

Reihe IV:  
Wärmeschutz im Wohnungsbau

## Untersuchungen zu Alterung und Wärmebrücken bei Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) für Bauanwendungen

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard  
Dr.-Ing. Martin H. Spitzner



# Untersuchungen zu Alterung und Wärmebrücken bei Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) für Bauanwendungen

Der Artikel stellt u.a. umfangreiche Berechnungen zur Wärmebrückenproblematik am VIP-Rand dar, die im Rahmen eines Forschungsprojektes „Energetische und wirtschaftliche Optimierung von VIP-Paneelen“ durchgeführt wurden. Zusätzlich wird eine Vielzahl von Messwerten der Wärmeleitfähigkeit von VIP ausgewertet, die aus eigenen Untersuchungen und anderen Forschungsprojekten stammen, um die unterschiedlichen Temperaturlagerungen und Klimawechselprüfungen hinsichtlich des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit der Paneele zu vergleichen. Aus den Ergebnissen werden Hinweise für die Produktion der Paneele abgeleitet und die Rahmenbedingungen für den Einsatz günstigerer Stützkern aus Mineralfasern untersucht.

**Investigations into Ageing and Thermal Bridging in Vacuum Insulation Panels (VIP) for Construction Applications.** *The article describes inter alia extensive calculations for thermal bridging problems at the VIP edge, which were conducted as part of a research project entitled „Optimisation of the energy-related and commercial aspects of VIP panels“. In addition, a number of measurements of the thermal conductivity of VIP are evaluated. These measurements came from our own studies and other research projects, and the purpose of the evaluation is to compare the effects of different storage temperatures and climate-change tests on the increase in the thermal conductivity of the panels. Guidelines for the production of panels are derived from the results, and the conditions for the use of more economical mineral-fibre support cores are investigated.*

## 1 Grundlagen

### Vakuum-Isolations-Paneele

Ein VIP ist ein Wärmedämmelement, das aus einem druckstabilen Stützkern und einer Hülle besteht. Das druckstabile Füllmaterial – zurzeit meistens ein mikroporöses Pulver mit einem hohen Anteil an pyrogener Kieselsäure – ist ein offenporiges Material mit Verstärkungsfasern, was sich einfach evakuieren lässt. Dieser Kern wird zur einfacheren Verarbeitung, und aus Staubschutzgründen, in ein dünnes Polyestervlies eingepackt. Der Stützkern mit Vlies wird in eine vorbereitete Hülle aus Spezialfolie geschoben, evakuiert und die Hülle direkt in der Evakuierpresse verschweißt. Neben pyrogener Kieselsäure kommen offenzellige organische Schäume, Mineralfasern, vor allem Glasfasern ohne ausgasende Bindemittel, technische Aerogele und Kieselsäure (mikroporös als pyrogener Kieselsäure oder Fällungskieselsäure) infrage, die offenporig genug sind, um sie zügig evakuieren zu können.

Unter Beachtung der Porengröße und Porenverteilung, der Gerüstwärmeleitung und Strahlungsdurchlässigkeit lassen sich für offenporige, evakuierbare Materialien die spezifischen äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit des Gasdrucks berechnen, oder können direkt in einem evakuierbaren Plattengerät gemessen werden (Bild 1).

### Stützkern

Im Rahmen der genannten Forschungsaufgabe wurden u. a. gepresste und temperaturbehandelte Platten aus Mineralfasern als mögliches Ersatzmaterial für pyrogener Kieselsäure untersucht. Die möglichen Kern-Wärmeleitfähigkeiten sind nach Bild 1 sogar noch etwas niedriger als mit pyrogener Kieselsäure, wengleich dafür auch ein deutlich niedrigerer Druck von weniger als 1 mbar notwendig ist. Die Kern-Wärmeleitfähigkeit, die sich im evakuierten Zustand erreichen lässt, liegt zwischen 0,0015 und 0,003 W/(m · K).

### Hüllfolien

Hüllfolien für VIP sind Mehrschichtsysteme, deren einzelne Lagen verschiedene Funktionen erfüllen. Die gas- und wasserdampfdichte Barrierschicht besteht aus anorganischem Material, bisher meist aus Aluminium, und ist zwischen mehreren Kunststofffolien eingebettet. Kunststoffschichten übernehmen Träger- und Schutzfunktion (PA, PET, PP usw.), und dienen zur Verschweißung (PE). Die Laminate

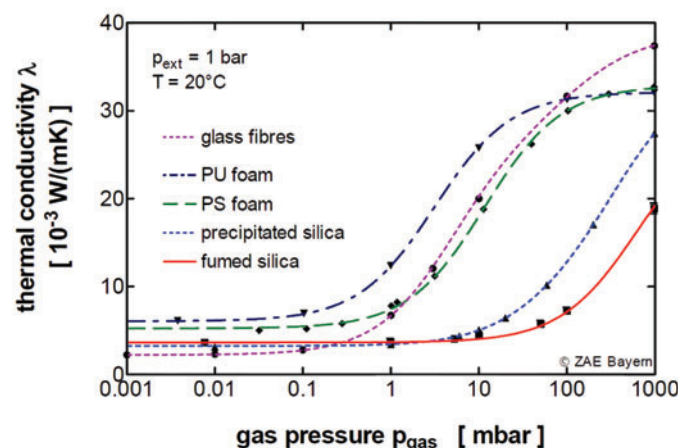


Bild 1. Wärmeleitfähigkeit verschiedener Kernmaterialien in Abhängigkeit des Gasdrucks, [1]  
Fig. 1. Thermal conductivity of various core materials as a function of gas pressure, [1]

auf Kunststoffbasis wären ohne die anorganischen Barrieren nicht in der Lage das Eindiffundieren von Wasserdampf nennenswert zu reduzieren.

Bei den mehrschichtigen Foliensystemen unterscheidet man

- a) metallisierte Folien (Hochbarrierelamine), und
- b) Metall-Verbundfolien (vor allem Aluminium-Verbundfolien; Ultrabarrierelamine).

Die erstgenannten, metallbedampften Systeme sind hinsichtlich der Wärmebrückeneffekte am Rand deutlich günstiger, weisen aber höhere Permeationsraten auf. Hier beträgt die Dicke jeder der bis zu drei anorganischen Schichten 30 bis 80 nm. Die Struktur der aufgedampften Schichten ist kristallin und weist mitunter zahlreiche Fehlstellen (nanogaps) auf, durch die Wasserdampf eindringen kann. Trockene Gase können durch die ebenfalls vorhandenen punktuellen Undichtigkeiten (pin-holes) eindringen [1]. Hier versucht man durch die Mehrlagigkeit der anorganischen Schichten Abhilfe zu schaffen, da solche nanogaps und pin-holes nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit in zwei Lagen an der gleichen Stelle liegen.

Bei den Aluminium-Verbundfolien wird auf eine für die Verschweißung benötigte Polyethylenschicht eine 6 bis 12 µm dicke Aluminiumfolie aufkaschiert. Die flächenspezifische Gasdurchlässigkeit ist sehr gering. Aus dem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit in evakuierten Paneelen verschiedener Größe kann die Diffusionsrate für Wasserdampf für gute Verbundfolien in der Größenordnung  $1 \cdot 10^{-4} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  abgeschätzt werden. Für Foliendichtheitsstests kommen hier größer strukturierte Materialien zum Einsatz, deren Wärmeleitfähigkeit sich schnell ändert, auch wenn die Druckänderung im Paneel nur gering ist. Hierfür werden meist abgestimmte Fasergeometrien verwendet und dünne Paneele mit kleinen Abmessungen hergestellt.

