



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München

# MITTEILUNGEN

Reihe I:

Allgemeine Fragen des Wärme- und Kälteschutzes

## EXTREME BEANSPRUCHUNGEN und deren Auswirkungen auf die Wärmedämmwirkung von Dämmstoffen

Dipl.-Ing. Roland Schreiner

Sonderdruck aus

**Isoliertechnik,**

Lambda-Verlag GmbH, Gars

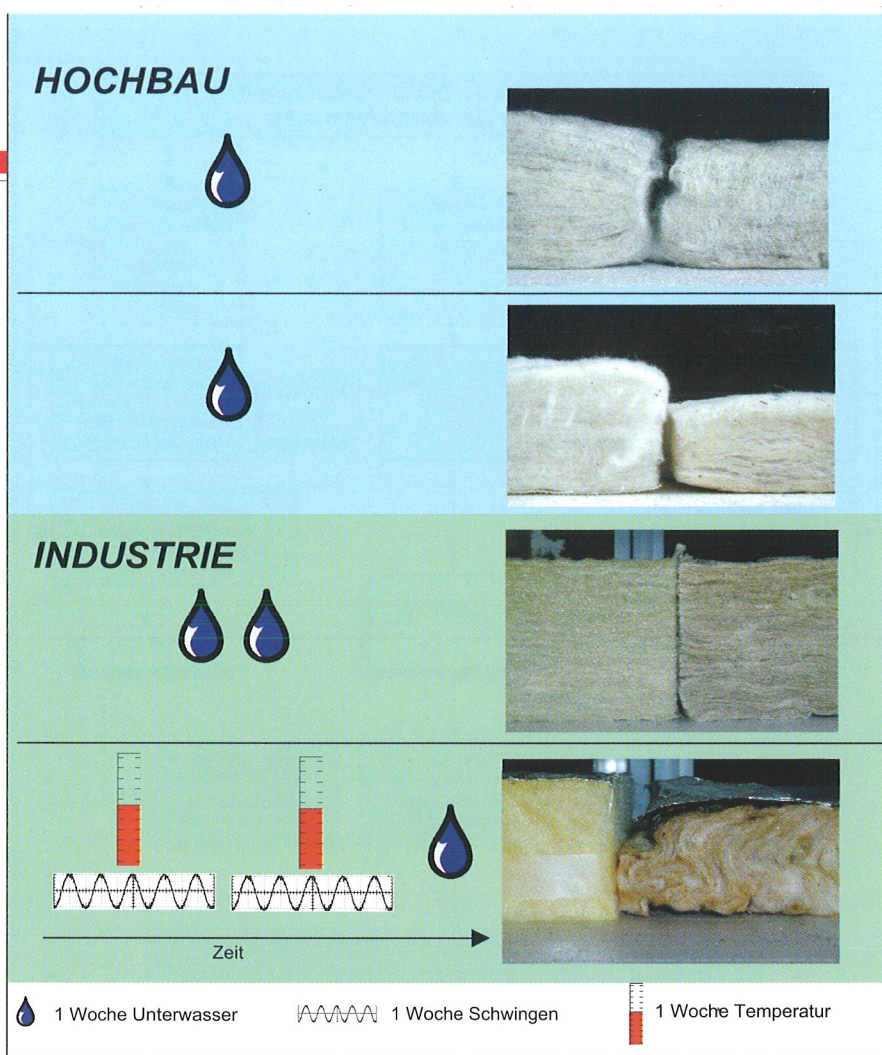
27. Jahrgang, Heft 6/2001, S. 6-14





**Bild 1: Beschaffenheit nach unterschiedlichen Beanspruchungen von Dämmstoffprodukten.**

Links: Probe vor der Beanspruchung, rechts: nach der Beanspruchung.



