

Wesen, Potentiale und Besonderheiten von Vakuumisolationspaneeelen

Dr. Ulrich Heinemann

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern)

Abteilung: Wärmedämmung und Wärmetransport

Am Hubland

97074 Würzburg

Tel.: 0931 / 70564-35 Fax: 0931 / 70564-60

ulrich.heinemann@zae.uni-wuerzburg.de

www.zae-bayern.de

www.vip-bau.de

1 Einleitung

Während herkömmliche Dämmmaterialien, wie Glas-, Mineralwolle oder Polystyrenschaume bei Umgebungstemperatur Wärmeleitfähigkeiten von etwa 0.035 bis 0.045 W/(m·K) aufweisen, lassen sich mit evakuierten Isolationsmaterialien Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von etwa 0.002 bis 0.008 W/(m·K) erreichen. Schwergas-gefüllte Polyurethanschaume haben Wärmeleitfähigkeiten von etwa 0.022 bis 0.030 W/(m·K); bei speziellen, besonders feingegliederten Materialien kann die Wärmeleitfähigkeit von trockener, ruhender d.h. nicht-konvektierender Luft von etwa 0.026 W/(m·K) noch unterschritten werden. Im Vergleich zu den nicht-evakuierten Dämmmaterialien weisen Vakuumisolationen somit ein Verbesserungspotential von einem Faktor 5 bis 10 auf (siehe Bild 1). Der erhebliche Raumgewinn wird anhand der in Bild 2 dargestellten thermisch äquivalenten Systeme offensichtlich.

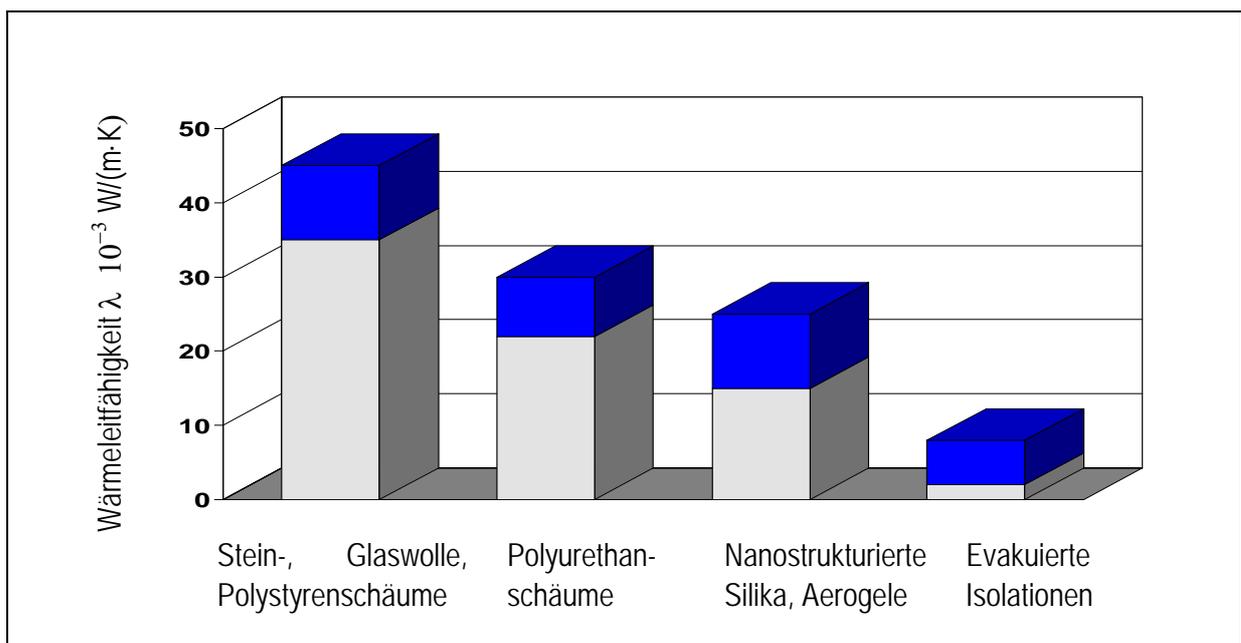


Bild 1: Dämmmaterialien (-systeme) im Vergleich.

