

Jahresbericht 2003

Vakuumdämmung - Qualitätssicherung und bauphysikalische Grundlagen

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

ZUSAMMENFASSUNG

Im Hochbau werden zunehmend Vakuumisulationspaneele (VIP) auf der Basis eines mikroporösen Kernmaterials mit niedrigem Innendruck und gasdichter Hülle eingesetzt. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit ermöglicht geringe Dämmschichtdicken und eröffnet somit ein grosses Anwendungspotenzial für neue architektonische Lösungen im Niedrigenergie- und Sanierungsbereich.

Die Umsetzung der VIP-Technik im Baubereich wird durch den IEA Annex 39 "High Performance Thermal Insulation Materials for Buildings" begleitet. 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 spielt. 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. Nach der Entwicklung eines Innendruck-Messverfahrens liegen erste Resultate der Untersuchung von Temperatur- und Feuchteeffekten auf die Lebensdauer vor. Betreffend wärmetechnischer Eigenschaften wurden Wärmebrückeneffekte durch den Rand von VIP-Hüllen und Wärmedurchgangseigenschaften verschiedener VIP-Konstruktionen berechnet.

Projektziele

Vakuumisulationspaneele (VIP) haben im Vergleich zu konventionellen Wärmedämmstoffen eine um etwa den Faktor 5-10 tiefere Wärmeleitfähigkeit und eröffnen durch die geringe erforderliche Dämmschichtdicke neue architektonische Lösungen im Niedrigenergie- und Sanierungsbereich [1]. VIP bestehen aus einem mikroporösen Kernmaterial mit niedrigem Innendruck in einer weitgehend gasdichten Hülle. Als Hüllen werden normalerweise mehrschichtig metallisierte Polymerfolien oder kunststofflamierte Aluminiumfolien thermisch verschweisst (Fig. 1).

Obwohl bereits verschiedene Produkte auf dem Markt sind, ist die VIP-Anwendung im Baubereich noch mit Unsicherheiten und Risiken behaftet [1]. So kann die entscheidende Frage der Lebensdauer, die von den Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchtigkeit in einer bestimmten Anwendung abhängt, nicht eindeutig beantwortet werden. Bauherren, Planer, Behörden und Hersteller sind dringend auf solche Informationen angewiesen. Auch die Berechnung von wärme- und feuchtetechnischen Eigenschaften unterscheidet sich stark vom Bisherigen: Die Kombination einer sehr dünnen, sehr gut wärmeleitenden Schicht mit dem hoch isolierenden Kernmaterial ergibt neue Effekte, die in herkömmlichen Rechenmethoden oft nicht korrekt berücksichtigt werden.

Zur Klärung solcher Fragen ist der IEA Annex 39 "High Performance Thermal Insulation Materials for Buildings" gestartet worden, der in 3 Subtasks gegliedert ist: A Grundlagen und Materialien, B Anwendungsfragen und Systementwicklung, C Demonstration. Die EMPA untersucht in Subtask A die Qualität und die Lebensdauer von VIP und hat sich 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.

Ziele für das Berichtsjahr sind die Entwicklung einer Innendruck-Messtechnik, der Aufbau der Zusammenarbeit mit Herstellern und im Rahmen von IEA Annex 39 und die Durchführung von Temperatur-/Feuchtebelastungsprogrammen für Qualitätstests und Lebensdauerabschätzungen.



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

In Subtask B werden grundsätzliche bauphysikalische Fragen im Zusammenhang mit dem Einsatz von VIP geklärt und thermisch-/hygrische Lastprofile der Paneele in verschiedenen Konstruktionsarten bestimmt. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage zur Lebensdauerprognose für eingebaute VIPs 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.

