

# High Performance Thermal Insulations: Aktivitäten und Ergebnisse des IEA Annex 39

Hans Simmler, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8600 Dübendorf

## 1 Einleitung

Gute Architektur und wirkungsvolle Wärmedämmung von Gebäuden sind oft schwierig in Einklang zu bringen, da aus energetischen Gründen heute Dämmschichtdicken von 20 und 40 cm erforderlich sind. Gerade im Sanierungsbereich ist gute Wärmedämmung mit vertretbarem Raumverlust oft kaum möglich. Hochleistungsdämmsysteme wie Vakuumisolationspaneele (VIP) eröffnen interessante neue Möglichkeiten für Raum sparende und dennoch hoch wärmedämmende Konstruktionen für die Gebäudehülle (Caps, R., 2002). Als Beispiel zeigt Bild 1 die Aussendämmung einer Terrasse ohne Niveauunterschied zwischen Wohnraum und Aussenbereich, der über einem beheiztem Raum liegt.



*Bild 1: Dämmung einer Terrasse mit VIP. Als Schutzschichten werden beidseitig dünne konventionelle Dämmplatten oder Bautenschutzmatte eingesetzt.*

Die Entwicklung der VIP-Technologie für den Baubereich spielte sich hauptsächlich in Deutschland ab, wo heute auch ein wesentlicher Teil VIP-Produktion angesiedelt ist. VIP-Bauprojekte entstanden rasch in der deutschsprachigen Schweiz, wo heute bereits VIP-Flächen von einigen 10'000 m<sup>2</sup> verbaut sind.

Die Einführung dieser neuartigen Bauteile in der Baupraxis ist aber auch mit offenen Fragen und Risiken verbunden. Zentral sind dabei Gebrauchstauglichkeitsaspekte wie Zuverlässigkeit, Alterung und Lebensdauer, aber auch bauphysikalische und anwendungstechnische Fragen. Aus diesem Grund kam aus der Schweiz die Initiative zur Untersuchung und Weiterentwicklung der VIP-Technologie im Rahmen eines Projekts der Internationalen Energieagentur (IEA). Im Rahmen des „implementing agreement“ ECBCS (Energy Conservation in Buildings and Community Systems) wurde das Projekt als An-

Annex 39 "High Performance Thermal Wärmedämmung Systems" Anfang 2001 gestartet. Teilnehmende Institute waren:

<i>Deutschland</i>	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE Bayern), Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV)
<i>Frankreich</i>	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
<i>Kanada</i>	National Research Council / Institute for Research in Construction (NRC/IRC)
<i>Niederlande</i>	Technische Universiteit Delft (TU Delft)
<i>Schweden</i>	Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm (KTH Stockholm)
<i>Schweiz</i>	Dr. Eicher+Pauli AG (Operating Agent: Markus Erb), Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Fachhochschule beider Basel (FHBB)

Der Arbeitsplan wurde in zwei Teilprojekten durchgeführt:

*Subtask A / Grundlagen:*

- Charakterisierung von Stützmaterialien, Barrierschichten und Panels
- Untersuchung von Alterungseffekten und Lebensdauerprognosen für VIP in Bauteilen
- Empfehlungen zu Qualitätssicherung, Spezifikation und Bemessungswerten von VIP

*Subtask B / Anwendungen:*

- Untersuchung von Anwendungsfragen wie Wärmebrücken und Kondensatbildung
- Dokumentation von Demonstrationsprojekten und Verdichtung des aktuellen Wissensstands in Form von Anwendungsempfehlungen
- Unterstützung von Anwendungen und Systementwicklung

Der Vollständigkeit halber sei hier nur kurz auf die aktuelle VIP-Herstellungstechnologie für Bauanwendungen hingewiesen, auf die sich die Arbeiten in IEA Annex 39 konzentrierten: VIP für den Baubereich bestehen heute allgemein aus einer mikroporösen, gepressten Kernplatte aus pyrogener Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) mit Zuschlagstoffen wie Trübungsmitteln und Strukturfasern, die bei einem Unterdruck von weniger als 1 mbar in eine weitgehend gasdichte Hülle eingeschweisst wird (Bild 2).

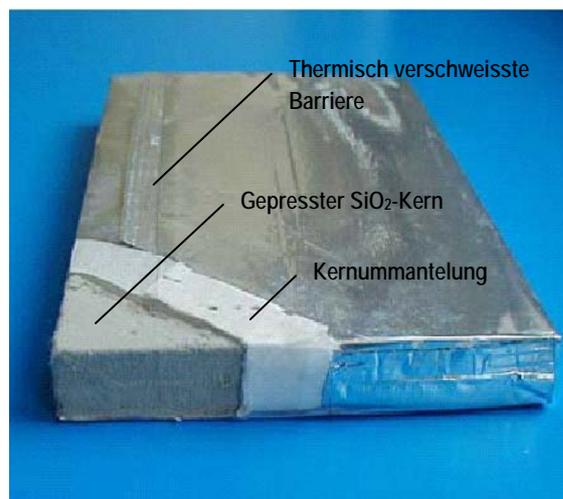


Bild 2: Bestandteile eines Vakuums-Isolationspanels (VIP). Foto von va-Q-tec.

