

Christoph Sprengard, Martin H. Spitzner

**Optimierung der energetischen  
Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit  
von VIP-Paneelen durch die optimale  
Kombination von Kieselsäure-,  
Mineralfaser- und EPS-Dämmstoff**

**F 2776**

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8521-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/bauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung)

## FORSCHUNGSBERICHT

Forschungsvorhaben: Optimierung der energetischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von VIP-Paneelen durch die optimale Kombination von Kieselsäure-, Mineralfaser- und EPS-Dämmstoff

Kurztitel: Energetische und wirtschaftliche Optimierung von VIP-Paneelen

Forschende Stelle: Forschungsinstitut für Wärmeschutz München e.V.  
FIW München  
Lochhamer Schlag 4  
82166 Gräfelfing

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Christoph Sprengard

Projektleiter: Dr.-Ing. Martin H. Spitzner

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

Aktenzeichen: Z6–10.08.18.7–08.11 / II 2 – F20-08-1-075

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Bericht Nr.: FO-06/08  
Ausstellungsdatum: 31. Januar 2011  
Seiten: 143

## Danksagung

Ich möchte mich im Namen des FIW München - und vor allem auch persönlich - bei den Firmen Saint Gobain G+H Isover AG, Ladenburg, variotec Sandwichelemente GmbH, Neumarkt und Rigips GmbH, Rheda-Wiedenbrück für die finanzielle Unterstützung des Projektes bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Ulrich Passon, Isover, und Herrn Wolfram Breitenbach, variotec, für die wissenschaftliche Unterstützung, die Fertigung der Versuchskörper und das Bereitstellen der Produktionstechnik.

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Bau- und Raumordnung (BBR) für die Förderung des Forschungsprojekts und ganz besonders bei Herrn Dr. Michael Brüggemann für die Betreuung seitens des BBR.

Im Namen der Autoren,  
Gräfelfing, den 31.1.2011

Christoph Sprengard

## Inhalt

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Danksagung .....                                                                                        | 2  |
| 1 Aufgabenstellung und Zielsetzung .....                                                                | 8  |
| 2 Grundlagen.....                                                                                       | 8  |
| 2.1 Das Prinzip der Vakuumdämmung und funktionale Zusammenhänge .....                                   | 8  |
| 2.1.1 Historische Entwicklung .....                                                                     | 8  |
| 2.1.2 Wärmetransportmechanismen .....                                                                   | 11 |
| 2.1.3 Stützkerne.....                                                                                   | 20 |
| 2.1.4 Umhüllungen.....                                                                                  | 27 |
| 2.1.5 Schutzschichten.....                                                                              | 31 |
| 2.1.6 Feuchtegehalt .....                                                                               | 32 |
| 2.1.7 Eindringen trockener Gase .....                                                                   | 34 |
| 2.1.8 Wärmeleitfähigkeit .....                                                                          | 34 |
| 2.1.9 Wärmebrückenwirkungen .....                                                                       | 35 |
| 2.1.10 Dauerhaltbarkeit der VIP und Notwendigkeit einer künstlichen Alterung<br>39                      |    |
| 2.1.11 Anwendungsgebiete und weitere Eigenschaften .....                                                | 42 |
| 2.1.12 Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit.....                                                       | 43 |
| 2.1.13 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an einem Neubau .....                                            | 47 |
| 2.1.14 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an einem Altbau .....                                            | 58 |
| 3 Analyse vorhandener Daten zu Wärmeleitfähigkeit.....                                                  | 68 |
| 3.1 DIBt-Alterung.....                                                                                  | 68 |
| 3.2 Forschungsvorhaben „VIP-Bau“ .....                                                                  | 68 |
| 3.2.1 Ableitung eines Alterungsfaktors aus den Untersuchungen des VIP-Bau-<br>Forschungsprojektes ..... | 70 |
| 3.3 Auswertung der Zulassungsuntersuchungen .....                                                       | 72 |
| 3.3.1 Überblick und Legende .....                                                                       | 73 |

|       |                                                                                       |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.2 | Mittelwerte aus drei Plattenpaaren.....                                               | 73 |
| 3.4   | Vergleich der Zulassungsuntersuchungen mit den Ergebnissen des VIP-Bau-Vorhabens..... | 74 |
| 3.4.1 | Einfluss der Klimawechselprüfung .....                                                | 74 |
| 3.4.2 | Ableitung der Alterungsfaktoren.....                                                  | 75 |
| 3.4.3 | Fortführung der Temperaturlagerung.....                                               | 75 |
| 3.5   | Vergleich der Erhöhungen der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Produkte.               | 76 |
| 3.6   | Weiterentwicklung der Produkte über die letzten Jahre.....                            | 77 |
| 3.7   | Folgerungen für dieses Projekt.....                                                   | 78 |
| 4     | Berechnungen und numerische Modelle .....                                             | 80 |
| 4.1   | Einfluss der Art der Randausbildung .....                                             | 80 |
| 4.2   | Einfluss der Dicke der Aluminiumschichten.....                                        | 81 |
| 4.3   | Einfluss des Materials der Barrierschichten.....                                      | 82 |
| 4.4   | Einfluss einer Fuge zwischen Paneelen.....                                            | 84 |
| 4.5   | Einfluss von Deckschichten.....                                                       | 85 |
| 4.5.1 | Einfluss der Dicke von vor- und nachgelagerten Dämmstoffschichten .                   | 85 |
| 4.5.2 | Einfluss anderer Deckschicht-Materialien auf den $\psi$ -Wert.....                    | 86 |
| 4.6   | Vergleich mit einer Aluminium-Verbundfolie.....                                       | 89 |
| 4.7   | Folgerungen für dieses Projekt.....                                                   | 92 |
| 5     | Prototypen und Probekörper – Entwicklung und Ergebnisse.....                          | 93 |
| 5.1   | Vorversuche und erste Prototypen .....                                                | 93 |
| 5.1.1 | Zielsetzung.....                                                                      | 93 |
| 5.1.2 | Folien .....                                                                          | 93 |
| 5.1.3 | Kernmaterial.....                                                                     | 93 |
| 5.1.4 | Prototypenversuche .....                                                              | 94 |
| 5.1.5 | Folgerungen.....                                                                      | 97 |
| 5.2   | Probekörper erste Charge .....                                                        | 97 |
| 5.2.1 | Zielsetzung.....                                                                      | 97 |
| 5.2.2 | Hinweise zur Auswahl der Materialien für die Probekörper.....                         | 97 |

|       |                                                                               |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.3 | Hinweise zu den Stützkernen.....                                              | 98  |
| 5.2.4 | Folien .....                                                                  | 99  |
| 5.2.5 | Untersuchungen zur Verbesserung der Produktionsparameter der Faserkerne ..... | 99  |
| 5.2.6 | Folgerungen für neue Versuchspaneele .....                                    | 103 |
| 5.3   | Probekörper zweite Charge .....                                               | 104 |
| 5.3.1 | Durchgeführte Untersuchungen .....                                            | 104 |
| 5.3.2 | Messergebnisse der Probekörper der zweiten Charge .....                       | 105 |
| 5.3.3 | Ergebnisse der Platten aus dem Zulassungsverfahren mit Folie 1 .....          | 106 |
| 5.3.4 | Analyse der Messwerte zur Wärmeleitfähigkeit .....                            | 106 |
| 5.3.5 | Beurteilung.....                                                              | 107 |
| 5.3.6 | Folgerungen und Fragestellungen für neue Probekörper .....                    | 107 |
| 5.4   | Telefonkonferenz.....                                                         | 108 |
| 5.4.1 | Genauigkeit der Druckmessung.....                                             | 108 |
| 5.4.2 | Druckverteilung im Paneel/ Evakuierzeit.....                                  | 108 |
| 5.4.3 | Minimal möglicher Evakuierdruck: .....                                        | 109 |
| 5.4.4 | Porengröße:.....                                                              | 109 |
| 5.4.5 | Trocknungstemperatur und Trocknungsdauer: .....                               | 109 |
| 5.5   | Versuchspaneele dritte Charge .....                                           | 109 |
| 5.5.1 | Eigenschaften der Probekörper der dritten Charge.....                         | 110 |
| 5.5.2 | Durchgeführte Untersuchungen .....                                            | 110 |
| 5.5.3 | Messergebnisse der Probekörper der dritten Charge .....                       | 111 |
| 5.5.4 | Beurteilung.....                                                              | 111 |
| 5.6   | Probekörper der vierten Charge .....                                          | 112 |
| 5.6.1 | Eigenschaften der Probekörper der vierten Charge.....                         | 113 |
| 5.6.2 | Durchgeführte Untersuchungen .....                                            | 114 |
| 5.6.3 | Messergebnisse der Probekörper der vierten Charge .....                       | 114 |

|       |                                                                  |     |
|-------|------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.6.4 | Beurteilung.....                                                 | 114 |
| 6     | Feldversuche zur Verlegung von VIP im Objekt Wormser Straße..... | 117 |
| 6.1   | Rahmenbedingungen und Aufgabenstellung.....                      | 117 |
| 6.2   | Zwischensparrendämmung .....                                     | 117 |
| 6.2.1 | Probleme + Randbedingungen .....                                 | 117 |
| 6.2.2 | Planung.....                                                     | 118 |
| 6.2.3 | Einbau.....                                                      | 118 |
| 6.2.4 | Fazit.....                                                       | 120 |
| 6.3   | Innenseitige Dämmung von Außenwänden .....                       | 121 |
| 6.3.1 | Probleme + Randbedingungen .....                                 | 121 |
| 6.3.2 | Planung:.....                                                    | 121 |
| 6.3.3 | Einbau.....                                                      | 122 |
| 6.3.4 | Fazit .....                                                      | 123 |
| 6.4   | Untersparrendämmung.....                                         | 124 |
| 6.4.1 | Probleme + Randbedingungen .....                                 | 124 |
| 6.4.2 | Planung.....                                                     | 124 |
| 6.4.3 | Einbau.....                                                      | 126 |
| 6.4.4 | Fazit.....                                                       | 127 |
| 6.5   | Zusammenfassung und Ausblick.....                                | 128 |
| 7     | Beurteilung .....                                                | 129 |
| 7.1   | Bestandteile der Paneele und wärmetechnische Eigenschaften ..... | 129 |
| 7.1.1 | Folien .....                                                     | 129 |
| 7.1.2 | Stützkerne.....                                                  | 130 |
| 7.1.3 | Wärmebrückenwirkung am Rand.....                                 | 131 |
| 7.1.4 | Schutzschichten.....                                             | 132 |
| 7.2   | Herstellung, Anwendung und Wirtschaftlichkeit.....               | 132 |
| 7.2.1 | Paneelherstellung .....                                          | 132 |
| 7.2.2 | Anwendung und Gebrauchsdauer .....                               | 134 |

|       |                                                             |     |
|-------|-------------------------------------------------------------|-----|
| 7.2.3 | Kosten und Wirtschaftlichkeit .....                         | 134 |
| 8     | Ausblick und weiterer Forschungsbedarf .....                | 136 |
| 8.1   | Stützkern .....                                             | 136 |
| 8.1.1 | Aufbereitung, Trocknung und mechanische Eigenschaften ..... | 136 |
| 8.1.2 | Materialmischungen .....                                    | 136 |
| 8.2   | Folien .....                                                | 136 |
| 8.2.1 | Qualitätssicherung .....                                    | 136 |
| 8.2.2 | Permeationsmessung .....                                    | 137 |
| 8.2.3 | Vergleich der Alterung im Labor und im Gebäude .....        | 137 |
| 8.3   | Paneele und Bauteile .....                                  | 137 |
| 8.3.1 | Mehrlagige Systeme .....                                    | 137 |
| 8.3.2 | Anschlussbauteile und Befestigungen .....                   | 138 |
| 8.3.3 | Qualitätssicherung .....                                    | 138 |
| 8.3.4 | Weitere Einsatzgebiete .....                                | 139 |
| 8.3.5 | Wiederverwertung .....                                      | 140 |
| 9     | Literaturverzeichnis .....                                  | 141 |

## 1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das FIW München und die am Projekt beteiligten Hersteller (variotech Sandwich-Elemente GmbH, Saint Gobain G+H isover AG und Rigips GmbH) erforschen gemeinsam, wie der kombinierte Einsatz von herkömmlichen Dämmstoffen und pyrogener Kieselsäure das Produkt Vakuum-Isolations-Paneel (VIP) in energetischer Hinsicht verbessern und dessen Wirtschaftlichkeit erhöhen kann. Hierbei wird der Einsatz von herkömmlichen Dämmstoffen als Füllmaterial (Stützkern) des Vakuum-Paneels untersucht, aber auch die Kombination von Kieselsäure und herkömmlichen Dämmstoffen in gemeinsamen Hüllen. Untersuchungen zu Deckschichten und Randausbildungen schlagen eine Brücke von den reinen Paneeleigenschaften zur Anwendung am Bau.

Die entstehenden Zwängungen und Konfliktfelder werden analysiert und Vorschläge zur Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in der Produktion der Paneele gemacht. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit der Paneelherstellung und zum Einsatz im Gebäude untermauern das große Potenzial der Vakuum-Isolations-Paneele hinsichtlich hochwertiger energetischer Sanierung und nachhaltiger, wesentlicher Verminderung des Ausstoßes von Treibhausgasen. Untersucht werden soll auch, ob der optimierte Einsatz der herkömmlichen Dämmstoffe in Verbindung mit den Vakuum-Paneelen, zu Sanierungen auf einem besseren energetischen Niveau führt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Das Prinzip der Vakuumdämmung und funktionale Zusammenhänge

#### 2.1.1 Historische Entwicklung

##### 2.1.1.1 Thermoskannen und Dewar-Gefäße

Bereits im Jahr 1893 stellte der Physiker James Dewar verspiegelte Glasgefäße für den Transport von verflüssigten Gasen vor. Nach heutiger Definition ist ein Dewargefäß ein verspiegeltes, doppelwandiges, evakuiertes Gefäß aus Glas oder Edelstahl, welches meist in Thermoskannen eingesetzt wird. Der Zwischenraum der Behälterwände muss bis unter  $10^{-5}$  mbar evakuiert werden, damit die vorhandenen Luftmole-

küle nur noch mit den Begrenzungen zusammenstoßen können, aber nicht mehr untereinander. In einem Dewar-Gefäß sind alle Wärmeübertragungsprozesse vermindert: Durch die Evakuierung wird die Wärmeleitung im Restgas unterdrückt und Konvektion ausgeschaltet. Durch Verspiegelung mit blanken, metallischen Schichten wird der Emissionsgrad der inneren Oberflächen herabgesetzt und die Wärmestrahlung von Oberfläche zu Oberfläche stark reduziert.

Aus diesem Grund erlauben vakuumisolierte Behälter wie zum Beispiel eine Thermoskanne, die Aufbewahrung von Flüssigkeiten und Gasen bei konstanter Temperatur über einen längeren Zeitraum. Nennenswerte Wärmeverluste treten nur noch am Behälterrand auf. Über die Wandung des Einfüllstutzens kann Wärme zu- oder abfließen.

#### *2.1.1.2 Superisolation*

Eine technische Weiterentwicklung dieses Prinzips stellt die Superisolation dar. Die Umsetzung der Dewar-Gefäß-Idee für den ebenen Fall wurde ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt, und ist ein Dämmsystem für große Temperaturunterschiede. Superisolationen bestehen aus 20-30 Lagen einer aluminiumbedampften Polyesterfolie. Anders als im Weltraum müssen bei normalem Umgebungsdruck die Zwischenräume der Folien evakuiert werden. Damit wird eine Stützkonstruktion notwendig, die, aufgrund der großen aufzunehmenden Kräfte aus dem Umgebungsdruck, massiv ausgeführt sein muss. Solche Stützkonstruktionen durchdringen die Konstruktion bzw. sind als Randeinfassung ausgebildet und führen zu einem erheblichen Wärmetransport, der eine effektive Anwendung bisher ausschließt.

#### *2.1.1.3 Vakuum-Isolutions-Paneele VIP*

Eine massive Stützkonstruktion kann vermieden werden, wenn ein ausreichend druckfestes Füllmaterial in der Evakuierung verwendet wird, das die Kräfte aus dem atmosphärischen Druck aufnehmen kann. Diese Entwicklungen führten zu dem in dieser Arbeit behandelten evakuierten Dämmsystem Vakuumisolutionspaneele (VIP).

Ein VIP ist ein Wärmedämmelement, das aus einem Füllmaterial und einer Hülle besteht. Das druckstabile Füllmaterial – zurzeit meistens ein mikroporöses Pulver mit

einem hohen Anteil an pyrogener Kieselsäure – ist ein offenporiges Material mit Verstärkungsfasern, was sich einfach evakuieren lässt. Dieser Kern wird zur einfacheren Verarbeitung und aus Staubschutzgründen in ein dünnes Polyestervlies eingepackt. Der Stützkern mit Vlies wird in eine vorbereitete Hülle aus Spezialfolie geschoben, evakuiert und direkt in der Evakuierpresse verschweißt.

Als weitere mögliche Füllmaterialien kommen verschiedene Faser-, Pulver- oder Schaumprodukte infrage, die offenporig genug sind um sie evakuieren zu können. Als Umhüllung werden Aluminium-Verbundfolien (Ultrabarrierfolien) und metallisierte Kunststofffolien (Hochbarrierfolien) eingesetzt. Die metallisierten Kunststofffolien haben sich in den letzten Jahren durchgesetzt, weil die deutlich dünneren Aluminiumschichten einen kleineren Wärmebrückeneffekt am Paneelrand erzeugen als die Verbundfolien.

#### *2.1.1.4 Vakuum-Isolations-Sandwichelemente VIS*

Als Vakuum-Isolations-Sandwichelemente (VIS) bezeichnet man Dämmelemente, die mit einer Hülle aus Aluminium- oder Edelstahlblechen versehen sind. Ein wesentlicher Vorteil des VIS gegenüber dem VIP besteht darin, dass es durch seine Blechumhüllung gegenüber mechanischen Beanspruchungen äußerst robust ist. Wenn eine Ansatzmöglichkeit für Vakuumpumpen eingesetzt wird, können diese Systeme nachevakuiert werden. Ein entscheidender Nachteil ist die Wärmebrückenwirkung am Rand der Sandwich-Elemente, die auch bei sehr dünnen Edelstahlfolien (durch Laserschweißen mit den Deckblechen verbunden) immer noch sehr groß ist. Nur Elemente mit sehr günstigem Fläche-zu-Umfang-Verhältnis sind aus wärmetechnischer Sicht sinnvoll. Anwendungen hierfür sind Wände und Decken von Tiefkühltransportfahrzeugen und großformatige Fassadenelemente.

#### *2.1.1.5 Vakuum-Isolier-Glas VIG*

Ein VIG ist eine Doppelverglasung mit niedrig emissiver Beschichtung, deren Scheibenzwischenraum evakuiert ist. Der Druck der Umgebungsluft auf die Glasflächen wird durch kleine Stützkörper (z.B. Edelstahlzylinder mit weniger als einem Millimeter Durchmesser) abgetragen. Diese Stützkörper werden in einem Raster im Scheibenzwischenraum angeordnet und sind ab einer bestimmten Betrachtungsentfernung

nicht mehr sichtbar. Hierdurch lassen sich Wärmedurchgangskoeffizienten von bis zu  $U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  für Verglasungen normaler Größe realisieren, wobei die Wärmebrücke am Glasrand bereits berücksichtigt ist. Der Scheibenzwischenraum kann hierbei sehr schmal bleiben, da keine Dämmwirkung aus einer Edelgasschicht notwendig ist. Die Anforderungen an das Vakuum im Scheibenzwischenraum sind jedoch hoch, weswegen ein sehr gasdichter Rand notwendig ist. Außerdem sind jegliche Ausgasungen aus Dichtmitteln, Kunst- und Klebstoffen zu vermeiden.

### 2.1.2 Wärmetransportmechanismen

Der Wärmetransport in porösen Dämmungen kann durch die Summe der verschiedenen Beiträge,

- Wärmetransport über das Festkörpergerippe  $\lambda_F$  in  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- Infrarotstrahlungstransport  $\lambda_S$  in  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , und
- Wärmeleitung des darin enthaltenen, ruhenden Gases  $\lambda_G$  in  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

beschrieben werden. Ein weiterer Term  $\lambda_K$  enthält die Kopplungseffekte der verschiedenen Transportpfade.

$$\lambda = \lambda_G + \lambda_F + \lambda_S + \lambda_K$$

Um den Wärmestrom durch einen Stoff zu reduzieren, müssen die einzelnen Beiträge durch gezielte Maßnahmen verringert werden. In den folgenden Unterkapiteln wird das Optimierungspotenzial der einzelnen Wärmetransportpfade aufgezeigt. Es werden die für die Planung des Versuchs- und Berechnungsprogramms dieser Forschungsarbeit notwendigen Zusammenhänge dargestellt. Die vollständigen Zusammenhänge bei Wärmeleitung und Strahlung im (technischen) Vakuum finden sich für interessierte Leser in den im Text angegebenen Literaturstellen.

Der Strahlungswärmetransport kann durch die Verwendung von Trübungsmitteln im Stützkern verringert werden, wie das z.B. bei dem in den letzten Jahren weit verbreiteten Dämmstoff Neopor® der Fall ist, ein expandiertes Polystyrol mit Trübungsmitteln.

Die Wärmeleitung durch das Feststoffgerüst muss durch die Verwendung von sehr kleinteiligen, oft unterbrochenen und verzweigten Strukturen möglichst gering gehalten werden. Sehr gut eignen sich hier Materialien, deren Aufbau in der Größe der Strukturen abgestuft ist, oder die eine Unterbrechung der internen Strukturen durch chemische oder physikalische Behandlung aufweisen.

Durch die Entfernung von Gasen (evakuieren) aus den Zwischenräumen der Struktur wird die Gaswärmeleitung in den Poren und Zwischenräumen wirksam unterdrückt. Dies ist die effizienteste Methode, um den Wärmetransport in porösen Materialien zu verringern. Wie in Abbildung 1 für eine Temperatur dargestellt, gibt es für jedes poröse Material einen Bereich der Rohdichte, für den die Wärmeleitfähigkeit ein Minimum annimmt.

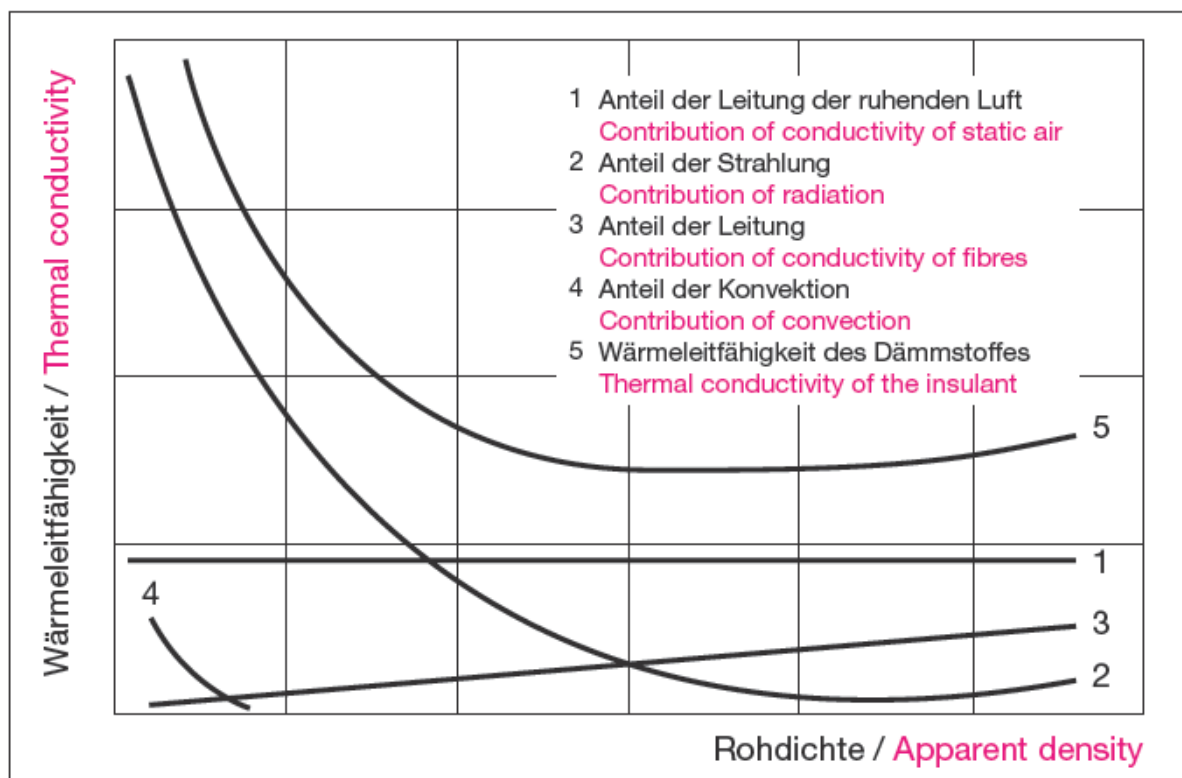


Abbildung 1: Prinzipielle Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte bei einer bestimmten Temperatur mit separierten Wärmetransportpfaden für Mineralwolle (aus AGI Arbeitsblatt Q 132 [1])

Die Konvektion im Dämmstoff spielt nur bei sehr geringen Dichten (und auch nur bei niedrigen Temperaturen) eine Rolle und ist für baupraktische Temperaturen und Rohdichten als nennenswerter Beitrag auszuschließen. Für niedrige Rohdichten beträgt die Wärmeleitung des Feststoffgerüsts etwa  $0,001 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  (Fricke et al. in [2]). Sie steigt mit zunehmender Dichte bis auf das zehnfache des Wertes bei geringer Dichte an.

Der Anteil der Strahlung am Wärmetransport nimmt mit zunehmender Dichte ab, weil einfach mehr „Material“ vorhanden ist, das dem Strahlungsaustausch im Weg steht. Bei sehr geringen Dichten spielt der Strahlungswärmetransport eine bedeutende Rolle, die bei höheren Temperaturen der im Strahlungsaustausch stehenden Oberflächen noch zunimmt. Geht die Dichte des Stoffes gegen „null“, stehen die Begrenzungen der Dämmschicht im direkten Strahlungsaustausch, wie z.B. bei den Glasscheiben von Fenstern.

Durch den Einbau effizienter Infrarottrübungsmittel in die Matrix des Dämmstoffs kann der Anteil der Strahlung bei 300 K auf unter  $0,001 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  gesenkt werden [2].

Der Kopplungsterm  $\lambda_K$  bildet die thermischen „Kurzschlüsse“ in den Zwickeln der punktuellen Kontakte ab, deren hohe Kontaktwiderstände durch enthaltene (Rest-) Luftmoleküle herabgesetzt werden. Der Kopplungsterm wird somit umso größer, je größer die Wärmeleitfähigkeit des Gases ist, welches diesen „Kurzschluss“ auslöst. Zusätzlich wird die Größe des Kopplungsterms noch durch die Wärmeleitfähigkeit der Festkörper-Teilchen bestimmt und durch die Anzahl der für den „Kurzschluss“ zur Verfügung stehenden Gasmoleküle, die abhängig vom Druck ist.

#### *2.1.2.1 Gas-Wärmeleitung*

Die Physik der Gaswärmeleitung wird im Lehrbuch „Vakuum-Isolations-Paneele für Gebäude“ von J. Fricke, A. Beck und M. Binder [2] ausführlich beschrieben. Die Gaswärmeleitung nimmt proportional zur Anzahldichte der Gasmoleküle, d.h. proportional zum Gasdruck zu. Sie geschieht in einem freien Gas durch Stöße der Gasmoleküle untereinander. Beschrieben wird sie durch die folgende Gleichung:

$$\lambda_{G0} = c_p \cdot \rho \cdot l_G \cdot v / 3 \quad \text{W/(m·K)}$$

mit:

$c_p$  spezifische Wärmekapazität des betrachteten Gases bei konstantem Druck in J/(kg·K)

$\rho$  Dichte des betrachteten Gases in kg/m<sup>3</sup>

$l_G$  mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle  $l_G = 1/(n \cdot \sigma_G)$  in m

mit:

$n$  Anzahldichte der Moleküle in 1/m<sup>3</sup>

$\sigma_G$  Stoßquerschnitt der Moleküle in m<sup>2</sup>

$v$  die Schallgeschwindigkeit in m/s

Mit dieser Formel lässt sich die Wärmeleitfähigkeit von Luft bei 20°C und Umgebungsdruck mit 0,026 W/(m·K) angeben. Für Wasserdampf, der eine nicht unerhebliche Rolle in den VIPs spielt, ergibt sich 0,018 W/(m·K). Die mittlere freie Weglänge kann als die durchschnittliche Distanz beschrieben werden, die ein Gasmolekül zurücklegt, bis es auf ein anderes Gasmolekül trifft. Wenn mehr Moleküle zur Verfügung stehen, nimmt die mittlere freie Weglänge ab. Gleiches gilt, wenn die Molekülgröße zunimmt.

Die Knudsenzahl  $Kn$  beschreibt das Verhältnis von mittlerer freier Weglänge zum Abstand der Wände (z.B. dem Porendurchmesser). Zusammen mit dem Smoluchowski-Effekt kann mit ihr die Wärmeleitung von Gasen in Poren beschrieben werden. Die Luftwärmeleitung verschwindet, wenn die Knudsenzahl deutlich größer als 1 wird ( $Kn \gg 1$ ). Unter diesen Bedingungen ist die mittlere freie Weglänge der Luftmoleküle sehr groß gegenüber dem Abstand der Behälterwände. Es stehen nur noch wenige Moleküle zur Verfügung, die untereinander stoßen können. Die Gasteilchen stoßen somit praktisch nur noch an die umgebenden Wände. H. Schwab beschreibt in seiner Dissertation [3] die Gaswärmeleitung quantitativ in Abhängigkeit des Gasdruckes mit der folgenden Formel:

$$\lambda_{Gas}(p_{Gas}) = \lambda_{Gas, frei} / (1 + 2\beta \cdot Kn) = \lambda_{Gas, frei} / (1 + p_{1/2, Gas} / p_{Gas}) \quad \text{W/(m·K)}$$

mit:

- $\lambda_{\text{Gas,frei}}$  voll entwickelte Gaswärmeleitfähigkeit für freie Gase (ohne Begrenzungswände), d.h. für  $Kn \ll 1$  in  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
- $p_{1/2,\text{Gas}}$  Halbwertsdruck, bei dem  $\lambda_G(p_G) = \lambda_{G0}/2$  in bar
- $Kn$  Knudsen-Zahl mit  $Kn = l_m/d$  (mittlere freie Weglänge/Porendurchmesser)
- $\beta$  von der Gasart abhängiger Gewichtungsfaktor (für Luft etwa 1,63 und für Wasserdampf 1,5)

In der folgenden Graphik ist die effektive Wärmeleitfähigkeit der Luft in Abhängigkeit vom Gasdruck für verschiedene Porendurchmesser dargestellt [4]. Der Zusammenhang der Porengröße, des Drucks und der effektiven Wärmeleitfähigkeit führt zu den folgenden Überlegungen:

- Bei einer Vergrößerung der Poren muss der Druck verringert werden, wenn man die Wärmeleitfähigkeit beibehalten will
- Verkleinert man die Poren und hält den Druck konstant, dann stellt sich eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit ein
- Eine Verringerung der Porengröße und des Drucks erscheint hinsichtlich der Gaswärmeleitung als ideale Kombination der Ansätze

Berechnungen der Gas-Wärmeleitfähigkeit in Poren lassen sich mit einer Vielzahl von Modellen berechnen. Einen guten Überblick über Modelle und Basisliteratur bietet die Übersicht zur Literatur zur Wärmeleitung in [5].

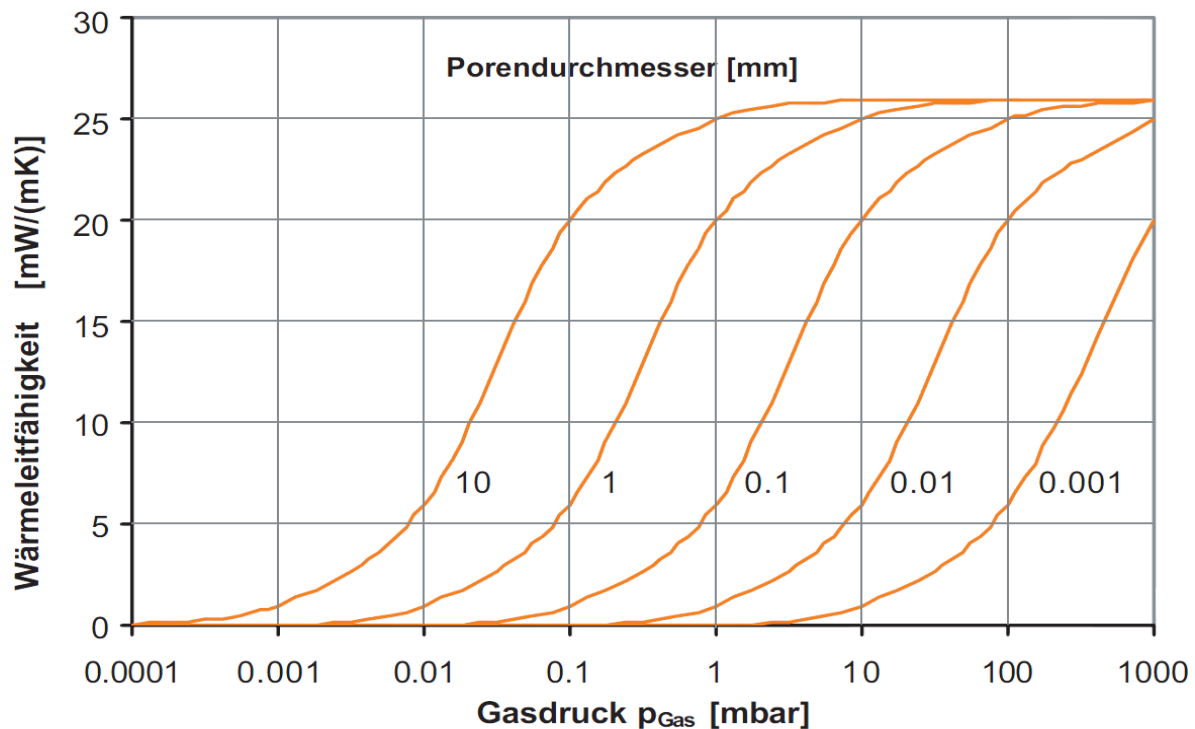


Abbildung 2: Effektive Wärmeleitfähigkeit der Luft in Poren in Abhängigkeit von Porengröße (Durchmesser in Millimeter) und Druck (von J. Cremers [4])

### 2.1.2.2 Festkörper-Wärmeleitung

Für Schaumkunststoffe ist die Festkörperwärmeleitung vor allem von der Rohdichte abhängig. Es kann nach dem Glicksman-Modell, wie von J. Fricke; A. Beck und M. Binder in [2] erläutert, eine lineare Abhängigkeit von der Dichte angenommen werden. Das einfache Abschätzverfahren aus der Dichte vor und nach dem Schäumen erfolgt nach der folgenden Formel:

$$\lambda_F = \left( \frac{2}{3} - \frac{f_{ST}}{3} \right) \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \lambda_0 \quad \text{W/(m·K)}$$

mit:

$f_{ST}$  Masseanteil in den Stegen des Schaumstoffs

$\rho$  Dichte des Schaumstoffs in kg/m<sup>3</sup>

$\rho_0$  Dichte des kompakten Materials vor dem Aufschäumen kg/m<sup>3</sup>

$\lambda_0$  Wärmeleitfähigkeit des kompakten Materials vor dem Aufschäumen in  $W/(m \cdot K)$

Die Festkörperwärmeleitung für Schäume ändert sich nicht durch eine Auflast, wenn die Struktur des Dämmstoffs nicht zusammengedrückt wird.

Für Faserlagen und Schüttungen ändert sich die Festkörperwärmeleitfähigkeit stark mit der mechanischen Belastung, da sich die Porenräume verdichten und die Fasern oder Pulverkörner aufeinandergedrückt werden. Dadurch wird das Material verdichtet und die thermischen Übergangswiderstände an den Kontaktstellen nehmen ab. Natürlich spielen auch bei Faserlagen und Schüttungen die Rohdichte und die Durchgängigkeit der Strukturen für den Wärmefluss eine wesentliche Rolle [2]. Da diese Kontaktstellen allerdings weniger ausgeprägt sind als beispielsweise die Zellwände in Schaumkunststoffen, zeigen sich hier Festkörperwärmeleitfähigkeiten von bis zu unter  $0,002 W/(m \cdot K)$ .

Die Festkörperwärmeleitung steigt an, wenn Feuchte in hydrophilen Pulver- oder Fasermaterialien eingelagert wird. Die Wasserdampfteilchen lagern sich an den Punktkontakten an, kondensieren, und führen zur teilweisen Überbrückung der thermischen Widerstände. Abbildung 3 zeigt schematisch die Festkörperwärmeleitung an punktförmigen Kontakten, mit und ohne Kondensat in den Zwickeln [2].

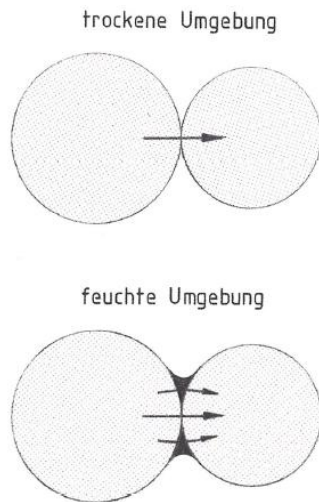


Abbildung 3: Durch die Einlagerung von Feuchte in hydrophile Materialien erhöht sich die Festkörperwärmeleitung

#### 2.1.2.3 Wärmestrahlung

In evakuierten Hohlräumen wird Wärmeenergie hauptsächlich durch Wärmestrahlung und über die Wärmeleitung im Restgas übertragen. Wenn ausreichend niedrige Drücke vorherrschen, erfolgt die Wärmeübertragung nahezu ausschließlich durch Strahlung. Das Stefan Boltzmann Gesetz beschreibt die emittierte Gesamtstrahlungsleistung einer Oberfläche A mit der thermodynamischen Temperatur T:

$$P_S = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad W$$

mit:

- A     Oberfläche in m<sup>2</sup>
- T     Thermodynamische Temperatur in K
- $\sigma$    Stefan – Boltzmann – Konstante ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )
- $\varepsilon$      Emissionsgrad der strahlenden Oberfläche

Für die meisten Baustoffe kann für den Emissionsgrad ein Wert von ca. 0,90 bis 0,95 angenommen werden. Ausführliche Tabellen für Oberflächen aus dem Bau und aus der technischen Wärmedämmung finden sich z.B. im VDI Wärmeatlas [6]. Sind zwei gegenüberliegende Flächen, die sich im Strahlungsaustausch befinden gleich groß ( $A_1 = A_2 = A$ ) und haben beide den gleichen Emissionsgrad  $\varepsilon$  aber unterschied-

liche Oberflächentemperaturen  $T_1$  und  $T_2$ , so gilt für den von  $A_1$  nach  $A_2$  übertragende Wärmestrom:

$$\Delta P_S = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad W$$

Der Anteil der Strahlung an der Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes kann mit der folgenden Formel berechnet werden (aus [2]):

$$\lambda_S = \frac{16n_0^2 \cdot \sigma \cdot T_S^3}{3E(T_S)}$$

mit:

- $\lambda_S$  Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen Porenwänden in  $W/(m \cdot K)$
- $n_0$  effektiver Brechungsindex (kann für Silica-Materialien 1 gesetzt werden)
- $T_S$  mittlere Strahlungstemperatur als thermodynamische Temperatur in K
- $E$  Extinktion in  $m^{-1}$  (kann vereinfachend auch als nicht temperaturabhängig angesetzt werden)
- $\rho$  Rohdichte des Dämmstoffes in  $kg/m^3$

Mit dieser Betrachtungsweise lassen sich verschiedene Optimierungsansätze zur Minimierung der Wärmeübertragung durch Strahlung diskutieren. Die Einsatztemperatur ist durch die Bauanwendung in einem engen Bereich vorgegeben. Die Verringerung des Anteils der Wärmeübertragung durch Strahlung kann also nur durch eine Erhöhung der Extinktion und/oder der Rohdichte erfolgen. Die Erhöhung der Dichte  $\rho$  führt zu einer Erhöhung der Festkörperwärmeleitung, die in engen Grenzen tolerierbar aber prinzipiell unerwünscht ist. Es bleibt somit nur die Erhöhung der massenspezifischen Extinktion  $e$  um die Extinktion  $E$  zu erhöhen. Dieses lässt sich nur durch das Untermischen von infrarot-Trübungsmitteln im Füllmaterial erreichen. Anschauliche Erklärungen zum Strahlungswärmedurchgang und ein allgemein gültiges Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe stellt M. Zeitler in [7] vor.

J. Cremers führt in [4] aus, dass sich durch die Beimischung von Trübungsmitteln (zum Beispiel Titanoxid,  $TiO_2$ ) zu mikroporösen Kieselsäuren die Gesamt-Wärmeleitfähigkeit schon bei Umgebungsdruck auf unter  $0,018 W/(m \cdot K)$  reduzieren

lässt. Die Verwendung von Kernmaterial hat - trotz Wärmeleitung im Feststoffgerüst - somit sogar einen positiven Effekt auf die Wärmeleitfähigkeit der VIPs, verglichen mit einer druckstabilen Hülle ohne Kernmaterial, da die Verminderung der Wärmeübertragung durch Strahlung sich stärker auswirkt als die Zunahme der Wärmeleitung im Feststoffgerüst.

### 2.1.3 Stützkerne

Aus den vorherigen Absätzen folgt, dass das Kernmaterial eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen und diese schon bei möglichst geringen Anforderungen an das Vakuum zeigen muss. Kernmaterialien (oder daraus hergestellte Stützkerne) müssen in der Lage sein, die Last aus dem äußeren Luftdruck abzutragen, ohne dass sie zu stark zusammengedrückt werden und ihre Gerüstwärmeleitung zu stark ansteigt. Zudem sollen Stützkerne ausreichend offenporig sein, um sie evakuieren zu können und frei von jeglichen Ausgasungen. Mögliche Materialien sind offenzellige organische Schäume, Mineralfasern, v.a. Glasfasern ohne ausgasende Bindemittel, technische Aerogele und Kieselsäure (mikroporös als pyrogene Kieselsäure oder Fällungskieselsäure).

Im Lehrbuch „Vakuum-Isolations-Paneele für Gebäude [2] kommen Fricke et.al. zur Erkenntnis, dass pyrogene Kieselsäure in Hinblick auf die Gaswärmeleitung besonders attraktiv ist, da die gewünschte niedrige Wärmeleitfähigkeit von  $0,004 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  bereits bei Unterschreiten eines Restgasdruckes von 20 mbar erreicht wird. Der Verlauf der Druck-Wärmeleitfähigkeits-Kurve ist beim monolithischen Aerogel ähnlich gut, dessen Festkörperleitfähigkeit ist jedoch größer als die der pyrogenen Kieselsäure. Das führt zu einer höheren Anfangs-Wärmeleitfähigkeit der Paneele.

Mögliche Füllmaterialien für VIPs sollten also nicht nur unter dem Aspekt der Porengröße ausgesucht werden. Unter der Beachtung der Porengröße und Porenverteilung, der Gerüstwärmeleitung und Strahlungsdurchlässigkeit lassen sich für offenporige, evakuierbare Materialien, die spezifischen Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit des Gasdrucks berechnen. Diese sind von Binz et.al. im Forschungsbericht „Vacuum Insulation Panels...(Subtask A)“ beschrieben [8]. Aus diesem Forschungsbericht

stammt auch Abbildung 4. Bei „precipitated silica“ handelt es sich um gefällte Kieselsäure, bei „fumed silica“ handelt es sich um pyrogene Kieselsäure.

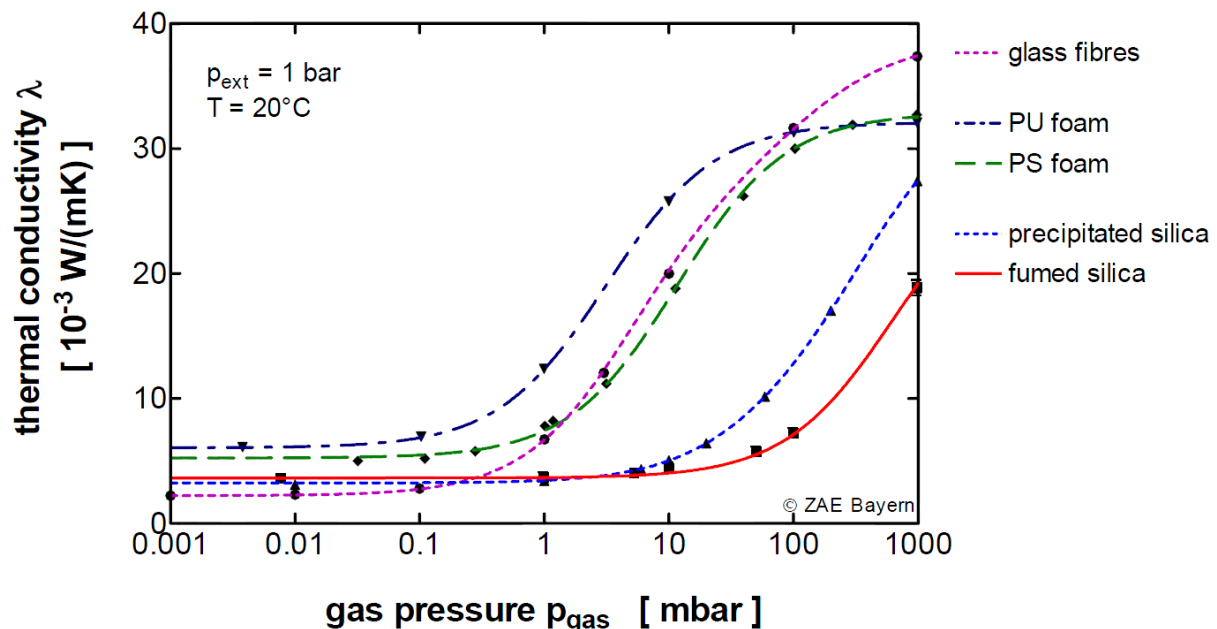


Abbildung 4: Wärmeleitfähigkeit (thermal conductivity  $\lambda$  in  $W/(m \cdot K)$ ) verschiedener Kernmaterialien in Abhängigkeit des Gasdrucks (gas pressure  $p_{\text{gas}}$  in mbar) aus [8]. Die Wärmeleitfähigkeit von pyrogener Kieselsäure steigt nennenswert erst ab einem Druck von ca. 50 mbar an.