Im Berichtsjahr werden grundsätzliche wärmetechnischen Fragen wie die Bestimmung linearer Randleitwerte von Stossfugen für verschiedene Hüllfolien und Schichtdicken geklärt. Daneben werden die Wärmedurchgangseigenschaften einzelner Konstruktionen numerisch untersucht.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

QUALITÄT UND LEBENSDAUER

Der Hauptunterschied zwischen einem herkömmlichen Dämmstoff und einem VIP ist das "Ausschalten" der Wärmeleitung durch das Gas zwischen dem Festkörpergerüst. Entsprechend ist die Zunahme des Innendrucks (Gasdiffusion, Beschädigung) ein kritischer Alterungseffekt für VIP. Für das normalerweise verwendete Kernmaterial, gepresste pyrogene Kieselsäure (SiO_2) mit Porengrößen im Bereich von $0.1 \mu\text{m}$, bleibt die Wärmeleitfähigkeit bis etwa 40 hPa unter $0.005 \text{ mW}/(\text{m K})$ an (Fig. 2).

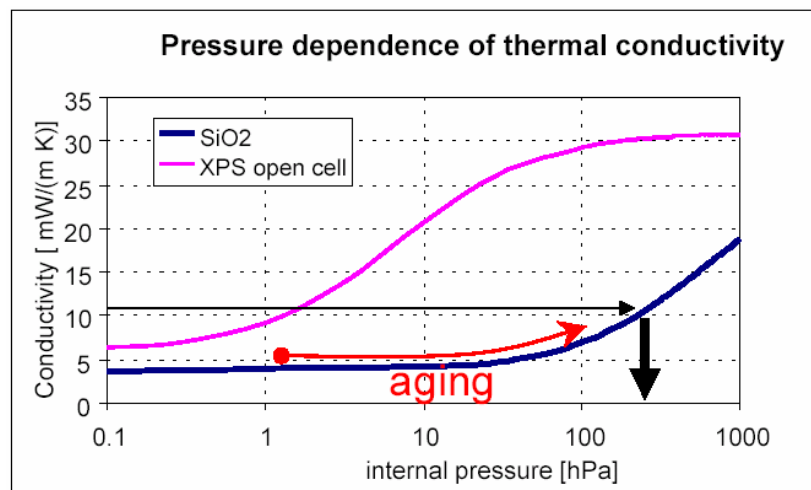


Fig. 2: Wärmeleitfähigkeit von VIP als Funktion des Innendrucks.

Die Wärmedämmwirkung eines VIP wird sich während eines Zeitraums von rund 40 Jahren nicht wesentlich verschlechtern, falls der Druckanstieg kleiner bleibt als etwa 1 hPa pro Jahr. Es folgt auch, dass die Wärmeleitfähigkeit kein geeigneter Indikator ist für den langsamen Druckanstieg in VIPs. Deshalb wurde im Berichtsjahr eine Messeinrichtung zur zerstörungsfreien Bestimmung des Innendrucks entwickelt. Das Prinzip beruht darauf, dass sich beim Absenken des Luftdrucks in einer Vakuumkammer die flexible Hülle vom Kernmaterial löst, sobald der Innendruck im VIP unterschritten wird. Das Ablösen der Folie wird mit einer Laserdistanzmessung gemessen und mit der Druck-

messung korreliert. Die Tests haben gezeigt, dass damit eine Auflösung im Bereich von 0.1 hPa erreicht werden kann (Fig. 3).