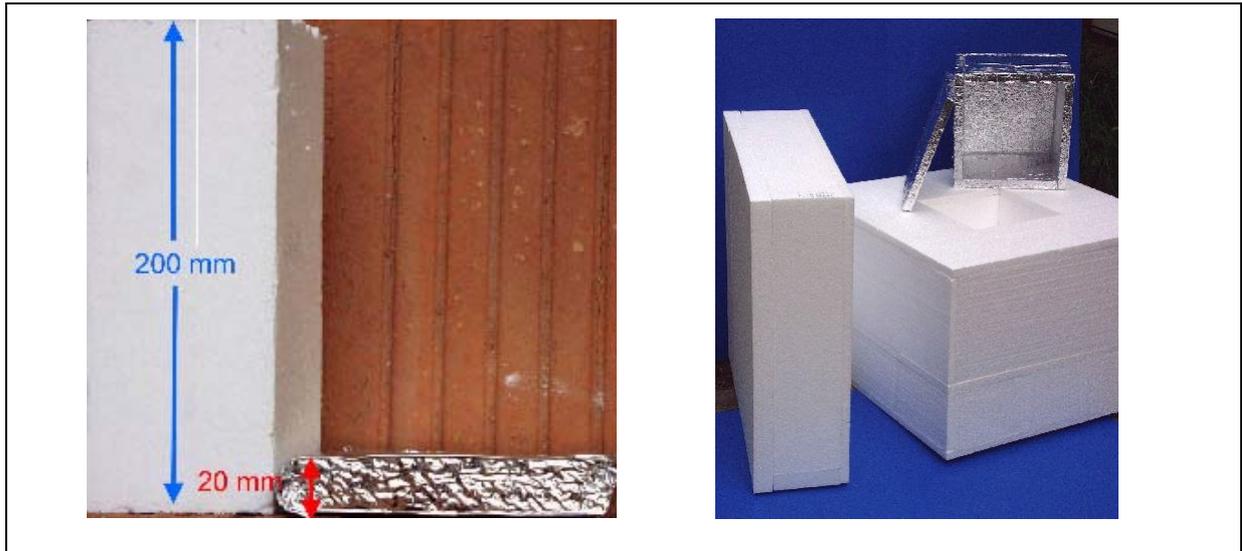


Bild 2: Thermisch äquivalente Dämmsysteme.

Anwendungsbereiche für evakuierte Isolationen sind zum einen Latentwärmespeicher für Fahrzeuge, Hochtemperatur-Batterien für Fahrzeuge, Kühlfahrzeuge, Kühlzellen oder Kühlhäuser, oder auch Heißwasserbehälter. Bei diesen sind metallische Hüllen erforderlich oder von Vorteil. Für weitere Anwendungen, Kühl- und Gefrierschränke, Transportboxen und aber auch für Anwendungen im Bauwesen, kommen spezielle Hochbarrierefolien und -filme in Frage, die Gegenstand der weiteren Ausführungen sein werden.

2 Aufbau und Wesen von Vakuumisolationspaneelen (VIP)

Während bei herkömmlichen evakuierten Dämmsystemen zylindrische Gehäuse in der Lage sind, den äußeren atmosphärischen Druck von 1 bar zu tragen, müssen bei flachen VIPs druckstabile Füllmaterialien die entsprechenden Druckkräfte aufnehmen. Hierfür kommen verschiedene Faser-, Pulver- oder Schaumprodukte in Frage, die, um sie evakuieren zu können, offenporig sein müssen. Zudem sollten sie möglichst wenig ausgasen. Ein VIP besteht prinzipiell aus dem Füllmaterial und einer Hülle. Damit ist es weniger ein Dämmmaterial, das nach Bedarf bearbeitet und zurechtgeschnitten werden kann, sondern mehr ein vorgefertigtes hocheffizientes Dämmelement, in verschiedener Hinsicht vergleichbar mit einem Fenster.

3 Wärmetransport in porösen Dämmmaterialien

In guter Näherung lässt sich der Wärmetransport in porösen Dämmungen durch die Summe der verschiedenen Beiträge, Wärmetransport über das Festkörpergerippe λ_s , Infrarotstrahlungstransport λ_r und Wärmeleitung des darin enthaltenen, ruhenden Gases λ_g beschreiben. Kopplungseffekte der verschiedenen Transportpfade werden in einem weiteren Term λ_c erfasst:

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_r + \lambda_g + \lambda_c. \quad (3-1)$$

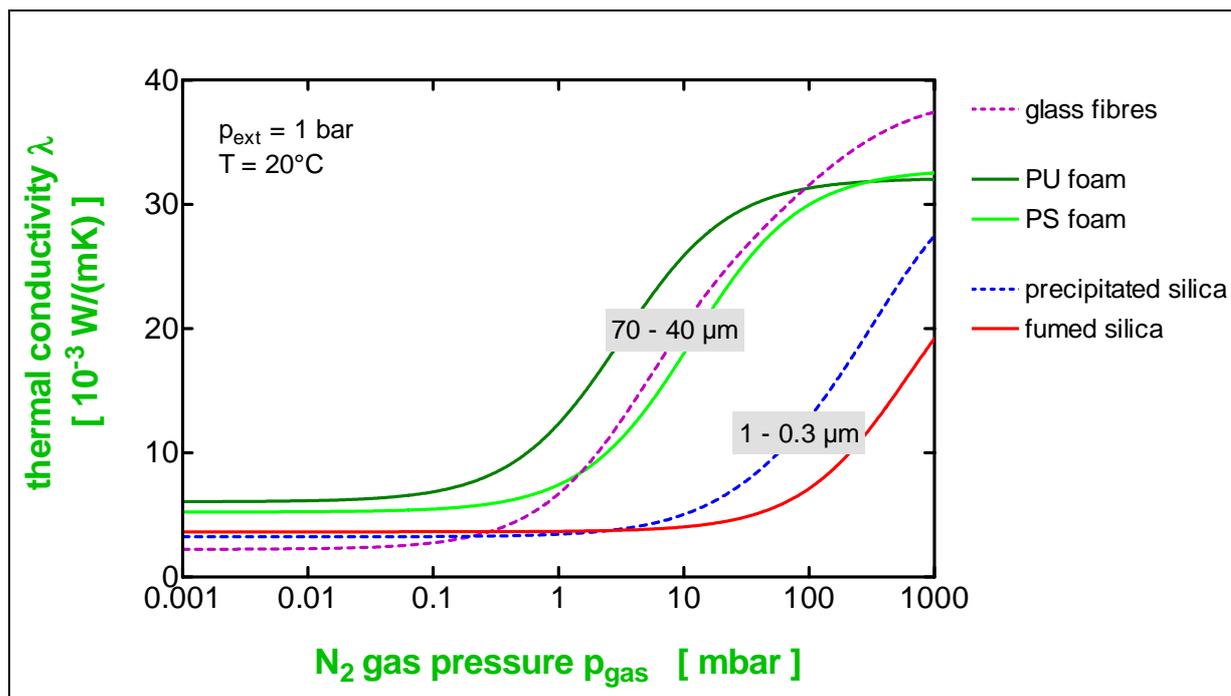


Bild 3: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Füllmaterialien in Abhängigkeit vom Gasdruck (N₂).