Durch den niedrigen Innendruck, die sehr feine Porenstruktur und den Trübungsmittelzusatz wird der Wärmetransport durch Gas und IR-Strahlung weitgehend ausgeschaltet. Die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Kernmaterials erreicht im Druckbereich bis einige mbar einen Wert um  $4 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m K)}$ . Eine sehr dichte Umhüllung wird durch laminierte Aluminiumfolie (Al-Schichtdicke einige  $\mu\text{m}$ ) erreicht. Zur Vermeidung des Wärmebrückenproblems im Randbereich werden heute meist Mehrfachlamine aus metallisierten Kunststofffilmen mit 2 bis 3 Metallschichten (Al-Schichtdicken jeweils unter  $0.1 \mu\text{m}$ ) verwendet, deren Ränder durch aufeinander liegende PE-Schichten thermisch verschweisst werden.

Die folgenden Abschnitte illustrieren einige Ergebnisse aus den beiden Subtasks A und B. Die Auswahl ist notwendigerweise selektiv und subjektiv. Vollständigere Informationen sind in den zwei offiziellen Berichten von IEA Annex 39 zu finden, die zurzeit als Entwürfe vorhanden sind (IEA Annex 39, 2005). Die Veröffentlichung ist noch im Jahr 2005 vorgesehen.

## 2 Eigenschaften von VIP (Subtask A)

### 2.1 Kernmaterial

Die wichtigsten Resultate von Messungen physikalischer Eigenschaften von  $\text{SiO}_2$ -VIP sind summarisch in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Angaben sind als Richtwerte zu verstehen, die selbstverständlich hersteller- und produktionsabhängigen Abweichungen unterworfen sind.

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften des gepressten Kernmaterials von  $\text{SiO}_2$ -VIP (Richtwerte).

Eigenschaft	Einheit	Wert
Dichte	$\text{kg/m}^3$	160 – 220
Porosität	%	90 – 95
Spezifische Fläche	$\text{m}^2/\text{g}$	200 – 220
Druckspannung bei 10% Stauchung (23°C, 50 % r.F.)	kPa	90 – 120
Wärmeleitfähigkeit (10°C, trocken, $p_i < 5 \text{ mbar}$ )	$10^{-3} \text{ W/(m K)}$	4 – 5
Wärmekapazität (0 bis 150°C)	$\text{J/(kg K)}$	800 – 900
Steigung Sorptionsisotherme $du_m/d\varphi$ ( $u_m < 8 \text{ Masse-\%}$ )	Masse-% / 100% r.F.	7 - 8

Die Messungen zeigen die grosse Porosität und innere Oberfläche des Kernmaterials sowie die niedrige Wärmeleitfähigkeit bei Innendrücken im Bereich von einigen mbar. Der Innendruck  $p_i$  und der Feuchtegehalt  $u_m$  sind signifikante und detailliert untersuchte Einflussgrößen in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit. Näherungsweise lässt sich der Zusammenhang für  $p_i < 100 \text{ mbar}$ ,  $u_m < 8 \text{ Masse-\%}$  wie folgt linear beschreiben:

$$\Delta\lambda \cong 0.035 \frac{10^{-3} \text{ W}}{\text{m K mbar}} p_i + 0.50 \frac{10^{-3} \text{ W}}{\text{m K Masse-\%}} u_m \quad (2-1)$$

Damit kann beispielsweise für eine Innendruckzunahme von 1.5 mbar pro Jahr und eine Feuchtegehaltszunahme von 0.15 Masse-% pro Jahr eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit  $\Delta\lambda \cong 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m K)}$  nach 10 Jahren abgeschätzt werden. Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit liegt in der Grössenordnung von  $0.01 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m K } ^\circ\text{C)}$  zwischen  $10^\circ\text{C}$  und  $50^\circ\text{C}$  und spielt damit praktisch keine Rolle.

## 2.2 Barrierschichten

Wie erwähnt werden heute aus wärmetechnischen Gründen für VIP im Baubereich meist komplexe Mehrfachlamine aus metallisierten Polymerfilmen (z.B. PET, Polypropylen) verwendet. Für die aktuellsten Barrierematerialien werden Sauerstofftransmissionsraten OTR hinunter bis zu  $0.0005 \text{ cm}^3(\text{STP})\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}\text{bar}^{-1}$  bei  $23^\circ\text{C}$ , 50% r.F. angegeben, die unter der Nachweisgrenze gebräuchlicher Standardmessverfahren liegen. Mit der oft benutzten Relation für die Stickstofftransmissionsrate  $\text{NTR} \approx \text{OTR} / 4$  und Berücksichtigung der Partialdrücke ergibt sich eine geschätzte Luft-Transmissionsrate  $\text{ATR} \approx 0.4 \times \text{OTR}$ , und eine jährliche Innendruckänderung bei 1 bar für ein Paneel mit  $V = 100 \times 50 \times 2 \text{ cm}^3$ :

$$\dot{p} = p_0 \dot{V} / V \approx 1000 \cdot 0.0002 \cdot 365 / (100 \cdot 50 \cdot 2) < 0.01 \text{ mbar} / \text{Jahr} \quad (2-2)$$

In Bezug auf Stickstoff und Sauerstoff wäre die Dichtigkeit der Barriere somit völlig problemlos. Messungen an Proben aus evakuierten VIP-Hüllen haben jedoch gezeigt, dass die Permeationsraten der durch die Druckbelastung gestressten Flächen deutlich (Faktor 10 bis 100) größer sind, vor allem im Bereich von Ecken und Kanten. Ausserdem ist zu berücksichtigen, dass die Permeationsraten relativ stark temperaturabhängig sind.

