

# Vakuum-Isolations-Paneele im Gebäudesektor

## Systeme und Anwendungen

Institut für Energie FHBB – Schweiz

EMPA – Schweiz

ZAE-Bayern – Deutschland

TU Delft – Niederlande

Dr.Eicher+Pauli AG – Schweiz

.....

Mit Unterstützung des

Bundesamtes für Energie

Dezember 2005

## **Auftraggeber**

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden  
Bundesamtes für Energie

## **Auftragnehmer**

Institut für Energie – Fachhochschule beider Basel Nordwestschweiz  
St. Jakobs-Strasse 84, CH-4132 Muttenz, info-energie@fhbb.ch, www.fhbb.ch/energie

## **Autoren**

Institut für Energie FHBB – Schweiz  
Armin Binz (Leitung IEA/ECBCS Annex 39 Teil B), Gregor Steinke, André Moosmann, Uwe Schonhardt, Franco Fregnan

EMPA – Schweiz  
Hans Simmler, Samuel Brunner, Karim Ghazi, Reto Bundi

ZAE-Bayern – Deutschland  
Ulrich Heinemann, Hubert Schwab

TU Delft – Niederlande  
Hans Cauberg, Martin Tenpierik

Dr.Eicher+Pauli AG – Schweiz  
Markus Erb (Leitung IEA/ECBCS Annex 39), Beat Nussbaumer

## **Begleitgruppe**

Herr Abegg (ZZWancor)  
Herr Arnold (ZZWancor)  
Herr Bründler (ZZWancor)  
Herr Derrer (Schneider Dämmtechnik)  
Herr Eichenberger (swisspor)  
Herr Fehr (Schneider Dämmtechnik)  
Herr Nikol (Nikol Multiplac)

Mark Zimmermann, Programmleiter Rationelle Energienutzung in Gebäuden, EMPA  
Andreas Eckmanns, Bereichsleiter Gebäude BFE

## **Danksagung**

Die Autoren danken allen Beteiligten, die Informationen zu diesem Forschungsprojekt beigetragen haben. Es wurden zahlreiche Bauprojekte begleitet, die nicht alle in dieser Studie dokumentiert werden konnten, da entweder mehrfach die gleiche Anwendung vorhanden war, sie keinen typischen Anwendungsfall darstellten oder technisch nicht mehr aktuell waren. Wertvolle Erkenntnisse über VIP konnten aus sämtlichen Projekten gewonnen werden.

Neben den in den Anwendungsbeispielen genannten verantwortlichen Personen möchten wir Herrn Derungs (Derungs Architekten) und Herrn Steffen (Jakob Hoehn + Partner) für die zur Verfügung gestellten Informationen und Dokumente danken.

2005

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet und basiert auf den Ergebnissen des IEA/ECBCS Annex 39 „HiPTI – High Performance Thermal Insulation“ Teil B „Vacuum Insulation in the Building Sector – Systems and Applications“. Für den Inhalt ist alleine der Studiennehmer verantwortlich.

## **Bundesamt für Energie BFE**

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: EMPA, 8600 Dübendorf (www.empa-ren.ch)

## Abstract

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) wurden bereits vor einiger Zeit für den Einsatz in Geräten, z.B. in Kühlschränken und Tiefkühltruhen, entwickelt. Ihre Dämmleistung liegt momentan um einen Faktor fünf bis acht über derjenigen von konventionellen Dämmstoffen. Im Bausektor eingesetzt, ermöglichen sie hochdämmende und gleichwohl schlanke Wand-, Dach- und Bodenkonstruktionen.

Die Einführung eines derart neuartigen Materials in der Bauwirtschaft ist aber mit vielen offenen Fragen und Risiken verbunden. Während eines vierjährigen Forschungsprojektes, das im Rahmen des IEA/ECBCS Annex 39 „HiPTI – High Performance Thermal Insulation“ durchgeführt wurde, untersuchte deshalb ein internationales Forscherteam die Grundlagen von Vakuum-Isolations-Paneelen und die Voraussetzungen, Risiken und optimalen Einsatzweisen dieser Materialien in der Bauwirtschaft. Vom Bundesamt für Energie im Rahmen des Programms „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ finanziert, war auf Schweizer Seite die Arbeitsgemeinschaft "vip-bau.ch" beteiligt, bestehend aus dem Institut für Energie der FHBB, der EMPA und der Dr.Eicher+Pauli AG. In enger Zusammenarbeit mit VIP-Anbietern in der Schweiz wurden im Rahmen eines Teilprojekts A grundlegende Fragen des Materials angegangen, während in einem Teil B Fragen der Anwendung von VIP im Bausektor untersucht wurden.

Die vorliegende Studie basiert auf den Ergebnissen des IEA/ECBCS Annex 39 Teil B und zeigt mit einer reichen Auswahl an Praxisbeispielen, wie heute dieses neue Material in der Bauwirtschaft eingesetzt wird, welche Erfahrungen gesammelt wurden und welche Schlussfolgerungen gezogen werden können. Neben Empfehlungen für den Praxiseinsatz von VIP konnten auch Fragen über die effektiv zu erwartenden Wärmedämmwerte heutiger VIP beantwortet werden.

## Inhalt

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ABSTRACT</b>   | <b>I</b>  |
| <b>1 ZUSAMMENFASSUNG</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 VIP FÜR GEBÄUDE – EINFÜHRUNG</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1 Entwicklung des Wärmedämmstandards von Gebäuden   | 5         |
| 2.2 Energieverbrauch im Gebäudesektor   | 5         |
| 2.3 Bedeutung von VIP für den Gebäudesektor   | 6         |
| 2.4 Vakuumdämmung heute   | 6         |
| <b>3 VIP – EIN NEUES MATERIAL FÜR DEN BAUSEKTOR</b>   | <b>7</b>  |
| 3.1 Alterungseffekte, Widerstandsfähigkeit und Ausfallrisiko  | 8         |
| 3.1.1 Planungswerte für die Wärmeleitfähigkeit  | 9         |
| 3.2 Wärmebrücken  | 10        |
| 3.2.1 Wärmebrücken-Randeffekt des Hüllmaterials   | 10        |
| 3.2.2 Einfluss angrenzender Bauteilschichten auf den Wärmebrücken-Randeffekt  | 14        |
| 3.2.3 Wärmebrücken der Randkonstruktion bei Fassadenpaneelen mit VIP  | 15        |
| 3.3 Ökobilanz von Vakuum-Isolations-Paneelen  | 19        |
| <b>4 PRAXISREPORT</b>   | <b>22</b> |
| 4.1 Boden- und Deckendämmung eines Atelier-Neubaus<br>Anbau an ein Einfamilienhaus in Zug/Schweiz                   | 22        |
| 4.2 Innendämmung und Lukarne bei einer Altbausanierung<br>Modernisierung eines Mehrfamilienhauses in Zürich/Schweiz | 27        |
| 4.3 Terrassendämmung in einer Neubausiedlung<br>Mehrfamilienhäuser in Kerzers/Schweiz                               | 32        |
| 4.4 Bodendämmung eines Kühl- und Tiefkühlraumes<br>Modernisierung eines Geschäftshauses in Winterthur/Schweiz       | 35        |
| 4.5 Nichttragende Sandwich-Elemente<br>Neubau eines Einfamilienhauses in Landschlacht/Schweiz                       | 38        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.6      | <b>Brüstungsdämmung in einem Fensterelement<br/>Mehrfamilienhausumbau mit Fensterersatz in Basel/Schweiz</b>                   | <b>43</b> |
| 4.7      | <b>Fassade mit vorfabrizierten Vakuumdämmelementen<br/>Reihenhäuser in Binningen/Schweiz</b>                                   | <b>46</b> |
| 4.8      | <b>Kompaktfassade mit Schienensystem<br/>Modernisierung eines Zweifamilienhauses in Nürnberg/Deutschland</b>                   | <b>47</b> |
| 4.9      | <b>Dämmung der Gebäudehülle eines Massivholzhauses<br/>Neubau eines Zweifamilienhauses in München/Deutschland</b>              | <b>48</b> |
| 4.10     | <b>Dämmung der Gebäudehülle eines Reihenhauses<br/>Modernisierung eines Reihemittelhauses in München/Deutschland</b>           | <b>49</b> |
| 4.11     | <b>Dämmung einer Wandheizung<br/>Sanierung einer ehemaligen Kirche in Wernfeld/Deutschland</b>                                 | <b>50</b> |
| 4.12     | <b>Fassadenpaneele in einer Pfosten-Riegel-Konstruktion<br/>Anbau am Krankenhaus in Erlenbach/Deutschland</b>                  | <b>51</b> |
| 4.13     | <b>Fassadenpaneel mit Heizkörper<br/>Testfassade im ZAE Bayern in Würzburg/Deutschland</b>                                     | <b>52</b> |
| 4.14     | <b>Vorgefertigte Beton-Fassadenelemente mit VIP<br/>Bürogebäude mit Apartment in Ravensburg/Deutschland</b>                    | <b>53</b> |
| 4.15     | <b>Kompaktfassade mit eingeschäumten VIP<br/>Einfamilienhaus in Passivhausbauweise in Bersenbrück/Deutschland</b>              | <b>54</b> |
| 4.16     | <b>Kompaktfassade mit Polystyrol-kaschierten VIP<br/>Reihenhäuser in Passivhausbauweise am Petrisberg in Trier/Deutschland</b> | <b>55</b> |
| 4.17     | <b>Kompaktfassade mit VIP und PU-Dämmung<br/>Neubau eines Wohn- und Geschäftshauses in München/Deutschland</b>                 | <b>56</b> |
| 4.18     | <b>Fussbodensanierung mit VIP<br/>Modernisierung des eza!-Hauses in Kempten/Deutschland</b>                                    | <b>57</b> |
| 4.19     | <b>Fussbodendämmung mit VIP<br/>Sanierung des historischen Gerichtsgebäudes in Schaffhausen/Schweiz</b>                        | <b>59</b> |
| 4.20     | <b>Fussbodenheizung mit VIP<br/>Modernisierung einer Sporthalle in Gemünden/Deutschland</b>                                    | <b>60</b> |
| <b>5</b> | <b>EINSATZ VON VIP – EMPFEHLUNGEN</b>  | <b>61</b> |
| 5.1      | <b>Gesamter Baubereich</b>   | <b>61</b> |
| 5.1.1    | Information / Beratung   | 61        |
| 5.1.2    | Wärmebrücken-Randeffekt  | 62        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 5.1.3      | Alterungseffekte                             | 62        |
| 5.1.4      | Detailbearbeitung                            | 62        |
| 5.1.5      | Dampfdiffusion, Feuchtigkeit und Temperatur  | 63        |
| 5.1.6      | Ersetzbarkeit der VIP                        | 63        |
| 5.1.7      | Handhabung von VIP                           | 64        |
| <b>5.2</b> | <b>VIP auf der Baustelle</b>                 | <b>64</b> |
| 5.2.1      | Allgemeine Empfehlungen                      | 64        |
| 5.2.2      | Bauteil Innendämmung                         | 66        |
| 5.2.3      | Terrassendämmung                             | 68        |
| <b>5.3</b> | <b>VIP in vorgefertigten Bauteilsystemen</b> | <b>70</b> |
| 5.3.1      | Allgemeine Empfehlungen                      | 70        |
| 5.3.2      | Fassadenpaneele mit VIP                      | 70        |
| 5.3.3      | Holzbausystem                                | 71        |
| 5.3.4      | Lukarne (Dachgaube)                          | 74        |
| <b>6</b>   | <b>ÖKONOMISCHE ASPEKTE</b>                   | <b>76</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Kosten</b>                                | <b>76</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Ökonomischer Nutzen</b>                   | <b>77</b> |
| 6.2.1      | Baulandersparnis                             | 77        |
| 6.2.2      | Nutzflächenmaximierung                       | 78        |
| <b>7</b>   | <b>ANNEX 39 – AUSBLICK</b>                   | <b>79</b> |
| <b>8</b>   | <b>LIEFERANTEN</b>                           | <b>81</b> |
|            | <b>LITERATURVERZEICHNIS</b>                  | <b>83</b> |



