

Jahresbericht 2002

Vakuumdämmung - Qualitätssicherung und bauphysikalische Grundlagen

Autor	Hans Simmler
beauftragte Institution	EMPA Bauphysik
Adresse	Ueberlandstr. 129, CH-8600 Dübendorf
E-mail	hans.simmler@empa.ch
BFE Vertrags-Nummer	89'410
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Dezember 2001 bis 31. Dezember 2004

ZUSAMMENFASSUNG

Vakuumisolationspaneele (VIP) für Anwendungen im Hochbau auf der Basis eines offenporigen Kernmaterials mit niedrigem Innendruck und einer gasdichten Hülle werden zur Zeit im Markt eingeführt. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit eröffnet ein grosses Anwendungs- und Energiesparpotenzial im Niedrigenergie- und Sanierungsbereich (neue architektonische Lösungen, Raumgewinn).

Zur Umsetzung der VIP-Technik im Baubereich ist der IEA BCS Annex 39 gestartet worden, der in die drei Subtasks A (Grundlagen und Materialien), B (Anwendungsfragen und Systementwicklung) und C (Demonstration) gegliedert ist.

Im Subtask A untersucht die EMPA die Qualität und die Lebensdauer von VIP, die bei Bauanwendungen mit einem Zeithorizont von 30-50 Jahren eine entscheidende Rolle spielen. In der ersten Projektphase läuft der Aufbau eines Innendruck-Messverfahrens und ein Belastungsprogramm zur Untersuchung des Temperatur- und Feuchteinflusses auf die Lebensdauer.

Im Subtask B werden grundsätzliche bauphysikalische Fragen im Zusammenhang mit dem Einsatz von VIP in Gebäuden (Wärmebrücken, Feuchtetransport) geklärt und Temperatur-/Feuchte-Belastungsprofile für grundlegende Konstruktionen erstellt.

Projektziele

Vakuumisolationspaneele (VIP) für Anwendungen im Hochbau auf der Basis eines offenporigen Kernmaterials mit niedrigem Innendruck und einer gasdichten Hülle werden zur Zeit im Markt eingeführt. Die im Vergleich zu konventionellen Wärmedämmstoffen um etwa einen Faktor 5-10 tiefere Wärmeleitfähigkeit eröffnet ein grosses Anwendungs- und Energiesparpotenzial im Niedrigenergie- und Sanierungsbereich (neue architektonische Lösungen, Raumgewinn).

Um der VIP-Technik in geeigneten Anwendungsbereichen zum Durchbruch zu verhelfen, ist der IEA BCS Annex 39 gestartet worden, der in 3 Subtasks gegliedert ist: A Grundlagen und Materialien, B Anwendungsfragen und Systementwicklung, C Demonstration. [www.vip-bau.ch]

Im Subtask A untersucht die EMPA die Qualität und die Lebensdauer von VIP, die bei Bauanwendungen mit einem Zeithorizont von 30-50 Jahren von entscheidender Bedeutung sind. Bauherren, Planer und Hersteller sind auf objektive Informationen über Eigenschaften und Langzeitverhalten von VIP angewiesen, die zur Zeit noch kaum vorhanden sind. Entsprechend gross ist die Unsicherheit und die Zurückhaltung bei der Anwendung von VIP. Die EMPA hat sich deshalb folgende Ziele gesetzt:

- Definieren und Anwenden von VIP-Qualitätsprüfverfahren.
- Entwickeln und Verifizieren von (beschleunigten) Alterungsverfahren für Paneele und Untersuchung des Langzeitverhaltens von VIP
- Erarbeiten von experimentellen und statistischen Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit und zur Lebensdauerprognose von VIP
- Optimieren von Produkteigenschaften in Zusammenarbeit mit Herstellern

Primäre Ziele für die erste Projektphase sind die Entwicklung einer Innendruck-Messtechnik, der Aufbau der Zusammenarbeit mit Herstellern und im Rahmen von IEA BCS Annex 39, die Definition von geeigneten Belastungsprogrammen für Qualitätstests und Lebensdauerabschätzungen, Beschaffung von geeigneten Materialien für erste Tests.