In Bild 3 sind die Abhängigkeiten verschiedener mehr oder weniger für den Einsatz in evakuierten Dämmungen optimierter Materialien dargestellt. Die Kurvenverläufe basieren auf am ZAE Bayern durchgeführten Messungen. Der Übergang von einem evakuierten Material, bei dem Beiträge des Gases zur Gesamtwärmeleitfähigkeit zu vernachlässigen sind, zu einem nicht-evakuierten Material bei dem die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Gasdruck konstant wird, erfolgt über zwei bis drei Größenordnungen. In welchem Druckbereich dieser Übergang erfolgt, wird wesentlich von der Größe der (größten) Poren bestimmt. Je feiner das Material, je kleiner die Poren, um so geringer sind die Anforderungen an die Qualität des Vakuums, das erreicht und aufrechterhalten werden muss. So ist bei den pyrogenen Kieselsäuren (fumed silica) bereits ein Gasdruck („Vakuum“) von einigen zig Millibar zur Unterdrückung der Luftwärmeleitfähigkeit ausreichend, während bei den Schäumen und Faserboards ein Gasdruck von etwa 1 mbar unterschritten werden muss. Beachtenswert ist die Tatsache, dass bei den nanostrukturierten pyrogenen Kieselsäuren die Wärmeleitfähigkeit auch im belüfteten Zustand nur etwa halb so groß ist, wie bei den konventionellen Dämmstoffen, ein Umstand, der das technische Risiko im Falle des kompletten Versagens der Vakuumhülle mindert.

4 Hüllmaterialien für Vakuumisulationspaneele

Ausgehend von bekannten evakuierten Isolationen wie Thermoskannen oder Kryogefäßen lässt sich ableiten, dass die dort verwendeten Hüllmaterialien Edelstahl, Aluminium oder Glas prinzipiell auch für flache Vakuumisulationspaneele geeignet sind. Jedoch weisen laminierte Folien und Filme in Bezug auf die Flexibilität im Herstellungsprozess und den Produktionskosten erhebliche Vorteile auf und werden daher im Weiteren eingehender betrachtet. Besonders attraktiv ist die Kombination mit den nanostrukturierten Füllmaterialien, die auch VIP-Produkte mit Funktionsdauern von Jahren oder gar Jahrzehnten erwarten lässt. Bei gleicher Permeationsrate eines Laminats wäre die zu erwartende Funktionsdauer bei VIPs mit Schäumen oder Fasern etwa um einen Faktor 100 kürzer. Es ist zu erwarten, dass weitgehend Pinhole-freie Aluminiumverbundfolien mit Al-Schichtdicken von 8 oder 7 μm den mehrlagigen Kunst-

stoffhochbarrierefilmen mit mehreren nur wenige zig Nanometer „dünnen“ aufgedampften Al-Sperrschichten in Bezug auf die Dichtigkeit überlegen sind. Jedoch ist Aluminium ein hervorragender Wärmeleiter. In Bild 4 ist der zum Teil gravierende Einfluss der Wärmeleitung der Hüllen, aber auch der Spalten zwischen den Paneelen, auf einen über mehrere Paneele gemittelten Wärmedurchgangskoeffizienten U abzulesen. Selbst bei Paneelen mit 1 m Kantenlänge ist dieser Effekt beachtlich. Lamineate mit insgesamt nur etwa 80 nm Aluminiumschichtdicke sind aus wärmetechnischen Gründen daher vorzuziehen.

