuen Dachabdichtung durch die alten Abläufe hindurchgeführt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die neuen Abläufe ebenfalls rückstausicher abgedichtet werden, z. B. durch einen Rollring oder durch Dichtlippensysteme. Denn auch die neue Dämmschicht darf bei einem Rückstau nicht geflutet werden. Dadurch entfällt zwar die Entwässerungsmöglichkeit der alten Dachebene. Diese muss jedoch ebenso wenig entwässert werden wie die Dampfsperreebene. Problematisch ist dabei ggf., dass als neues Ablaufstockwerk nur eines mit geringerem Nenndurchmesser eingebaut werden kann (Bild 74). Damit verringert sich die Abflussleistung, was in der Regel den verschärften Anforderungen diametral entgegensteht. Allerdings sind die Querschnittsverminderungen dann unproblematisch, wenn die neuen Abläufe auch bei vermindertem Rohrdurchmesser die gleichen Entwässerungsleistungen erbringen wie die alten. Die Hersteller liefern zu ihren Sanierungsgullys die entsprechenden Nachweise der Regen- und Notentwässerung.

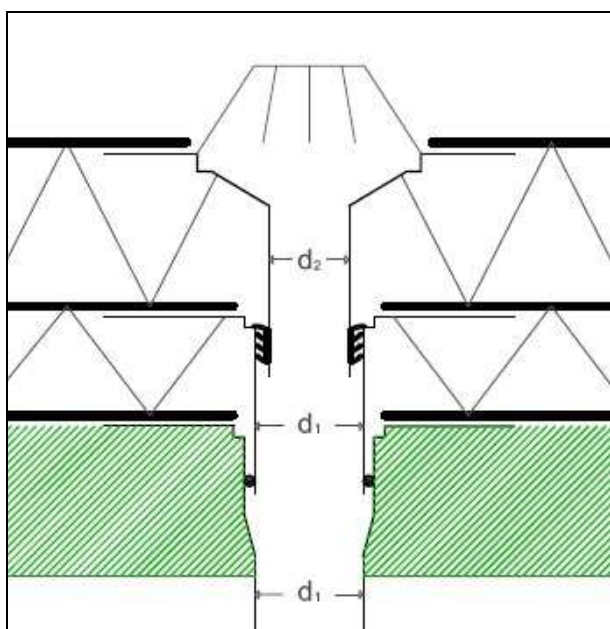


Bild 74
Neues Aufstockelement mit Querschnittsverringerung

Nicht selten wird das alte Aufstockelement ausgebaut und die alte Abdichtung im Bereich des Ablaufs offen gelassen (Bild 75). Das ist bei funktionstüchtiger neuer Abdichtung kein Problem: Ein Diffusionsvorgang wird nur im Bereich des aufgeschnittenen und entfernten Rings stattfinden, die in den neuen Dämmstoff eindringende Feuchtigkeit sich darüber hinaus aber kaum auf die übrige Fläche ausdehnen, weil für einen horizontalen Transportvorgang die Antriebskräfte fehlen. Ist die neue Abdichtung aber fehlerhaft bzw. fällt im Rahmen der Baumaßnahme Niederschlag, so wird Wasser an diesen

Punkten in das alte Dämmpaket laufen. Eine Abgrenzung im Sinne der Gewährleistungsverpflichtungen wird dadurch erschwert, weil zwischen „alter“ und „neuer“ Feuchtigkeit nicht mehr unterschieden werden kann. Diese Maßnahme muss auch mit der Behandlung der übrigen Anschlüsse im Zusammenhang gesehen werden: Wenn auch an Lüfter-, Lichtkuppel- und Randanschlüssen die alte Abdichtung aufgeschnitten und nicht wieder dicht angeschlossen wird, und sogar ggf. die alte Abdichtung (unnötigerweise) perforiert oder gar zerschnitten wird, dann verteilt sich eingeschlossene oder neue Feuchte sowieso über den gesamten Querschnitt und die gesamte Dachfläche.

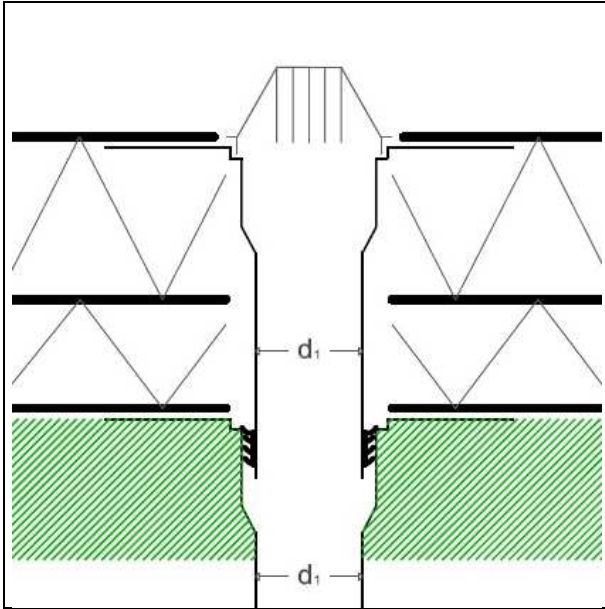


Bild 75

Neues Aufstockelement nach ersatzlosem Entfernen des alten Aufstockelements bzw. dessen Abdichtungsanschlusses