Die Wasserdampftransmissionsrate WVTR aktueller Barrierematerialien liegt bei rund  $0.005 \text{ g/(m}^2 \text{ d)}$  für die Standardmessbedingungen  $38^\circ\text{C}$ , 90 % r.F., was ungefähr dem  $10^4$ -fachen des OTR-Wertes entspricht. Eine schlüssige Erklärung für diesen grossen Unterschied ist noch nicht gefunden worden. Dass VIP mit polymerbasierter Barrierschicht trotzdem „funktionieren“ hat folgende Gründe:

- Durch das Sorptionsvermögen des Kernmaterials wird der Druckanstieg stark verzögert.
- Der Ausgleichsdruck für Wasserdampf liegt im Gebäudebereich bei 10 bis 20 mbar und ist damit noch nicht kritisch in Bezug auf den druckbedingten Anstieg der Wärmeleitfähigkeit (siehe Gleichung 2-1).

Die Permeationseigenschaften aktueller mehrfach metallisierter Polymer-Barrierematerialien sind vereinfacht gesagt so zu bewerten, dass sie für VIP unter normalen Bedingungen genügen sollten, bei kleinen Formaten, ungünstigen Randbedingungen oder erhöhter Defektdichte (Qualitätsprobleme, Beschädigung) jedoch auch zu große Leckraten aufweisen können.

## 2.3 Vakuumisolationspaneel

Obwohl heutige Mehrschichtbarrieren sehr gute Sperreigenschaften aufweisen, bleibt auch ohne eigentliche Schädigung eine Gasdurchlässigkeit bestehen, die für Langzeitanwendungen nicht vernachlässigt werden kann. Diese beruht einerseits auf der materialbedingten Permeabilität von beschichteten Kunststofffilmen, und andererseits auf Schwachstellen, die durch Falten, Knickstellen und Verschweißung hauptsächlich im Randbereich entstehen. Durch die eindringenden Gasmoleküle finden eine mehr oder weniger langsame Zunahme des Innendrucks und eine Befeuchtung des Kernmaterials statt. Beide Mechanismen sind von den Umgebungsbedingungen – d.h. zeitlicher Verlauf von Temperatur und Wasserdampfdruck – und dem Paneelformat abhängig und führen zu einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit über einen längeren Zeitraum. Die Quantifizierung dieser „Alterungs“-Effekte und die Prognose des

Langzeitverhaltens von Innendruck, Feuchtegehalt und Wärmeleitfähigkeit wurde in IEA Annex 39 ausführlich untersucht. Als Beispiel sind in Tabelle 2 Messergebnisse der EMPA an VIP mit zwei mehrfach metallisierten Kunststofflaminat-Barrieren (MF3 und MF4) und einer Hülle aus laminiertes Aluminiumfolie (AF1) zusammengestellt (Simmler, H., 2005).

Tabelle 2 : Anstiegsraten von Feuchtegehalt und Innendruck von VIP Proben in zwei Formaten und verschiedenen Barriermaterialien bei Standardbedingungen 23°C, 50 % r.F. (EMPA).

Typ	Format [cm]	Masse-% / Jahr Messdauer 103 Tage	mbar / Jahr Messdauer 103 Tage
AF1	25x25x2	0.02% ± 0.01%	0.7 ± 0.1
	50x50x2	0.03% ± 0.01%	0.6 ± 0.2
MF3	25x25x2	0.15% ± 0.02%	3.3 ± 0.9
	50x50x2	0.10% ± 0.01%	1.8 ± 0.2
MF4	25x25x2	0.16% ± 0.01%	1.4 ± 0.6
	50x50x2	0.12% ± 0.01%	1.0 ± 0.1

Die deutlich niedrigsten Anstiegsraten weisen wie erwartet Proben mit massiver Aluminiumfolie (7 µm) auf. Die beiden mehrfach metallisierten Kunststoffbarrieren sind in Bezug auf Wasserdampfpermeation miteinander vergleichbar, hingegen weist MF4 gegenüber MF3 signifikant tiefere Druckanstiegsraten auf. Mit Ausnahme des kleinen Formates von MF3 liegen alle Werte unter 2 mbar / Jahr, was als sinnvolle Bedingung für eine Langzeitanwendung im Baubereich betrachtet werden kann. Aus den Daten der unterschiedlichen Formate können flächen- und umfangbezogene Permeabilitäten bestimmt werden.

Eine entsprechende Auswertung für vier verschiedene metallisierte Kunststoffbarrieren bei Standardbedingungen ist in Tabelle 3 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die mehrfach metallisierten Lamine MF2 bis MF4 vergleichbare Eigenschaften aufweisen, während die einfach metallisierte Barriere MF1 deutlich schlechter abschneidet. Wie erwähnt sind – schon wegen der Randbeiträge – die durch Messungen an Paneelen bestimmten Permeationsdaten meist deutlich höher als die Werksdaten ungestresster Barriermaterialien. Leckraten von VIP-Barrieren lassen sich somit nur durch Messungen an Paneelen zuverlässig ermitteln.

Tabelle 3 : Flächen- (Index A) und umfangbezogene (Index L) Gas-Transmissionseigenschaften von VIP mit mehrfach metallisierten Polymerlaminatbarrieren für 23°C, 50 % r.F und 1 bar.