DÄMMSTOFFE

# Extreme Beanspruchungen

## und deren Auswirkungen auf die Wärmedämmwirkung von Dämmstoffen

VON DIPL.-ING. ROLAND SCHREINER

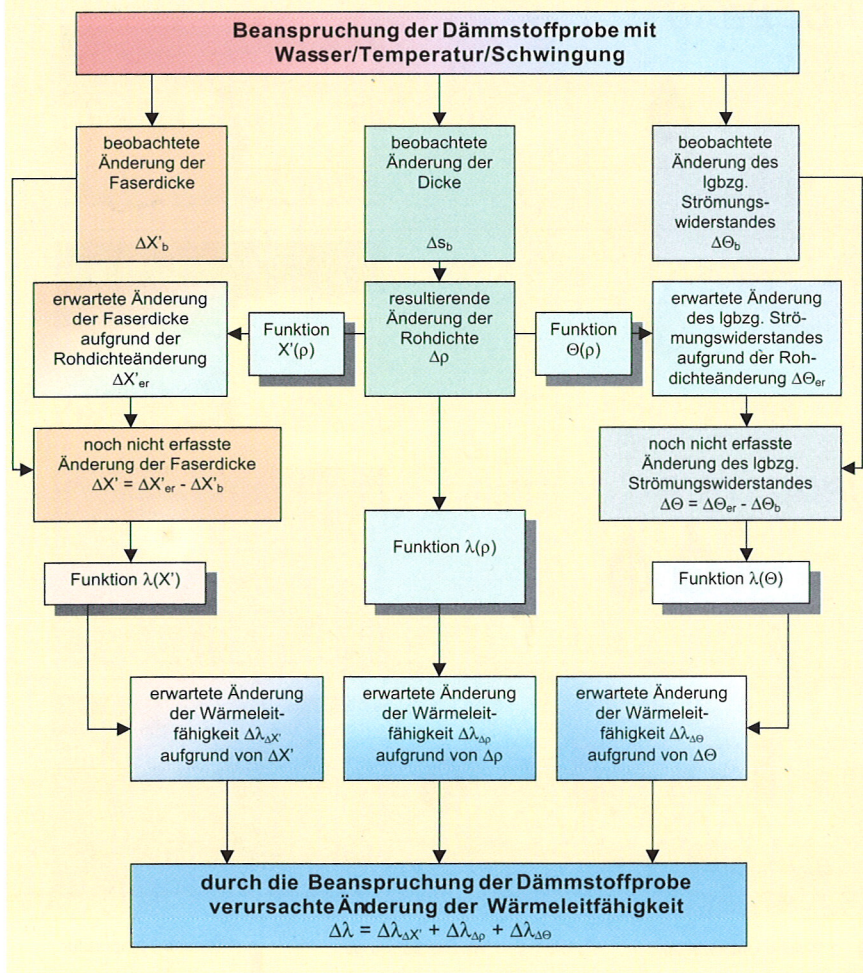
**Durch extrem veränderte klimatische Randbedingungen im Anwendungsfall, wie z. B. Auftreten von Wasser, überhöhte Temperatur oder Schwingbeanspruchungen, ist mit einer Verminderung der Wärmedämmwirkung von Dämmstoffprodukten zu rechnen.**

Im Rahmen einer mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AIF, Köln) geförderte Forschungsarbeit wurden verschiedene Dämmstoffe solchen extremen Bedingungen ausgesetzt.

### Beurteilung der Wärmedämmwirkung von Dämmstoffen

Handelt es sich um extreme Beanspruchungen für ein Dämmpro-

dukt, so stellt sich die Frage nach einer noch funktionsfähigen Dämmung oder ob man schon von einem „Schadensfall“ sprechen kann. Veränderte klimatische Randbedingungen können bei einem Dämmstoff dazu führen, dass sich die Dämmdicke verringert oder sich Strukturänderungen einstellen. Gekoppelt mit einer Dämmdickenänderung ist eine daraus resultierende Änderung der Rohdichte. Modifikationen der Faserstruktur und der Rohdichte eines



**Bild 2: Theoretische Auswirkung von beobachteten Änderungen in Faserstruktur und Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen.**

Eigenschaftsprofil der Dämmprodukte müssen deren Eigenschaften im Lieferzustand vor der physikalischen Belastung bekannt sein. Die wesentlichen physikalischen Größen zur Bestimmung des Eigenschaftsprofils der Dämmprodukte sind die Lieferdicke  $s$ , die Rohdichte  $\rho$ , die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die Faserstruktur mit dem längenbezogenen Strömungswiderstand  $\Theta$  und der Faserdicke  $x'$ . Die Bestimmung der wichtigsten wärmeschutztechnischen Größe, der Wärmeleitfähigkeit, wurde mit Hilfe von indirekten Qualitätsmerkmalen durchgeführt.

Aus der Kombination der Belastungen Wasser und Schwingungen mit Temperaturbeaufschlagung ergeben sich für die technischen Dämmstoffprodukte drei unterschiedliche Beanspruchungsfälle. Die Unterwasserlagerung (A), das Schwingen der Probe unter Temperatureinwirkung (B) und das Schwingen mit Temperaturbeaufschlagung mit anschließender Unterwasserlagerung (C).

Bei den Dämmstoffprodukten für den Hochbau wurden auch drei Beanspruchungsfälle gewählt, die als typische Belastungen für das Eindringen von Wasser in den Dämmstoff angesehen werden können. Mit steigender Belastungsstärke ergeben sich die Ausgleichsfeuchte bei 23 °C und 80 % rel. Luftfeuchte (A), eine Durchnässung (B) und die Unterwasserlagerung von Proben (C).