# 1 Zusammenfassung

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) wurden bereits vor einiger Zeit für den Einsatz in Geräten, z.B. in Kühlschränken und Tiefkühltruhen, entwickelt. Ihre Dämmleistung liegt um einen Faktor fünf bis acht über derjenigen konventioneller Dämmstoffe. Sie ermöglichen hochdämmende und gleichwohl schlanke Wand-, Dach- und Bodenkonstruktionen. Die Einführung eines derart neuartigen Materials in der Bauwirtschaft ist aber auch mit vielen offenen Fragen und Risiken verbunden.

Ein internationales Forscherteam arbeitete im Rahmen des IEA/ECBCS Annex 39 „HiPTI – High Performance Thermal Insulation“ während eines 2002-2005 durchgeführten Forschungsprojekts an verschiedenen Fragestellungen zu Vakuum-Isolations-Paneelen im Bausektor. In Teilprojekt A wurden Grundlagen von VIP untersucht [1], in Teilprojekt B standen Voraussetzungen, Risiken und optimale Einsatzweisen dieser Materialien im Bausektor im Mittelpunkt [2]. Finanziert vom Bundesamt für Energie war auf Schweizer Seite die Arbeitsgemeinschaft "vip-bau.ch" beteiligt, bestehend aus dem Institut für Energie der FHBB, der EMPA und der Dr. Eicher + Pauli AG. Zudem wurde die Bearbeitung der beiden Teilprojekte in enger Zusammenarbeit mit VIP-Anbietern durchgeführt.

Den Schwerpunkt der vorliegenden Studie bildet der Praxisreport, welcher aktuelle Anwendungen von VIP zeigt, spezielle Teilaspekte und offene Fragen behandelt. Die reiche Auswahl an Beispielen dokumentiert den Einsatz von VIP bei Neubauten und Modernisierungen in Boden- und Deckenkonstruktionen, Terrassendämmung, vorgefertigten Fassadenkonstruktionen, Kompaktfassaden, Sandwich-Elementen etc. Die Praxisbeispiele bieten sowohl für interessierte Planer und Anwender, als auch für Entwickler und zukünftige Anbieter von Bausystemen mit integrierten VIP eine breite Basis an Erfahrungen. Des Weiteren liefert der Bericht aktuelle Erkenntnisse über Alterung und Zuverlässigkeit, Wärmebrückeneffekte des Hüllmaterials, Angaben zur effektiven Wärmeleitfähigkeit einer VIP-Schicht und Empfehlungen für den Einsatz von VIP. Die Ergebnisse des IEA/ECBCS Annex 39 Forschungsvorhabens sind zudem auf der Homepage [www.vip-bau.ch](http://www.vip-bau.ch) dokumentiert. In der Schweiz fließen in der nächsten Phase die Erkenntnisse in anwendungsorientierte Forschungsprojekte ein, die auf die Entwicklung von vorgefertigten Bausystemen mit VIP abzielen und vom Bundesamt für Energie finanziell gefördert werden.

VIP sind wesentlich teurer als konventionelle Wärmedämmstoffe. Sie werden letztere nicht auf dem Markt ersetzen, wohl aber in sinnvoller Weise ergänzen. Der derzeitige Preis spiegelt jedoch die typische Dynamik der Markteinführung eines neuen Produktes wider. Darüber hinaus werden VIP von den Herstellern noch weiterentwickelt, verbessert und langfristig voraussichtlich preiswerter. Die höheren Kosten sind in vielen Fällen durch signifikante Vorteile gerechtfertigt. Ein wesentlicher Punkt ist die Platzersparnis im Vergleich zu herkömmlicher Wärmedämmung. Oftmals wäre eine ausreichende Wärmedämmung ohne VIP erst gar nicht möglich, in anderen Fällen kann durch die geringere Stärke der VIP-Konstruktionen wertvolle Nutzfläche gewonnen werden.

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) bestehen im Wesentlichen aus einem Kernmaterial, welches in einer Vakuumkammer in ein hoch gasdichtes Hüllmaterial eingeschweisst wird (Abbildung 1). Das Vakuum spielt dabei die Schlüsselrolle, denn die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes wird massgeblich durch die Wärmeleitung des eingeschlossenen Gases bestimmt. Durch die Evakuierung wird diese Gasleitung unterbunden. Für den Baubereich am

besten als Kernmaterial geeignet ist Kieselsäure, ein mineralisches, nanoporöses Pulver, das bereits bei Normaldruck sehr gute Wärmeleitfähigkeitswerte von nur  $18 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  aufweist. Die Wärmeleitfähigkeit eines gut evakuierten VIP beträgt unmittelbar nach der Herstellung ohne den Einfluss des Wärmebrücken-Randeffekts etwa  $4 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Die Wärmeleitfähigkeit einer VIP-Schicht wird jedoch durch den Wärmebrücken-Randeffekt aufgrund des Metallanteils im Hüllmaterial negativ beeinflusst. Die Auswirkungen dieser Wärmebrücken ist unterschiedlich, je nach Folientyp, Plattendicke und angrenzenden Materialien. Ausserdem kommt es aufgrund des Eindringens geringer Luft- und Wasserdampfmenngen durch die Hüllfolie zu einer langsamen Zunahme des Innendrucks und des Feuchtegehaltes, was zu einer stetigen Verschlechterung der Dämmfähigkeit führt.



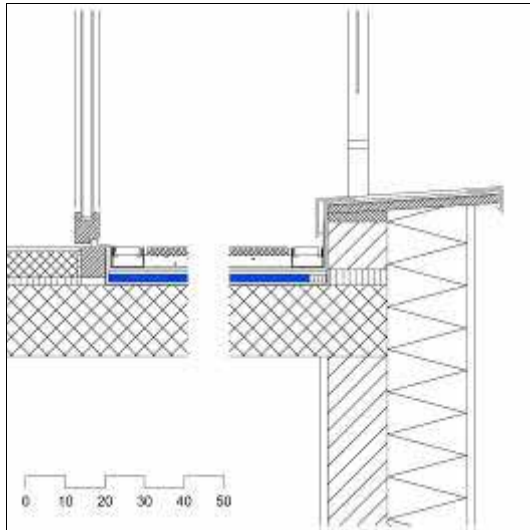
Abbildung 1: Vakuums-Isolations-Paneele (VIP) bestehen aus einem nanoporösen Kern, welcher im Vakuum in ein gasdichtes Hüllmaterial eingeschweisst wird.  
(Quelle: va-Q-tec)

Im Rahmen des Projektes „HiPTI – High Performance Thermal Insulation“ des IEA/ECBCS Annex 39 wurden zahlreiche Untersuchungen über die Alterungs- und Wärmebrückeneffekte durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse wird empfohlen, für die Anwendung im Bausektor bei heute zur Verfügung stehenden VIP mit metallisierten Hüllmaterialien eine Wärmeleitfähigkeit von  $8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und bei Hüllmaterialien mit Metallfolien eine Wärmeleitfähigkeit von  $6 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  anzusetzen. Dies sind Planungswerte für die Wärmeleitfähigkeit im ungestörten Bereich des Paneels, die Alterungseffekte über die Lebensdauer berücksichtigen und einen Sicherheitszuschlag beinhalten. Je nach Fabrikat, Abmessung und Einbausituation können die Werte angepasst werden. Der Einfluss des Wärmebrückenrandeffektes muss zusätzlich berücksichtigt werden und ist stark von der jeweiligen Konstruktion abhängig.

Der Einsatz neuer Materialien wirft immer auch die Frage nach den langfristigen ökologischen Folgen auf. Im Rahmen des Projektes wurde deshalb auch eine differenzierte Ökobilanz durchgeführt. Die Resultate zeigen, dass der Einsatz von VIP am Bau zu Umweltbelastungen (bzw. –entlastungen) in der gleichen Grössenordnung führt, wie der Einsatz konventioneller Dämmstoffe. Da die Belastung durch Dämmstoffe im Rahmen von Bauprozessen insgesamt sehr gering ist, kann auch bezüglich des Einsatzes von VIP aus ökologischer Sicht grünes Licht für deren Verwendung gegeben werden.