Barriere	WVTR <sub>A</sub> g/(m <sup>2</sup> d)	WVTR <sub>L</sub> g/(m d)	ATR <sub>A</sub> cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> d)	ATR <sub>L</sub> cm <sup>3</sup> /(m d)
MF1	0.0233	-	0.0160	0.0080
MF2	0.0057	-	-	0.0039
MF3	0.0030	0.0008	0.0034	0.0091
MF4	0.0048	0.0006	0.0088	0.0018

Versuche bei verschiedenen Temperatur- und Feuchtebedingungen haben ergeben, dass die Tempera-

turabhängigkeit der ATR-Werte gut durch eine Arrheniusfunktion beschrieben werden kann. Die Aktivierungsenergien liegen im Bereich von 25 bis 40 kJ/mol. Die WVTR-Werte sind näherungsweise proportional zur Wasserdampfdruckdifferenz und weisen nur eine geringe explizite Temperaturabhängigkeit auf.

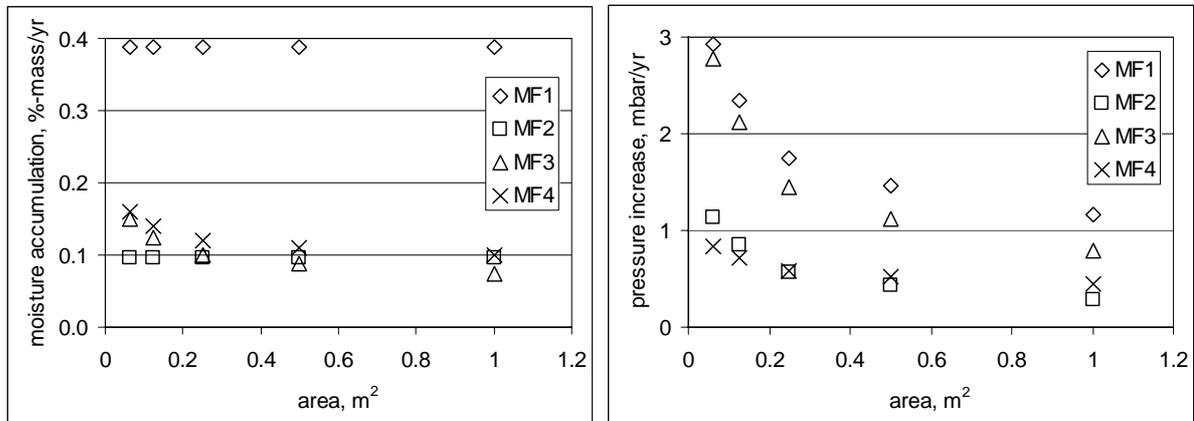


Bild 3: Feuchtegehaltszunahme- und Druckanstiegsraten bei  $23^{\circ}\text{C}$ , 50 % r.F. (1 bar) für verschiedene VIP-Formate, berechnet mit den Werten von Tabelle 3. Die Unsicherheit der Zahlen liegt schätzungsweise im Bereich von 10 bis 15%.

In Bild 3 sind auf Tabelle 3 basierende jährliche Anstiegsraten des Feuchtegehalts  $u_{ma}$  und des Innendrucks  $p_a$  von 20-mm-Paneelen mit den Formaten  $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$ ,  $0.25 \times 0.50 \text{ m}^2$ ,  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ ,  $0.5 \times 1.0 \text{ m}^2$  und  $1.0 \times 1.0 \text{ m}^2$  grafisch dargestellt. Beim Druckanstieg ist eine deutliche Formatabhängigkeit erkennbar, was mit dem relativ grossen Beitrag durch den Randbereich zusammenhängt. Der Anstieg des Feuchtegehalts ist (bei gleich bleibender Paneeldicke) weniger stark formatabhängig, da der Transport hier durch die gesamte Fläche stattfindet.

Aus Daten gemäss Bild 3 kann nun unter Benutzung von Gleichung 2-1 das Langzeitverhalten der Wärmeleitfähigkeit näherungsweise bestimmt werden:

$$\Delta\lambda(t) \cong 0.035 \frac{10^{-3} W}{m K mbar} p_i(t) + 0.50 \frac{10^{-3} W}{m K Masse - \%} u_m(t) \quad (2-3)$$

Dabei wird für den Innendruck meist vereinfachend eine konstante Zunahme mit der Zeit angenommen, während für den Feuchtegehalt oft ein Sättigungsverhalten (Annäherung des Wasserdampfdrucks an die Umgebung) über einen Zeitraum von vielen Jahren zu berücksichtigen ist:

$$u_m(t) = u_{m,Sättigung} + (u_{m0} - u_{m,Sättigung}) \exp(-t / \tau) \quad (2-4)$$

mit	$u_{m0}$	Anfangsfeuchtegehalt, Masse-%
	$u_{m,Sättigung}$	Ausgleichsfeuchtegehalt, Masse-% (ca. 4 Masse-% für 50 % relative Luftfeuchte)
	$\tau$	Zeitkonstante = $u_{m,Sättigung} / u_{ma}$ , Jahre
	$u_{ma}$	Anfangswert des Feuchtegehaltsanstiegs, Masse-% / Jahr