Die bisher verwendeten organischen Schäume sind vor allem extrudiertes Polystyrol (Rohdichte zwischen ca. 80 und 150  $\text{kg/m}^3$ ) und Polyurethan (Rohdichte zwischen ca. 50 und 80  $\text{kg/m}^3$ ) [4]. Aus Abbildung 4 ergibt sich, dass der herrschende Druck bei Kunststoffschäumen und Fasern bei gleicher Paneel-Anfangs-Wärmeleitfähigkeit niedriger sein muss als zum Beispiel bei mikroporöser Kieselsäure. Es können nur vollständig offenporige Kunststoffschäume evakuiert werden, da sich bei geschlossenen, mit Gas gefüllten Poren, ein Druckgefälle zwischen geschlossenen und offenen Poren im Material aufbaut. Das eingeschlossene Gas entweicht dann nur langsam in die offenzellige Struktur, von der es abgesaugt werden kann. Dieses langsame „Nachströmen“ führt zu einem Druckanstieg und dadurch natürlich zu einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit. Das ist der Haupt-Nachteil der geschäumten Kunststoffe im Gegensatz zu Pulver- und Fasermaterialien, die aufgrund ihrer strukturellen Eigenschaften völlig offenzellig sind.

Möglich sind auch Ausgasungen aus nicht vollständig umgesetzten chemischen Komponenten, oder aufgrund von Zersetzungsvorgängen im Zuge der Alterung. Wenn die Schäume vor dem Einbau lange genug gelagert und dadurch vorgetrocknet wurden, kann die Gefahr des Ausgasens vermindert werden.

Sehr sensibel reagieren Stützkerne aus Kunststoffschäumen auf eindringende Feuchte, da sie diese nicht binden oder einlagern können und sie somit direkt zu einer Druckerhöhung führt. Hier müssen Getter zur Bindung der eingedrungenen Feuchte eingesetzt werden. Je nach Menge und Verteilung der Getter im Stützkern stellen diese eine merkliche Wärmebrücke dar.

Deutliche Vorteile der Schäume sind das viel geringere Gewicht und der wesentlich niedrigere Preis gegenüber pyrogener Kieselsäure, bei einer gleichzeitig hohen Druckfestigkeit. Die Handhabung von Schäumen als Kernmaterial ist jedoch deutlich schwieriger als die von pulverförmigen oder faserigen Materialien (s.a. Kapitel „Ergebnisse“ (Voruntersuchungen).

Vielversprechendes Ersatz-Kernmaterial für pyrogene Kieselsäure sind Mineralfasern, v.a. Glasfasern, die temperaturbehandelt und gepresst werden. Die erreichbaren Wärmeleitfähigkeiten sind nach Abbildung 4 sogar noch etwas niedriger als mit pyrogener Kieselsäure. Glasfasern eignen sich hier wegen ihrer feineren Faserstruktur etwas besser als Steinwolle. Beide Kernmaterialien dürfen keinerlei ausgasende Bindemittel oder Zusatzstoffe enthalten. Glasfasern könne in einem breiten Rohdichtebereich zwischen 100 und 400 kg/m<sup>3</sup> hergestellt werden. Stützkerne aus Fasern stellen aus den o.g. Gründen – genauso wie die Kunststoffschäume - höhere Anforderungen an das Vakuum als pyrogene Kieselsäure. Bisher fanden Glasfasern hauptsächlich in Verbindung mit Glas oder Blech als Hüllmaterialien Verwendung. Die Wärmeleitfähigkeit, die sich im evakuierten Zustand erreichen lässt, liegt zwischen 0,0015 und 0,003 W/(m·K).

Ein mögliches weiteres Kernmaterial ist Aerogel, wobei hier vor allem das Silica – Aerogel in Frage kommt. Die Porengrößen dieser organischen Siliziumverbindungen liegen bei 10 – 100 nm und sie weisen einen Porenvolumenanteil von mehr als 80 % auf. Die Rohdichte deckt einen großen Bereich ab, liegt aber oft unter 300 kg/m<sup>3</sup>. Durch eine Modifikation des Herstellverfahrens und die Änderung des Prozesses der überkritischen Trocknung sind Aerogele in letzter Zeit günstiger und einfacher verfügbar geworden. Kommerziell erhältlich sind mittlerweile Produkte die als Granulat für Schüttungen angeboten werden, und Matten mit Vliesen als Deckschichten. Für die Anwendung als Kernmaterial sind gepresste monolithische Blöcke erhältlich. Da Aerogele sehr durchlässig für Strahlung sind, müssen dem Gel Trübungsmittel wie zum Beispiel Ruß zugesetzt werden.

Die Wärmeleitfähigkeit eines monolithischen, infrarotgetrübten Aerogels liegt etwa bei 0,013 W/(m·K) bei Normaldruck, was es zu einem der besten Wärmedämmstoffe macht. Wird das Aerogel evakuiert, stellt sich die Wärmeleitfähigkeit unter 20 mbar Innendruck etwa zu 0,006 W/(m·K) ein [2]. Wird ein Granulat verwendet, muss aufgrund der Größe der Zwischenräume der Schüttungs-Bestandteile auf einen deutlich niedrigeren Druck evakuiert werden. Kaum Vorteile gegenüber pyrogener Kieselsäure haben Aerogele durch ihre energieintensive Herstellung, ihren Preis und die noch geringe Verfügbarkeit. Um sie als Stützkern für ein VIP zu verwenden, müssen höhere Anforderungen an das Vakuum und somit auch an die Umhüllung gestellt werden.

Das bisher wichtigste Kernmaterial sind Kieselsäuren. Die Sauerstoffsäuren des Siliziums werden als Kieselsäure bezeichnet, die in der Natur als Silikate vorkommen. Amorphe Kieselsäuren haben gegenüber den kristallinen eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit und sind gesundheitlich unbedenklich, was ihre fast ausschließliche Verwendung erklärt. Im Zusammenhang mit Vakuum-Dämmung kommen zwei Arten von amorpher Kieselsäure vor. Fällungskieselsäure mit etwas weniger filigranen Strukturen und pyrogene Kieselsäure. Kieselsäuren haben für moderne Baustoffe wichtige Eigenschaften; sie sind:

- toxikologisch unbedenklich,

- emissionsfrei,
- gut rezyklierbar,
- nicht brennbar

Fällungskieselsäure weist eine gröbere Struktur als pyrogene Kieselsäure auf, was einen niedrigeren Innendruck im Paneel erfordert. Die Herstellung ist weniger aufwändig und zu einem günstigeren Preis realisierbar. Fällungskieselsäure könnte zukünftig in Vakuum – Dämmsystemen eingesetzt werden, wenn die höheren Anforderungen an die Umhüllung gelöst sind. Pyrogene Kieselsäure wurde 1942 durch Harry Klöpfer von der Firma Degussa erfunden, die das Material unter dem Markennamen Aerosil® herstellte und vertrieb [4]. Abbildung 5 zeigt schematisch den Herstellungsprozess pyrogener Kieselsäure aus Chlorsilan ( $\text{SiCl}_4$ ) in der Wasserstoffflamme (Quelle: Wacker BU Silicones).

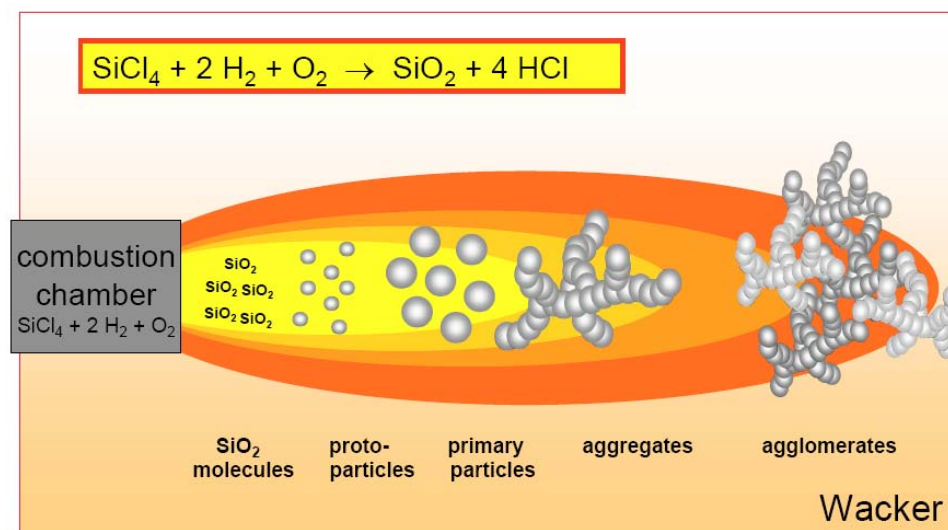


Abbildung 5: Herstellungsprozess pyrogener Kieselsäure und Zusammenballung der Partikel

Die Primärteilchen sind amorph und etwa 10 bis 30 nm groß [3]. Sie setzen sich noch in der Flamme zu Aggregaten zusammen, deren Durchmesser etwa 10-mal so groß ist. Aus den Aggregaten entstehend bei der Abkühlung Agglomerate der Größe 1 bis 1000  $\mu\text{m}$ , H. Schwab gibt in [3] 10 bis 100  $\mu\text{m}$  an. Die Teilchen besitzen eine  $\text{SiO}_4$  Tetraederstruktur verbunden über Si-O-Si Siloxanbrücken. Etwa an jedem zweiten Si-Atom ist eine OH-Gruppe, die Silanolgruppe angelagert. Abbildung 6 zeigt

schematisch die Anordnung der Tetraeder in den Primärpartikeln und die Silanolgruppen.

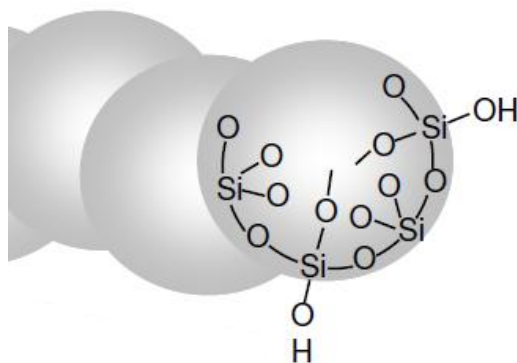


Abbildung 6: Chemische Struktur der pyrogenen Kieselsäure-Partikel (Quelle: Wacker BU Silicones)

An den Silanolgruppen können durch Wasserstoffbrückenbindung Wassermoleküle angelagert werden (Physisorption von Wasser). Diese Anlagerung geschieht innerhalb kurzer Zeit und ist auch bei Raumtemperatur reversibel. Neuere Forschungsergebnisse legen die Vermutung nahe, dass nach längerer Zeit die Siloxanverbindung Si-O-Si und das durch Physisorption angelagerte Wassermolekül H-O-H aufgetrennt werden und sich an allen beteiligten Si-Atomen Silanolgruppen Si-OH bilden. In diesem Prozess wird das Wasser chemisch gebunden. Der Prozess ist erst bei deutlicher Temperaturerhöhung wieder rückgängig zu machen. Das chemisch gebundene Wasser steht damit nicht mehr für einen Anstieg des Dampfdrucks innerhalb der VIP-Hülle zur Verfügung. Mikroporöse Kieselsäure als Kernmaterial wirkt somit gegenüber eingedrungenem Wasser als Getter, was für die Eignung als VIP Stützkern von Vorteil ist.

In der IUPAC Nomenklatur werden Porengrößen kleiner 2 Nanometer als Mikroporen, Poren zwischen 2 und 50 Nanometer als Mesoporen und Poren größer 50 Nanometer als Makroporen bezeichnet. Die typische Porengröße in VIP Stützkernen aus pyrogener Kieselsäure (gepresste Platten der Rohdichte 150 bis 180 kg/m<sup>3</sup>) liegen mit 50 – 100 nm im niedrigen Bereich der Makroporen, aber es hat sich die Be-

zeichnung „mikroporöse Kieselsäure“ für solche Stoffe eingebürgert, weswegen im weiteren Verlauf dieser Arbeit das auch so beibehalten wird.

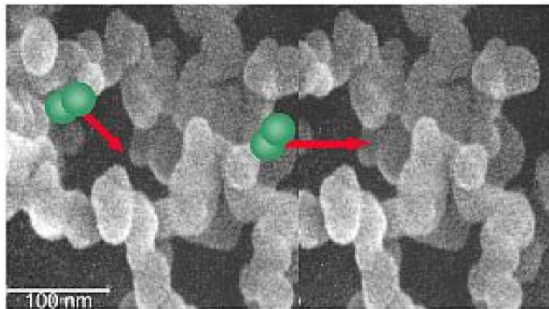


Abbildung 7: SEM Aufnahme der Porengrößenverteilung (Quelle: Wacker/ZAE Bayern) aus dem oben genannten Forschungsbericht [8] mit eingezeichneten Gasmolekülen (grün) und Andeutung der mittleren freien Weglänge (rote Pfeile)

Die Begrenzung der freien Weglänge der Luftmoleküle führt schon bei Atmosphärendruck zu sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeiten an gepressten Platten aus pyrogener Kieselsäure von etwa  $0,018 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Die spezifische Oberfläche in Quadratmeter pro Gramm – z.B. 200 bis  $800 \text{ m}^2/\text{g}$  [4] – ist ein Indiz für die Fähigkeit des Materials Wasserdampfmoleküle anzulagern. Die Untersuchungen der Firma Wacker (z.B. beschrieben von H. Schwab in [3] für den Kieselsäuretyp HDK<sup>®</sup> T30) ergaben für  $23^\circ\text{C}$  und 80% r.F. einen massebezogenen Feuchtegehalt von etwa 7 % aufgrund von Adsorption. Das entspricht 70 g Wasser pro 1 kg Kieselsäure. T. Reiss untersuchte die Wärmeleitfähigkeit von VIP mit unterschiedlichen Feuchtegehalten [9]. Für einen massebezogenen Feuchtegehalt von 7 % kann die Wärmeleitfähigkeit mit etwa  $0,0075 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  angegeben werden. Der durch Sorption bei bauüblichen Feuchten mögliche Feuchtegehalt führt somit zu einem Anstieg von  $0,0035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  gegenüber der Wärmeleitfähigkeit von trockenen VIP.

Nach den Auswertungen von Cremers [4] lässt sich die Rohdichte je nach Druck zwischen ca.  $100$  und  $400 \text{ kg}/\text{m}^3$  einstellen. Hierbei gilt es, zwei gegensätzliche Anforderungen abzuwägen:

- je geringer die Dichte ist, desto besser verhält sich das Material hinsichtlich der Festkörper-Wärmeleitung
- je höher die Rohdichte ist, desto stabiler ist der Stützkern bei Belastung durch den Atmosphärendruck und desto weniger durchlässig ist das Material für Infrarotstrahlung

Die pyrogene Kieselsäure wird aus diesen Gründen mit Glasfasern (Verstärkung und Stabilität der Platten bei der Produktion) und einem Infrarot-Trübungsmittel (zur Verbesserung des Durchstrahlungsverhaltens – meist Silizium-Karbid) versetzt. Dieses Material lässt sich zu Platten verpressen, die in einem breiten Rohdichtebereich angeboten werden.

#### 2.1.4 Umhüllungen

In dieser Arbeit werden ausschließlich VIPs mit Folienumhüllung betrachtet. Die folgenden Anforderungen an die Umhüllung wurden von Cremers in [4] zusammengestellt:

- Gasdichtheit, angepasst an die Anforderung des Vakuums und den Einsatzzeitraum,
- Möglichkeit der Verbindung am Rand (z.B. durch Kleben, Vulkanisieren oder Schweißen),
- möglichst geringe Schichtdicke (vor allem der Metall- oder Metalloxidschichten) um Wärmebrückenverluste zu minimieren,
- eine einfache und gute Verarbeitbarkeit,
- Alterungsbeständigkeit der einzelnen Lagen und ihrer Verbindung untereinander bei Temperatur-, Feuchtebeanspruchung,
- Produktqualität (keine Fehlstellen, und damit Undichtigkeiten),
- Bahnenbreite
- Flexibilität (Dehnbarkeit),
- keine (Mikro-) Risse durch Dauerbelastung, keine Versprödung oder Weißbruchversagen,
- gute Umformbarkeit (möglichst enge Biegeradien ohne Versprödung oder Weißbruchversagen),
- Dauerhaftigkeit über den gesamten angestrebten Temperatur-Einsatzbereich hinaus,

zudem je nach Einbausituation / Anwendung:

- Alterungsbeständigkeit der einzelnen Lagen und ihrer Verbindung untereinander bei möglicher UV-Beanspruchung,
- mechanische Beanspruchbarkeit z.B. zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit beim Handling oder zur Aufnahme von Schwind-Spannungen aus dem Kleber für Deckschichten
- Brandschutz des Bauprodukts VIP und der Bauteile, in denen es verwendet wird (z.B. Sandwichplatten),
- Verträglichkeit mit anderen, angrenzenden bauüblichen Materialien (z.B. Kleber, Putze o.ä.),
- Beständigkeit von Verklebungen der obersten Schichten des Laminats mit Schutzschichten (z.B. aus Holz und Holzwerkstoffplatten, Dämmstoffen etc.)

Für den Einsatz im und an Gebäuden sollten VIP 30 bis 50 Jahre ihre Gebrauchstauglichkeit behalten. In dieser Zeit darf also der Innendruck (für Stützkern aus pyrogener Kieselsäure) nicht über 100 mbar ansteigen (besser < 50 mbar; s.a. Abbildung 4). Unterscheiden muss man zwischen der Dichtheit der Fläche (also der einzelnen Folienbestandteile hintereinander) und der Dichtheit des Randes im Bereich der Siegelnaht. Die jeweiligen Anteile an der Luft- oder Wasserdampf-Permeation wurden durch Untersuchungen an Platten mit unterschiedlichen Abmessungen und verschiedenem Fläche/Umfang-Verhältnis bestimmt [10], [3].

Der Paneelrand ist hinsichtlich der Gasdichtheit und der Wärmebrückenwirkung eine Schwachstelle. Die Gasdichtheit ist geringer als in der Fläche. Wie dicht die Umhüllung (Einfluss der Ränder und der Fläche) sein muss, wird vom Stützkern bestimmt. Innerhalb gegebener Grenzen (Porengrößen des Stützkerns, Gasdichtheit der Folie) kann eine Optimierung des Gesamtsystems erfolgen. Für Kernmaterialien mit einer höheren Anforderung an die Qualität des Vakuums, wie z.B. Faserstützkern, reduziert sich dadurch die zulässige Permeationsrate gegenüber pyrogener Kieselsäure drastisch.

Simmler et.al. [8] geben als Anhaltswert in der Einleitung zu ihrem Kapitel 3 „Envelope“ unter Beachtung der Tatsache, dass einige Kernmaterialien für Wasserdampf als Getter wirken, aus der Lebensdauer von 30 bis 50 Jahren rückgerechnet, maximal zulässige Permeationsraten von etwa  $10^{-2} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$  für trockene Gase

und etwa  $10^{-4}$  g/(m<sup>2</sup>·d) für Wasserdampf an. Diese Zahlen beziehen sich auf pyrogene Kieselsäure als Stützkern. Permeationsraten für Wasserdampf (WVTR) durch Hochbarrierelamine können derzeit zuverlässig nur bis ca.  $5 \times 10^{-4}$  g/(m<sup>2</sup>·d) gemessen werden; Permeationsraten für Sauerstoff O<sub>2</sub>TR nur bis ca. 1 bis  $10 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d·bar) [11]. Die derzeit im Einsatz befindliche Messtechnik stößt bereits bei den Hochbarrierelaminen für den Einsatz mit pyrogener Kieselsäure an ihre analytischen Grenzen. Für den Einsatz alternativer Stützkern sind noch wesentlich geringere Permeationsraten notwendig. Daten zu Permeation und Alterungsverhalten der Folien und Paneele lassen sich aus diesem Grund fast nur indirekt, d.h. über die Messung der Wärmeleitfähigkeit, bekommen. Direkte Messung des Innendrucks mit dem Folienabhebeverfahren ist bei fasergefüllten VIP aufgrund der unebenen Struktur der VIP-Oberfläche schwierig.

Hüllfolien für VIP sind Mehrschichtsysteme, deren einzelne Lagen verschiedene Funktionen erfüllen. Die gas- und wasserdampfdichte Barrierschicht besteht aus anorganischem Material, bisher meist aus Aluminium, und ist zwischen mehreren Kunststofffolien eingebettet. Die Kunststoffschichten übernehmen Träger- und Schutzfunktion (Nylon, PET, PP usw.), und dienen zur Verschweißung (PE). Die Lamine auf Kunststoffbasis wären ohne die anorganischen Barrieren nicht in der Lage das Eindiffundieren von Wasserdampf nennenswert zu reduzieren.

Bei den mehrschichtigen Foliensystemen unterscheidet man in

- a) metallisierte Folien (Hochbarrierelamine) und
- b) Metall-Verbundfolien (v.a. Aluminium-Verbundfolien; Ultrabarrierelamine).

Die erstgenannten, metallbedampften Systeme sind hinsichtlich der Wärmebrückeneffekte am Rand deutlich günstiger, weisen aber höhere Permeationsraten auf. Hier beträgt die Dicke jeder der bis zu drei anorganischen Schichten 30 bis 80 Nanometer. Die Struktur der aufgedampften Schichten ist nanokristallin und weist leider zahlreiche Fehlstellen, sog. Nanogaps auf, durch die Wasserdampf eindringen kann. Trockene Gase können durch die ebenfalls vorhandenen punktuellen Undichtigkei-

ten, sog. Pin-holes, eindringen. Hier versucht man durch die Mehrlagigkeit der anorganischen Schichten Abhilfe zu schaffen, da solche Nanogaps und pin-holes nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit in zwei Lagen an der gleichen Stelle liegen. Der Diffusionsweg für die Gase wird durch die Versetzung der Störstellen entscheidend verlängert. Abbildung 8 zeigt die Vorteile der mehrlagigen anorganischen Schichten und die Vergrößerung der Diffusionswege.

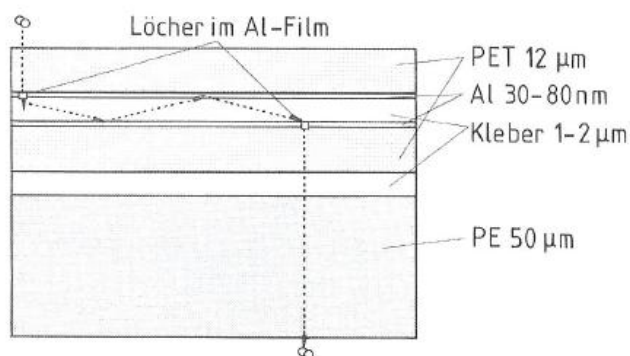


Abbildung 8: Darstellung der Vorteile der mehrlagigen anorganischen Schichten auf die Diffusionswege an Störstellen; aus [2]

Bei den Aluminium-Verbundfolien wird auf eine für die Verschweißung benötigte Polyethylenschicht eine 6 bis 12 µm dicke Aluminiumfolie aufkaschiert. Die flächenspezifische Gasdurchlässigkeit ist sehr gering und derzeit mit den etablierten Messmethoden nicht genau zu bestimmen. Aus dem Druckanstieg in evakuierten Paneelen verschiedener Größe kann die Diffusionsrate für Wasserdampf für gute Verbundfolien in der Größenordnung  $10^{-4}$  g/(m<sup>2</sup>·d) abgeschätzt werden. Die summierte Dicke der Aluminiumschichten in den Hochbarrierelaminaten und in der Verbundfolie unterscheidet sich etwa um den Faktor 60 bis 90, was auch zum großen Teil die Unterschiede bei den Wärmebrückeneffekten erklärt.

Sogenannte SiO<sub>x</sub> – bedampfte Folien sind neuere Entwicklungen als mögliche Alternative zu den hier beschriebenen Folien. Die Gasdichtheit ist mit den metallisierten Folien vergleichbar. Die Wärmeleitfähigkeit von SiO<sub>x</sub> liegt im Bereich von Glas (ca. 1,0 W/(m·K)), und ist damit ca. 160 mal geringer als die von Aluminium. Es ergeben sich wesentlich kleinere Wärmebrückeneffekte am Paneelrand, bzw. bei gleichem

Wärmebrückeneffekt könnte die anorganische Schicht dicker und damit dichter ausgeführt werden. In diesem Zusammenhang sind auch zusätzliche Schichten aus organisch-anorganischen Hybrid-Polymeren (Handelsname ORMOCER®) zu sehen, die makroskopische Defekte (Nanogaps und Pin-holes) der aufgedampften Schichten ausfüllen können und die eine sehr ebene Oberfläche für eine weitere Bedampfungsschicht herstellen können [12]. Je nach Bedampfungsmaterial können sie sogar kovalente Bindungen mit der Bedampfungsschicht eingehen, was die Gleichmäßigkeit und die Dichtheit dieser Schicht noch erhöht. Leider sind diese Folien noch in der Erprobungsphase und noch nicht kommerziell erhältlich. Aus diesem Grund wird ihr Aufbau nur theoretisch hinsichtlich ihrer Wärmebrückenwirkung im Randbereich untersucht und bewertet.

#### 2.1.5 Schutzschichten

Um die Eigenschaften von Vakuum Isolationspaneelen für bestimmte Anwendungen im Baubereich zu optimieren, kann es sinnvoll sein, die VIPs vor einer weiteren Verarbeitung allseitig mit Schutzschichten zu umhüllen, bzw. einzuschäumen. Für eine komplette Einhüllung eignen sich Dämmstoffe, wie Polyurethan- oder Polystyrolschaum. Als Schutzschichten auf den Flächen werden auch andere Werkstoffe eingesetzt, die durch Kleben auf den Folienoberflächen befestigt werden können (z.B. Holz und Holzwerkstoffe, Kunststoffe, Metallschichten). Für eine allseitige Umhüllung eignen sich solche plattenförmigen Werkstoffe jedoch nur bedingt oder gar nicht.

Umhüllungen und/oder Schutzschichten bieten erhöhten mechanischen Schutz während des Transports vom Hersteller zur Baustelle, während der Lagerhaltung auf der Baustelle und natürlich auch bei der Montage. Herstellungstoleranzen können durch Bearbeitungsmöglichkeiten am Rand verringert werden. Werden diese Schutzschichten an den Rändern noch etwas dicker ausgeführt, lassen sich diese Paneele sogar in geringem Umfang auf der Baustelle nacharbeiten oder anpassen. Die Fugen werden dichter, da sich die Platten sauberer stoßen lassen. Die Umhüllungen bieten natürlich auch erhöhten Schutz vor Umwelteinflüssen wie Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen oder aggressive Substanzen aus Putzen oder Mörtel etc. Dadurch lässt sich unter Umständen eine längere Funktionsdauer realisieren.

Nachteilig ergibt sich durch diese Schutzschicht natürlich ein erhöhter Kostenaufwand, der sich aber beispielsweise durch Serienproduktion von Paneelen mit Rastermaßen wieder auffangen lässt.

Ein großer Nachteil sind die deutlich erhöhten Wärmebrückeneffekte in den breiteren Fugen, besonders wenn nicht Dämmstoffe eingesetzt werden. Durch die Schutzschichten erhöht sich die Bauteildicke, die gerade bei den schlanken VIPs eines der Hauptargumente für den Einsatz in beengten Verhältnissen ist, bzw. in verdichteten innerstädtischen Lagen zu einem wirtschaftlichen Einsatz des Produktes führen kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird auch der Anteil der Schutzschichten auf den Flächen am Wärmebrückeneffekt des Randes untersucht.

#### 2.1.6 Feuchtegehalt

Durch Untersuchungen an VIPs unterschiedlicher Größe nach Lagerung bei erhöhter Umgebungsfeuchte kann man feststellen, dass die Massezunahme deutlich von der Größe der VIPs abhängig ist. Wasserdampf dringt demnach vor allem durch die Fläche der VIPs ein. Die Wassermoleküle lösen sich im Polyethylen und finden Wege durch die Lamine und sogar durch die Aluminiumschichten. Nach Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens HiPTI – Subtask A [8], liegt die Vermutung nahe, dass für die Wasserdampf-Permeation durch die Barrierschichten vor allem punktuelle Störstellen (Kapillaren), an den Korngrenzen der Aufdampfung und an mikroskopischen Defekten, verantwortlich sind. Der eingedrungene Wasserdampf führt je nach Kernmaterial zu einem mehr oder weniger ausgeprägten Druckanstieg im VIP. Hydrophile Kernmaterialien (z.B. pyrogene Kieselsäure) sind in der Lage, eingedrungenen Wasserdampf zu binden. Es steht dann nur ein geringer Anteil für eine Erhöhung des Partialdruckes zur Verfügung. Bei hydrophoben Kernmaterialien (Fasern oder Schäumen) ist damit zu rechnen, dass ohne den Einsatz von Gettern fast der gesamte eingedrungene Wasserdampf zur Erhöhung des Partialdrucks beiträgt.

Freier Wasserdampf in den Poren trägt zur Erhöhung der Gaswärmeleitung bei. Die Wärmeleitfähigkeit liegt für freien Wasserdampf mit  $0,018 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  bei Normaldruck

und bei etwa 300 K etwas niedriger als die von Luft mit  $0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , aber immer noch deutlich über der eines evakuierten Stützkerns  $0,002$  bis  $0,006 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Zusätzlich lagern sich die eingedrungenen (und absorbierten) Wasserdampfteilchen in den Zwickeln der Kontaktstellen der Partikel bzw. der Fasern an und erhöhen die Feststoffwärmeleitfähigkeit durch Verminderung der Kontaktwiderstände. Diffundiert mehr Wasser ein, können kleine Poren gefüllt werden, was u.a. zur thermischen Aktivierung „toter Wege“ im Kieselsäuregerüst führt, oder Wegverkürzungen für die Wärme im Agglomerat ermöglicht [3].

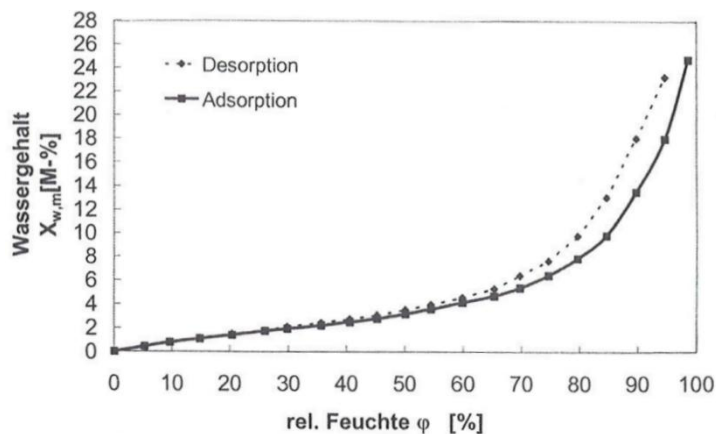


Abbildung 9: Adsorptions- und Desorptionsisotherme von Kieselsäure Typ Wacker HDK® T30 (Darstellung aus [3])

Der Ausgleichsfeuchtegehalt von Baustoffen wird nach DIN EN ISO 12571 [13] ermittelt und in Deutschland für „saugende“ Baustoffe üblicherweise als der Wert angegeben, der sich bei Lagerung im Klima  $23^\circ\text{C}$  und 80% r.F. ergibt (Randbedingung der zurückgezogenen DIN 52620). Für Dämmstoffe findet auch der Wert der Ausgleichsfeuchte bei der Lagerung im Klima  $23^\circ\text{C}$  und 50% r.F. Verwendung, was bei der in Abbildung 9 dargestellten Adsorptionskurve zu einem Ausgleichsfeuchtegehalt von etwa 3 Masse-% führt. Die hieraus zu erwartende Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit liegt etwa bei  $0,002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Die Zunahme ist in den ersten Jahren größer und nimmt gegen Ende hin ab, da das antreibende Potenzial des Wasserdampfdrucks abnimmt. Für  $23^\circ\text{C}/80\%$  r.F. ergeben sich ca. 7 Masse-% und somit die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit etwa um  $0,0035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  s.a. Abschnitt 2.1.3.

### 2.1.7 Eindringen trockener Gase

Das Eindringen trockener Gase durch die Umhüllung in die VIP ist eine der Ursachen für die Degradation. Aus der Betrachtung der Porengrößen und ihrer Verteilung, sowie der Berechnung der mittleren freien Weglänge der Luftmoleküle für die als Kernmaterialien in Frage kommenden Stoffe, lässt sich ermitteln, welcher Druckanstieg für ein funktionierendes System tolerabel ist und wie dieser Druckanstieg zeitlich verteilt sein muss, um die angestrebte Lebensdauer zu erreichen. Für VIPs mit metallisierten Hochbarrierefolien kann ein Druckanstieg von weniger als 1 mbar pro Jahr erreicht werden, wie u.a. von R. Caps in seinem Tagungsbeitrag der Fachtagung VIP-Bau in Rostock erläutert [14]. Diese Systeme sind nach 50 Jahren bei maximal 50 mbar Innendruck angekommen – ein Wert bei dem ein System mit pyrogener Kieselsäure als Stützkern noch die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,006 W/(m·K) aufweist. Die Untersuchungen am ZAE Bayern weisen darauf hin, dass das Eindringen trockener Gase vor allem im Bereich der Siegelnähte erfolgt.

### 2.1.8 Wärmeleitfähigkeit

Für diese Untersuchung wird die Wärmeleitfähigkeit im ungestörten Bereich in Paneelmitte betrachtet. Die Rand-Wärmebrücken haben einen Einflussbereich, der je nach verwendeter Folie und Dicke der Metallisierungsschichten unterschiedlich groß ist. Messungen an verschiedenen Plattengrößen mit Heizplatten unterschiedlicher Größe im FIW München haben gezeigt, dass sich die Wärmebrücken am Rand für übliche Folien nicht weiter als 10 cm vom Rand entfernt auswirken. Diese Ergebnisse werden auch durch die numerische Betrachtung der Störstellen unterstützt [15].

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit wird mit Plattengeräten (Zweiplattenverfahren und Wärmestrommessplattenverfahren) durchgeführt. Die Messungen werden bei Umgebungsdruck und für den Hochbau üblichen Temperaturen durchgeführt. Um auch minimale Geräteeinflüsse auf die vergleichenden Messungen auszuschließen, werden die Messungen nacheinander im selben Gerät durchgeführt. Die normativen Grundlagen der Messungen finden sich in DIN EN 12667 [16]. Werden Prüfungen unter Verwendung von Ausgleichsschichten durchgeführt, müssen die Messergebnisse entsprechend der Korrekturrechnung in DIN EN 12664 [17] korrigiert werden.

Die Spanne der Wärmeleitfähigkeiten für frisch evakuierte VIP mit getrockneten Kernen hängt von der Art und der Rohdichte des Kernmaterials ab. Wie sich diese über die Zeit ändert, wird maßgeblich vom Kernmaterial, den eingedrungenen Gasen und dem Wasserdampf bestimmt. H. Simmler und S. Brunner leiten in ihrem Beitrag „Vacuum insulation panels for building application“ [18] den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit eines durchschnittlichen Kieselsäure-Kerns mit einer Hülle aus metallisierter Hochbarrierefolie, aus einer Versuchsreihe zu Wärmeleitfähigkeit und Innendruck her. Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit liegt nach [18] in der Größenordnung von etwa  $0,1 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{a})$ .

#### 2.1.9 Wärmebrückenwirkungen

Wärmebrücken sind Stellen in Bauteilen, die im Vergleich zu den angrenzenden Bauteilbereichen eine örtlich höhere Wärmestromdichte aufweisen. Ihr physikalisches Merkmal ist, dass die Isothermen an dieser Stelle gegenüber dem ungestörten Bauteil einen verzerrten Verlauf aufweisen. Bei homogenen Bauteilen mit einer konstanten Temperaturdifferenz stellen sich immer oberflächenparallele Isothermen ein. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten an einer Wärmebrücke wird ein Temperaturgradient in Richtung der Wärmebrücke erzeugt.

Je nach Beschaffenheit der angrenzenden Baustoffe ergibt sich zur Wärmebrücke hin eine unterschiedlich starke Querleitung. Die Querleitung ist allerdings bei normalen Bau- und Dämmstoffen (mit Ausnahme von massiven Beton- und Stahlbauteilen) nicht sehr ausgeprägt. Durch die örtlich erhöhte Wärmestromdichte wird nicht nur in dem betreffenden Bereich die Oberflächentemperatur des Bauteils reduziert, sondern auch ein zusätzlicher Wärmeverlust verursacht. Aufgrund der Beschaffenheit von VIPs lassen sich thermische Schwachstellen jedoch nicht vollkommen vermeiden. Wärmebrückeneffekte treten im Bausystem VIP an den folgenden Stellen auf:

- Wärmebrücken des einzelnen VIPs am Paneelrand, die je nach verwendeter Folie und Art der Randausbildung sehr unterschiedlich sein können

- Wärmebrücken aufgrund der Stoßausbildung zwischen 2 Kanten aneinander grenzender VIPs, die sehr stark von der Spaltweite und dem den Spalt füllenden Stoff abhängig sind (Kompribänder, Klebebänder etc.)
- Wärmebrücken der Konstruktion, d.h. der Befestigungselemente und der baulichen Einbindung der VIPs in konventionelle Konstruktionen – hier kommt es aufgrund der großen Unterschiede der Wärmeleitfähigkeiten der beteiligten Baustoffe zu Wärmebrücken, die bei Anwendung herkömmlicher Dämmstoffe möglicherweise unkritisch wären

Die Wärmebrückenwirkung wird für zweidimensionale Fälle durch den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\psi$  in  $W/(m \cdot K)$  charakterisiert. Die Ermittlung erfolgt mit der Methode der „Finite-Differenzen“. Der  $\psi$ -Wert gibt an, welcher Wärmeverlust pro laufenden Meter Anschlusslänge und Kelvin Temperaturdifferenz zusätzlich zum Wärmeverlust des ungestörten Paneels durch das Anschlussdetail entsteht. Als Bezugswert dient die ungestörte, eindimensional gerechnete Fläche des Paneels ohne Wärmebrücken. Berechnet wird üblicherweise der Rand eines Elementes, ohne Nachbarelement. Um den Einfluss einer Stoßkante zweier Elemente zu erhalten, muss der für einen Rand ermittelte Wert verdoppelt werden. Der Einfluss eines eventuell vorhandenen Dichtbandes wird getrennt davon ermittelt. Für die Berechnung werden die Foliendeckschichten im verschweißten Zustand betrachtet.

Die normale Ausführung von VIP Umhüllungen sieht vor, dass die jeweils längeren Kanten der rechteckigen Dämmplatten mit einer Folienlage (konzentrische Anordnung der einzelnen Schichten) ausgeführt werden. An den kürzeren Kanten werden die obere und die untere Folienlage miteinander verschweißt.

Kürzere Kanten:

An den kürzeren Kanten wird die obere mit der unteren Folienlage verschweißt und der Schweißbereich anschließend nach einer Seite umgeklappt, was dazu führt, dass die Schichtenfolge der Folie dreimal nebeneinander zu liegen kommt. Zugrunde liegt das folgende Prinzip:

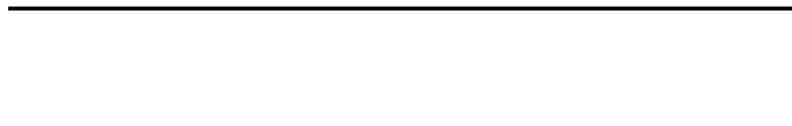


Für die kürzeren Seiten ist auch eine Ausführung ähnlich der ersten Möglichkeit denkbar, mit dem Unterschied, dass die Verschweißung nicht in der Mitte des Panels erfolgt, sondern am Rand an einer Seite. Auch hier kommen drei Folienlagen auf jeder Seite des VIP-Stoßbereichs zu liegen, die als Wärmebrücke wirken. Gegenüber der ersten dargestellten Möglichkeit ergeben sich aber nur minimale Unterschiede im  $\Psi$ -Wert, wie die analytischen Modellrechnungen von A. Binz et.al. im Forschungsprojekt „HiPTI – High Performance Thermal Insulation – IEA/ECBCS Annex 39 – Vacuum Insulation in the Building Sector - Systems and Applications“ [19] zeigen. Diese analytische Annäherung wird durch eigene Untersuchungen gestützt.



#### Längere Kanten:

Die längeren Kanten der VIPs weisen i.d.R. einen einlagigen Folienstoß ohne Verschweißung auf. Die Schweißnaht, welche den Beutel zu einer Röhre schließt, kommt in der Fläche zu liegen. Gegenüber den drei nebeneinander liegenden Folienlagen der ersten beiden Randausbildungen ist hier die Wärmebrückenwirkung reduziert.



Der  $\Psi$ -Wert am Rand eines Elements wird maßgeblich beeinflusst von der Dicke und der Anzahl der metallischen Schichten in der Folie [20]. Zusätzlich spielen die Art und die Dicke der Kunststoffschichten eine Rolle. Ein idealer Spalt würde keine Hohl-

räume zwischen den aneinander gepressten Folienlagen aufweisen. Da aber die Folien wellig sind und sich durch die Verschweißung verformen, liegen sie nicht vollflächig aufeinander. Der Spalt zwischen den (umgeklappten) Folien eines VIPs muss mit einem Stoff gefüllt werden. Hier werden für die Berechnung i.d.R. 0,1 bis 0,5 mm Luftschicht innerhalb der Umklappung angesetzt.

Der  $\Psi$ -Wert der gesamten Stoßstelle zweier VIPs ist zudem stark abhängig vom Material, was in der Konstruktionsfuge zwischen zwei VIPs eingesetzt wird und der Spaltweite, die durch den seitlichen Anpressdruck bestimmt wird. Dieser kann nicht beliebig erhöht werden, weswegen immer Luftschichten zwischen zwei Paneelen oder Zwischenlagen aus teilweise aufgegangenen Kompribändern angenommen werden müssen. Zudem können damit Maßtoleranzen der Paneele ausgeglichen werden.

Die Wärmebrückenwirkungen an den Rändern der VIPs unterscheiden sich, je nachdem ob und welche Deckschichten für die VIPs in der Fläche Verwendung finden. Diese als vorgelagerte Wärmedurchlasswiderstände wirkenden Schichten reduzieren die Querleitung in der Folie zur Verschweißung hin, oder erhöhen diese, wenn sie als Wärmesammler für die Stoßstelle wirken.

Die  $\Psi$ -Werte der Wärmebrücken nehmen bei gleicher Ausbildung der Wärmebrücke mit zunehmendem Wärmedurchlasswiderstand der Konstruktion ab, ihr prozentualer Anteil am Wärmeverlust nimmt jedoch zu. In Abbildung 10 ist die prozentuale Erhöhung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von VIPs verschiedener Größe und unterschiedlicher Dicke dargestellt. Deutlich wird die Abhängigkeit der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von der Plattengröße – oder präziser - von dem Verhältnis aus Umfang und Fläche des betrachteten Paneels. Für kleine Plattenabmessungen erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit mitunter beträchtlich. Die Variation der Dicke zeigt den zunehmenden Einfluss der Wärmebrücken-Problematik bei sehr gut gedämmten Konstruktionen. Für dicke Platten (hier bis 40 mm Paneeldicke) ergeben sich größere Erhöhungen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Wärmebrücken-Effekte [21].

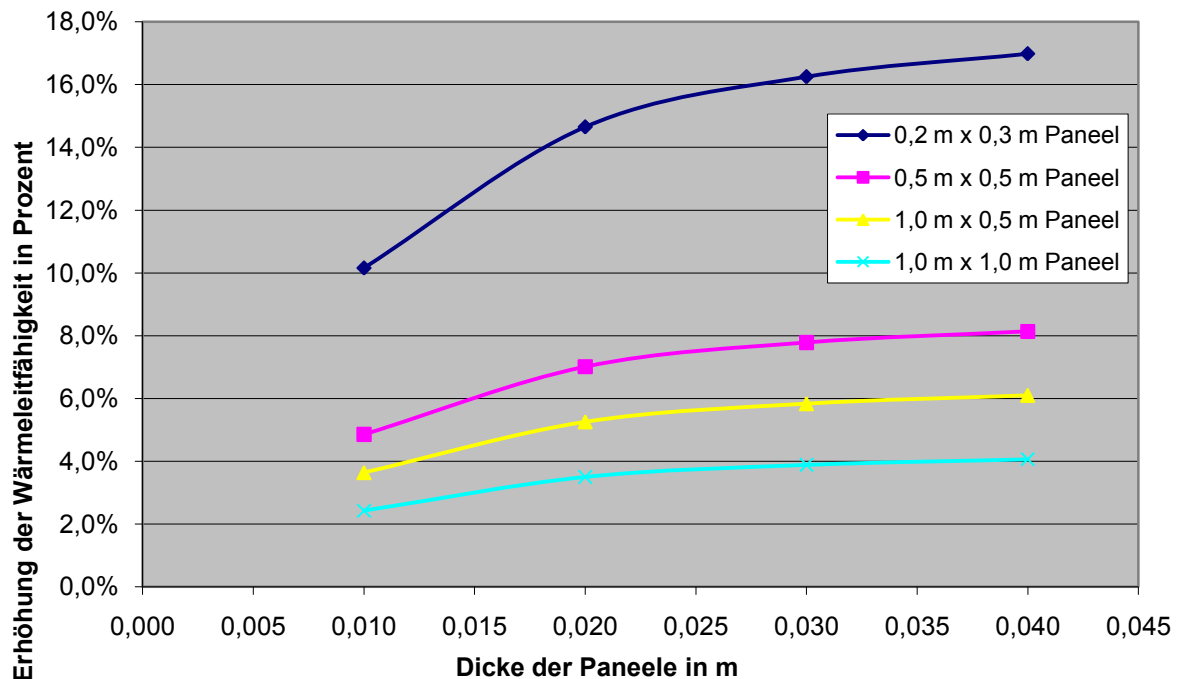


Abbildung 10: Beispiel der Erhöhung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von VIPs aufgrund der Randwärmeebrücken für einen bestimmten Folientyp zur Verdeutlichung der Wirkungsweise der Randwärmeebrücke [21].