Anzustreben ist allerdings, die alte Dachabdichtung so funktionsfähig wie möglich zu erhalten, d. h., die Dichtheit aller Anschlüsse beizubehalten, auch wenn die Möglichkeit zur Entwässerung der alten Abdichtungsebene durch das neue, rückstausicher einzubauende Aufstockelement der neuen Abdichtungslage nicht mehr gegeben ist. Im Falle erneuter Leckagen oder Niederschlagseintrag während der Bauzeit muss dann „nur“ die alte Abdichtungsebene abgesaugt werden. Für die Situation, dass das alte Aufstockelement einen größeren Nenndurchmesser als die Entwässerungsleitung hat, können neue Aufstockelemente unproblematisch eingesetzt werden. Für den Fall, dass das eingebaute alte Aufstockelement den gleichen Nenndurchmesser wie die Entwässerungsleitung hat, muss eine Querschnittsverminderung in Kauf genommen werden oder, falls die Abflussleistung nicht verkleinert werden darf, das alte Aufstockelement durch eine Art „Zwischen-/Ersatzgully“ ersetzt werden (Bild 76).

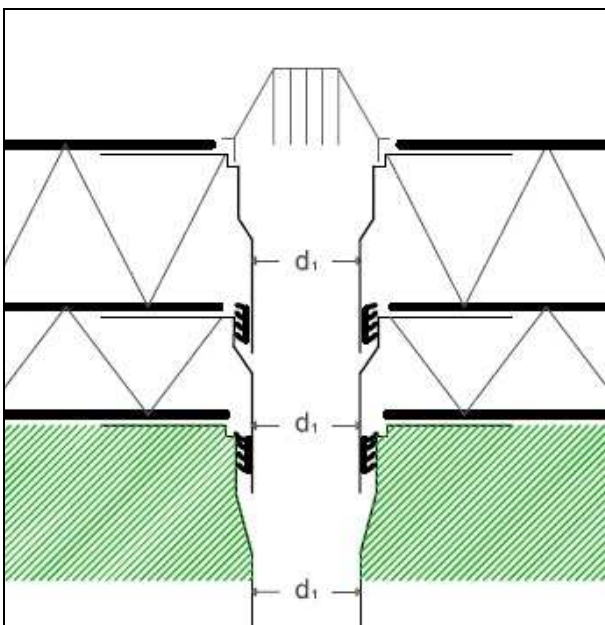


Bild 76

Nach ggf. erforderlichem Ausbau des alten Aufstockgullys: Ersatz durch einen neuen „Zwischen-/Ersatz-Gully“, in den das Aufstockelement der neuen Abdichtung geführt werden kann.

10.12 Weitere Entscheidungskriterien

Die Entscheidung über die Beibehaltung feuchter Dämmstoffe muss im Einzelfall unter Berücksichtigung anderer Kriterien (Gewährleistungsfall oder Modernisierungsentscheidung, Umgang mit verbauten/gebundenen Schadstoffen, Nutzungsänderungen usw.) getroffen werden. Ebenso sollte vor der Überarbeitung der Dachfläche überprüft werden, ob ggf. feuchteempfindliche Baustoffe im Dachaufbau vorhanden sind, die durch den Verbleib des feuchten Dämmstoffes geschädigt werden könnten.

11. Zusammenfassung

Werden im Dachaufbau erhöhte Feuchtegehalte festgestellt, wird die grundsätzliche Gebrauchstauglichkeit der Dämmstoffe oft infrage gestellt. Mangels entsprechender Produktinformationen, die über die durch Feuchte veränderten Eigenschaften Auskunft geben könnten, wird häufig entschieden, die Dämmstoffe auszutauschen. Das ist mit einem großen Entsorgungsaufwand, hohen Kosten eines neuen Dachaufbaus und Risiken während der Modernisierung für den Zeitraum zwischen Abnehmen und neue Aufbringen einer gebrauchstauglichen Abdichtung verbunden. Heute übliche Dämmstoffe aus Schaumkunststoffen haben bei oft in Dächern anzutreffenden Feuchtigkeitsgehalten entweder keinen oder nur einen geringen Verlust der Druckfestigkeit. Bei Mineralwollen hoher Rohdichte konnten allerdings keine positiven Langzeiterfahrungen zu stark feuchten Dämmschichten dokumentiert werden.