Der Paneelrand ist hinsichtlich der Gasdichtheit und der Wärmebrückenwirkung eine Schwachstelle. Die Gasdichtheit ist geringer als in der Fläche. Die jeweiligen Anteile an der Luft- oder Wasserdampfpermeation wurden durch Untersuchungen an Platten mit unterschiedlichen Abmessungen und verschiedenem Fläche/Umfang-Verhältnis bestimmt, [2] und [3].

Wie dicht die Umhüllung (Einfluss der Permeation an den Schweißnähten und in der Fläche) sein muss, wird vom Material des Stützkerns bestimmt. Innerhalb gegebener Grenzen (Porengrößen des Stützkerns, Gasdichtheit der Folie) kann eine Optimierung des Gesamtsystems erfolgen. Für Kernmaterialien mit einer höheren Anforderung an das technische Vakuum, wie z. B. Faserstützkerne, reduziert sich dadurch die zulässige Permeationsrate der Umhüllung gegenüber pyrogener Kieselsäure drastisch.

Simmler et al. [1] geben bei Kieselsäure-VIP als Anhaltswert für maximale Permeationsraten  $10^{-2} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$  für trockene Gase und  $10^{-4} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  für Wasserdampf an. Diese Werte sind aus der für Bauanwendungen wünschenswerten Lebensdauer von 30 bis 50 Jahren zurückgerechnet und berücksichtigen die Tatsache, dass einige Kernmaterialien für Wasserdampf als Getter wirken. Permeationsraten für Wasserdampf (WVTR) durch Hochbarrierelamine können derzeit zuverlässig nur bis ca.  $5 \cdot 10^{-4} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  gemessen werden; Permeationsraten für Sauerstoff  $\text{O}_2\text{TR}$  nur bis ca.  $1 \text{ bis } 10 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$  [4].

Bei sehr dichten Folien, wie sie für den Einsatz alternativer Stützkerns, wie z. B. Glas- oder Steinwolleplatten, notwendig sind, lassen sich Daten zu Permeation der Folien und Alterungsverhalten der Paneele fast nur indirekt, d. h. über die Messung der Wärmeleitfähigkeit, bestimmen. Direkte Messung des Innendrucks mit dem Folienabhebeverfahren ist bei fasergefüllten VIP aufgrund der unebenen Struktur der VIP-Oberfläche kaum möglich.

## 2 Untersuchungen und Ergebnisse

### 2.1 Auswertung vorhandener Messwerte

#### 2.1.1 Messwerte aus dem VIP-Bau Forschungsprojekt

In die Auswertung werden zu eigenen Messungen aus Zulassungsuntersuchungen auch die im Rahmen des VIP-Bau-Forschungsprojekts [2] gemessenen Werte mit einbezogen. Dort wurden zwischen 2004 und 2007 umfangreiche Untersuchungen zum Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von VIP durchgeführt. Miteinander verglichen werden hier die Ergebnisse der Messungen an Paneelpaaren, die bei 80 °C bzw. im Klima 23 °C/80 % r. F. gelagert wurden. Aus dem Unterschied der Wärmeleitfähigkeitsanstiege lässt sich ein Faktor ableiten, um den die Lagerung bei 80 °C die Wärmeleitfähigkeit stärker erhöht als die Lagerung bei den Laborbedingungen für hygroskopische Baustoffe und Dämmstoffe (23 °C/80 % r. F.). Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit über ein  $1/2$  Jahr bzw. über 1 Jahr für die untersuchten Plattenpaare ist im Mittel (ohne Klimawechsel) aus Tabelle 1 ersichtlich.

Für die Lagerung bei 80 °C/< 5 % r. F. über 180 Tage kann ein Faktor von 5,8 abgeleitet werden, um den der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit größer ist als bei gleich langer Lagerung im Klima 23 °C/80 % r. F. Für 360 Tage Lagerung beträgt dieser Faktor sogar 9,1.

#### 2.1.2 Messwerte für das DIBt-Alterungsverfahren

Weiterhin werden zahlreiche Messwerte an Vakuumpaneelen seit 2003 ausgewertet, darunter Messwerte für fast alle Hersteller, Kernmaterialien und Folien. Einige Untersuchungen wurden an gealterten Vakuum-Paneelen durchgeführt. In Bild 3 sind die Hersteller H A bis H F, die Folien F 1 bis F 7, die Stützkernmaterialien K 1 bis K 4 und das Produktionsjahr angegeben. Ausgewertet werden nur vollständige Messreihen als Mittelwerte aus jeweils mindestens drei gemessenen Plattenpaaren. Als Alterungsverfahren wurde die vom Deutschen Institut für Bautechnik DIBt, Berlin, für die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

Tabelle 1. Anstieg der Wärmeleitfähigkeit im Mittel der untersuchten Plattenpaare im Vergleich der Lagerung  
Table 1. Increase in the mean thermal conductivity of the panel pairs investigated in comparison to their storage

	Anstieg der Wärmeleitfähigkeit in 180 Tagen $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Anstieg der Wärmeleitfähigkeit in 360 Tagen $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Mittelwert 23 °C/80 % r. F.	0,000059	0,000070
Mittelwert 80 °C/< 5 % r. F.	0,000344	0,000632

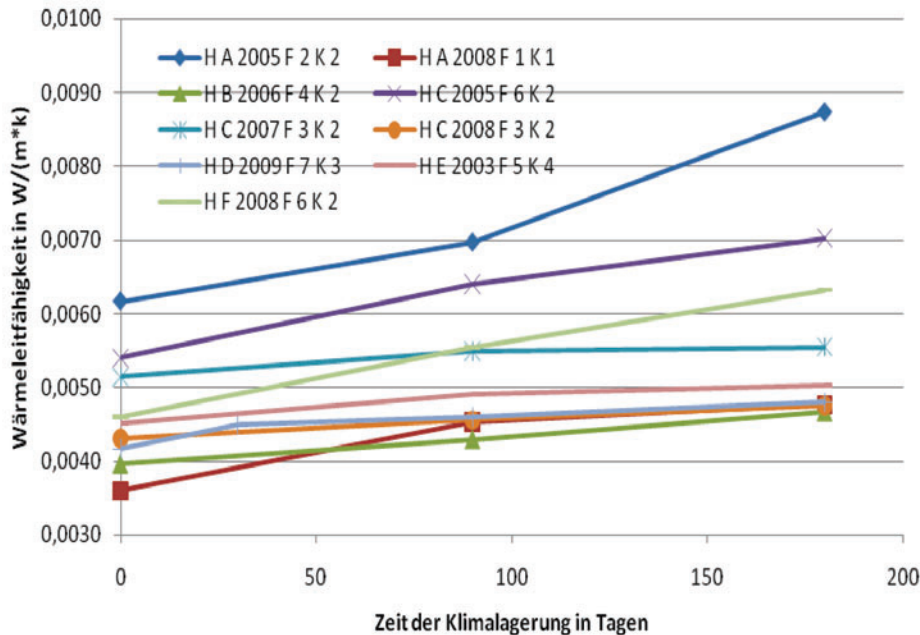


Bild 2. Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit aus jeweils drei Plattenpaaren  
Fig. 2. Mean values of the thermal conductivity of three pairs of panels

sung von Vakuum-Paneelen festgelegte Prozedur zur Alterung angewendet:

1. Messung des Wärmedurchlasswiderstands bzw. der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit im Anlieferungszustand mit dem Plattengerät nach DIN EN 12667 [5];
2. Klimawechselbeanspruchung 7 Tage Wechselklima  $-15\text{ °C}/+80\text{ °C}$  mit einem kompletten Zyklus pro Tag;
3. 90 Tage Lagerung bei  $80\text{ °C}$  (Laborluft von  $23\text{ °C}/50\text{ \% r. F.}$  wird auf  $80\text{ °C}$  erwärmt – die relative Feuchte beträgt bei  $80\text{ °C}$  ca.  $3\text{ \%}$  – der absolute Feuchtegehalt der Luft bleibt jedoch konstant);
4. Zweite Messung des Wärmedurchlasswiderstands im Plattengerät nach DIN EN 12667;
5. 90 Tage Lagerung bei  $80\text{ °C}/\text{ca. } 3\text{ \% r. F.}$ ;
6. Dritte Messung des Wärmedurchlasswiderstands im Plattengerät nach DIN EN 12667.