Das resultierende Langzeitverhalten der Wärmeleitfähigkeit ist beispielhaft für VIP mit Barriere MF2 im Klima 23°C, 75 % r.F. in Bild 4 dargestellt. Umgekehrt können die dargestellten Beziehungen dazu benutzt werden, für einen geforderten Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit bzw. des Wärmedurchlasswiderstandes die maximale Betriebs- oder Lebensdauer des Panels abzuschätzen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass das Alterungsverhalten von VIP mit aktuellen mehrfach metallisierten Polymerlaminat-Barrieren in komplexer Weise von Materialeigenschaften, Klimabedingungen und Formateffekten abhängt. Eine Vielzahl von Laborversuchen und Lebensdauerabschätzungen haben gezeigt, dass für Temperatur- und Feuchtebedingungen im Umgebungsbereich und nicht zu kleine Formate für VIP mit Hochqualitätsbarrieren eine Betriebsdauer im Bereich von mehreren Jahrzehnten erwartet werden kann. Eigentliche Langzeitergebnisse aus Anwendungen sind zwar noch nicht vorhanden, doch bestätigen laufende Messungen und Beobachtungen an Objekten bisher die Funktionstauglichkeit. Allerdings müssen beim jetzigen Stand der Barriertechnologie deutliche Alterungszuschläge für den Anstieg von Innendruck und Feuchtegehalt des Kerns in Kauf genommen werden. Für Dicken ab 20 mm können Wärmeleitfähigkeitswerte von  $7$  bis  $8 \cdot 10^{-3}$  W/(m K) für die Formate  $50 \times 50$  cm<sup>2</sup> bzw.  $100 \times 100$  cm<sup>2</sup> als sichere Werte angesehen werden.

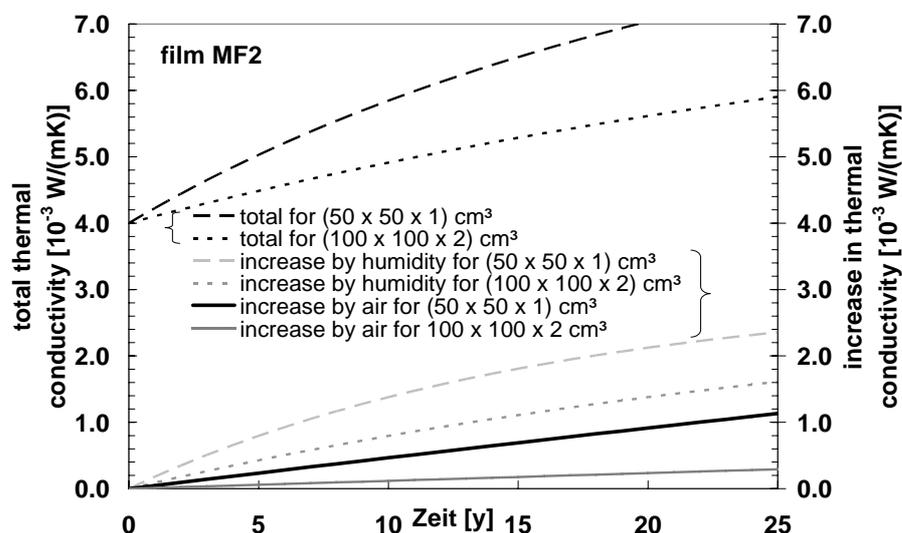


Bild 4: Gesamte Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit (oben, linke Ordinate) und Zunahmen bezüglich Innendruck und Feuchtegehalt (unten, rechte Ordinate) von VIP mit Barriere MF2 für zwei Formate bei den Klimabedingungen 23°C, 75 % r.F. (ZAE Bayern).

### 3 Anwendung von VIP in Gebäuden (Subtask B)

Auf der einen Seite gibt es bereits eine grössere Zahl von realisierten VIP-Anwendungen in der Praxis, auf der anderen Seite fehlen jedoch oft klare Aussagen zu wärmetechnischen Eigenschaften und Vor-/Nachteilen von Bauteilen mit VIP. Klar ist, dass die Komponente VIP sowohl bauphysikalisch wie auch konstruktiv wesentlich von einer konventionellen Wärmedämmung unterscheidet. Aus der umfangreichen Materialsammlung in Subtask B werden in den folgenden Abschnitten punktuell einige Aspekte herausgegriffen.

### 3.1 Wärmebrückeneffekte

Eine der wichtigsten Planungsaufgaben ist selbstverständlich die korrekte Bestimmung des Wärmedurchgangs durch VIP-Schichten und Bauteile mit eingebauten VIP. Da das VIP selbst schon ein System mit stark unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von Barriere und Kernmaterial darstellt, müssen verschiedene Ebenen von Wärmebrückeneffekten unterschieden werden:

- Randeffekte in der VIP-Schicht durch umlaufende Hülle und Luftschichten in Stossbereich
- Konstruktive Wärmebrücken der Tragstruktur von VIP-Bauteilen

#### *Randeffekte in der VIP-Schicht*

Die Kombination des sehr gut isolierenden Kernmaterials und einer umlaufenden Hülle mit dünnen, aber hochleitfähigen Metallschichten erzeugt eine Wärmebrückensituation mit nicht vernachlässigbaren Effekten (Bild 5).

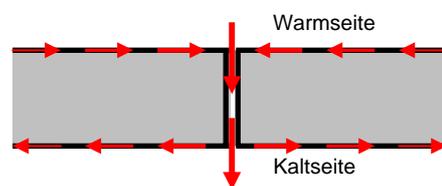


Bild 5: Schematische Darstellung der Wärmebrückensituation am Rand bzw. im Stossbereich von VIP.