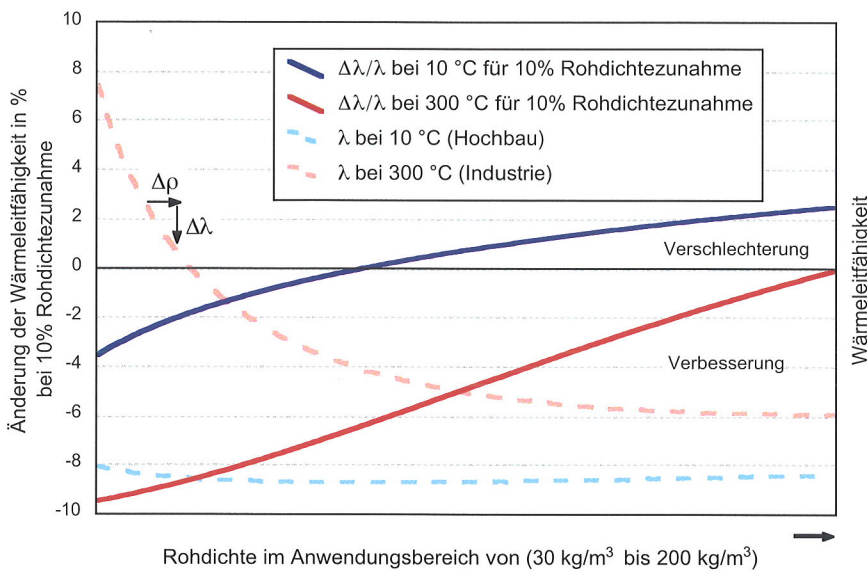
Dämmstoffes wirken sich auf die physikalische Kenngröße der Wärmeleitfähigkeit aus, denn die niedrige Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen ist vor allem durch die ruhende Luft in den durch Fasern oder Körnern eingeschlossenen Poren begründet. Die Faserstruktur und die Rohdichte beeinflussen dabei u. a. den Anteil der Strahlung an der Wärmeübertragung durch eine geänderte Strahlungsdurchlässigkeit der Dämmstoffe.

Betrachtet man nun als Zielgröße zur Beurteilung der Wärmedämmwirkung eines ebenen Dämmstoffproduktes den Wärmedurchlasswiderstand  $R = s / \lambda$ , so finden wir hier eine Abhängigkeit von der Dämmdicke  $s$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ .

Sind nun die Änderungen der Parameter Dämmdicke und Wärmeleitfähigkeit, die sich aufgrund der Beanspruchung des Dämmstoffes ergeben haben, bekannt, so kann eine Aussage über die Auswirkung auf die Wärmedämmwirkung erfolgen.

### Beanspruchung der Dämmstoffe

Differenziert nach Produkten für den Hochbau und für betriebstechnische Anlagen wurde der Einfluss von anwendungsbezogenen Beanspruchungen auf das Eigenschaftsprofil der Dämmprodukte untersucht. Da die Anforderungen an die Dämmprodukte im Hochbau andere sind als für technische Produkte, wurden für die geplanten Beanspruchungen der Dämmprodukte anwendungsspezifische Prüfpläne erstellt. Als Belastungen wurden Kombinationen aus Wasser-, Schwing- und Temperatureinwirkung vorgesehen. Bei jedem Beanspruchungsfall wurden die Proben ca. eine Woche lang belastet. Bei den technischen Dämmprodukten wurde aufgrund der allgemeinen höheren Beständigkeit der Dämmstoffe eine weitere Beanspruchungswoche vorgesehen. Bild 1 zeigt die Beschaffenheit nach den unterschiedlichen Beanspruchungen für ausgewählte Dämmstoffproben. Für die Beurteilung der Auswirkungen der geprüften Beanspruchungen auf das



**Bild 3: Änderung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffprodukten bei einer 10 %-igen Rohdichtezunahme (Hochbau und Industrie).**