Als mittlere Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit kann für das DIBt-Alterungsverfahren über alle Messreihen  $0,00090\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  aus dem Wert für 180 Tage ermittelt werden. Verglichen mit dem für das Forschungsprojekt „VIP-Bau“ gefundenen Wert von  $0,00034\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  ist das eine deutlich größere Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Dieser Unterschied ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Klimawechselprüfung zurückzuführen, die nicht Bestandteil der Untersuchung für das VIP-Bau-Forschungsvorhaben war. Bezogen auf die o. g. Messwerte bedeutet das, dass die Klimawechselprüfung im Mittel für einen Unterschied im Wärmeleitfähigkeitsanstieg von  $0,00090 - 0,00034 = 0,00056\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  verantwortlich sein dürfte. Sie ist damit für den überwiegenden Teil des Anstiegs verantwortlich.

Weiterhin ist der Vergleich der mit dem DIBt-Alterungsverfahren gewonnenen Werte mit denen des VIP-Bau-Forschungsprojekts ohne Temperaturerhöhung interessant. Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit der für 180 Tage im Klima  $23\text{ °C}/80\text{ \%}$  gelagerten Paneele des VIP-Bau-Forschungsvorhabens beträgt  $0,000059\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  (vgl. Tabelle 1). Im Verhältnis zum mittleren Wert der Wärmeleitfähigkeitszunahme aus der DIBt-Alterung von  $0,00090\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  ergibt sich für 180 Tage hier der Faktor zu 15,3, um den die

DIBt-Alterung höhere Werte ergibt als die einfache Klimalagerung bei  $23\text{ °C}/80\text{ \% r. F.}$

### 2.1.3 Fortführung der Klimalagerung

Um belastbare Daten für längere Lagerungszeiten zu erhalten, wurden bei drei Plattenpaaren die Klimalagerung bei  $80\text{ °C}$ , nach den ersten 180 Tagen, noch für weitere 180 Tage fortgeführt (Bild 3). Nach einem Jahr hat sich die Wärmeleitfähigkeit im Mittel um  $0,0020\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  gegenüber dem an frischen Paneelen gemessenen Wert der Wärmeleitfähigkeit erhöht.

Wenn man diese Erhöhung mit der aus dem VIP-Bau-Forschungsvorhaben für Klimalagerung ( $23\text{ °C}/80\text{ \%}$ ) ins Verhältnis setzt, ergibt sich ein Erhöhungsfaktor von 28,6. Die DIBt-Alterung mit Klimalagerung über 360 Tage bei  $80\text{ °C}$  und Klimawechselbelastung zeigt also einen fast dreißigfachen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit gegenüber der Lagerung bei  $23\text{ °C}/80\text{ \%}$  des VIP-Bau-Forschungsprojekts für den gleichen Zeitraum. Der Abstand aller Messwerte der Wärmeleitfähigkeit der drei Plattenpaare untereinander ist auch nach einem Jahr Temperaturlagerung noch kleiner als  $0,0002\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , was ein Zeichen für gleichbleibend hohe Qualität unterschiedlicher Produktionschargen ist.

Die gemessenen Werte von  $0,0055$  bis  $0,0057\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  liegen zudem deutlich unter dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von  $0,007\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  aus den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen. Der zurzeit angesetzte Sicherheitszuschlag von  $25\text{ \%}$  auf den gealterten Wert der Wärmeleitfähigkeit – einschl. Wärmebrückeneffekte der Ränder – liegt für die Permeation trockener Gase deutlich auf der sicheren Seite, muss jedoch noch weitere Effekte abdecken. Dazu gehören vor allem Maßtoleranzen der Paneele, Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch vermehrt eindringende Feuchte und einzelne ausgefallene Paneele.

Unter der Annahme, dass für Kieselsäurepaneele im unteren Bereich der Wärmeleitfähigkeitskurve über dem Innendruck ein linearer Zusammenhang angesetzt werden kann (s. Bild 1), lässt sich aus dem Erhöhungsfaktor

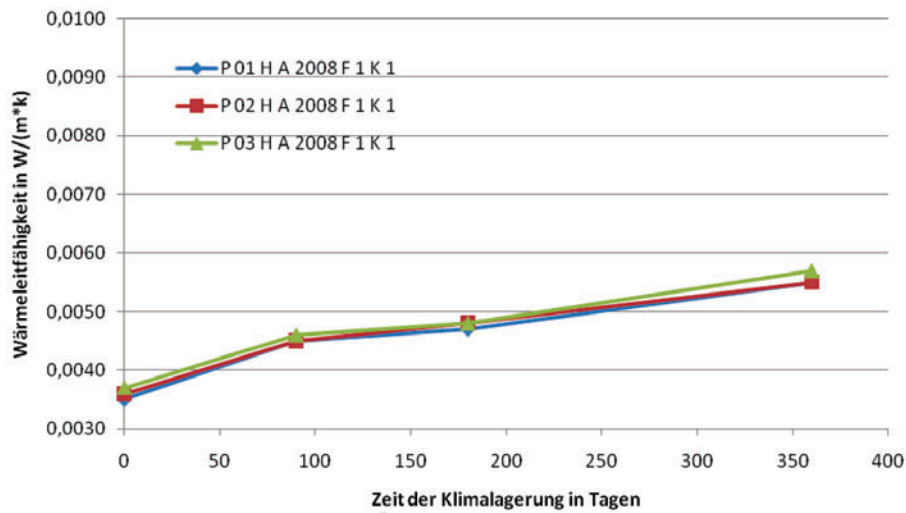


Bild 3. Wärmeleitfähigkeitsanstieg bei Verlängerung der Klimalagerung im Anschluss an die DIBt-Alterung um weitere 6 Monate bei 80 °C / < 5 %  
 Fig. 3. Increase in thermal conductivity with a lengthening of the climate storage that follows the DIBt ageing by a further 6 months at 80 °C / < 5 %

von 28,6 eine Gebrauchstauglichkeit von etwa 30 Jahren im Gebäude ableiten. Dieser Zusammenhang ist vereinfachend aus dem Wärmeleitfähigkeitsanstieg berechnet; weitere Einflussfaktoren für die Haltbarkeit der Paneele, wie z. B. UV-Strahlung, starke Temperaturschwankungen in Bauteilen, mechanische Beanspruchungen und äußere Einflüsse aus statischer Belastung etc. sind nicht berücksichtigt. Hier besteht für Bauanwendungen weiterhin Forschungsbedarf, um das DIBt-Alterungsverfahren um Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Gegebenheiten und Verfahren des Baualltags zu ergänzen.