Fig. 1: VIP-Paneele für den Baubereich bestehen aus einem nanoporösen Kernmaterial (z.B. pyrogene Kieselsäure) mit niedrigem Innendruck und einer möglichst gasdichten Hüllfolie (meist laminierte Aluminiumfolie oder metallbedampfte Kunststofffolie) mit verschweissten Rändern.

Das thermische und hygrische Verhalten von Bauteilen mit VIP unterscheidet sich von Konstruktionen mit herkömmlicher Wärmedämmung und dünnen (wärmetechnisch irrelevanten) Dampfsperren. Damit die neuen Materialien im Baubereich richtig eingesetzt werden können, werden in Subtask B grundsätzliche bauphysikalische Fragen im Zusammenhang mit dem Einsatz von VIP geklärt und Belastungen der Paneele in verschiedenen Konstruktionsarten bestimmt. Dies dient der Lebensdauerprognose für eingebaute VIP auf der Basis von Alterungsuntersuchungen im Labor.

Die Ziele im Einzelnen sind:

- Klären grundsätzlicher bauphysikalischer Fragen im Zusammenhang mit dem Einsatz von VIP in Gebäuden: Wärmebrücken durch den Randverbund, linien- und punktförmige Plattenstöße, zweischichtige VIP-Verlegung usw. Auswirkungen von VIP auf den Feuchtetransport, das Kondensationsrisiko und thermische Spannungen in Konstruktionen.
- Ausarbeiten von Empfehlungen und Anwenden der Berechnungsgrundlagen auf ausgewählte VIP-Konstruktionen sowie Erstellen von Temperatur-/Feuchte-Belastungsprofilen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

QUALITÄT UND LEBENSDAUER

Um geeignete Qualitätsmessgrößen und –messverfahren zu entwickeln, muss von den Mechanismen des Wärmetransports in einem VIP ausgegangen werden. Der Hauptunterschied zwischen einem herkömmlichen Dämmstoff und einem VIP ist das "Ausschalten" der Wärmeleitung durch das Gas zwischen dem Festkörpergerüst (Fig. 2). Die Wärmeleitfähigkeit in Funktion des Gasdrucks p_{Gas} kann wie folgt beschrieben werden [1]:

$$\lambda = \lambda_{\text{evakuiert}} + \frac{\lambda_{\text{Gas}}}{1 + p_{1/2} / p_{\text{Gas}}}$$

Für die heute auf den Markt kommenden Produkte mit einem nanoporösen Kernmaterial aus pyrogener Kieselsäure (gemessene Werte $\lambda_{\text{evakuiert}} = 3.6 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $p_{1/2} = 630 \text{ Pa}$) ergibt sich die in Fig. 3 dargestellte Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Daraus ist ersichtlich, dass für das Erreichen der tiefsten Wärmeleitfähigkeitswerte der Vorvakuumbereich ausreicht. Bei Normaldruck liegt die Wärmeleitfähigkeit mit etwa $18 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ unter dem Wert für freie Luft ($25 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$), da die Stossrate zwischen den Gasmolekülen durch die kleine Porenstruktur reduziert wird. Fig. 3 zeigt auch, dass die Wärmeleitfähigkeit bis zu Werten von rund 35 hPa nur schwach druckabhängig ist.