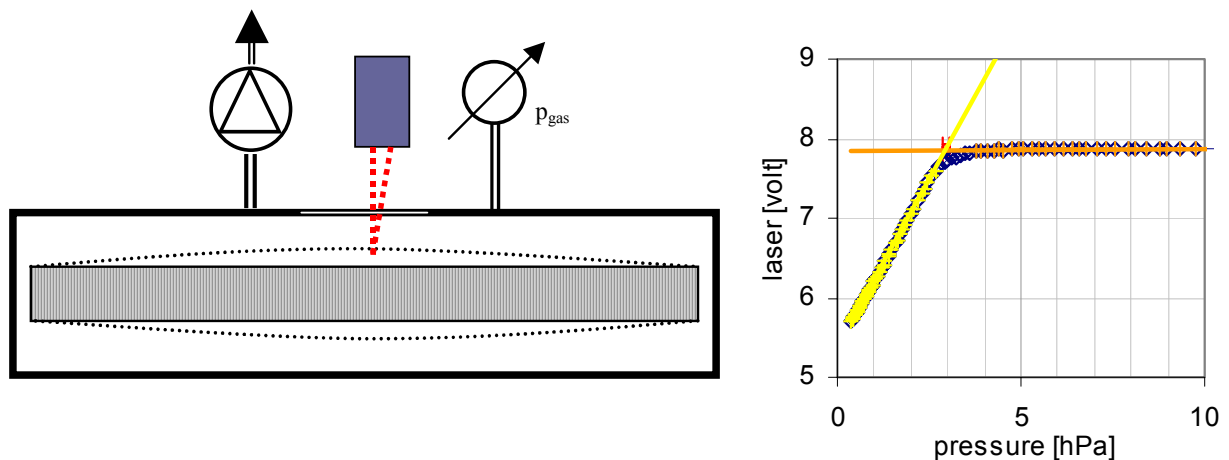


Fig. 3: Prinzip der Innendruckbestimmung an einem VIP mit flexibler Hüllfolie (links) und Auswertung des Weg-Druck-Diagramms zur Bestimmung des "kritischen" Drucks (rechts).

Erste Alterungsversuche bei verschiedenen Temperatur-/Feuchtebedingungen wurden an VIPs mit metallisierter Kunststoffolie durchgeführt [2]. Diese Hüllfolien werden heute fast ausschliesslich eingesetzt, weil damit nur kleine Wärmebrücken an den Rändern entstehen. Um den Bereich von Effekten abzustecken, wurden neben dem Normalklima 23°C / 50 % r.F. auch bei 30°C / 90 % r.F. und bei 80°C / 80 % r.F. (konstant und zyklisch) getestet (Fig. 4). Schlussfolgerungen sind, dass Feuchtebelastung insbesondere bei erhöhter Temperatur zu kurzen, für den Baubereich nicht geeigneten Lebensdauern führt. In trockener Umgebung im Bereich von Umgebungstemperaturen bis etwa 30°C kann bei dampfdruckentspanntem Einbau und Dimensionen ab etwa 50 cm x 50 cm eine Lebensdauer im Bereich von 50 Jahren erwartet werden. Dies setzt selbstverständlich die Vermeidung von anderen Belastungen wie Schädigungen beim Einbau sowie mechanische oder chemische Lasten im eingebauten Zustand voraus.

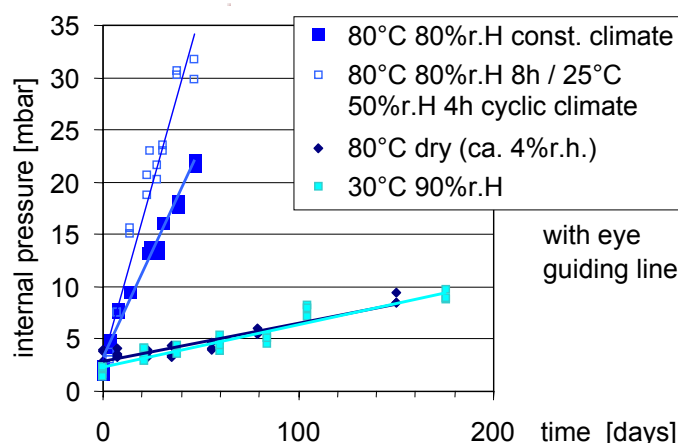


Fig. 4: Zeitliche Innendruckzunahme von VIP mit einer Hülle aus einer mehrschichtigen, dreifach metallisierten Kunststoffolie.

Die Auswirkungen verschiedener Hüllfolien und Dimensionen wurden an drei Produkten bei 65°C / 75 % r.F. untersucht (Tab. 1). Das Produkt mit laminierten 6-µm Aluminiumfolie (AF) ist sehr dicht.