### 2.1.4 Qualitätssicherung

Die Klimawechselbeanspruchung führt zusammen mit der Temperaturlagerung bei 80 °C / < 5 % zu einem mittleren Anstieg der Wärmeleitfähigkeit um 0,00090 W/(m · K) in 180 Tagen, was mit dem Zweiplattenverfahren nach DIN EN 12667 messtechnisch noch gut erfasst werden kann. Aus der Kurve für pyrogene Kieselsäure (fumed silica) in Bild 1 kann daraus ein ungefährer Druckanstieg im Paneel für diesen Zeitraum von 20 bis 30 mbar abgelesen werden. Da Kieselsäure-VIP mindestens bis zu einem Innendruck von 50 mbar ihre günstigen Wärmedämmeigenschaften behalten, lässt sich mit den DIBt-Alterungstests eine zuverlässige und für alle Beteiligten nachvollziehbare Aussage über die Dauerhaftigkeit der Paneele gewinnen, ohne die Paneele bis zum Versagen zu belasten. Qualitätsunterschiede bei der Herstellung und bei den Folien können über die Unterschiede bei der Wärmeleitfähigkeitszunahme identifiziert werden, ohne jedoch eine absolute Aussage über den Zeitpunkt des Versagens in der jeweiligen Bauanwendung treffen zu können.

Weiterhin lässt sich aus dem mittleren Anstieg des Innendruckes von 20 bis 30 mbar schließen, dass ohne deutliche Verringerung der Permeationsrate der Folienhüllen – in der Fläche und an den Schweißnähten – fasergefüllte VIP die Alterungsuntersuchungen nach dem DIBt-Verfahren nicht bestehen dürften: Paneele mit Füllung aus Fasermaterial weisen bereits bei Druckanstiegen auf etwa 1 mbar sehr große Anstiege der Wärmeleitfähigkeit auf, da die Porenstruktur hier ungleich gröber ist als bei den feinporigen Kieselsäurekernen und deshalb die Luftmoleküle in ihrer Bewegung nicht so eingeschränkt sind.

### 2.2 Berechnungen an Rändern und Deckschichten

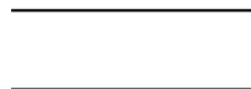
Wärmebrückeneffekte treten bei VIP an den folgenden Stellen auf:

- Wärmebrücken des einzelnen VIP am Paneelrand, abhängig von verwendeter Folie, eingesetztem Deckschichtmaterial und Art der Randausbildung,
- Wärmebrücken an der Stoßstelle aneinander grenzender VIP, abhängig von Spaltweite und spaltfüllendem Stoff (vorkomprimierte Dichtbänder, weiche Dämmstoffe mit Klebebändern etc.),
- Wärmebrücken der Konstruktion, d. h. der Befestigungselemente und der baulichen Einbindung der VIP in die umgebenden Konstruktionen, abhängig vom Unterschied der Wärmeleitfähigkeiten der angrenzenden Baustoffe untereinander.

Berechnet wird der Rand eines VIP-Elementes, ohne Nachbar-element. Für die Berechnung werden die Foliendeckschichten im verschweißten Zustand betrachtet. Die normale Ausführung von VIP Umhüllungen sieht vor, dass die jeweils längeren Kanten der rechteckigen Dämmplatten mit nur 1 Folienlage ausgeführt werden. An den kürzeren Kanten werden die obere und die untere Folienlage miteinander verschweißt und der Schweißbereich anschließend nach einer Seite umgeklappt.

#### Längere Kanten

einlagiger Rand (auch als konzentrischer Rand bzw. einlagiger Stoß bezeichnet):



#### Kürzere Kanten

mehrlagiger Rand (auch als überlappende Randausbildung bzw. mehrlagiger Stoß bezeichnet):



Die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\psi$  unterscheiden sich deutlich, je nachdem ob eine einlagige oder eine mehrlagige Randausbildung vorliegt.

Stark beeinflusst werden die  $\psi$ -Werte außerdem durch Luftspalte zwischen den Paneelen. Alle hier angegebenen Werte sind für schmale Luftspalte von 0,1 bis 0,5 mm innerhalb der Umklappung des mehrlagigen Randes berechnet worden. Diese Annahme ist selbst bei sehr maßhaltigen Paneelen und dichter Verlegung kaum zu erreichen, lässt aber die Untersuchung der Einflüsse der Dicke der Aluminiumschichten ohne Vermischung mit anderen Wärmebrücken-Ursachen zu. Untersuchungen mittels FE-Berechnungen und Messungen an Paneelstößen in ein- und zweilagigen Verlegungen wurden u. a. auch von *K. Ghazi-Wakili* et al. veröffentlicht [6], [7]. Weniger als 1,5 bis 2 mm Spaltweite bei Paneelen ohne spaltfüllenden, flexiblen Dämmstoff lassen sich in experimentellen Einbauten kaum realisieren, weil die Folie durch die Verschweißung wellig wird und die Paneele nicht näher zusammengeschoben werden können. Luft- oder Dämmstoffspalte dieser Abmessungen führen dann auch zu höheren  $\psi$ -Werten als im untersuchten Fall.

### 2.2.1 Einfluss der Dicke der Aluminiumschichten

In Bild 4 ist der Einfluss der Dicke der Aluminiumschichten auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten des einlagigen und des mehrlagigen Randes für 20 und 40 mm dicke Paneele dargestellt. Die betrachtete Spanne der Dicke der Aluminiumschichten von 90 bis 360 nm deckt einen Großteil der derzeit erhältlichen Hochbarrierefolien ab. Die Berechnungen werden unter Berücksichtigung der einzelnen Folienlagen, Vliese, Kleberschichten und Rand-Klebebändern durchgeführt, die für die numerischen Modelle einzeln diskretisiert werden.

Wie zu erwarten, steigen die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten mit zunehmender Dicke der Aluminiumschichten deutlich an. Die gefundenen Zusammenhänge sind für den betrachteten Bereich zwischen 90 und 360 nm annähernd linear. Die Steigung der Kurven ist für Paneele der Dicke 20 mm etwas größer als für Paneele der Dicke 40 mm. Ebenso ist die Steigung für die mehrlagige Randausbildung etwas höher als für die einlagige Randausbildung.

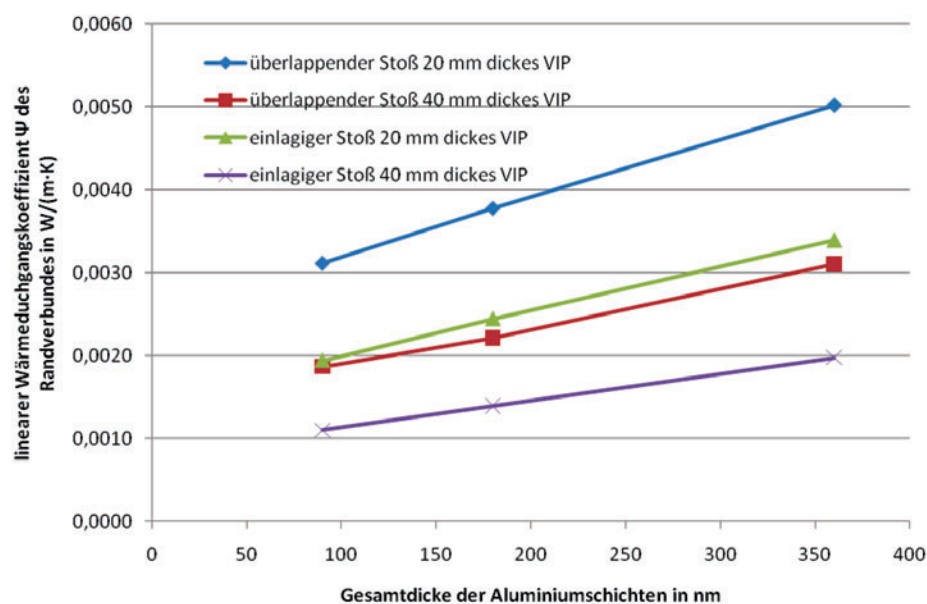


Bild 4. Einfluss der Dicke der anorganischen Barrierschichten auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten des einlagigen und des mehrlagigen Randes für 20 und 40 mm dicke Paneele – gerechnet für eine metallisierte Folie mit unterschiedlicher Dicke der Barrierschichten  
Fig. 4. Influence of the thickness of the inorganic barrier layers on the longitudinal heat-transfer coefficients of single- and multi-layer edges for 20 and 40 mm thick panels – calculated for a metallised foil with various thicknesses of the barrier layers

