

Auswirkungen von Wärmebrücken beim Einsatz hocheffizienter Vakuumisolationspaneelen am Bau

Andreas Beck und Oswald Frank
Hochschule für Technik, Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart
E-Mail: Andreas.Beck@hft-stuttgart.de

1 Zusammenfassung

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Umsetzung des Potenzials hinsichtlich eines deutlich erhöhten Wärmeschutzes durch Vakuumisolationspaneelen, aufgrund ihrer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit stark situationsabhängig ist. Dabei muss nicht nur der Aufbau der Paneelen selbst bezüglich des Folienumhüllungen, Abmessungen und Spaltabständen beachtet und optimiert werden, sondern auch die Auswahl der umgebenden Materialien. Nur wenn es gelingt, hohe Wärmequerleitungseffekte zu unterbinden, ist ein sinnvoller Einsatz von VIP am Bau gewährleistet. Die Untersuchungen bezüglich des Einsatzes als Paneelelemente in Pfosten-Riegel-Konstruktionen lassen die Fehlerquellen und Optimierungsmöglichkeiten der das VIP umgebenden Bauteile erkennen. Allgemein kann gesagt werden, dass es sich bei Vakuumisolationspaneelen um einen Extremdämmstoff handelt, dessen Einsatz eine detaillierte Betrachtung unbedingt erforderlich macht, um das gewünschte Ziel einfach zu erreichen und Bauschäden zu vermeiden.

2 Einführung

Um den heutigen Wärmeschutzstandard für Niedrigenergie- (3l-) oder Passivhäuser mit herkömmlichen Dämmstoffen zu realisieren, sind sehr hohe Dämmstoffdicken notwendig. Dies erfordert in der Umsetzung einen hohen Platzbedarf, welcher meistens sehr teuer und im Sanierungsfall oftmals nicht vorhanden ist. Die von Seiten der Architekten gewünschte schlanke Bauweise wird dabei ebenfalls erschwert. Hier bietet sich der Einsatz von hocheffizienten Vakuumisolationspaneelen (VIP) an, welche bei gleicher Dicke einen um den Faktor 5 bis 8 höheren Wärmedurchlasswiderstand ($\lambda_{VIP} = 0,005 \text{ W/(mK)}$) gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen aufweisen [1].

Mit dem zunehmenden Wärmeschutz der Gebäude erhalten gleichzeitig Wärmebrücken eine wesentlich größere Bedeutung. Diese sind einerseits geometrisch und konstruktiv bedingt oder durch Schwachstellen in der Dämmhülle gegeben. Das wesentliche Kennzeichen von Wärmebrücken ist eine gegenüber der Umgebung erhöhte Wärmestromdichte sowie geringere Oberflächentemperaturen. Dies führt neben erhöhten Wärmeverlusten im schlechtesten Fall zu Schimmelpilzbildung aufgrund erhöhter Bauteilfeuchte. Der zusätzliche Wärmeverlust muss gemäß der Energieeinsparverordnung 2002 (EnEV) mit einem *Wärmebrückenzuschlag* ΔU_{WB} auf den Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Gebäudefläche berücksichtigt werden. Selbst bei Bauausführung nach DIN 4108 Beiblatt 2 [2] ($\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) liegen die jährlichen zusätzlichen Wärmeverluste durch Wärmebrücken, bei einem Gebäude mit einer Hüllfläche von 400 m² (Einfamilienhaus), mit 1600 kWh in der gleichen Größenordnung wie der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung eines 3 Personenhaushaltes.

Daher hat heutzutage die Optimierung von Wärmebrücken einen höheren Stellenwert und erfordert besonders beim Einsatz von schlanken, hocheffizienten Vakuumisolationspaneelen eine kritische Analyse der Wärmebrückenproblematik. In diesem Beitrag werden die Auswirkungen von Wärmebrücken mit Optimierungshinweisen beim Einbau von Vakuumisolationspaneelen (VIP) an verschiedenen Beispielen aufgezeigt, um einen optimalen Einsatz von VIP am Bau zu ermöglichen.

3 Wärmebrücken in Konstruktionen mit VIP

3.1 Wärmebrücke Umhüllung

Aufgrund seines Aufbaues aus einem evakuierten Kern in gasdichter Folie stellt ein VIP bereits ein Bauteil dar. Vergleichbar dem Isolierglas mit seinem Randverbund muss dabei die Wärmequerleitung durch die Folie bei der Ermittlung wärmetechnischer Kenngrößen berücksichtigt werden. Die Folie wirkt sich wie ein flächiger Wärmeverteiler aus. Die eigentliche Wärmebrücke an der Paneelkante, an der die Folie die Dämmebene durchdringt, wird durch den Querleitungseffekt deutlich verstärkt.