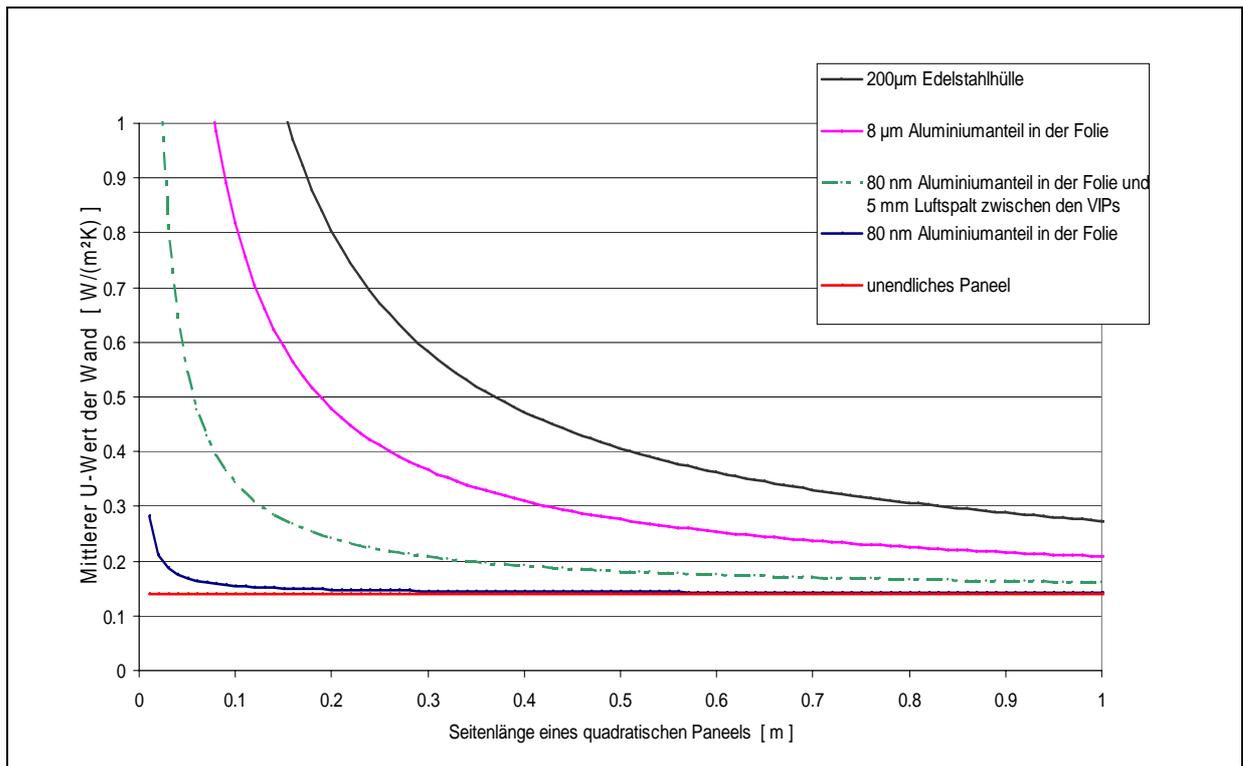


Bild 4: Einfluss von verschiedenen Hüllen und einem Spalt auf den gemittelten Wärmedurchgang für einen Wandaufbau aus 3 cm VIP und 3 cm Polystyrolämmung.

5 Permeation durch Hüllen aus Kunststoffhochbarrierefilmen

Lösungsdiffusion ist ein wesentlicher Transportmechanismus. Er ist unterschiedlich für die verschiedenen Gase der Luft. Insbesondere Wasserdampf wird aufgrund seiner hohen Löslichkeit in Kunststoffen in weitaus größerem Umfang transportiert als die „trockenen“ Bestandteile der Luft. Generell ist eine starke Temperaturabhängigkeit der Permeationsraten zu erwarten. Zudem bestimmen relative Feuchte und treibende Partialdruckdifferenzen den Gastransport (Bild 5).

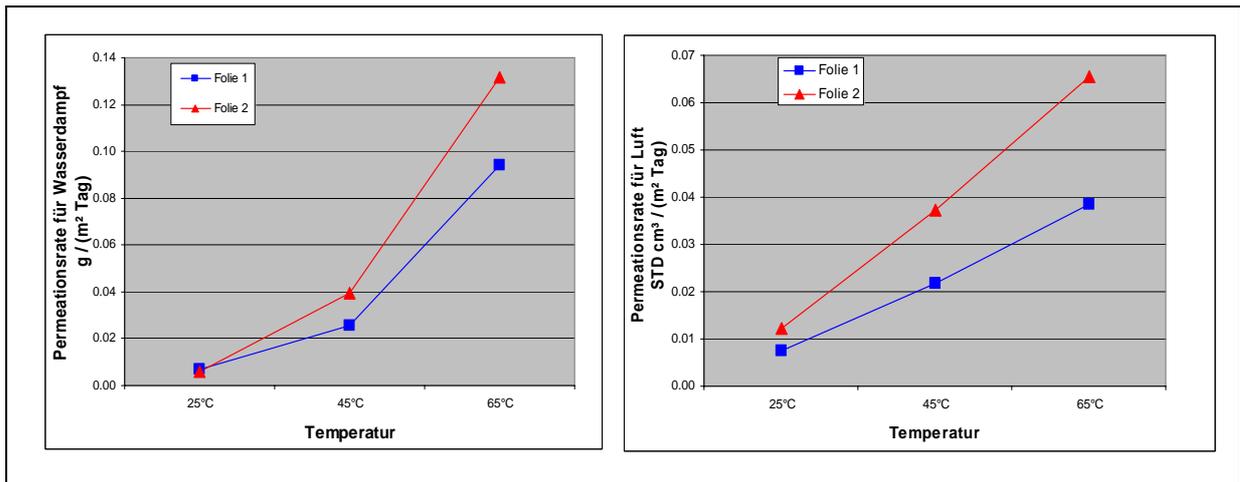


Bild 5: Temperaturabhängigkeit der Permeationsraten in Hochbarrierefilmen (Beispiele).