### Wärmeleitfähigkeit, Faserstruktur und Rohdichte

Um die Änderung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der durchgeführten Beanspruchungen der Dämmstoffe mit Wasser, Temperatur und Schwingung zu ermitteln, wurden die grundlegenden Zusammenhänge zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Faserstruktur sowie der Rohdichte entwickelt (Bild 2). Die Faserstruktur ist repräsentiert durch den längenbezogenen Strömungswiderstand und die Faserdicke. Die Veränderungen der Rohdichte entstehen durch die beobachteten Dickenänderungen der Dämmstoffe. Für eine ganzheitliche Betrachtung der durch die durchgeführten Beanspruchungen der Dämmstoffe verursachten Änderungen der Wärmeleitfähigkeit dürfen die funktionellen Zusammenhänge der drei Parameter Faserdicke, Rohdichte und längenbezogener Strömungswiderstand mit der Wärmeleitfähigkeit nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Vielmehr müssen ausgehend von dem Einfluss der Rohdichte die hier noch nicht erfassten Einflüsse der Faserdicke und des längenbezogenen Strömungswiderstandes auf die Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden. Im weiteren wurden einige Entkoppelungen der verflochtenen Parameter vorge-

nommen. So wurde der Einfluss der Faserdicke auf die Wärmeleitfähigkeit nicht weiter untersucht und nur eine Signalwirkung bei beobachteten extremen Veränderungen der Faserdicke postuliert. Eine globale Betrachtung der Ergebnisse durch das Zusammenfassen aller untersuchten Proben in zwei Dämmstoffproduktgruppen, Dämmstoffe für den Hochbau und Produkte für industrielle Anwendungen, lässt auch noch eine Entkoppelung von Rohdichte und längenbezogenem Strömungswiderstand zu. Demnach konnten die nachfolgenden Auswertungen nur mit den funktionellen Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte und von dem längenbezogenen Strömungswiderstand durchgeführt werden.

### Die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte

Es liegen Messdaten vor, welche die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte  $\lambda(\rho)$  (Bild 3) im typischen Anwendungsbereich von 30 kg/m<sup>3</sup> bis 200 kg/m<sup>3</sup> für Dämmstoffprodukte im Hochbau (blau gestrichelt) und der Industrie (rot gestrichelt) beschreiben. Bei den technischen Dämmstoffprodukten wird als Referenzwert die Wärmeleitfähigkeit bei einer Temperatur von 300 °C

verwendet. Bei den Dämmstoffprodukten im Hochbau bezieht man sich auf eine Wärmeleitfähigkeit bei einer Temperatur von 10 °C. Beide Kurven besitzen ein Minimum der Wärmeleitfähigkeit bei einer bestimmten Rohdichte. Das Minimum der Wärmeleitfähigkeit für die technischen Dämmstoffprodukte liegt außerhalb des dargestellten Anwendungsbereiches der Rohdichte. Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit bei einer angenommenen Rohdichtezunahme von 10 % berechnet sich aus der Steigung der Funktion  $\lambda(\rho)$ .

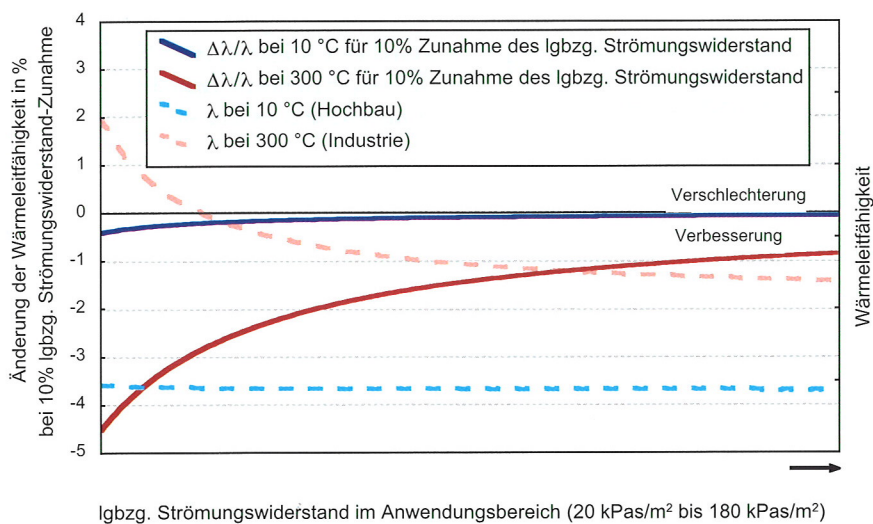
Steigung der Funktion  $\lambda(\rho)$ :

$$\lambda(\rho)' = \frac{d}{d\rho} \lambda(\rho)$$

Handelt es sich um eine endliche Änderung der Rohdichte von +10 %, dann kann mit dem Differentialquotienten gerechnet werden. Es ergibt sich die Änderung der Wärmeleitfähigkeit bei einer Rohdichtezunahme von 10 % in Abhängigkeit von der Rohdichte zu:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}(\rho) = \frac{\lambda(\rho)' \cdot 10\% \cdot \rho}{\lambda(\rho)} \text{ in \%}$$