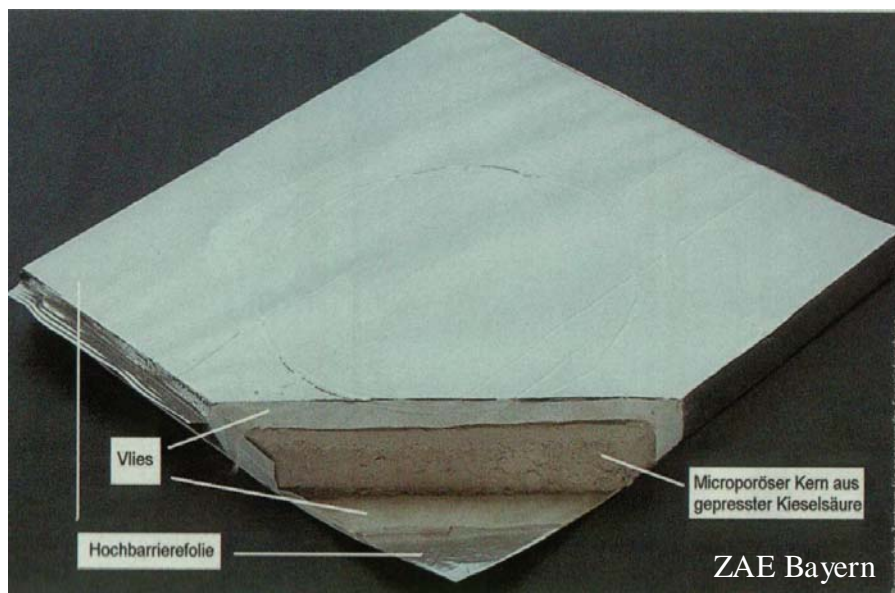


Bild 1: Typischer Aufbau eines Vakuumpaneels aus Pulver-Dämmkern und Folienummantelung.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wärmebrückenwirkung der Folie hat, aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit, die Dicke der gasdichten Metallschicht zwischen der Träger- und Schutzfolie aus PE und PET. Während bei den Aluminiumverbundfolien die Aluminiumschicht 7 bis 12 μm dick ist, beträgt sie bei den metallisch bedampften Hochbarrierefolien nur ca. 40 nm (z.B. bei va-Q-tec). Um die zusätzlichen Wärmeverluste über unterschiedliche Folien darzustellen, wurden dreidimensionale Finite-Elemente-Berechnungen durchgeführt und der *längenbezogene Wärmebrückenverlustkoeffizient* ψ ermittelt. Dieser ergibt sich aus der Differenz der *Wärmedurchgangskoeffizienten der Paneele* mit (U_{tot}) und ohne (U_0) Berücksichtigung der Folie bezogen auf den *Paneelumfang* l_u und die *Paneelfläche* A gemäß:

$$\Psi = \frac{U_{tot} - U_o}{l_u} * A \quad (3-1)$$

Dabei wird der *Wärmedurchgangskoeffizient* U_{tot} sowie der *Wärmebrückenzuschlag* ΔU_{WB} der Paneele wie folgt bestimmt:

$$U_{tot} = U_o + \Delta U_{WB} \quad (3-2)$$

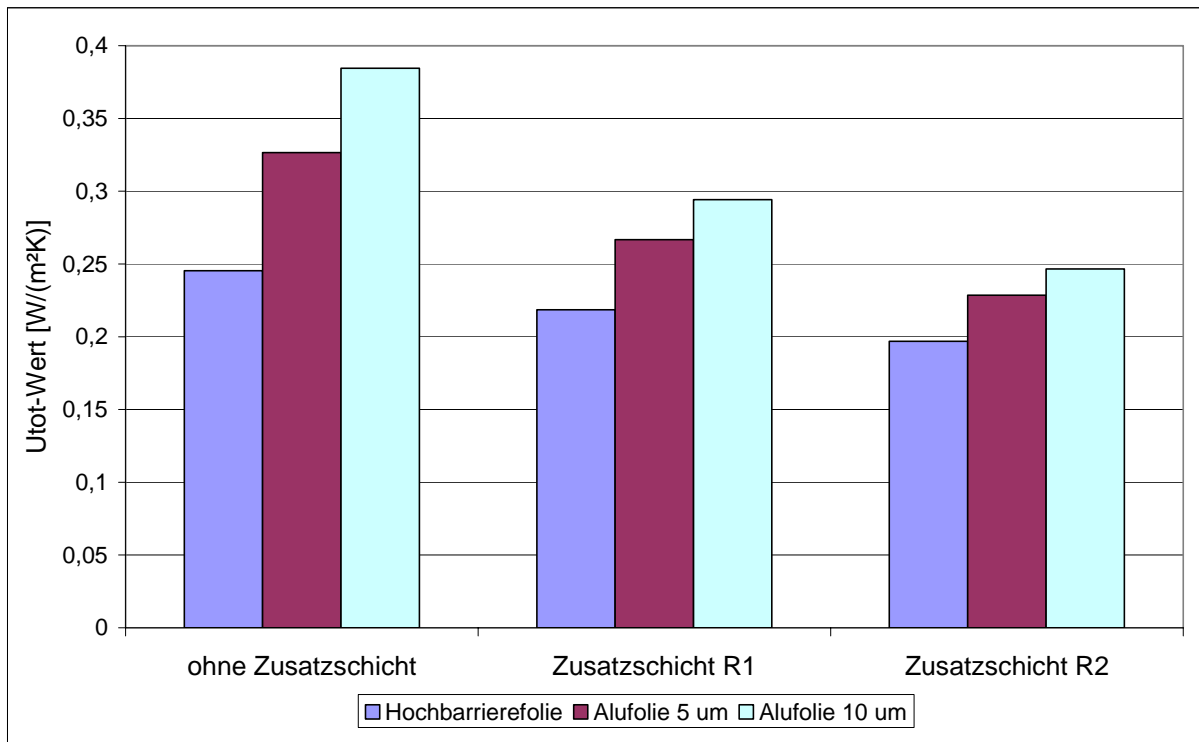
$$\Delta U_{WB} = \frac{\Psi * l_u}{A} \quad (3-3)$$

In Tabelle 1 sind die berechneten Ψ -Werte, U_{tot} -Werte sowie der Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} für ein 1 m² großes, quadratisches VIP mit 2 cm Dicke bei unterschiedlicher Folienausführung aufgeführt. Außerdem wurden im Fall 2 und 3 die Auswirkungen von beidseitigen Zusatzdämmschichten ($R = 0,25$ bzw. $0,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) auf die o. g. Kenngrößen untersucht. Für eine bessere Übersicht sind die Wärmedurchgangskoeffizienten U_{tot} der Paneelen einschließlich Folien in **Abb. 1** nochmals grafisch dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen an einem 1 m² großen, quadratischen Paneel bzgl. Folienumhüllung- und der Variation zusätzlicher Dämmschichten.

Folienart	Fall	Ψ [W/(mK)]	U_{tot} [W/(m ² K)]	ΔU_{WB} [W/(m ² K)]
Hochbarrierefolie	1	0,0014	0,2453	0,0055
	2	0,0011	0,2186	0,0045
	3	0,0009	0,1969	0,0034
Aluminiumverbundfolie 5 μm	1	0,0217	0,3265	0,0867
	2	0,0131	0,2667	0,0526
	3	0,0088	0,2286	0,0352
Aluminiumverbundfolie 10 μm	1	0,0362	0,3844	0,1446
	2	0,0200	0,2943	0,0802
	3	0,0133	0,2466	0,0532

Abb. 1: Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen bzgl. der Wärmedurchgangskoeffizienten U_{tot} bei Folien- und zusätzlichen Dämmschichtenvariationen



Die niedrigsten Wärmedurchgangskoeffizienten U_{tot} erreicht man unter Verwendung der Hochbarrierefolien, da hier der Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} praktisch vernachlässigbar ist. Bei den Aluminiumverbundfolien treten je nach Schichtdicke dagegen sehr hohe Wärmebrückeneffekte auf. Eine Abdeckung mit zusätzlichen Dämmschichten, die aus Schutzgründen für das Handling in den meisten Fällen ohnehin sinnvoll ist, reduziert den Wärmebrückeneinfluss der Aluminiumverbundfolien jedoch wieder wesentlich. Daher ist es unerlässlich die Folienwahl immer in Abstimmung mit der konkreten Anwendung zu treffen. Einen wesentlichen Einfluss auf die Auswirkungen der Wärmebrückeneffekte haben auch die Abmessungen des VIP mit ihrem jeweiligen spezifischen Umfang-/ Flächenverhältnis. Allgemein gilt, je geringer das Umfang-/ Flächenverhältnis ist, umso weniger schlagen die Wärmebrückeneffekte zu Buche.

Um die Wärmebrückeneffekte durch die Folien zu reduzieren, gibt es folgende Möglichkeiten:

- Verringerung der Wärmeleitfähigkeit der gasdichten Ummantelung,
- Reduzierung der Schichtdicke der hochleitfähigen Metallschicht,
- Doppelte, die Fugen überlappende Verlegung,
- Anbringen zusätzlicher Dämmschichten zur Verringerung des Temperaturgradienten an der Wärmebrücke sowie
- Verringerung des Umfang-/ Flächenverhältnisses der VIP durch optimale Wahl der Abmessungen.