VIP werden heute vor allem direkt auf der Baustelle in die Konstruktion eingebaut. Am häufigsten werden VIP bei Flachdachterrassen eingesetzt. Es ist damit auf einfache Art möglich, eine hohe Stufe zwischen Innenraum und Terrasse zu vermeiden (Abbildung 2).

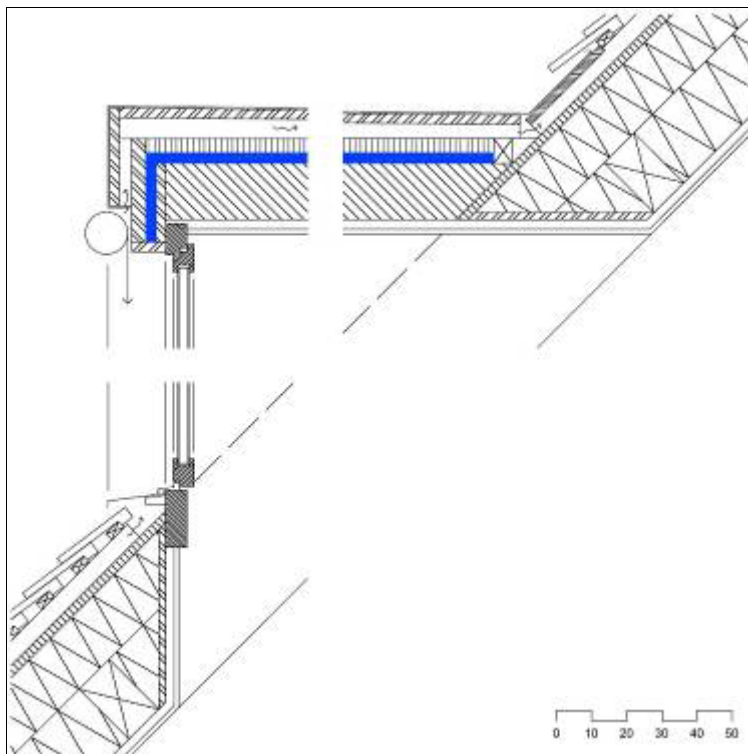


#### Bodenaufbau

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| Gehwegplatten                | 20 mm  |
| Stelzlager<br>(Entwässerung) | 30 mm  |
| PE Schaummatte               |        |
| Abdichtung                   |        |
| Gummischrotmatte             |        |
| VIP                          | 20 mm  |
| PE Schaummatte               |        |
| Dampfsperre                  |        |
| Betondecke                   | 200 mm |

Abbildung 2: Der Einbau von VIP in Dachterrassen ermöglicht eine einfache konstruktive Lösung für einen stufenlosen Übergang vom Innenraum auf die Dachterrasse.

Es ist zu erwarten, dass zukünftig auch vermehrt Bauprodukte und –systeme mit integrierten VIP auf den Markt gelangen (Abbildung 3). Die Verarbeitung von VIP in der geschützten Atmosphäre eines Produktionsbetriebes trägt der mechanischen Verletzlichkeit eher Rechnung, als der Einsatz auf der Baustelle.



#### Dachaufbau Lukarne

|                        |          |
|------------------------|----------|
| Blech-Dachdeckung      |          |
| Dreischichtplatte      | 27 mm    |
| Konterlattung, konisch | 40-60 mm |
| Unterdachbahn          |          |
| Weichfaserplatte       | 40 mm    |
| VIP                    | 30 mm    |
| Brettstapeldecke       | 160 mm   |
| Dampfbremse            |          |
| Lattung                |          |
| Vidiwal-Platte         | 12.5 mm  |

Abbildung 3: Vorfabrizierte Lukarnenkonstruktion. (Architekt: Viriden + Partner, Zürich)

Neben den „folienumhüllten“ VIP gibt es Vakuumdämmelemente in Form evakuierter Edelstahlkassetten, ebenfalls mit Kieselsäure als Kernmaterial. Diese Elemente können grossflächig hergestellt werden (bis zu drei mal acht Meter) und sind sehr gasdicht und robust (Abbildung 4).

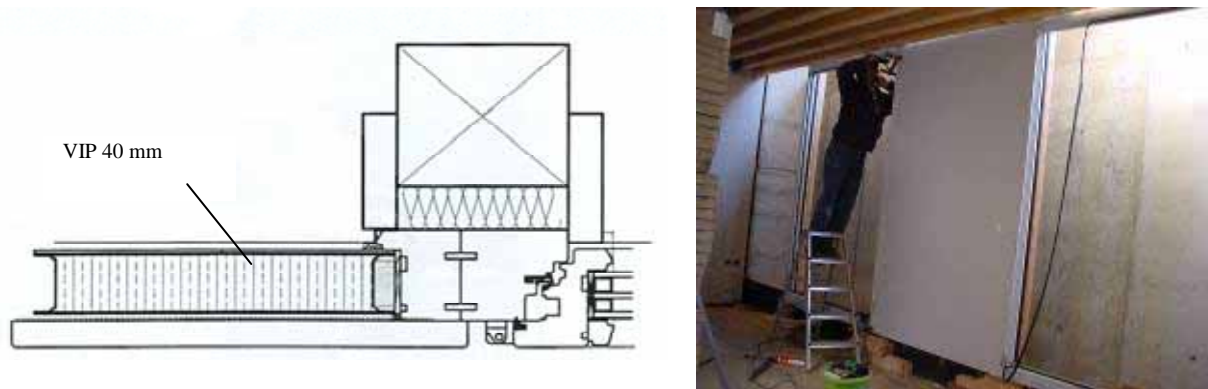


Abbildung 4: Fassade mit vorfabrizierten Vakuumdämmelementen in Binningen / Schweiz.  
Links: Horizontalschnitt durch die Konstruktion.  
rechts: Installation der raumhohen Vakuumdämmelemente.  
(Architekt: Feiner Pestalozzi, Basel; Fassadensystem: Häring AG, Schweiz)

VIP ist mehr als ein neues Material – es muss eher als System - von erheblicher Komplexität und Empfindlichkeit - betrachtet werden. Daher ist wichtig, dass sich alle Beteiligten möglichst früh informieren, beraten und während des gesamten Planungs- und Verarbeitungsprozesses fachlich begleiten lassen (vorzugsweise durch VIP-Lieferanten).

VIP müssen gut vor mechanischen Beschädigungen geschützt sein. Dies gilt sowohl für funktionsbedingte (z.B. Bodenbelastung) und ungewollte Belastungen (z.B. Dilatationen) sowie für nachträgliche Manipulationen (z.B. Bildernägeln). Zudem ist bei der Konzeption und Ausführung den diversen Anschlussdetails besondere Beachtung zu schenken, da vorstehende Bauteile und nachträgliche Befestigungen die VIP beschädigen können.

Bei VIP handelt es sich um dampfdichte Dämmsysteme, was bei der Planung der Schichtenreihenfolge, Schichtdicken eines Bauteils beachtet werden muss. Den Fugen zwischen einzelnen VIP und Fugen zwischen VIP-Bauteilen ist diesbezüglich besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Die Möglichkeit des Versagens einzelner Platten sollte als Risiko in die Planung und Ausführung einbezogen werden. Wünschbar wäre eine Strategie, die darauf abzielt, die VIP im Versagensfall ersetzen zu können. Das bedeutet zwei Dinge, die bisher aber meist nicht beachtet werden:

- Die VIP sollten so in die Konstruktion eingebettet sein, dass sie ersetzt werden können, ohne dass ein allzu grosser Folge- bzw. Vorbereitungsanfang nötig ist
- Einbau der VIP in einer Art und Weise, welche eine Überprüfung ihrer Funktionstauglichkeit, insbesondere mit Infrarot-Thermografie, ermöglicht.

In der Regel beschränkt man sich bisher darauf den Versagensfall so abzufedern, dass eine Verschlechterung des U-Wertes in Kauf genommen wird und sichergestellt wird, dass bei Vakuumverlust keine Komfort- oder Feuchte-Risiken entstehen.

## 2 VIP für Gebäude – Einführung

### 2.1 Entwicklung des Wärmedämmstandards von Gebäuden

Obwohl ein Grossteil der heute verfügbaren Wärmedämmstoffe bereits vor 1950 entwickelt wurde, setzte ihre breite Anwendung im Bausektor erst nach der Ölkrise 1973 ein. Die Wärmedämmung der Gebäudehülle ist die wichtigste Massnahme, Wärmeverluste zu reduzieren und die Energieeffizienz zu verbessern. Lange Zeit galten 10 cm Wärmedämmung mit Polystyrol, PU-Schaum oder Mineralwolle als guter Wärmedämmstandard. Nach der Einschätzung von Experten wird zukünftig das ökonomische Optimum je nach Klimazone bei 30-50 cm konventioneller Wärmedämmung liegen. Bereits heute gelten in einigen Ländern Vorschriften bezüglich des Wärmeschutzes der Gebäudehülle, die U-Werte von  $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  fordern, was Dämmstärken von ca. 20 cm entspricht. Viele Architekten sind gegenüber diesen Vorschriften aufgrund gestalterischer und konstruktiver Aspekte kritisch eingestellt. Insbesondere bei der Sanierung von Gebäuden sind grosse Dämmstärken wegen mangelndem Platz oder aus konstruktiven Gründen oft nicht realisierbar.

### 2.2 Energieverbrauch im Gebäudesektor

Es ist zu erwarten, dass die breite Einführung und Anwendung der Vakuumdämmtechnologie im Bausektor einen weit reichenden, positiven Einfluss auf die Umwelt haben wird. Die Zahlen in Tabelle 1 zeigen, dass die Wärmedämmung von Gebäuden mit Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) wesentlich dazu beitragen kann, das anspruchsvolle Ziel der EU zu erreichen, den Ausstoss an Klimagasen um 8% zu reduzieren (Kyoto Protokoll).