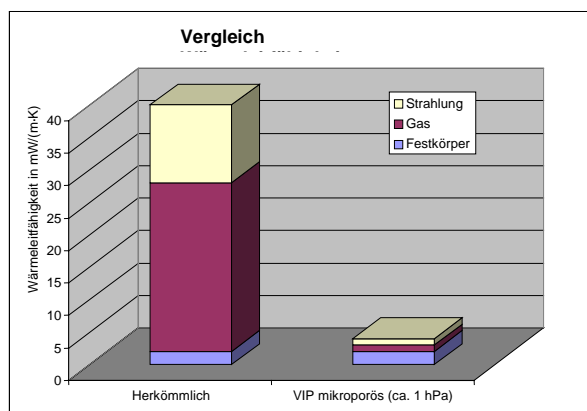


Fig. 2: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit eines herkömmlichen Dämmstoffs und eines VIP

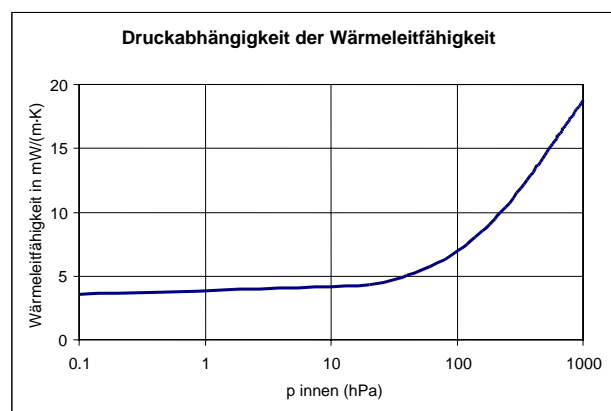


Fig. 3: Wärmeleitfähigkeit von VIP mit pyrogener Kieselsäure in Funktion des Innendrucks

Diese vorteilhafte Eigenschaft bedeutet, dass sich die Wärmedämmwirkung eines VIP während eines Zeitraums von über 30 Jahren nicht wesentlich verschlechtert, falls der Druckanstieg kleiner bleibt als etwa 1 hPa pro Jahr. Andererseits folgt daraus, dass die Wärmeleitfähigkeit keine empfindliche Messgröße zur Beobachtung des langsamen Druckanstiegs in einem VIP ist.

Aus diesem Grund wird an der EMPA für Qualitäts- und Lebensdauerversuche an VIP eine Messeinrichtung zur zerstörungsfreien Bestimmung des Innendrucks entwickelt. Das Prinzip beruht darauf, dass sich beim Absenken des Luftdrucks in einer Vakuumkammer die Hüllfolie eines VIP vom Kernmaterial löst, sobald der Innendruck im VIP unterschritten wird. Vorversuche haben gezeigt, dass damit eine Auflösung im Bereich von 0.1 mbar (hPa) erreicht werden kann (Fig. 4). Zur Zeit der Berichterstellung wird das Verfahren automatisiert und an Proben mit verschiedenen Abmessungen und Hüllfolien getestet.

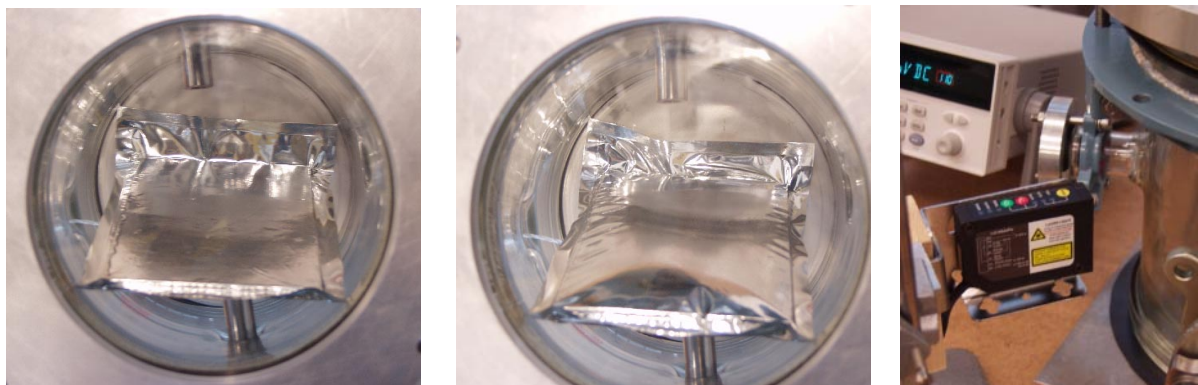
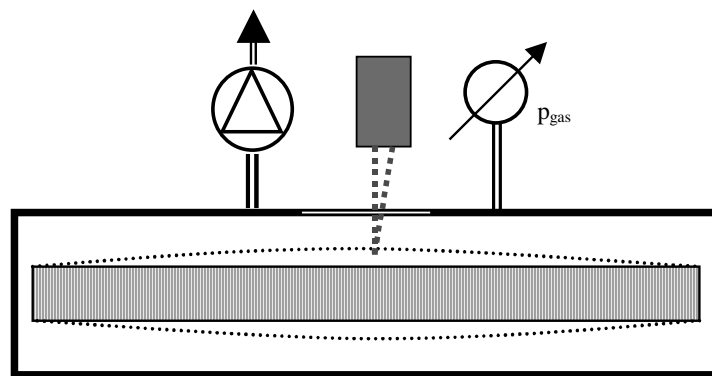