6 Anforderungen an die Dichtigkeit der Hülle

Bei den nanostrukturierten pyrogenen Kieselsäuren kann man diskutieren, ob der mit der Feuchte im VIP einhergehende Anstieg der Wärmeleitfähigkeit soweit wie möglich unterdrückt werden sollte, oder ob der im Extremfall im Ausgleich mit der Umgebungsfeuchte sich ergebende Einfluss von zusätzlich 1 bis $2 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ toleriert werden kann (siehe Bild 6). Das tolerable Maß für die effektive Wärmeleitfähigkeit zusammen mit der gewünschten Funktionsdauer bestimmen die zulässige Permeationsrate für Wasserdampf.

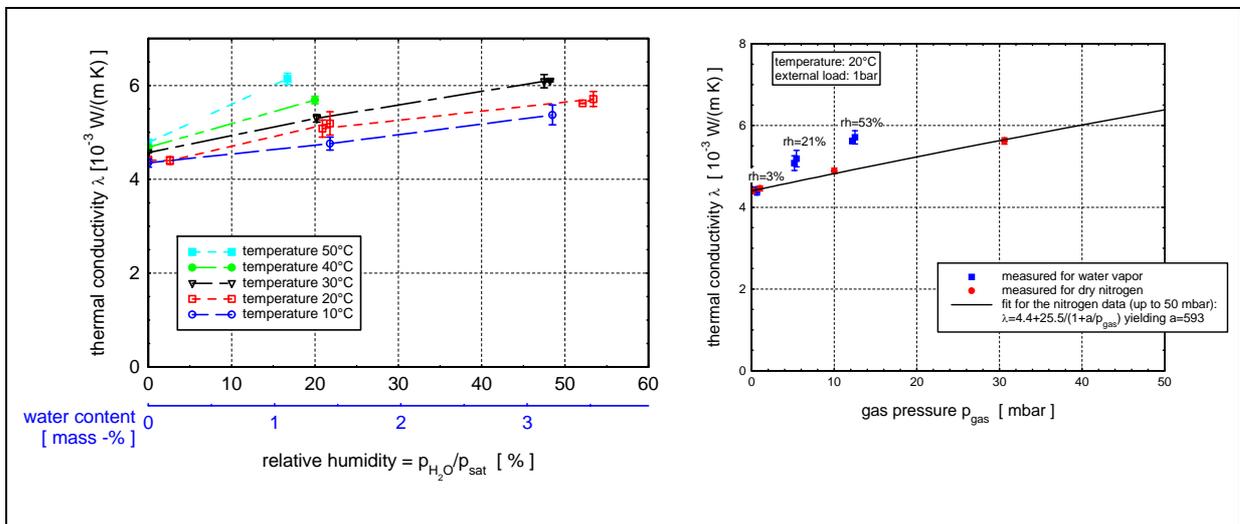


Bild 6: Einfluss von Feuchte und von Luft auf die Wärmeleitfähigkeit in pyrogene-Kieselsäureboards.

Legt man die extremen Anforderungen bzgl. der Funktionsdauer von bis zu 50 Jahren bei Anwendungen im Bauwesen zugrunde und akzeptiert den in Bild 6 rechts dargestellten Anstieg der Wärmeleitfähigkeit, so darf der Druckanstieg in einem Panel maximal 1 mbar pro Jahr betragen, entsprechend einer Permeabilität von max. $0.03 \text{ STDcm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{Tag})$ ohne Berücksichtigung von Einträgen über die Siegelnähte o.ä.. Da die Permeationsraten der Lamine stark von Temperatur und Feuchte beeinflusst werden, müssen auch die klimatischen Bedingungen in der Anwendung berücksichtigt werden.

7 Messungen zur Permeation mit Hilfe von Testpaneelen in Klimaboxen

Für verschiedene Laminare (eine Alu-Folie + zwei metallisierte Filme) wurden Sets von kleinen Testpaneelen in zwei Größen – quadratisch, Kantenlänge 10 cm und Kantenlänge 20 cm, Dicke jeweils 1 cm – hergestellt und über mindestens 6 Monate bei sechs verschiedenen Klimata gelagert: 25°C, 45°C, 65°C, einmal mit unregelmäßiger Feuchtigkeit (im Labor ca. 14 mbar Partialdruck) und einmal mit jeweils 75% rel. Feuchtigkeit (H_2O -Partialdruck: 24 mbar, 73 mbar bzw. 187 mbar)).

In regelmäßigen Abständen wurde die Masse(-zunahme), wie auch der Paneelinnendruck gemessen. Geht man näherungsweise davon aus, dass der eindringende Wasserdampf komplett von dem Kern aus pyrogener Kieselsäure adsorbiert wird und der Anstieg im Gasdruck allein den eindringenden trockenen Gasen zuzuordnen ist, so lassen sich aus den linearen Anstiegen mit der Zeit die Permeationsraten für Wasserdampf und Luft quantifizieren. Im Vergleich der Ergebnisse für kleine und größere Paneele mit unterschiedlichen Oberfläche-zu-Rand-Verhältnissen lässt sich zudem unterscheiden, ob die Permeation überwiegend über die Fläche erfolgt oder über Kanten und Siegelnähte.