Der Forschungsbericht fasst praktische Erfahrungen mit dem Erhalt feuchter Dämmschichten zusammen und gibt die Ergebnisse von Labormessungen wieder, welche einen ersten Anhaltspunkt darstellen können, um die aktuellen Zuschläge auf die Werte der Wärmeleitfähigkeit bei Feuchtigkeit in Dämmstoffen gemäß [DIN EN ISO 10456:2010-05] orientierend zu überprüfen.

Neben der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären Temperaturbedingungen, wurden in einem Laborversuch an den gleichen Materialien auch Wärmeströme auf der Innen- und Außenseite unter instationären Temperaturbedingungen gemessen, welche einen typischen Tagesgang der Temperatur an einer Flachdachkonstruktion repräsentieren sollen. Die so ermittelten mittleren Wärmeströme und mittleren Temperaturen auf der Warm- und Kaltseite wurden anschließend zu einem Wert der Wärmeleitfähigkeit verrechnet und mit den Messwerten aus der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären Temperaturbedingungen verglichen.

Durch die Auswertung von ca. 100 Mitteilungen aus einer Umfrage unter ca. 1.400 öffentlich bestellten und vereidigten Sachverständigen für Schäden an Gebäuden sowie des Dachdeckerhandwerks wurden Praxiserfahrungen gesammelt. In den letzten 10 Jahren hatten etwa ein Drittel der Sachverständigen, die geantwortet hatten, insgesamt 182 Fälle mit feuchten Dämmstoffen in Dachaufbauten zu bearbeiten. An 8 % dieser Fälle waren nach der Überarbeitung der Abdichtung weitere Feuchteschäden aufgetreten. Die Schadensursachen lagen zum Teil in weiteren, bislang unentdeckten bzw. nicht abgedichteten Leckstellen sowie in Fehlern bei der Erstellung der neuen Abdichtung mit und ohne Zusatzdämmung. Der Verbleib der Dämmstoffe war in keinem der Fälle schadensursächlich. Sicherlich werden Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von eingebauten Teilen zu untersuchen sein, die durch eine dauerhafte Feuchtigkeit geschädigt werden könnten. Unter der Voraussetzung geeigneter Randbedingungen, die im Bericht beschrieben werden, spricht sonst nichts gegen den Erhalt feuchter Dämmschichten.

Die Labormessungen unter stationären Bedingungen haben gezeigt, dass die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten zum Teil gegenüber den rechnerisch zu ermittelnden Werten abweichen. Bei EPS und XPS wurden die anhand der Feuchtezuschlagskoeffizienten der [DIN EN ISO 10456:2010-05] ermittelbaren Wärmeleitfähigkeiten bestätigt. Bei PUR war die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit geringer als berechnet. Bei Mineralwolle hoher Rohdichte lagen die Wärmeleitfähigkeiten teilweise deutlich über den rechnerisch ermittelbaren und bildeten einen degressiven Verlauf statt eines exponentiell-progressiven. Insbesondere beim letztgenannten Dämmstofftyp sollten die Feuchtezuschläge der Norm differenziert werden. Für praktische Abschätzungen in aktuellen Fällen können die gemessenen Laborwerte jedoch als Maßstab herangezogen werden. Der Bericht enthält dazu Diagramme und Tabellen sowie Praxisempfehlungen zur Ermittlung der Feuchtegehalte und Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen.

Die Auswertung der Wärmestromverläufe sowohl bei der stationären Messung wie auch der instationären Messung zeigt, dass die Feuchtetransportvorgänge in Dämmstoffen auch heute noch nicht ausreichend erforscht sind und noch nicht rechnerisch beschrieben werden können.

So zeigen die Untersuchungen unter instationären Randbedingungen, bei denen auf der Kaltseite der Wärmedämmung ein typischer Tagesdurchgang im Winter angelegt wurde, dass an der Kalt- bzw. Oberseite der Dämmung der Wärmestromverlauf bei auf der Außenseite ansteigenden Temperaturen aufgrund der thermischen Trägheit der Dämmschicht zunächst ein Wärmestrom von der Kaltseite in die Dämmung hinein zu verzeichnen ist, der sich erst ab der zweiten Tageshälfte mit fallenden Temperaturen wieder umkehrt. Außerdem weist der Wärmestromverlauf darauf hin, dass im Randbereich des Dämmstoffs zur Außenseite hin, neben dem Wärmeenergiegewinn (von der Außen- zur Innenseite des Dämmstoffs) durch die Schmelzwärme auch beim Gefrieren der in den Außenschichten des Dämmstoffs enthaltenen Feuchte ein deutlicher Wärmeenergieverlust (von der Innen- zur Außenseite des Dämmstoffs) aufgrund der Kristallisationswärme entsteht. Die genannten Effekte sind aller Voraussicht nach auch mit ein Grund für die Unterschiede zwischen den unter stationären und instationären Temperaturverhältnissen ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerten, die auch vom Dämmstofftyp und dem jeweiligen Feuchtegehalt abhängen. So sind die unter instationären Temperaturverhältnissen ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerte bei dem eher diffusionsoffenen Hartschaumstoff EPS höher als die unter stationären Temperaturverhältnissen ermittelten Werte, während bei den eher diffusionsdichteren Hartschaumstoffen (XPS, PUR) die Verhältnisse umgekehrt erscheinen. Bei dem Mineralwollgedämmstoff sind die Unterschiede quantitativ am deutlichsten, aber qualitativ uneinheitlich ausgeprägt. Inwieweit es sich hierbei um messtechnische Artefakte oder um valide Effekte, bspw. aufgrund von thermischen Ein- und Ausspeichervorgängen handelt, sollte in weiteren Untersuchungen geklärt werden und könnte perspektivisch zur Entwicklung praxisgerechterer Feuchtezuschlagsfaktoren und eines instationären Bemessungsmodells beitragen. Die Beschreibung des Feuchtetransports alleine aufgrund einer konstanten Diffusionsstromdichte, die durch den s_d -Wert beschrieben wird, reicht nicht aus, um die gemessenen Wärmestromverläufe zu erklären. Daher sind noch immer weitere Untersuchungen erforderlich, auch wenn die im Bericht beschriebenen Untersuchungen bereits praktische Hilfestellungen bieten.