*Tabelle 1: Prozentuale Verteilung des Endenergieverbrauchs in Wohn- und Dienstleistungsgebäuden in der EU.  
(Quelle: EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden)*

| Wohnsektor    | [%] | Dienstleistungssektor | [%] |
|---------------|-----|-----------------------|-----|
| Raumheizung   | 57  | Raumheizung           | 52  |
| Warmwasser    | 25  | Warmwasser            | 9   |
| Elektrogeräte | 11  | Beleuchtung           | 14  |
| Kochen        | 7   | Bürogeräte            | 16  |
|               |     | Kochen                | 5   |
|               |     | Kühlung               | 4   |

Der gesamte Endenergieverbrauch betrug 1997 in der EU 930 Mtoe (Millionen Tonnen Erdöläquivalent). Die Betrachtung der prozentualen Verteilung des Verbrauchs verdeutlicht die grosse Bedeutung des Gebäudesektors: 41% des Gesamtverbrauchs fallen im Wohn- und im Dienstleistungssektor an, der Grossteil für gebäudebezogene Energiedienstleistungen (Tabelle 1). Davon werden etwa 10% durch erneuerbare Energien gedeckt. Der grösste Anteil des Endenergieverbrauchs in Haushalten wird in der EU für die Raumheizung benötigt (57%), gefolgt von der Warmwassererzeugung (25%) und dem Strombedarf für Beleuchtung und sonstigen elektrischen Verbrauchern. Im Dienstleistungssektor ist der Verbrauch für

Raumheizung etwas geringer (52%), während der Verbrauch für Beleuchtung (14%) und sonstige Verbraucher (16%) höher liegt.

Diese Zahlen verdeutlichen, dass 25% des Endenergieverbrauchs in der EU durch Energieumwandlungsprozesse in Gebäuden verursacht werden, die direkt mit Wärmedämmstandards in Zusammenhang stehen. Dies bezieht sich nicht nur auf die Gebäudehülle, sondern auch auf die Wärmeerzeugung, -speicherung und -verteilung, sowie auf Kühlschränke, Kühlgeräte und Kühlräume.

## 2.3 Bedeutung von VIP für den Gebäudesektor

Betrachtet man den Bestand der ca. 150 Millionen Wohngebäude in den EU-15-Staaten aufgeschlüsselt nach Baujahren, so wurden 32% vor 1945 errichtet, 40% zwischen 1945 und 1975 und 28% zwischen 1975 und 1995 (Referenzjahr 1995). Bezogen auf den gesamten Gebäudepark beträgt die Neubauquote jährlich lediglich 1-2%. Aus diesem Grund hängt die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von VIP in entscheidendem Masse von der Entwicklung anwendungsfreundlicher Bausysteme mit VIP für die Modernisierung bestehender, zum Grossteil nicht gedämmter Gebäude ab. Der Erfolg dieser Anwendungen wird nicht nur von technischen Lösungen, sondern auch von Vorschriften und zukünftigen Energiepreisen bestimmt werden. Insgesamt gesehen kann bei den bestehenden Gebäuden der Energieverbrauch mindestens um den Faktor drei gesenkt werden. Allein durch diese Reduktion im Gebäudesektor könnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der EU um 8% gesenkt werden, was dem Reduktionsziel der EU laut Kyoto Protokoll entspricht. Darüber hinaus ist der Ressourcenverbrauch von VIP-Bausystemen aufgrund schlanker Konstruktionen und wirtschaftlicher Recyclingmöglichkeiten geringer als bei konventionell gedämmten Systemen. Wird zudem berücksichtigt, dass der Einsatz von VIP im Bausektor nicht nur auf Europa beschränkt ist, eröffnet sich noch ein weitaus grösseres Reduktionspotential der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## 2.4 Vakuumdämmung heute

VIP kamen bislang hauptsächlich in sehr guten Kühl- und Tiefkühlschränken, sowie in Transportkühlboxen zur Anwendung. Die rasant wachsende japanische VIP-Industrie dominiert mit mehreren Millionen Paneelen über 50% des derzeit noch kleinen VIP-Weltmarktes. Die gebräuchlichsten Kernmaterialien sind pyrogene Kieselsäure und Fällungskieselsäure, offenporiges PU und verschiedene Produkte aus Glasfasern. Als Hüllmaterialien kommen sowohl Lamine mit Aluminiumfolien als auch metallisierte Lamine zum Einsatz.

Für die Anwendung in Gebäuden konzentrieren sich die meisten Aktivitäten noch auf Forschung und Entwicklung, einige Demonstrationsvorhaben sind bisher realisiert worden. Deutschland und die Schweiz sind derzeit die einzigen Länder, in denen sich schrittweise ein Markt für die Anwendung von VIP im Bausektor etabliert hat. Hier werden fast ausschliesslich Paneele mit pyrogener Kieselsäure eingesetzt. Aufgrund der geringen Porengrösse und der niedrigen Wärmeleitfähigkeit ist pyrogene Kieselsäure derzeit das beste Material für den Stützkörper der Vakuum-Isolations-Paneele. Momentan gibt es lediglich drei Firmen, die pyrogene Kieselsäure herstellen: Wacker (Deutschland), Cabot (USA) und Degussa (Deutschland).

### 3 VIP – Ein neues Material für den Bausektor

Für den Planer und Anwender ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) von zentraler Bedeutung. Um konkrete Werte dieser neuen Wärmedämmelemente für die Praxis angeben zu können, müssen vor allem Alterungs- und Wärmebrückeneffekte berücksichtigt werden. Im Unterschied zu herkömmlichen Wärmedämmstoffen, die meist aus einem homogenen Material bestehen, ist ein VIP aus unterschiedlichen Komponenten mit jeweils verschiedenen Eigenschaften und Funktionen aufgebaut (Abbildung 5). VIP haben feste Abmessungen und können nachträglich nicht zugeschnitten werden.



Abbildung 5: Komponenten eines VIP. Das Vlies gewährleistet im Herstellungsprozess die mechanische Stabilität des Kernmaterials und schützt die Produktionsumgebung während des Vakuumier- und Einschweißvorgangs vor Verunreinigung durch Kieselsäurepulver.  
(Quelle: va-Q-tec)

Vakuum-Isolations-Paneele bestehen im Wesentlichen aus einem offenporigen Kernmaterial, das in einer Vakuumkammer in ein hoch gasdichtes Hüllmaterial eingeschweisst wird. Das Vakuum spielt dabei die Schlüsselrolle, denn die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes wird maßgeblich durch die Wärmeleitung des eingeschlossenen Gases bestimmt. Durch die Evakuierung wird diese Gasleitung weitestgehend unterbunden.

Für den Baubereich ist als Kernmaterial am besten Kieselsäure geeignet, ein mineralisches, nanoporöses Pulver, das bereits bei Normaldruck sehr gute Wärmeleitfähigkeitswerte von  $18 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  aufweist, weshalb selbst bei Verlust des Vakuums immer noch eine gute Dämmwirkung erzielt wird. Je kleiner die Poren des Kernmaterials sind, desto geringer muss der Unterdruck sein, um die Wärmeleitung durch das eingeschlossene Gas zu unterbinden. Dank der Nanoporosität des Materials bestehen deshalb relativ geringe Anforderungen an das Vakuum (unter 10 mbar), was sich günstig auf die zu erwartende Lebensdauer der VIP auswirkt.

Die Hülle hat die wichtige Aufgabe, das erforderliche Vakuum über einen möglichst langen Zeitraum zu gewährleisten. Für die hoch gasdichten Hüllmaterialien werden heute meist mehrschichtig metallisierte polymere Lamine, seltener laminierte Metallfolien eingesetzt. Durch die Hülle dringt permanent eine geringe Luftmenge in das Paneel ein, weshalb sich der Innendruck langsam erhöht und das Wärmedämmvermögen reduziert. Je höher der Metallanteil des Hüllmaterials, umso langsamer läuft dieser Prozess ab. Ein höherer Metallanteil führt aber aufgrund der gleichzeitig höheren Wärmeleitfähigkeit der Hülle zu einem grösseren Wärmebrücken-Randeffekt. Für das Hüllmaterial gilt es demnach, im Hinblick auf einen minimalen Wärmebrücken-Randeffekt und maximale Gasdichtheit (Alterungseffekt) ein Optimum zu finden. Hierbei sind zukünftig noch grosse Fortschritte zu erwarten.

### 3.1 Alterungseffekte, Widerstandsfähigkeit und Ausfallrisiko

Die Wärmeleitfähigkeit eines gut evakuierten VIP (Innendruck unter 10 mbar) mit trockenem Kernmaterial aus pyrogener Kieselsäure beträgt unmittelbar nach der Herstellung ohne den Einfluss des Wärmebrücken-Randeffekts (centre of panel – cop) etwa  $\lambda_{cop} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Da der geringe Innendruck des VIP nicht mit den Druckverhältnissen der Umgebung im Gleichgewicht steht, wirkt der grosse Druckunterschied als treibende Kraft für das normalerweise langsame Eindringen atmosphärischer Gasmoleküle (hauptsächlich  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$ ) durch die Schweissnähte und die dünnen Metallschichten des Hüllmaterials. Dieser irreversible Anstieg des Innendruckes und die Ansammlung von Feuchtigkeit im hygroskopischen Stützkörper des VIP führt zu einer kontinuierlichen Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit des VIP und kann als Alterungsprozess bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu ist die Widerstandsfähigkeit eines VIP die Eigenschaft, mechanischen oder chemischen Einflüssen zu widerstehen, die Undichtigkeiten in der Hülle verursachen würden. Diese Beschädigungen der Hülle hätten einen relativ schnellen Anstieg des Innendruckes zur Folge.