### 2.2.2 Einfluss der Abmessungen der Paneele

Der Einfluss der Wärmebrücke am Folienrand auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Paneele ist vor allem abhängig von den Abmessungen der Paneele, wie das nachfolgende Beispiel zeigt, Bild 5. Betrachtet wird ein Paneel, das an allen vier Seiten verschweißt wurde. Angesetzt wird allseitig für den kompletten Umfang des Panels ein  $\Psi$ -Wert von  $0,0038 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , wie er einem überlappenden Stoß einer mehrlagigen Hochbarrierefolie mit ca. 180 nm Aluminium in der Summe der drei metallisierten Schichten entspricht (s. Bild 4). Die Berechnung der  $\Psi$ -Werte erfolgt üblicherweise für die Messwerte nach Alterung im ungestörten Bereich des Panels – in diesem Fall für die Kern-Wärmeleitfähigkeit von  $0,005 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

Auf der linken Ordinate ist aufgetragen, um wieviel Prozent die Kern-Wärmeleitfähigkeit nach Alterung erhöht werden muss, um die Effekte am Paneelrand in der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des ganzen Panels zu berücksichtigen. Auf der rechten Ordinate ist ebenfalls der Einfluss der Rand-Wärmebrücke der Folie auf die Kern-Wärmeleitfähigkeit aufgetragen, jedoch absolut in  $\text{mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Deutlich wird: je großflächiger die Platten werden, desto geringer ist der Einfluss der Ränder auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Paneele. Für übliche Paneelgrößen von  $0,25$  bis  $1,0 \text{ m}^2$  beträgt der „Rand-Zuschlag“ zwischen 12 und 5 % auf den gealterten Wert der Wärmeleitfähigkeit. Absolut entspricht dies  $0,0006$  bis  $0,0002 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  bei einem Messwert nach Alterung von  $0,005 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

Um der Wärmebrückenproblematik besonders kleiner Paneele zu begegnen, wird in den meisten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen eine Mindest-Paneelgröße festgeschrieben, die nicht unterschritten werden darf. Wird eine möglichst große durchschnittliche Plattengröße am Gebäude verwendet, kommt dies dem Wärmeverbrauch des Gebäudes zugute, obwohl für den Wärmebedarfsausweis nach EnEV dieser Vorteil nicht berücksichtigt werden darf, denn in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen wird beim Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit nicht nach der Abmessung der Paneele unterschieden.

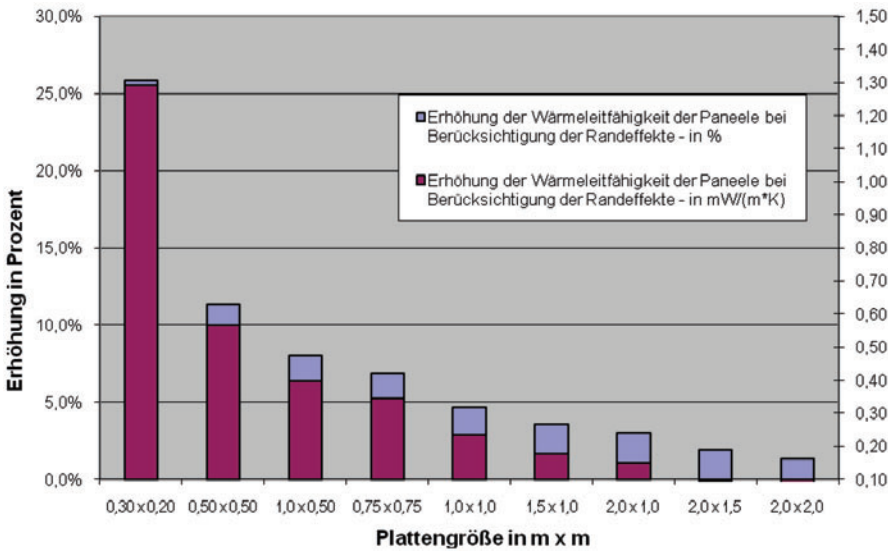


Bild 5. Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit eines 20 mm dicken VIP abhängig von der Plattengröße-überlappender Stoß; Berechnungsbasis ist die Wärmeleitfähigkeit des Kerns für den Wert nach Alterung mit 0,005 W/(m · K)  
 Fig. 5. Increase in the thermal conductivity of a 20 mm thick VIP as a function of the panel size (butt joint); calculation basis is the thermal conductivity of the core for the value after ageing with 0.005 W/(m · K)

### 2.2.3 Einfluss der Spaltweite und des Füllmaterials

Nachfolgend ist für einen einlagigen Stoß der Einfluss der Spaltweite zwischen zwei verlegten VIP der Dicke 20 mm und der Einfluss der Spaltfüllung mit einem Dämmstoff bestimmter Wärmeleitfähigkeit dargestellt (Bild 6). Untersucht wird hier nur ein einlagiger Stoß, da sich der Zusammenhang für den mehrlagigen Stoß ähnlich darstellt. Die untersuchten Spaltweiten decken mit 10 bis 50 mm den für Randschutzstreifen sinnvollen Bereich ab. Bei Randstreifen über 50 mm Breite werden die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten so groß, dass VIP-übliche äquivalente Wärmeleitfähigkeitswerte der Gesamtfläche nur noch für sehr große Paneele möglich sind.

Als Spaltfüllung wird Dämmstoff mit üblichen Wärmeleitfähigkeitswerten betrachtet (0,022 bis 0,040 W/(m · K)). Liegt die Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffes im Spalt nur wenig darüber (beispielsweise vorkomprimiertes Dichtband mit ca. 0,050 W/(m · K)), kann für die entsprechenden Spaltweiten der  $\Psi$ -Wert aus den angegebenen Kurven linear extrapoliert werden. Für größere Wärmeleitfähigkeiten des

Füllmaterials ist eine numerische Berechnung mit den genauen Abmessungen der Paneele und der Spalten notwendig. Für dickere Paneele stellt sich ein ähnliches Verhalten ein, jedoch sind die  $\Psi$ -Werte selbst etwas kleiner und die Kurven flacher.