Beide 3-fach metallisierten Polymerfolien (MF1, MF2) zeigen eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit. Gegenüber den Atmosphärgasen N_2 und O_2 ist jedoch MF2 deutlich resistenter als MF1.

Bez / Abmessungen [cm]		Masse-% / Jahr (extrapol.)	hPa / Jahr (extrapol.)
AF	25x25x2	0.26% ± 0.04%	nicht messbar in 29 Tagen
	50x50x2	0.19% ± 0.04%	nicht messbar in 29 Tagen
MF1	25x25x2	8.6% ± 0.6%	167 ± 5
	50x50x2	6.1% ± 0.08%	124 ± 6
MF2	25x25x2	5.4% ± 0.04%	37 ± 2
	50x50x2	4.0% ± 0.03%	19 ± ?

Tab. 1: Feuchteaufnahme (Masse-% / Jahr) und Innendruckzunahme (hPa / Jahr) von VIP mit unterschiedlichen Hüllmaterialien und Abmessungen.

WÄRMETECHNISCHE EIGENSCHAFTEN

Ein Kernmaterial mit metallischer Hüllfolie ist grundsätzlich kein (quasi) homogenes Material wie ein herkömmlicher Dämmstoff, sondern ein Bauteil mit Analogien zu einer Isolierverglasung (IV). Gasdichtheit und Wärmebrückenfreiheit am Rand sind gegensätzliche Eigenschaften: Glas- oder massive Metallschichten gelten als gasdicht, erzeugen aber durch den Randverbund relativ grosse Wärmebrücken. Hüllmaterialien auf Kunststoffbasis sind weniger kritisch betreffend Wärmebrücken, weisen aber immer eine gewisse Gasdurchlässigkeit auf. Gestützt auf Wärmedurchgangsmessungen mit und ohne Stossfugen wurden rechnerisch lineare Randleitwerte Ψ für 20-mm-VIP mit metallbedampfter Kunststofffolie und Metallverbundfolie bestimmt [3,4]. Für einlagige flächige Verlegung kann damit eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda_{\text{äquivalent}} = \lambda_{\text{Kern}} + \Psi \cdot \text{Dicke} \frac{\text{Umfang}}{\text{Fläche}}$$

berechnet werden, welche für die 1-dimensionale U-Wert-Berechnung massgeblich ist. Aus verschiedenen Berechnungen wurden sichere Werte bestimmt und dem SIA als Dimensionierungsgrundlage vorgeschlagen. Insbesondere beim Einsatz von Metallverbundfolien ergeben sich erhebliche Zuschläge (Tab. 2).

Hüllmaterial	λ_{Kern} ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Ψ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	$\lambda_{\text{äquivalent}}$ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) für $A_{\text{VIP}} = 1.0 \times 0.6 \text{ m}^2$
Metallbedampfte Folie	0.008	0.01	0.0091
Metallverbundfolie	0.006	0.07	0.0135

Tab. 2: Kernleitfähigkeit, linearer Randzuschlag und äquivalente Wärmeleitfähigkeit für ein Beispiel.

Wird ein VIP in ein Bauteil mit gut leitenden Umschliessungsflächen eingebaut, können sich sehr grosse Wärmebrückeneffekte ergeben. Korrekte Ergebnisse für solche Bauteile sind nur durch detaillierte 3-dimensionale Berechnungen zu erhalten. Als Beispiel wurde für ein Sandwich-Fassadenelement mit Aluminiumblechen und einem PVC-Umleimer an Stelle eines vereinfachten U-Werts von $0.64 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ein U-Wert von $1.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ berechnet. Mit einem Aluminium-Randverbund ergibt sich sogar ein U-Wert von $3.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Bei grossflächiger Dämmung und VIP-Dimensionierung treten kleinere Randeefekte auf. Fig. 5 zeigt die schlanke Innendämmung einer Bruchsteinwand auf einen mittleren U-Wert unter $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Vernachlässigung der VIP-Randverluste ändert das Ergebnis um weniger als 10 %. Die Randzonen und Anschlüsse zu anderen Bauteilen sind jedoch bezüglich Luftleckagen und Oberflächen-

temperaturen (Kondensationsrisiko) besonders genau zu betrachten, da bei VIP-Konstruktionen extremere Bedingungen auftreten als bei herkömmlicher Wärmedämmung.