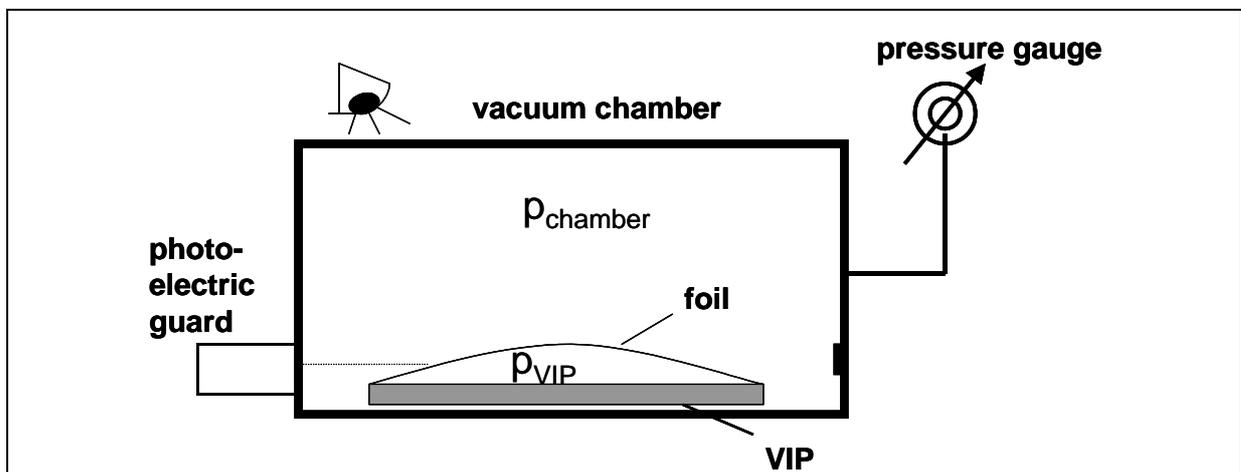


Bild 7: Skizze einer Apparatur zur Bestimmung des Paneelinnendrucks nach dem Folienabhebeverfahren.

Der Paneelinnendruck wird nach dem Folienabhebeverfahren bestimmt. Dabei wird der Druck in einer Vakuumkammer, in der das Testobjekt liegt, kontinuierlich soweit abgesenkt, bis dass dieser geringer ist als der Paneelinnendruck. Die Kräfte aufgrund einer Differenz zwischen dem Paneelinnendruck (Überdruck) und dem Druck in der Vakuumkammer von nur wenigen zehntel Millibar reichen aus, um die Folie anzuheben. Dieses Anheben kann visuell oder mit einem photoelektrischen Detektor erfasst und einem Paneelinnendruck zugeordnet werden.

8 Wesentliche Ergebnisse

Die Permeation für Luft ist stark temperaturabhängig (Arrheniusfunktion mit Aktivierungsenergien von etwa 30 bis 40 kJ/mol), erfolgt bei diesen relativ kleinen Testpaneelen überwiegend über die Siegelnähte und Kanten und ist deutlich größer als aus den flächen- und längenbezogenen Materialdaten theoretisch zu erwarten. Die Permeationsraten sind sehr unterschiedlich für die verschiedenen Laminare.

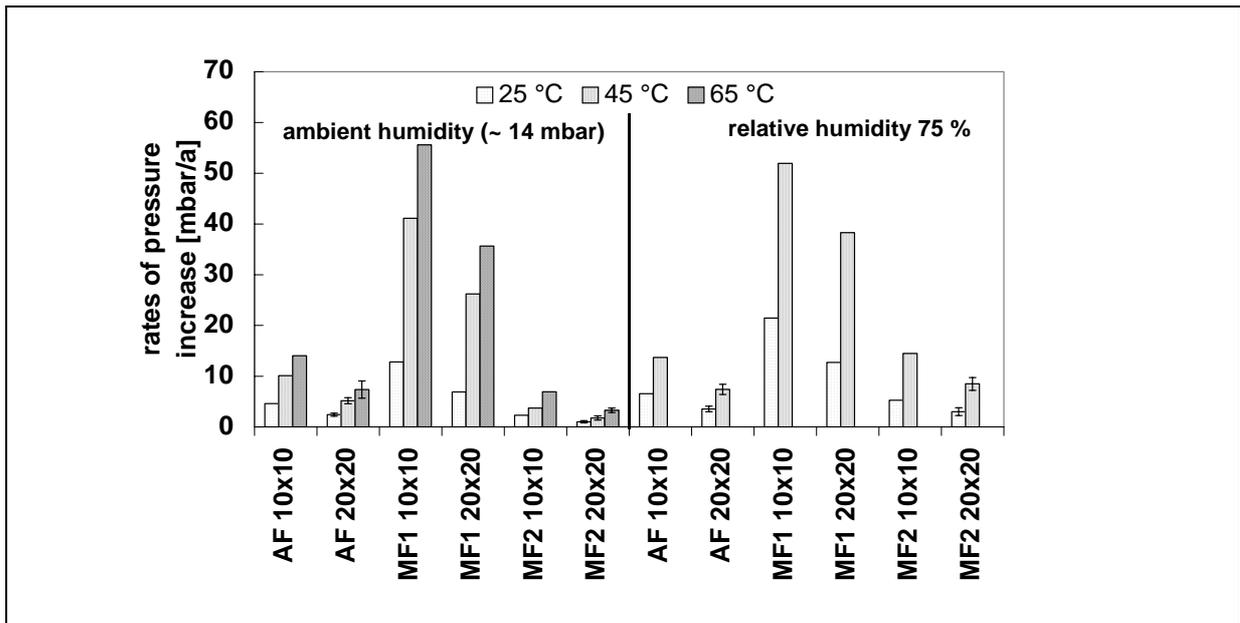


Bild 8: Gemessene Druckanstiegsraten für Paneele mit zwei unterschiedlichen Größen, gelagert in sechs verschiedenen Klimate.