### 2.1.10 Dauerhaltbarkeit der VIP und Notwendigkeit einer künstlichen Alterung

Die Lebenserwartung unterschiedlicher Bauteile im Gebäude wird mit 10 bis 50 Jahren angegeben. Für die meisten Anwendungen sind 30 bis 50 Jahre zutreffend. Für ein WDVS findet sich die Angabe 40 Jahre. Da die ersten Dämmungen an der Fassade in den frühen 60er Jahren installiert wurden, wäre eigentlich erst seit einigen Jahren eine Aussage darüber möglich, ob die Lebensdauer erreicht wurde. Für das Inverkehrbringen neuer Produkte und bauliche Innovationen ist eine solche Betrachtung über realistische Zeiträume an Gebäuden ungeeignet. Aussagen über die Gebrauchsdauer müssen schneller möglich sein. Hier setzt man die bekannten Methoden der künstlichen Schnellalterung ein – mit den aus anderen Bereichen bekannten klassischen „Stressfaktoren“ für Produkte, wie beispielsweise

- Ultraviolette Strahlung, u.U. verbunden mit Temperaturerhöhung (z.B. bei Fenstern, Unterspannbahnen und Kunststoffen)
- Untersuchungen mit Salzsprühnebel zur Beschleunigung von Korrosionsvorgängen (z.B. bei niedrigemissiven Beschichtungen)
- Temperaturerhöhungen (Wärmelagerung) zur Beschleunigung des Ausdiffundierens von Treibgasen und Zellgasen (z.B. aus EPS, XPS und PUR)
- Lagerungen bei erhöhter Umgebungsfeuchte, bzw. Besprühen mit flüssigem Wasser – u.U. auch in Kombination mit Temperaturerhöhung oder UV-Strahlung (z.B. für Unterspannbahnen)
- Langzeit-Kriechversuche an Dämmstoffen für den Einsatz in belasteten Bereichen (z.B. an Perimeterdämmung zum Einsatz unter der Bodenplatte) – hier wird aus den Verformungskurven des knapp zwei Jahre laufenden Versuchs auf die Verformungen während 50 Jahre Einsatz im Gebäude geschlossen

In die Abschätzung der Nutzungsdauer geht bisher v.a. die Konstruktion des Produkts ein:

- Kernmaterial
- Hüllmaterial
- Form und Größe
- Güte des Vakuums

Für die Suche nach passenden Schnellalterungsmethoden ist aber auch der Einsatzzweck im Gebäude und der Standort des Gebäudes wichtig:

- Gibt es eine Möglichkeit, dass UV-Strahlung das Produkt erreicht – eher unwahrscheinlich im WDVS aber beim Einsatz in Fassadenelementen denkbar
- Ist das Produkt großen Temperaturschwankungen unterworfen?
- Wo wird das Produkt eingebaut und welches Klima herrscht dort? (Einsatzort – Wüste, feucht-warmes Klima oder Dauerfrost?)

- Chemische Angriffe (Küstennähe – Salzangriff) mit Analogie zur Betonüberdeckung bei Stahlbetonbewehrung mit den Klassen für chemischen Angriff

Wenn die Einflüsse auf die Degradation durch eindiffundierende trockene Gase und Wasserdampf gegeben sind, dann ist es logisch, dass für eine schnelle Alterung die Permeationsrate erhöht wird. Das geschieht am einfachsten durch Temperaturerhöhung (Arrhenius-Gleichung). Zusätzlich muss man in Betracht ziehen, den Wasserdampfpartialdruckgradienten zu erhöhen, was durch Lagerung bei erhöhter Umgebungsfeuchte erreicht werden kann. Die Zusammenhänge sind jedoch komplex, denn manche Kernmaterialien absorbieren einen Teil des eindiffundierenden Wasserdampfs.

Bei der Erhöhung der Umgebungsfeuchte sollte sichergestellt sein, dass nicht mehr Wasserdampf in das VIP eingebracht wird als durch bauübliche Umgebungsfeuchten während der Einsatzzeit am Gebäude möglich. Die Folge wären unrealistisch große Anstiege Wärmeleitfähigkeit (s.a. Sorptionsisotherme für das Kernmaterial pyrogene Kieselsäure in Abbildung 9). Zusätzlich beeinflussen die in Versuchen beim ZAE Bayern gefundenen Haupt-Permeationswege (Wasserdampf in der Fläche; trockene Gase vorwiegend über die Siegelnähte) das Ergebnis der Schnellalterungsversuche auch über die Paneelgröße.

Der Anteil der Feuchte an der Wärmeleitfähigkeit macht für VIPs mit pyrogener Kieselsäure als Kernmaterial nach bisherigen Untersuchungen für bauübliche Feuchten etwa  $0,002 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  aus, kann jedoch bei dauerhaft höheren Luftfeuchten und höheren Temperaturen auch darüber hinausgehen s.a. Abschnitt 2.1.6. Der Anstieg um  $0,002 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  wird im angewandten Alterungsverfahren des DIBt Berlin teilweise durch den üblichen Sicherheitszuschlag von 25% auf die mittels reiner Temperaturlagerung gealterten Elemente abgedeckt. Eine kombinierte Lagerung bei erhöhter Temperatur und erhöhtem Feuchtegradienten wird bisher nicht durchgeführt, vor allem weil bei deutlich erhöhter Temperatur und hoher Luftfeuchte ein Versagen der metallisierten Folien wahrscheinlich ist, worauf viele Untersuchungen hinweisen.

Bei der Temperaturlagerung bei 80°C wird nicht-vorgetrocknete Umgebungsluft verwendet, deren relativer Feuchtegehalt bei 23°C etwa 50% beträgt. Durch das Aufheizen auf 80°C sinkt der relative Feuchtegehalt auf etwa 3% - der absolute Feuchtegehalt der Luft bleibt jedoch gleich und damit auch der Konzentrationsunterschied. Die Durchlässigkeit der Folie für Wasserdampf wird durch die Temperaturerhöhung natürlich auch erhöht, wie in Abbildung 8 dargestellt.

Um die Hüllfolien und ihre Verschweißung noch einem zusätzlichen Stress auszusetzen, sieht der Prüfplan des DIBt Berlin vor, die VIPs einer Temperaturwechselbeanspruchung zu unterwerfen. Gefordert werden hier 7 Zyklen von je 24 Stunden mit den Temperaturen -15°C und +80°C, wobei die Temperaturen einige Stunden gehalten werden müssen.

Durch die Lagerung bei 80°C und 3% Feuchte wird im Forschungsbericht „VIP-Bau...“ [10] gegenüber der Lagerung bei 23°C und 80% r.F. ein Faktor von 15 bis 20 festgestellt, um den der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei der Temperaturlagerung höher ist als bei der Lagerung im Laborklima. Aus den sechs Monaten Lagerung bei erhöhter Temperatur (vom DIBt gefordertes Alterungsverfahren) könnte also grob auf etwa 10 Jahre Einsatzzeit geschlossen werden. Die Ergebnisse des „VIP-Bau“-Projektes werden in Abschnitt 3 mit den Ergebnissen der Alterungsuntersuchungen nach dem DIBt-Prüfplan verglichen. Die Möglichkeit einer ausgeprägteren Alterung im Hinblick auf die Einsatzzeit im Gebäuden, wird in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen mittels eines Sicherheitszuschlags auf die gealterten Wärmeleitfähigkeitswerte berücksichtigt. Zurzeit werden hier 25% Sicherheitszuschlag angesetzt. Zusätzlich fordert das DIBt Entnahmen von Paneelen aus ausgeführten Objekten zur Prüfung der Wärmeleitfähigkeit nach einigen Jahren Einbauzeit im Gebäude. Sollte sich dabei herausstellen, dass das System VIP sich in der Praxis günstiger verhält als prognostiziert, könnte der Sicherheitszuschlag zukünftig gesenkt werden.

#### 2.1.11 Anwendungsgebiete und weitere Eigenschaften

Die Entwicklung im Baubereich geht eindeutig zu höheren Dämmstandards, um den gestiegenen Anforderungen des Klimaschutzes und der CO<sub>2</sub>-Vermeidung Rechnung

zu tragen. Damit wird zunehmend der Platzbedarf und damit der materialspezifische Wärmedurchlasswiderstand wichtiger. Dämmschichten von 12 bis 16 cm in normalen Neubauten oder von 20 bis 30 cm in Passivhäusern sind Stand der Technik. In einigen Fällen verursachen große Dämmdicken konstruktive Erschwernisse, die bisher bei vorausschauender Planung noch gut beherrschbar sind.

Zusätzlich hängt aber die Wahl des geeigneten Dämmstoffes noch von einer Vielzahl weiterer Faktoren ab, welche die Eignung eines Dämmstoffes für eine bestimmte „Dämm-Aufgabe“ beschreiben und im Rahmen von Zulassungsprüfungen untersucht werden. Nachfolgend sind die technischen Aspekte (neben Preis, Neigung, Verfügbarkeit etc. beschrieben.

- Dimensionsstabilität im Normalklima (23°C, 50% r.F.), nach DIN EN 1603, (z.B. Anforderung DS(N)5)
- Dimensionsstabilität unter definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen (70°C, 90% r.F.) nach DIN EN 1604, (z.B. Anforderung DS(70,90)1)
- Verformung unter Druck- und Temperaturbeanspruchung nach DIN EN 1605 – Bedingung 1 (20kPa, 80°C) – (z.B. Anforderung DLT(1)5)
- Verformung unter Druck- und Temperaturbeanspruchung nach DIN EN 1605 – Bedingung 2 (40kPa, 70°C) – (z.B. Anforderung DLT(2)5)
- Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nach EN 1607
- Wasseraufnahme bei langfristigem Eintauchen nach DIN EN 12087 – Prüfverfahren 1A, für die Nahtstellen (Teilweises Eintauchen)

Diese Prüfungen sind auch für VIPs notwendig, um die Eignung für die in DIN 4108-10 [22] beschriebenen Anwendungstypen für Dämmstoffe zu untersuchen. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden jedoch nur die wärmetechnischen und die wirtschaftlichen Faktoren untersucht.

#### 2.1.12 Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit

Noch sind Vakuum-Paneele im Vergleich mit anderen Dämmstoffen deutlich teurer. Pyrogene Kieselsäure ist bei der Herstellung sehr energieintensiv und erfordert eine aufwändige Anlagentechnik. Zudem sind die verwendeten Folien sehr aufwändig herzustellen und damit ebenfalls teuer. Der Herstellprozess erfordert viele einzelne Schritte – vor allem bei Anfertigung der Paneele auf Maß – bei denen zur Zeit noch überwiegend Handarbeit notwendig ist. Aufgrund der sehr guten Dämmwirkung ist oftmals eine andere Baukonstruktion möglich, durch die sich die Gesamtkosten für

eine Baumaßnahme mit VIP möglicherweise günstiger darstellen lassen. Denkbar sind hier einfachere Konstruktionen mit geringerem Dachüberstand, Befestigungslösungen mit kürzeren und damit günstigeren Ankern oder einfachere Konstruktionen bei weniger tiefen Fensterleibungen.

#### 2.1.12.1 Kosten des Dämmstoffs

Die folgende Aufstellung von Binz A. et al in [23] führt die Größe „Kosten pro 1 m<sup>2</sup>·K/W Wärmedurchlasswiderstand“ ein, mit deren Hilfe sich die Materialien besser vergleichen lassen als mit dem Preis pro m<sup>3</sup>, da VIPs eine deutlich bessere Dämmwirkung aufweisen und nicht hinsichtlich der Einbaudicke mit herkömmlichen Dämmstoffen direkt vergleichbar sind. Tabelle 1 zeigt die spezifischen Dämmkosten verschiedener Dämmstoffe im Vergleich.

| Material                                     | Kosten der Wärme-<br>dämmung<br>ewd<br>€/m <sup>3</sup> | Wärmeleitfähigkeit<br>$\lambda$<br>W/(m·K) | Kosten pro 1 m <sup>2</sup> ·K/W<br>Wärmedurchlasswider-<br>stand<br>€/ (m <sup>2</sup> ·K/W) |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Glasfaserplatten 40 kg/m <sup>3</sup>        | 134                                                     | 0,033                                      | 4,42                                                                                          |
| Steinwolle 35 kg/m <sup>3</sup>              | 76                                                      | 0,040                                      | 3,03                                                                                          |
| Steinwolle 100 kg/m <sup>3</sup>             | 165                                                     | 0,040                                      | 6,59                                                                                          |
| EPS 30 kg/m <sup>3</sup>                     | 131                                                     | 0,035                                      | 4,62                                                                                          |
| XPS 33 kg/m <sup>3</sup>                     | 343                                                     | 0,034                                      | 11,67                                                                                         |
| PUR ca. 60 kg/m <sup>3</sup>                 | 212                                                     | 0,028                                      | 5,93                                                                                          |
| Kork ca. 130 kg/m <sup>3</sup>               | 303                                                     | 0,042                                      | 12,73                                                                                         |
| Holz-Weichfaserplatten 150 kg/m <sup>3</sup> | 152                                                     | 0,040                                      | 6,07                                                                                          |
| Zellulose ca. 50 kg/m <sup>3</sup>           | 119                                                     | 0,040                                      | 4,75                                                                                          |
| Schaumglas 130 kg/m <sup>3</sup>             | 406                                                     | 0,040                                      | 16,22                                                                                         |
| VIP 1                                        | 1320                                                    | 0,015                                      | 19,78                                                                                         |
| VIP 2                                        | 1320                                                    | 0,005                                      | 6,59                                                                                          |

Tabelle 1: Spezifische Wärmedämmkosten verschiedener Dämmstoffe aus [23] (Umrechnungskurs: 1€ = 1,5165 Fr.; Stand 31.08.09)

Montage – und Unterkonstruktionskosten sind bei den Kostenangaben von Binz A. et al nicht mit aufgeführt. Diese dürften sich jedoch für herkömmliche Dämmstoffe nur wenig unterscheiden. Inwiefern durch schlankere VIP-Konstruktionen Kosten für die Montage und die Unterkonstruktion eingespart werden können, lässt sich derzeit nicht eindeutig belegen und ist ein mögliches Thema für weitergehende Forschung zur VIP-Bauweise. Die Tabelle zeigt, dass die relativ hohen Materialkosten der VIP

durch die guten  $\lambda$  – Werte zum Teil kompensiert werden können. Da VIPs gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien wie z.B. Polystyrol, Polyurethan und Glas – oder Mineralwolle bei gleichem Wärmedurchgangskoeffizient eine 5 bis 8 – fach geringere Dicke aufweisen, ergibt sich hieraus die Möglichkeit, den Flächengewinn bzw. den eingesparten umbauten Raum gegen die Kosten aufzurechnen. Nicht in allen bebauten Lagen wird sich das wirtschaftlich darstellen lassen. Beispiele für die Einsparung von Raum sind zum Beispiel geringere Geschosshöhe beim Einsatz unter Fußbodenheizung oder Einsatz an der Fassade bei beengten Verhältnissen und Grenzbebauung. Mitunter macht erst die Anwendung von VIP gewisse (Sanierungs-) Baumaßnahmen bei guter Akzeptanz möglich (Ersparnis bei Sanierungen von Flachdach, Fassaden, Innendämmung [23]).

#### 2.1.12.2 Wirtschaftlichkeitsberechnung am Beispielobjekt Seitzstraße

Gelegentlich sind die Außenmaße eines neuen Gebäudes vorgegeben (z.B. Grenzbebauung, Baulücke, First- oder Traufhöhenbegrenzungen) bzw. erfordert eine Sanierung (z.B. schützenswerte Fassade) eine Innendämmung. In diesen Fällen interessiert vor allem der Gewinn an Nutzfläche, die durch die „schlankere“ Dämmung erreicht wird. Der Mehr- oder Minderwert der gewählten Dämmmaßnahme kann beurteilt werden, indem man die Nutzflächenkosten (oder Mieteinnahmen) den durch die Dämmmaßnahme entstehenden Kosten (Material, Nutzflächenverlust) gegenüber stellt. Je höher die Nutzflächenkosten einer Liegenschaft sind, desto interessanter wird der Einsatz von platzsparenden VIPs, wenn Platzbeschränkungen vorliegen.

Das Flächensparpotenzial zeigt das Beispiel des VIP gedämmten Büro- und Wohnhauses in der Seitzstraße in München. Martin Pool untersuchte die Wirtschaftlichkeit der Fassade mit schlankem Aufbau hinsichtlich Maximierung der Nutzfläche [24]. Ohne die Verwendung von VIPs wäre durch den Niedrigenergie-Standard am Gebäude eine Dämmschichtdicke von 25 cm erforderlich. 25 cm bedingen schon auf 4 m Fassadenlänge eine Grundfläche von 1 m<sup>2</sup>. Aufgrund der ca. 500 m Fassadenlänge bedeutet das den Verlust an Gesamtgrundfläche von:

- 125 m<sup>2</sup> Grundfläche

- die Nutzfläche eines halben Geschosses
- 10% der Gesamtnutzfläche.

Bei der Verwendung von VIP als Fassadenplatten mit EPS-Schutzschichten (z.B. 9 cm dicke Platten mit einem 3 cm dicken integrierten VIP) entfällt nur auf 11 m Fassadenlänge ein Quadratmeter Nutzfläche. Folgendes Beispiel zeigt den Flächengewinn durch VIP bei zwei Gebäuden mit Abmessungen 10 x 20 m, links mit Dämmung 25 cm, rechts mit VIP/WDVS Dämmung 9 cm (z.B. 3 cm VIP + 5 cm PS + 1 cm Verputz).

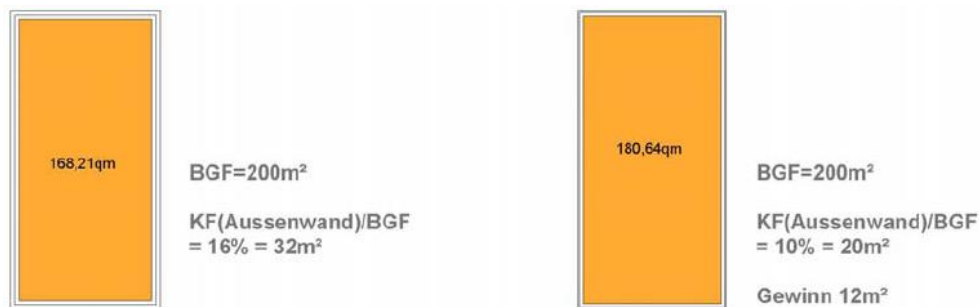


Abbildung 11: Darstellung des Nutzflächengewinns beim Einsatz von VIPs und konstanten Außenabmessungen des Gebäudes (Beispielrechnung und Skizzen von M. Pool aus [24])

Die VIP-Fassade der Dicke 9 cm „spart“ 12 m² Nutzfläche, was etwa 6% der Brutto-Grundfläche ist. Mit zunehmender Außenwandfläche bei gleicher Grundfläche (also bei weniger kompakten Gebäuden) ergibt sich ein noch größerer Nutzflächengewinn. VIP und VIP-Fassaden sind teurer als andere Baustoffe und Bauweisen. Ob sich VIP wirtschaftlich einsetzen lassen hängt davon ab, ob die Mehrkosten für den Quadratmeter Nutzfläche geringer sind, als der erzielbare Verkaufspreis für einen Quadratmeter. Das hängt von vielen Faktoren ab, angelehnt an die Analyse von M. Pool in seinem Beitrag für die VIP-Bau Fachtagung 2005 [24]:

- Grundstückspreis und möglicher Verkaufspreis des Objekts, bzw. erzielbare Miete pro Quadratmeter Nutzfläche

- Geplanter Dämmstandard, denn je dicker die Dämmschichten sein müssten, desto größer ist das Flächeneinsparpotential beim Einsatz der schlanken VIP-Dämmsysteme. Maßgebende Größe ist hier der Unterschied der Schichtdicke von üblichen Dämmstoffen und VIPs bei einem festgelegten U-Wert.
- Begrenzung durch die Außenabmessungen: Nutzflächenmaximierung durch VIPs funktioniert nur dort, wo die äußeren Abmessungen eines Gebäudes begrenzt sind, wie das in vielen innerstädtischen Bereichen durch die vorgegebene Geschossflächenzahl, durch Kubaturbegrenzungen und Abstände zu bestehenden Gebäuden gegeben ist. Weitere Begrenzungen, die den Einsatz von VIP bereits jetzt oder in naher Zukunft wirtschaftlich erscheinen lassen, sind festgelegte Gauben- oder Erkerbreiten und einzuhaltende Straßenfluchten bei Sanierungen.
- Die Höhe der Fassade bzw. die Stockwerkshöhe: die Mehrkosten für die Ausführung der VIP Fassade sind abhängig von der Geschoßhöhe (d.h. große Geschosshöhen bedeuten mehr Fassadenkosten pro gewonnenen Quadratmeter Nutzfläche).
- Durch Verbesserungen bei der Wärmeleitfähigkeit können bei gleichem U-Wert kleinere Dämmdicken eingesetzt werden.
- Durch Verbesserungen im System und bei den Befestigungen lassen sich Wärmebrücken am Rand der VIPs und an Befestigungspunkten reduzieren.
- Durch eine breitere Anwendung und Automatisierungen bei der Herstellung werden die Kosten für solche Systeme sinken (nach Ansicht der Autoren ist das seit dem Beitrag von M. Pool im Jahr 2005 bereits deutlich erkennbar).
- Der Einsatz von VIPs lohnt sich, wenn die Mehrkosten für den Quadratmeter Nutzfläche geringer sind als der erzielbare Verkaufspreis für einen Quadratmeter.

### 2.1.13 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an einem Neubau

Grundlage der Berechnung für den Neubau bildet ein fiktives Referenzgebäude mit folgenden Maßen:

- Länge: 12 m
- Breite: 8 m
- Geschosshöhe: 2,5 m
- Geschoßanzahl: 2 Vollgeschoße plus Dachgeschoß
- Dachneigung: 20° Grad
- Grundfläche: 96 m<sup>2</sup>
- Fensterflächenanteil 20%

#### Vorgehen:

- Die Maße beschreiben die begrenzende Außenhülle des Gebäudes
- Die Bauteile Dach und Außenwand werden getrennt betrachtet
- Es werden verschiedene Dämmmaterialien betrachtet
- Die Außenwand wird mit WDVS hergestellt
- Das Dach wird mit Aufsparrendämmung hergestellt
- Bezugsvariante bildet jeweils die Variante mit der größten Dicke
- Die Herstellkosten pro Quadratmeter beinhalten die Montage- und Gerüstkosten

Die Kosten für die einzelnen baulichen Maßnahmen und die herkömmlichen Dämmstoffe sind größtenteils Baupreiskatalogen entnommen (z.B. Publikationen des Baukosteninformationszentrums BKI [25] [www.baukosten.de](http://www.baukosten.de) oder aus anderen Internet-Katalogen z.B. Baupreislexikon [www.baupreislexikon.de](http://www.baupreislexikon.de)). Weitere Datenquellen, vor allem für die Preise der Vakuum-Paneele und der Bauteile aus den Vakuum-Paneelen, sind Preistabellen von Herstellern entnommen (z.B. Saint-Gobain-Isover und va-Q-tec AG [26], [27]) bzw. wurden telefonisch angefragt.

Daten über die Häufigkeit der gewählten Beispiele, im Vergleich zu den absoluten Zahlen für Neubauten und Sanierungen, liegen nicht vor. Bei den Beispielen handelt es sich um Konstruktionen, für die die Ausführung mit VIP-Bauteilen in Frage kommt. Die Beispiele der VIP-gedämmten Außenwände sind für den Fall freistehender Gebäude gerechnet. Hier ist der Nutzflächengewinn durch die dünne Dämmung am

größten, aber auch die Kosten aufgrund der rundum gedämmten Außenwände. Für Lückenbebauung kann die Wirtschaftlichkeit nach dem gleichen Prinzip berechnet werden, stellt sich womöglich aber etwas anders dar, weil die Nutzflächengewinne aber auch die Kosten für die Dämmung der Außenwände geringer sind.

#### 2.1.13.1 Wirtschaftlichkeit für eine Wand mit WDVS im Neubau

Das erste untersuchte Bauteil ist die Außenwand eines Neubaus an einem Vollgeschoß, an der Außendämmung (hier WDVS) angebracht wird. Die Annahme für diese Berechnung beruht auf festgelegten Außenabmessungen und ggf. festgelegten Abständen zur Nachbarbebauung, die die Kubatur des Gebäudes festlegen. Die Aufgabe für den Planer besteht darin, eine Optimierung von Baukosten und möglichem Erlös durchzuführen. Die wärmetechnische Ausführung ist hochwertig und für die einzelnen eingesetzten Baustoffe hinsichtlich des U-Werts vergleichbar. Eine Übersicht der untersuchten Varianten enthält Tabelle 2.

|                                  | Wanddicke<br>d [mm] | Dicke der<br>Dämmung<br>[mm] | $\lambda$ Dämmung<br>[W/(m*K)] | U-Wert<br>Wand<br>[W/(m²*K)] | €/m²   |
|----------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------|
| Außenwand mit Außendämmung       |                     |                              |                                |                              |        |
| 1. Variante: Mineralwolle        | 498                 | 220                          | 0,040                          | 0,157                        | 145,00 |
| 2. Variante: EPS                 | 478                 | 200                          | 0,035                          | 0,152                        | 110,00 |
| 3. Variante: EPS Neopor          | 458                 | 180                          | 0,032                          | 0,154                        | 125,00 |
| 4. Variante: Weber Lockplate VIP | 368                 | 90                           | 0,016                          | 0,157                        | 290,00 |

Tabelle 2: Wandaufbauten

Das untersuchte Bauteil hat folgenden Aufbau:



- VIPs ermöglichen aufgrund ihrer geringen Dicke einen dünneren Wandaufbau als herkömmliche Dämmmaterialien. Durch die unterschiedlichen Dicken der Varianten sind auf derselben Grundfläche des Referenzgebäudes unterschiedlich große Nutzflächen möglich. Variante 1 bildet hierbei die Bezugsvariante (hier gelb unterlegt).
- Die Nutzfläche bildet sich aus der Differenz der Grundfläche ( $8\text{m} \cdot 12\text{m} \cdot 2 = 192\text{m}^2$ ) mit der benötigten Fläche der Wand. Die verbrauchte Fläche durch die Wand ist abhängig von der Dicke der Außenwand.
- Der Gewinn an Nutzfläche pro Variante ergibt sich aus der Differenz der Nutzfläche der Variante X und der Nutzfläche der Bezugsvariante [NFL Variante X – NFL Bezugsvariante = Gewinn an NFL].
- Die Fassadenfläche ergibt sich aus dem Umfang, Geschoßanzahl und der Geschoßhöhe.
- Die Wandfläche am Giebel wird für diese Betrachtung vernachlässigt.
- Wird die Fassadenfläche mit den Herstellkosten/m<sup>2</sup> der jeweiligen Variante multipliziert, erhält man die Gesamtherstellkosten der Fassade.
- Um einen Bezug zur Wirtschaftlichkeit der VIPs herzustellen, wird angenommen, dass das Gebäude auf dem freien Markt verkauft wird. Es werden unterschiedliche Quadratmeterpreise angenommen, um deutlich zu machen, ab wann sich eine VIP Dämmung wirtschaftlich darstellen lässt. Die Quadratmeterpreise reichen von 1000 – 5000 €.

- Der Erlös errechnet sich aus der Nutzfläche multipliziert mit dem angesetzten Quadratmeterpreis abzüglich der Herstellkosten.

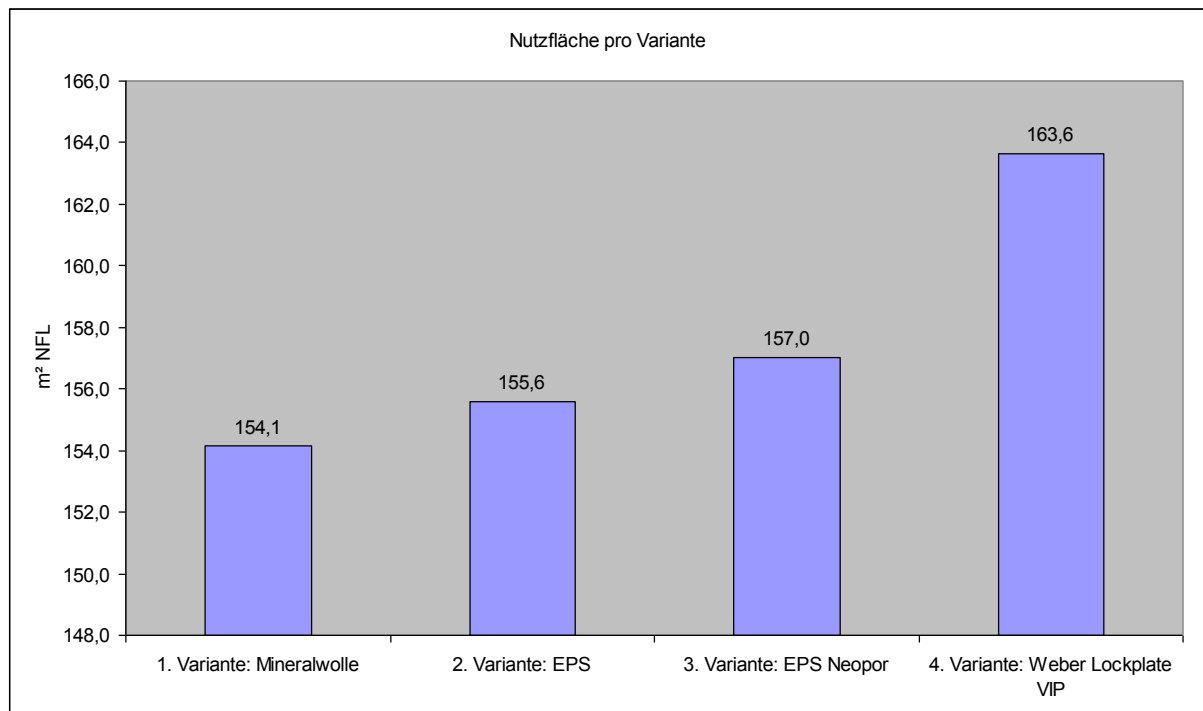


Abbildung 12: Mögliche Nutzfläche des Referenzgebäudes bei festgelegten Außenabmessungen

Wie in Abbildung 12 dargestellt, ist durch die VIP die mit Abstand größte Nutzfläche möglich. Die herkömmlichen Dämmstoffe unterscheiden sich bei der Nutzfläche um nicht mehr als 3 Quadratmeter. Durch den Einsatz von VIP kann bei festgelegten Außenabmessungen eine um bis zu 10 m² größere Nutzfläche erzielt werden.

Wird die zusätzliche Nutzfläche mit dem pro Quadratmeter erzielbaren Erlös multipliziert, lassen sich die Grenzen für die Mehrkosten der VIP-Dämmmaßnahme bestimmen, für die eine solche Maßnahme noch wirtschaftlich darstellbar ist. Die Erlöse sind in Abbildung 13 für Quadratmeterpreise von 1000 bis 5000 € dargestellt. Da die VIPs die größte Nutzfläche ermöglichen, sind hier auch die höchsten Gewinne durch den Verkauf zu erzielen, bzw. darf die Maßnahme entsprechend mehr kosten.

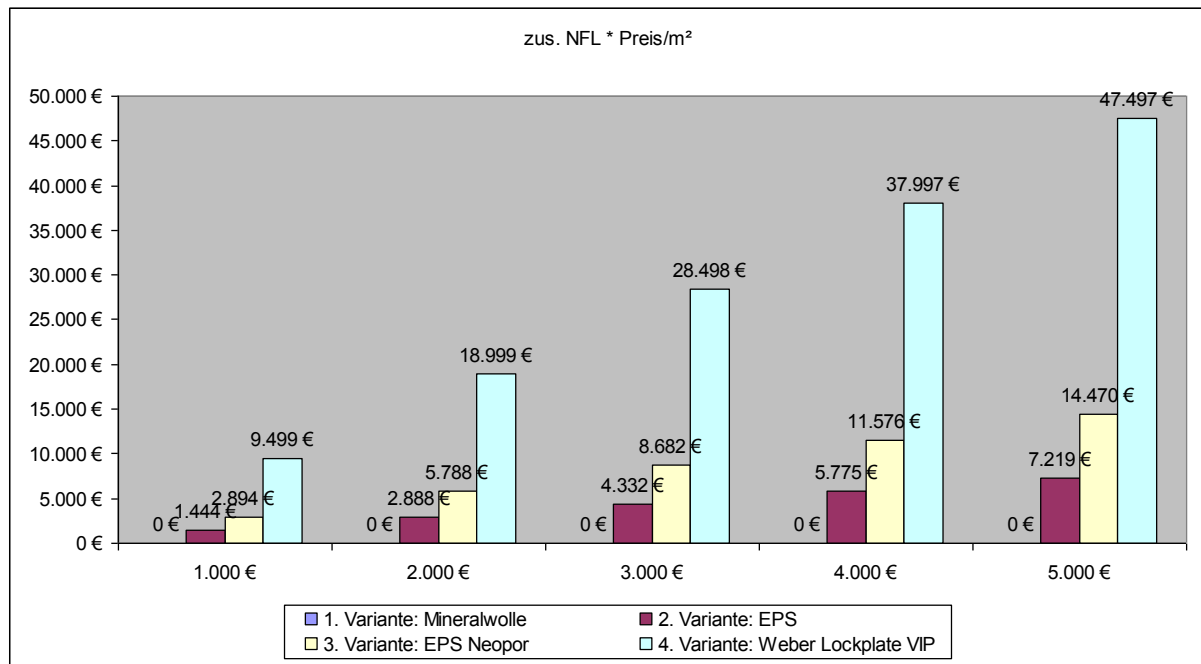


Abbildung 13: Erlös aus der zusätzlich möglichen Nutzfläche - gestaffelt nach dem Verkaufspreis für einen Quadratmeter

Die Herstellkosten sind von den erzielbaren Erlösen für einen Quadratmeter Nutzfläche unabhängig. Bei den derzeitigen Kosten für Stützkernmaterial und Hüllfolie verwundert es keineswegs, dass die Kosten für die Dämmmaßnahme mit VIP mit Abstand am höchsten sind. Ausgehend von den geschätzten Quadratmeterkosten in Tabelle 2 ergeben sich die in Abbildung 14 dargestellten Kosten für die Maßnahme. Die Außenwanddämmung in VIP-Ausführung ist doppelt so teuer wie die zweit teuerste Ausführung (Mineralwolle). Die Ausführung mit weißem EPS hat die geringsten Herstellkosten, gefolgt von der Ausführung mit Neopor.

Werden die in Abbildung 12 dargestellten Nutzflächen des Gebäudes mit dem möglichen Erlös pro Quadratmeter multipliziert und von diesem Betrag die Herstellkosten der jeweiligen Lösung und die Gesamtkosten der Ausführung 1 (Mineralwolle) abgezogen, so ergeben sich die im Vergleich zur Ausführung 1 auftretenden Kosten. Ist der Rest größer null, ergibt sich für den Bauherrn eine Einsparung gegenüber der Ausführung in Mineralwolle. Ist der Rest kleiner null, dann ergeben sich gegenüber

der Ausführung in Mineralwolle entsprechende Mehrkosten. Diese Kosten sind in Abbildung 15 für die Varianten 2 bis 4 aufgetragen.

Bei geringen erzielbaren Erlösen für das verkaufte Gebäude ist die Lösung mit normalem weißem EPS auf Basis dieser Daten am wirtschaftlichsten. Die beiden EPS-Lösungen (weiß und Neopor) liegen für alle untersuchten Verkaufserlöse höher als die dickste Variante in Mineralwolle. Ab einem Quadratmetererlös von etwa 2500 € liegt die Ausführung mit Vakuum-Paneelen höher als die Ausführung in Mineralwolle. Ab etwa 4000 € pro Quadratmeter ist die Ausführung mit VIPs auch günstiger als die beiden Ausführungen in EPS.

Für hochpreisige Innenstadtlagen lässt sich derzeit der Einsatz von Vakuum-Dämmung an der Fassade wirtschaftlich darstellen. Für einen Neubau ist hier allerdings Voraussetzung, dass ein bestehendes Gebäude nicht saniert, sondern abgerissen wird. Baulücken in hochpreisigen Lagen sind kaum vorhanden. Mögliche Folge- oder Betriebskosten sind bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

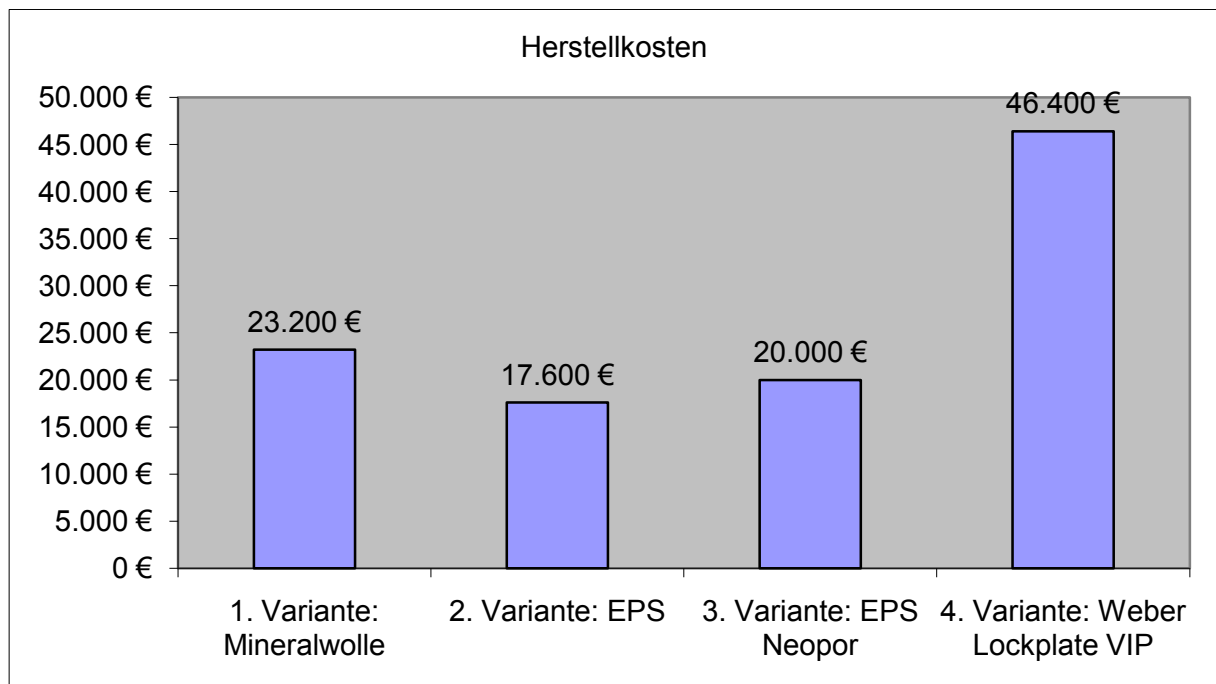


Abbildung 14: Herstellkosten der Außenwanddämmung

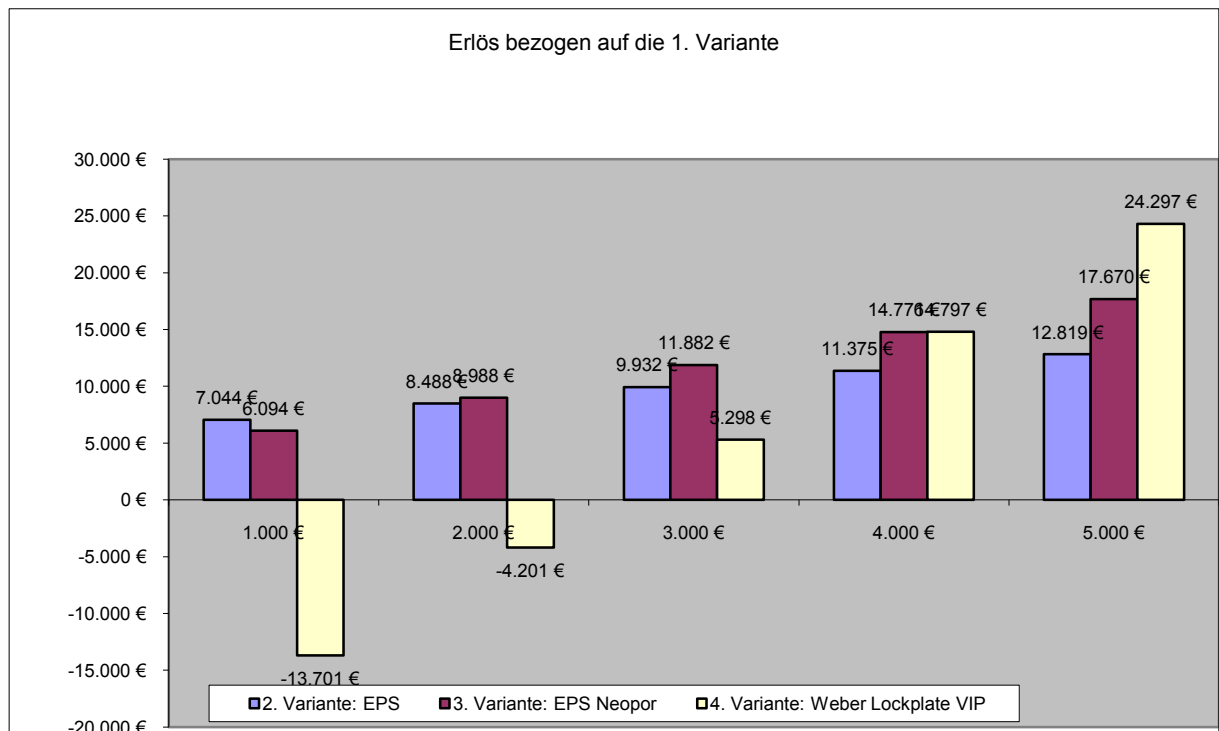


Abbildung 15: Erlös bei Bezug auf die dickste Variante (Mineralwolle) – Minderkosten gegenüber der Ausführung in Mineralwolle haben ein positives Vorzeichen, Mehrkosten ein negatives Vorzeichen

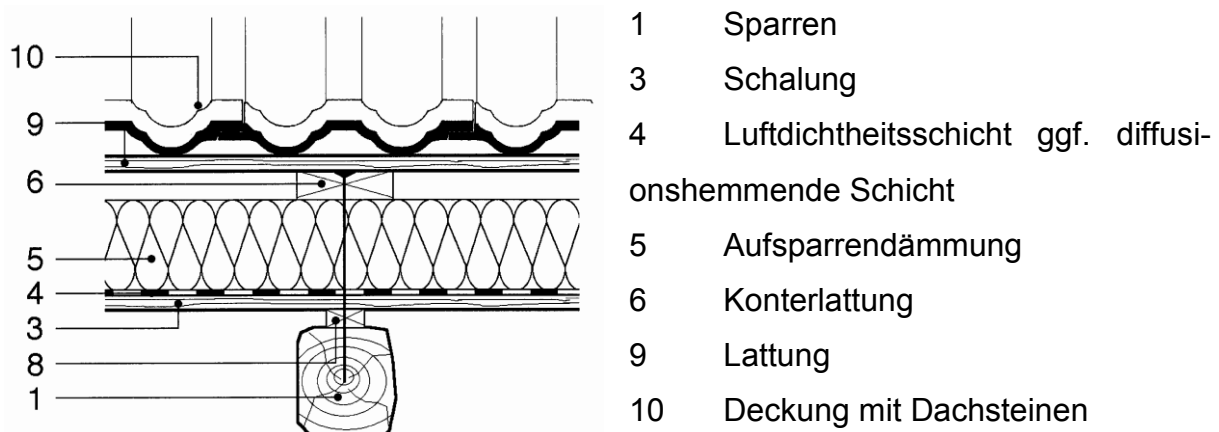
### 2.1.13.2 Wirtschaftlichkeit für ein Dach mit Aufsparrendämmung im Neubau

Das zweite betrachtete Neubauteil ist das Dach, das hier in der Ausführung mit Aufsparrendämmung ausgeführt wird. Wie bei der Außenwand mit Wärmedämmung sind hier auch die Außenabmessungen des Gebäudes und die Abstandsflächen festgelegt. Zudem gibt es die Vorgabe einer festgelegten maximalen Trauf bzw. Firsthöhe. Innerhalb dieser Grenzen gilt es die Nutzfläche zu optimieren. Auch hier ist die wärmetechnische Ausführung hochwertig und für die einzelnen eingesetzten Baustoffe hinsichtlich des U-Werts vergleichbar. Eine Übersicht der untersuchten Varianten enthält Tabelle 3.

|                                   | d [mm] | d Dämmung [mm] | $\lambda$ Dämmung [W/(m*K)] | U-Wert Dach [W/(m²*K)] | €/m² |
|-----------------------------------|--------|----------------|-----------------------------|------------------------|------|
| Dach mit Aufsparrendämmung        |        |                |                             |                        |      |
| 1. Variante: Mineralwolle         | 221    | 200            | 0,035                       | 0,165                  | 120  |
| 2. Variante: PUR024               | 161    | 140            | 0,024                       | 0,161                  | 160  |
| 3. Variante: PUR028               | 181    | 160            | 0,028                       | 0,165                  | 140  |
| 4. Variante: VIP (z.B. QASA roof) | 91     | 70             | 0,012                       | 0,160                  | 280  |

Tabelle 3: Aufbauten Aufsparrendämmung

Das untersuchte Bauteil hat folgenden Aufbau:



- Für die Aufsparrendämmung wird angenommen, dass die maximale Traufhöhe des Gebäudes begrenzt ist. Durch die unterschiedlichen Dämmdicken resultieren unterschiedliche Dicken des Daches. Da jedoch die Traufhöhe begrenzt ist, verringert sich mit steigender Dicke die nutzbare Höhe im Dachgeschoß.
- Die Dachneigung beträgt in diesem Beispiel 20°
- Bereiche mit einer Raumhöhe ab 2 m werden vollständig zur Wohnfläche gezählt. Bereiche zwischen 1 m und 2 m Raumhöhe zählen nur zur Hälfte.
- Durch einen Kniestock gibt es hier keine Raumhöhe unter 1 m

- Die unterschiedlichen Erlöse für die untersuchten Varianten errechnen sich aus der zusätzlichen Wohnfläche aufgrund der verschiedenen Dicken der Dachdämmung, bei konstanten Außenabmessungen des Gebäudes.

Besonders bei kleinen Dachneigungen und festgelegten First- oder Traufhöhen macht sich ein schlanker Dachaufbau deutlich durch eine bessere Nutzhöhe im Dachgeschoß bemerkbar. Wie in Abbildung 16 dargestellt, verschiebt sich der Anteil der vollständig nutzbaren Grundfläche (Bereiche mit einer Nutzhöhe größer 2 m) deutlich zu Gunsten der Ausführung mit VIPs. Die blau dargestellten Bereiche dürfen zu 100 % der Nutzfläche zugeschlagen werden, die violett dargestellten Bereiche zu 50 %. Die daraus ermittelten Nutzflächen unterscheiden sich vom dicksten Dachaufbau mit 61 m<sup>2</sup> (Mineralwolle) bis zum dünnsten Dachaufbau mit 66 m<sup>2</sup> (VIP) um 5 m<sup>2</sup>. Die wertvollen Bereiche mit einer Nutzhöhe von mehr als 2 m sind jedoch bei der Ausführung mit VIP etwa 9 m<sup>2</sup> größer. Diese absolute Nutzfläche kann direkt mit dem erzielbaren Quadratmeterpreis multipliziert werden.