### 2.2.4 Einfluss der Deckschichten

In weiteren Untersuchungen wird der Einfluss der Deckschichtmaterialien auf den Wärmedurchgang des Randes ermittelt. Deckschichten für VIP werden aus sehr unterschiedlichen Materialien angefertigt. Die Spanne der Wärmeleitfähigkeit reicht von Dämmstoffen ( $\lambda < 0,09$  W/(m · K)) über Holz und massive Kunststoffe (0,09 bis 0,60 W/(m · K)) bis hin zu Metallen ( $\lambda > 10$  W/(m · K)). Der Bereich zwischen massiven Kunststoffen und Metallen wird hauptsächlich durch mineralische Baustoffe repräsentiert, die bisher keine Verwendung als Deckschichten von VIP finden. In den folgenden Untersuchungen werden für die einzelnen Wärmeleitfähigkeitsbereiche typische Vertreter betrachtet (EPS; MDF-Platten; Kunststoff-Schwerfolien zur Schall-

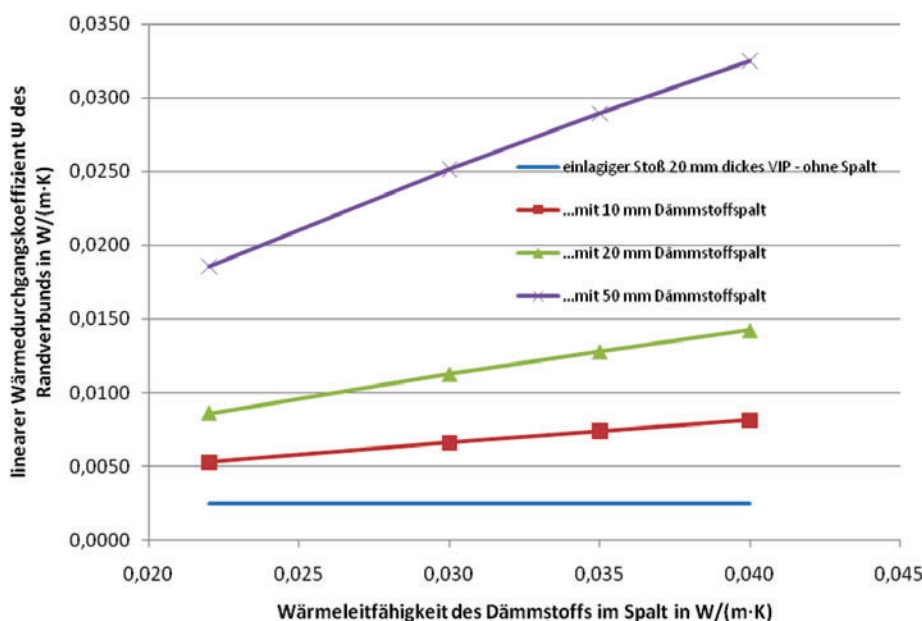


Bild 6. Einfluss der Spaltweite und der Wärmeleitfähigkeit der Spaltfüllung zwischen zwei verlegten VIP auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  
 Fig. 6. Influence of the gap width and the thermal conductivity of the gap-filling material between two installed VIPs on the longitudinal heat-transfer coefficients

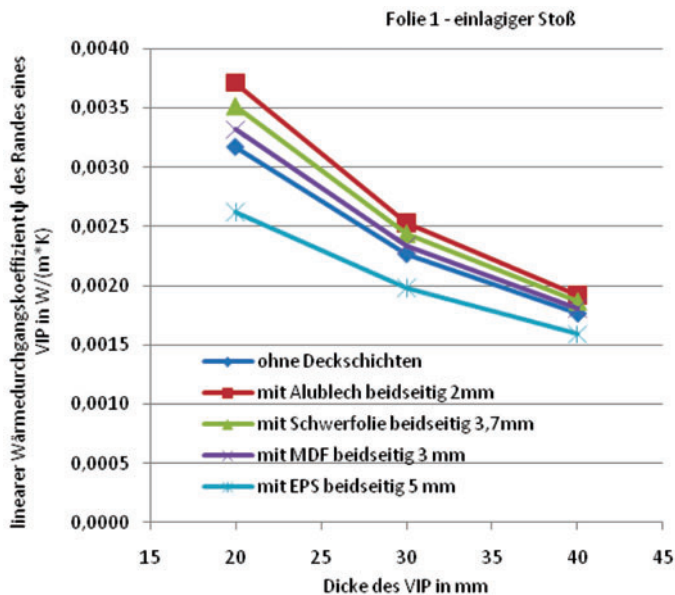


Bild 7. Einfluss des Deckschichtmaterials auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für den einlagigen Stoß und VIP der Dicke 20 bis 40 mm

Fig. 7. Influence of the surface-layer material on the longitudinal heat-transfer coefficients for the single-layer butt-joint and VIP thicknesses from 20 to 40 mm

dämmung; metallische Deckschichten). Der Einfluss der Deckschicht-Materialien ist in Bild 7 für den einlagigen Folienstoß und VIP der Dicke 20 bis 40 mm dargestellt.

Die Ausführung mit einlagiger Folie am Rand (üblich bei allen längeren Kanten der VIP) zeigt mit fast allen Deckschichten einen Anstieg der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten der Randwärmebrücken. Dieser Anstieg fällt bei dünneren VIP stärker aus und nimmt mit zunehmender Dicke der VIP ab. Lediglich für Deckschichten aus Dämmstoffen können niedrigere  $\Psi$ -Werte für den Rand als für den Fall ohne Deckschichten ermittelt werden. Ein nennenswerter Unterschied zwischen massiven metallischen Decklagen (hier 2 mm Aluminiumbleche) und Holzwerkstoffen (hier 3 mm MDF-Platten) kann nicht festgestellt werden. Die  $\Psi$ -Werte für Deckschichten aus massiven Kunststoffen liegen zwischen denen für Metalle und Holz.

### 2.2.5 Vergleich metallisierter Folien mit Aluminium-Verbundfolien

Hinsichtlich der Gasdichtheit und der Permeationsrate sind Aluminium-Verbundfolien deutlich günstiger zu bewerten als die metallisierten Hochbarrierelamine. Abschätzungen aus dem Druckanstieg in Paneelen lassen vermuten, dass die Durchlässigkeit hinsichtlich Wasserdampf in der Größenordnung  $1 \cdot 10^{-4} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  liegt. Diese geringe Permeationsrate ist derzeit mit den vorhandenen Messmethoden nicht genau bestimmbar. Aus der Abschätzung der Permeationsrate für solche Folien lässt sich aber ableiten, dass jene Folien sehr gut geeignet wären, um damit hinsichtlich Druckanstieg empfindlich reagierende VIP mit Faserfüllung einzupacken.

Die Dicke der Aluminiumschicht liegt jedoch im Bereich von 6 bis 12  $\mu\text{m}$  und ist somit um den Faktor 30 bis 130 dicker als bei üblichen metallisierten Hochbarrierela-

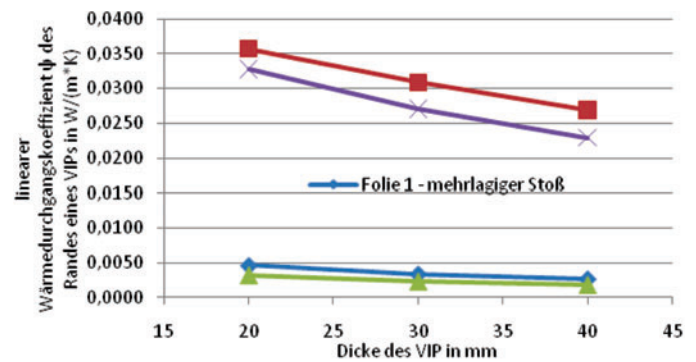


Bild 8. Vergleich der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für die einlagige und mehrlagige Randausbildung für Folie 1 (metallisiert) und Folie 8 (Aluminium-Verbundfolie) bei VIP der Dicke 20 bis 40 mm

Fig. 8. Comparison of the longitudinal heat-transfer coefficients for single-layer and multi-layer edging for Foil 1 (metallised) and Foil 8 (laminated aluminium foil) for VIP thicknesses from 20 to 40 mm

minaten. Deshalb sind die Randwärmebrückeneinflüsse viel größer als bei VIP mit metallisierten Barrierelaminen. Die nachfolgende untersuchte Folie 8 ist eine Aluminium-Verbundfolie mit 9  $\mu\text{m}$  Aluminium, eingebettet in 90  $\mu\text{m}$  Kunststoff. Zum Vergleich sind in Bild 8 die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten einer metallisierten Folie dargestellt, deren Dicke der Barrierschicht um den Faktor 100 kleiner ist. Untersucht wurden beide Randausbildungen mit der 9  $\mu\text{m}$ -Aluminium-Verbundfolie und der metallisierten Folie.