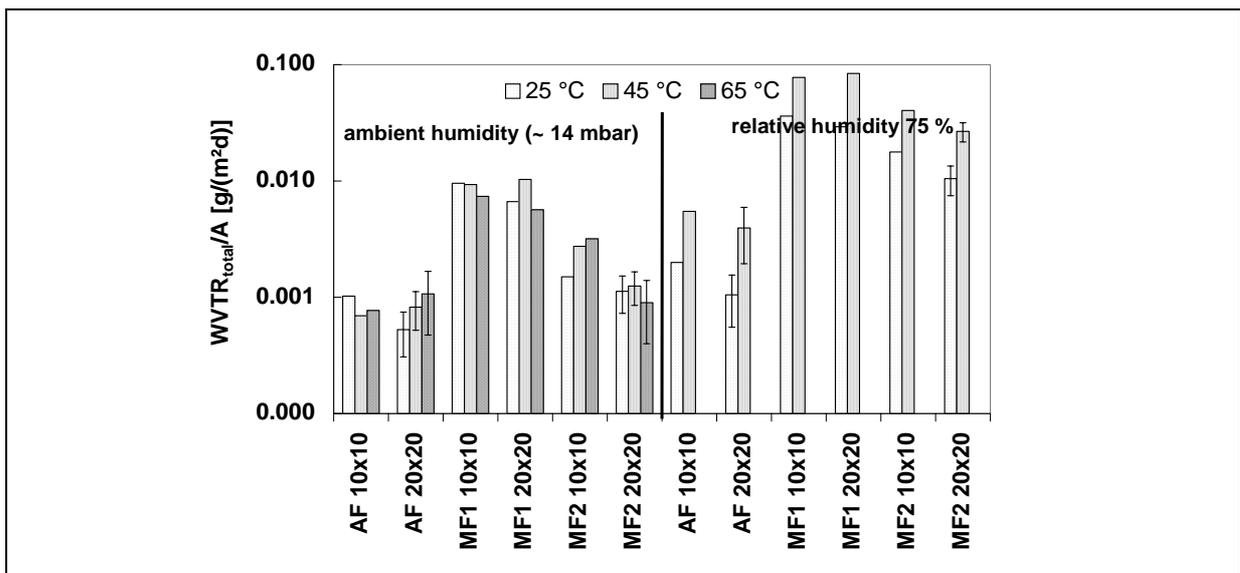


Bild 9: Gemessene Masseanstiegsraten für Paneele mit zwei unterschiedlichen Größen, gelagert in sechs verschiedenen Klimate (! logarithmische Darstellung !).

Die Permeation von Wasserdampf erfolgt im Wesentlichen über die Hüllfläche, Beiträge von den Siegelnähten und Kanten sind häufig nicht oder nur ungenau zu separieren. Die Permeationsraten entsprechen weitgehend den Erwartungswerten. Für die Alu-Folie sind sie etwa um eine Größenordnung niedriger als für die metallisierten Filme.

9 Ursachensuche für unerwartet hohe Permeationsraten

Untersuchungen zeigen, dass die Lamine mit einer großen Anzahl von Fehlstellen wie Gasblasen im PU-Kleber, Demetallisierungen, Delaminierungen und Verunreinigungen durchsetzt sind.

Der Einfluss dieser Fehlstellen ist in den Herstellerangaben bereits berücksichtigt. Möglicherweise ergeben sich hier Ansätze zur Verbesserungen der Dichtigkeit der Lamine.

Visuelle Untersuchungen zeigen darüber hinaus, dass der Laminataufbau im Bereich der Kanten so stark verletzt ist, dass dort an zahlreichen Punkten Licht durchscheint. Die unerwartet hohen Permeationsraten proportional zur Länge der Kanten sind daher vermutlich wesentlich auf Verletzungen im Aufbau der Lamine in den Bereichen hoher mechanischer Beanspruchung zurückzuführen.

Weitere Ursachen mögen sein: nicht optimal eingehaltene Parameter während des Siegelprozesses, Verunreinigungen der Siegelnähte mit Pulvern oder Fasern, oder aber auch Falten in der Hülle im Bereich der Siegelnähte.

10 Ergebnisse aus weiteren Untersuchungen

Für nicht zu kleine Paneele (größer als etwa $50 \times 50 \times 2 \text{ cm}^3$), unter mäßigen klimatische Bedingungen (25°C , 75% r.F.) werden mit aktuellen Hochbarrierefilmen verschiedener Hersteller für die trockenen Bestandteile der Luft (O_2 , N_2) Druckanstiegsraten kleiner als 1 mbar/a erreicht!

Damit ergibt sich die Möglichkeit VIPs mit derartigen Kunststoffhochbarrierefilmen in Kombination mit einem Füllkern aus nanostrukturiertem Material auch im Bauwesen mit extremen Anforderungen bezüglich der Dauerhaftigkeit (50 Jahre) einzusetzen. Zumindest rechnerisch werden die Anforderungen erfüllt.

Tests an VIPs in der baupraktischen Anwendung unter real variierenden klimatischen Bedingungen ergaben gegenüber numerischen Kalkulationen, bei denen die aufgezeichneten Temperatur- und Feuchteverläufe berücksichtigt wurden, geringere Druckanstiege und Massezunahmen.