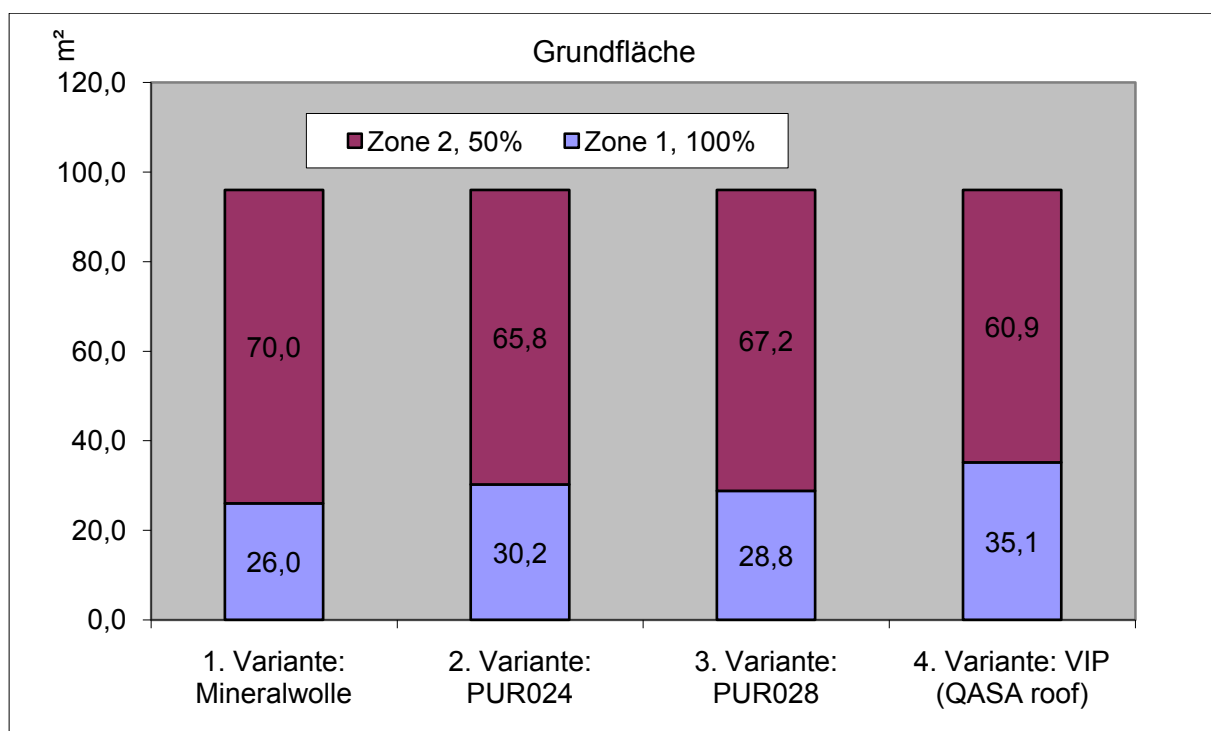


Abbildung 16: Aufteilung der 96m<sup>2</sup> Grundfläche des Dachgeschoßes auf Bereiche zwischen 1 und 2 m Nutzhöhe und Bereiche über 2 m Nutzhöhe

Die Herstellkosten für die vier untersuchten Varianten unterscheiden sich deutlich. Die Aufsparrendämmung mit Vakuum-Paneelen kommt deutlich teurer als die Ausführungen mit PUR oder Mineralwolle (Abbildung 17).

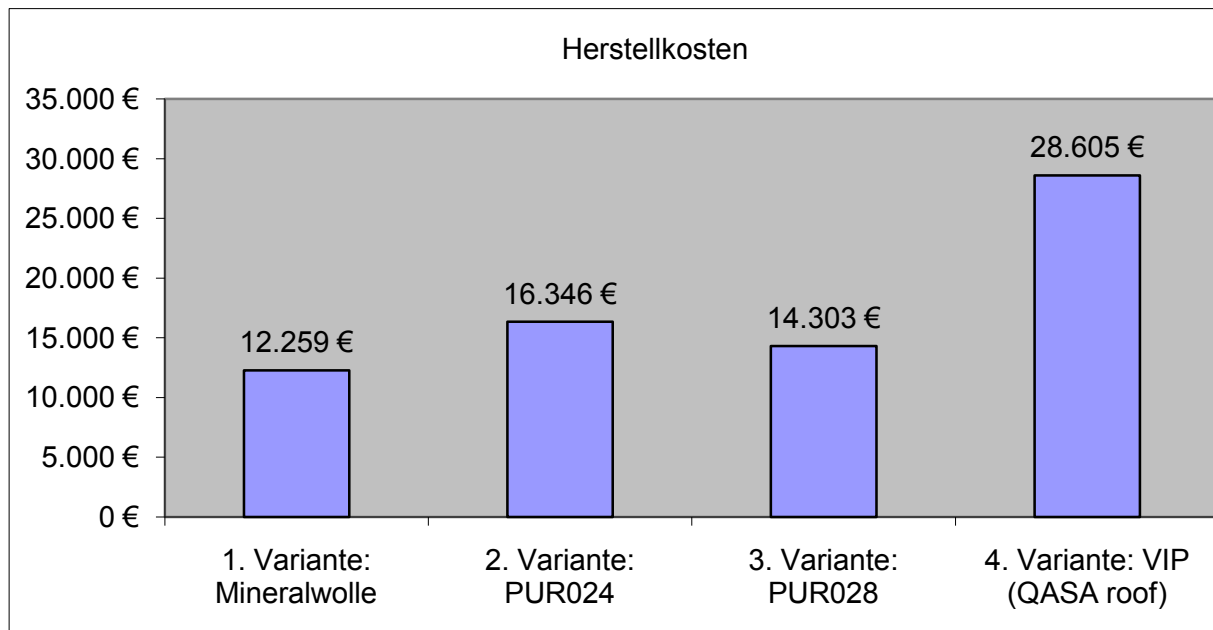


Abbildung 17: Herstellkosten für die Aufsparrendämmung

Werden die Nutzflächen des Dachgeschoßes mit dem möglichen Erlös pro Quadratmeter multipliziert und von diesem Betrag die Herstellkosten der jeweiligen Lösung und die Gesamtkosten der Ausführung 1 (Mineralwolle) abgezogen, so ergeben sich die im Vergleich zur Ausführung 1 auftretenden Kosten. Ist der Rest größer null, ergeben sich für den Bauherrn Minderkosten gegenüber der Ausführung in Mineralwolle. Ist der Rest kleiner null, dann ergeben sich gegenüber der Ausführung in Mineralwolle entsprechende Mehrkosten. Diese Kosten sind in Abbildung 18 für die Varianten 2 bis 4 aufgetragen.

Bei sehr geringen erzielbaren Erlösen für das verkaufte Gebäude ist die Lösung mit Mineralwolle-Aufsparrendämmung am wirtschaftlichsten. Die beiden PUR-Lösungen (024 und 028) liegen erst für Verkaufserlöse von über 2000 € pro Quadratmeter wirtschaftlicher für den Bauherrn. Erst ab einem Verkaufspreis von etwa 3500 € ist die Aufsparrendämmung aus Vakuum-Paneelen wirtschaftlicher als die dickste Variante

in Mineralwolle. Ab einem Quadratmetererlös von etwa 5000 € liegt die Ausführung mit Vakuum-Paneelen gleich auf mit der Lösung PUR 024.

Für hochpreisige Innenstadtlagen lässt sich derzeit der Einsatz von Vakuum-Dämmung als Aufsparrendämmung im Neubau wirtschaftlich darstellen. Dafür muss im Regelfall ein altes Gebäude abgerissen werden. Bestehende Baulücken in hochpreisigen Lagen sind ungewöhnlich.

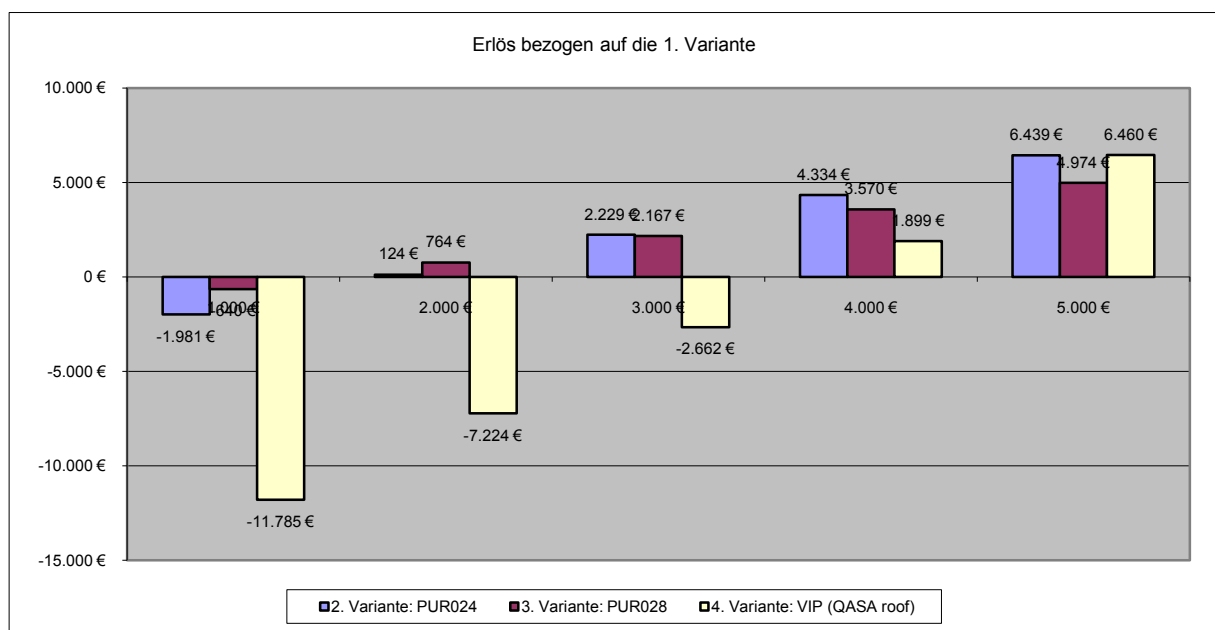


Abbildung 18: Erlös bei Bezug auf die dickste Variante (Mineralwolle)

#### 2.1.14 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an einem Altbau

Grundlage der Berechnung für die Altbausanierung bildet ein fiktives Referenzgebäude mit folgenden Maßen:

- Länge: 12 m
- Breite: 8 m
- GeschöÙhöhe: 2,5 m
- GeschöÙanzahl: 2 VollgeschöÙe plus DachgeschöÙ
- Kniestock: 0,9 m

- Dachneigung: 20° Grad
- Grundfläche: 96 m²
- Fensterflächenanteil 20%

#### Vorgehen:

- Die Bauteile Dach und Außenwand werden getrennt betrachtet.
- Es werden verschiedene Dämmmaterialien betrachtet.
- Für die Außenwand kommt als Sanierungsmaßnahme eine Innendämmung zum Einsatz.
- Das Dach wird mit Zwischensparrendämmung und Untersparrendämmung saniert.
- Bezugsvariante bildet jeweils die Variante mit der größten Dicke.

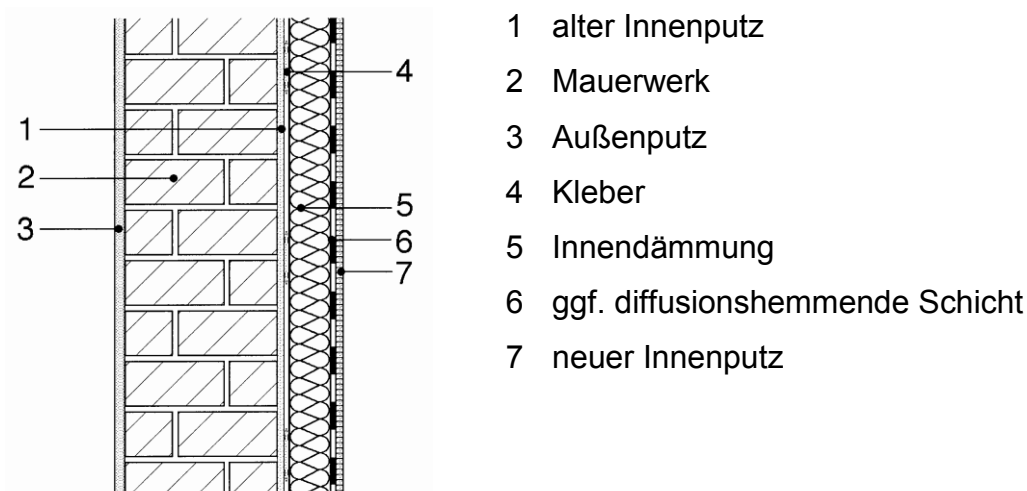
#### 2.1.14.1 Wirtschaftlichkeit für eine innengedämmte Wand eines Altbaus

Ein übliches Einsatzgebiet für Vakuum-Dämmung, bei der sie ihre geringe Dicke voll ausspielen kann, ist die Innendämmung von Außenwänden. Die Aufgabe für den Planer besteht darin, eine Optimierung von Baukosten und möglichem Erlös bei möglichst wenig verkleinerten Räumen durchzuführen. Die wärmetechnische Ausführung ist hochwertig und für die einzelnen eingesetzten Baustoffe hinsichtlich des U-Werts vergleichbar. Eine Übersicht der untersuchten Varianten enthält Tabelle 4.

|                                                   | d [mm] | d Däm-<br>mung<br>[mm] | $\lambda$ Däm-<br>mung<br>[W/(m*K)] | U-Wert<br>Wand<br>[W/(m²*K)] | €/m²   |
|---------------------------------------------------|--------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--------|
| Außenwand mit Innendämmung                        |        |                        |                                     |                              |        |
| 1. Variante: CaSi                                 | 420    | 140                    | 0,040                               | 0,241                        | 65,00  |
| 2. Variante: XPS                                  | 400    | 120                    | 0,035                               | 0,245                        | 45,00  |
| 3. Variante: PUR028                               | 380    | 100                    | 0,028                               | 0,237                        | 55,00  |
| 4. Variante: PUR024                               | 360    | 80                     | 0,024                               | 0,251                        | 60,00  |
| 5. Variante: kaschierte VIPs<br>QASAFlex 10+25+10 | 325    | 10                     | 0,013                               | 0,246                        | 190,00 |

Tabelle 4: Varianten der Innendämmung von Außenwänden

Das untersuchte Bauteil hat folgenden Aufbau:



- Das Referenzgebäude ist identisch zu dem Referenzgebäude des Neubaus. Da es sich jedoch um einen Altbau handelt, sind bereits Außenwände vorhanden. Dadurch verringert sich die Nutzfläche um die Dicke der Außenwand.
- Durch die unterschiedlich dicken Materialien entstehen unterschiedliche Nutzflächen. Wobei hier die VIPs aufgrund ihrer geringen Dicke die größte Nutzfläche bieten s.a. Abbildung 19.

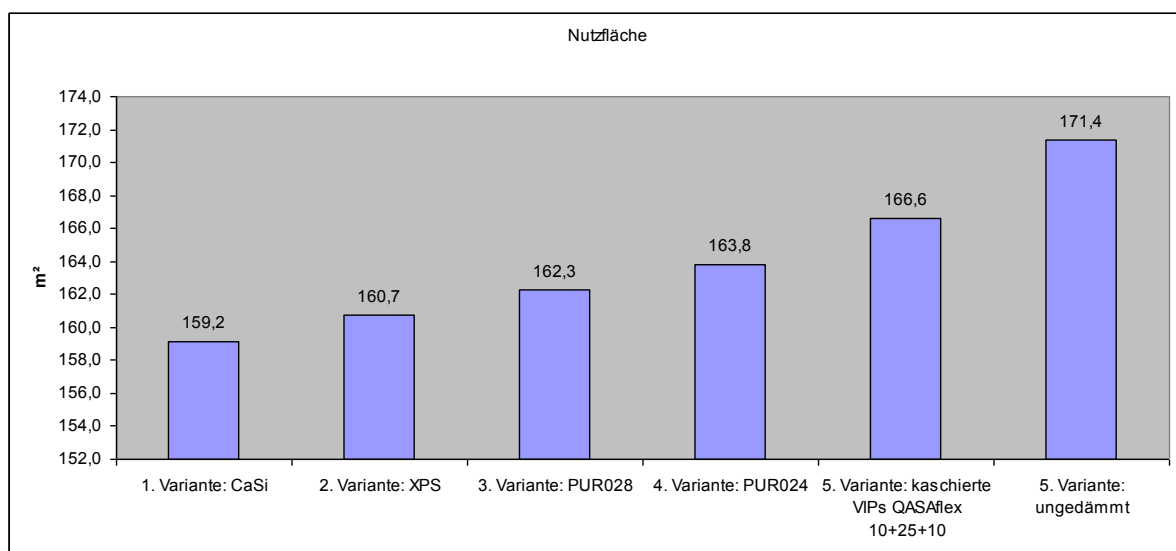


Abbildung 19: Nutzflächen der untersuchten Varianten

Nach der Modernisierung steht bei der Variante mit VIP, aufgrund des schlankeren Aufbaus, die größte verbleibende Nutzfläche zur Verfügung. Der Unterschied zur dicksten Variante mit Kalziumsilikat-Platten beträgt mehr als 7 m<sup>2</sup>. Bei Bezug auf die dickste Variante (CaSi) ergeben sich die in Abbildung 20 dargestellten zusätzlichen Erlöse aufgrund der größeren Nutzfläche. Setzt man als Bezugsvariante die Variante mit der geringsten Nutzfläche, errechnet sich für die dünneren Varianten ein zusätzlicher Erlös. Da die Nutzfläche der Variante mit VIP am größten ist, ist auch der zusätzliche Erlös am größten. Ein weiterer möglicher Ansatz ist die Berechnung der Verluste an Wohnfläche im Vergleich mit der Ausgangssituation – der unsanierten Variante. Bezogen auf die ursprüngliche Nutzfläche ergeben sich mit zunehmender Dämmdicke höhere Verluste. Da die Außenwand aber ohnehin saniert werden muss, wird nicht die unsanierte Ausgangssituation, sondern die Sanierung mit der größten Dämmdicke als Bezug gewählt.

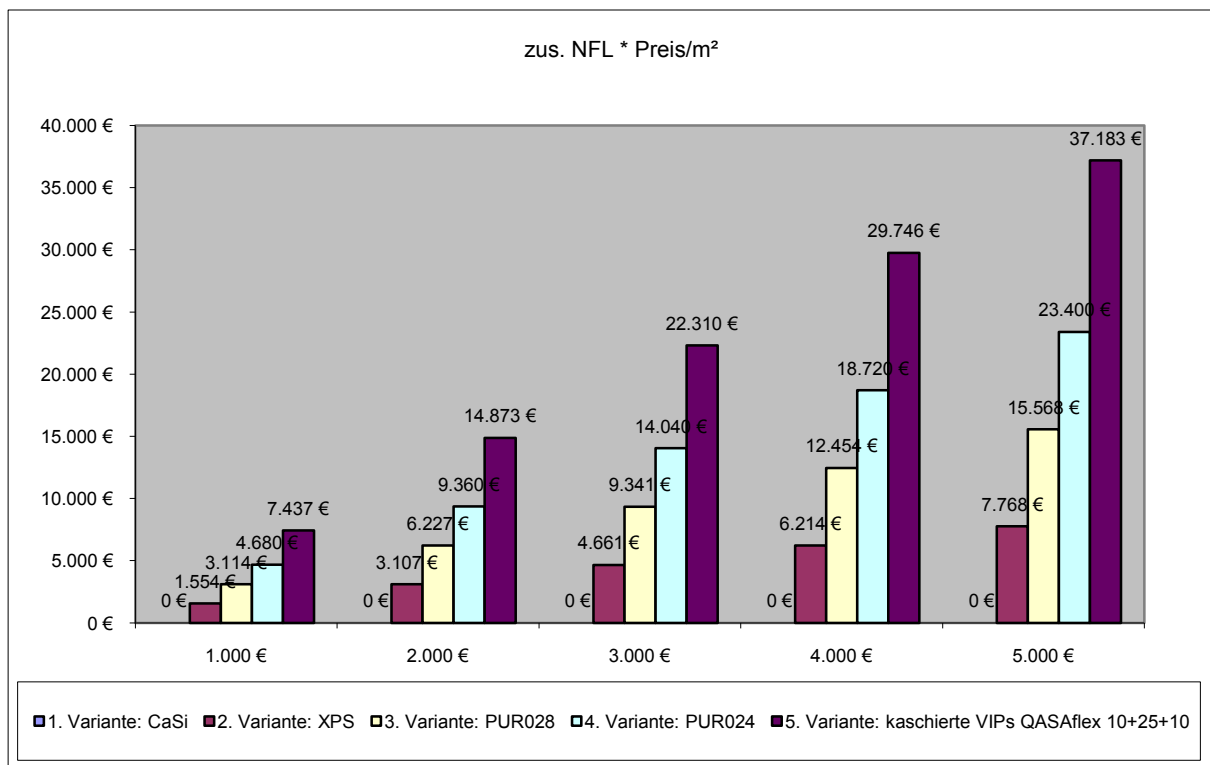


Abbildung 20: zusätzliche Erlöse aufgrund der größeren Nutzflächen bezogen auf die Ausführung mit CaSi-Platten

Die Herstellkosten für Innendämmung liegen deutlich unter denen für eine Außendämmung der Außenwände. Innendämmungen sind unabhängig von der Witterung montierbar und es ist kein Gerüst erforderlich. Die Ausführung kann wohnungsweise oder raumweise erfolgen. Werden die Herstellkosten (Abbildung 21) mit einbezogen, zeigt sich, dass die Verwendung von VIP-Dämmplatten als Innendämmung nur über wirtschaftliche Faktoren schwer zu begründen ist. Werden die Nutzflächen mit dem möglichen Erlös pro Quadratmeter multipliziert und von diesem Betrag die Herstellkosten der jeweiligen Lösung und die Gesamtkosten der Ausführung 1 (CaSi-Platten) abgezogen, so ergeben sich die im Vergleich zur Ausführung 1 auftretenden Kosten. Ist der Rest größer null, ergeben sich für den Bauherrn Minderkosten gegenüber der Ausführung mit CaSi-Platten. Ist der Rest kleiner null, dann ergeben sich gegenüber der Ausführung 1 entsprechende Mehrkosten. Diese Kosten sind in Abbildung 22 für die Varianten 2 bis 5 aufgetragen.

Bei geringen erzielbaren Erlösen für das verkaufte Gebäude ist die Lösung mit Vakuum-Dämmplatten nicht wirtschaftlich. Die beiden PUR-Lösungen (024 und 028) und die Ausführung mit XPS liegen in allen Fällen wirtschaftlicher als die Ausführung mit CaSi-Platten. Erst für Verkaufserlöse von über 2000 € pro Quadratmeter liegt die Vakuum-Dämmlösung wirtschaftlicher für den Bauherrn als die Ausführung mit CaSi-Platten. Erst ab einem Verkaufspreis von etwa 3000 € pro Quadratmeter ist die Lösung mit Vakuum-Paneelen wirtschaftlicher als die Variante mit XPS. Ab einem Quadratmetererlös von etwa 4000 € liegt die Ausführung mit Vakuum-Paneelen gleich auf mit der Lösung PUR 028.

Für sehr hochpreisige Lagen lässt sich derzeit der Einsatz von Vakuum-Dämmung als Innendämmung im Altbau wirtschaftlich darstellen. Der Mehrwert einer Innendämmung aus Vakuum-Paneelen sollte hier nicht nur wirtschaftlich begründet werden. Der Verlust an Wohnfläche wiegt für einen Bauherrn womöglich schwerer als dies alleine über monetäre Betrachtung der verlorenen Quadratmeter möglich ist. Trotzdem ist hier eine Kostenreduzierung für die Vakuum-Dämmplatten unbedingt notwendig.

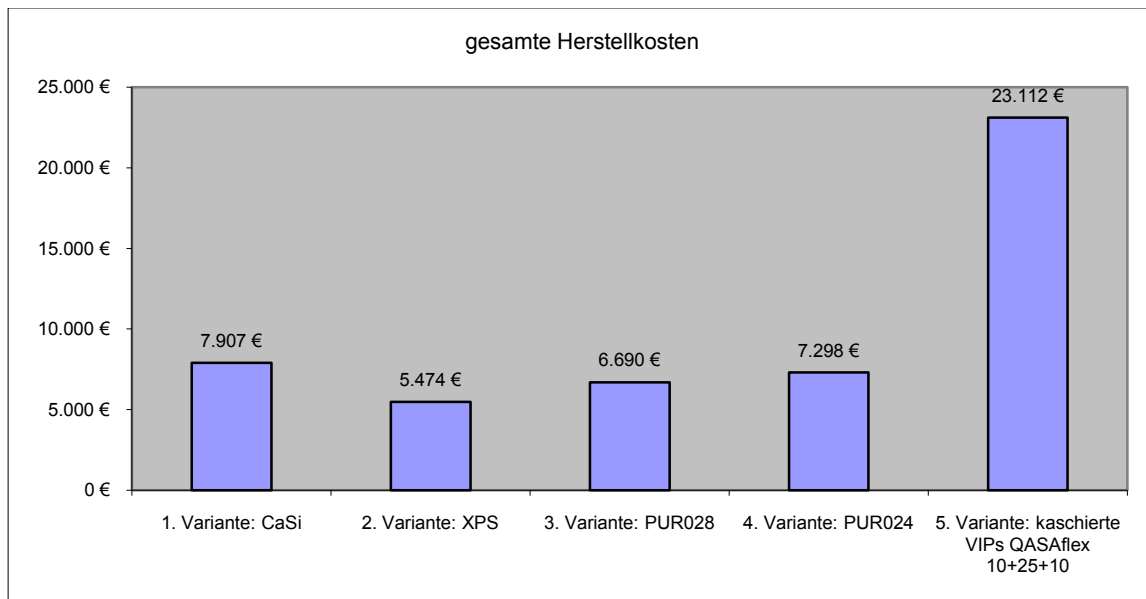


Abbildung 21: Herstellkosten für eine Innendämmung der Außenwand

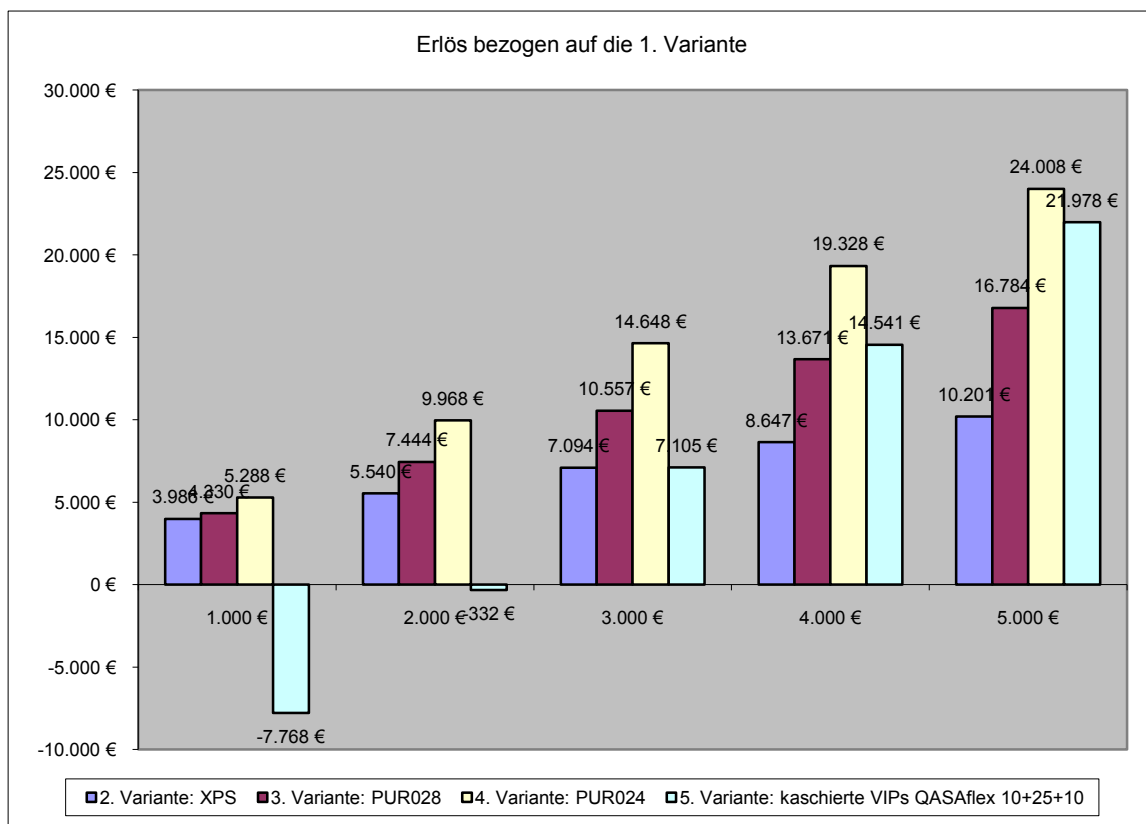


Abbildung 22: Erlöse bei Bezug auf die dickste Variante (CaSi-Platten)

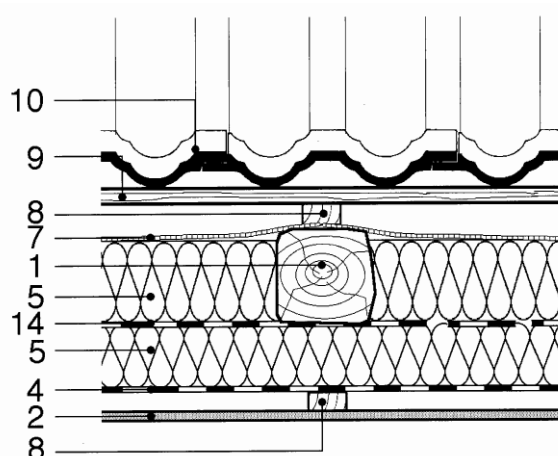
#### 2.1.14.2 Wirtschaftlichkeit für ein Dach mit Zwischensparrendämmung und Untersparrendämmung eines Altbaus

Das zweite betrachtete Altbaudetail ist das Dach, das hier in der Ausführung mit 140 mm Zwischensparrendämmung ausgeführt ist und als Sanierungsmaßnahme eine zusätzliche Untersparrendämmung erhält. Bei allen untersuchten Aufbauten ist die Zwischensparrendämmung mit Mineralwolle ausgeführt. Die Nutzfläche errechnet sich wie beim Neubaudetail aus dem anteiligen Ansatz von Bereichen über 2 m Nutzhöhe und Bereichen zwischen 1 m und 2 m, die nur zur Hälfte angesetzt werden dürfen. Innerhalb dieser Grenzen gilt es die Nutzfläche zu optimieren. Auch hier ist die wärmetechnische Ausführung hochwertig und für die einzelnen eingesetzten Baustoffe hinsichtlich des U-Werts vergleichbar. Eine Übersicht der untersuchten Varianten enthält Tabelle 5.

|                                                              | d [mm] | d Däm-<br>mung<br>[mm] | $\lambda$ Dämmung<br>[W/(m*K)] | U-Wert<br>Wand<br>[W/(m²*K)] | €/m² |
|--------------------------------------------------------------|--------|------------------------|--------------------------------|------------------------------|------|
| Dach mit Zwischensparren-<br>dämmung und Untersparrendämmung |        |                        |                                |                              |      |
| 1. Variante: Mineralwolle                                    | 272,5  | 120                    | 0,035                          | 0,154                        | 110  |
| 2. Variante: PUR 028                                         | 232,5  | 80                     | 0,028                          | 0,159                        | 150  |
| 3. Variante: VIP z.B. Integra UVP                            | 183,5  | 31                     | 0,009                          | 0,161                        | 250  |

Tabelle 5: Aufbauten Untersparrendämmung

Das untersuchte Bauteil hat folgenden Aufbau:



- 1 Sparren
- 2 Gipskartonplatte
- 4 luftdichte Schicht ggf. diffusionshemmende Schicht
- 5 Untersparren und Zwischensparrendämmung
- 7 Unterspan- bzw. Unterdeckbahn
- 8,9 Konterlattung und Lattung

## 10 Deckung aus Dachsteinen

- Die Sparrendicke beträgt 14 cm – voll gedämmt mit Mineralwolle 035
- Der Kniestock hat vor der Sanierung eine Höhe von 0,9 m
- Für die Raumhöhe ist die Dicke der Untersparrendämmung ausschlaggebend
- Bereiche mit einer Raumhöhe ab 2m werden vollständig zur Wohnfläche gezählt. Bereiche zwischen 1 m und 2 m Raumhöhe zählen nur zur Hälfte. Raumhöhen unter 1 m werden nicht beachtet

Die Reduzierung des nutzbaren Raumvolumens fällt bei der Ausführung mit VIP-Dämmplatten am geringsten aus. Bereiche zwischen 1 und 2 m Nutzhöhe bleiben gleich groß, da die Höhe am Kniestock vor der Sanierung bereits unter 1 m liegt und diese Flächen nicht in die Nutzfläche eingerechnet werden. Die Bereiche mit einer Nutzhöhe von mehr als 2 m sind unterschiedlich groß. Die Summe der Nutzflächen für die untersuchten Varianten sind in Abbildung 23 dargestellt.

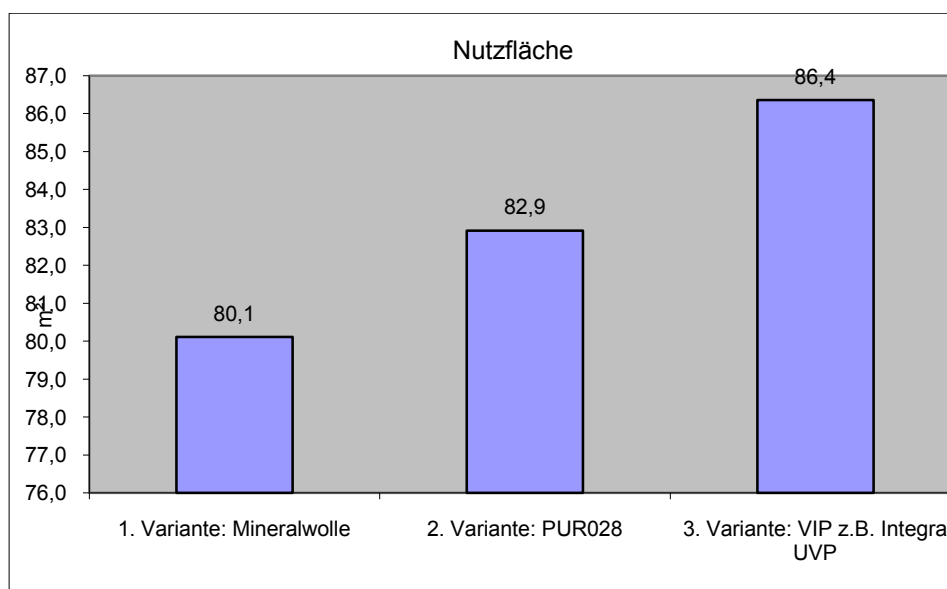


Abbildung 23: Nutzflächen im Dachgeschoß, abhängig von der Dicke der gewählten Sanierungsvariante

Bei der dünnsten Untersparrendämmung ist die Nutzfläche natürlich am größten. In Abbildung 24 sind die Herstellkosten für die Lösung mit Zwischensparrendämmung

aus Mineralwolle mit verschiedenen Ausführungen von Untersparrendämmung dargestellt. Die Herstellkosten für die Lösung mit der Untersparrendämmung aus Vakuum-Dämmplatten liegen deutlich über denen für die anderen beiden Lösungen.

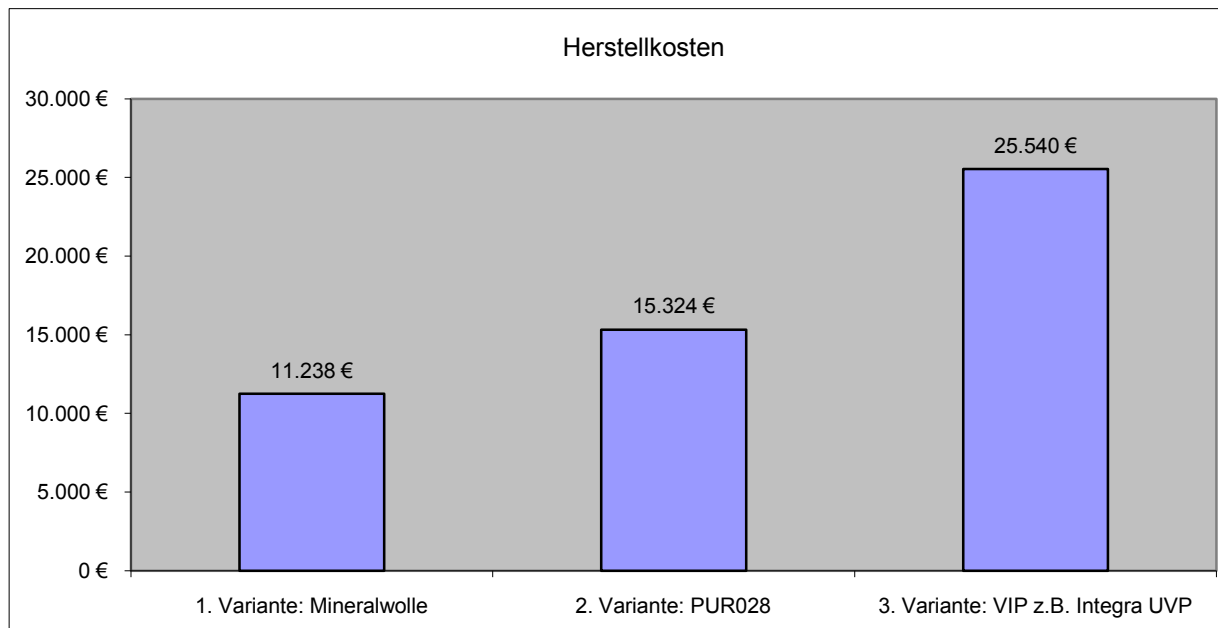


Abbildung 24: Herstellkosten für Zwischensparren- und Untersparrendämmung

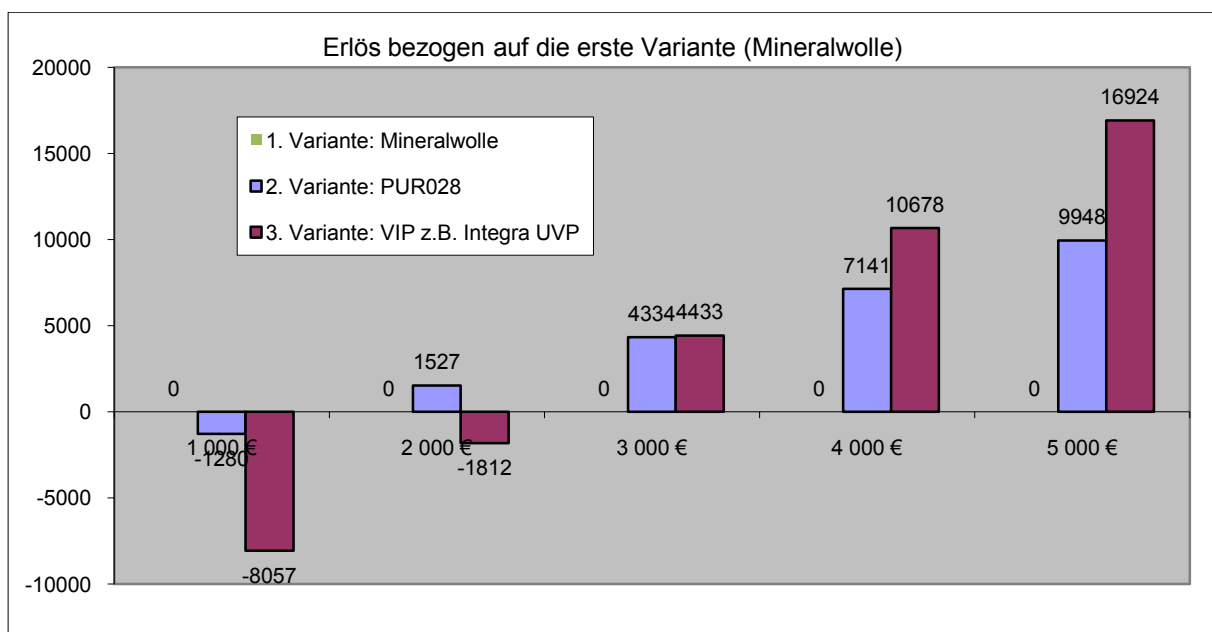


Abbildung 25: Erlös bezogen auf die dickste Variante (Mineralwolle) – dargestellt für verschiedene Erlöse pro Quadratmeter

Möglich, aber nicht realistisch, wäre hier der Bezug auf den Wert des ursprünglichen Dachgeschoßes, berechnet aus der vorhandenen Nutzfläche und dem möglichen Erlös pro Quadratmeter. Aufgrund der Verringerung der Nutzfläche durch die Sanierungslösungen ergäben sich für alle untersuchten Varianten geringere Erlöse gegenüber der unsanierten Variante. Dieser Ansatz ist falsch und berücksichtigt nicht die für eine unsanierte Variante geringeren erzielbaren Erlöse pro Quadratmeter.

Für die Darstellung in Abbildung 25 werden die zusätzlichen Erlöse für die untersuchten Varianten 2 und 3 in Bezug zur Variante 1 betrachtet. Von diesem zusätzlichen Erlös werden die Mehrkosten der Varianten 2 und 3 gegenüber den Kosten der Variante 1 abgezogen. Ist der Rest größer null, ergeben sich für den Bauherrn Minderkosten gegenüber der Ausführung 1 mit Mineralwolle. Ist der Rest kleiner null, dann ergeben sich gegenüber der Ausführung 1 entsprechende Mehrkosten. Diese Kosten sind in Abbildung 25 für die Varianten 2 und 3 aufgetragen.

Bei geringen erzielbaren Erlösen für das verkaufte Gebäude (bis ca. 2500 €/m<sup>2</sup>) ist die Lösung mit Vakuum-Dämmplatten nicht wirtschaftlich. Die Variante 1 (Mineralwolle) ist für niedrige erzielbare Erlöse die wirtschaftlichste Lösung. Die Nutzflächengewinne durch die PUR-Lösung lassen diese ab ca. 2000 €/m<sup>2</sup> wirtschaftlicher erscheinen als die Lösung 1. Erst ab erzielbaren Erlösen von über 3000 €/m<sup>2</sup> ist die Variante 3 (VIP) wirtschaftlicher als die Lösung 2 (PUR).

Für sehr hochpreisige Lagen lässt sich derzeit der Einsatz von Vakuum-Dämmung als Untersparrendämmung im Altbau wirtschaftlich darstellen. Der Mehrwert einer Untersparrendämmung aus Vakuum-Paneelen sollte hier nicht nur wirtschaftlich begründet werden. Der Verlust an Wohnfläche und freier nutzbarer Raumhöhe wiegt für einen Bauherrn womöglich schwerer, als dies alleine über monetäre Betrachtung der verlorenen Quadratmeter möglich ist. Trotzdem ist hier auch hier eine Kostenreduzierung für die Vakuum-Dämmplatten unbedingt notwendig.

### 3 Analyse vorhandener Daten zu Wärmeleitfähigkeit

#### 3.1 DIBt-Alterung

Aus der Messtätigkeit des FIW München liegen eine Vielzahl von Messwerten an Vakuum-Paneelen aus den letzten 10 Jahren zur Auswertung vor. Die Palette deckt fast alle Hersteller, Kernmaterialien und Folien ab. Einige Untersuchungen wurden an gealterten Vakuum-Paneelen durchgeführt. In vielen Fällen wurde die vom DIBt, Berlin, für die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung von Vakuum-Paneelen festgelegte Prozedur zur Alterung angewendet:

1. Messung des Wärmedurchlasswiderstands im Anlieferungszustand im Plattengerät nach DIN EN 12667
2. Klimawechselbeanspruchung 7 Tage Wechselklima  $-15^{\circ}\text{C}$  /  $+ 80^{\circ}\text{C}$  mit einem kompletten Zyklus pro Tag
3. 90 Tage Lagerung bei  $80^{\circ}\text{C}$  (Laborluft von  $23^{\circ}\text{C}$  und 50% relativer Feuchte wird auf  $80^{\circ}\text{C}$  erwärmt – die relative Feuchte beträgt bei  $80^{\circ}\text{C}$  ca. 3% - der absolute Feuchtegehalt der Luft bleibt jedoch konstant)
4. Erneute Messung des Wärmedurchlasswiderstands im Plattengerät nach DIN EN 12667
5. 90 Tage Lagerung bei  $80^{\circ}\text{C}$
6. Dritte Messung des Wärmedurchlasswiderstands im Plattengerät nach DIN EN 12667

Für einige Platten und Plattenpaare liegen Zwischenwerte bei anderen Lagerungszeiträumen vor. Für eine Messreihe gibt es Langzeituntersuchungen bis 360 Tage Lagerung bei  $80^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.2 Forschungsvorhaben „VIP-Bau“

Für das Forschungsvorhaben „VIP-Bau – Vakuum-Isolationspaneele für die Anwendung im Bauwesen“ [10] wurden zwischen 2004 und 2007 Untersuchungen zum Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von VIPs durchgeführt. Aus dem Unterschied der Ergebnisse für Paneele gelagert bei  $23^{\circ}\text{C}/80\%$  und bei  $80^{\circ}\text{C}/<5\%$  lässt sich der Faktor ableiten, um den die Lagerung bei  $80^{\circ}\text{C}/<5\%$  die Wärmeleitfähigkeit stärker erhöht als

die vergleichende Lagerung bei Laborbedingungen für hygroskopische Baustoffe und Dämmstoffe 23°C/80%. Da sich die Dicke der untersuchten Plattenpaare während der 12-monatigen Lagerungszeit etwas verminderte, wurden für das Forschungsvorhaben die Wärmedurchlasskoeffizienten  $\Lambda$  in  $W/(m^2 \cdot K)$  betrachtet. Um die Steigung der Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen, werden die Wärmedurchlasskoeffizienten mit der Anfangsdicke multipliziert, um normierte Werte für die Wärmeleitfähigkeit zu bekommen. Im folgenden Diagramm (Abbildung 26) sind die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts hinsichtlich der vergleichenden Untersuchung der Effekte der Alterung auf die Wärmeleitfähigkeit aufgetragen.