Für ein VIP der Dicke 20 mm liegen die Wärmebrückeneffekte der Verbundfolie um den Faktor 8 (mehrlagiger Rand) bis 9 (einlagiger Rand) über denen der metallisierten Folie. Für ein 40 mm dickes VIP sind die Wärmebrückeneffekte der Verbundfolie sogar um den Faktor 10 (mehrlagig) bis 13 (einlagig) größer als bei der metallisierten Folie. Die Ergebnisse für die Aluminium-Verbundfolie liegen etwas niedriger als die von A. Binz et al. im Rahmen des Forschungsprojekts „High Performance Thermal Insulation (HiPTI)“ ermittelten  $\Psi$ -Werte [8]. Die Unterschiede lassen sich durch die in unserem Projekt etwas höher angesetzte äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials (hier 0,005  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  zu 0,004  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  bei A. Binz et al. und die etwas niedriger angesetzte Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums (hier 160  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  zu 200  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) erklären.

### 3 Hinweise für Produktion und Anwendung

Aus den umfangreichen Untersuchungen zu den vorhandenen Messwerten werden folgende Parameter für die Produktion wärmetechnisch hochwertiger VIP abgeleitet, siehe auch den ausführlichen Forschungsbericht [11]:

#### Niedrigen Frischwert der Wärmeleitfähigkeit anstreben

Hierfür muss die Mischung von Kieselsäure (Gerüstwärmeleitung), Verstärkungsfasern (Gerüstwärmeleitung und Presungseigenschaften) und Trübungsmittel (Infrarot-Strahlungstransport) genau abgestimmt werden. Die Pressung und damit die Rohdichte des Kernmaterials muss für den Einsatzzweck angepasst werden; ideal wäre eine möglichst

geringe Rohdichte bei gleichzeitig guten mechanischen Eigenschaften. Wichtig ist auch eine sehr gute Trocknung der Kerne über mehrere Stunden bei entsprechend hohen Temperaturen. Zudem muss der Evakuierdruck für das gewählte Kernmaterial ausreichend niedrig sein. Maßgebend ist hier die Porengröße.

*Möglichst kleine Erhöhung aus der Alterung*

Hierfür muss eine Folie mit möglichst niedriger Permeationsrate ausgewählt werden. Wichtig sind hier Vortests an den Folien selbst zur Permeation von trockenen Gasen und Wasserdampf, zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Folien- und damit später auch Paneelqualität. Zudem ist die Ausführung der Verschweißung entscheidend. Schon geringe Verschmutzungen auf den Folienoberflächen im Bereich der späteren Verschweißung erhöhen die Durchlässigkeit am Rand. Größere Paneele verhalten sich bei den Alterungsuntersuchungen aufgrund des geringeren Randaufbaus günstiger.

*Sorgfalt bei der Herstellung*

Durch geschickte und vorsichtige Faltung der Folien wird die Gefahr punktueller Undichtigkeiten an den Umfaltetellen der Folien deutlich verringert. Sinnvoll sind auch eine Dokumentation des Evakuierdrucks und eine nachträgliche Kontrolle der Verschweißung. Falten, Knicke und enge Biegeradien sollten soweit möglich vermieden werden, weil die Folienlagen an diesen Stellen großen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind.

Aus den Ergebnissen der Berechnungen zu den Wärmebrücken am Paneelrand können Hinweise zur Minimierung der Wärmebrückeneffekte abgeleitet werden, deren Beachtung für wärmetechnisch hochwertige VIP unerlässlich sind. Einige Hinweise sind nachfolgend in Stichpunkten dargestellt:

*Kürzere Kanten mit der ungünstigeren Randausbildung ausführen*

- was im Umkehrschluss bedeutet, dass die längeren Kanten in der einlagigen Randausführung hergestellt werden sollten. Schon durch diese einfache Maßnahme können die Wärmebrücken am Paneelrand deutlich reduziert werden.

*Folien mit dünnen Aluminiumschichten verwenden*

Dieser Forderung aus Sicht der Wärmebrückenminimierung widerspricht die Forderung, eine Folie mit einer sehr niedrigen Permeationsrate zu verwenden, um den Druckanstieg in den Paneelen möglichst klein zu halten.

*Möglichst keine bzw. möglichst schmale Spalte zwischen VIP*

- was bedeutet, dass möglichst rechteckige und passgenaue VIP verwendet werden sollten. Wenn Spalte zwischen Platten trotzdem nicht zu vermeiden sind, sollten diese möglichst schmal ausgeführt und mit einem Material mit möglichst niedriger Wärmeleitfähigkeit gefüllt werden.

*Deckschichten aus Dämmstoffen*

Fast alle am Markt erhältlichen VIP werden mit Deckschichten angeboten, die zum Schutz der VIP dienen und das Handling auf der Baustelle verbessern. Die Rand-Wärmebrückeneffekte werden durch die Querleitung in den Deckschichten erhöht. Lediglich beim Einsatz von Dämmstoffen ergeben sich günstigere  $\Psi$ -Werte am Rand als für VIP ohne Deckschichten.

**4 Randbedingungen für den Einsatz alternativer Kernmaterialien**

**4.1 Folien**

Die zurzeit am Markt erhältlichen, metallisierten Folien sind gut geeignet für die Herstellung von Paneelen mit Stützkernen aus pyrogener Kieselsäure. Für den Einsatz alternativer Stützkern (z. B. Fasern) ist es notwendig, die Permeationsrate der metallisierten Folien zu senken und eine Verbesserung der Folieneigenschaften hinsichtlich der Alterung zu erreichen. Mit Aluminium-Verbundfolien sind sehr niedrige Permeationsraten möglich, sie weisen jedoch an den Rändern so große Wärmebrückeneffekte auf, dass ihr Einsatz aus wärmetechnischer Sicht nicht zu empfehlen ist.

**4.2 Innendruck**

Mit der Abschätzung des mittleren Porendurchmessers für Faserkerne nach folgender Formel (nach U. Passon), kann der Zielwert für den Innendruck berechnet werden:

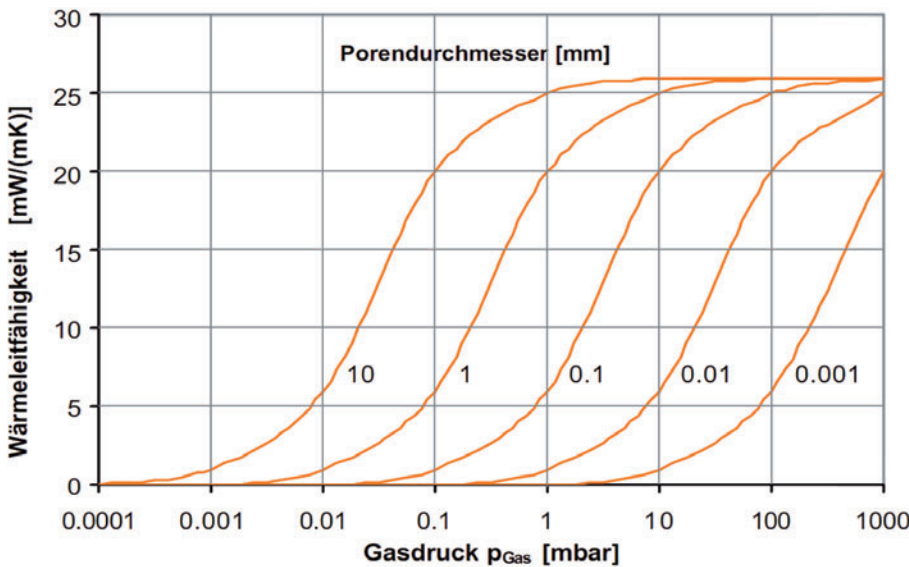


Bild 9. Effektive Wärmeleitfähigkeit der Luft in Poren in Abhängigkeit von Porengröße (Durchmesser in mm) und Druck; aus [9]