Die technischen Dämmstoffprodukte zeigen bei den niedrigen Rohdichten eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit von ca. 10 %



**Bild 4: Änderung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffprodukten bei einer 10 %-igen Zunahme des längenbezogenen Strömungswiderstandes (Hochbau und Industrie).**

(rote durchgezogene Linie). Dieser positive Effekt verschwindet bei zunehmender Rohdichte. Für die Dämmstoffprodukte im Hochbau ist die Funktion als blau durchgezogene Linie dargestellt. Sie besitzt bei der Rohdichte, bei der die Wärmeleitfähigkeit minimal ist, ihren Nulldurchgang. Der Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit ist hier geringer als bei den Dämmstoffprodukten mit industrieller Anwendung. Es werden Verbesserungen der Wärmeleitfähigkeit bei den geringen Rohdichten und Verschlechterungen der Wärmeleitfähigkeit bei den hohen Rohdichten beobachtet. Der Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit durch andere prozentuale Änderungen der Rohdichte können in einem gewissen Rahmen linear umgerechnet werden. Verringerungen der Rohdichte werden durch umgekehrtes Vorzeichen berücksichtigt.

### Die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Faserstruktur

Um die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe von der Faserstruktur zu untersuchen, genügt eine Betrachtung des längenbezogenen Strömungswiderstandes, weil der Faserdicke als Einflussparameter nur eine Signalfunktion zugesprochen wird. Da die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des längenbezogenen Strö-

mungswiderstandes für beide Produktgruppen (Hochbau und Industrie) im Anwendungsbereich von 20 kPa/m<sup>2</sup> bis 180 kPa/m<sup>2</sup> abnehmend ist, ergibt sich für eine 10 %-ige Zunahme des längenbezogenen Strömungswiderstandes für alle untersuchten Dämmstoffprodukte eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit. Bei den Dämmstoffprodukten im Hochbau ist die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit allerdings sehr gering (Bild 4).

### Erwartete Veränderungen der Wärmedämmwirkung

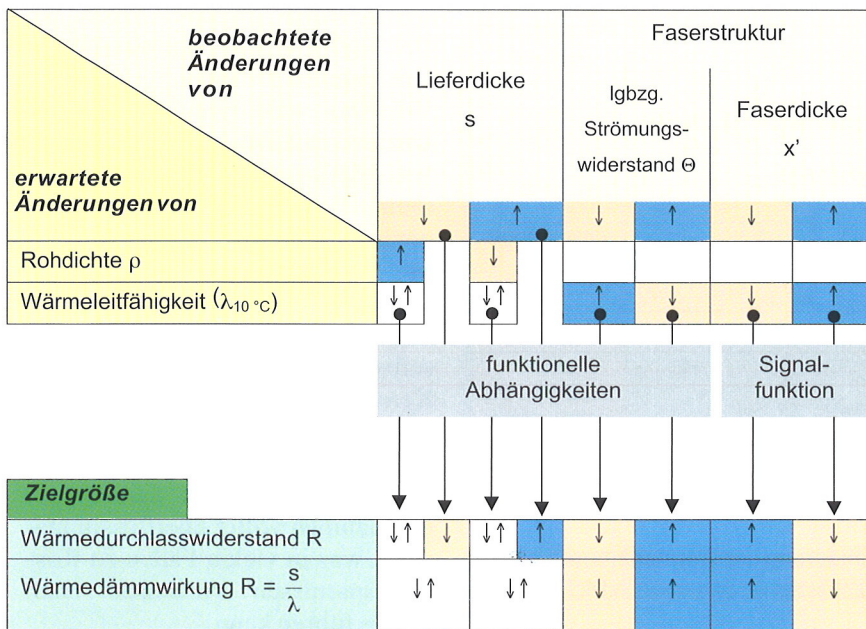
Modellhaft wird die Wirkung einer Änderung der Einflussgrößen Dämmdicke und Faserstruktur auf die Wärmedämmwirkung der Dämmprodukte im Hochbau dargestellt (Bild 5). Die Pfeile „nach unten“ bedeuten eine Verminderung der jeweiligen physikalischen Größe. Ein Pfeil „nach oben“ deutet auf eine Erhöhung des Wertes hin. Über die zu erwartenden Änderungen der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der durch Dickenänderungen hervorgerufenen Rohdichteänderungen können nur Aussagen erfolgen, wenn die Rohdichte bekannt ist, bei der die Wärmeleitfähigkeit des untersuchten Dämmstoffproduktes ihr Minimum besitzt (Bild 3). Der längenbezogene Strömungswiderstand wirkt sich auf die Wärmedämmwirkung pro-

portional aus. Das bedeutet, dass eine Erhöhung des Wertes auch die Dämmwirkung erhöht, wenn gleich der Einfluss hier bei den Dämmstoffprodukten im Hochbau gering ist (Bild 4). Die Faserdicke mit ihrer Signalfunktion wirkt über den Parameter Wärmeleitfähigkeit theoretisch indirekt proportional auf die Wärmedämmwirkung der Dämmstoffe ein. Kleinere Faserdicken lassen eine erhöhte Wärmedämmwirkung vermuten.