Fig. 4: Prinzip der Innendruckbestimmung an einem VIP mit flexibler Hüllfolie (oben). Die Fotos unten zeigen ein VIP-Muster in einer Vakuumkammer. Links ist der Umgebungsdruck höher, in der Mitte tiefer als der Innendruck. Rechts: Lasermessgerät und Datenlogger für die Druck-/Positionsmessung.

Ein wichtiger Aspekt der Startphase war die Einarbeitung in den Themenkreis Qualitätsprüfung / Zuverlässigkeit / Lebensdauerbestimmung. Ein VIP ist ein Bauteil, das im Prinzip mit Methoden der Zuverlässigkeitstechnik untersucht werden kann. Qualitativ kann eine Anzahl von Bauteilen durch eine Badewannenkurve [2] beschrieben werden (Fig. 5). Die erste Phase mit möglicherweise höherer Ausfallrate kurz nach der Produktion ("Geburtsdefekte") ist auf Probleme beim Herstellungsprozess zurückzuführen. Diese treten bei VIP noch relativ häufig auf. Nach einer möglichst langen Phase mit einer geringen Rate an zufälligen Ausfällen steigt die Ausfallrate oft aufgrund der "Alterung" des Systems an.

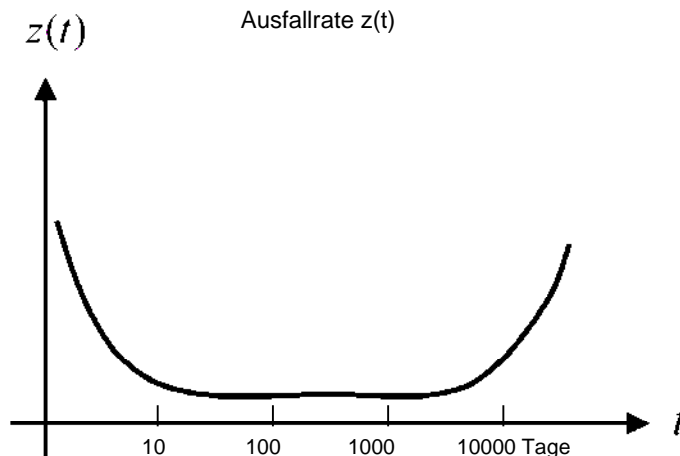


Fig. 5: Badewannenkurve zur qualitativen Beschreibung von Ausfällen bei Bauteilen. In der ersten Phase treten mögliche "Geburtsdefekte" auf. In der letzten Phase ist "Alterung" für eine erhöhte Ausfallrate verantwortlich.