12. Ausblick

12.1 Weiterer Untersuchungsbedarf zu bauphysikalischen Kennwerten

Folgende Fragen sind zu den Feuchtetransportvorgängen in Dämmstoffen weiter zu untersuchen:

- Welche Feuchtegehalte weisen Dämmstoffe im „trockenen“ Zustand auf, d. h., bei den den Wärmeleitfähigkeitsmessungen zugrundeliegenden Norm-Klimabedingungen?
- Wie laufen (zyklische) Feuchtetransportvorgänge in Dämmstoffen unter baupraktischen Randbedingungen ab?
- Welche Feuchtetransportkoeffizienten müssen in hygrothermischen Berechnungen implementiert werden, um Feuchte- und Wärmeströme in Dämmstoffen präziser beschreiben zu können?
- Der Wärmestromanteil, der durch Kondensations- und Kristallisationswärme bei nicht durch eine Zusatzdämmung abgedeckten, feuchten Dämmstoffen „verloren“ geht, lässt sich durch die heute üblichen Messverfahren der Wärmeleitfähigkeit nicht ermitteln. Die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit unter stationären und instationären Temperaturbedingungen führt dementsprechend zu unterschiedlichen Ergebnissen. Wie kann dieser Effekt quantifiziert und durch ein praxisgerechteres Modell zur Ermittlung von Feuchtezuschlagsfaktoren beschrieben werden?

12.2 Anreize zum Erhalt feuchter Dämmstoffe

Anreize zum Erhalt von feuchten Dämmschichten könnten z. B. durch die [EnEV 2014] Energieeinsparverordnung gesetzt werden, wenn der Zusammenhang zwischen Feuchte und Wärmeleitfähigkeit thematisiert wird. In die [EnEV 2014] sollte ein Hinweis auf die aktuelle Quantifizierungsmöglichkeit der Wärmeleitfähigkeiten feuchter Dämmstoffe aufgenommen werden und eine zu beachtende Empfehlung, die Gebrauchstüchtigkeit alter Dämmstoffe vor einer Instandsetzungs- bzw. Modernisierungsentscheidung zu quantifizieren.

In den Regelwerken des Dachdeckerhandwerks sollte eine entsprechende Empfehlung zur Beibehaltung feuchter Dämmschichten aufgenommen werden.

Dabei sollten Bagatellgrenzen quantifiziert werden, bei denen ein Durchfeuchtungsgrad keinen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat.

12.3 Herstellerangaben

Hersteller sollten Angaben zum produktionsbedingten Feuchtegehalt der Dämmstoffe und zur Wasseraufnahme bei *Kurzzeitigem Eintauchen* veröffentlichen, um Messungen des Feuchtegehalts bei Praxisfällen besser einordnen zu können.

Die zusätzliche, freiwillige Herstellerangabe zu Rohdichten von Dämmstoffen ermöglicht eine baustellengerechte, schnelle Abschätzung des volumenbezogenen Feuchtegehalts und trägt zur statistischen Validierung der Werte bei. Daher sollten Hersteller diese zusätzlichen Angaben bereitstellen.

12.4 Nachhaltigkeit und Energieeinsparung

Durch den Erhalt feuchter Dämmschichten können nicht nur die Vorteile der Dämmstoffe einer langen Nutzungsdauer und damit einer höheren Nachhaltigkeit ausgeschöpft werden, sondern auch die eingesparten Aufwendungen in effizientere Wärmeschutzmaßnahmen investiert werden, was unmittelbar zur weiteren Reduktion von CO₂-Emissionen führt.