Bei den technischen Dämmstoffprodukten (Bild 6) zeigt sich ein ähnlicher Zusammenhang wie bei den Dämmstoffprodukten im Hochbau. Hier kann allerdings der negative Einfluss einer Dickenverminderung durch die Verbesserung der Wärmedämmwirkung aufgrund der Rohdichteerhöhung teilweise kompensiert werden. Des weiteren wirken sich die Änderungen des längenbezogenen Strömungswiderstandes auf die Wärmedämmwirkung deutlicher aus. Die Faserdicke besitzt hier nur eine Signalfunktion.

### Beobachtete Auswirkungen auf die Wärmedämmwirkung

Durch die entwickelten funktionellen Zusammenhänge (Bild 3 und Bild 4) ist für die zwei globalen betrachteten Dämmstoffproduktgruppen (Hochbau und Industrie) eine Abschätzung der maximalen



**Bild 5:** Erwartete Veränderung der Wärmedämmwirkung von Dämmstoffprodukten im Hochbau aufgrund von beobachteten Änderungen in Dicke und Faserstruktur.

Verschlechterungen oder Verbesserungen der Wärmedämmwirkung, die sich durch die jeweiligen Belastungsfälle ergeben, möglich (Bild 7). Bei den Dämmstoffprodukten im Hochbau wurde neben Dickenverminderungen auch eine Erhöhung der Dicke beobachtet, die aufgrund einer Quellung durch Feuchtigkeitseinwirkung verursacht wird. Der Rohdichtein-

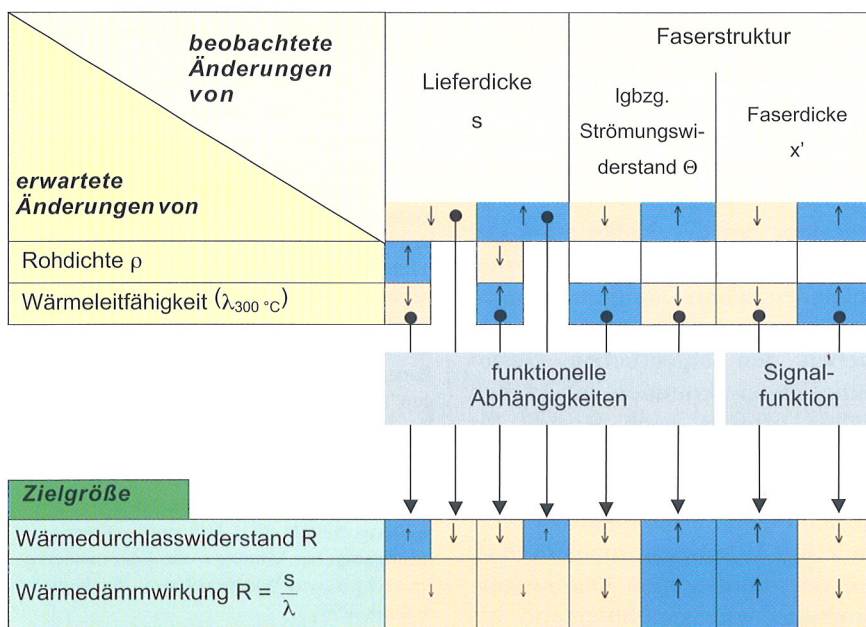
fluss auf die Wärmedämmwirkung stellt sich aufgrund des dargestellten funktionellen Zusammenhanges zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte uneinheitlich dar (Bild 3). Die Änderungen des längenbezogenen Strömungswiderstandes sind hier gering und somit auch der Einfluss auf die Wärmedämmwirkung. Es wurden Dämmstoffproben im Hochbau beobach-

tet, die durch die Beanspruchungen unverändert blieben. Es wurden aber auch Proben geprüft, die anschließend unbrauchbar waren, da sich der Wärmedurchlasswiderstand bis zu 80 % verschlechtert hatte.