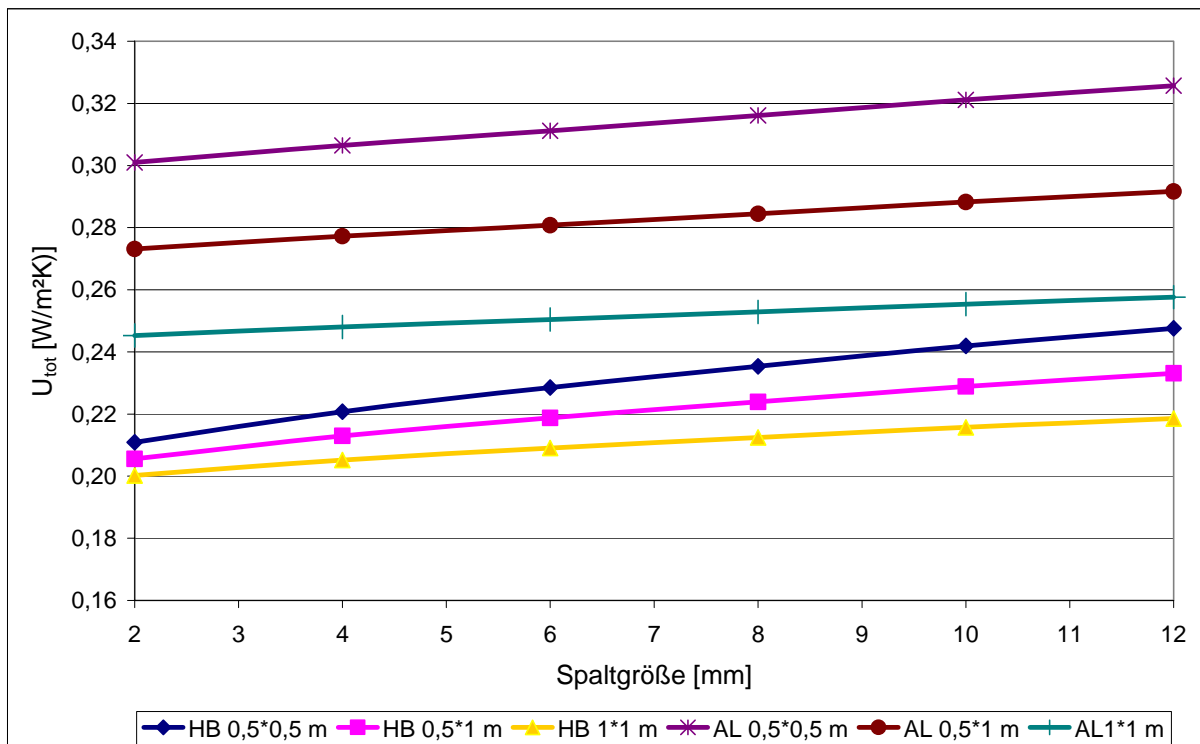
3.2 Wärmebrücke Spalt

Neben der Wärmebrücke durch die Folie besteht auch immer eine Wärmebrücke durch einen Spalt zwischen den einzelnen VIP. Dieser ergibt sich aus Maßungenauigkeiten bei der Herstellung, dem Folienüberstand am Rand sowie je nach Anwendung aus der Notwendigkeit von Durchdringungen für die Befestigung. Um die Auswirkungen der Breite des Luftspaltes auf den *längenbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizient* ψ zu ermitteln, wurden beispielhaft anhand eines Fußbodenaufbaus zweidimensionale Finite-Elemente-Berechnungen durchgeführt. Im Fußbodenaufbau war ein 2 cm dickes VIP mit ober- und unterseitiger 2 cm dicker PS-Dämmung integriert. Als Parameter wurde bei den einzelnen Berechnungen die Spaltbreite (2 – 12 mm) sowie die Folie (Hochbarrierefolie, Aluminiumverbundfolie mit Aluminiumschicht 10 μm) variiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen für den längenbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ bei unterschiedlicher Folie und Breite des Luftspaltes am Stoß zweier VIP

Spaltbreite [mm]	längenbezogener Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ [W/(mK)]	
	Hochbarrierefolie (HB)	Aluminiumverbundfolie (AL)
2	0,0027	0,0139
4	0,0039	0,0146
6	0,0049	0,0152
8	0,0057	0,0158
10	0,0065	0,0164
12	0,0072	0,0170

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen längenbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizienten zu verdeutlichen, wurden die Wärmedurchgangskoeffizienten U_{tot} des Fußbodenaufbaus für ein VIP mit den Abmessungen 0,5*0,5 m, 0,5*1 m und 1*1 m ermittelt und grafisch in Abhängigkeit der Spaltbreite dargestellt.