13. Literaturverzeichnis

13.1 Fachbücher, Fachaufsätze und sonstige Veröffentlichungen

[Achtziger/Cammerer 1984]

Achtziger, J.; Cammerer, J.: Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen, Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Gräfelfing 1984, IRB-Verlag Nr. F 1988

[Achtziger/Hoffmann 1990]

Achtziger, J.; Hoffmann, H.: Weiterverwendung ursprünglicher Dachaufbauten – Festigkeitseigenschaften feuchter Dämmstoffe als Beurteilungsgrundlage bei der Sanierung von Flachdächern, in: Das Dachdecker-Handwerk Heft 16/1990

[Achtziger/Cammerer/Korff 1991]

Achtziger, J.; Cammerer, J.; Korff, H.-K. (FIW): Sanierung durchfeuchteter Flachdächer unter Erhaltung vorhandener Wärmedämmschichten; Forschungsarbeit, gefördert durch den Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Gräfelfing 1991, IRB Verlag Stuttgart, Bericht F 2200

[Achtziger/Cammerer/Korff 1995]

Achtziger, J.; Cammerer, J.; Korff, H.-K. (FIW): Sanierung durchfeuchteter Flachdächer unter Erhaltung und Trocknung vorhandener Wärmedämmschichten; Forschungsarbeit, gefördert durch den Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Gräfelfing 1995

[AIBAU/FIW 2003]

Oswald, R.; Spilker, R. (AIBAU); Cammerer, F.-J. (FIW): Sanierung nicht genutzter Flachdächer unter Beibehaltung durchfeuchteter Dämmschichten und durch Aufbau einer zusätzlichen Dämmschicht aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum mit oberseitiger bahnenförmiger Abdichtung; Kurztitel: Flachdachsanierung über durchfeuchteter Dämmschicht; Forschungsvorhaben Nr. 12088 der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) „*Otto von Guericke*“, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 2003

[AIBAU/FIW 2012]

Oswald, R.; Spilker, R.; Abel, R.; Wilmes, K., (AIBAU); Cammerer, J., Treiber, G., Zimmermann, M. (FIW): Zustandsänderungen von Mineralwolledämmstoffen in Warmdachaufbauten bei Flachdächern infolge Feuchteintritt; Forschungsbericht des Aachener Instituts für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik gemeinnützige GmbH (AIBAU) in Kooperation mit dem Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München (FIW), gefördert vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung mit Mitteln der Zukunftsinitiative Bau und der Deutschen Rockwool GmbH & Co. OHG, Forschungsbericht Nr. F 2824, IRB-Verlag, Stuttgart, 2012

[AIBAU 2014]

Spilker, R.; Sous, S.; Oswald, R.; Zöller, M.: Zuverlässigkeit von Holzdachkonstruktionen ohne Unterlüftung der Abdichtungs- oder Decklage; Forschungsbericht des Aachener Instituts für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik gemeinnützige GmbH (AIBAU), gefördert vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, Bauforschung für die Praxis, Band 115, Fraunhofer Verlag Stuttgart, 2015

[Arndt 1998]

Arndt, H.: Instandsetzung von einschaligen Dächern mit feuchter Wärmedämmung, in: Bauwerksinstandsetzung gestern – heute – morgen, WTA-Schriftenreihe Heft 17, 55-68 (1998)

[Bangerter 1991]

Bangerter, H.: Das Verhalten von Mineralfaser-Dämmstoffen gegenüber Wasser, in: wksb Heft 29/1991

[BASF 2005]

Technische Information Styropor, Druckschrift 310 der BASF Plastics, Dezember 2005

[Buch 1969]

Buch, W.: Wärmedämmung von Dächern mit Hartschaum aus Styropor. Hrsg.: Informationszentrum Styropor, Carl-Bosch-Straße 38, 6700 Ludwigshafen, ca. 1969

[Cammerer 1995]

Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. 5. Auflage, Berlin

[Cammerer/Achtziger 1964]

Cammerer, C.; Achtziger, J.: Schätzungsweise Bestimmung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen, In: Chemie-Ingenieur-Technik, 36. Jahrgang 1964, Seite 493 - 496.

[Cammerer/Neumann 1983]

Cammerer, J.; Neumann, R.: Kommentar zu DIN 4108 Teil 1 bis 5; Beuth Kommentar, 1. Auflage 1983

[Dahmen 1990]

Dahmen, G.: Stimmt die Bauphysik des sanierten Daches? Kriterien zur Entscheidung der Frage Totalerneuerung oder zusätzlicher Dachaufbau, Vortrag beim TAKK-Seminar 10/90 – Die Sanierung alter Flachdächer am 31.10.1990

[DUD 2015]

Fachinformation: Sanierung von Flachdächern; Hrsg: Industrieverband Kunststoff-Dach- und Abdichtungsbahnen e.V. (DUD), www.die-kunststoffdachbahn.de, April 2017, Stand: Februar 2015

[Dt. Bauindustrie 2016]