Für ein einzelnes Paneel kann eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit wie folgt definiert werden:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{cop}} + \Psi_{\text{VIP}} \cdot d \cdot p / A \quad (3-1)$$

mit	$\lambda_{\text{cop}}$	Wärmeleitfähigkeit senkrecht in Plattenmitte, W/(m K)
	$\Psi_{\text{VIP}}$	Linearer Randverlustfaktor, W/(m K)
	$d$	Dicke, m
	$p$	Umfang, m
	$A$	Fläche, m <sup>2</sup>

$\Psi_{\text{VIP}}$  hängt neben den Materialeigenschaften der Hülle auch von der Paneeldicke, der Wärmeleitfähigkeit des VIP-Kerns und der Wärmeleitfähigkeit der umgebenden Materialschichten ab. Experimentell an der EMPA bestimmte  $\Psi$ -Werte sind in Tabelle 4 aufgeführt (Ghazi Wakili, K., 2004). Deutlich erkennbar ist der grosse Unterschied zwischen den  $\Psi$ -Werten der metallisierten Polymerhüllen und der Aluminiumfolie.

Mit den  $\Psi$ -Werten aus Tabelle 4 können Effektivwerte der Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung 3-1 berechnet werden, die in Tabelle 5 für die Formate 100 x 100 cm<sup>2</sup> und 50 x 50 cm<sup>2</sup> zusammengestellt sind. Für die Barriere aus Aluminiumfolie ergeben sich sehr hohe Zuschläge von 200 % bis 300 %. Für die mehrfach metallisierten Polymerlamine betragen die Zuschläge 14 – 18 % für das grössere und 28 – 37 % für das kleinere Format.

Tabelle 4 : Resultate der experimentellen Untersuchung von Wärmebrückeneffekten an VIP mit unterschiedlichen Barriere-materialien (EMPA). Angrenzende Deckschichten waren beidseitig ca. 5 mm Elastomerschaum.

VIP	Beschreibung	$d$ , m	$\lambda_{cop}$ , $10^{-3}$ W/(m K)	$\Psi_{VIP}$ , $10^{-3}$ W/(m K)
Typ A	Polymerlaminat mit 3-facher Metallisierung, total 90 nm Aluminium, breite Nahtzone auf VIP-Fläche gefaltet	0.020	$4.14 \pm 0.08$	$7.0 \pm 1.6$
Typ B	Polymerlaminat mit 3-facher Metallisierung, total 300 nm Aluminium, schmale Naht an Stirnfläche gefaltet	0.020	$3.91 \pm 0.08$	$9.2 \pm 1.6$
Typ C	Aluminiumfolie 8 $\mu$ m PE-laminiert, breite Nahtzone auf VIP-Fläche gefaltet	0.018	$3.95 \pm 0.08$	$52 \pm 3$

Tabelle 5 : Effektivwerte der Wärmeleitfähigkeit für 20-mm-VIP in 2 Formaten, basierend auf den  $\Psi$ -Werten in Tabelle 4.

VIP	$d$ [m]	$\lambda_{cop}$ , $10^{-3}$ W/(m K)	$\lambda_{eff}$ , $10^{-3}$ W/(m K)	
			100 x 100 cm <sup>2</sup>	50 x 50 cm <sup>2</sup>
Typ A	0.020	4.0	4.6	5.1
Typ B	0.020	4.0	4.7	5.5
Typ C	0.020	4.0	8.2	12.4

Detaillierte numerische Berechnungen mit Berücksichtigung aller einzelnen Schichten der Hülle reproduzieren die experimentellen Resultate gut, sind jedoch zu komplex für die Berechnung von ganzen Bauteilen (Ghazi Wakili, K., 2004). In einem vereinfachten Modell wird nur eine Metallschicht und eine Polymerschicht verwendet, der Stossbereich jedoch durch eine Zusatzmetallschicht den genaueren Resultaten angepasst.

Mit diesem Modell wurde an der EMPA der Einfluss der beidseitig angrenzenden Materialschichten auf die  $\Psi$ -Werte untersucht, wobei eine alterungsbedingte Kern-Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{cop} = 8 \cdot 10^{-3}$  W/(m K), eine Polymer-Laminatbarriere mit 3 Metallisierungen und ein Luftspalt von 5 mm Breite im Stossbereich angenommen wurde (Tabelle 6). Für Stahlblech und Glas ergeben sich – besonders bei den kleineren Formaten – beträchtliche Zuschläge bis zu  $3 \cdot 10^{-3}$  W/(m K). Am kleinsten sind die Randzuschläge für Isolationsschichten und grosse Formate.

Tabelle 6 : Berechnete  $\Psi$ -Werte und Effektivwerte der Wärmeleitfähigkeit für 20-mm-VIP mit beidseitigen Deckschichten.

Schichtaufbau	$\Psi_{VIP}, 10^{-3} \text{ W/(m K)}$	$\lambda_{eff}, 10^{-3} \text{ W/(m K)}$		
		100 x 100 cm <sup>2</sup>	100 x 50 cm <sup>2</sup>	50 x 50 cm <sup>2</sup>
2 mm Stahl 20 mm VIP 2 mm Stahl	19	9.5	10.3	11.0
5 mm Glas 20mm VIP 5 mm Glas	16	9.3	9.9	10.6
20 mm Holz 20 mm VIP 20 mm Holz	10	8.8	9.2	9.6
5 mm Wärmedämmung 20 mm VIP 5 mm Wärmedämmung	7	8.6	8.8	9.1

### Konstruktive Wärmebrücken

Verschiedene Arbeiten in IEA Annex 39 befassten sich mit der Berechnung von  $\Psi$ -Werten konstruktiver Elemente in VIP-Bauteilen. Diese sind sehr genau zu untersuchen, da sie durch die starke Sperrwirkung der „thermischen Barriere“ VIP und die geringe Bauteiltiefe zwischen Warm- und Kaltseite wesentlich stärker ins Gewicht fallen als bei einer VIP-losen Konstruktion. Die EMPA wird einen Wärmebrücken-katalog für verschiedene typische VIP-Konstruktionen (Wand, Decken, Terrasse, Anschlussdetails etc.) publizieren. Die TU Delft untersuchte den Einfluss von Konstruktion und Materialwahl auf die  $\Psi$ -Werte des Randverbundes von Fassadenelementen (Bild 6) mit verschiedenen Deckschichten (jeweils einseitig Floatglas).