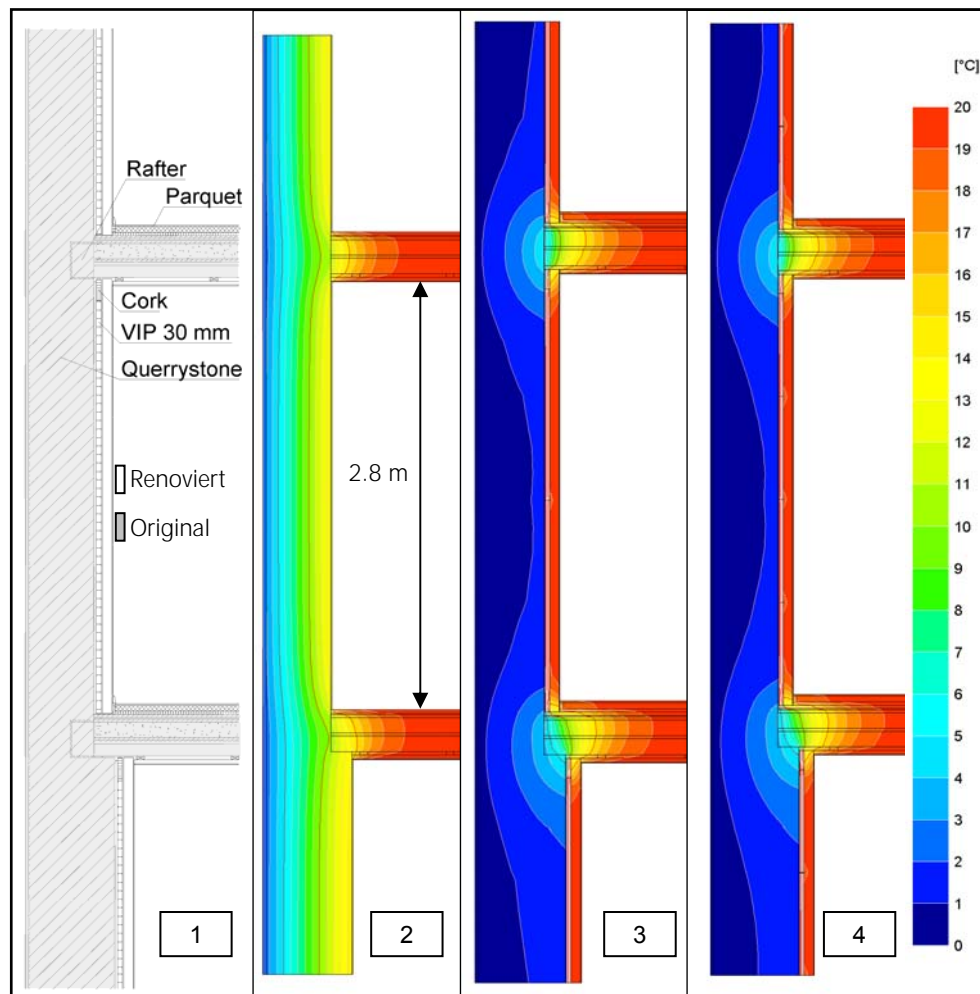


Fig. 5: Sanierung durch VIP-Innendämmung (1). Gegenüber dem ursprüngliche Isothermenbild (2) resultiert eine drastische Erhöhung der inneren Oberflächentemperatur (3) und des Wärmewiderstands. Kleinere VIP-Elemente (4 statt 2 pro Stockwerkhöhe) ändern am Ergebnis nur wenig (4).

Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit der Schweizer Teilnehmer in IEA Annex 39 in der ARGE *vip-bau.ch* wurde weiter geführt.

vip-bau.ch baute unter anderem eine Begleitgruppe mit Industriepartnern aus der Baubranche auf, die sich zweimal zu Workshops traf. Die EMPA informierte dabei über ihre Aktivitäten und den aktuellen Stand im VIP-Projekt. Mit verschiedenen Schweizer VIP-Lieferanten besteht ein regelmässiger Kontakt. Innerhalb des Schweizer Projekts ist eine enge Zusammenarbeit vor allem im Bereich Bauteilberechnung angelaufen.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit wird innerhalb von IEA Annex 39 koordiniert. Die EMPA organisierte im Juni 2003 ein Meeting von Teilnehmenden in Subtask A und beteiligte sich an den Annex-Meetings in Stockholm (April) und Delft (Oktober).

Die EMPA informierte am Symposium der Vacuum Insulation Association VIA (Washington DC, Juni 2003) und an der CISBAT (Lausanne, Oktober 2003) über ihre Arbeiten.

An den Veranstaltungen konnten wertvolle Kontakte zu anderen Instituten und Herstellern aufgebaut und intensiviert werden. Mittlerweile bestehen gute Kontakte zu den meisten VIP-Produzenten und Hüllfolienherstellern. Alle Industriepartner haben der EMPA ihre Produkte zur Verfügung gestellt.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Die Schwerpunkte des EMPA-Projekts in den Bereichen Qualität/Lebensdauer und wärmetechnische Eigenschaften sind nach wie vor sehr aktuell. Als wichtiges Etappenziel konnten ausreichende Lebensdauern für qualitativ gute VIPs bei moderaten Temperatur- und Feuchtelasten abgeschätzt werden. Es zeigte sich aber auch, dass VIP mit Hüllfolien auf Polymerbasis bei erhöhter Temperatur- und insbesondere Feuchtebelastung noch nicht für Langzeitanwendungen im Baubereich geeignet sind.

Im Labor wurde eine laseroptische Innendruckmesseinrichtung mit sehr guter Reproduzierbarkeit aufgebaut und in vielen Versuchen ausgetestet. Eine Anlage mit vergleichbarem Qualitätsstandard ist in anderen Labors nicht vorhanden.

Im Bereich der wärmetechnischen Eigenschaften wurden detaillierte Berechnungen der Wärmeströme im Randbereich mit einer grösseren Anzahl von Messungen verglichen und grundlegende Zusammenhänge und Daten für die Dimensionierung von VIP-Dämmungen erarbeitet. Mit einer speziellen Technik wurden verschiedene Bauteilberechnungen mit der vollen Auflösung aller Hüllschichten durchgeführt. Vergleichbare Berechnungen anderer Institute sind nicht verfügbar.

Im Jahr 2004 wird das umfassende Temperatur-/Feuchtebelastungsprogramm in Klimakammern an verschiedenen Produkten fortgesetzt und als Grundlage für belastungsspezifische Lebensdauerprognosen ausgewertet. Bauteilberechnungen werden anhand von konkreten Konstruktionen weitergeführt und in Einzelfällen mit U-Wert-Messungen überprüft. Für ausgewählte Konstruktionen werden zeitabhängige Temperatur- und Feuchtelastprofile erstellt.

Referenzen

- [1] A. Binz, M. Erb, Hp. Eicher, H. Simmler, K. Ghazi Wakili: **Vakuüm-Dämmung im Baubereich / vip-bau.ch**, 12. Schweizerisches Statusseminar "Energie-und Umweltforschung im Bauwesen", Zürich, September 2002.
- [2] S. Brunner, H. Simmler: **Service Life Prediction for Vacuum Insulation Panels (VIP)**, proceedings CISBAT, Lausanne, October 2003.
- [3] K. Ghazi Wakili, R. Bundi, Th. Frank: **Vacuum insulated panels in building applications**, proceedings CISBAT, Lausanne, October 2003.
- [4] K. Ghazi Wakili, R. Bundi, B. Binder: **Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels VIP used in building constructions**, akzeptiert zur Publikation in "Building Research and Information", März 2004.