Technischer Brief Nr. 11: Feuchte in Dämmsystemen; Bundesfachabteilung für Wärme-, Kälte-, Schall- und Brandschutz im Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., 10898 Berlin; Stand: 2016-05

[FIW 1985]

Cammerer, J., Achtziger, J.: Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen, In: Kurzberichte aus der Bauforschung, September 1985, Bericht Nr. 115

[Gausepohl/Gellert 1996]

Gausepohl, H.; Gellert, R. (Hrsg.): Polystyrol (Kunststoff-Handbuch 4). Carl Hanser Verlag, 1996

[Götze/Frank/Hardell/Mahel/Steiner 1992]

Götze, H.; Frank G.; Hardell, M.; Mahel, R.; Steiner, U.: Flachdächer beurteilen und instandsetzen – Schadensbilder, Ursachenermittlung, Instandsetzungsmöglichkeiten; Forschungsbericht im Auftrag des Ministeriums für Bauen und Wohnen des Landes NRW, LBB NRW 2.16-1992

[Hohwiller 2003]

Hohwiller F. H.: Flachdach – Abriss oder Substanzerhaltung; In: Deutsche Bauzeitschrift DBZ Heft 10/2003

[IBP/FIW 2014]

Zirkelbach, D.; Stöckl, B.; (IBP) Albrecht, W. (FIW): Abschätzung der Feuchtezuschläge auf die Wärmeleitfähigkeit von Umkehrdachdämmungen auf Basis von Objektuntersuchungen und hygrothermischen Berechnungen; Forschungsbericht, Fraunhofer IRB-Verlag Stuttgart 2014

[IVPU 2008]

Wärmedämmstoffe aus Polyurethan; Herstellung – Anwendung – Eigenschaften, Hrsg.: IVPU – Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V., www.daemmt-besser.de, Februar 2008

[IVPU 2017]

Polyurethan-Hartschaum, Eigenschaften, Hrsg.: IVPU –Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V., www.ivpu.de, 2017

[Joos 2011]

Joos, A.: Untersuchungen des mit Phasenwechsel verbundenen instationären Transports von Wasser in Isolierungen; Dissertation an der Technischen Universität Hamburg-Harburg 2011

[Krischer 1962]

[Krischer, O.: Vergleichsversuche zur Bestimmung der Wärmeleitzahl von Baustoffen mit Hilfe eines Kurzzeitverfahrens; In: Berichte aus der Bauforschung 23 (1962), S. 58 - 64

[Künzel 1980]

Künzel, H.: Untersuchungen und Überlegungen zur Frage des „praktischen Feuchtegehaltes“ von Baustoffen, Untersuchung der Außenstelle Holzkirchen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik im Auftrag der Stiftung für Forschungen im Wohnungs- und Siedlungswesen, Berlin. Holzkirchen 28.07.1980

[Künzel 1988]

Künzel, H.M.: Das Verhalten von Mineralfaserdämmstoffen gegenüber Wasser; in wksb Heft 25/1988

[Künzel 1991]

Künzel, H.M.: Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit bei hygroskopischen und nicht hygroskopischen Stoffen, wksb Heft 29/1991

[Künzel 2011]

Künzel, H. M.: Einfluss der Feuchte auf die Wärmedämmwirkung; Vortrag beim Fachsymposium „*Dämmstoffe – Neue Erkenntnisse und Messmethoden*“, am 11.10.2011 beim Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, Oktober 2011

[Ochs/Stumpp/Mangold/Heidemann/Müller-Steinhagen 2004]

Ochs, F.; Stumpp, H.; Mangold, D.; Heidemann, H.; Müller-Steinhagen, H.: Bestimmung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, Beitrag zum 14. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, 12.-14.05.2004, www.itw.uni-stuttgart.de/publikationen

[Oswald 2005]

Oswald, R.: Voruntersuchungen bei Dachinstandsetzungen; Artikel in der Reihe „Schwachstellen“, db, Heft 5/2005

[Oswald/Rojahn 2005]

Oswald, R.; Rojahn, H.: Verschlechterung des Wärmeschutzes der Umkehrdachdämmung durch ein mangelhaftes Entwässerungskonzept, In: Schäden an genutzten Flachdächern; Schadenfreies Bauen, Band 35. Günter Zimmermann, Ralf Ruhnau (Hrsg.), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2005 06

[Pfeifer 2013]

Pfeifer, H.: Wasseraufnahme von Polystyrol-Dämmstoff; Artikel vom 30. Oktober 2013, www.bau-sv.de/Fachthemen

[Rockwool 2017]

Sanierung von Flachdächern; Hrsg.: Deutsche Rockwool Mineralwolle GmbH & Co. KG, Ausgabe 11/2017

[Schild/Rogier/Lamers/Oswald/Schnapauff 1984]

Schild, E.; Rogier, D., Lamers, R., Oswald, R., Schnapauff, V.: Nachbesserung von Flachdächern – Wärmeschutz, Abdichtung; Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, RWTH Aachen 1984