Bei den technischen Dämmstoffprodukten überwogen nach den Beanspruchungen Proben, die deutliche Dickenverminderungen zeigten. Diese können aufgrund einer Rohdichteerhöhung die Wärmedämmwirkung verbessern (Bild 3). Somit kann der negative Einfluss der Dämmdickenverminderung auf den Wärmedurchlasskoeffizienten durch den positiven Effekt einer Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit durch eine Rohdichteerhöhung geschwächt werden. Hier wurde eine starke Änderung der Faserstruktur (längenbezogener Strömungswiderstand) beobachtet und somit konnte ein deutlicher Einfluss auf die Wärmedämmwirkung der Dämmstoffprodukte festgestellt werden. Bei den Dämmstoffprodukten für industrielle Anwendungen konnten nach den Beanspruchungen uneinheitliche Auswirkungen auf das wärmeschutztechnische Eigenschaftsprofil ermittelt werden. Neben nur leicht veränderten Proben lagen auch letztlich unbrauchbar gewordene Proben vor. Hier muss mit einer maximalen Verschlechterung des Wärmedurchlasswiderstandes von bis zu 60 % gerechnet werden.

Den Faserstrukturänderungen aufgrund veränderter Faserdicken konnten im Bezug auf die Wärmedämmwirkung der Dämmstoffe nur Signalfunktionscharakter zugesprochen werden. Man kennt zwar die theoretische Tendenz der funktionellen Zusammenhänge, kann aber keine quantitativen Aussagen treffen.

Für detaillierte Aussagen über die Funktionsfähigkeit einer Dämmung nach einer außergewöhnlichen Beanspruchung muss die direkte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Zweiplattenverfahren nach DIN 52612 / ISO 8302 für ebene Dämmstoffprodukte oder



**Bild 6:** Erwartete Veränderung der Wärmedämmwirkung von industriellen Dämmstoffprodukten aufgrund von beobachteten Änderungen in Dicke und Faserstruktur.

| Dämmstoff-<br>produkte<br>für              | Belastungsfall | Änderung<br>der Liefer-<br>dicke $s$<br>in % | Änderung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in %<br>für 10°C / 300°C |                                  |                     | Wärmedämm-<br>wirkung |  |
|--|----------------|--|--|----------------------------------|---------------------|-----------------------|--|
|  |                |  | erwartet durch Änderung  |                                  | gemessen<br>(*)     |                       |  |
|  |                |  | Rohdichte<br>$\rho$  | Faserstruktur<br>$\Theta$   $x'$ |                     |                       |  |
| HOCHBAU<br>$\lambda_{10^\circ\text{C}}$    | A              | -10 +10                                      | ±3   | 0 +1                             | Signal-<br>funktion | -                     | unverändert<br>bis<br>unbrauchbar<br>(bis -80%)      |
|  | B              | -1 +20                                       | ±7   | 0 +1                             |                     | -                     |  |
|  | C              | -60 +2                                       | ±20  | -2 +1                            |                     | ±2                    |  |
| INDUSTRIE<br>$\lambda_{300^\circ\text{C}}$ | A              | -10 +3                                       | -10 +3   | -5 +20                           | Signal-<br>funktion | +6                    | leicht<br>verändert bis<br>unbrauchbar<br>(bis -60%) |
|  | B              | -20 -5                                       | -20 0  | -10 +20                          |                     | -                     |  |
|  | C              | -20 -10                                      | -20 0  | +5 +40                           |                     | +10                   |  |

\*) Probenstruktur messtauglich

**Bild 7: Zusammenstellung der erwarteten Veränderung der Wärmedämmwirkung von Dämmstoffprodukten aufgrund von beobachteten Änderungen in Dicke und Faserstruktur (Hochbau und Industrie).**

das Rohrverfahren DIN 52613 / DIN EN ISO 8497 für Formprodukte herangezogen werden. Es konnten noch einige Prüfungen an beanspruchten Proben durchgeführt werden. Die Erwartungen an die Ergebnisse wurden bestätigt. Die gemessenen Änderungen der Wärmedämmwirkung blieben auf geringem Niveau, da nur noch messtaugliche Dämmstoffproben geprüft werden konnten.

### Zusammenfassung und praktische Bedeutung bei Störfällen

Als Beurteilungsgröße hinsichtlich einer Veränderung der Wärmedämmwirkung dient der Wärmedurchlasswiderstand. Dazu wurde das Eigenschaftsprofil der untersuchten Dämmstoffproben vor und nach den unterschiedlichen Belastungsfällen ermittelt. Eine beobachtete Änderung der Lieferdicke und der Faserstruktur lässt eine Aussage auf die zu erwartende Änderung des Wärmedurchlasswiderstandes zu. Bei den Dämmstoffprodukten im Hochbau konnten nur geringfügige Strukturänderungen beobachtet werden. Die Verringerung der Wärmedämmwirkung ist hier vor allem durch die Dickenverminderung begründet. Die technischen Dämmstoffprodukte zeigen bei den für ihre Anwendung relevanten Beanspruchungen eindeu-

tige Faserstrukturänderungen, die eine Verminderung der Wärmedämmwirkung verursachen.