Die Alterung bezüglich des kontinuierlichen Anstiegs des Wärmetransports sowohl durch die gasförmigen als auch durch die feuchter werdenden festen Bestandteile des Kernmaterials ist im Rahmen des IEA Annex 39 Teilprojekt A [1] für verschiedene Umgebungstemperaturen und Wasserdampfdruckverhältnisse detailliert untersucht worden [6]. Diesen Untersuchungen zufolge hängt die Geschwindigkeit des Alterungsprozesses von verschiedenen Parametern, wie der Art des Hüllmaterials, den Paneelabmessungen, insbesondere der Paneeldicke und von Temperatur und Feuchte in der jeweiligen Konstruktion im eingebauten Zustand ab. Für die heute meist eingesetzten Hüllmaterialien, mehrschichtig metallisierte polymere Filme, wurden unter typischen Einsatzbedingungen (23 bis 25 °C und 50% rel. Luftfeuchte) durch laborgestützte Alterungsversuche Maximalwerte für den Druckanstieg und die Zunahme des Feuchtegehalts ermittelt (Tabelle 2). Wird eine Langzeitbetrachtung über den Zeitraum von 25 Jahren vorgenommen (in Übereinstimmung mit den Europäischen Standards für Wärmedämmstoffe [7]), verläuft der Druckanstieg über die gesamte Periode nahezu linear, beim Feuchtegehalt hingegen kann über diese Zeitspanne eine Sättigung eintreten (ca. 0.04 kg/kg). Es lässt sich der Einfluss der Zunahme des Innendruckes und der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit ableiten. Die in Tabelle 2 angegebenen Werte für die Wärmeleitfähigkeit sind Maximalwerte verschiedener Fabrikate, ohne Berücksichtigung des Wärmebrücken-Randeffektes und gelten für die Anwendung von VIP unter typischen Temperatur- und Wasserdampfdruckverhältnissen. Bei einer geringeren Gasdurchlässigkeit des Hüllmaterials können diese Werte reduziert werden. Es sollten möglichst dicke Paneele eingesetzt werden, da der Einfluss der Alterungseffekte mit grösserer Paneeldicke wegen des günstigeren Oberfläche-Volumen-Verhältnisses wesentlich abnimmt.



*Tabelle 2: Alterungseffekte der VIP: Zunahme des Innendrucks und des Feuchtegehalts. Maximalwerte für verschiedene VIP-Fabrikate (Hüllmaterial aus metallisierten polymeren Laminaten). Wärmeleitfähigkeit eines gut evakuierten, trockenen VIP ohne den Einfluss des Wärmebrücken-Randeffekts:  $\lambda_{cop} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .*

| VIP-Abmessungen                                     |                | 50 x 50 x 2 cm <sup>3</sup> | 100 x 100 x 2 cm <sup>3</sup> |
|---|----------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Anstieg des Innendrucks                             | [mbar/Jahr]    | 2                           | 1                             |
| Zunahme des Feuchtegehalts                          | [kg/(kg Jahr)] | $2 \cdot 10^{-3}$           | $2 \cdot 10^{-3}$             |
| Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{cop}$ (nach 25 Jahren) | [W/(m·K)]      | $8 \cdot 10^{-3}$           | $7 \cdot 10^{-3}$             |

Risiken für ein Vakuumversagen der VIP beim Einsatz in geeigneten Konstruktionen bestehen hauptsächlich vor oder während des Einbaus. Eine bestimmte Ausfallrate ist durch Materialfehler und Störungen im Herstellungsprozess in der Fabrik bedingt. Dieses Risiko kann im Wesentlichen durch eine entsprechende Qualitätskontrolle bei der Fertigung minimiert werden. Da die meisten produktionsbedingten Ausfälle in den ersten Tagen nach der Herstellung auftreten, werden die VIP vor der Auslieferung über einen bestimmten Zeitraum unter definierten Bedingungen gelagert und anschliessend noch einmal kontrolliert. Es ist festzustellen, dass sich in den letzten Jahren die Zahl der in fehlerhaftem Zustand ausgelieferten VIP stark reduziert hat (unter ein Prozent). Weitaus häufiger treten Ausfälle beim Transport und bei der Verarbeitung der Paneele auf. Werden die VIP hier nicht entsprechend geschützt, besteht ein hohes Risiko der Beschädigungen der Hülle z.B. durch scharfkantige Werkzeuge, Ecken anderer Paneele, Steine, Sandkörner, Unebenheiten des Untergrundes oder raue Oberflächen. Die Kanten und Ecken der Paneele sind hier besonders gefährdet. Das Ausfallrisiko ist sehr gering, sobald die Vakuum-Isolations-Paneele fachgerecht in geeignete Konstruktionen eingebaut worden sind.

### 3.1.1 Planungswerte für die Wärmeleitfähigkeit

Auf Grundlage der Untersuchungen zur Alterung von VIP können Empfehlungen für Planungswerte der Wärmeleitfähigkeit angegeben werden (Tabelle 3). Wärmebrücken-Randeffekte sind in diesen  $\lambda_{cop}$ -Werten nicht berücksichtigt.

*Tabelle 3: Schweizer Planungswerte der Wärmeleitfähigkeit,  $\lambda_{cop}$ , ohne den Einfluss des Wärmebrücken-Randeffekts, für VIP mit Hüllmaterialien bestehend aus laminierten Aluminiumfolien oder mehrlagig metallisierten polymeren Filmen.*

| Planungswerte                            |           | $\lambda_{cop}$   |
|--|-----------|-------------------|
| <b>AF: laminierte Aluminiumfolie</b>     | [W/(m·K)] | $6 \cdot 10^{-3}$ |
| <b>MF: mehrlagig metallisierter Film</b> | [W/(m·K)] | $8 \cdot 10^{-3}$ |

In der Schweiz wird ein Sicherheitszuschlag von  $4 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  zum Wärmeleitfähigkeitswert von  $4 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  eines neuen, gut evakuierten VIP mit metallisiertem Hüllmaterial hinzuge-rechnet. Ein Teil des Zuschlags,  $2 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , ist durch die Zunahme des Feuchtegehalts bedingt, die langfristig über 4 Massen-Prozent betragen kann. Der andere Teil wird durch den Anstieg des Innendrucks (ca. 50 mbar über 25 Jahre) verursacht, was zu einem Zuschlag von weiteren  $2 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  führt. Für Hüllmaterialien mit Aluminiumfolien beträgt der

empfohlene Zuschlag  $2 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Diese Werte beziehen sich auf Alterungseffekte über eine Zeitspanne von 25 Jahren, beinhalten entsprechende Sicherheiten und spiegeln die Eigenschaften derzeit verfügbarer Produkte wider. Mit zukünftig verbesserten Hüllmaterialien und besseren Ausgangseigenschaften (geringerer Innendruck und Feuchtegehalt) können diese Werte reduziert werden, entsprechende Herstellergarantien vorausgesetzt.

## 3.2 Wärmebrücken

Wärmebrücken sind Bereiche in Baukonstruktionen, die im Vergleich zur umgebenden Konstruktion lokal einen höheren Wärmefluss bzw. lokal auf der Warmseite eine geringere Oberflächentemperatur aufweisen. Die Folge ist ein höherer Wärmeverlust durch die Gebäudehülle, sowie ein erhöhtes Kondensationsrisiko im Bereich der Wärmebrücken an der Innenoberfläche der Gebäudehülle. Für den optimalen Einsatz von VIP ist es daher entscheidend, Wärmebrücken zu vermeiden oder zumindest zu minimieren. Aufgrund ihrer Beschaffenheit können gewisse thermische Schwachstellen nicht vollkommen vermieden werden.

Beim Einsatz von VIP ist der Einfluss folgender Wärmebrücken zu beachten:

1. Wärmebrücken im Randbereich der VIP selbst, aufgrund höherer Wärmeleitfähigkeit der metallischen Schichten des Hüllmaterials der VIP
2. Wärmebrücken im Bereich aneinander angrenzender VIP, aufgrund nicht gänzlich vermeidbarer Luftspalte zwischen den VIP
3. Wärmebrücken der umgebenden Konstruktion, aufgrund statisch und konstruktiv erforderlicher Durchdringungen und Schwächungen der Dämmebene.

### 3.2.1 Wärmebrücken-Randeffekt des Hüllmaterials

VIP sind aufgrund der sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit ihrer einzelnen Komponenten ein ausgesprochen inhomogenes Wärmedämmmaterial. Wegen der minimierten Wärmeleitung durch die festen Bestandteile des Kernmaterials und die fast vollständig unterbundene Gasleitung in den Poren liegt die Wärmeleitfähigkeit eines VIP bei einem niedrigen Innendruck bis max. 100 mbar bei unter  $10 \cdot 10^{-3}$  Watt pro Meter und Kelvin. Im Gegensatz dazu haben die Aluminiumschichten der Hüllmaterialien, die diesen geringen Innendruck erst ermöglichen, eine um das vielfache höhere Wärmeleitfähigkeit von etwa 200 Watt pro Meter und Kelvin. Da das stärker leitende Hüllmaterial im Randbereich des Panels von der kalten zur warmen Seite direkt übergeht, entsteht hier ein erhöhter Wärmefluss (Abbildung 6).

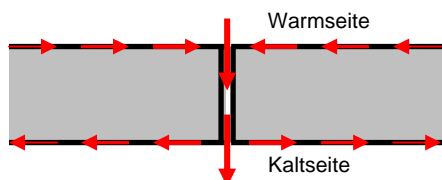


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wärmebrückensituation am Rand bzw. im Stossbereich von VIP.

Wegen dieses Wärmebrückeneffekts ist die effektive Wärmeleitfähigkeit,  $\lambda_{eff}$ , eines Vakuuminulations-Paneels höher als die von Randeffekten ungestörte Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{cop}$ . Die Höhe des erforderlichen Wärmebrückenzuschlags wird zudem von den unmittelbar an das

VIP angrenzenden Materialschichten beeinflusst. Dieser Zuschlag berücksichtigt die sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Komponenten des Materials selbst, den Luftspalt zwischen einzelnen VIP und den Einfluss angrenzender Materialschichten. Mit anderen Worten entspricht die effektive Wärmeleitfähigkeit einer VIP-Schicht der Leitfähigkeit eines homogenen Materials mit vergleichbaren thermischen Eigenschaften.