Abb. 2: Übersicht der berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten U_{tot} für unterschiedliche VIP-Abmessungen

Der Verlauf der Kennlinien zeigt deutlich den gegenseitigen Einfluss von Folienart, Spaltbreite und Paneelabmessungen. Danach gilt es bei den Aluminiumverbundfolien aufgrund der hohen Wärmequerleitungseffekte vorwiegend die Paneelabmessungen zu optimieren. Dem gegenüber spielt bei den VIPs mit Hochbarrierefolie eher die Spaltbreite die größere Rolle. Es zeigt sich, dass der optimale Einsatz von VIP im Bau je nach Anwendungsfall eine konkrete Analyse der beeinflussenden Parameter erfordert und in Abstimmung mit dem Kostennutzenverhältnis mehrere praktische Umsetzungsmöglichkeiten bietet.

3.3 Brüstungselemente mit VIP

Ein weiterer interessanter Einsatzbereich ist die Integration von VIP in Brüstungselementen von Pfosten-Riegel-Konstruktionen. Aus ästhetischen sowie auf Platzgründen sind hier schlanke Konstruktionen mit hoch dämmenden Materialien erforderlich. Zusätzlich bietet der hohe Vorfertigungsgrad die besten Voraussetzungen für einen geschützten Einbau von VIP. Allerdings können hier durch ungeeignete Materialwahl der umgebenden Bauteile extreme Wärmequerleitungseffekte entstehen. Die Grundkonstruktion für die folgende Untersuchung bildet eine Holz-Pfosten-Riegel-Konstruktion mit Paneelelementen bestehend aus 2 cm integrierten VIP, beidseitigen Abdeckplatten sowie einem Kunststoffumleimer (ein Beispiel hierfür ist die Pfosten-Riegelfassade am Institutsanbau des ZAE-Bayern in Würzburg [3]). Für die Berechnungen ist das VIP zum Schutz mit einer 3 mm dicken Schaumfolie umgeben. Es ist eine Rastermaß von 1,5 * 1,5 m vorgesehen. Neben dem Wärmedurchgangskoeffizient U_{tot} für das Rastermaß sollen auch die minimalen Oberflächentemperaturen θ_{min} und der Temperaturfaktor f_{RSI} bestimmt werden. Die zu variierenden Parameter sind die Wärmeleitfähigkeit und Anordnung unterschiedlicher Abdeckplatten.

Zur Überprüfung der Auswirkungen unterschiedlicher Abdeckungen, wurde die o. g. Grundkonstruktion mit einem Kunststoffumleimer ($\lambda = 0,50 \text{ W/(mK)}$, Breite = 1cm) versehen und zweidimensionale Finite-

Elemente-Berechnungen durchgeführt. Dabei wurden als Abdeckung Aluminium- ($\lambda = 160 \text{ W/(mK)}$), Glas- ($\lambda = 1 \text{ W/(mK)}$) und Kunststoffplatten ($\lambda = 0,50 \text{ W/(mK)}$) verwendet. Die Anordnung der Platten wurde nach Tabelle 3 variiert.

Tabelle 3: Anordnung der verschiedenen Deckschichten

Fall	Außenseite	Innenseite
1	Aluminium	Aluminium
2	Glas	Glas
3	Kunststoff	Kunststoff
4	Glas	Aluminium
5	Kunststoff	Aluminium
6	Aluminium	Glas
7	Aluminium	Kunststoff

Die Ergebnisse der Berechnungen sind nachfolgend für Fall 1 und 3 in **Abb. 3** dargestellt und zusammenfassend in Tabelle 4 aufgeführt.