Eine genaue Kenntnis über die Auswirkungen etwaiger Änderungen der Fasergeometrie oder des Gefüges von Dämmstoffprodukten auf die Wärmeschutzeigenschaft ist dann von hoher wirtschaftlicher Bedeutung für die Unternehmen der Dämmtechnik oder Betreiber von betriebstechnischen Anlagen, wenn Anlagen mit Temperaturen nahe der Klassifizierungstemperatur zu dämmen sind. Die Entscheidung, ob Dämmstoffe mit höheren Anwendungstemperaturen eingesetzt werden müssen oder ob zusätzliche konstruktive Maßnahmen erforderlich sind, ist in vielen Fällen ein nicht unwesentlicher Kostenfaktor bei der Kalkulation der Dämmkosten. Erhebliche Kosten entstehen, wenn Dämmungen nach Störfällen erneuert werden müssen. Neben den eigentlichen Gesteungskosten kommen in solchen Fällen oftmals noch Kosten für Produktionsausfall hinzu.

Aufgrund der durch die Beanspruchungsfälle uneinheitlich veränderten Wärmedämmeigenschaften der untersuchten Dämmstoffprodukte von gleichbleibend bis unbrauchbar entsteht bei einem Störfall das hohe Risiko eines Schadens am Dämmstoffprodukt

selbst sowie eventuell auch am Dämmobjekt. Für eine detaillierte Untersuchung eines konkreten Vorfalles wird man nicht umhin können, einen Gutachter von neutraler Stelle einzuschalten, der das räumliche Ausmaß des Schadens untersucht, eine Probenahme des in Mitleidenschaft gezogenen Dämmstoffes veranlasst und eventuell den Schaden am Dämmobjekt selbst feststellt. Eine genaue Kenntnis über die mögliche Wiederverwendbarkeit des Dämmstoffes nach einem etwaigen Störfall kann gegebenenfalls Sanierungsmaßnahmen völlig überflüssig machen, was in vielen Fällen zu Kostenersparnissen immensen Ausmaßes führen kann.

### Literatur

- Jansen, P.: „Temperaturverhalten und maximale Belastungsmöglichkeit von Mineralfaserdämmstoffen bis rund 1000 °C“; Brennstoff-Wärme-Kraft 26 (1974) Nr. 3, S. 95/101.
- Dietrichs, P., Krönert, W.: „Brenn- und Wärmeschwund, Wärmeleitfähigkeit und Anwendungsgrenzttemperaturen wärmedämmender Baustoffe“; Z. „neue“ Fachberichte, Hüttenpraxis, Metallverarbeitung, H. 11, Nov. 1975, S. 905/915.
- Zehendner, H.: „Verhalten von Mineralfaserdämmstoffen bei höheren Temperaturen“; Isolierung, Heft 2/80.
- Zehendner, H.: „Verhalten von Wärmedämmstoffen bei höheren Temperaturen und Ermittlung der oberen Anwendungsgrenzttemperatur“; Z. wksb Sonderausgabe 1985.
- Zeitler, M.: „Die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen bei höheren Temperaturen“; Z. Dämm-Technik Isolierung 2/1986.
- Zehendner, H.: „Wärmedämmstoffe für hohe Temperaturen – Anforderungen an Wärmeleitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit“; Z. wksb 25/1988.
- Albrecht, W.: „Die Anwendungsgrenzttemperatur von Mineralfaserdämmstoffen bei höheren Temperaturen“; Z.: Dämm-Technik Heft 4/88.
- Zehendner, H.: „Hochtemperatur-Isolierungen“; Z. Isoliertechnik 9/1.
- Royar, J.: „Masse muss nicht Klasse sein – Warum die Rohdichte von Mineralwolle-Dämmstoffen ein irreführendes Qualitätsmerkmal ist“; Z. Isoliertechnik 5/95.
- Willems-Schulz, G.: „Hot stuff – Temperaturangaben bei Mineralwolle-Dämmstoffen im technischen Wärmeschutz“; Z. Isoliertechnik 3/97.
- Schreiner R.: „Wärmedämmstoffe für hohe Temperaturen – Einfluss von Grund- und Zuschlagsstoffe“; Z. Isoliertechnik Jan./Feb. 98.