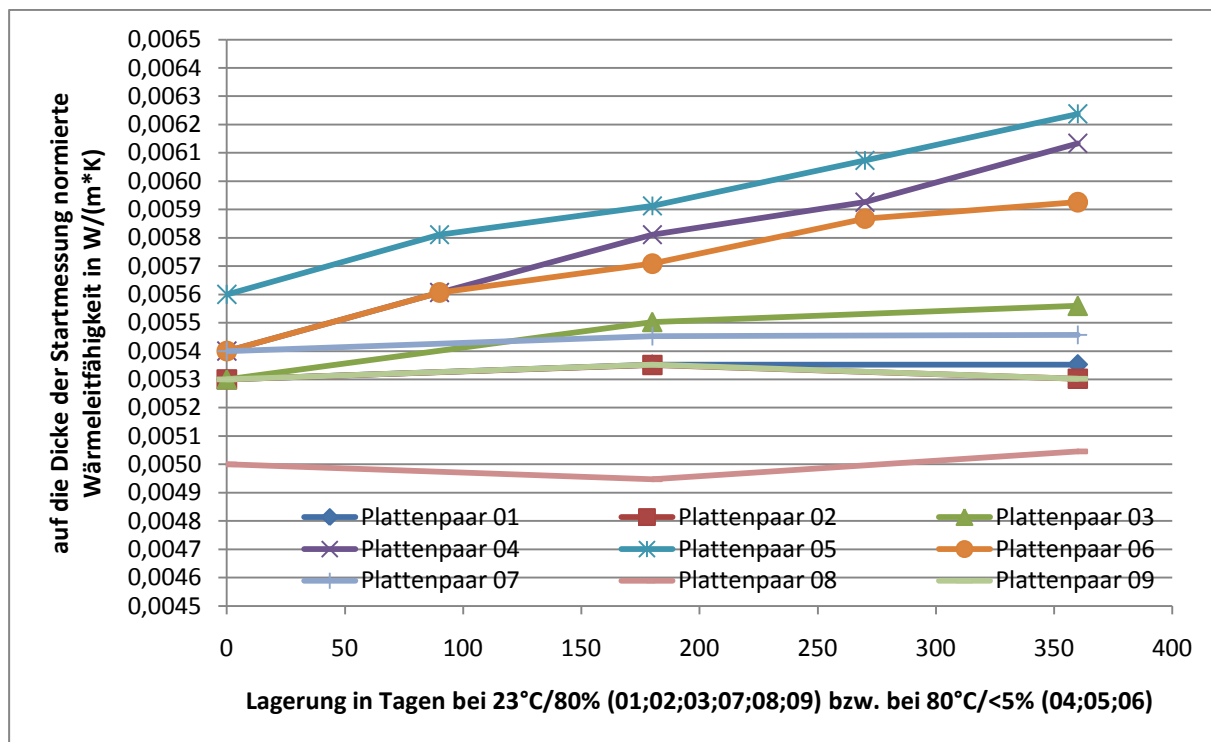


Abbildung 26: Auswertung der Untersuchungen des Forschungsprojekts VIP-Bau hinsichtlich der Unterschiede des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit bei Lagerung in verschiedenen Klimaten

Im Unterschied zur Alterung nach dem Prüfplan des DIBt, Berlin wurden die Plattenpaare nur einer Temperaturlagerung unterzogen, nicht einer der ersten Temperaturlagerung vorgeschalteten Klimawechselprüfung. Aus den Einzelergebnissen für die Plattenpaare lassen sich die folgenden Mittelwerte für den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit

higkeit für die Plattenpaare mit Temperaturlagerung und die Vergleichsplattenpaare ableiten (Abbildung 27).

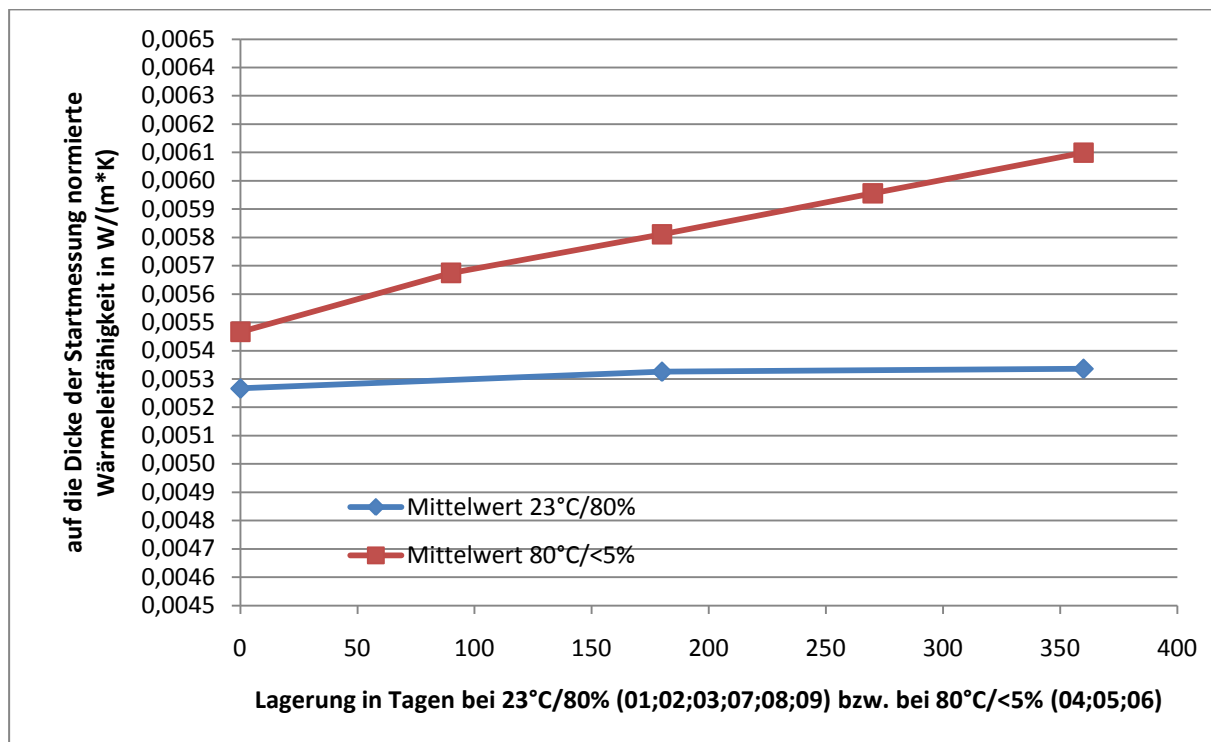


Abbildung 27: Mittelwerte der Plattenpaare nach Lagerung in verschiedenen Umgebungen in Tagen

### 3.2.1 Ableitung eines Alterungsfaktors aus den Untersuchungen des VIP-Bau-Forschungsprojektes

Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bei den einzelnen Alterungsschritten ist in Abbildung 28 dargestellt. Aus dem Unterschied der Erhöhung können Faktoren abgeleitet werden, um wie viel die Lagerung bei 80°C/<5% die Wärmeleitfähigkeit mehr erhöht als die Lagerung bei 23°C/80%. Für die Lagerung bei 80°C/<5% für 180 Tage kann ein Faktor von 5,8 abgeleitet werden, um den der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit schneller abläuft als bei Lagerung im Klima 23°C/80%. Für 360 Tage Lagerung im Klima 80°C/<5% kann gegenüber dem Vergleichsklima ein Faktor von 9,1 gefunden werden.

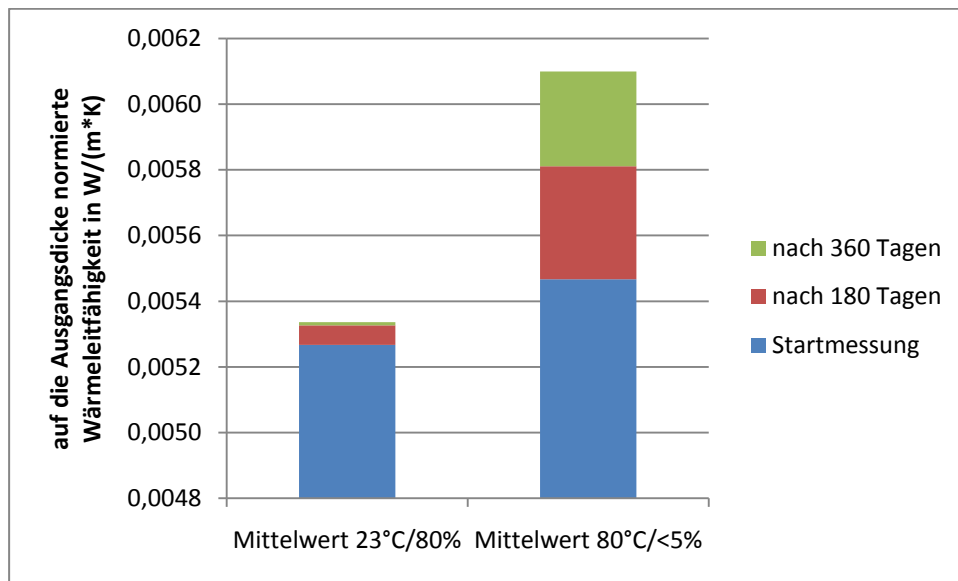


Abbildung 28: Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit für 180 und 360 Tage Lagerung in verschiedenen Umgebungen

Die im Forschungsbericht „VIP-Bau“ angegebene Spanne für den Faktor von 15 bis 20 ist für die reine Temperaturlagerung nicht zutreffend. Möglicherweise wurden hier die Effekte einer Klimawechselbeanspruchung auf den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit zusätzlich eingerechnet. Diese erhöht den Stressfaktor für die Folie und die Verschweißung und sorgt für eine erhöhte Permeation. Der jährliche Anstieg der Wärmeleitfähigkeit für die untersuchten Plattenpaare beträgt im Mittel (ohne Klimawechsel):

|                     | Anstieg in 180 Tagen<br>in W/(m·K) | Jährlicher Anstieg aus<br>360 Tage Messung di-<br>rekt<br>in W/(m·K) | Jährlicher Anstieg aus 180<br>Tage Messung hochge-<br>rechnet<br>in W/(m·K) |
|---------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Mittelwert 23°C/80% | 0,000059                           | 0,000070                                                             | 0,000119                                                                    |
| Mittelwert 80°C/<5% | 0,000344                           | 0,000632                                                             | 0,000688                                                                    |

Tabelle 6: Jährlicher Anstieg der Wärmeleitfähigkeit im Mittel der untersuchten Plattenpaare

Dabei ist der Anstieg für die Lagerung bei 80°C/<5% annähernd linear; der für die Lagerung im Vergleichsklima ist für die ersten 180 Tage deutlich ausgeprägter als für weitere 180 Tage. Für beide Klimalagerungen ist jedoch feststellbar, dass der für das

DIBt-Alterungsverfahren herangezogene Zeitraum von 180 Tagen Lagerung bei 80°C bei Hochrechnung auf ein Jahr Alterung zu höheren Werte führt als die tatsächliche Klimalagerung in diesem Klima für die Dauer eines Jahres.

Wird stattdessen der direkt für 360 Tage ermittelte Wert zugrunde gelegt, ergeben sich für eine Gebrauchsdauer von 10, 20 und 30 Jahren in erster linearer Näherung die nachfolgende dargestellten Werte der Wärmeleitfähigkeit, wobei die Werte der Mittelwert-Reihe bei 23°C/80% direkt hochgerechnet wurden. Die sich aus der Hochrechnung des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit ergebenden Werte für die bei 80°C/<5% gelagerten Paneele werden, um den gefundenen Faktor 9,1 vermindert, um sie mit den Werten aus der direkten Ermittlung vergleichen zu können.

|                     | Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K) |          |          |          |
|---------------------|-------------------------------|----------|----------|----------|
|                     | Startmessung                  | 10 Jahre | 20 Jahre | 30 Jahre |
| Mittelwert 23°C/80% | 0,0053                        | 0,0060   | 0,0067   | 0,0074   |
| Mittelwert 80°C/<5% | 0,0055                        | 0,0062   | 0,0069   | 0,0076   |

Tabelle 7: Hochrechnung der Wärmeleitfähigkeit für 10, 20 und 30 Jahre Gebrauchsdauer im Gebäude aus den für 360 Tage ermittelten Erhöhungen der Wärmeleitfähigkeit

In dieser ersten linearen Näherung sind die hochgerechneten Werte unter Verwendung des gefundenen Faktors vergleichbar.

### 3.3 Auswertung der Zulassungsuntersuchungen

Nachfolgend werden die im Rahmen des VIP-Bau-Forschungsvorhabens festgestellten Werte mit den Alterungsuntersuchungen beim FIW München aus den Zulassungsprüfungen der letzten Jahre verglichen. Hierfür wurde ausschließlich das Alterungsverfahren nach dem DIBt-Entwurf angewendet, jedoch teilweise durch zusätzliche Messungen (Zwischenwerte) und längere Lagerungszeit ergänzt. Aus über 150 Einzelmessungen werden vollständige Messreihen aus mindestens drei Plattenpaaren zu Mittelwerten zusammengefasst. Alle Messungen sind mit dem Zweiplattenverfahren durchgeführt worden, außer bei belüfteten Platten. Hier wurde an der verblei-

benden unbelüfteten Platte mit dem Wärmestrommessplattenverfahren die Untersuchung weitergeführt.

### 3.3.1 Überblick und Legende

- Untersuchungen zwischen 2003 und 2010 – in den Diagrammen mit Jahreszahl angegeben – ältere Messungen nicht berücksichtigt
- Untersuchungen für 6 Hersteller – in den Diagrammen mit H A bis H F bezeichnet
- Untersuchungen an 7 Hochbarriere-Folien mit drei Lagen aufgedampften Aluminiums – in den Diagrammen mit F 1 bis F 7 bezeichnet
- Untersuchungen an 4 Stützkernmaterialien (pyrogene Kieselsäure in verschiedenen Mischungen und Rohdichten) – in den Diagrammen mit K 1 bis K 4 bezeichnet
- Nur vollständige Messreihen ausgewertet – einzelne orientierende Messungen nicht berücksichtigt

### 3.3.2 Mittelwerte aus drei Plattenpaaren

In Abbildung 29 sind die Mittelwerte der Messreihen an jeweils mindestens drei Plattenpaaren aufgetragen. Da die Kurven bis auf die Untersuchungsreihe H A 2005 F 2 K 2 (aus der Auswertung für die Steigung herausgenommen) eine sehr ähnliche Steigung aufweisen, kann daraus eine mittlere Erhöhung nach dem DIBt-Alterungsverfahren ermittelt werden.

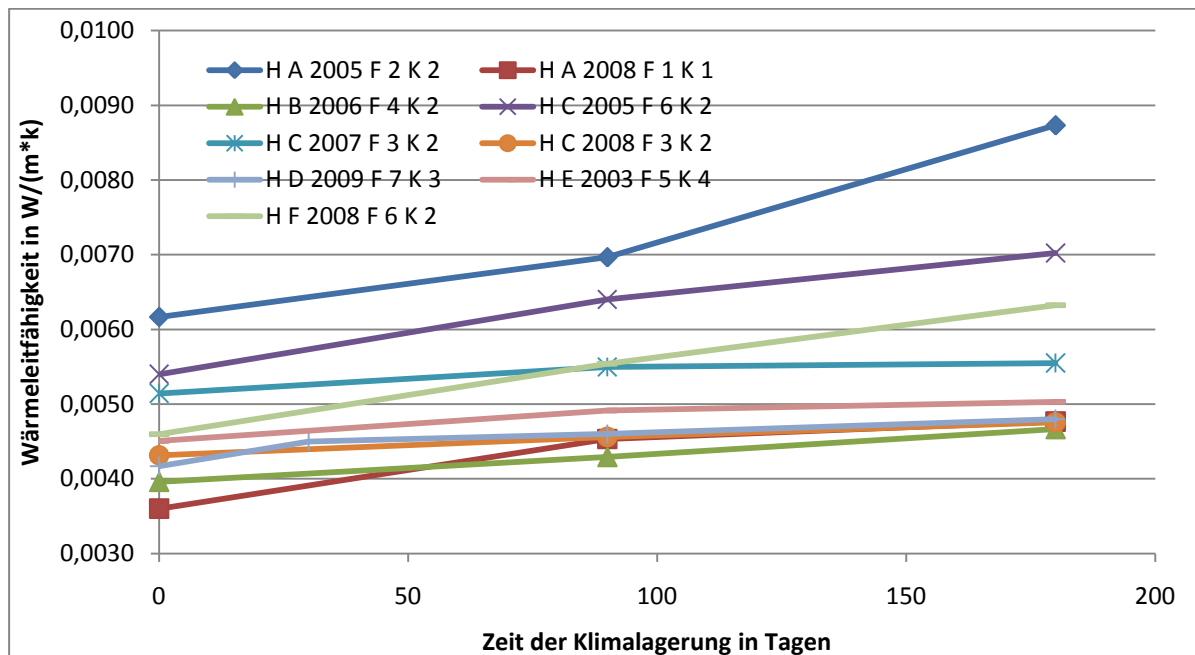


Abbildung 29: Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit aus jeweils drei Plattenpaaren

Als mittlere Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit kann für das DIBt-Alterungsverfahren 0,00090 W/(m·K) für 180 Tage ermittelt werden. Der Mittelwert der Erhöhung der 3 Kurven mit dem größten Anstieg beträgt 0,00151 W/(m·K) - der Mittelwert der Erhöhung der 5 Kurven mit dem geringsten Anstieg beträgt 0,00054 W/(m·K).

### 3.4 Vergleich der Zulassungsuntersuchungen mit den Ergebnissen des VIP-Bau-Vorhabens

#### 3.4.1 Einfluss der Klimawechselprüfung

Ausgehend vom Mittelwert der Erhöhung von 0,00090 W/(m·K) erfolgt ein Vergleich mit dem für das Forschungsprojekt „VIP-Bau“ ermittelten Wert. Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist dort mit 0,000344 W/(m·K) für die Temperaturlagerung deutlich geringer als bei der Alterung nach dem DIBt-Verfahren. Dieser Unterschied ist auf die Klimawechselprüfung zurückzuführen, die nicht Bestandteil der Untersuchung für das „VIP-Bau“ Forschungsvorhaben war. Auf die Ergebnisse der FIW-Untersuchungen bezogen bedeutet das, dass die Klimawechselprüfung im Mittel für  $\Delta\lambda$  von  $0,00090 - 0,000344 = 0,000556$  W/(m·K) der Erhöhung der Wärmeleitfähig-

keit verantwortlich sein dürfte. Sie ist damit für den überwiegenden Teil des Anstiegs verantwortlich.

### 3.4.2 Ableitung der Alterungsfaktoren

Aus der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der bei Raumtemperatur im Klima 23°C/80% gelagerten Paneele des Forschungsvorhabens kann eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um 0,000059 W/(m·K) (vergl. Tabelle 6 für 180 Tage) ermittelt werden. Mit dem Mittelwert der Messreihen aus der DIBt-Alterung von 0,00090 W/(m·K) ergibt sich für 1/2 Jahr hier der Faktor zu 15,3 – um den die DIBt-Alterung systematisch höhere Werte ergibt als die Lagerung bei Laborbedingungen.

### 3.4.3 Fortführung der Temperaturlagerung

Für drei Plattenpaare wurde die Temperaturlagerung noch bis auf 1 Jahr ausgedehnt (Abbildung 30). Es ergibt sich nach 360 Tagen eine Erhöhung um 0,0020 W/(m·K) im Mittel für die drei Plattenpaare. Im Vergleich zu den Werten aus dem „VIP-Bau“ Vorhaben bei 360 Tagen ohne Klimawechsel (0,000070 W/(m·K) – vergl. Tabelle 6 für 360 Tage) ergibt sich der Faktor zu 28,6 – um den die DIBt-Alterung höhere Werte der Wärmeleitfähigkeit ergibt, als die Lagerung bei Laborbedingungen.

Alle Wärmeleitfähigkeitswerte der drei Plattenpaare liegen auch nach einem Jahr Temperaturlagerung noch innerhalb von 0,2 mW/(m·K) und mit 0,0055 bis 0,0057 W/(m·K) noch deutlich unter dem angegebenen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von 0,007 W/(m·K). Mit der Erhöhung um den Faktor 28,6 lässt sich aus der Temperaturlagerung von 360 Tagen etwa auf die Gebrauchstauglichkeit am/im Gebäude von 30 Jahren schließen.

Wenn zukünftig eine größere Anzahl von Untersuchungen über einen längeren Zeitraum vorliegen, kann möglicherweise der Sicherheitszuschlag des DIBt, von pauschal 25 % auf die Messwerte nach Alterung und inklusive der Wärmebrückeneffekte am Rand, gesenkt werden. Denkbar wäre auch ein gestaffelter Sicherheitszuschlag, je nachdem, ob Alterungsuntersuchungen über 180 Tage oder 360 Tage durchgeführt wurden.

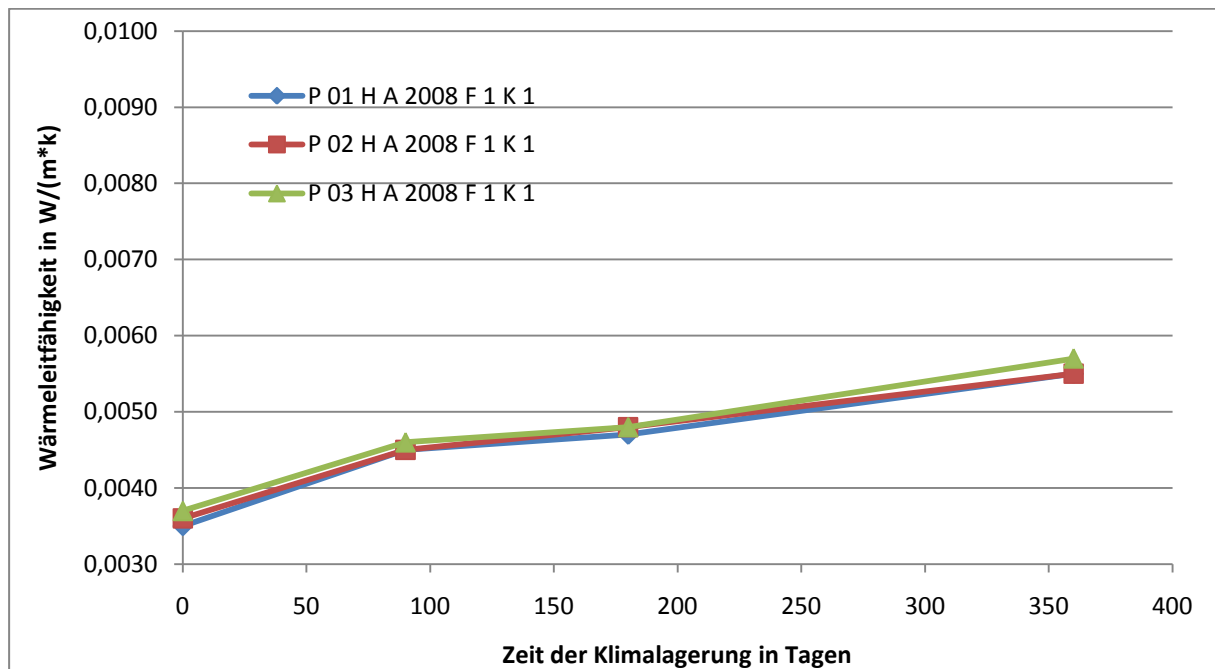


Abbildung 30: Wärmeleitfähigkeitsanstieg bei Verlängerung der Klimalagerung im Anschluss an die DIBt-Alterung um weitere 6 Monate bei 80°C/<5%

### 3.5 Vergleich der Erhöhungen der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Produkte

Beim direkten Vergleich der Wärmeleitfähigkeits-Frischwerte mit den Erhöhungen durch die künstliche Alterung fällt auf, dass die Erhöhung in vielen Fällen nur 0,5 bis 1 mW/(m·K) beträgt. Mit Ausnahme des Herstellers F zeigen alle seit 2006 gemessenen Produkte ein recht gleichmäßiges Verhalten bei der Alterung. Das deutet auf eine verbesserte Qualität bei der Herstellung der Produkte hin. In Abbildung 31 sind die Säulen nach den gemessenen Frischwerten sortiert. Es ist eine klare Tendenz zu sehen, dass gute Ergebnisse bei der Prüfung im Anlieferungszustand auch zu einem günstigen Alterungsverhalten führen. Sorgfalt bei der Herstellung führt zu einem günstigen Ausgangswert und zahlt sich auch beim Alterungsverhalten aus.

Mit Einschränkungen gilt diese Aussage auch für das leicht in der Konstruktion abweichende Produkt H A 2008 F 1 K 1, das den niedrigsten Anfangswert aufweist, dann allerdings eine etwas größere Erhöhung bei der Wiederholungsmessung nach 90 Tagen zeigt. Wiederum aus der Reihe fällt das Produkt des Herstellers F, das sich

hinsichtlich des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit bei der Alterung etwas ungünstiger zeigt.

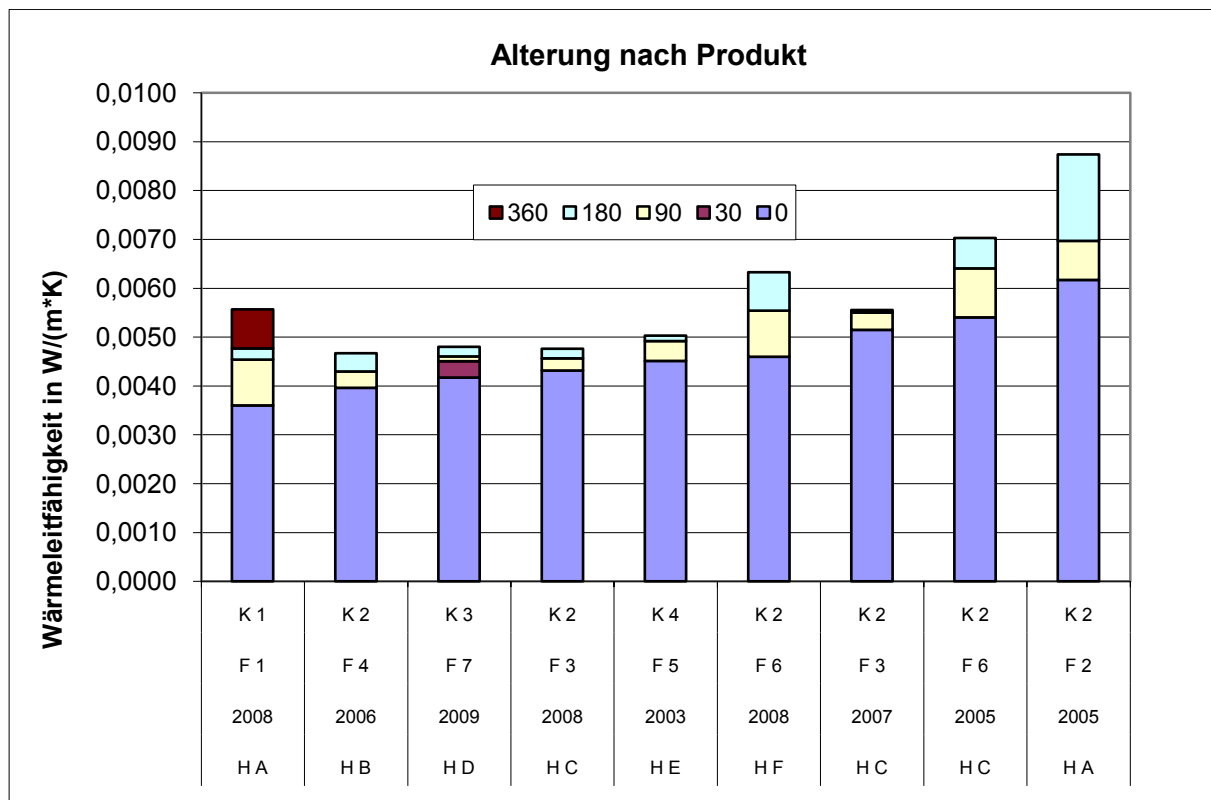


Abbildung 31: Vergleich der Frischwerte und der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit für die einzelnen Produkte – F3, F4, F5 und F7 sind Folien desselben Herstellers

Diese Abweichungen vom Trend lassen sich besser erklären, wenn als zusätzliche Information der Hersteller der Folien mit einfließt. Folien 3; 4; 5 und 7 sind verschiedene Typen eines Herstellers. Bei diesen Folien ist die Erhöhung aufgrund der Alterung deutlich kleiner als bei den anderen Produkten. Für einige Folien mit ungünstigerem Alterungsverhalten (z.B. F2) wurde mittlerweile die Produktion eingestellt, da die Hersteller gemerkt haben, dass damit hergestellte Paneele eine höhere Permeation aufweisen.

### 3.6 Weiterentwicklung der Produkte über die letzten Jahre

Im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 32) sind die Messreihen zur Alterung über dem Herstellungsjahr der Produkte aufgetragen. Die Wärmeleitfähigkeit konnte in den letzten Jahren weiter verringert werden, sowohl beim Frischwert als auch bei

den gealterten Werten. Im Jahr 2008 weicht eine Messreihe vom Trend ab, das ist jedoch die des Herstellers F, die schon in Abbildung 31 beim Alterungszuschlag aus der Reihe fiel. Die Messreihe aus dem Jahr 2003 zeigt allerdings, dass es mit einer Folie mit geringer Durchlässigkeit und hohem Aufwand bei der Herstellung schon mit den damaligen Produkten möglich war, günstige Werte bei der Alterung zu erreichen.

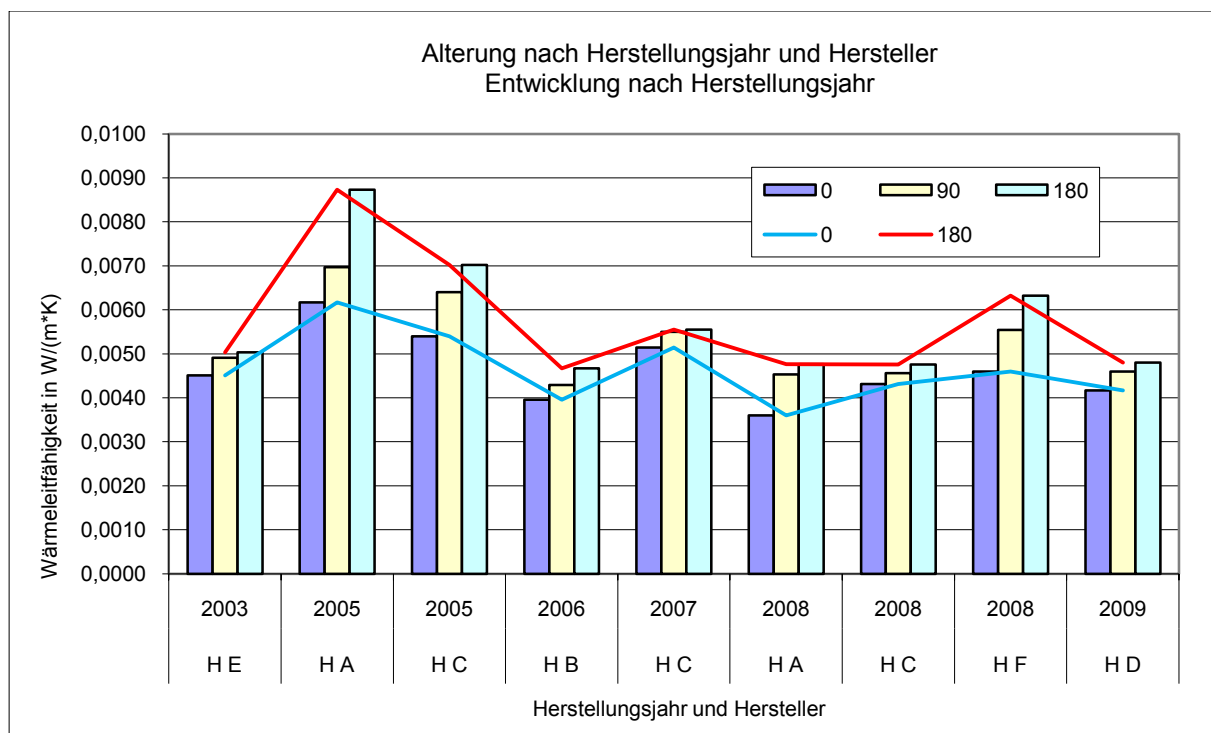


Abbildung 32: Darstellung der Messreihen zur Alterung nach Herstellungsjahr des Produkts

### 3.7 Folgerungen für dieses Projekt

Aus der Auswertung der Zulassungsuntersuchungen und den Messungen für das Forschungsprojekt „VIP-Bau“ werden die folgenden Punkte für die Produktion und das Alterungsverfahren für die im Rahmen dieses Forschungsprojekts hergestellten Versuchspaneele abgeleitet:

- Niedrigen Frischwert anstreben (Mischung, Rohdichte, Trocknung, Innendruck),
- Möglichst kleine Erhöhung aus der Alterung (Folie, Verschweißung, Paneelgröße),

- Folie mit sehr niedriger Permeation auswählen,
- Sorgfalt bei der Herstellung (Presse, Faltung, Evakuierung, Verschweißung),

Die Klimawechselbeanspruchung führt zusammen mit der Temperaturlagerung bei 80°C/<5% zu einem mittleren Anstieg der Wärmeleitfähigkeit um 0,00090 W/(m·K) in 180 Tagen. Aus der Kurve für pyrogene Kieselsäure (fumed silica) in Abbildung 4 kann daraus auf einen ungefähren Druckanstieg im Paneel von 20 bis 30 mbar geschlossen werden. Da das untersuchte Kernmaterial pyrogene Kieselsäure sich hinsichtlich des Druckanstiegs im Paneel wesentlich gutmütiger verhält als eine Füllung mit Mineralfasern – hier ist u.U. schon der Anstieg auf 1 mbar Innendruck intolerabel – wird für die Alterungsversuche keine Klimawechselbeanspruchung, sondern – wie beim „VIP-Bau“ Forschungsvorhaben – nur eine Temperaturlagerung durchgeführt.

Auf die Temperaturlagerung kann – im Hinblick auf das Einsatzgebiet der optimierten Paneele am Bau und die zahlreichen vorliegenden Vergleichswerte bei der Wärmeleitfähigkeit – kaum verzichtet werden, damit das Alterungsverhalten der neuen Paneele mit dem der Zulassungsuntersuchungen einfacher verglichen werden kann. Es werden jedoch Wärmeleitfähigkeitsmessungen schon nach kürzerer Lagerungsdauer durchgeführt, um die zu erwartenden deutlichen Veränderungen in der Wärmeleitfähigkeit genauer zu erfassen.

## 4 Berechnungen und numerische Modelle

### 4.1 Einfluss der Art der Randausbildung

Wie bereits theoretisch in Abschnitt 2.1.9 dargestellt, wirkt sich die Art der Randausbildung deutlich auf die Wärmeverluste am Paneelrand aus. Die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\psi$  unterscheiden sich deutlich, je nachdem ob eine einlagige Randausbildung (gelegentlich auch als konzentrischer Rand bzw. einlagiger Stoß bezeichnet) oder eine mehrlagige Randausbildung (gelegentlich auch als überlappende Randausbildung bzw. mehrlagiger Stoß bezeichnet) vorliegt. Für den mehrlagigen Stoß werden die Folien am Rand überlappt, verschweißt und anschließend nach einer Seite umgeklappt.

In Abbildung 33 sind diese Unterschiede für die Folie 4 exemplarisch dargestellt. Der Unterschied ist umso deutlicher ausgeprägt, je dünner das untersuchte VIP ist. Für dünne VIPs betragen die Randverluste über die Folien-Wärmebrücke an den kurzen Rändern (mehrlagiger Rand) mehr als das Doppelte der Wärmeverluste der längeren Ränder (einlagiger Rand).

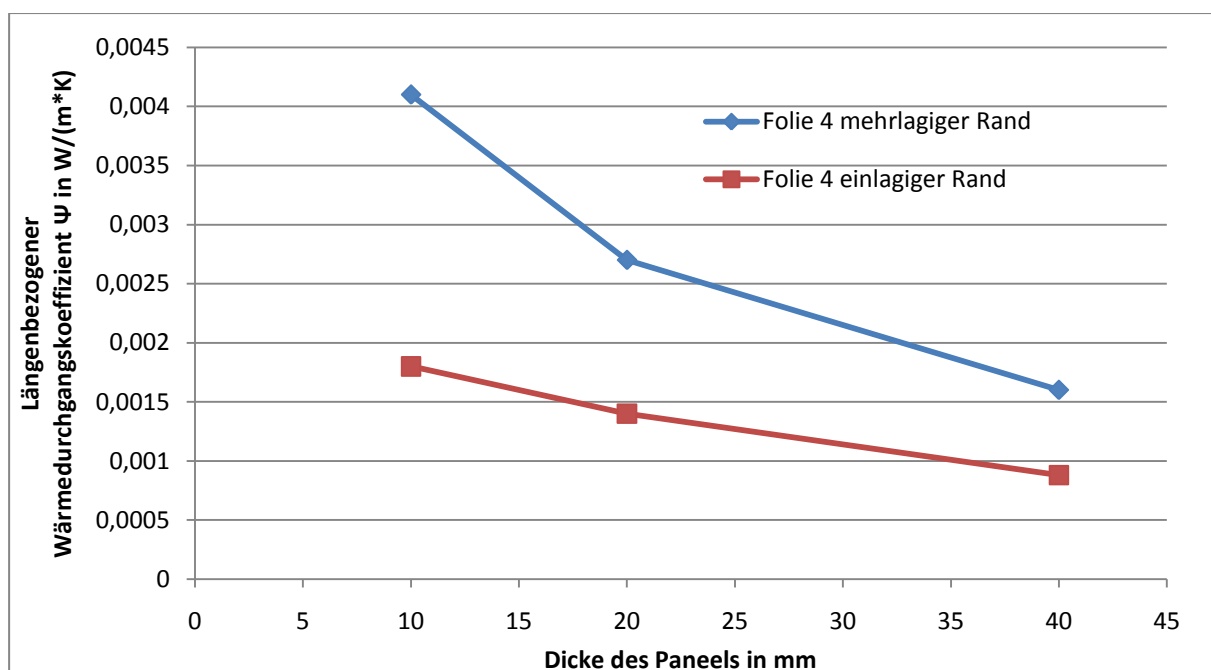


Abbildung 33: Einfluss der Randausbildung auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten am Paneelrand

## 4.2 Einfluss der Dicke der Aluminiumschichten

Für die nachfolgenden Untersuchungen wird der prinzipielle Aufbau der Folie 1 verwendet und die Dicke der anorganischen Barrierschichten für die zu untersuchenden Parameter variiert. In Abbildung 34 ist der Einfluss der Dicke der anorganischen Barrierschichten auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten des einlagigen und des mehrlagigen Randes für 20 mm und 40 mm dicke Paneele dargestellt. Die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten steigen mit zunehmender Dicke der anorganischen Barrierschichten deutlich an. Der Anstieg ist umso größer, je dünner die VIPs sind. Außerdem ist die Auswirkung bei der mehrlagigen Randausbildung natürlich größer, da hier die Dicke der anorganischen Barrierschichten in jeder Folienlage verdoppelt wird. Die gefundenen Zusammenhänge sind für den betrachteten Bereich zwischen 90 Nanometer und 360 Nanometer annähernd linear.

Wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert, unterscheiden sich die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für die beiden untersuchten Randausbildungen deutlich. Auch bei Verwendung der Folie 1 sind die  $\psi$ -Werte des mehrlagigen Randes des 20 mm dicke VIPs fast doppelt so groß wie die des einlagigen Randes. Ebenso ist der Unterschied für dickere Paneele (hier z.B. 40 mm) nicht so groß wie für dünne.

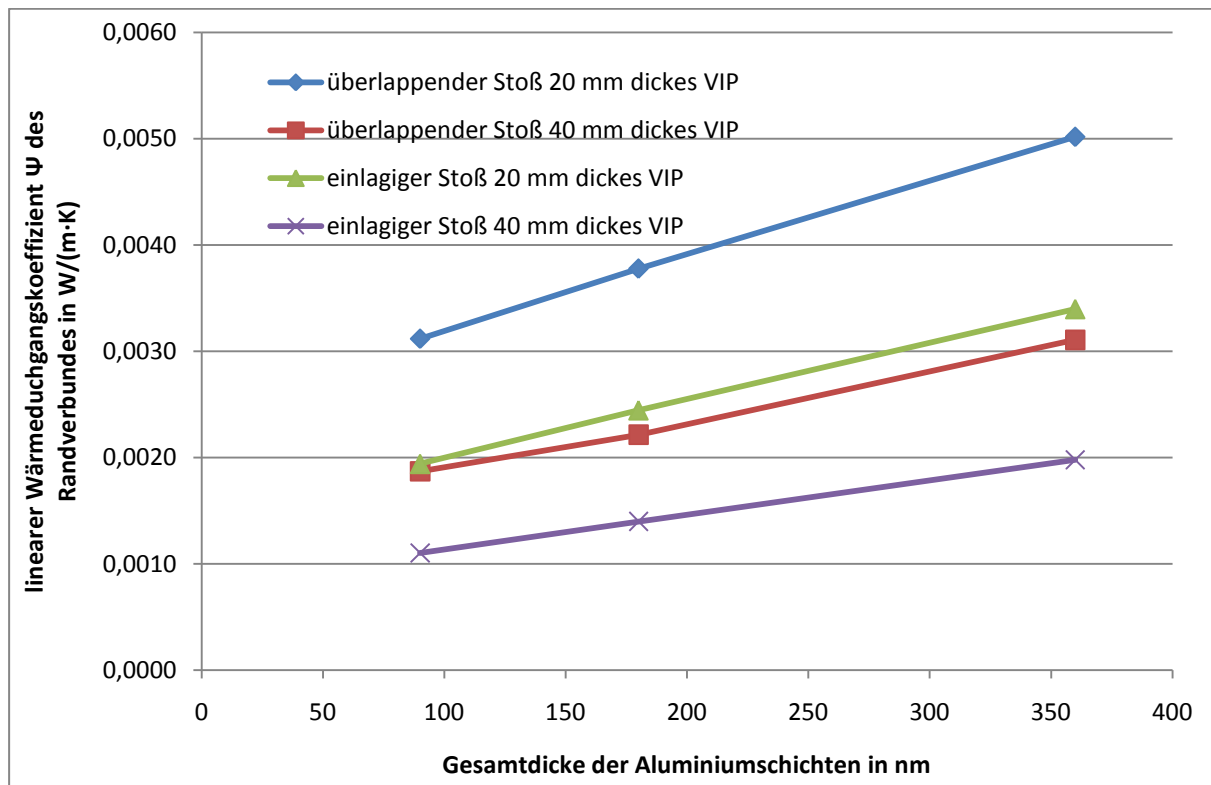


Abbildung 34: Einfluss der Dicke der anorganischen Barrierschichten auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten des einlagigen und des mehrlagigen Randes für 20 mm und 40 mm dicke Paneele

Der hier untersuchte Bereich der Gesamtdicke der Aluminiumschichten deckt den für metallisierte Hochbarrierefolien für VIP-Anwendungen üblichen Bereich ab. Die Hochrechnung für Ultrabarrierefolien (Aluminiumverbundfolien) mit einer Barrierschicht von wenigen Mikrometern lässt sehr große längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten erwarten, die zu einer Unwirtschaftlichkeit der VIPs bei üblichen Paneelabmessungen führt (Berechnung vgl. Abschnitt 4.6).

### 4.3 Einfluss des Materials der Barrierschichten

Wenn die Dicke der Aluminiumschichten einen solchen großen Einfluss auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten hat, dann bietet sich eine Untersuchung mit anderen geeigneten anorganischen Barriermaterialien an. Für die folgende Untersuchung wurden Siliziumdioxid, Edelstahl und Aluminium zugrunde gelegt. Die angesetzten Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit sind 1,0; 15 und 160 W/(m·K). Die Ordinate in Abbildung 35 ist in logarithmischem Maßstab aufgetragen

um die Unterschiede der Wärmeleitfähigkeit von Siliziumdioxid, Edelstahl und Aluminium in einem Diagramm darstellen zu können. Siliziumdioxid und Edelstahl unterscheiden sich bei der Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 15. Für die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten resultiert aus diesem Unterschied eine Änderung von 0,00005 bis 0,00013 W/(m·K). Beim Vergleich von Edelstahl und Aluminium gibt es jedoch deutliche Unterschiede hinsichtlich des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten am Paneelrand. Die Wärmeleitfähigkeit der beiden Barrierematerialien unterscheidet sich um den Faktor 11. Für die  $\psi$ -Werte resultiert aus diesem Unterschied jedoch eine Änderung von 0,00055 bis 0,0012 W/(m·K).

Dieses Verhalten lässt sich erklären, wenn beachtet wird, dass die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten zweidimensional zu ermitteln sind. Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Barrierematerials, desto größer ist die Querleitung in der Fläche der VIPs zu den Stoßstellen hin. Da die Wärmeleitfähigkeit der anderen am Wärmetransport beteiligten Materialien des VIP Kerns und der Folie in dieser Berechnung nicht geändert werden, ergibt sich durch die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Barrierematerials ein deutliches Übergewicht für den Anteil am Wärmetransport. Der Wärmetransport am Paneelrand ist somit nicht nur abhängig vom absoluten Wert der Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Materialien, sondern auch vom Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit zu den benachbarten Materialien.