[Schild/Willems 2011]

Schild, K.; Willems, W.: Wärmeschutz. Grundlagen – Berechnung – Bewertung. 1. Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

[Schubert 1989]

Schubert, Reinhard: Austrocknung durchfeuchteter Flachdächer; in: Das Dachdeckerhandwerk, Heft 13/1989

[Sprengard/Spitzner 2011]

Sprengard, C.; Spitzner, M.: Untersuchungen zu Alterung und Wärmebrücken bei Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) für Bauanwendungen. Bauphysik 33 (2011), Heft 4, Verlag Ernst und Sohn, Berlin

[Swisspor 2000]

Swisspor Planungsgrundlagen, Stand 9/2000, www.swisspor.ch

[vdd 2017]

Technische Regeln – abc der Bitumenbahnen – Instandhaltung, Hrsg.: vdd Industrieverband Bitumen-Dach- und Dichtungsbahnen e. V., Frankfurt/Main, www.derdichtebau.de, 6. Auflage November 2017

[Zapke, 2000]

Zapke, W.: Umkehrdach eines Schulzentrums – Hoher Feuchtegehalt der Extruderschaumplatten; Bauschäden-Sammlung, Band 8. Günter Zimmermann (Hrsg.), 3., unveränd. Aufl., Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2000, Dächer

13.2 Normen, Richtlinien und Verordnungen

[DIN 4108-04:2017-03]

DIN 4108: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, Ausgabe März 2017

[DIN 4108-10:2015-12]

DIN 4108: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe, Ausgabe Dezember 2015

[DIN 18531:2017-07]

Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen (Normenreihe),, Ausgabe Juli 2017

[DIN 18531-1:2017-07]

DIN 18531: Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen – Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze, Ausgabe Juli 2017

[DIN 18531-2:2017-07]

DIN 18531: Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen – Teil 3: Nicht genutzte und genutzte Dächer – Stoffe, Ausgabe Juli 2017

[DIN 18531-3:2017-07]

DIN 18531: Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen – Teil 3: Nicht genutzte und genutzte Dächer – Auswahl, Ausführung und Details, Ausgabe Juli 2017

[DIN 18531-4:2017-07]

DIN 18531: Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen – Teil 4: Nicht genutzte und genutzte Dächer - Instandhaltung, Ausgabe Juli 2017

[DIN 31051:2012-09]

DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung, Ausgabe September 2012

[DIN 52611-1:1991-01]

DIN 52611: Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes von Bauteilen; Prüfung im Laboratorium, Ausgabe Januar 1991 (Dokument ist zurückgezogen)

[DIN 52612-1:1979-09]

DIN 52612: Wärmeschutztechnische Prüfungen – Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät – Teil 1. Durchführung und Auswertung, Ausgabe September 1979

[DIN EN 1609:2013-05]

DIN EN 1609: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen — Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem teilweisem Eintauchen, Ausgabe Mai 2013

[DIN EN 1934:1998-04]

DIN EN 1934: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Messung des Wärmedurchlasswiderstandes; Heizkastenverfahren mit dem Wärmestrommesser – Mauerwerk, Ausgabe April 1998

[DIN EN 1991-1:2010-12]

DIN EN 1991: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau, Ausgabe Dezember 2010

[DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12]

DIN EN 1991/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau, Ausgabe Dezember 2010

[DIN EN 12087:2013-06]

DIN EN 12087: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen — Bestimmung der bei langzeitigem Eintauchen, Ausgabe Juni 2013

[DIN EN 12088:2013-06]

DIN EN 12088: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasseraufnahme durch Diffusion, Ausgabe Juni 2013
(Vorgängerversion: 1997-08)

[DIN EN 12664:2001-05]

DIN EN 12664: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät; Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand; Ausgabe Mai 2001

[DIN EN 12667:2001-05]

DIN EN 12667: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät; Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Ausgabe Mai 2001

[DIN EN 12939:2001-02]

DIN EN 12939: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät; Dicke Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Ausgabe Februar 2001

[DIN EN 13162:2015-04]

DIN EN 13162: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) Spezifikation, Deutsche Fassung EN 13162:2012+A1:2015, Ausgabe April 2015

[DIN EN 13163:2017-02]

DIN EN 13163: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) - Spezifikation, Ausgabe Februar 2017

[DIN EN 13164:2015-04]

DIN EN 13164: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS) - Spezifikation, Ausgabe April 2015

[DIN EN 13165:2016-09]

DIN EN 13165: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyurethan-Hartschaum (PU) - Spezifikation, Ausgabe September 2016

[DIN EN 13166:2016-09]

DIN EN 13166: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Phenolharzschäum (PF) - Spezifikation, Ausgabe September 2016

[DIN EN 13167:2015-04]

DIN EN 13167: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Schaumglas (CG) - Spezifikation, Ausgabe April 2015