Für eine einfache Abschätzung von Druckanstieg und Massezunahme über einen Zeitraum von mehreren Jahren lässt sich daher mit den Jahresmittelwerten für Temperatur und Feuchte arbeiten.

11 Zusammenfassung

- In Vakuum-Isolations-Paneelen können extrem niedrige Wärmeleitfähigkeiten erreicht werden: 0,002 bis 0,008 (W/mK).
- Hüllen aus Edelstahl sind ausreichend dicht für alle Füllmaterialien und bieten einen guten Schutz gegen mechanische Verletzung.
- Nanostrukturierte Materialien ermöglichen den Einsatz von Kunststoffbarrierefilmen für VIPs mit einer Funktionsdauer von mehr als 50 Jahren.
- Für eine zuverlässigere Qualität der VIPs und ein geringeres Verletzungsrisiko ist eine bessere mechanische Stabilität der Lamine wünschenswert.
- Noch dichtere Lamine würden den Einsatz weiterer Füllmaterialien mit größeren Poren ermöglichen.
- Für die Verwendung von Hochbarrierefilmen in Kombination mit Schäumen oder Fasern kommt der Dichtigkeit bezüglich Wasserdampf eine verstärkte, wenn nicht sogar entscheidende Bedeutung zu. Je nach Auslegungsgebrauchsdauer sind zusätzlich Getter und/oder Trockenmittel einzusetzen.
- In der praktischen Anwendung ist die besondere Gefahr, die Hülle der Vakuumisulationspaneele zu verletzen, zu beachten. Paneele mit Kunststofflaminat oder Aluminiumverbundfolie müssen mechanisch geschützt werden. Transport, Handling und Verarbeitung sollten nur von eingewiesenem Personal erfolgen.
- Der Wärmebrückenproblematik ist in Verbindung mit Vakuum-Isolations-Paneeelen besonderes Augenmerk zu widmen. In dem gleichen Maße, wie durch den Einsatz von VIPs die Stärke einer Wärmedämmschicht verringert werden kann, verschärft sich das Problem von Wärmebrücken.

Literatur

- U. Heinemann, R. Caps, J. Fricke: *Characterization and optimization of filler materials for vacuum super insulations*. Vuoto scienza e tecnologia, Vol. 18, N. 1-2 1999, p. 43-46.
- R. Caps, U. Heinemann, J. Fricke, P. Randel: *Application of Vacuum Insulation in Buildings*. VIA Symposium: Progress in vacuum insulation, June 2000, Vancouver.
- H. Schwab et al.: *Entwicklung und Anwendung von evakuierten höchsteffizienten Dämmungen für Gebäude (Vakuumdämmung für Gebäude)*. Schlußbericht, Homepage ZAE Bayern: www.zae-bayern.de/a2/deutsch/projekte_vip/d_vakuum_start.html, 2004.
- H. Schwab, U. Heinemann, H.-P. Ebert, J. Fricke: *Permeation of different gases through foils used as envelopes for vacuum insulation panels*. Accepted for publication in: Thermal envelope and building science, 2005.
- H. Schwab, U. Heinemann, H.-P. Ebert, J. Fricke: *Dependence of thermal conductivity on water content in vacuum insulation panels with fumed silica kernels*. Accepted for publication in: Thermal envelope and building science, 2005.
- H. Schwab, U. Heinemann, H.-P. Ebert, J. Fricke: *Prediction for the increase in pressure and water content of vacuum insulation panels (VIP) integrated into building constructions using a model calculations*. Accepted for publication in: Thermal envelope and building science, 2005.
- H. Schwab, U. Heinemann, H.-P. Ebert, J. Fricke: *Prediction of service life time for vacuum insulation panels with fumed silica kernels*. Accepted for publication in: Thermal envelope and building science, 2005.
- H. Schwab, U. Heinemann, H.-P. Ebert, J. Fricke: *Thermal bridges of vacuum insulated building facades*. Accepted for publication in: Thermal envelope and building science, 2005.
- Hans Simmler, Samuel Brunner, Ulrich Heinemann, Hubert Schwab, Kumar Kumaran, Phalguni Mukhopadhyaya, Daniel Quénard, Hébert Sallée, Cornelia Stramm, Martin Tenpierik, Hans Cauberg, Markus Erb: *Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications*, Annex 39 "HiPTI – High Performance Thermal Insulation" of IEA/ECBCS-Implementing Agreement, Report on Subtask A, 2005.
- Armin Binz, André Moosmann, Gregor Steinke, Uwe Schonhardt, Franco Fregnan, Hans Simmler, Samuel Brunner, Karim Ghazi, Reto Bundi, Ulrich Heinemann, Hubert Schwab, Hans Cauberg, Martin Tenpierik, Gudni Johannesson, Thomas Thorsell, Markus Erb, Beat Nussbaumer: *Vacuum Insulation in the Building Sector, Systems and Applications*, Annex 39 "HiPTI – High Performance Thermal Insulation" of IEA/ECBCS-Implementing Agreement, Report on Subtask B, 2005.

Dr. Ulrich Heinemann

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern)

Abteilung Wärmedämmung und Wärmetransport

Am Hubland, 97074 Würzburg,

www.zae-bayern.de / www.vip-bau.de

E-mail: ulrich.heinemann@zae.uni-wuerzburg.de