Diese effektive Wärmeleitfähigkeit kann wie folgt berechnet werden:

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

|                        |  |                   |
|------------------------|--|-------------------|
| $\lambda_{\text{cop}}$ | Wärmeleitfähigkeit ohne Wärmebrücken-Randeffekt          | [W/(m·K)]         |
| $d$                    | Dicke des VIP (in Richtung des Wärmeflusses)             | [m]               |
| $A$                    | Fläche des VIP (senkrecht zur Richtung des Wärmeflusses) | [m <sup>2</sup> ] |
| $\rho$                 | Umfang der Fläche $A$                                    | [m]               |
| $\Psi_{\text{VIP}}$    | längenbezogener Wärmebrückenkoeffizient                  | [W/(m·K)]         |

Der längenbezogene Wärmebrückenkoeffizient,  $\Psi_{\text{VIP}}$ , in Gleichung (1) ist abhängig von der Paneeldicke,  $d$ , der Wärmeleitfähigkeit ohne Einfluss des Wärmebrücken-Randeffekts,  $\lambda_{\text{cop}}$ , der Dicke des Hüllmaterials,  $t_f$ , und deren Wärmeleitfähigkeit,  $\lambda_f$ . Für verschiedene Hüllmaterialien und angrenzende Materialien mit verschiedenen thermischen Eigenschaften ergeben sich unterschiedliche  $\Psi_{\text{VIP}}$ -Werte.

Abbildung 7 bis Abbildung 9 zeigt  $\Psi_{\text{VIP}}$ -Werte für verschiedene Aluminiumfolien, Edelstahlfolien und einen dreilagig metallisierten polymeren Film. Der längenbezogene Wärmebrückenkoeffizient für VIP der Dicke 10 bis 40 mm mit einer 10  $\mu\text{m}$  Aluminiumfolie liegt zwischen  $34 \cdot 10^{-3}$  und  $55 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K), mit einer 50  $\mu\text{m}$  Edelstahlfolie von  $15 \cdot 10^{-3}$  bis  $38 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K) und für den dreilagig metallisierten Film zwischen  $2 \cdot 10^{-3}$  und  $4 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K). Luftspalte zwischen angrenzenden VIP und Schweissnähte der Hüllmaterialien sind nicht berücksichtigt.

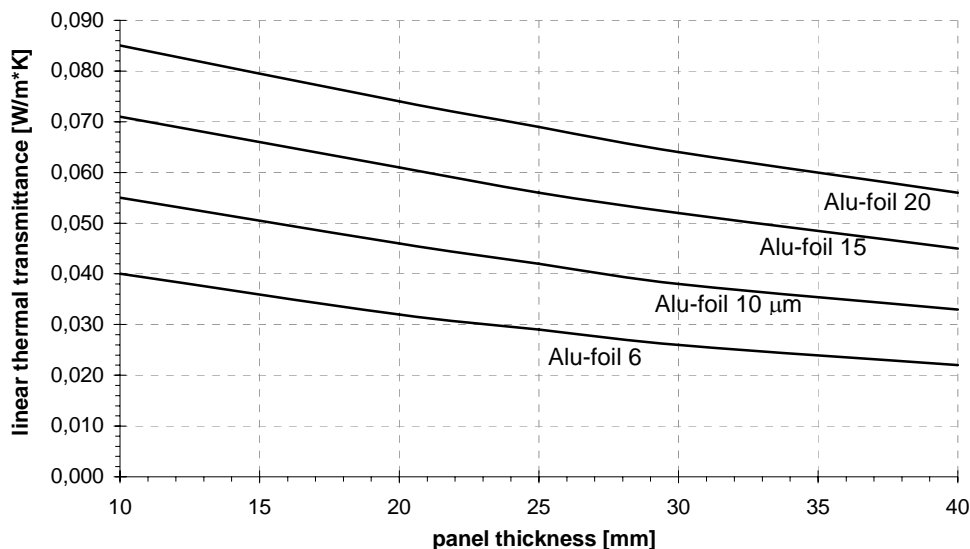


Abbildung 7: Der numerisch ermittelte Einfluss der Paneeldicke auf den längenbezogenen Wärmebrückenkoeffizient,  $\Psi_{\text{VIP}}$ , verschiedener Aluminiumfolien,  $\lambda_{\text{foil}} = 200$  W/(m·K);  $\lambda_{\text{cop}} = 4 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K).

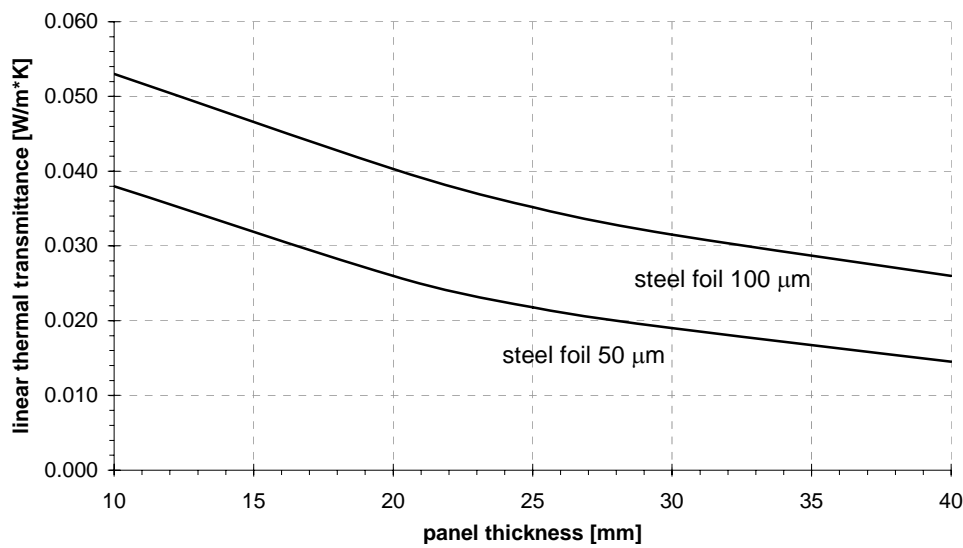


Abbildung 8: Der numerisch ermittelte Einfluss der Paneeldicke auf den längenbezogenen Wärmebrückenkoeffizient,  $\Psi_{VIP}$ , verschiedener Edelstahlfolien;  $\lambda_{foi} = 25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $\lambda_{cop} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

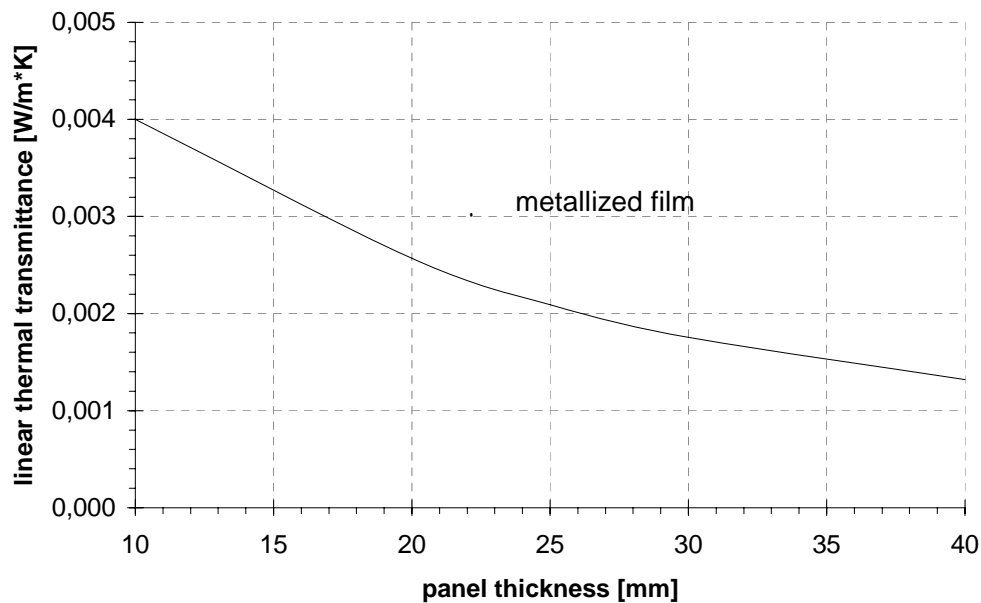


Abbildung 9: Der numerisch ermittelte Einfluss der Paneeldicke auf den längenbezogenen Wärmebrückenkoeffizient,  $\Psi_{VIP}$ , eines dreilagig metallisierten Films;  $\lambda_{cop} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

Darüber hinaus wurden an der EMPA Messungen des Wärmebrücken-Randeffektes verschiedener Hüllmaterialien durchgeführt, die auch den Einfluss der Art und Lage der Schweissnähte zeigen [3]. In Tabelle 4 sind diese Ergebnisse wiedergegeben. Die  $\Psi_{VIP}$ -Werte für die verwendeten Materialproben mit Schweissnähten sind erwartungsgemäss höher, als die oben dargestellten numerisch ermittelten Werte ohne Schweissnähte.

Tabelle 4: Untersuchung des Wärmebrücken-Randeffekts verschiedener VIP mit unterschiedlichen Hüllmaterialien und Schweißnähten, durchgeführt an der EMPA [3].

| VIP   | Beschreibung   | d [m] | $\lambda_{cop}$ [W/(m·K)]       | $\Psi_{VIP}$ [W/(m·K)]           |
|-------|--|-------|---------------------------------|----------------------------------|
| Typ A | Hüllmaterial, metallisiert mit insgesamt 90 nm Aluminium und einer über die Kante gefalteten, grossen Schweißnaht  | 0.020 | $(4.14 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$ | $(6.96 \pm 1.63) \cdot 10^{-3}$  |
| Typ B | Hüllmaterial, metallisiert mit insgesamt 300 nm Aluminium und einer über die Kante gefalteten, kleinen Schweißnaht | 0.020 | $(3.91 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$ | $(9.19 \pm 1.63) \cdot 10^{-3}$  |
| Typ C | Hüllmaterial mit 8 $\mu$ m Aluminiumfolie und einer über die Kante gefalteten, grossen Schweißnaht                 | 0.018 | $(3.95 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$ | $(52.44 \pm 3.34) \cdot 10^{-3}$ |

Auf Grundlage der an der EMPA ermittelten  $\Psi_{VIP}$ -Werte und Gleichung (1) wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit,  $\lambda_{eff}$ , für VIP der Dicke 20 mm für verschiedene Hüllmaterialien ermittelt. Abbildung 10 zeigt die  $\lambda_{eff}$ -Werte für eine 8  $\mu$ m Aluminiumfolie ( $\Psi_{VIP} = 33 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K)), eine 50  $\mu$ m Edelstahlfolie ( $\Psi_{VIP} = 26 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K)) und einen dreilagig metallisierten Film ( $\Psi_{VIP} = 6 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K)) in Abhängigkeit zum Verhältnis von Paneelumfang zur Paneelfläche. Die Werte gelten für VIP mit einem  $\lambda_{cop} = 6 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K) für Metallfolien und  $\lambda_{cop} = 8 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K) für metallisierte Filme, ohne den Einfluss angrenzender Materialien (siehe dazu Kapitel 3.2.2).