[DIN EN 13168:2015-04]

DIN EN 13168: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzwolle (WW) - Spezifikation, Ausgabe April 2015

[DIN EN 13169:2015-04]

DIN EN 13169: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Bläherlit (EPB) - Spezifikation, Ausgabe April 2015

[DIN EN 13170:2015-04]

DIN EN 13170: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Kork (ICB) - Spezifikation, Ausgabe April 2015

[DIN EN 13171:2015-04]

DIN EN 13171: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) - Spezifikation, Ausgabe April 2015

[DIN EN 13172:2012-04]

DIN EN 13172: Wärmedämmstoffe - Konformitätsbewertung, Ausgabe April 2012

[DIN EN 15026:2007-07]

DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation

[DIN EN ISO 6946:2018-03]

DIN EN ISO 6946: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren, Ausgabe März 2018

[DIN EN ISO 6946:2008-04]

DIN EN ISO 6946: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren, Ausgabe April 2008

[DIN EN ISO 7345:1996-01]

DIN EN ISO 7345: Wärmeschutz, Physikalische Größen und Definitionen, Ausgabe Januar 1996

[DIN EN ISO 7345:2017-05, Entwurf]

DIN EN ISO 7345: Wärmeverhalten von Gebäuden und Baustoffen - Physikalische Größen und Definitionen, Ausgabe Mai 2017 (Entwurf)

[DIN EN ISO 9346:2008-02]

DIN EN ISO 9346: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden und Baustoffen - Physikalische Größen für den Stofftransport - Begriffe, Ausgabe Februar 2008

[DIN EN ISO 10456:2010-05]

DIN EN ISO 10456: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (Vorgängerversion: 2000-08)

[DIN EN ISO 12570:2013-09]

DIN EN ISO 12570: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur, Ausgabe September 2013 (aktuell liegt eine Entwurfsfassung vom Dezember 2017 vor)

[DIN EN ISO 12572:2017-05]

DIN EN ISO 12572: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß, Ausgabe Mai 2017

[E DIN EN ISO 16535:2017-12]

Entwurf DIN EN ISO 16535: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasseraufnahme bei langfristigem Eintauchen, Entwurf Dezember 2017

[E DIN EN ISO 16536:2017-12]

Entwurf DIN EN ISO 16536: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasseraufnahme durch Diffusion, Entwurf Dezember 2017

[E DIN EN ISO 29767:2017-12]

Entwurf DIN EN ISO 29767: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzfristigem teilweisem Eintauchen, Entwurf Dezember 2017

[EnEV 2014]

Verordnung über energieeinsparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden – Energieeinsparverordnung (EnEV) - Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013

[Flachdachrichtlinie 2016]

Fachregel für Abdichtungen – Flachdachrichtlinie; Hrsg.: Zentralverband des Dt. Dachdeckerhandwerks (ZVDH), Köln, Stand: 2016-12

[ISO 8301:1981-08]

ISO 8301: Wärmeschutz; Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes und verwandter Eigenschaften; Verfahren mit dem Wärmestrommessplatten-Gerät, Ausgabe August 1981

[ISO 8302:1991-08]

ISO 8302: Wärmeschutz; Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes und verwandter Eigenschaften; Verfahren mit dem Plattengerät, Ausgabe August 1991

[ISO 9869-1:2014-08]

ISO 9869-1 Wärmeschutz - An der Verwendungsstelle durchgeführte Messung des Wärmewiderstandes und der Wärmeübertragung - Teil 1: Heizkostenverfahren mit dem Wärmestrommesser Ausgabedatum 2014-08

[ISO 10051:1996-04]

ISO 10051: Wärmeschutz - Feuchteinfluß auf den Wärmetransport - Stofftransport durch thermische Einwirkung Ausgabedatum 1996-04

[VDI 2055-1:2008-09]

VDI 2055: Wärme und Kälteschutz von Betriebstechnischen Anlagen – Teil 1: Berechnungsgrundlagen Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, September 2008

[VDI 2055-2:20013-10]

VDI 2055: Wärme und Kälteschutz von Betriebstechnischen Anlagen – Teil 2. Technische Grundlagen der Überprüfung der Eigenschaften von Dämmstoffen Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Oktober 2013

[VDI 2055-3:2011-10]

VDI 2055: Wärme und Kälteschutz von Betriebstechnischen Anlagen – Teil 3: Technische Grundlagen zur Überprüfung der wärmetechnischen Eigenschaften von Dämmsystemen, Ermittlung von Gesamtwärmeverlusten Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Oktober 2011 mit Berichtigung 1 von 2012-04

[VDI 6200:2010-02]

VDI 6200: Standsicherheit von Bauwerken – Regelmäßige Überprüfungen; Hrsg.: Verband Deutscher Ingenieure; Ausgabe Februar 2010

[WSVO 1995]

Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung WärmeschutzVO) vom 16.08.1994, gültig ab 1.1.1995