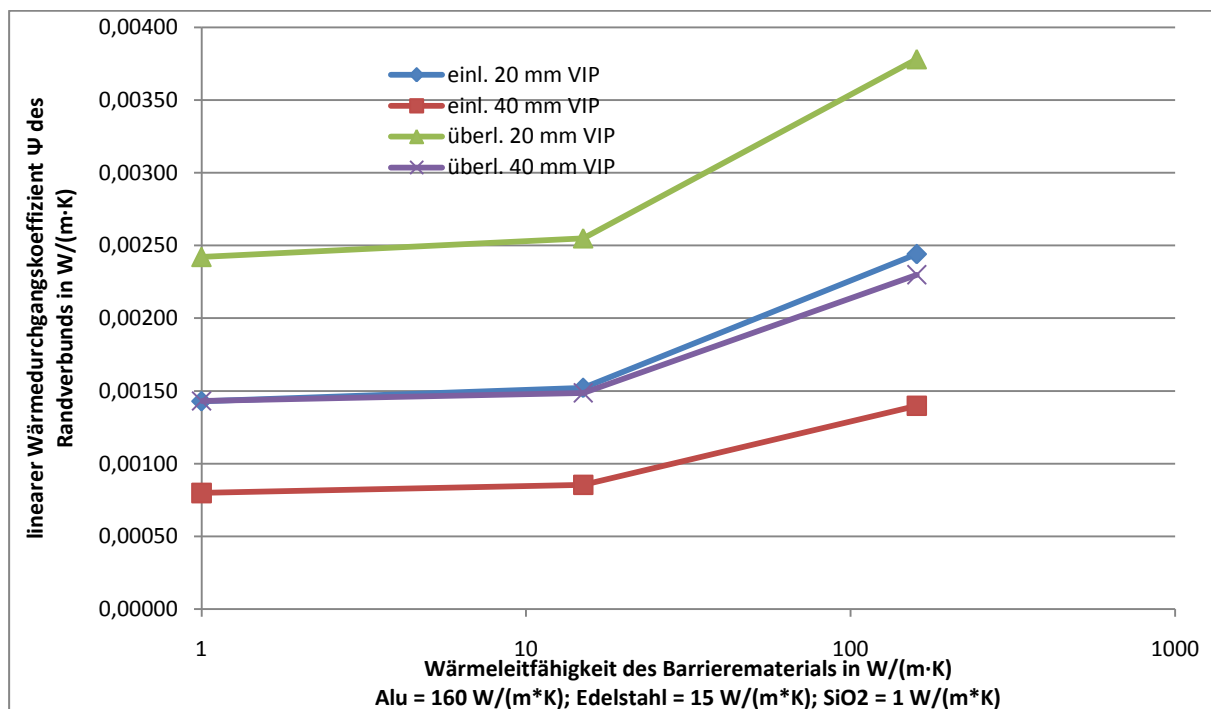


Abbildung 35: Einfluss des Barrierematerials auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten der ein- und mehrlagigen Randausbildung an 20 mm und 40 mm dicken VIPs

#### 4.4 Einfluss einer Fuge zwischen Paneelen

Nachfolgend ist für einen einlagigen Stoß mit Folie 1 der Einfluss der Spaltweite zwischen zwei verlegten VIPs der Dicke 20 mm und der Einfluss der Spaltfüllung mit einem Dämmstoff bestimmter Wärmeleitfähigkeit dargestellt (Abbildung 36). Untersucht wurde hier nur ein einlagiger Stoß, da sich dieser Zusammenhang für den mehrlagigen Stoß ähnlich darstellen sollte. Die untersuchten Spaltweiten decken mit 10 mm bis 50 mm den für Randschutzstreifen sinnvollen Bereich ab. Bei Randstreifen über 50 mm Breite werden die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten so groß, dass sich eine VIP-Bauweise nur noch bei sehr großen Paneelen darstellen lässt.

Als Spaltfüllung wird Dämmstoff mit einigen üblichen Wärmeleitfähigkeitswerten betrachtet (0,022 bis 0,040  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ). Liegt die Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffes im Spalt nur wenig darüber (beispielsweise vorkomprimiertes Dichtband mit ca. 0,050  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ), kann für die entsprechenden Spaltweiten der  $\psi$ -Wert aus den angegebe-

nen Kurven linear extrapoliert werden. Für größere Wärmeleitfähigkeiten des Füllmaterials ist eine numerische Berechnung mit den genauen Abmessungen der Paneele und der Spaltweiten notwendig. Für dickere Paneele stellt sich ein ähnliches Verhalten ein, jedoch sind die Steigungen der Kurven und die  $\psi$ -Werte etwas kleiner.

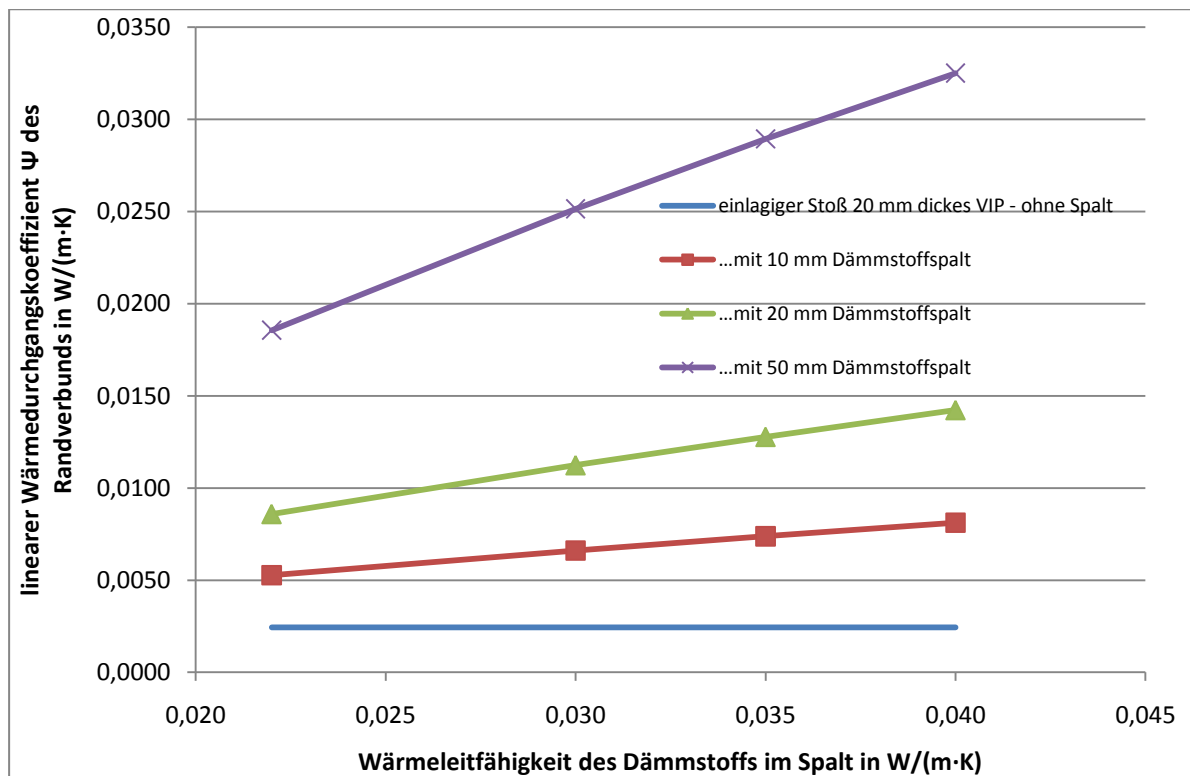


Abbildung 36: Einfluss der Spaltweite und der Wärmeleitfähigkeit der Spaltfüllung zwischen zwei verlegten VIPs auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten

## 4.5 Einfluss von Deckschichten

### 4.5.1 Einfluss der Dicke von vor- und nachgelagerten Dämmstoffschichten

Für einen einlagigen Folienstoß eines 20 mm dicken VIPs wird der Einfluss der Dicke von vor- und nachgelagerten Schichten aus Dämmstoff der Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(m·K) auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten untersucht. Durch den zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstand der Dämmschichten ergibt sich eine Verringerung der  $\psi$ -Werte. Die zusätzlichen Schichten wirken dämpfend auf die  $\psi$ -Werte und den Unterschied zwischen dem 20 mm dicken und dem 40 mm dicken

VIP. Schon durch 5 mm Dämmstoff auf beiden Flächen des Panels lässt sich der  $\psi$ -Wert des Randes des 40 mm dicken VIPs um fast 20 % verringern.

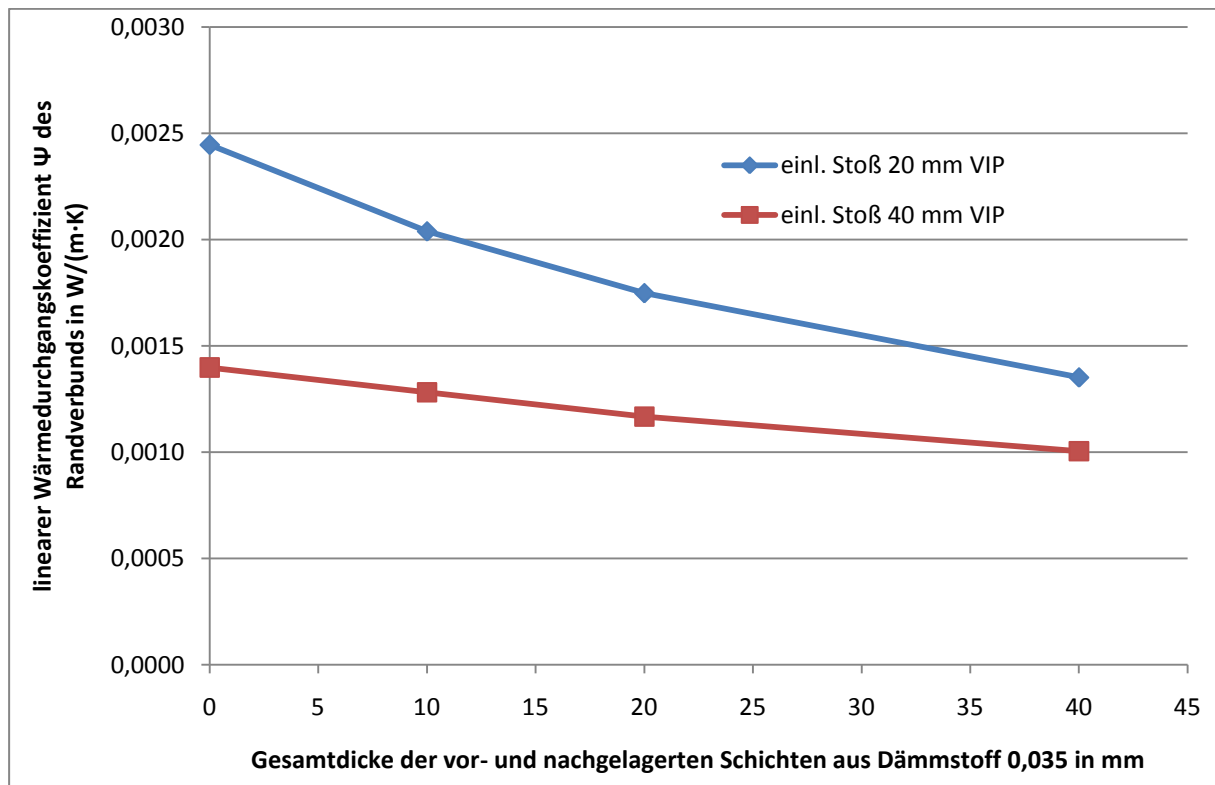


Abbildung 37: Einfluss vor- und nachgelagerter Schichten aus Dämmstoff auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten

#### 4.5.2 Einfluss anderer Deckschicht-Materialien auf den $\psi$ -Wert

In weiteren Untersuchungen erfolgt ein Vergleich der Materialien der Deckschichten. Deckschichten für VIPs werden aus sehr unterschiedlichen Materialien angefertigt. Die Spanne der Wärmeleitfähigkeit reicht von Dämmstoffen ( $\lambda < 0,09$  W/(m·K)) über Holz und massive Kunststoffe (0,09 bis 0,60 W/(m·K)) bis hin zu Metallen ( $\lambda > 10$  W/(m·K)). Der Bereich dazwischen wird hauptsächlich durch mineralische Baustoffe repräsentiert, die keine Verwendung als Deckschichten von VIPs finden. In den folgenden Untersuchungen werden für die einzelnen Wärmeleitfähigkeitsbereiche typische Vertreter betrachtet (EPS; MDF-Platten; Kunststoff-Schwerfolien (z.B. Schalldämmfolien) und metallische Deckschichten). Der Einfluss der Deckschicht-

Materialien ist in Abbildung 38 für den einlagigen Folienstoß und VIPs der Dicke 20 mm bis 40 mm dargestellt.

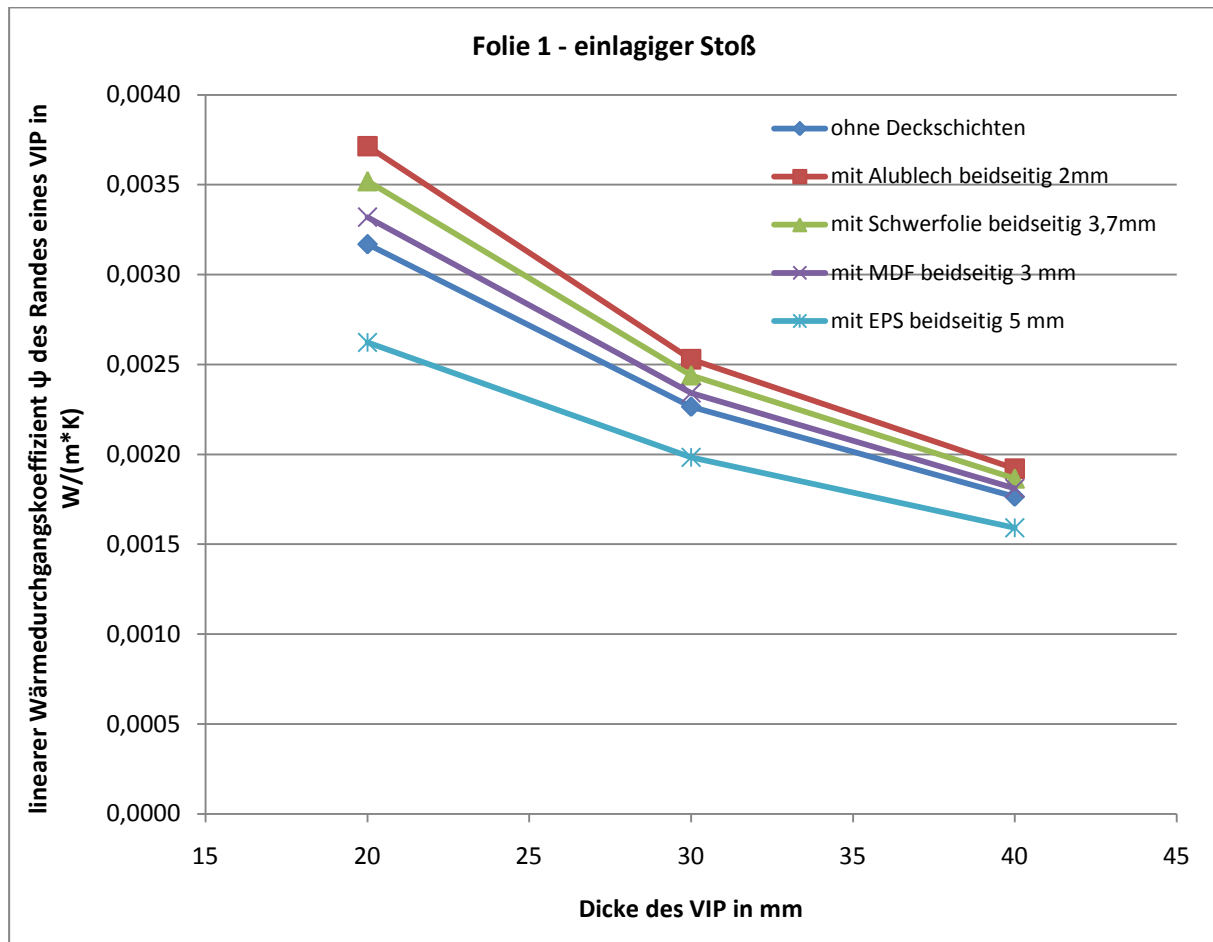


Abbildung 38: Einfluss des Deckschichtmaterials auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für den einlagigen Stoß und VIPs der Dicke 20 mm bis 40 mm

Die Ausführung mit einlagiger Folie am Rand (üblich bei allen längeren Kanten der VIPs) zeigt mit Deckschichten einen Anstieg der Randwärmebrücken Verluste. Dieser Anstieg fällt bei dünneren VIPs stärker aus und nimmt mit zunehmender Dicke der VIPs ab. Nur für Deckschichten aus Dämmstoffen können niedrigere  $\psi$ -Werte für den Rand als für den Fall ohne Deckschichten ermittelt werden. Ein nennenswerter Unterschied zwischen massiven metallischen Decklagen (hier 2 mm Aluminiumbleche) und Holzwerkstoffen (hier 3 mm MDF Platten) kann nicht festgestellt werden. Die massiven Kunststoffe liegen dazwischen.

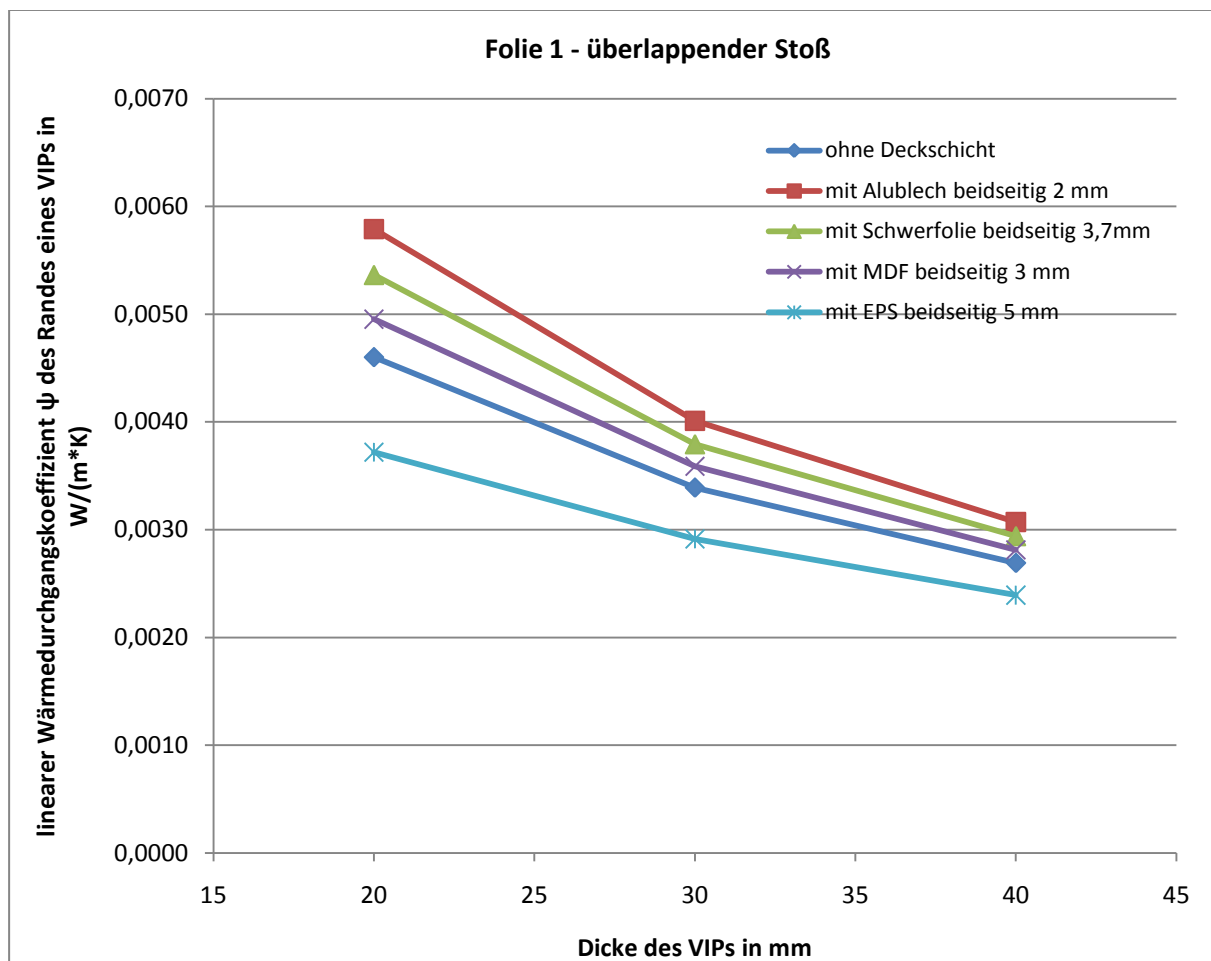


Abbildung 39: Einfluss des Materials der Deckschichten auf die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für den mehrlagigen Stoß von VIPs der Dicke 20 mm bis 40 mm

Die Ausführung mit überlappender Folie am Rand (Umklappung; üblich bei kürzeren Kanten der VIPs) zeigt mit Deckschichten auch einen Anstieg der Randwärmebrücken Verluste (Abbildung 39). Dieser Anstieg fällt bei dünneren VIPs stärker aus und nimmt mit zunehmender Dicke der VIPs ab. Die geringere Zunahme bei den größeren Dicken ist nicht so deutlich ausgeprägt wie bei der einlagigen Randausbildung. Prozentual fällt der Anstieg bei dieser Randausbildung etwas höher aus als beim einlagigen Rand.

Auch hier können für Deckschichten aus Dämmstoffen niedrigere Werte ermittelt werden. Ein nennenswerter Unterschied zwischen massiven metallischen Decklagen

(hier 2 mm Aluminiumbleche) und Holzwerkstoffen (hier 3 mm MDF Platten) kann auch hier nicht festgestellt werden. Die massiven Kunststoffe liegen wiederum zwischen Holz und Metall.

#### **4.6 Vergleich mit einer Aluminium-Verbundfolie**

In Abschnitt 2.1.4 sind die beiden möglichen Folientypen für VIPs in ihren Eigenschaften beschrieben. Hinsichtlich der Gasdichtheit und der Permeationsrate sind die Aluminium-Verbundfolien deutlich günstiger zu bewerten als die metallisierten Hochbarrierelamine. Abschätzungen aus dem Druckanstieg in Paneelen lassen vermuten, dass die Durchlässigkeit hinsichtlich Wasserdampf in der Größenordnung  $10^{-4}$  g/(m<sup>2</sup>·d) liegt. Diese ist derzeit mit den vorhandenen Messmethoden nicht genau bestimmbar. Aus der Abschätzung der Permeationsrate für solche Folien lässt sich ableiten, dass diese sehr gut geeignet wären um damit hinsichtlich Druckanstieg empfindlich reagierende VIPs mit Faserfüllung einzupacken.

Die Dicke der Aluminiumschicht ist jedoch im Bereich von 6 bis 12 Mikrometern und somit um den Faktor 30 bis 130 dicker als bei den metallisierten Hochbarrierelaminen. Die nachfolgende untersuchte Folie 8 ist eine Aluminium-Verbundfolie mit 9 Mikrometern Aluminium, eingebettet in 90 Mikrometern Kunststoff. Zum Vergleich sind in Abbildung 40 die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten einer metallisierten Folie dargestellt, deren Dicke der Barrierschicht sich um den Faktor 100 von der der Verbundfolie unterscheidet. Untersucht wurden beide Randausbildungen mit der 9 µm-Aluminium-Verbundfolie und der metallisierten Folie.

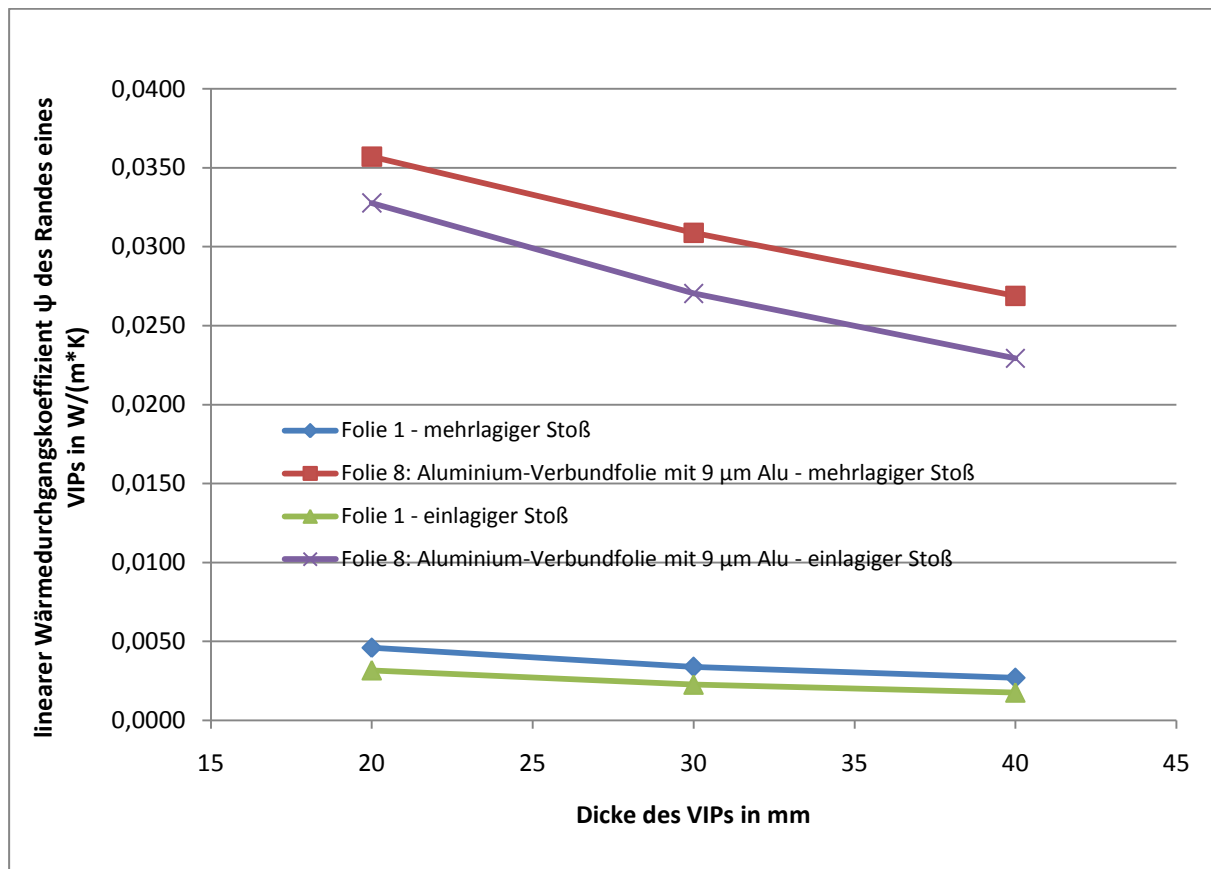


Abbildung 40: Vergleich der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für die einlagige und mehrlagige Randausbildung für Folie 1 (metallisiert) und Folie 8 (Aluminium-Verbundfolie) bei VIPs der Dicke 20 mm bis 40 mm

Für ein VIP der Dicke 20 mm liegen die Wärmebrückeneffekte der Verbundfolie um den Faktor 8 (mehrlagiger Rand) bis 9 (einlagiger Rand) über denen der metallisierten Folie. Für ein 40 mm dickes VIP sind die Wärmebrückeneffekte der Verbundfolie sogar um den Faktor 10 (mehrlagig) bis 13 (einlagig) größer als bei der metallisierten Folie. Die Ergebnisse für die Aluminium-Verbundfolie liegen etwas niedriger als die von A. Binz et.al. im Rahmen des HiPTI-Projekts ermittelten  $\psi$ -Werte [19]. Die Unterschiede lassen sich durch die hier etwas höher angesetzte äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials (hier 0,005 W/(m·K) zu 0,004 W/(m·K) bei A. Binz et.al. [19]), die exakte Abbildung aller Folienschichten und die etwas niedriger angesetzte Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums (hier 160 W/(m·K) zu 200 W/(m·K) bei A. Binz et.al. [19]) erklären.

Die Untersuchung des Einflusses der Rand-Wärmebrücke auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Paneele für unterschiedliche Paneelabmessungen ist in Abbildung 41 dargestellt. Die aufgetragenen Kurven reichen von sehr großen Paneelen (3,0 m x 1,25 m mit einem U/A-Verhältnis von 2,3) bis zu sehr kleinen Paneelen (0,3 m x 0,2 m mit einem U/A-Verhältnis von 16,7). Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Paneele mit metallisierter Folie 1 ändert sich höchstens um 0,002 W/(m·K). Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Paneele mit Folie 8 ändert sich von ca. 0,007 W/(m·K) auf 0,023 W/(m·K). Die Wärmebrückenwirkung ist so groß, dass sich für Paneele in Aluminium-Verbundfolie - bei Berücksichtigung der Randeffekte die für Vakuum-Dämmsysteme - die bekannten guten Wärmeleitfähigkeiten nur für sehr große Paneele darstellen lassen. Zudem kann für metallisierte Folien die äquivalente Wärmeleitfähigkeit annähernd unabhängig von der VIP-Dicke angegeben werden, da sich die Wärmeleitfähigkeit für die beiden betrachteten Dicken nur unwesentlich unterscheidet. Bei Verbundfolien müsste für eine Einstufung in Wärmeleitfähigkeitsklassen nach der Dicke der Paneele unterschieden werden.

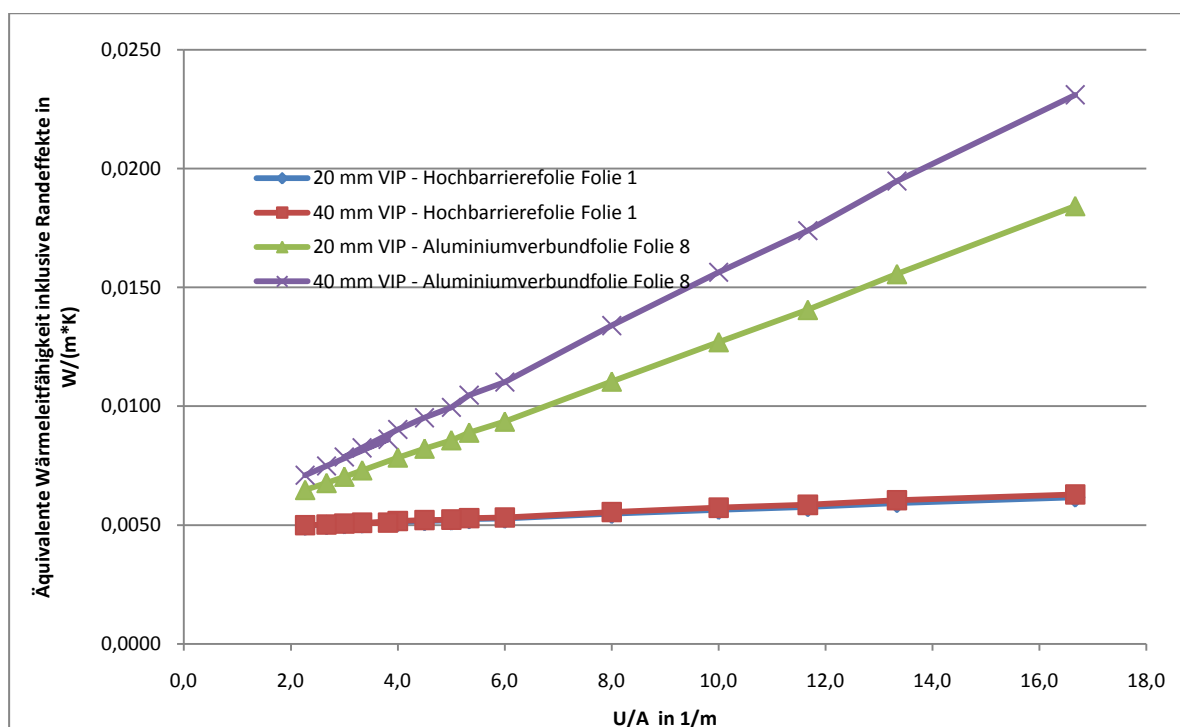


Abbildung 41: Auswirkungen der Rand-Wärmebrücke auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Paneele bei unterschiedlichen Paneelgrößen - aufgetragen über dem Quotienten Umfang/Fläche (U/A)

#### 4.7 Folgerungen für dieses Projekt

Aus der theoretischen Betrachtung der Thematik der Wärmebrücken am Rand ergibt sich die allgemeine Forderung für Vakuumpaneele, die einzelnen Paneele so groß wie möglich zu machen, um den Einfluss der Ränder zu begrenzen. Selbstredend sinnvoll ist es natürlich dann auch, die jeweils kürzeren Kanten in der ungünstigeren Randausbildung auszuführen. Die  $\psi$ -Werte der Wärmebrücken am Rand werden mit zunehmender Dicke der Paneele zwar betragsmäßig kleiner, ihre Wärmebrückenwirkung wird jedoch im Verhältnis größer, je besser die Dämmwirkung der Paneele wird. Um ein wärmetechnisch optimiertes VIP herzustellen, müssen die folgenden Punkte hinsichtlich der Größe und der Beschaffenheit der VIPs und der Folie beachtet werden:

1. Möglichst große Paneele herstellen
2. Möglichst nur die kürzeren Kanten mit der ungünstigeren Randausbildung herstellen (mehrlagiger Stoß)
3. Möglichst Folien mit dünnen Aluminiumschichten verwenden
4. Sonstige Schichten der Folien (Kunststoffe) möglichst dünn
5. Die Folie muss eine sehr niedrige Permeation aufweisen
6. Möglichst auf andere Barrierematerialien wechseln (Edelstahl;  $\text{SiO}_2$ )
7. Nur mehrlagige metallisierte Folien verwenden (Hochbarrirelamine)
8. Verbundfolien mit Aluminium als Barrierematerial haben einen viel zu hohen Einfluss auf die Rand-Wärmebrücken, so dass sie hinsichtlich der Wärmebrückenwirkung nicht geeignet sind für die Produktion von VIPs mit niedrigen äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten
9. Keine oder möglichst kleine Spalte zwischen den Platten anordnen
10. Wenn Spalte zwischen VIPs nicht vermeidbar sind, diese mit Dämmstoff füllen
11. Zusätzliche Deckschichten aus Dämmstoffen zum Schutz der VIPs und zur Reduzierung der Wärmebrückenwirkung des Randes verwenden
12. Sehr passgenaue und rechtwinklige Paneele herstellen, um Luftschlitze und Spalte zu vermeiden

Zusammen mit den Hinweisen zu den Stützkernen aus Abschnitt 2.1.3 ergeben sich klare Randbedingungen für die Produktion hochwertiger Vakuum-Paneele. Die für die Probekörper und Prototypen ausgewählten Folien und Herstellungsparameter sind im anschließenden Abschnitt beschrieben.

## 5 Prototypen und Probekörper – Entwicklung und Ergebnisse

### 5.1 Vorversuche und erste Prototypen

#### 5.1.1 Zielsetzung

Primäres Ziel ist die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von VIP durch Kostenreduktion beim Kernmaterial. Die bisher verwendete pyrogene Kieselsäure soll vollständig oder teilweise durch alternative Kernmaterialien (insbesondere auf Faser- oder EPS-Basis) ersetzt werden. Darüber hinaus soll eine Hüllfolie gefunden werden, die den Einsatz dieses Kernmaterials über lange Zeiträume ermöglicht.

#### 5.1.2 Folien

Variotec stellte für die Versuche 2 verschiedene Folien (im Folgenden Folie A, B) zur Verfügung, wobei von Folie B eine höhere Dichtigkeit erwartet wird.

#### 5.1.3 Kernmaterial

##### a) Rigips:

Die Fa. Rigips stellte verschiedene Materialien auf EPS-Basis als Kernmaterial zur Verfügung. Diese wurden bei der Firma variotec evakuiert. Allerdings waren diese Materialien nicht ausreichend offenporig, so dass für das EPS-Material kein Vakuum-Effekt erzielt werden konnte.

##### b) Isover:

Die Fa. Isover entwickelte spezielle Kernmaterialien auf Faserbasis. Diese besitzen eine hohe Rohdichte, um die Formstabilität bei der Evakuierung zu gewährleisten. Darüber hinaus enthalten sie kein organisches Bindemittel, um ein Ausgasen desselben unter Vakuum – und den damit verbundenen Anstieg des Innendrucks im Panel – zu verhindern. In dieser Voruntersuchungsphase des Projekts kamen zwei Faserkerne (im Folgenden Kern 1 und 2) zum Einsatz, die sich im Herstellungsprozess unterscheiden.

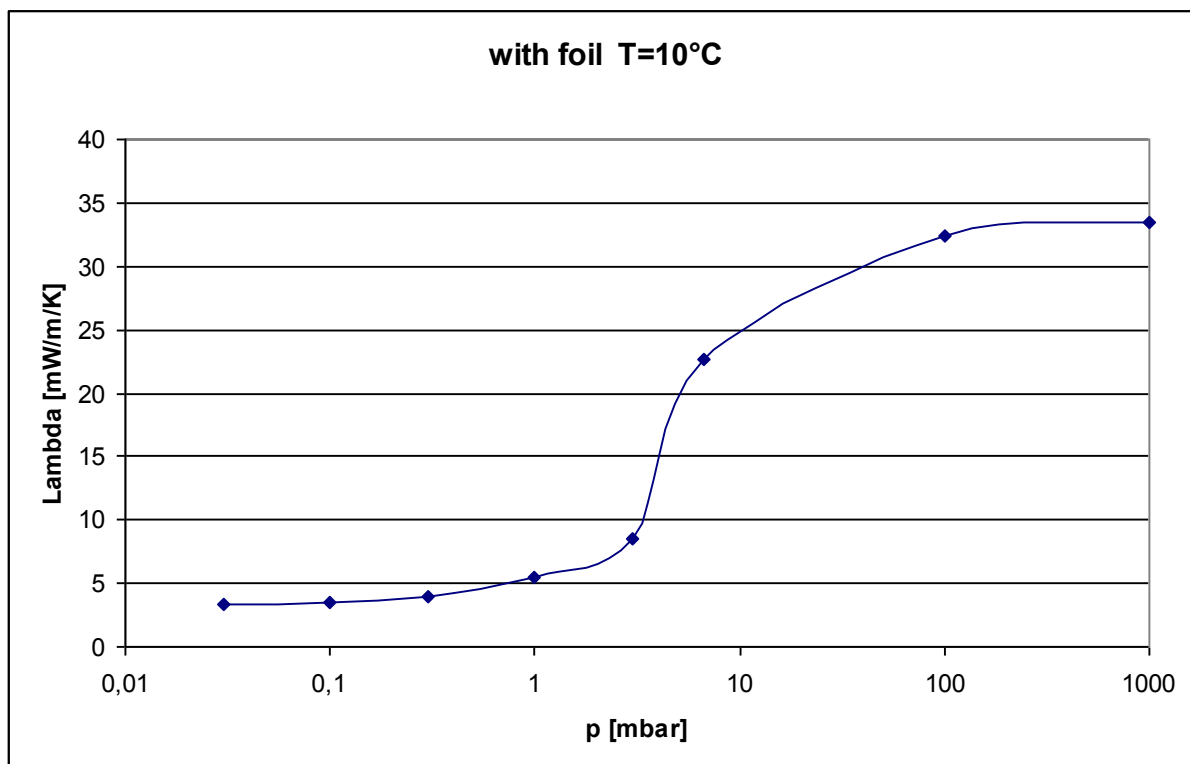
#### 5.1.4 Prototypenversuche

a) Kern 1 + Folie A:  $p = 0,3$  mbar, Panelgröße: 400 mm \* 400 mm \* 30 mm

Im Mittel ergab sich eine Wärmeleitfähigkeit von 3,5 mW/m/K also ein günstigerer Wert als bei pyrogener Kieselsäure. Allerdings zeigte sich bereits nach 4 Monaten Lagerung im Laborklima (ohne Temperaturwechselbeanspruchung oder Lagerung bei Temperaturerhöhung) ein starker Anstieg der Wärmeleitfähigkeit der Paneele.

b) Kern 1 + Folie A:  $p$  variabel, Panelgröße: 400 mm \* 400 mm \* 30 mm

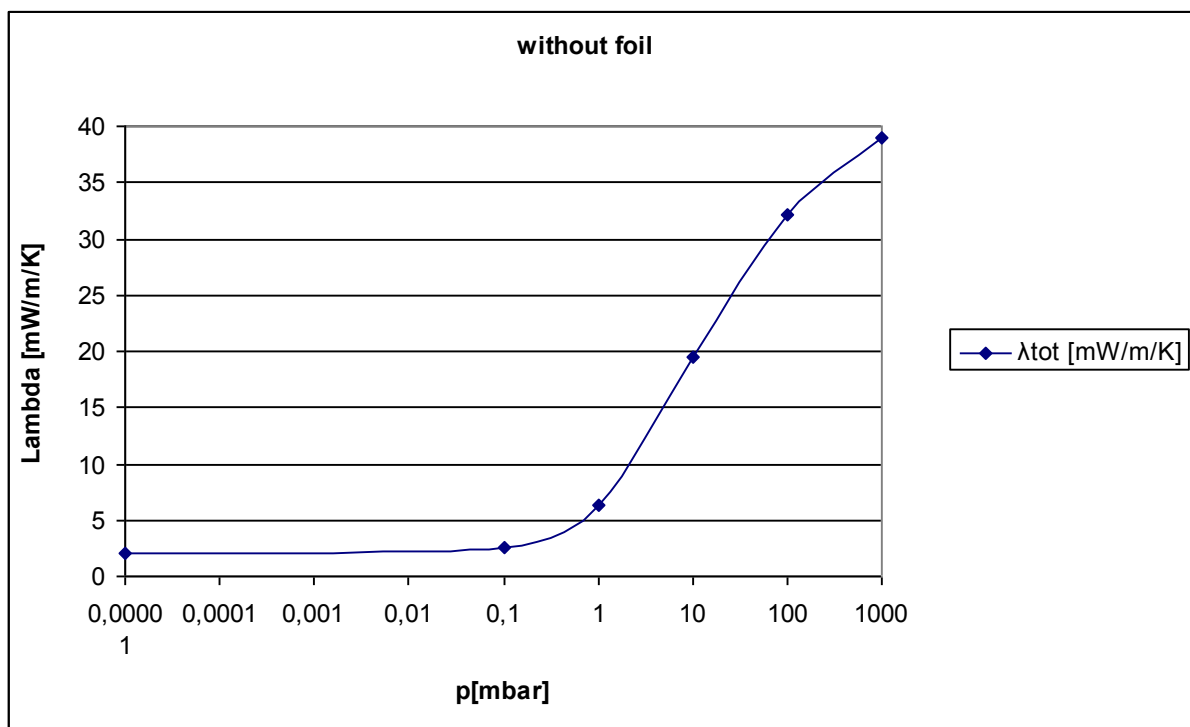
In einem nächsten Schritt wurde die Wärmeleitfähigkeit des Materials als Funktion des Innendrucks aufgenommen:



Die Kurve zeigt einen starken Anstieg oberhalb von 1 mbar. Für die in a) verwendeten Paneele der Größe 400 mm \* 400 mm \* 30 mm und Folie A erwartet man einen Anstieg des Innendrucks von  $\sim 2$  mbar/a, was den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit in a) erklärt.

c) Kern 1: p variabel: direkte Messung (ohne Folie) am ZAE

Am ZAE Bayern wurde dasselbe Kernmaterial wie in b) aber ohne Einfluss der Hüllfolie bestimmt. Hierzu wurde die Apparatur Lola 2 – ein evakuierbares Plattengerät – beim ZAE Bayern in Würzburg benutzt.

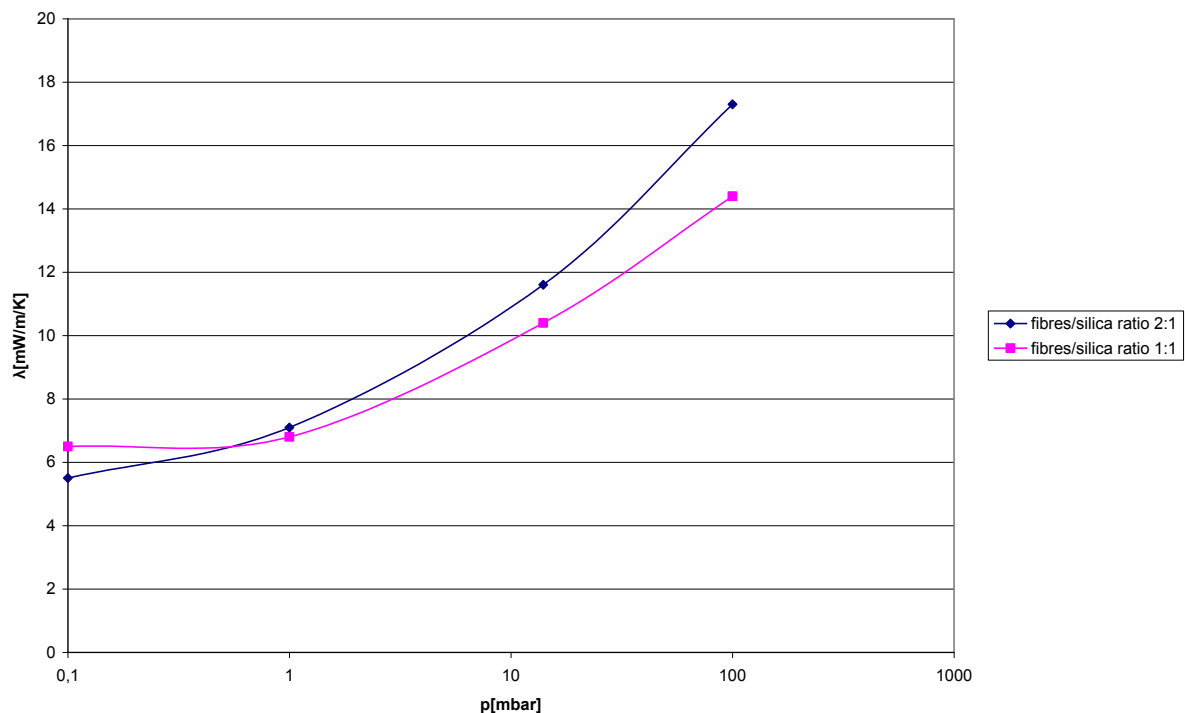


Die Kurve zeigt das gleiche Verhalten wie in b), nur das die Werte im flachen Bereich der Kurve ( $p < 0,1$  mbar) noch etwas niedriger sind. Dies ist auf die Wärmebrücke der Hüllfolie in b) zurückzuführen.

Darüber hinaus ist die Kurve nahezu identisch mit der erwarteten Kurve für Fasermaterial aufgetragen über dem Luftdruck (siehe z.B. [http://www.vip-bau.de/pdf/3\\_vip-bau/beitraege/heinemann.pdf](http://www.vip-bau.de/pdf/3_vip-bau/beitraege/heinemann.pdf) Seite 14).

d) Kombinationen (Kieselsäure/Kern 1; Folie A; p variabel, Panelgröße: 400 mm \* 400 mm \* 30 mm)

Es wurden zwei verschiedene Varianten gemessen:



Der Wärmeleitfähigkeitsanstieg mit steigendem Innendruck verlangsamte sich jeweils gegenüber der Kurve in b) oder c)

e) Kombinationen (Kieselsäure/Kern 2; Folie A/B; p variabel, Panelgröße: 400 mm \* 400 mm \* 30 mm)

| Dicke Kern 2<br>in mm | Dicke Kieselsäure<br>in mm | Folientyp | $\lambda_{10}$<br>in mW/(m·K) |
|-----------------------|----------------------------|-----------|-------------------------------|
| 30                    | 0                          | A         | 15,3 (3,5)                    |
| 30                    | 0                          | B         | 15,8 ± 2,7                    |
| 20                    | 10                         | A         | 9,6 (5,5)                     |
| 20                    | 10                         | B         | 9,6 ± 0,8                     |
| 15                    | 15                         | A         | 10,7 (6,5)                    |
| 15                    | 15                         | B         | 7,8 ± 0,6                     |
| 10                    | 20                         | A         | 5,7                           |
| 10                    | 20                         | B         | 6,3 ± 0,1                     |

Tabelle 8: Ergebnisse der kombinierten Kerne der Vorversuche

Die entsprechenden Ergebnisse aus c) sind *kursiv* in Klammern gegeben. Kern 2 zeigt schlechtere Ergebnisse als Kern 1. Die sehr vielversprechenden Ergebnisse aus den ersten Untersuchungen können hier nicht wieder erreicht werden. Die Er-

gebnisse aus d) zeigen einen starken Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Wärmeleitfähigkeit des Fasermaterials (Kern 2 deutlich schlechter als Kern 1).