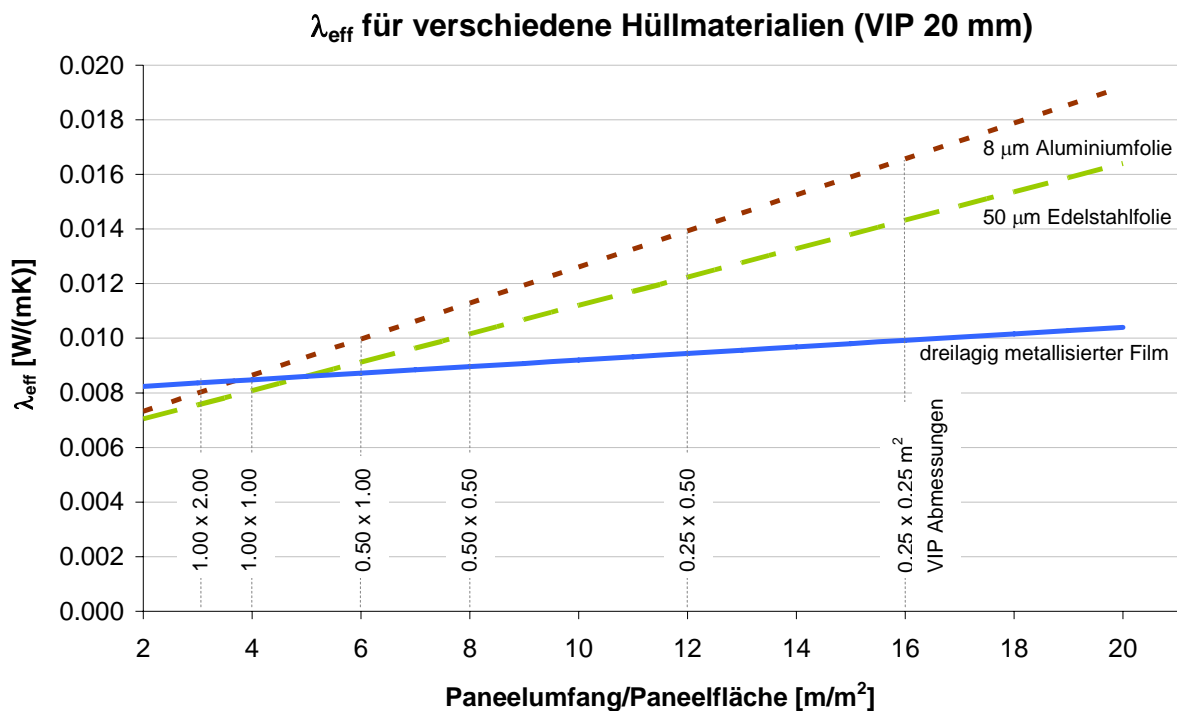


Abbildung 10: Effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit zu den Paneelabmessungen für VIP 20 mm mit verschiedenen Hüllmaterialien;

Metallfolie:  $\lambda_{cop} = 6 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K), metallisierter Film:  $\lambda_{cop} = 8 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K).

### 3.2.2 Einfluss angrenzender Bauteilschichten auf den Wärmebrücken-Randeffekt

Der längenbezogene Wärmebrückenkoeffizient,  $\Psi_{VIP}$ , wird massgeblich von den unmittelbar das VIP umgebenden Materialschichten beeinflusst. An der EMPA ist der Einfluss verschiedener angrenzender Materialien untersucht worden. Die Berechnungen wurden für ein VIP (20 mm) mit metallisiertem Hüllmaterial für die angrenzenden Materialien Metall, Glas, Holz und Wärmedämmung jeweils ohne Luftspalt zwischen den VIP und mit einem 5 mm Luftspalt zwischen den VIP durchgeführt (Programm TRISCO). Tabelle 5 zeigt die resultierenden  $\Psi_{VIP}$ -Werte für die Materialkombinationen.

Tabelle 5: Einfluss angrenzender Schichten auf den längenbezogenen Wärmebrückenkoeffizient,  $\Psi_{VIP}$ ;

VIP mit dreilagig metallisiertem Film,  $\lambda_{cop} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

| Materialien                                     | 2 mm Stahl<br>20 mm VIP<br>2 mm Stahl | 5 mm Glas<br>20mm VIP<br>5 mm Glas | 20 mm Holz<br>20 mm VIP<br>20 mm Holz | 5 mm Dämmung XPS<br>20 mm VIP<br>5 mm Dämmung XPS |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|
| $\Psi_{VIP} [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ |                                       |                                    |                                       |   |
| ohne Luftspalt                                  | $11 \cdot 10^{-3}$                    | $9 \cdot 10^{-3}$                  | $6 \cdot 10^{-3}$                     | $5 \cdot 10^{-3}$                                 |
| 5 mm Luftspalt                                  | $19 \cdot 10^{-3}$                    | $16 \cdot 10^{-3}$                 | $10 \cdot 10^{-3}$                    | $7 \cdot 10^{-3}$                                 |

Basierend auf diesen Ergebnissen sind in Abbildung 11 die  $\lambda_{eff}$ -Werte für VIP der Grösse  $50 \times 50 \text{ cm}^2$ ,  $50 \times 100 \text{ cm}^2$  und  $100 \times 100 \text{ cm}^2$  bei einem  $\lambda_{cop}$  von  $8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  wiedergegeben. An VIP angrenzende Materialschichten mit einer hohen thermischen Leitfähigkeit führen zu einer deutlichen Verschlechterung der  $\lambda_{eff}$ -Werte. Nach Möglichkeit sind daher Dämmmaterialien, Holz oder andere Stoffe geringer Wärmeleitfähigkeit einzusetzen. Zudem steigt der Einfluss des Randeffektes mit abnehmender Paneelgrösse an, weshalb möglichst grosse, quadratische Paneele gewählt werden sollten.

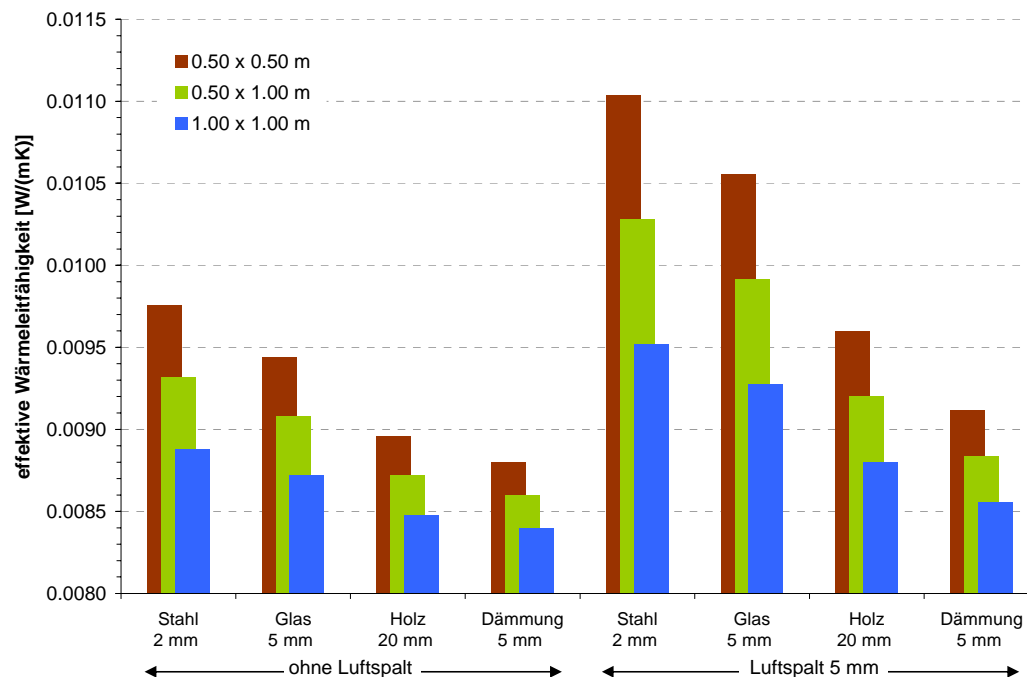


Abbildung 11: Effektive Wärmeleitfähigkeit,  $\lambda_{eff}$ , in Abhängigkeit verschiedener angrenzender Materialien für unterschiedliche Paneelgrössen; VIP 20 mm, dreilagig metallisierter Film,  $\lambda_{cop} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .



### 3.2.3 Wärmebrücken der Randkonstruktion bei Fassadenpaneelen mit VIP

Für die thermischen Eigenschaften von Fassadenpaneelen mit integrierten VIP ist die Art der Randausbildung von grosser Bedeutung. Zwei verschiedene Paneelkonstruktionen werden hier näher betrachtet: Sandwichkonstruktionen und Randverbundkonstruktionen (Abbildung 12).