Als Kriterium für das Lebensende ("end-of-life") wird meist das Überschreiten von festgelegten Grenzwerten physikalischer Eigenschaften definiert. Für ein VIP eignet sich als Parameter der Innendruck. Die Lebensdauer eines Panels kann somit als Zeitdauer bis zur Überschreitung eines Innendrucks von z.B. 100 hPa für Kieselsäure-Kernmaterial definiert werden. Verschiedene Faktoren tragen zum Erreichen des Grenzwertes bei:

- Anfangswert des Innendrucks (gegeben durch Produktionsprozess, Streuung?)
- Gasdurchlässigkeit der Hüllfolie (ev. erhöht durch Mikrodefekte und Materialalterung)
- Gasdurchlässigkeit der Randverschweißung (ev. erhöht durch unreine Nahtflächen, nicht optimale Prozessparameter beim Verschweißen oder Materialalterung)
- Ausgasung des Kernmaterials oder der Hüllfolie
- Sorptionseigenschaften des Kernmaterials oder von eingebauten "Gettern"
- Kriechen (irreversible Stauchung) des Kernmaterials infolge der hohen Druckbelastung (der Luftdruck von 1 bar entspricht 10'000 kg/m²)

Das Zeitverhalten des Innendrucks ist eine Überlagerung dieser Effekte und hängt stark von äusseren Einflüssen wie Temperatur- und Feuchtebedingungen ab. Zur systematischen Untersuchung dieser Zusammenhänge hat die EMPA ein umfassendes Belastungsprogramm an zwei VIP-Produkten definiert und die Probenlieferung mit dem zur Zeit wichtigsten VIP-Hersteller für den Schweizer Markt vereinbart.

Mittels Messungen des Innendruckverlaufs und der Feuchtigkeitsaufnahme bei verschiedenen Temperatur- und Feuchtebedingungen werden Zuverlässigkeitsfunktionen (= Wahrscheinlichkeit, den Innendruckgrenzwert bis zu einer bestimmten Zeit nicht zu überschreiten) bestimmt und Beschleunigungsfaktoren durch die Anpassung analytischer physikalisch-/chemischer Alterungsmodelle ermittelt. Statistische Aspekte und frühe Ausfälle werden mit untersucht, indem jeweils eine Kleinserie den gleichen Bedingungen ausgesetzt wird. Weniger umfangreiche Vergleichsversuche werden an weiteren Produkten durchgeführt. Neben konstanter Temperatur-/Feuchteexposition werden auch einzelne zyklische Belastungen im zulässigen Bereich laut Hersteller gefahren.

In IEA Annex 39 wurden als Referenzbedingungen für Innenanwendungen 30°C / 90 % r.F. und für temperatur-/feuchteexponierte Anwendungen 80°C / 80 % r.F. definiert. Vor allem beim zweiten Satz von Klimabedingungen werden Hinweise auf Ausfallmechanismen, also ev. eine Häufung von raschen Ausfällen, erwartet. Anhand von Permeationsmessungen an Folien und Schweißnähten und eventuell weiterer Methoden zur Lokalisierung von Fehlstellen werden Ursachen für hohe Leckraten und/oder Ausfälle untersucht und Hinweise zur Verbesserung der Qualität von VIP erarbeitet.

GRUNDSÄTZLICHE ANWENDUNGSFRAGEN

Ein Paneel mit gasdichter Hüllfolie und evakuiertem Kernmaterial ist grundsätzlich kein quasi homogenes Material wie ein herkömmlicher Dämmstoff, sondern ein Bauteil mit Analogien zu einer Isolierverglasung (IV). Glas- oder Metallschichten können als gasdichte Flächen bezeichnet werden, haben aber den Nachteil, dass durch den erforderlichen Randverbund relativ grosse Wärmebrücken entstehen. Hüllmaterialien auf Kunststoffbasis sind weniger kritisch betreffend Wärmebrücken, weisen aber immer eine gewisse Gasdurchlässigkeit auf. An der EMPA wurden aus Wärmedurchgangsmessungen an Paneelen mit und ohne Stossfugen folgende Linienleitwerte L^{2D} für ein 20-mm-VIP mit Aluminiumverbundfolie und mit metallisierter Kunststoffolie bestimmt:

Hüllfolientyp	L^{2D} W/(m·K)
Aluminiumverbundfolie	0.0800
Metallisierte Mylarfolie	0.0065

Durch Kombination dieser Werte mit der VIP-Wärmeleitfähigkeit von rund 0.004 W/(m·K) resultieren die in Fig. 6 dargestellten effektiven Wärmeleitfähigkeiten einschliesslich Randverlust für Paneele mit zwei unterschiedlichen Abmessungen. Mit Aluminiumverbundfolien entstehen erhebliche Randverluste, die nur durch grosse Abmessungen in beiden Richtungen reduziert werden können. Bei der Verwendung von metallisierten Kunststoffolien spielen Randeffekte eine weniger grosse Rolle.

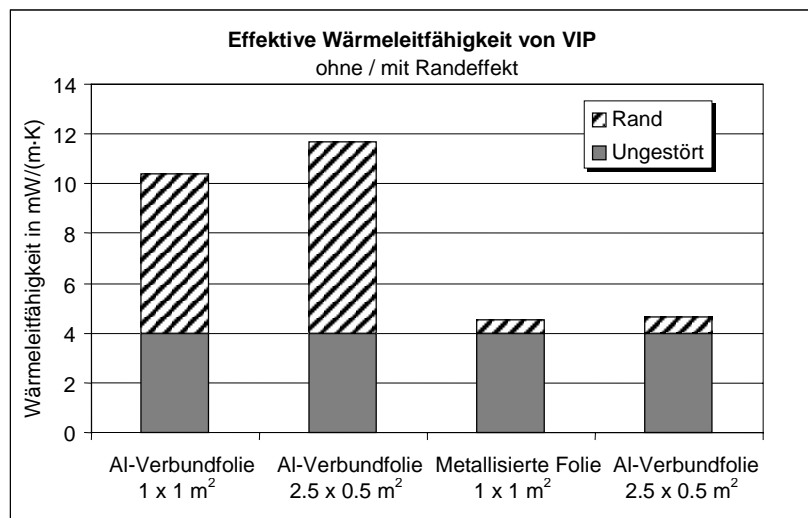


Fig. 6: Effektive Wärmeleitfähigkeit von VIP mit 2 unterschiedlichen Hüllfolien und Abmessungen, berechnet aufgrund der gemessenen linearen Leitwerte am Rand.

Um die Auswirkungen solcher Wärmebrücken in einer Anwendung zu demonstrieren, wurde der Wärmeverlust einer innen isolierten Wandocke (30 cm Backstein) durch eine 3-dimensionale Finite-Differenzen-Berechnung mit einer Temperaturdifferenz von 20 K bestimmt. Die VIP-Abmessungen waren 50 x 50 x 2 cm³, die Dicke der Hülle 10 µm. Für die Hülle wurden verschiedene Wärmeleitfähigkeiten eingesetzt. Wegen der geringen Schichtdicke wurden für das Gitter 330'000 Knoten verwendet (Fig. 7). Die Erhöhung des Wärmeverlustes durch wärmeleitende Hüllmaterialien ist in Fig. 8 dargestellt.