#### 5.1.5 Folgerungen

In einem nächsten Schritt soll das Herstellungsverfahren daher weiter variiert werden, um die optimalen Parameter festzulegen. Somit können eventuell sogar noch bessere Werte als für Kern 1 erreicht werden.

Danach sollen Paneele aus dem besten Fasermaterial und Kombinationen desselben mit Kieselsäure sowie Hülle B hergestellt und einem Alterungstest unterzogen werden.

### 5.2 Probekörper erste Charge

#### 5.2.1 Zielsetzung

Ein wichtiger Bestandteil des gemeinsamen Forschungsprojekts der energetischen und wirtschaftlichen Optimierung von VIP sind die Untersuchungen an den Paneelen, vor allem die Alterungsuntersuchungen. Geplant ist ein Vergleich der bisher für die Beantragung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung durchzuführenden Alterung (Temperaturwechselbeanspruchung und anschließende Lagerung bei 80°C für drei bzw. sechs Monate) mit Alterungsmethoden unter Berücksichtigung eines hohen Wasserdampfdrucks (z.B. 60 °C/90% RH). Hierfür ist es jedoch unbedingt notwendig, die vielversprechenden Ergebnisse der ersten Vorversuche sicher wiederholen zu können. Zur besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Ergebnisse untereinander und zur Erhöhung der Genauigkeit der Untersuchungen werden die Messungen an den jeweiligen Paneelen im selben Gerät durchgeführt.

#### 5.2.2 Hinweise zur Auswahl der Materialien für die Probekörper

Die in den theoretischen Abschnitten dieses Forschungsberichts herausgearbeiteten Parameter für die Paneele sollen weitgehend für die Prototypen angewendet werden. Aus verschiedenen Permeationsmessungen und Abschätzungen z.B. beim ZAE Bayern lässt sich ableiten, dass Faserstützkerne sehr wahrscheinlich nur mit Ultrabarrierefolien funktionieren werden – hier ist dann allerdings der Wärmebrü-

ckeneffekt des Randes deutlich stärker, und wie in Abschnitte 4.6 erläutert, führt das zu so großen äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten, dass kleinformartige Paneele nicht mehr sinnvoll produziert werden können.

Um den tatsächlichen Einfluss der Permeation auf die Wärmeleitfähigkeit von Vakuum-Paneele mit Faserfüllung zu messen, werden die besten Faserkerne mit der besten Folie kombiniert und einige Versuchspaneele produziert. Durch den Einsatz von hochdisperser Kieselsäure in Verbindung mit Faser-Stützkernen könnte bereits mit kommerziell erhältlichen Hochbarrierelaminaten die Herstellung von sinnvollen VIPs möglich sein. Für die Fasermaterialien werden Getter für die eingedrungene Feuchte benötigt, da sonst der Druckanstieg im VIP zu groß wird – möglicherweise kann bei Mischung der Kernmaterialien (in einer Hülle) darauf verzichtet werden. Die Verwendung von EPS wird für den weiteren Verlauf dieser Forschungsarbeit unter dem Aspekt der Schutzschichten für das evakuierte VIP betrachtet – als Stützkern ist EPS eher ungeeignet, weil es sich nur schwierig evakuieren lässt, wie die Vorversuche gezeigt haben.

### 5.2.3 Hinweise zu den Stützkernen

- Faser ohne ausgasendes Bindemittel verwenden
- Fasern dünn, flexibel, gleichmäßig, nicht gerichtet
- IR-Trübungsmittel einbauen – Menge und Art abhängig von der Rohdichte des Faserkerns
- Kerne dürfen sich nur wenig zusammendrücken lassen, gute Maßhaltigkeit der Kerne bei der Evakuierung notwendig
- Anpassung der Rohdichte – möglichst gering wg. Gerüstwärmeleitung und Evakuierbarkeit – doch ausreichende Formstabilität wg. des Atmosphärendrucks
- Denkbar sind Mischungen aus pyrogener Kieselsäure und Faser – mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen – dadurch teilweiser Ersatz der teuren HDK durch Glasfasern (ideal wäre eine Mischung, aber produktionstechnisch schwierig; weswegen eine Schichtung vorgesehen wird)
- Hoher Glasfaseranteil – Getter für Wasserdampf notwendig um einen zu schnellen Anstieg des Innendrucks zu verhindern

#### 5.2.4 Folien

- Hochbarrierelamine oder Ultrabarrierelamine (z.Zt. nur als Al-Verbundfolien erhältlich) – es werden aus o.g. Gründen nur metallisierte Folien verwendet.
- Der Anspruch des Stützkerns an das Vakuum bestimmt die zulässige Permeation und somit die Art der Folie – die Vorauswahl der metallisierten Folien erfolgt über die Auswertung bekannter Messreihen zu Wärmeleitfähigkeit und Permeation.
- Der Einsatz von gemischten Systemen (nicht gemischten Kernen) soll überprüft werden – große Paneele mit Fasern und Verbundfolie – kleine Paneele mit Kieselsäure und Hochbarrierelaminaten.

5.2.5 Untersuchungen zur Verbesserung der Produktionsparameter der Faserkerne  
Parallel zu den Untersuchungen an den ersten Versuchspaneele wurde an der Verbesserung der Faserkerne gearbeitet und einige Herstellparameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Wärmeleitfähigkeit der Paneele untersucht.

Die Ergebnisse aus 5.1.4.d) zeigen einen signifikanten Einfluss der Verpresstemperatur auf die Wärmeleitfähigkeit des Fasermaterials (Kern 2 deutlich schlechter als Kern 1). In einem nächsten Schritt sollte daher der Einfluss dieser Verpresstemperatur weiter untersucht werden, um seinen optimalen Wert zu bestimmen. Dazu wurden 15 Paneele (A-O) mit aufsteigender Verpresstemperatur hergestellt. Es wurden die folgenden Ergebnisse erhalten:

| Paneel           | $\lambda_{10}$ |
|------------------|----------------|
|                  | mW/(m·K)       |
| A                | 5,5            |
| B                | 33,9           |
| C                | 6,4            |
| D                | 6,4            |
| E                | 6,4            |
| F                | 6,2            |
| G                | 7,0            |
| H                | 6,8            |
| I (Kern 1 in 1.) | 6,4            |
| J                | 26,2           |
| K                | 7,3            |
| L                | 6,7            |
| M                | 7,5            |
| N                | 5,6            |
| O(Kern 2 in1.)   | 7,9            |

Tabelle 9: Ergebnisse der Variationsversuche

Neben der hohen Werte für die Paneele B und J, die wohl auf Belüftung zurückzuführen waren, lässt sich keine klare Korrelation zwischen der Variation der Verpresstemperatur und der Wärmeleitfähigkeit der Paneele erkennen. Darüber hinaus liegen alle Werte höher als die  $\sim 3,5$  mW/m/K aus den ersten Versuchen.



Abbildung 42: Faserkern

Ausgehend von diesen ungünstigen Ergebnissen wurde die Messung aus 5.1.4.b) mit neue hergestellten Elementen (allerdings mit Hüllfolie B, da Hüllfolie A kommerziell nicht mehr verfügbar war) wiederholt. Es wurden folgende Ergebnisse erhalten:

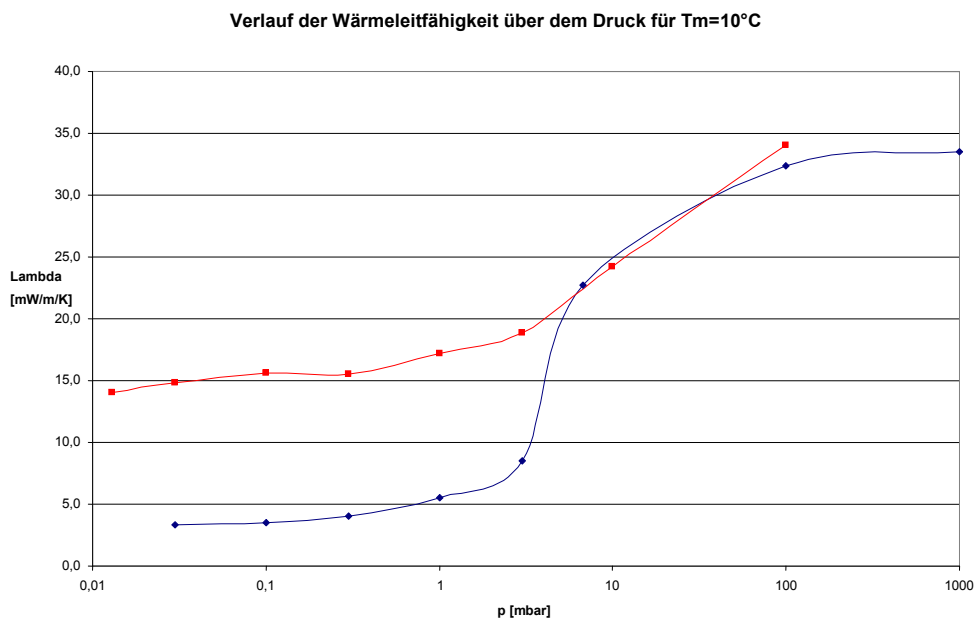


Abbildung 43: Messung der Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Innendrücken

Die neuen Ergebnisse (rot) liegen deutlich über den alten Ergebnissen aus 5.1.4.b) (blau). Diese Tatsache deutet auf gegenüber dem Nennwert (x-Achse) um 3 mbar erhöhten Innendruck im Paneel hin.

In der Analyse dieser Ergebnisse wurden 2 mögliche Ursachen identifiziert. Zum Einen könnte der Druckanstieg einer nicht ausreichenden Trocknung des Kernmaterials und einem damit zusammenhängenden Ausgasen von Wasserdampf geschuldet sein. Zum Anderen könnte die Zeit zwischen dem Erreichen des Zieldrucks in der Vakuumkammer und dem Verschweißen der Paneele zu kurz gewählt sein, so dass der Zieldruck im Paneel nicht erreicht werden konnte.

Zur Überprüfung dieser Hypothesen wurden insgesamt 8 Platten hergestellt. 4 davon wurden vor Evakuierung gar nicht, die verbleibenden 4 Platten 1h bei 100 °C getrocknet. Die Zeit zwischen Erreichen des Zieldrucks und Verschweißen der Folie wurde einmal bei je 2 getrockneten und 2 nicht getrockneten Platten auf 10 Sekunden eingestellt und bei den restlichen Platten auf 60 Sekunden. Folgende Ergebnisse wurden erhalten.

Die getrockneten Platten schnitten in Schnitt etwas besser ab, allerdings konnten die Werte aus den ersten Vorversuchen in keiner der Varianten wieder erreicht werden. Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die guten Ergebnisse aus dem Zwischenbericht nicht mehr reproduziert werden konnten. Mehrere mögliche Ursachen hierfür wurden bereits untersucht, ohne bislang jedoch zu einem schlüssigen Ergebnis zu kommen.

| Bezeichnung |                                                                      | Abmessungen | Einbaudicke | Wärmeleitfähigkeit<br>$\lambda_{10}$ |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|--------------------------------------|
| -           |                                                                      | mm x mm     | mm          | mW/(m·K)                             |
| Platte 1    | 1h Trocknung; Max. Zeit zwischen Enddruck und Verschweißen (60 Sek.) | 500 x 500   | 17,0        | <b>8,9</b>                           |
| Platte 2    |                                                                      | 500 x 500   | 17,0        | <b>10,5</b>                          |
| Platte 3    | 1h Trocknung; Standardzeit (10 Sek)                                  | 500 x 500   | 17,5        | <b>10,7</b>                          |
| Platte 4    |                                                                      | 500 x 500   | 17,5        | <b>10,9</b>                          |
| Platte 5    | keine Trocknung; 60 Sek.                                             | 500 x 500   | 17,0        | <b>13,4</b>                          |
| Platte 6    |                                                                      | 500 x 500   | 17,0        | <b>13,9</b>                          |
| Platte 7    | keine Trocknung; 10 Sek.                                             | 500 x 500   | 17,0        | <b>9,6</b>                           |
| Platte 8    |                                                                      | 500 x 500   | 17,0        | <b>13,5</b>                          |

Tabelle 10: Ergebnisse der Versuche zur Trocknung und Evakuierzeit

### 5.2.6 Folgerungen für neue Versuchspaneele

Für weitere Versuchspaneele (Herstelldatum 11.12.2009) werden neue Faserkerne hergestellt. Die im Vorfeld besprochenen Produktionsparameter sind in Stichpunkten nachfolgend dargestellt:

- Sicherstellung der Bindemittelfreiheit – aus dem Produktionsprozess
- Anpassung der Rohdichte der Faserkerne
- Untersuchung anderer Fasermaterialien und Fasergeometrien – (Kern 1; Kern 3; Kern 4)
- Sicherstellung einer nicht vorhandenen Ausrichtung der Fasern aus dem Produktionsprozess – lose Wolle

- Erhöhung der Trocknungsdauer – jetzt ca. 3 Stunden
- Erhöhung der Trocknungstemperatur – ca. 100° bis 120°
- Sicherstellung des Schutzes der Faserkerne zwischen Trocknung und dem Eintüten

### 5.3 Probekörper zweite Charge

Hergestellt werden weitere Probekörper mit unterschiedlichen Fasermaterialien als Füllung. Nachfolgend sind die Eigenschaften dieser Probekörper tabellarisch dargestellt. Bei den beiden Kernmaterialien aus Glaswolle wurde im Produktionsprozess das Bindemittel komplett weggelassen und die Fasern mit Wasser besprüht.

| Bezeichnung | Folie   | Abmessung  | Dicke | Evakuierdruck |
|-------------|---------|------------|-------|---------------|
|             |         | in mm x mm | in mm | in mbar       |
| Kern 1      | Folie 1 | 500 x 500  | 20    | 0,085         |
| Kern 3      | Folie 1 | 500 x 500  | 20    | 0,085         |
| Kern 4      | Folie 1 | 500 x 500  | 20    | 0,085         |

Tabelle 11: Eigenschaften der Probekörper der zweiten Charge

#### 5.3.1 Durchgeführte Untersuchungen

- Messung der Wärmeleitfähigkeit im Anlieferungszustand (Frischwert)
- Klimawechselprüfung 8 Tage Wechselklima -15°C ↔ +80°C
- 4 Wochen Temperaturlagerung bei 80°C
- Erneute Messung der Wärmeleitfähigkeit (Alterung 1)
- 4 Wochen Temperaturlagerung bei 80°C
- Erneute Messung der Wärmeleitfähigkeit (Alterung 2)
- 4 Wochen Temperaturlagerung bei 80°C
- Erneute Messung der Wärmeleitfähigkeit (Alterung 3)

### 5.3.2 Messergebnisse der Probekörper der zweiten Charge

Nachfolgend sind die Ergebnisse der im Dezember 2009 evakuierten Platten tabellarisch dargestellt:

| Plattenpaar | Frischwert der Wärmeleitfähigkeit | Alterung 1 | Alterung 2 | Alterung 3 |
|-------------|-----------------------------------|------------|------------|------------|
| -           | in W/(m·K)                        | in W/(m·K) | in W/(m·K) | in W/(m·K) |
| Kern 1      | 0,0067                            | 0,0216     | 0,0257     | 0,0274     |
| Kern 3      | 0,0061                            | 0,0189     | 0,0224     | 0,0249     |
| Kern 4      | 0,0062                            | 0,0204     | 0,0233     | 0,0257     |

Tabelle 12: Ergebnisse der Probekörper der zweiten Charge

Die Messwerte der frisch evakuierten Paneele mit Glasfaserfüllung liegen für die beiden Plattenpaare 3 und 4 nah beieinander. Die Messwerte sind mit 0,0061 und 0,0062 W/(m·K) wiederum deutlich höher als die bei den Prototypen gemessenen Ausgangswerte. Das Plattenpaar 1 zeigt mit 0,0067 W/(m·K) einen Ausgangswert, der etwas über den Werten der mit Glasfasern gefüllten Paneele liegt.

Nach der Klimawechselprüfung und anschließender Lagerung bei 80°C für 4 Wochen zeigt sich bei allen Paneelpaaren ein deutlicher Anstieg der Wärmeleitfähigkeit. Dieser Anstieg geht bei den Messungen nach weiteren 4 bzw. 8 Wochen Temperaturlagerung annähernd linear weiter. Bereits nach der Temperaturwechselbeanspruchung und der ersten Lagerung bei 80° für 4 Wochen befinden sich die Vakuum-Paneele im schnell ansteigenden Bereich der Wärmeleitfähigkeits-Kurven (s.a. Abbildung 4).

Die „Alterung 3“ ist direkt mit der ersten Alterungsstufe des Zulassungsverfahrens vergleichbar (90 Tage – Wert). Da für die Folie 1 unter Zulassungsbedingungen ermittelte Werte vorliegen, können die dort ermittelten Werte zur Orientierung verwendet werden.

### 5.3.3 Ergebnisse der Platten aus dem Zulassungsverfahren mit Folie 1

| Plattenpaar | Frischwert der Wärmeleitfähigkeit |  |  | Erste Alterungsstufe Zulassungsverfahren (90 Tage) |
|-------------|-----------------------------------|--|--|----------------------------------------------------|
| -           | in W/(m·K)                        |  |  | in W/(m·K)                                         |
| 1           | 0,0035                            |  |  | 0,0045                                             |
| 2           | 0,0036                            |  |  | 0,0045                                             |
| 3           | 0,0037                            |  |  | 0,0046                                             |

Tabelle 13: Ergebnisse für Kieselsäure gefüllte VIPs mit Folie 1 im Zulassungsverfahren

Durch eine Überprüfung der Messwerte mittels Ablesung an den Kurven für verschiedene Kernmaterialien (Abbildung 4), kann die Größenordnung des Innendrucks indirekt abgeschätzt werden. Genauer ist die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit aus den bekannten Zusammenhängen für die Wärmeleitung in Gas und Feststoff, sowie der Wärmestrahlung. Hierfür sind jedoch sehr viele Materialparameter notwendig, die für die Versuchspaneele und die Vergleichspaneele aus dem Zulassungsverfahren nicht bekannt sind. In erster Näherung reicht die Abschätzung aus den Wärmeleitfähigkeits-Kurven um eine Aussage über den Zustand der Paneele nach der Alterung zu bekommen.

### 5.3.4 Analyse der Messwerte zur Wärmeleitfähigkeit

Durch Rückwärtsablesung an der Kurve für „fumed silica“ bei 0,0045 W/(m·K) in Abbildung 4 kann der Innendruck im Paneel auf ca. 25 bis 30 mbar abgeschätzt werden. Mit diesem Innendruck erhält man aus der „glass fibres“ Kurve eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,025 bis 0,028 W/(m·K). In diesem Bereich liegen alle Messwerte der fasergefüllten Paneele der zweiten Charge des Forschungsvorhabens für die Spalte „Alterung 3“.

Die Rückwärtsablesung für die fasergefüllten Paneele ergibt:

- für den Frischwert einen Innendruck von ca. 1 mbar
- für „Alterung 1“ ca. 10 mbar
- für „Alterung 2“ ca. 18 bis 22 mbar
- für „Alterung 3“ ca. 25 bis 30 mbar

In der Literatur finden sich Werte für den mittleren Porendurchmesser von Mineralfasern von ca. 20 bis 200  $\mu\text{m}$ . Dafür muss der Innendruck deutlich unter 0,1 mbar sein, um die Gaswärmeleitung zu unterdrücken.

### 5.3.5 Beurteilung

Der Innendruck aus der Evakuierung (lt. Aufzeichnungen ca. 0,085 mbar) müsste für einen Frischwert der Wärmeleitfähigkeit deutlich unter den gemessenen Werten ausreichen. Aus der Lambda-Messung lässt sich rückwärts auf einen Innendruck von etwa 1 mbar schließen. Geringe Druckanstiege in den ersten Tagen werden für viele Paneele beobachtet. Der Druckanstieg durch das Alterungsverfahren passt in der Größenordnung zu den Werten, die sich für vergleichbare Folien aus den Zulassungsprüfungen ermitteln lassen. Eine Art „schleichende Belüftung“ scheint also ausgeschlossen. Die Messwerte  $\lambda$  für die fasergefüllten VIPs liegen allesamt im eingegrenzten Innendruckbereich, d.h. die Umhüllung ist nicht schlechter geworden und es gibt wahrscheinlich keine „schleichende Belüftung“. Diese Annahme wird durch die mehrmalige Messung mit gleichmäßiger Zunahme des Innendrucks gestützt. Wenn mit einem Druckanstieg in der oben dargestellten Größenordnung gerechnet werden muss, dann kann nur pyrogene Kieselsäure als Stützkernmaterial eingesetzt werden, wenn es nicht gelingt, die Permeationsrate der Folien zu verringern.

### 5.3.6 Folgerungen und Fragestellungen für neue Probekörper

- Entspricht der an der Evakuierpresse gemessene Druck dem im Paneel? – nach Angabe des Herstellers der Evakuierpresse ist davon bei dünnen Faserstützkernen auszugehen.
- Ist die Evakuierzeit für die Druckverteilung im Paneel ausreichend? – Bei sehr offenen Stützkernen ist hier keine nennenswerte Verzögerung festzustellen, die Restgas-Verteilung ist hier im Paneel und in der Presskammer gleich.
- Könnte der angezeigte Druck ein Messfehler sein? – Kontrolle und Wartung der Evakuierpresse durch variotec und den Hersteller.
- Der Druckanstieg ist für „fumed silica“ tolerabel, aber für eine Füllung mit Fasern viel zu hoch – Kann die ursprüngliche Idee „VIP im VIP“ hier vielleicht etwas Druck von der Hülle der Faserfüllung nehmen? – Die Produktion solcher

Paneele wird zurückgestellt bis die primären Probleme bei der Produktion der fasergefüllten Paneele ausgeräumt sind.

Welche Erklärungen und Gründe für diesen deutlichen Druckanstieg bleiben übrig?

- Kerne nicht ausreichend ausgeheizt → höhere Temperatur für die Trocknung wählen.
- Permeation der Folie zu hoch → noch eine weitere Folie im Vergleich untersuchen.
- Technisches Problem mit der Evakuierpresse → Rücksprache mit Hersteller und Überprüfung der Technik

## 5.4 Telefonkonferenz

Bei einer Telefonkonferenz wurden die offenen Fragen aus der Herstellung besprochen. Daran nahm auch ein Vertreter eines Vakuum-Pressenherstellers teil.

### 5.4.1 Genauigkeit der Druckmessung

Durch verschmutzte Drucksensoren (Thermosack-Messsystem mit Heizdraht Verfahren – indirekte Druckmessung) kann der angezeigte Wert an der Evakuierpresse höchstens höher als der tatsächliche Innendruck sein, keinesfalls niedriger. Mögliche Unterschiede können durch Verschmutzung des Heizdrahtes durch Kieselsäure bzw. Mineralwolle-Partikel zustande kommen. Eine fehlerhafte Druckmessung scheidet demnach als Fehlerquelle aus.

### 5.4.2 Druckverteilung im Paneel/ Evakuierzeit

Abhängig von der Größe der Paneele sollte eine Nachlaufzeit von 90 bis 120 s für VIPs großer Dicke mit Kieselsäurefüllung ausreichen. Für Faser-VIPs, die auf 0,1 mbar Innendruck evakuiert werden, reichen bereits 15 s Evakuierzeit aus. Auch bei einem Evakuierdruck von 0,01 mbar sollten 60 s ausreichen. Der Einfluss der „Brownschen Molekularbewegung“ ist damit jederzeit ausreichend berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde bei den Vorversuchen mit deutlich erhöhter Evakuierzeit auch kein Unterschied bei den Paneelen festgestellt. Merkliche Druckunterschiede im Paneel zur außenliegenden Messstelle können hiermit ausgeschlossen werden.

#### 5.4.3 Minimal möglicher Evakuierdruck:

Mit der vorhandenen Evakuierpresse kann höchstens bis auf 0,01 mbar evakuiert werden. Für weitere Versuche wird ein Vorhaltemaß unter dem angestrebten Innendruck von 0,1 mbar vereinbart. Der an der Maschine voreingestellte Innendruck für die Produktion der nächsten Paneele soll unter 0,05 mbar liegen, um die angestrebten 0,1 mbar sicher zu erreichen.

#### 5.4.4 Porengröße:

Der notwendige Evakuierdruck ist abhängig vom mittleren Porendurchmesser. In der Literatur finden sich hier Werte zwischen 20 und 200 µm für Mineralfasern. Für die nächsten Versuchskörper wird die Porenstruktur der verwendeten Faserkerne untersucht, um den Zielwert für den Innendruck genauer festzulegen.

#### 5.4.5 Trocknungstemperatur und Trocknungsdauer:

Für den angestrebten Innendruck von weniger als 0,1 mbar (mit Vorhaltemaß wird an der Maschine ein Druck von 0,05 mbar eingestellt), ist es ratsam, den Wassergehalt noch weiter zu verringern. Die Trocknungstemperatur wird für neue Probekörper auf 140°C erhöht und die Trocknungsdauer auf ca. 2 bis 3 h ausgedehnt.

### 5.5 Versuchspaneele dritte Charge

Die Abschätzung des mittleren Porendurchmessers für die untersuchten Faserkerne kann nach folgender Formel gemacht werden (nach der Abschätzung von Dr. Passon – St. Gobain Isover)

$$d_{pore} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\rho_{Glas}}{\rho_{Faserkern}} \cdot d_{Faser}$$

mit:

|                    |                                               |
|--------------------|-----------------------------------------------|
| $\rho_{Glas}$      | Rohdichte der Glasfasern in kg/m <sup>3</sup> |
| $\rho_{Faserkern}$ | Rohdichte des Faserkerns in kg/m <sup>3</sup> |
| $d_{Faser}$        | Durchmesser einer Faser in m                  |
| $d_{Pore}$         | Durchmesser einer Pore in m                   |

Bei Ansatz eines Dichteverhältnisses von etwa 10 und eines Faserdurchmessers von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  ergibt sich daraus eine mittlere Porengröße von etwa 30 bis 50  $\mu\text{m}$ . Aus Abbildung 2 lässt sich hieraus ein sicherer Schwellendruck von 0,1 mbar ablesen, der zur Unterdrückung der Luft-Wärmeleitung eingehalten werden muss. Als Zielwert für den Innendruck wird für neue Paneele 0,02 mbar festgelegt um ein ausreichend großes Vorhaltemaß unter 0,1 mbar zu haben. Dieser angestrebte Druck liegt noch unter dem bei der Telefonkonferenz diskutierten Innendruck von 0,05 mbar und hat somit ein noch größeres Vorhaltemaß hinsichtlich des Schwellendrucks von 0,1 mbar. Die Faserkerne wurden mindestens 3 h bei 140°C getrocknet.

#### 5.5.1 Eigenschaften der Probekörper der dritten Charge

| Bezeichnung | Folie   | Abmessung  | Dicke | Evakuierdruck |
|-------------|---------|------------|-------|---------------|
|             |         | in mm x mm | in mm | in mbar       |
| Kern 1      | Folie 1 | 500 x 500  | 20    | 0,019         |
| Kern 1      | Folie 3 | 500 x 500  | 20    | 0,019         |
| Kern 4      | Folie 1 | 500 x 500  | 20    | 0,019         |
| Kern 4      | Folie 3 | 500 x 500  | 20    | 0,019         |

Tabelle 14: Eigenschaften der Versuchspaneele der dritten Charge

#### 5.5.2 Durchgeführte Untersuchungen

- Messung der Wärmeleitfähigkeit im Anlieferungszustand (Frischwert)
- 6 Wochen Temperaturlagerung bei 80°C
- Erneute Messung der Wärmeleitfähigkeit (Alterung 1)

### 5.5.3 Messergebnisse der Probekörper der dritten Charge

Nachfolgend sind die Ergebnisse der im Juli 2010 evakuierten Platten tabellarisch dargestellt:

| Plattenpaar | Folie   | Frischwert der Wärmeleitfähigkeit | Alterung 1         |
|-------------|---------|-----------------------------------|--------------------|
| -           |         | in $W/(m \cdot K)$                | in $W/(m \cdot K)$ |
| Kern 1      | Folie 1 | 0,0136                            | 0,0193             |
| Kern 1      | Folie 3 | 0,0041                            | 0,0133             |
| Kern 4      | Folie 1 | 0,0226                            | 0,0250             |
| Kern 4      | Folie 3 | 0,0035                            | 0,0101             |

Tabelle 15: Messergebnisse Paneele der dritten Charge

### 5.5.4 Beurteilung

Die verwendete Produktionscharge der Folie 1 ist fehlerhaft und für die Umhüllung von Vakuum-Paneeelen nicht geeignet. Frühere Chargen hatten eine geringe Permeation – was auf eine einzelne fehlerhafte Produktionscharge und nicht auf ein generelles Problem hindeutet.

Die Frischwerte für die Paneele mit der Umhüllung aus Folie 3 zeigen zum ersten Mal seit den Vorversuchen wieder Werte der Wärmeleitfähigkeit von  $4 \text{ mW}/(m \cdot K)$  und darunter. Die Vorbehandlung der Paneele durch die höhere Trocknungstemperatur und den verringerten Evakuierdruck sind zum Erreichen niedriger Ausgangswerte der Wärmeleitfähigkeit geeignete Maßnahmen. Diese Vorbehandlung wird für die weiteren Versuchspaneele beibehalten.

Die Lagerung bei  $80^\circ\text{C}$  ist für empfindliche Paneele mit Faserfüllung auch schon ohne vorhergehende Klimawechselprüfung eine zu scharfe Lagerungsbedingung. Hier zeigt sich, dass die Folien bei Temperaturerhöhung ihre Permeationseigenschaften deutlich verändern. Der resultierende Druckanstieg ist für Faser-Stützkern zu groß. Der Bereich der Wärmeleitfähigkeitskurve mit der beginnenden Luft-Wärmeleitung ist erreicht. Als Folge für weitere Versuchspaneele wird nur eine Lagerung im Laborklima bei  $23^\circ$  und 50% r.F. vorgesehen. Die Lagerung bei erhöhter Temperatur kann

erst wieder durchgeführt werden, wenn die Eigenschaften der Paneele besser untersucht und stabil sind. Hier zeichnet sich bereits ab, dass das Ziel der Forschungsarbeit – die wärmetechnische und wirtschaftliche Optimierung von VIPs für Bauanwendungen – mit fasergefüllten VIPs ohne eine zweite Hülle wohl nicht erreicht werden kann.

## 5.6 Probekörper der vierten Charge

Für die vierte Produktionscharge werden mehrlagige Stützkerne hergestellt. In der Bezeichnung der Kerne bedeutet:

K = Kieselsäure

W = Kern 4

G = Kern 1

Es werden Stützkerne aus Kieselsäure zusammen mit Faserkernen in einer Hülle evakuiert sowie Stützkerne aus Fasermaterial in einer Hülle evakuiert, auf einer oder beiden Seiten mit Kieselsäurestützkern aufgedoppelt und in einer weiteren Umhüllung gemeinsam evakuiert. Die folgenden Paneele werden untersucht:

- 2 Platten der Nenndicke 40mm mit Beschriftung K + W + K (10mm Kieselsäure; 20mm Kern 4; 10mm Kieselsäure in einer gemeinsamen Umhüllung)
- 2 Platten der Nenndicke 40mm mit Beschriftung K + G + K (10mm Kieselsäure; 20mm Kern 1; 10mm Kieselsäure in einer gemeinsamen Umhüllung)
- 2 Platten der Nenndicke 40mm mit Beschriftung 20K + W (20mm Kieselsäure mit 20mm Kern 4 – die 20mm Kern 4 sind in einer Hülle und um beides zusammen ist noch einmal eine Hülle)
- 2 Platten der Nenndicke 40mm mit Beschriftung 20K + G (20mm Kieselsäure mit 20mm Kern 1 – die 20mm Kern 1 sind in einer Hülle und um beides zusammen ist noch einmal eine Hülle)
- 1 Platte der Dicke 20 mm mit Beschriftung G (20 mm Kern 1 - als Referenzprobe mit nur einer Umhüllung und ohne Kieselsäure und gleichzeitig die einzige Probe die nicht 40 mm dick ist)

- 1 Platte der Dicke 40 mm mit Beschriftung 20W + W (20mm Kern 4 mit 20mm Kern 4 – die einen 20mm Kern 4 sind nochmals in einer eigenen Hülle – alles zusammen in einer zweiten Hülle)
- 1 Platte der Dicke 40 mm mit Beschriftung 20G + G (20mm Kern 1 mit 20mm Kern 1 – die einen 20mm Kern 1 sind nochmals in einer eigenen Hülle – alles zusammen in einer zweiten Hülle)

Probekörper, von denen 2 Platten zur Verfügung stehen, werden mittels des Zweiplattengeräts gemessen, wenn es nur einen Probekörper gibt, wird dieser im Wärmestrommessplattengerät gemessen.

#### 5.6.1 Eigenschaften der Probekörper der vierten Charge

| Bezeichnung | Kernmaterial                                                                   | Folie   | Abmessung  | Dicke | Evakuierdruck |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------|------------|-------|---------------|
|             |                                                                                |         | in mm x mm | in mm | in mbar       |
| K + W + K   | 10 mm Kieselsäure – 20 mm Kern 4 – 10 mm Kieselsäure zusammen in einer Folie   | Folie 3 | 500 x 500  | 39,3  | 0,019         |
| K + G + K   | 10 mm Kieselsäure – 20 mm Kern 1 – 10 mm Kieselsäure zusammen in einer Folie   | Folie 3 | 500 x 500  | 37,4  | 0,019         |
| 20K + W     | 20 mm Kern 4 in einer Hülle + 20 mm Kieselsäure und zusammen eine zweite Hülle | Folie 3 | 500 x 500  | 39,9  | 0,019         |
| 20 K + G    | 20 mm Kern 1 in einer Hülle + 20 mm Kieselsäure und zusammen eine zweite Hülle | Folie 3 | 500 x 500  | 39,4  | 0,019         |
| G           | 20 mm Kern 1 in einer Hülle als Referenzprobe                                  | Folie 3 | 500 x 500  | 18,9  | 0,019         |
| 20W + W     | 20 mm Kern 4 in einer Hülle + 20 mm Kern 4 und zusammen eine zweite Hülle      | Folie 3 | 500 x 500  | 39,1  | 0,019         |
| 20G + G     | 20 mm Kern 1 in einer Hülle + 20 mm Kern 1 und zusammen eine zweite Hülle      | Folie 3 | 500 x 500  | 36,4  | 0,019         |

Tabelle 16: Eigenschaften der Versuchspaneele der vierten Charge

### 5.6.2 Durchgeführte Untersuchungen

- Messung der Wärmeleitfähigkeit im Anlieferungszustand (Frischwert)
- 4 - 5 Wochen Lagerung bei Raumtemperatur (4 Wochen für die einzelnen Probekörper für das Messplattenverfahren, da hier nur Faser eingesetzt wurde)
- Erneute Messung der Wärmeleitfähigkeit (Alterung 1)
- 12 Wochen Lagerung bei Raumtemperatur
- Erneute Messung der Wärmeleitfähigkeit (Alterung 2)

### 5.6.3 Messergebnisse der Probekörper der vierten Charge

Nachfolgend sind die Ergebnisse der im September 2010 evakuierten Platten tabellarisch dargestellt:

| Plattenpaar<br>Bzw. einzelne Platten | Folie   | Frischwert der<br>Wärmeleitfähigkeit | Alterung 1    | Alterung 2     |
|--------------------------------------|---------|--------------------------------------|---------------|----------------|
| -                                    |         | in W/(m·K)                           | in W/(m·K)    | in W/(m·K)     |
| K + W + K                            | Folie 3 | 0,0048                               | 0,0054 – 5Wo. | 0,0061 – 12Wo. |
| K + G + K                            | Folie 3 | 0,0051                               | 0,0055 – 5Wo. | 0,0059 – 12Wo. |
| 20K + W                              | Folie 3 | 0,0058                               | 0,0061 – 5Wo. | 0,0061 – 12Wo. |
| 20 K + G                             | Folie 3 | 0,0057                               | 0,0060 – 5Wo. | 0,0066 – 12Wo. |
| G                                    | Folie 3 | 0,0049                               | 0,0078 – 4Wo. | 0,0126 – 12Wo. |
| 20W + W                              | Folie 3 | 0,0052                               | 0,0067 – 4Wo. | 0,0082 – 12Wo. |
| 20G + G                              | Folie 3 | 0,0163                               | 0,0175 – 4Wo. | 0,0185 – 12Wo. |

Tabelle 17: Messergebnisse Paneele der dritten Charge

### 5.6.4 Beurteilung

Die Ausgangswerte der im September evakuierten Paneele sind trotz gleichem Evakuierdruck wieder etwas höher als die der dritten Produktionscharge. Möglicherweise war die Trocknungstemperatur nicht während der ganzen Trocknungsdauer auf 140°C eingestellt, da noch weitere Produkte parallel zu den Versuchspaneele hergestellt wurden, die bei geringeren Temperaturen (ca. 100°C) getrocknet wurden.

Auf den ersten Blick erfreulich ist der im Vergleich zur dritten Charge moderate Anstieg der Wärmeleitfähigkeit nach dem ersten Alterungsschritt. Es ist jedoch zu bemerken, dass hier bei diesen Paneelen im Gegensatz zur dritten Charge keine Temperaturlagerung durchgeführt wurde; die Alterung also wesentlich moderater als bei der dritten Charge war - die Werte sind also nur indirekt vergleichbar.

Nach dem zweiten Alterungsschritt (weitere 12 Wochen bei Raumtemperatur) weisen nur noch die vier Plattenpaare, die Kieselsäure enthalten, eine Wärmeleitfähigkeit auf, die unter dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für die Kieselsäure-VIPs liegt. Die drei Plattenpaare mit Faserfüllung befinden sich bereits im Bereich mit starkem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit. Bei den ersten vier Plattenpaaren wirkt sich womöglich die Kieselsäure als Gettersubstanz für den eingedrungenen Wasserdampf direkt aus. Eine andere Erklärung kann aus der Eigenschaft der Kieselsäure, dass die Wärmeleitfähigkeit bis zu einem bestimmten Innendruck nur sehr langsam ansteigt, abgeleitet werden. Interessant sind die höheren Ausgangswerte für die beiden doppelt eingehüllten Plattenpaare 20K + W und 20K + G. Möglicherweise wirkt sich hier die doppelte Einhüllung mit ihren erhöhten Rand-Wärmebrückeneffekten bis in die Messzone der Plattengeräte aus. Für einfach eingehüllte VIPs haben Untersuchungen mittels der FE-Methode und Messungen mit Heizplatten unterschiedlicher Größe gezeigt, dass der übliche Randabstand der Messzone bei Plattengerätmessungen ausreichend ist. Für die doppelt eingehüllten VIPs ist die Breite des Schutzrings bei Messungen womöglich zu erhöhen.

Die insgesamt geringsten Anstiege der Wärmeleitfähigkeit zwischen der Anfangsmessung und der Messung nach der ersten Alterung, zeigen die doppelt eingehüllten Paneele mit einem inneren Faserpaneel und außenliegendem Kieselsäurestützkern – zusammen in einer zweiten Umhüllung. Der Anstieg beträgt hier von der Ausgangsmessung zur Messung nach dem ersten Alterungsschritt nur  $0,0003 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Bei den ersten beiden Plattenpaaren (Kieselsäure und Faser in einer Hülle) sind es  $0,0004$  bis  $0,0006 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Der zweite Alterungsschritt bedeutet für die Plattenpaare 1 und 2 (K + W + K und K + G + K) wiederum einen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit um einen dem ersten Alterungsschritt vergleichbaren Wert ( $0,0004$  bis  $0,0007$

W/(m·K)). Die Plattenpaare 3 und 4 (20 K + W und 20 K + G) zeigen ein sehr uneinheitliches Verhalten. Während Plattenpaar 3 keinen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit zeigt, steigt diese bei Plattenpaar 4 (mit 0,0006 W/(m·K)) deutlicher an als beim ersten Alterungsschritt.

Aus dem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit lässt sich somit nicht eindeutig ableiten, ob eine doppelte Umhüllung hinsichtlich des Alterungsverhaltens eine Verbesserung darstellt. Plattenpaar 3 weist darauf hin, aber Plattenpaar 4 zeigt ein Verhalten, dass den beiden einfach eingehüllten Plattenpaaren mit Kieselsäure vergleichbar ist.

## **6 Feldversuche zur Verlegung von VIP im Objekt Wormser Straße**

### **Anmerkung**

Das Kapitel „Feldversuche“ wurde von Dr. Ulrich Passon, Isover, für den Zwischenbericht angefertigt und aus diesem vollständig und nahezu unverändert übernommen. Im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts wurden keine Feldversuche mit neu hergestellten Paneelen mit Faserfüllung mehr gemacht, da die Paneele sich als nicht ausreichend dauerhaft erwiesen, um sie in Gebäuden einsetzen zu können.

### **6.1 Rahmenbedingungen und Aufgabenstellung**

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Lösungen zur Installation von Vakuum Isolations- Paneele (VIP) für die folgenden drei Anwendungsbereiche im Hochbau untersucht:

- Zwischensparrendämmung
- Innenseitige Dämmung von Außenwänden
- Untersparrendämmung

Eine wärmetechnische Bewertung der verschiedenen Systeme mithilfe einer Wärmebildkamera konnte bisher noch nicht vorgenommen werden, da nach Fertigstellung der Heizung des Objekts die Außentemperaturen bereits zu hoch waren. Diese Art der Auswertung muss daher auf den Winter 2008/09 verschoben werden. Im Folgenden werden die Installationen in den drei genannten Bereichen dokumentiert und die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme aufgelistet. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst.

### **6.2 Zwischensparrendämmung**

#### **6.2.1 Probleme + Randbedingungen**

Aufgrund der hohen Verletzungsanfälligkeit der VIP sind diese sowohl an den Rändern der Sparren, als auch dach- und raumseitig zu schützen. Dies geschah durch Seitenstreifen aus Mineralwolle sowie dach- und raumseitigen Deckplatten aus Mineralwolle.

Ein weiteres Problem stellen die unterschiedlichen Sparrenlängen und -breiten dar. Wärmetechnisch wäre es ideal für jedes einzelne Sparrenfeld passgenau Elemente zu fertigen. Dieses Vorgehen ist fertigungstechnisch jedoch sehr aufwendig und außerdem sehr unflexibel was Messungenauigkeiten angeht. Aus diesen Gründen wurde entschieden nur VIP in einer begrenzte Anzahl von Standardformaten zu verwenden.

### 6.2.2 Planung

Kompatibel mit der Sparrentiefe von 100 mm wurden Deckplatten mit je 25 mm und VIP der Dicke 50 mm eingesetzt. Bei der Wahl der Standardmaße für die VIP wurde sich auf 2 Längen (900 mm und 700 mm) sowie 4 Breiten (450 mm – 600 mm in 50 mm Schritten) beschränkt. Der genaue Verlegeplan findet sich in Tabelle 1. Je nach Länge des Sparrenfeldes wurden eine, zwei oder drei VIP verlegt. In einem Sparrenfeld (Bad 5) wurde eine zweilagige Verlegung von 25 mm dicken VIP mit Überdeckung der Stöße zwischen den einzelnen Elementen ausprobiert.

### 6.2.3 Einbau

In einem ersten Schritt wurden Seitenstreifen aus Mineralwolle an die Sparren geklebt und die dachseitige Deckplatte angebracht (Bild 1). Dieser Arbeitsschritt konnte bereits vor der eigentlichen Installation der VIP durchgeführt werden, wodurch die Lagerzeit der Vakuumelemente auf der Baustelle deutlich reduziert wurde. Die Seitenstreifen haben zwei Funktionen gleichzeitig: zum Einen sorgen sie für den seitlichen Schutz der Elemente; zum Anderen wurde ihre Dicke so gewählt, dass die Differenz zwischen Sparren- und der nächst kleineren VIP-Standardbreite überbrückt wurde.

Im nächsten Arbeitsschritt wurden die VIP Stoß an Stoß (Bild 2) zwischen die Randstreifen geklemmt. Anschließend wurde die raumseitige Dämmplatte über den VIP angebracht (Bild 3). Die aus der Differenz zwischen Sparren- und VIP-Länge entstehenden Hohlräume wurden mit Mineralwolle ausgestopft (Bild 4) und die ganze Konstruktion abschließend mit einem Draht gesichert (Bild 5).

| Raum/ Feld   | Benötigte Platten (alles in mm) |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | Diff. Länge in cm | Diff. Breite in cm |
|--------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|
|              | 900<br>600<br>50                | 900<br>550<br>50 | 900<br>500<br>50 | 900<br>450<br>50 | 900<br>500<br>25 | 700<br>600<br>50 | 700<br>550<br>50 | 700<br>500<br>50 | 700<br>450<br>50 | 700<br>500<br>25 |                   |                    |
| Z11          |                                 | 1                |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 3                 | 4-5                |
| Z12          |                                 | 1                |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 2                 | 5-5,5              |
| Z13          |                                 |                  | 1                |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 7                 | 6-8                |
| Z14          | 1                               |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 11                | 2,5-3,5            |
| Z15          | 1                               |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 10                | 4-5,5              |
|              |                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                    |
| Z21          |                                 | 1                |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 2                 | 2-3                |
| Z22          |                                 |                  | 1                |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 3                 | 2,5-3              |
| Z23          |                                 |                  |                  | 1                |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 1                 | 6-6,5              |
| Z24          |                                 | 1                |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 2                 | 6,5-7              |
|              |                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                    |
| Flur 1       |                                 |                  |                  | 2                |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 11                | 6-8                |
| Flur 2       |                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 3                |                  |                  | 3                 | 2-10               |
| Flur 3       | -                               | -                | -                | -                | -                | -                | -                | -                | -                | -                | -                 | -                  |
| Flur 4       | 1                               |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 8                 | 8                  |
|              |                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                    |
| Bad 1        |                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 2                |                  | 1                 | 2-3,5              |
| Bad 2        |                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 2                |                  | 3                 | 6-6,5              |
| Bad 3        |                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | 2                |                  | 5                 | 2-4                |
| Bad 4        |                                 |                  |                  | 1                |                  |                  |                  |                  | 1                |                  | 3                 | 6-8                |
| Bad 5        |                                 |                  |                  |                  | 2                |                  |                  |                  |                  | 2                | 6                 | 2                  |
| Bad 6        |                                 |                  | 1                |                  |                  |                  |                  | 1                |                  |                  | 9                 | 4,5-6,5            |
|              |                                 |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                    |
| <b>total</b> | <b>3</b>                        | <b>4</b>         | <b>3</b>         | <b>4</b>         | <b>2</b>         | <b>0</b>         | <b>0</b>         | <b>4</b>         | <b>7</b>         | <b>2</b>         |                   |                    |

Tab. 1: Verlegeplan für die Zwischensparrendämmung



Bild 1



Bild 2



Bild 3



Bild 4



Bild 5

#### 6.2.4 Fazit

Die Vorbereitung der Sparrenfelder mit Seitenstreifen und dachseitiger Deckplatte konnte nach einiger Übung sehr zügig durchgeführt werden. Durch die Abkopplung dieses Arbeitsschritts wurde die Verweildauer der VIP auf der Baustelle deutlich reduziert. Es zeigte sich jedoch, dass die Verwendung von ungeschützten VIP schon bei der Lagerung und dem Transport ein zu hohes Verletzungsrisiko mit sich bringt. Mehrere Elemente wurden bereits vor Ankunft an der Baustelle belüftet. Alternativ dazu würde es sich anbieten, im Vorfeld nur die Seitenstreifen anzubringen und die VIP als Sandwichelemente mit den Deckplatten zu verkleben. Ein ähnliches System wurde bei der innenseitigen Dämmung der Außenwände (siehe unten) angewendet,

wodurch Transport, Lagerung und Verarbeitung der hochempfindlichen Vakuumelemente deutlich vereinfacht wurden.