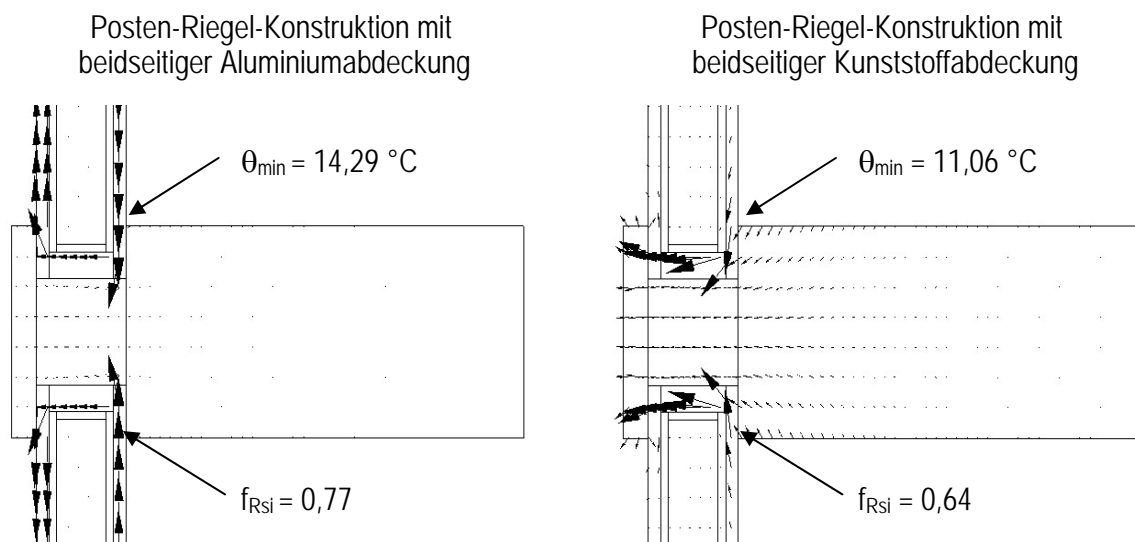


Abb. 3: Detailausschnitt der Wärmebrückensimulationen mit Vektordarstellung der auftretenden Wärmeströme (die Pfeillängen sind nicht normiert)

Tabelle 4: Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen mit unterschiedlichen Abdeckungen

Fall	Außen- / Innenseite	U_{tot} [W/(m ² K)]	θ_{min} [°C]	f_{Rsi}
1	Aluminium / Aluminium	0,77	14,29	0,77
2	Glas / Glas	0,52	10,80	0,63
3	Kunststoff / Kunststoff	0,48	11,06	0,64
4	Glas / Aluminium	0,69	14,90	0,80
5	Kunststoff / Aluminium	0,66	15,05	0,80
6	Aluminium / Glas	0,55	10,04	0,60
7	Aluminium / Kunststoff	0,51	10,20	0,61

Man erkennt in **Abb. 3** deutlich die Funktion der Aluminiumplatten als flächige Wärmeverteiler. Ähnlich wie bei der Aluminiumfolie beim VIP selbst (siehe Abschnitt 3.1), kommt es auch hier zu sehr starken Wärmequerleitungseffekten. Eine beidseitige Verwendung von Abdeckplatten mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 1 \text{ W/(mK)}$ reduziert die Wärmeverluste erheblich. Aufgrund des geringen Wärmedurchlasswiderstandes des Umleimers wird aber der erforderliche Mindestwert von 0,7 des Temperaturfaktors f_{RSI} unterschritten und es besteht die Gefahr von Oberflächenkondensat. Bei einseitiger Anwendung von hoch leitenden Abdeckungen ist zwischen innen- und außenseitiger Anwendung zu differenzieren. Im Falle außenseitiger Anwendung (Fall 6 und 7) kommt es nur zu einer geringen Erhöhung von U_{tot} (gegenüber Fall 2 und 3), allerdings auch zu einer weiteren Verschlechterung des Temperaturfaktors f_{RSI} . Bei innenseitiger Anwendung wird der Wärmebrücke verstärkt Wärme zugeführt, was zu einer Erhöhung des Temperaturfaktors f_{RSI} jedoch auch zu höheren Wärmeverlusten führt.

Optimierungsmaßnahmen

Welche Auswirkungen kleine Optimierungsmaßnahmen haben können, wird anhand der Verwendung eines Dämmkeils (Breite 2 cm, Länge 4 cm) aus PS-Schaum in der Innenecke der Pfosten-Riegel-Konstruktion gezeigt. Untersucht wurde der Fall 7 mit Aluminiumabdeckung außen und Kunststoffabdeckung innen. Die Ergebnisse sind nachfolgend gegenübergestellt.