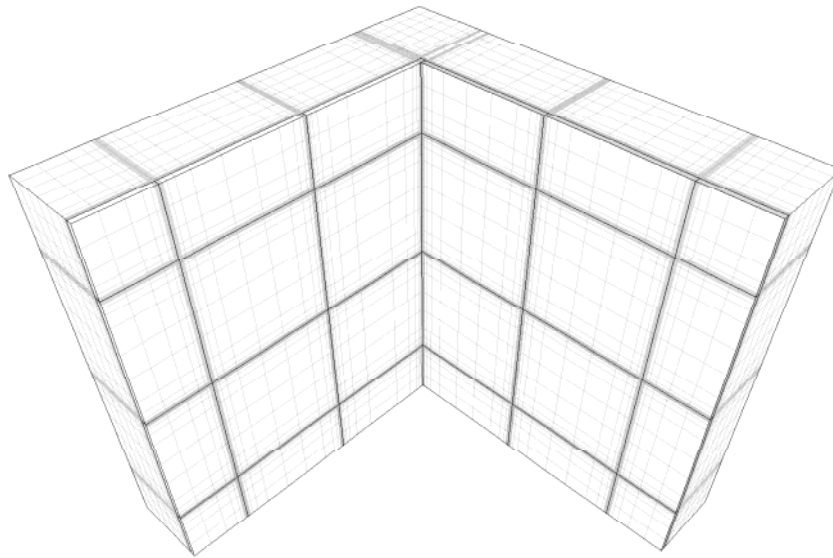


Fig. 7: Gitternetz zur Berechnung des Wärmestroms durch eine Wandecke mit VIP-Innenisolation

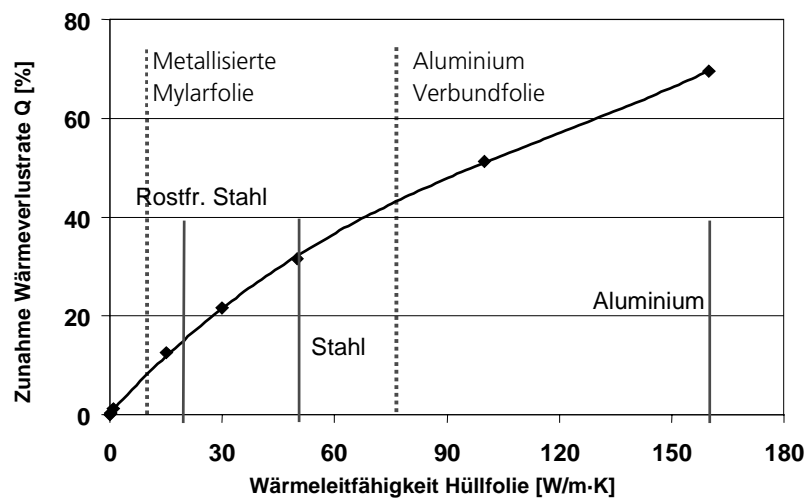


Fig. 8: Relative Zunahme des Wärmeverlustes durch eine VIP-isolierte Wandecke (Paneeldimensionen $50 \times 50 \times 2 \text{ cm}^3$) für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten der $10 \mu\text{m}$ dicken Hüllfolie resp. für zwei gemessene Folien. Am Nullpunkt entspricht sie dem Kernmaterial mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0.005 W/(m·K) .

Die Berechnungen zeigen, dass bei metallischen Hüllmaterialien ein nicht vernachlässigbarer Zusatzverlust durch den Randverbund auftritt. Bei der Aluminiumfolie treten zwischen Paneelmitte und -stößen Temperaturdifferenzen von etwa 5 K auf, was sich feuchtetechnisch – insbesondere in der Ecke – negativ auswirken kann.

Nationale Zusammenarbeit

Die Schweizer Projektpartner im Rahmen von IEA Annex 39 – Dr. Eicher+Pauli AG / Fachhochschule beider Basel, Institut für Energie / EMPA, Abteilung Bauphysik – haben sich in der ARGE *vip-bau.ch* zusammen geschlossen. *www.vip-bau.ch* ist auch die gemeinsame Internetplattform der Schweizer Projektpartner.

vip-bau.ch erstellte eine Adressdatenbank und organisierte im September 2002 einen VIP-Workshop in Basel. An der gut besuchten Veranstaltung nahmen Vertreter aus den Bereichen VIP-Hersteller, Dämmstoffhersteller, Bauteilentwickler, Bauingenieure und Planer teil. Die EMPA informierte über ihre Ziele und Aktivitäten im VIP-Projekt.