Anhand der geplanten Wärmebildkameraaufnahmen bleibt schließlich noch zu klären, wie effektiv der verwendete Aufbau wirklich ist. Es ist zu erwarten, dass die Sparren hier im Vergleich zu konventioneller Zwischensparrendämmung noch größere Wärmebrücken darstellen.

### **6.3 Innenseitige Dämmung von Außenwänden**

#### **6.3.1 Probleme + Randbedingungen**

Analog zur Zwischensparrendämmung wurden die möglichen Formate der VIP auf wenige Standardmaße beschränkt. Nach Vermessung einiger der zu dämmenden Wände wurden diese wie folgt festgelegt: 120 cm \* 60 cm (Platte a), 90 cm \* 60 cm (Platte b), 90 cm \* 50 cm (Platte c), 60 cm \* 50 cm (Platte d) und 60 cm \* 15 cm (Platte e).

Nach den gewonnen Erfahrungen in Zwischensparrenbereich wurden hier jedoch keine ungeschützten VIP verwendet, sondern die Elemente wurden vorab beidseitig mit 15 mm dicken Mineralwolleplatten beklebt.

#### **6.3.2 Planung:**

Die einzelnen Außenwände wurden vermessen und anschließend ein Verlegeplan erstellt. Ein typisches Beispiel ist in der nachfolgenden Skizze dargestellt.



B = Sparren

### 6.3.3 Einbau

In einem ersten Schritt wurde zum Schutz der Paneele vor Beschädigung durch herumliegende Steine oder ähnlichem dünne Mineralwollestreifen am Fußboden angebracht. Anschließend wurden die Sandwichelemente (15 mm Glaswolle / 35 mm VIP/ 15 mm Mineralwolle) nach dem Verlegeplan an die Wand geklebt. Aufgrund der eingesetzten Standardmaße bleiben nach diesem Schritt noch ungedämmte Flächen (im Verlegeplan gelb) übrig. Diese wurden mit Mineralwolle gedämmt. Vor diese Dämmebene wurde anschließend eine Ständerwand gesetzt sowie Dampfbremse und Gipskartonplatten verlegt. Die notwendigen Arbeitsvorgänge sind in der nachfolgend dargestellten Bilderfolge dokumentiert.



#### 6.3.4 Fazit

Die Verwendung von Sandwichelementen erleichterten Transport, Lagerung und Verarbeitung im Vergleich zu ungeschützten Elementen enorm. Eine weitere Verbesserung könnte durch Abkleben der Kanten mit Klebeband erzielt werden. Aufgrund des guten Handlings konnten die Verlegearbeiten zügig durchgeführt werden.

Allerdings war ein großer Planungsaufwand für die Vermessung und das Erstellen der Verlegepläne von Nöten.

Beim Verlegen trat öfters das Problem auf, dass eine Wand falsch oder ungenau ausgemessen wurde, bzw. der Fußboden oder die Seitenwänden nach der Messung noch verändert wurden. Daher konnte nicht immer nach Verlegeplan gearbeitet werden. Es war aber von vornherein eine kleine Reserve für jedes Plattenmaß eingeplant worden und es stellte sich erstaunlicherweise heraus, dass man mit den gewählten VIP-Formaten recht flexibel auf solch unvorhergesehene Störungen reagieren konnte.

Ein Nachteil dieses Systems ist die deutlich größere Dicke des Sandwichelements (65 mm) im Vergleich zum VIP (35 mm). Andererseits könnten die akustischen Eigenschaften deutlich besser sein als bei Systeme mit unverkleideten, eingeschäumten oder mit Sperrholz verkleideten VIP. Dies soll in einem nächsten Teil des Forschungsprojekts untersucht werden.

## **6.4 Untersparrendämmung**

### **6.4.1 Probleme + Randbedingungen**

Für den Einsatz unter den Sparren wurde ein kommerzielles Produkt der Firma Variotec getestet, das sogenannte Qasa-Element (Bild 1). Dieses besteht aus einem VIP (hier 35 mm dick) das beidseitig mit Sperrholz (hier jeweils 4mm dick) verkleidet ist. Die Ränder sind mit Klebeband abgeklebt.

### **6.4.2 Planung**

Die Verlegung dieser Elemente (Abb. 1) erfolgte in einer Lattung aus Holz (Bild 2), auf die anschließend ein Traggerüst für Gipskarton-Platten geschraubt wurde. Der Abstand zwischen den einzelnen Latten und damit die Breite der Elemente waren daher durch das Rastermaß der Gipskarton-Platten sowie die Breite der Latten vorgegeben. Die Länge der Platten wurde so gewählt, dass die ganze Fläche abgedeckt werden konnte. Dieses Vorgehen ermöglicht das Dämmen von großen Flächen mit nur 2 Plattenmaßen (siehe Abb. 1).

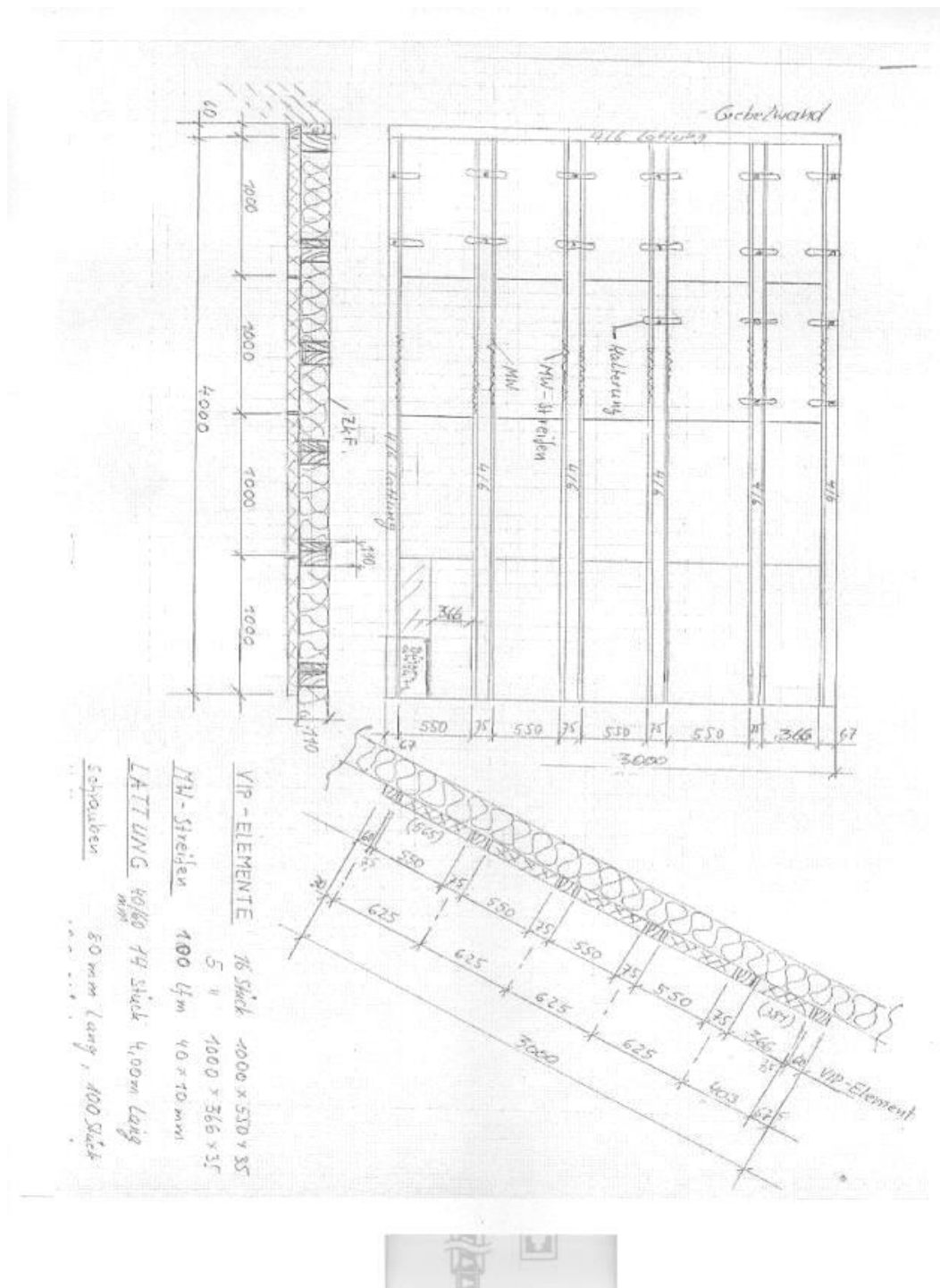


Abbildung 44

### 6.4.3 Einbau

In den Bereichen, in denen die Untersparrendämmung mit VIP eingesetzt wurde, wurde zwischen den Sparren konventionell mit Mineralwolle gedämmt (Bild 3). Anschließend wurde die Lattung gemäß Abb.1 angebracht (Bild 4). Die Latten wurden dabei an den Rändern mit dünnen Streifen aus Mineralwolle beklebt, um anschließend die Qasa-Elemente Stoß an Stoß zwischen die Lattung zu klemmen (Abb. 5-7). Nach Anbringen der Dampfbremse wurde auf dieser die Position der Lattung markiert (Bild 8), um sicher zu gehen, dass das Traggerüst für die Gipskarton-Platten wirklich auf die Lattung geschraubt wird und nicht auf die Elemente. Auf diese Weise konnten die VIP wirksam vor Beschädigung während der Anschlussarbeiten geschützt werden.



Bild1

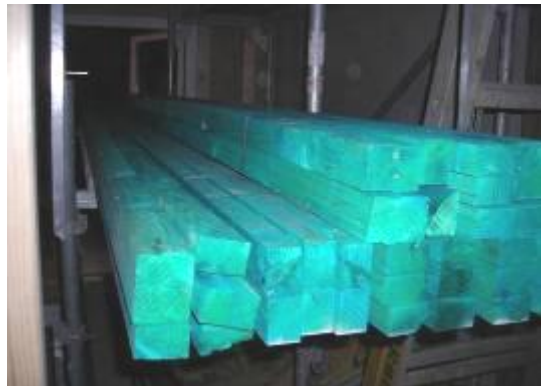


Bild2



Bild3

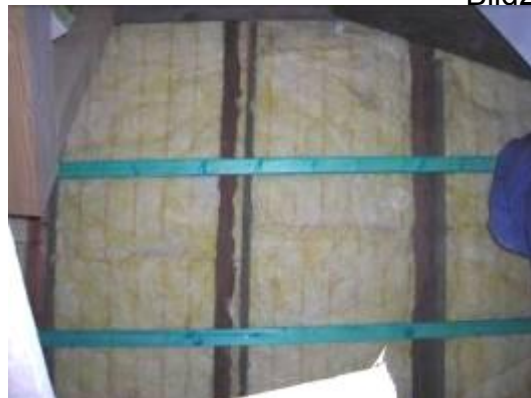


Bild4



Bild 5



Bild 6



Bild 7



Bild 8

#### 6.4.4 Fazit

Die Sperrholz-Verkleideten Qasa-Elemente lassen sich sehr sicher verarbeiten. Auch beim Transport und der Lagerung ist das Beschädigungsrisiko minimal. Das Klemmen der Elemente zwischen die Mineralwollestreifen an der Lattung konnte zügig durchgeführt werden. Die Elemente saßen anschließend sehr fest, so dass auf die ursprünglich geplanten zusätzlichen Halterungen verzichtet werden konnte.

Auch bei diesem Aufbau müssen die zu dämmenden Flächen sehr genau vorab vermessen werden. Der Einfluss der Wärmebrücken der Lattung kann erst nach der Messung mit der Wärmebildkamera abgeschätzt werden.

## 6.5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Objekt „Wormser Straße“ wurde die Installation von VIP in den Bereichen Zwischensparrendämmung, innenseitige Dämmung von Außenwänden sowie Untersparrendämmung getestet. In allen drei Anwendungsbereichen ist vorab ein großer Aufwand bei der Planung der VIP Dimensionierung von Nöten.

Die verwendeten Einbaumethoden ermöglichen alle eine zügige Verlegung der VIP. Es zeigte sich allerdings, dass beim Verwenden von ungeschützten VIP, wie im Zwischensparrenbereich geschehen, bereits bei Transport und Lagerung ein zu großes Beschädigungsrisiko besteht. Es ist also dringend zu empfehlen, ausschließlich VIP zu verwenden, die zum Schutz vor Beschädigung in irgendeiner Form verkleidet sind, z.B. mit Mineralwolle oder Sperrholz.

Die Sandwichelemente Mineralwolle/VIP/Mineralwolle ließen sich sehr gut verarbeiten. Da Mineralwolleplatten nicht beliebig dünn erhältlich sind, ist die Dicke des gesamten Elements zwangsläufig deutlich höher als die des VIP. Auf der anderen Seite könnten die akustischen und brandschutztechnischen Eigenschaften dieses Systems deutlich besser sein, als dies für eingeschäumte oder mit Sperrholz verkleidete VIP der Fall ist. Diese Aspekte sollen in einem weiteren Teil des Projekts untersucht werden.

Die wärmetechnische Effizienz der einzelnen Systeme werden im kommenden Winter mit Hilfe einer Wärmebildkamera bewertet werden. Danach kann auch über die Optimierung der dieser Systeme nachgedacht werden. Die aussichtsreichste Einsatzmöglichkeit ist vermutlich die Untersparrenlösung, da hier in recht kurzer Zeit große Flächen mit einer sehr kleinen Anzahl verschiedener VIP-Formate gedämmt werden können.

## 7 Beurteilung

### 7.1 Bestandteile der Paneele und wärmetechnische Eigenschaften

#### 7.1.1 Folien

Die zurzeit am Markt erhältlichen metallisierten Folien sind nicht geeignet für die Umhüllung von VIPs mit Faserfüllung oder anderen Stützkernmaterialien, die in ihrer Porenstruktur nicht so kleinteilig sind wie pyrogene Kieselsäure. Unbedingt notwendig für die Verwendung mit Fasern als Stützkern ist bei den metallisierten Folien eine Reduzierung der Permeation und eine Verbesserung der Folieneigenschaften bei der Alterung.

Mit Aluminium-Verbundfolien sind sehr niedrige Permeationsraten möglich, sie weisen jedoch an den Rändern so große Wärmebrückeneffekte auf, dass ihr Einsatz für kleinteilige Paneele nicht zu empfehlen ist. Kann die Dicke der Alu-Schichten dieser Verbundfolien zukünftig reduziert werden, ohne dass die Permeation deutlich erhöht wird, können diese Folien in Zukunft Verwendung bei der Herstellung sehr dichter Umhüllungen finden, wie sie für fasergefüllte VIPs notwendig sind.

Ein anderer Ansatz wird bei den Entwicklungen verfolgt, die Aluminium als Barrierematerial ersetzen sollen. Hier könnte durch die Verwendung von Edelstahl oder anorganischen Stoffen mit Kristallstruktur (z.B.  $\text{SiO}_2$ ) als Barrierematerial eine deutliche Reduzierung der Rand-Wärmebrücken erreicht werden, was den Einsatz der sehr dichten Verbundfolien auch bei kleinformatischen Paneelen möglich machen würde.

Wenn eine Verringerung der Schichtdicke des Barrierematerials und ein Ersatz für das sehr gut wärmeleitende Aluminium kombiniert werden kann, sollte die Verwendung von Fasern als Stützkern für VIPs in Verbindung mit einer solchen neuartigen Umhüllung erneut untersucht werden.

Eine wirtschaftliche Optimierung hinsichtlich der Folienwahl kann derzeit nicht durchgeführt werden, solange die Permeationsrate der metallisierten Folien nicht vermindert oder die Wärmebrückenwirkung am Rand beim Einsatz der Verbundfolien nicht

reduziert wird. Die wärmetechnische Optimierung ist hier die Voraussetzung für die wirtschaftliche Optimierung. Eine vielversprechende Entwicklung ist hier das im Rahmen einer Forschungsarbeit des Fraunhofer Instituts für Verfahrenstechnik und Verpackung entwickelte POLO-Konzept mit den Ormocer®-Folien. Leider sind diese neuartigen Hochbarrierefolien derzeit noch nicht kommerziell erhältlich, und es gibt noch keine Maschine, die diese Folien in einer für den Einsatz als VIP-Umhüllung notwendigen Breite herstellen kann.

### 7.1.2 Stützkern

Als Stützkernmaterial kann derzeit auf pyrogene Kieselsäure nicht verzichtet werden. Allenfalls ein Teil der Kieselsäure könnte beim Einsatz sehr dichter Folien in absehbarer Zeit durch z.B. Fasern ersetzt werden. Die Anforderung an das Vakuum (Innendruck auf absehbare Zeit kleiner als 0,1 mbar) erfordert große Sorgfalt bei der Herstellung der Kerne aus Fasermaterialien. Diese müssen absolut fettfrei sein und dürfen keinerlei Bindemittel enthalten. Im Gegensatz zu pyrogener Kieselsäure ist auch eine Trocknung bei mindestens 140°C über mehrere Stunden unerlässlich, um auch kleinste Reste anhaftenden Wassers von den Fasern zu entfernen.

Untersucht wurden Schichtungen aus Kieselsäure und Fasermaterial als Stützkern, es sind aber auch Mischungen von losen Fasern und Kieselsäure denkbar. Dabei könnte ein Teil der teuren Kieselsäure durch günstigere Fasern ersetzt werden. Der Ansatz „Beutel im Beutel“ führt zu den niedrigsten Anstiegen der Wärmeleitfähigkeit im ersten Alterungsschritt. Es tritt jedoch ein verstärkter Randeffect an der teilweise zweimal nebeneinander liegenden Folie auf, der vermutlich dafür verantwortlich ist, dass die Anfangswerte der Wärmeleitfähigkeit etwas höher liegen als bei den einfach eingehüllten Paneelen.

Ein weiterer Nachteil, beim Einsatz von Fasern als Stützkern, ergibt sich aus der unebenen Oberfläche der mit Fasern gefüllten Paneele. Diese eignen sich weniger gut zum Bekleben mit Deckschichten, da wesentlich mehr Kleber notwendig ist um die Dellen der unebenen Oberfläche zu füllen, was zu einem uneinheitlichen Schrumpfungsverhalten der Kleberschicht führt, und zusätzliche Spannungen aus der Verklebung in die obersten Folienschichten einbringt.

### 7.1.3 Wärmebrückenwirkung am Rand

Die rechnerische Untersuchung an den Wärmebrücken am Rand der Elemente bestätigt erstmals quantitativ die theoretischen Überlegungen zu den Produktionsparametern von VIP-Umhüllungen. Besonders wichtig ist hier, dass möglichst große Paneele hergestellt werden, bei denen nur die kürzeren Kanten mit der ungünstigeren Randausbildung verschweißt werden (mehrlagiger Stoß). Alleine durch diese einfache Maßnahme, der Anordnung der Verschweißungsbereiche auf den Flächen statt an den Rändern der längeren Kanten, lassen sich die Randeffekte deutlich vermindern.

Entscheidenden Einfluss auf die Wärmebrücke am Folienrand haben auch die Dicke der verwendeten Schichten der Materialien, vor allem die der Aluminiumschichten. Bei metallisierten Folien könnte es zukünftig gelingen, die Permeationsrate zu senken, ohne die Dicke der Barrierschicht zu erhöhen (siehe z.B. POLO-Konzept und Ormocer®). Aus wärmetechnischer Sicht sind ausschließlich metallisierte Folien für VIPs in normalen Größen geeignet, da die Wärmebrücken am Rand der Verbundfolien zu groß werden.

Möglicherweise bieten hier andere anorganische Barrierematerialien eine Chance für die Reduzierung der Wärmebrücken am Folienrand der Verbundfolien. Erste Forschungsergebnisse mit SiO<sub>2</sub> und Edelstahl als Barrierematerial anstelle von Aluminium geben Anlass zur Hoffnung, dass ein Innovationsschub bei den Folien zu erwarten ist.

Eine gute Maßhaltigkeit und Rechtwinkligkeit der VIPs ist Voraussetzung für die passgenaue Montage nebeneinanderliegender Platten. Dann können die Spalte zwischen den Platten klein bleiben, was die Wärmebrücke am Rand erheblich vermindert. Lassen sich die Spalte zwischen den Platten nicht ganz vermeiden, sollten sie auf jeden Fall mit einem Dämmstoff möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit gefüllt werden, um die Wärmebrückeneffekte so klein wie möglich zu halten.

Die Anordnung zusätzlicher Deckschichten auf den VIP reduziert die Wärmebrückeneffekte am Rand, wenn diese Deckschichten aus Dämmstoffen bestehen. Bereits dünne Platten aus Holzwerkstoffen führen dazu, dass die Wärmebrücke am Rand aufgrund der Querleitung in den Deckschichten größer ist als bei einem VIP ohne Deckschicht. Das gilt ganz besonders für Deckschichten aus Metall, z.B. aus Stahl- oder Aluminiumblech wie bei einigen Sandwichkonstruktionen üblich.

#### 7.1.4 Schutzschichten

Aus wärmetechnischer Sicht sind Schutzschichten auf den Paneelen eher ungünstig, außer sie bestehen aus Dämmstoffen. Sie sind aber sehr sinnvoll für das Handling der Paneele und für Transport und Verarbeitung. Als Schutzschichten finden viele Stoffe Verwendung; z.B. Dämmstoffe, Holz- und Holzwerkstoffe, massive Kunststoffe und auch Metalle. Auch wenn massive Stoffe einen besseren Schutz gegen Beschädigung beim Transport und gegen Witterungseinflüsse bieten, sollte auf die Verwendung von Schutzschichten aus Dämmstoffen geachtet werden, da diese die Wärmebrückenwirkung am Folienrand günstig beeinflussen. Die Schutzwirkung robuster Dämmstoffe (z.B. XPS- und PUR-Platten) sollte bei sorgfältiger und schonender Behandlung der Paneele ausreichend sein.

## 7.2 Herstellung, Anwendung und Wirtschaftlichkeit

### 7.2.1 Paneelherstellung

Um ein wärmetechnisch hochwertiges VIP herzustellen, ist große Sorgfalt und Genauigkeit bei allen Schritten der Produktion notwendig. Besonders wichtig ist die Qualitätskontrolle der Ausgangsstoffe – vor allem der Folie. Eine Foliencharge minderer Qualität kann durch keine andere Maßnahme der Produktion wieder wett gemacht werden. Eine regelmäßige Kontrolle der Permeationseigenschaften ist unerlässlich. Ist die Permeation zu hoch, lassen sich Paneele mit Faserfüllung gar nicht erst herstellen. Die Gefahr bei Kieselsäurestützkernen ist eine zu schnelle Degradation, die möglicherweise erst einmal nicht bemerkt wird, da bei Kieselsäure erst ein deutlich höherer Druckanstieg im Paneel zu einer merklichen Zunahme der Wärmeleitfähigkeit führt.

Die Trocknung der Kieselsäurekerne ist gängige Praxis bei der Herstellung der auf dem Markt befindlichen Paneele. Bei der Verwendung anderer Stützkernmaterialien reicht die bei Kieselsäureplatten angewendete Trocknung nicht aus. Hier gibt es höhere Anforderungen an das Vakuum und somit muss auch sichergestellt sein, dass anhaftendes Wasser vollständig ausgeheizt wird. Um fasergefüllte Paneele herstellen zu können, ist eine Trocknung der Stützkern für mehrere Stunden bei mindestens 140°C erforderlich.

Aus der Größe der Porenräume ergibt sich die Anforderung an den Innendruck bei der Evakuierung. Da die Porenräume bei Faserschüttungen deutlich größer sind als bei pyrogener Kieselsäure, ist auch die Anforderung an die Güte und Dauerhaftigkeit des Vakuums deutlich höher. Für die untersuchten Stützkern ergibt sich aus der Geometrie der Fasern und aus der Dichte des Stützkerns ein Zielwert für den Innendruck von unter 0,1 mbar, um dauerhaft die Luft-Wärmeleitung zu unterdrücken. Diese Werte dauerhaft sicherzustellen, ist eine schwierig zu lösende Aufgabe für die Hersteller der Folien.

Die Evakuierbarkeit der fasergefüllten Paneele ist bedingt durch die Offenheit der Struktur sehr gut. Die Evakuierung geht bei gleichem Innendruck deutlich schneller als bei kieselsäuregefüllten VIPs. Abhängig von der Leistung der eingesetzten Vakuumpumpen lässt sich der Evakuervorgang selbst für die sehr niedrigen Innendrucke von 0,01 bis 0,05 mbar in einer vernünftigen Zeit bewerkstelligen. Druckbedingt sind allerdings die Taktzeiten, wie sie für die Produktion kieselsäuregefüllter VIP möglich sind, zurzeit nicht erreichbar, da übliche Innendrucke bei der Produktion kieselsäuregefüllter VIP bei etwa 1 bis 2 mbar liegen. Diese Drücke sind selbst bei großen und dicken Kieselsäure-VIP viel schneller erreichbar als z.B. 0,01 mbar bei sehr offenporigen Faser-Stützkernen.

Die zurzeit verwendeten metallisierten Folien lassen sich gut verarbeiten, da die anorganischen Barrierschichten aus Aluminium recht zäh und gut verformbar sind. Hier liegt das Hauptproblem bei der Verwendung alternativer anorganischer Barriermaterialien. Diese lassen sich nicht so gut verformen wie Aluminium, bre-

chen und werden an diesen Knickstellen leichter undicht. Ansatzpunkt für eine Weiterentwicklung ist hier eine verbesserte Verbindung der Barrierschicht mit den Trägerschichten aus Kunststoff, um lokale Abplatzungen und Risse bei der Beutelherstellung zu vermeiden.

Die Techniken bei der Verschweißung der Folien miteinander sind gut entwickelt und können sicher angewendet werden. Die Qualität der Verschweißungen ist gut. Wenn Probleme mit der Dichtheit der Paneele auftreten, befinden sich die Leckagen i.d.R. an Knickstellen und Kanten, nicht in der Siegelnaht.

#### 7.2.2 Anwendung und Gebrauchsdauer

Das derzeit angewendete Alterungsverfahren für Vakuum-Paneele in Anträgen für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen führt für fasergefüllte Paneele zu einem Versagen der Paneele. Mit den verwendeten Folien können keine fasergefüllten Paneele hergestellt werden, die die Anforderungen aus den Alterungstests erfüllen. Schon die einfache Temperaturlagerung ohne Klimawechselprüfung führt zu einem solch großen Druckanstieg im Paneel, dass die Luft-Wärmeleitung nicht mehr unterdrückt wird und die Wärmeleitfähigkeit des Paneels deutlich ansteigt.

Die Permeation der Folien ist sogar schon bei Raumtemperatur zu groß, um Innendrucke kleiner 0,1 mbar über einen längeren Zeitraum aufrecht zu erhalten, wie die Versuche der vierten Produktionscharge zeigen.

#### 7.2.3 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Bereits für die am Markt befindlichen, teuren Kieselsäurepaneele lässt sich die Anwendung bei einer guten Erlössituation wirtschaftlich darstellen. Durch eine Kostenreduzierung bei den Stützkernen ohne Qualitätsverlust – z.B. durch Herstellung im größeren Maßstab – ist der Einsatz zukünftig auch bei niedrigeren Quadratmeterpreisen alleine aus der größeren Nutzfläche wirtschaftlich.

Aus den schlankeren Aufbauten der VIP-gedämmten Außenbauteile im Vergleich mit den Bauteilen, die mit dicken Schichten herkömmlicher Dämmstoffe gedämmt wurden, ergeben sich über die größeren Nutzflächen hinaus noch weitere Vorteile, die

bisher noch nicht vollständig untersucht wurden, z.B. geringere Kosten für Befestigungen, Dachüberstände, Fensterleibungen, Anschlussbauteile. In seinem Beitrag für die 2. VIP-Bau Konferenz 2005 beschreibt Carsten Grobe beispielsweise solche Anschlussbauteile und stellt in einem Fall die Kosten einer konventionellen Lösung am Traufanschluss der Lösung mit VIP gegenüber [28]. Aufgrund der noch neuen Bauweise mit VIP werden hier noch viele Anschlusslösungen am Gebäude improvisiert und handwerklich gefertigt. Bei einer weiteren Verbreitung der VIP-Bauweise werden sich hier zukünftig günstigere serienreife Lösungen realisieren lassen.

Damit sich die VIP-Bauweise durchsetzen kann, muss die Qualität der Produkte und die Bauausführung stimmen und dauerhaft sein. Für Kieselsäure-VIPs gibt es mittlerweile einige allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen mit Fremdüberwachung. Zusätzlich wurde ein RAL Gütezeichen für Vakuum-Isolations-Paneele von einigen Herstellern beantragt. Solche qualitätssichernden und vertrauensbildenden Maßnahmen helfen, die Verbreitung der VIP-Bauweise zu unterstützen. Parallel zur Überwachung der Produkte bei der Produktion werden ausgesuchte Praxisobjekte gutachterlich untersucht und verbaute Paneele zur Prüfung entnommen. Sind die Paneele dauerhaft dicht und behalten ihre guten wärmetechnischen Eigenschaften über einen längeren Zeitraum, so könnte der Sicherheitszuschlag im Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von derzeit 25% zukünftig gesenkt werden.

## **8 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf**

### **8.1 Stützkern**

#### **8.1.1 Aufbereitung, Trocknung und mechanische Eigenschaften**

Einzelne Aspekte der Stützkern-Aufbereitung, wie z.B. Trocknungstemperatur und Trocknungsdauer wurden für diesen Forschungsauftrag untersucht. Eine Ausführliche, systematische Erforschung der notwendigen Trocknungstemperaturen und Trocknungszeiten für unterschiedliche Füllstoffe und Mischungen, war im Rahmen dieser breit angelegten Forschungsarbeit nicht möglich. Eine solche Studie sollte auf Basis von Fasergeometrien, Mischungsverhältnissen und Evakuierdrücken noch erstellt werden, um die Randbedingungen für Produktion hochwertiger VIPs weiter zu erforschen.

Die Zusammenhänge zwischen Innendruck und resultierender Wärmeleitfähigkeit sind (nicht nur aus dieser Forschungsarbeit) bekannt. Wenn es zukünftig gelingen sollte, wärmetechnisch vernünftige VIP mit alternativen Stützkernen herzustellen, müssen zusätzlich noch andere Faktoren berücksichtigt werden. Für bauliche Anwendung sind das vor allem die in Abschnitt 2.1.11 aufgelisteten Prüfungen und Eigenschaften. Diese mechanischen Eigenschaften müssen dann systematisch erforscht werden.

#### **8.1.2 Materialmischungen**

Mit den zurzeit erhältlichen Folien lassen sich keine fasergefüllten VIPs herstellen, die baulichen Anforderungen genügen. Es ist jedoch durchaus denkbar, einen kleinen Anteil der Kieselsäure der Stützkern durch Fasern zu ersetzen. Hierzu könnten weiterführende Untersuchungen klären, bei welchen Faseranteilen die wärmetechnischen Anforderungen noch erfüllt werden.

### **8.2 Folien**

#### **8.2.1 Qualitätssicherung**

Bei den am Markt erhältlichen metallisierten Folien gibt es große qualitative Unterschiede zwischen unterschiedlichen Folien, aber auch innerhalb einer Produktions-

charge derselben Folie wurden bereits deutliche Qualitätsschwankungen festgestellt. Manche Produktionschargen weisen hinsichtlich der Permeationseigenschaften deutliche Schwankungen auf. Eine lückenlose Qualitätssicherung der Folie ist daher für die VIP-Herstellung unerlässlich. Von jeder Foliencharge sollten vor der Verwendung in der VIP-Produktion Stichproben hinsichtlich der Permeationseigenschaften untersucht werden. Nur bei absolut intakten Folien ist eine dauerhaft niedrige Permeation gewährleistet, die für das Funktionieren der Paneele unerlässlich ist.

### 8.2.2 Permeationsmessung

Bei sehr dichten Folien stößt die derzeit verfügbare Permeationsmesstechnik an die Grenzen. Neue Messverfahren befinden sich noch in der Erprobungs- bzw. in der Erforschungsphase. Hier ist es dringend erforderlich, ein einfaches, schnelles und zuverlässiges Verfahren zu finden, um eine laufende Qualitätssicherung der Folien bei den Herstellern zu ermöglichen. Zurzeit ist ein Forschungsvorhaben zu dieser Themenstellung beantragt.

### 8.2.3 Vergleich der Alterung im Labor und im Gebäude

Eine zuverlässige Qualitätssicherung der Paneele, hinsichtlich ihres Verhaltens im eingebauten Zustand, erfordert Daten zum Alterungsverhalten von eingebauten Paneelen (die für Prüfungen aus der Baukonstruktion entnommen werden) im Vergleich zum Alterungsverhalten von Paneelen mit Schnellalterungsverfahren im Labor. Hier würde eine umfangreiche Studie helfen, die vielfältigen Fragen zum angewendeten Alterungsverfahren zu beantworten und den Zusammenhang zwischen tatsächlicher Alterung im Gebäude und Schnellalterungsverfahren zu etablieren.

## 8.3 Paneele und Bauteile

### 8.3.1 Mehrlagige Systeme

Weitere Verringerungen bei den Rand- Wärmebrückeneffekten kann durch Überlappung der einzelnen VIP erreicht werden. Hier könnte zudem untersucht werden, ob sich durch eine zwei- oder mehrlagige Verlegung, die riesigen Wärmebrückeneffekte beim Einsatz von Aluminium-Verbundfolien auf ein erträgliches Maß vermindern las-

sen. An den Kanten eines VIPs liegt dann nicht die komplette Temperaturdifferenz an – die Wärmebrückeneffekte des Randes werden hierdurch reduziert.

Zurzeit sind einige überlappende Systeme am Markt erhältlich, bzw. befinden sich in der Erprobungsphase. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Befestigungen bzw. der Dauerhaftigkeit der Verklebungen. Zu den Verklebungen läuft bereits ein Forschungsvorhaben.

### 8.3.2 Anschlussbauteile und Befestigungen

Forschungsbedarf besteht bei den Baukosten für Anschlussbauteile und Befestigungen, die für die schlanken Vakuum-Paneele u.U. niedriger ausfallen als für eine wärmetechnisch vergleichbare Lösung aus herkömmlichen Dämmstoffen in großer Dicke. Aufgrund der geringeren Dicke sind oft einfachere Befestigungen möglich, oder nur geringe bauliche Veränderungen notwendig. Aus der Untersuchung dieser speziellen Kosten lassen sich Argumente für den Einsatz von Vakuum-Paneele am Gebäude ableiten, die die höheren Kosten in der Fläche etwas kompensieren können.

### 8.3.3 Qualitätssicherung

Die teilweise sehr umfangreiche Qualitätssicherung der Hersteller hat zum Aufbau von Vertrauen der Planer in die VIP-Bauweise geführt. Einige Hersteller prüfen jedes einzelne produzierte Paneel noch einmal 24 h nach der Produktion hinsichtlich des Innendrucks, was eine sichere aber teure Maßnahme zur Sicherstellung der Qualität ist. Bisher wurden allerdings nur wenige Paneele von ausgeführten Objekten wieder entnommen und nach einer bestimmten Einsatzzeit im Gebäude untersucht. Durch Vergleiche von entnommenen Paneelen mit den hochgerechneten Steigungen der Wärmeleitfähigkeit könnte eine effektive Überprüfung der Qualität erfolgen. Bei guter Übereinstimmung der Eigenschaften und einer geringen Ausfallrate, könnte der Sicherheitszuschlag auf die gealterten Werte der Wärmeleitfähigkeit von derzeit 25% gesenkt werden. Hierfür sind jedoch Erfahrungen und Messwerte aus einer Vielzahl ausgeführter Objekte notwendig, die im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersucht werden könnten.

Eine theoretische Forschungsarbeit, zu den Auswirkungen einzelner belüfteter VIPs auf das Ergebnis des Energieeinsparnachweises, würde helfen, die Vorbehalte einiger Planer hinsichtlich der VIP-Bauweise zu verringern. Wieviele ausgefallene Paneele sind für das Ergebnis des EnEV-Nachweises noch zu tolerieren und besteht beim Ausfall eines Paneels die Gefahr, dass bauphysikalische Schäden am Gebäude auftreten?

#### 8.3.4 Weitere Einsatzgebiete

Über Studien zum Einsatz von Vakuum-Paneelen für weitere Einsatzgebiete würde die Verbreitung der Bauweise gefördert. In den Diskussionen im projektbegleitenden Ausschuss wurde vor allem der Einsatz von Vakuum-Dämmung für die Sanierung von Klinkerfassaden diskutiert. Hier könnte durch Ersatz der alten Klinker-Vormauerung mit Luftspalt durch schlanke VIP-Dämmung und vorgesetzte Riemchen, die vorhandene Kubatur des Gebäudes auch nach der Sanierung erhalten werden. Die neue Außenoberfläche würde sich nach der Sanierung wieder an der gleichen Stelle befinden, und das Aussehen des Gebäudes würde durch die Riemchen nicht verändert. Alle vorhandenen Bauteilanschlüsse (Leibungen, Brüstungen, Traufgesimse etc.) würden sich durch die Sanierung nicht verändern, bzw. müssten nicht versetzt werden.

Denkbar ist auch der Einsatz von VIPs in vorgehängten hinterlüfteten Fassaden. Hier ergäbe sich durch die geringe Aufbaudicke möglicherweise eine weniger aufwändige Befestigung der Fassade, als bei herkömmlichen Dämmstoffen. Durch den geringeren Abstand der vorgehängten Konstruktion von der Tragkonstruktion für dünne Dämmungen sind kleinere, leichtere und damit preisgünstigere Befestigungselemente möglich. In diesem Zusammenhang sollte die Wärmebrückenwirkung der Befestiger und der Montagekonstruktion genauer untersucht werden. In einer Studie könnten Randbedingungen für den Einsatz und die Kosten für die Baumaßnahme untersucht werden.

Weitere Einsatzbereiche sind Pfosten-Riegel-Konstruktionen und Brüstungsdämmung opaker, geschoßhoher Fensterelemente. Mögliche Konstruktionen werden be-

reits von A.-K. Kleinhempel 2005 vorgestellt [29], wurden bis jetzt jedoch noch nicht ausführlich untersucht.

### 8.3.5 Wiederverwertung

Zurzeit gibt es noch sehr wenige Daten zu Wiederverwertung von Resten der Produktion von VIPs und zur Recyclingfähigkeit ausgebauter Paneele. Beim Zuschnitt der Stützkerne maßgefertigter Paneele fällt viel Verschnitt an, der bisher entsorgt werden muss. Da das Stützkernmaterial sehr teuer ist, würde sich die Wiederverwertung des Verschnitts lohnen, wenn die Aufbereitung der Reste kostengünstig erfolgt, und die wärmetechnischen Eigenschaften der Paneele nicht leiden. Für eine Lebenszyklusbetrachtung von VIPs ist die Untersuchung der Recyclingfähigkeit ebenso ein wichtiger Punkt, der bisher kaum beachtet wird. Hier könnte erforscht werden, ob Stützkerne aus rückgebauten Paneelen wieder aufgearbeitet, und dem Produktionsprozess wieder zugeführt werden können. Durch die Wiederverwertung des Verschnitts und die Beimischung von rückgebautem Stützkernmaterial können die Rohstoffkosten gesenkt werden.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] *Arbeitsblatt Q 132 - Mineralwolle als Dämmstoff für betriebstechnische Anlagen.* **AGI Arbeitsgemeinschaft Industriebau e.V.** Lindau : Callwey Verlag, 2006.
- [2] **Fricke, Jochen, Beck, Andreas und Binder, Markus.** *Vakuum-Isolations-Paneele für Gebäude - ein Lehrbuch.* Würzburg : ZAE Bayern, 2007. ISBN 978-3-00-022618-2.
- [3] **Schwab, Hubert.** *Vakuumisulationspaneele - Gas- und Feuchteintrag sowie Feuchte- und Wärmetransport. Dissertation Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg.* Würzburg : s.n., 2004.
- [4] **Cremers, Jan.** *Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle - technologische, bauphysikalische und architektonische Aspekte. Dissertation der Technischen Universität München.* München : s.n., 2005.
- [5] **Spitzner, Martin H.** *Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit geschäumter Massen - Dissertation, TU Clausthal .* Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2000. ISBN 3-8167-4734-5.
- [6] *VDI-Wärmeatlas - Recherchieren - Berechnen - Konstruieren.* **Verein Deutscher Ingenieure - VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen.** Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1997.
- [7] **Zeitler, Martin G.** *Allgemein gültiges Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe und Stoffschichten - Dissertation Universität GHS Essen.* Olching : s.n., 2000.
- [8] **Simmler, Hans, et al.** *Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A). Forschungsbericht HiPTI - High Performance Thermal Insulation IEA/ECBCS Annex 39.* diverse : s.n., 2005.
- [9] **Reis, T.** *Einfluss von Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit von Vakuumisulationspaneelen.* s.l. : Diplomarbeit Universität Würzburg, 2003.
- [10] **Heinemann, Ulrich, et al.** *VIP-Bau - Vakuumisulationspaneele für die Anwendung im Bauwesen - Koordinations- und Informationsstelle und Qualitätskontrolle von Vakuumisulationspaneelen.* Würzburg : Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung ZAE Bayern, 2007. Report ZAE 2 - 0707 - 16 (2007).
- [11] *Informationsbroschüre Vakuumisulationspaneele (VIP) in der Baupraxis.* **Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).** Berlin : s.n., 2010.
- [12] *POLO Concept to manufacture VIP barrier film laminates based on hybrid barrier layers.* **Noller, Klaus.** Vortrag beim Arbeitskreis "Anwendung VIP in der Baupraxis" am 25. Mai 2009 in Würzburg : s.n.
- [13] *DIN EN ISO 12571:2000-04 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften.* Berlin : Beuth Verlag, 2000.

- [14] *Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Vakuumdämmplatten - Konferenzprotokoll der 1. Fachtagung am 10./11.06.2003 - VIP-Bau Vakuum Isolations Paneele - Evakuierte Dämmungen im Bauwesen.* **Caps, Roland.** Wismar : s.n., 2003.
- [15] *Tipps für VIPs - bauphysikalische Überlegungen zum Einsatz von Vakuumdämmung - Vortrag auf dem variotec Innovationstag in Feucht am 21. Januar 2010.* **Sprengard, Christoph.**
- [16] DIN EN 12667:2001-05 "Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswider. Berlin : Beuth Verlag, 2001.
- [17] DIN EN 12664:2001-05 Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät -. *Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12664:2001.* Berlin : Beuth Verlag, 2001.
- [18] **Simmler, H. und Brunner, S.** Vacuum insulation panels for building application - Basic properties, ageing mechanisms and service life. *Energy and buildings.* 2005, Bd. 37, S. 1122 - 1131.
- [19]. **Armin Binz et.al..** *HiPTI - High Performance Thermal Insulation - IEA/ECBCS Annex 39 - Vacuum Insulation in the Building Sector - Systems and Applications.* 2005.
- [20] *Einflussfaktoren auf die bauphysikalischen Eigenschaften von VIPs: Vom Labormesswert zum anwendungsbezogenen Bemessungswert.* **Gellert, Roland, Albrecht, Wolfgang und Sprengard, Christoph.** Gräfelfing : Tagungsbeitrag. VIP-Bau: 2. Fachtagung "Erfahrungen aus der Praxis" am 16./17.06.2005.
- [21] *Vom Messwert zum Bemessungswert - Anwendungsbezogene Prüfungen - Alterung und Zuschläge - Vortrag auf der VIP-Klausurtagung in Berlin am 5. Mai 2006.* **Sprengard, Christoph.**
- [22] DIN 4108-10:2008-06 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe. Berlin : Beuth Verlag, 2008.
- [23] **Binz, A., et al.** Vakuum-Dämmung im Baubereich vip-bau.ch. MuttENZ; Liestal; Dübendorf
- [24] *VIP Architektur - Gestaltungsmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit.* **Martin Pool, Pool Architekten, München.** Wismar : Tagungsbeitrag, 2005. VIP-Bau: 2. Fachtagung "Erfahrungen aus der Praxis" am 16./17.06.2005.
- [25] *BKI Objekte E1 - Niedrigenergie und Passivhäuser.* Stuttgart : BKI Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, 2001.
- [26] **Saint Gobain G+H Isover AG.** Preisliste VacuPad - Steildach; Innenausbau Wand; Innenausbau Decke. Ladenburg : s.n., 2010.
- [27] **va-Q-tec AG, Würzburg.** *Listenverkaufspreise 2010; Stand 15.1.2010.*

- [28] *Einsatz von VIPs zur kostengünstigen Problemlösung.* **Grobe, Carsten.** s.l. : Tagungsbeitrag.  
VIP-Bau: 2. Fachtagung "Erfahrungen aus der Praxis" am 16./17.06.2005.
- [29] *Innovative Dämmstoffe im Bauwesen - Forschungsstand und Marktübersicht.* **Keinhempel, A.-K.** Bremen : bremer energieinstitut, 2005.