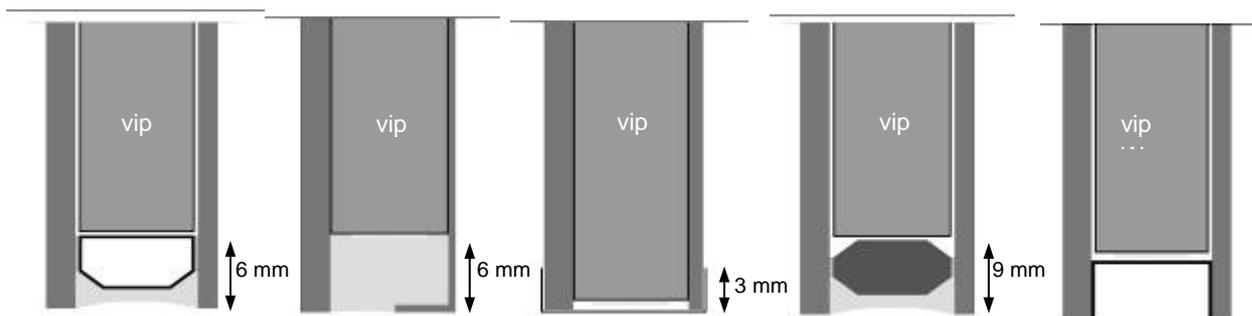


Bild 6: Verschiedene Randverbandsysteme eines VIP-Fassadenelements (von links nach rechts): a.) Aluminium-Abstandhalter; b.) Butyldichtmasse; c.) Verstärktes nicht-metallisches Klebeband (0.15 mm); d.) optimierter thermoplastischer Abstandhalter (Henkel Tereson Thermoplastic Spacer); e.) Kunststoff-U-Profil (TU Delft).

Die Berechnungen ergaben, dass der Standard-Aluminiumspacer a) den U-Wert eines Fassadenelements mit dem Format 100 x 100 cm<sup>2</sup> von ca. 0.2 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> (Sandwich ohne Randverbund) auf Werte zwischen 0.45 und 0.55 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> erhöht, wobei die wärmetechnischen Eigenschaften der umlaufenden VIP-Barriere nur eine untergeordnete Rolle spielen. Auch für die besser geeigneten Last übertragenden

Randverbunde d) und e) sind Erhöhungen der U-Werte im Bereich von 50 % und mehr zu erwarten.

### 3.2 Anwendungsbeispiele

Ein wesentlicher Bestandteil des Berichts über Subtask B sind insgesamt 20 ausführlich dokumentierte und kommentierte Anwendungsbeispiele aus der Praxis. Am Beispiel einer Terrassendämmung wird die Dokumentationsstruktur hier kurz erläutert.

#### *Projektübersicht*

Dieser Abschnitt enthält eine allgemeine Beschreibung und Illustration des Projekts (Bild 7) sowie Eckdaten wie Lage, Architekt, Ausführungszeitraum sowie weitere Informationen aus dem direkten Kontakt mit involvierten Personen.



*Bild 7: Terrassenartige Bauweise auf einem leicht geneigten Areal (links: Foto; rechts: Planungsvision).*

#### *Material und Konstruktion*

Hier werden Konstruktionsdetails und verwendete Materialien anhand von Schnitten dargestellt (Bild 8).

#### *Bauphysik und Engineering*

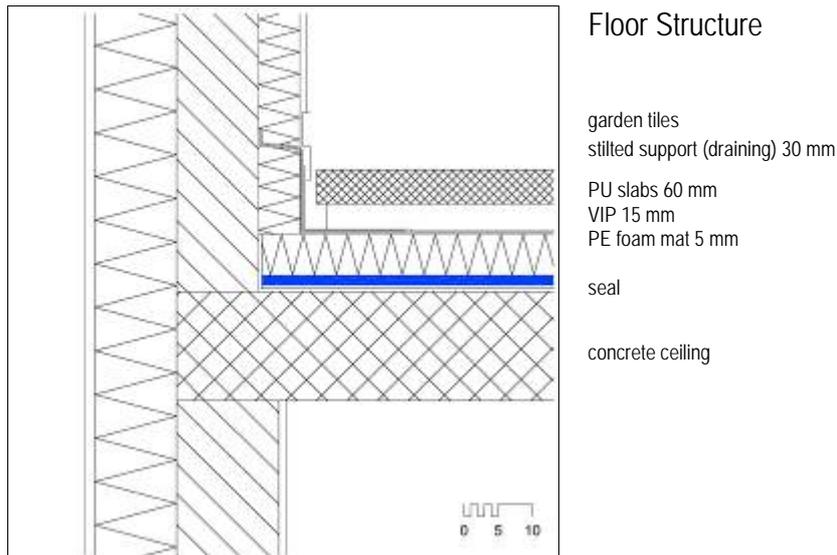
Der Abschnitt enthält Überlegungen und Kommentare zur Wärmebrückensituation, zu Fragen der Wasserdampfdiffusion und –Kondensation, zum Feuchteschutz und zum mechanischen Schutz der Paneele, sowie zu den vermuteten Folgen eines Versagens von Paneelen.