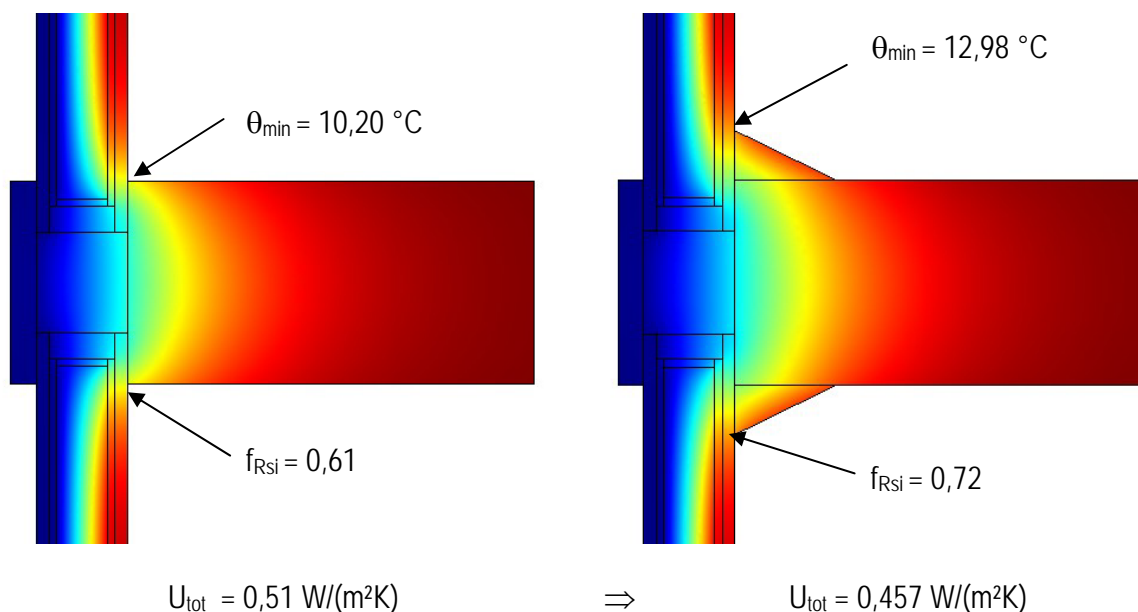


Abb. 4: Wärmebrückensimulation mit und ohne Wärmedämmkeil mit Aluminiumabdeckung außen und Kunststoffabdeckung innen

Neben einer erheblichen Reduzierung der Wärmeverluste bringt diese einfache Maßnahme zusätzlich Sicherheit vor Oberflächenkondensat. Weitere Optimierungsmaßnahmen sind z.B. die Variation des Umleimers bzgl. Wärmeleitfähigkeit, Breite und Dicke. Die angeführten Beispiele verdeutlichen noch einmal die Notwendigkeit der Gesamtbetrachtung beim Einsatz von VIP. Nur so werden schwere Baufehler vermieden und einfache Lösungen erkannt. Das Beispiel zeigt auch, dass die Anwendung von hochleitfähigen Platten in Verbindung mit einer Wärmebrücke nicht zwangsläufig untersagt werden muss. Es kommt vielmehr auf die konkrete Ausführung an.

3.4 Temporärer Wärmeschutz mit VIP

Aufgrund ihrer geringen Dicken, eignen sich VIP insbesondere für den Einsatz in beweglichen Elementen. Da das Fenster gegenüber einer vergleichbaren Wand einen 4 bis 5fach höheren U-Wert aufweist, stellt es derzeit am Baukörper die größte thermische Schwachstelle dar. Die Aufgaben herkömmlicher, temporärer Fensterschutzvorrichtungen (Rollladen, Klappladen) bestehen vorwiegend im Sonnen- und Sichtschutz. Durch Winddichtigkeitsprobleme und zu geringe, mögliche Dämmschichtdicken wurde die Optimierung des temporären Wärmeschutzes in der Vergangenheit vernachlässigt. Stattdessen hat man den Wärmeschutz in der Fenstertechnik stark weiterentwickelt, welcher allerdings derzeit aufgrund technischer Möglichkeiten bei einem U_w -Wert von ca. $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ stagniert. Dieser Wert lässt sich aber nur durch einen hohen Kostenaufwand (Dreifachverglasung) erreichen. Zusätzlich sind Einbusen bei den solaren Gewinnen sowie der Tageslichtausnutzung hinzunehmen. Die Wärmebrückenproblematik (Rollladenkasten, Führungsschienen, etc.), die der Einbau herkömmlicher temporärer Vorrichtungen mit sich bringt, ist bei dem heutigen Wärmeschutzstandard von Wand und Fenster ebenfalls nicht mehr zeitgemäß. Eine Optimierung des temporären Wärmeschutzes mit VIP wurde in [4] erarbeitet. Wesentliche Erkenntnisse werden nachfolgend vorgestellt.

Aufgrund der Wärmebrückenproblematik an den Rändern des VIP muss ein großformatiger Einsatz gewährleistet sein. Außerdem sollten nur geringe, zusätzliche Wärmebrücken durch den Einbau des temporären Wärmeschutzes verursacht, sowie eine optimale Fensterrahmen- und Leibungsüberdeckung ermöglicht werden. Aus diesen Gründen wurde ein Schiebeladenelement entwickelt, welches aus einer Rahmen-/ Plattenkonstruktion mit einem integrierten 2 cm dicken VIP besteht. Eine spezielle Schienentechnik führt den Schiebeladen direkt auf den Fensterrahmen, womit ein winddichter Abschluss ermöglicht wird. Außerdem werden so mögliche Anschlussprobleme mit massiven Wärmebrücken wie der Außensims und die Putzleibung vermieden. Anhand der nachfolgenden Wärmebrückensimulationen eines 1 m^2 großen Holzfensters ohne und mit Schiebeladen und des daraus berechneten U-Wertes wird die Reduzierung des Wärmedurchgangs durch den Schiebeladen deutlich.