Fig. 9. Effective thermal conductivity of the air in pores as a function of pore size (diameter in mm) and pressure; from [9]

$$d_{\text{Pore}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\rho_{\text{Glas}}}{\rho_{\text{Faserkern}}} \cdot d_{\text{Faser}}$$

mit:

$\rho_{\text{Glas}}$	Rohdichte der Glasfasern in $\text{kg/m}^3$
$\rho_{\text{Faserkern}}$	Rohdichte des Faserkerns in $\text{kg/m}^3$
$d_{\text{Faser}}$	Durchmesser einer Faser in m
$d_{\text{Pore}}$	Durchmesser einer Pore in m.

Bei Ansatz eines Dichteverhältnisses von etwa 10 und eines Faserdurchmessers von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  ergibt sich daraus eine mittlere Porengröße von etwa 50 bis 80  $\mu\text{m}$ . Aus Bild 9 lässt sich hieraus ein Schwellendruck von 0,1 mbar ableiten, der zur Unterdrückung der Luft-Wärmeleitung eingehalten werden muss. Als Zielwert für den Innendruck der im Rahmen der Forschungsarbeit hergestellten Paneele mit Faserkern wird 0,02 mbar festgelegt, um ein ausreichend großes Vorhaltemaß unter 0,1 mbar zu haben. Die Faserkerne werden mindestens 3 h bei 140 °C getrocknet.

### 4.3 Stützkern

Als Stützkernmaterial kann derzeit auf pyrogene Kieselsäure nicht verzichtet werden. Allenfalls ein Teil der Kieselsäure könnte beim Einsatz neuer, sehr dichter Folien in absehbarer Zeit durch z. B. Fasern ersetzt werden. Die Anforderung an das Vakuum (Innendruck auf absehbare Zeit kleiner als 0,1 mbar) erfordert große Sorgfalt bei der Herstellung der Kerne aus Fasermaterialien. Diese müssen absolut fettfrei sein und dürfen keinerlei Bindemittel enthalten. Im Gegensatz zu pyrogener Kieselsäure ist auch eine Trocknung bei mindestens 140 °C über mehrere Stunden unerlässlich, um auch kleinste Reste anhaftenden Wassers von den Fasern zu entfernen.

## 5 Ausblick

### 5.1 Anwendung und Gebrauchsdauer

Alle Unsicherheiten beim Alterungsverhalten der Paneele im Hinblick auf die Einsatzzeit im Gebäude werden in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen derzeit mittels eines Sicherheitszuschlags auf die gealterten Wärmeleitfähigkeitswerte berücksichtigt. Abgedeckt werden damit außerdem Toleranzen bei den Abmessungen, mögliche höhere  $\Psi$ -Werte bei ungenauer Verlegung, Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch vermehrt eindringende Feuchte und der flächenanteilige Einfluss einzelner „versagender“ Paneele. Zurzeit werden hier 25 % Sicherheitszuschlag angesetzt. Zusätzlich fordert das DIBt Entnahmen von Paneelen aus ausgeführten Objekten zur Prüfung der Wärmeleitfähigkeit nach einigen Jahren Einbauzeit im Gebäude. Sollte sich dabei herausstellen, dass sich das System der Vakuum-Isolations-Paneele in der Praxis günstiger verhält als prognostiziert, könnte der Sicherheitszuschlag zukünftig gesenkt werden.

### 5.2 Andere Barrierematerialien

Sogenannte  $\text{SiO}_x$ -bedampfte Folien sind neuere Entwicklungen als mögliche Alternative zu den hier beschriebenen

Folien. Die Gasdichtheit ist mit den metallisierten Folien vergleichbar. Die Wärmeleitfähigkeit von  $\text{SiO}_x$  liegt im Bereich von Glas (ca. 1,0  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), und ist damit ca. 160mal geringer als die von Aluminium. Es ergeben sich kleinere Wärmebrückeneffekte am Paneelrand, bzw. bei gleichem Wärmebrückeneffekt könnte die anorganische Schicht dicker und damit dichter ausgeführt werden.

In diesem Zusammenhang sind auch zusätzliche Schichten aus organisch-anorganischen Hybrid-Polymeren (Handelsname ORMOCER®) zu sehen, die makroskopische Defekte (Nanogaps und Pin-holes) der aufgedampften Schichten ausfüllen können und die eine sehr ebene Oberfläche für eine weitere Bedampfungsschicht schaffen [10]. Leider sind diese Folien noch in der Erprobungsphase und noch nicht kommerziell erhältlich.

### Literatur

- [1] *Simmler, H.* et al.: Vacuum Insulation Panels – Study on VIP Components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A): Forschungsbericht HiPTI – High Performance Thermal Insulation, 2005.
- [2] *Heinemann, U.*: Vakuuminisulationspaneelle für die Anwendung im Bauwesen: VIP-Bau; Koordinations- und Informationsstelle und Qualitätskontrolle von Vakuuminisulationspaneelen. Schlussbericht. Würzburg, 2007.
- [3] *Schwab, H.*: Vakuuminisulationspaneelle: Gas- und Feuchteintrag sowie Feuchte- und Wärmetransport, 2004.
- [4] *Brockmann, T., Herr, R., Rössig, S.*: Vakuuminisulationspaneelle (VIP) in der Baupraxis. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn 2011.
- [5] DIN EN 12667:2001-05 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. Berlin: Beuth Verlag, 2001.
- [6] *Ghazi-Wakili, K., Bundi, R., Binder, B.*: Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels. In: Building Research & Information 32 (2004) No. 4, p. 293.
- [7] *Ghazi Wakili, K., Stahl, T., Brunner, S.*: Effective thermal conductivity of a staggered double layer of vacuum insulation panels. In: Energy and Buildings 43 (2011) No. 6, p. 1241.
- [8] *Binz, A.* et al. HiPTI – High Performance Thermal Insulation – IEA/ECBCS Annex 39 – Vacuum Insulation in the Building Sector – Systems and Applications 2005.
- [9] *Cremers, J.*: Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle: Technologische bauphysikalische und architektonische Aspekte, Meidenbauer, München, 2006.
- [10] *Noller, K.*: POLO Concept to manufacture VIP barrier film laminates based on hybrid barrier layers. Vortrag beim Arbeitskreis „Anwendung VIP in der Baupraxis“, Würzburg, 2009.
- [11] *Sprengard, C., Spitzner, M. H.*: Optimieren der energetischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von VIP-Paneelen durch die optimale Kombination von Kieselsäure-, Mineralfaser- und EPS-Dämmstoff. Forschungsbericht, IRB-Verlag, Stuttgart 2011 (in Druck).

### Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard, Dr.-Ing. Martin H. Spitzner  
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München (FIW),  
Lochhamer Schlag 4, 82166 Gräfelfing