#### *Planung und Ausführung*

Der Planungs- und Ausführungsprozess wird beschrieben und illustriert (Bild 9). Positive und negative Erfahrungen der Beteiligten bei der Planung und Ausführung werden dargestellt und kommentiert.

#### *Kosten, Vorteile, Risiken*

Die Kostenseite wird angesprochen, ebenso Vorteile und Risiken der Konstruktion (z.B. Aufwand für den Ersatz defekter Paneele, fehlende Garantie des Lieferanten).



**Bild 8:** Vertikalschnitt durch das Anschlussdetail an der Brüstung.



**Bild 9:** Ausführung – Fertige Terrasse: Die Paneele sind während des Einbaus gut geschützt.

### 3.3 Anwendungsempfehlungen

Die vorhandenen Erfahrungen aus Messungen sowie der Planung und Realisierung von VIP-Bauprojekten sind schon recht umfangreich. Der Projektbericht von Subtask B enthält ein eigenes Kapitel mit einer Vielzahl von Anwendungsempfehlungen, die in die Abschnitte „Allgemeine Empfehlungen“, „VIP auf der Baustelle“ und „VIP in vorfabrizierten Bauteilen“ gegliedert sind. Im Rahmen dieses Übersichtsbeitrags ist es nicht möglich, auf die Einzelheiten einzugehen. Es sei hier nur in Stichworten auf einige Punkte im allgemeinen Abschnitt hingewiesen:

<i>Information / Beratung</i>	Realisierung durch ausgebildete Fachpersonen, Informationen und Hinweise auf Verpackungen, Warnhinweis „VIP inside“.
<i>Flankenverlust</i>	Minimierung von Flankenverlusten, Paneel-Format mindestens 0.5 x 0.5 m <sup>2</sup> , versetzte Doppellage bei VIP mit massiver Aluminiumfolie.
<i>Wasserdampfdiffusion</i>	Berücksichtigung der Dampfsperrfunktion von VIP, spezielle Beachtung von Stossfugen zwischen VIP (Abdichtung).

<i>Detailausführung</i>	Schutz vor – auch nachträglicher – mechanischer Beschädigung. Vermeidung von Beschädigungen bei Anschlüssen (Anker, Führungsschienen, Rahmen etc.).
<i>Ersetzbarkeit von VIP</i>	Wünschbar: Strategie, welche die Ersetzung einzelner Paneele erlaubt. Z.B. mechanisch befestigte Abdeckung. Konstruktion soll nach Möglichkeit eine Kontrolle erlauben, z.B. durch Thermografie. Konstruktion soll Versagen eines einzelnen Panels tolerieren.
<i>Handling von VIP</i>	Handwerker mit spezieller VIP-Ausbildung. Geeignete Werkzeuge und Arbeitshilfen, z.B. Schuhüberzug, Lastverteilungsplatte (Vermeiden von Eindrücken durch Knien bei der Verlegung).

## 4 Zusammenfassung, Ausblick

Die Ergebnisse von IEA Annex 39 sowie die laufende Weiterentwicklung von Barrierematerialien, Herstellungsverfahren und Qualitätsüberwachung während der letzten Jahre zeigen, dass die VIP-Technologie im Baubereich heute einen anwendungstauglichen Stand erreicht hat. Es darf aber nicht vergessen werden, dass dieser Zweig der Bau-Technologie noch jung ist und laufende Weiterentwicklungen erforderlich und im Gang sind. Darunter sind zu nennen:

- Verbesserung der Barriereigenschaften insbesondere in Bezug auf Wasserdampf, Reduktion der Anfälligkeit gegenüber mechanischer Beschädigung, konsequente Qualitätsoptimierung und –sicherung im Herstellungsprozess und in der Anwendung (bis zum abgeschlossenen Einbau).
- Standardisierung von Testmethoden, Produktspezifikation und Verfahren zur Festlegung von Bemessungswerten.
- Weiterentwicklung in Richtung integrierte VIP-Bauteile (VIP mit Schutzschichten, VIP-Leichtbauteile wie Türen, Rahmen- und Brüstungselemente, Holzmodulbau)

Die rasche Verbreitung und die starke Nachfrage in der Schweiz lassen vermuten, dass Hochleistungs-dämmsysteme in Zukunft eine bedeutende Rolle im Bausektor spielen könnten.

### Literatur

Caps, R. et al. (2002): Evacuated Wärmedämmung panels filled with pyrogenic silica powders: properties and applications, High Temperatures-High pressures 33 (2002) 151-156.

IEA Annex 39 (2005): Subtask A und Subtask B Berichte (in Englisch), Druck und Publikation als pdf-Dateien auf [www.vip-bau.ch](http://www.vip-bau.ch), [www.vip-bau.de](http://www.vip-bau.de) u.a. in Vorbereitung.

Simmler, H., Brunner, S. (2005): Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life, Energy & Buildings (im Druck).

Ghazi Wakili, K. et al. (2004): Effective Thermal Conductivity of Vacuum Insulation panels, Building Research and Information 32(4) 293-299.

### Hans Simmler, Dipl. Phys., Dr. phil. II

EMPA Laboratory for Applied Physics in Building, Ueberlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf

[www.empa.ch](http://www.empa.ch), [hans.simmler@empa.ch](mailto:hans.simmler@empa.ch)