Am 12. Schweizerischen Statusseminar "Energie- und Umweltforschung im Bauwesen" stellten die Schweizer Projektpartner ihre Aktivitäten in einem Übersichtsreferat und einem Beitrag im Tagungsband vor [3].

Mit verschiedenen Schweizer VIP-Lieferanten besteht ein regelmässiger Kontakt. Innerhalb des Schweizer Projekts wird eine enge Zusammenarbeit vor allem im Bereich Bauteilberechnung und -entwicklung stattfinden.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit wird innerhalb von IEA Annex 39 koordiniert. Die EMPA organisierte im Juli 2002 ein informelles Treffen von Teilnehmenden und Interessierten in Subtask A und beteiligte sich am 2. Meeting im Oktober in Basel. An diesen Veranstaltungen konnte das weitere Vorgehen vor allem im Bereich Qualitätsbeurteilung und Lebensdaueruntersuchungen diskutiert und konkretisiert werden.

Bei den Veranstaltungen konnten auch gute Kontakte zu anderen Instituten aufgebaut werden. Im Anschluss an das IEA Meeting folgte ein Besuch beim ZAE Würzburg (D), dem Hochschulinstitut mit der grössten Erfahrung im Bereich Vakuumisolation. Ein guter Kontakt besteht auch zu VIP-Herstellern in Deutschland, insbesondere dem gegenwärtig wichtigsten Produzenten für den Schweizer Markt.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die ersten Meetings im Rahmen von IEA Annex 39 haben gezeigt, dass das EMPA-Projekt in den Bereichen Qualität/Lebensdauer und Anwendungsfragen auf grosses Interesse stösst. Die EMPA-Ziele werden in dieser Form nicht durch andere Institute bearbeitet und stellen eine sinnvolle Ergänzung zu den Beiträgen anderer IEA-Partner dar.

Im Berichtsjahr wurden verschiedene Kontakte mit Instituten und Herstellern/Lieferanten hergestellt und an Veranstaltungen informiert.

Wegen Verzögerungen bei der Personalrekrutierung erfolgte der Einstieg in die wissenschaftliche Projektbearbeitung erst nach der Sommerpause 2002. Im Bereich Qualität/Lebensdauer wird nach erfolgreichen Vorversuchen zur Zeit ein Innendruck-Messverfahren entwickelt, das im 1. Quartal 2003 einsatzbereit sein wird. Anschliessend wird ein umfassendes Temperatur-/Feuchtebelastungsprogramm mit zwei Referenzprodukten als Basis für Lebensdauerabschätzungen durchgeführt.

Im Bereich der Anwendungsfragen werden ab Anfang 2003 ebenfalls zusätzliche personelle Ressourcen zur Verfügung stehen, um grundsätzliche Anwendungsfragen messtechnisch und numerisch weiter zu bearbeiten. Bauteilberechnungen werden anhand von konkreten Projekten in Zusammenarbeit mit Entwicklern und Lieferanten durchgeführt werden. Es ist geplant, das Verhalten von Temperaturen und Feuchtigkeiten in einer VIP-Konstruktion über einen längeren Zeitraum in einem Gebäude zu messen.

Referenzen

- [1] R. Caps, U. Heinemann et al.: ***Application of Vacuum Insulations in Buildings***, Symposium "Progress in Vacuum Insulation", Vancouver, June 2000
- [2] Meeker, W.Q., Escobar, L.A.: ***Statistical Methods for Reliability Data***, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998
- [3] A. Binz, M. Erb, Hp. Eicher, H. Simmler, K. Ghazi Wakili: ***Vakuum-Dämmung im Baubereich / vip-bau.ch***, 12. Schweizerisches Statusseminar "Energie-und Umweltforschung im Bauwesen", Zürich, September 2002