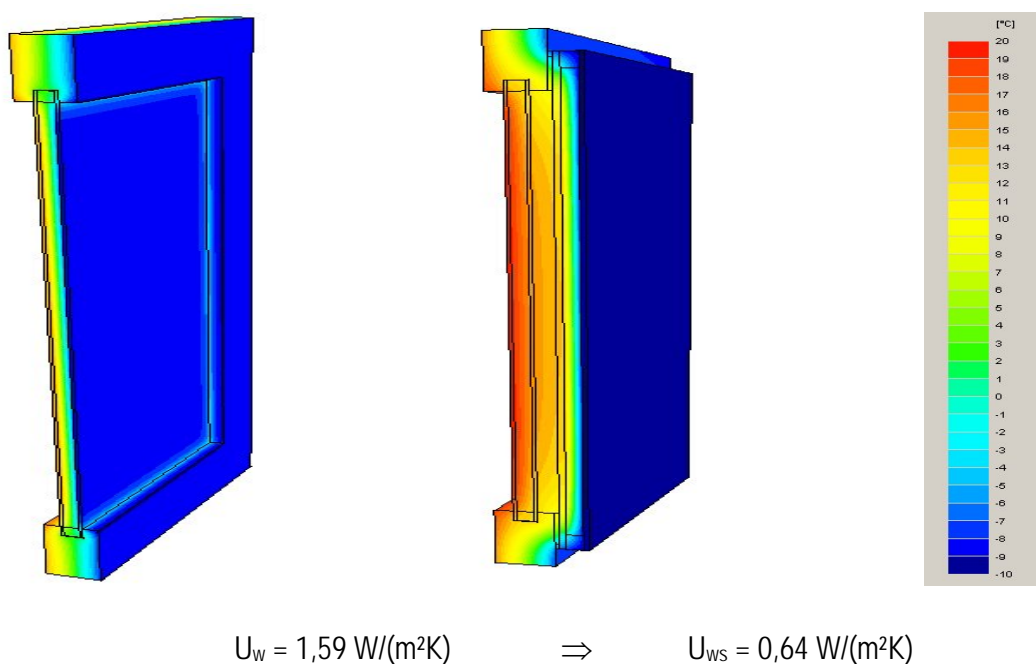


Abb. 5 Temperaturverteilung und U-Werte eines 1 m^2 großen Holzfensters ohne und mit VIP-Schiebeladen

Die Wärmebrückensimulationen zeigen deutlich die Änderung der Temperaturverteilung über den Konstruktionsquerschnitt. Während die Verminderung des U-Wertes durch den Schiebeladen auf den ersten Blick sehr hoch erscheint, erkennt man beim Vergleich mit der eindimensionalen Berechnung die hohen Wärmeverluste durch die Wärmebrücke im Randbereich des VIP.

Tabelle 5: Vergleich der U-Werte des Fensters mit Abschluss

Berechnungsmethode	U_{ws} , U_0 bzw. ΔU_{WB} [W/(m ² K)]
Wärmebrückensimulationsprogramm U_{ws}	0,64
Eindimensionale Berechnung U_0	0,40
Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB}	0,24

Dieser hohe Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} ist auf die Temperaturerhöhung im Hohlraum zwischen Fenster und Schiebeladen und den geringen thermischen Widerstand der Wärmebrücke am Fensterrahmen zurückzuführen. Obwohl die Reduktion des Wärmedurchgangskoeffizienten des Fensters durchaus beachtlich ist, zeigt sich auch hier, dass das Potenzial von VIP je nach Anwendung nur bedingt umsetzbar ist.

Literatur

- [1] R. Caps, U. Heinemann, M. Ehrmantraut, J. Fricke, *Evacuated insulation panels filled with pyrogenic silica powders: properties and applications*. High Temperatures – High Pressures 32, 2000
- [2] DIN 4108 Beiblatt 2, Ausgabe:2004-01, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele
- [3] Institutsdarstellung des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e.V., www.zae-Tbayern.de
- [4] Frank; O. (2005): Optimierung des temporären Wärmeschutzes von Fenstern mit VIP. Diplomarbeit WS 2004/05, HfT Stuttgart, Studiengang Bauphysik

Prof. Dr. Andreas Beck

Fachbereich Bauphysik
 Fachhochschule Stuttgart – Hochschule für Technik
 Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
www.fht-stuttgart.de
 E-Mail: Andreas.Beck@hft-stuttgart.de