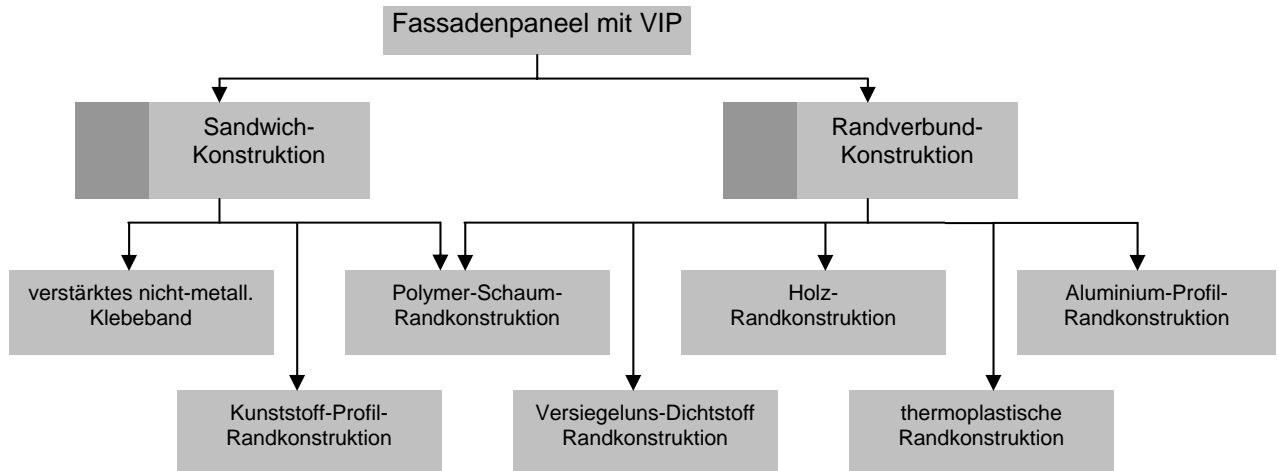


Abbildung 12: Verschiedene Randkonstruktionen bei Fassadenpaneelen.

Der Unterschied liegt in der Last abtragenden Funktion der einzelnen Systemkomponenten. Bei der Randverbundkonstruktion sind die innere und äussere Deckschicht durch einen Lasten übertragendes Randprofil miteinander verbunden. Bei der Sandwichkonstruktion sind die Deckschichten jeweils vollflächig mit dem Kern verbunden und bilden somit eine strukturelle Einheit. Im Gegensatz zur Randverbundkonstruktion wird hier kein Element zur Verbindung der beiden Deckschichten am Paneelrand benötigt. Um das Risiko einer Beschädigung des VIP zu reduzieren, ist hier ein Schutz (z.B. Gewebeklebeband, Kunststoffprofil) zu empfehlen. Insbesondere bei den Randverbundkonstruktionen entsteht durch das Randprofil eine erheblicher Wärmebrückeneffekt. Um die  $\psi$ -Werte für verschiedene Randkonstruktionen zu ermitteln, wurden an der TUDelft Berechnungen mit dem Simulationsprogramm TRISCO durchgeführt. Die untersuchten Konstruktionen sind in Abbildung 13 dargestellt.

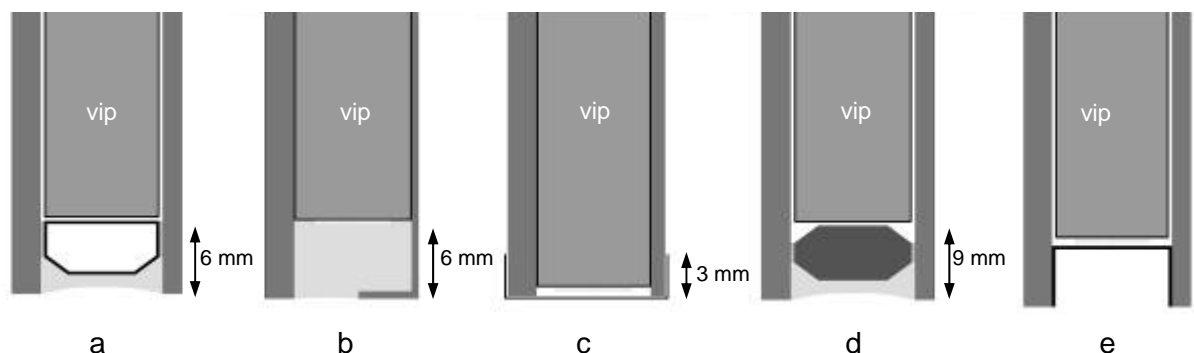


Abbildung 13: Verschiedene Randkonstruktionen: a) Aluminiumprofil-Randverbund; b) Butyl-Versiegelung; c) verstärktes, nicht-metallisches Klebeband (0.15 mm); d) optimierter thermoplastischer Randverbund (Henkel Tereson); e) Kunststoff U-Profil.

Die Berechnungen der verschiedenen Randkonstruktionen basiert auf folgenden Daten:

- Konstruktion a: Standard Aluminiumprofil-Randverbund ( $\lambda = 225 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )  
 Polysulfid Versiegelung ( $\lambda = 0.40 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )  
 Silikon Versiegelung ( $\lambda = 0.35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
- Konstruktion b: Butyl-Versiegelung ( $\lambda = 0.24 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
- Konstruktion c: nicht-metallisiertes Klebeband ( $\lambda = 0.33 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ); Dicke = 0.15 mm
- Konstruktion d: thermoplastischer Randverbund ( $\lambda = 0.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )  
 Polysulfid Versiegelung ( $\lambda = 0.40 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
- Konstruktion e: Kunststoff U-Profil ( $\lambda = 0.40 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ); Dicke = 0.5 und 1.0 mm  
 Verklebung ( $\lambda = 1.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
- VIP: Dicke 20 mm; drei Hüllmaterialien:  
 6  $\mu\text{m}$  Aluminiumfolie ( $\lambda_{\text{cop}} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )  
 Mylar Film ( $\lambda_{\text{cop}} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )  
 3-lagig metallisierter Film ( $\lambda_{\text{cop}} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )

Tabelle 6 und Tabelle 7 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen des längenbezogenen Warmebruckenoeffizienten,  $\Psi$ . Der Warmebruckeneffekt ist für die metallisierten Filme geringer als für das Hüllmaterial mit laminiertes Aluminiumfolie. Dieser Effekt wird allerdings durch die geringere Gasdurchlässigkeit der Aluminiumfolie teilweise kompensiert, da mit Berücksichtigung der Alterung hier ein  $\lambda_{\text{cop}}$  von  $6 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  im Gegensatz zu einem  $\lambda_{\text{cop}}$  von  $8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  für die Filmmaterialien angesetzt wird. Für die innere und äussere Deckschicht des Paneels sind Materialien geringerer Wärmeleitfähigkeit von Vorteil. Die berechneten  $\Psi$ -Werte beziehen sich auf die Kante eines Paneels. Für zwei angrenzende Paneele müssen die Werte demnach zweimal berücksichtigt werden.

Tabelle 6: Längenbezogener Warmebruckenoeffizient,  $\Psi$ , für die Fassadenpaneelkonstruktionen a) bis d) mit verschiedenen Materialien.

|     |                           | Glas 6 mm  |  |                     |                     |
|-----|---------------------------|--|--|---------------------|---------------------|
|     |                           | Wärmedämmung: Vakuum-Isolations-Paneel 20 mm             |  |                     |                     |
|     |                           | innere Schicht: Trespa 3 mm Aluminium 1.5 mm Stahl 0.75 mm |  |                     |                     |
| Typ | VIP-Hüllmaterial         | $\lambda_{\text{cop}}[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$   | $\Psi[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ |                     |                     |
| a   | 6 $\mu\text{m}$ Aluminium | $6 \cdot 10^{-3}$  | $127 \cdot 10^{-3}$                      | $347 \cdot 10^{-3}$ | $253 \cdot 10^{-3}$ |
|     | Mylar Film                | $8 \cdot 10^{-3}$  | $101 \cdot 10^{-3}$                      | $297 \cdot 10^{-3}$ | $223 \cdot 10^{-3}$ |
| b   | 6 $\mu\text{m}$ Aluminium | $6 \cdot 10^{-3}$  | $61 \cdot 10^{-3}$                       | $138 \cdot 10^{-3}$ | $117 \cdot 10^{-3}$ |
|     | Mylar Film                | $8 \cdot 10^{-3}$  | $44 \cdot 10^{-3}$                       | $101 \cdot 10^{-3}$ | $88 \cdot 10^{-3}$  |
| c   | 6 $\mu\text{m}$ Aluminium | $6 \cdot 10^{-3}$  | $53 \cdot 10^{-3}$                       | $65 \cdot 10^{-3}$  | $62 \cdot 10^{-3}$  |
|     | Mylar Film                | $8 \cdot 10^{-3}$  | $10 \cdot 10^{-3}$                       | $11 \cdot 10^{-3}$  | $11 \cdot 10^{-3}$  |
| d   | 6 $\mu\text{m}$ Aluminium | $6 \cdot 10^{-3}$  | $87 \cdot 10^{-3}$                       | $106 \cdot 10^{-3}$ | $100 \cdot 10^{-3}$ |
|     | Mylar Film                | $8 \cdot 10^{-3}$  | $56 \cdot 10^{-3}$                       | $69 \cdot 10^{-3}$  | $66 \cdot 10^{-3}$  |

Tabelle 7: Längenbezogener Wärmebrückenkoeffizient,  $\Psi$ , für die Fassadenpaneelkonstruktion e) in verschiedenen Varianten.

|     |         | äussere Schicht:     |                           | MDF* 4 mm                      | Glas 4 mm          | Aluminium 2 mm      |
|-----|---------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------|
|     |         | Wärmedämmung:        |                           | Vakuum-Isolations-Paneel 20 mm |                    |                     |
|     |         | innere Schicht:      |                           | MDF* 4 mm                      | Glas 4 mm          | Aluminium 2 mm      |
| Typ | Dicke   | VIP-Hüllmaterial     | $\lambda_{cop}$ [W/(m·K)] | $\Psi$ [W/(m·K)]               |                    |                     |
| e   | 1.0 mm  | 6 $\mu$ m Aluminium  | $6 \cdot 10^{-3}$         | $72 \cdot 10^{-3}$             | $78 \cdot 10^{-3}$ | $126 \cdot 10^{-3}$ |
|     |         | 3-lagig metallisiert | $8 \cdot 10^{-3}$         | $50 \cdot 10^{-3}$             | $56 \cdot 10^{-3}$ | $79 \cdot 10^{-3}$  |
| e   | 0.5 mm  | 6 $\mu$ m Aluminium  | $6 \cdot 10^{-3}$         | $71 \cdot 10^{-3}$             | $76 \cdot 10^{-3}$ | $120 \cdot 10^{-3}$ |
|     |         | 3-lagig metallisiert | $8 \cdot 10^{-3}$         | $48 \cdot 10^{-3}$             | $54 \cdot 10^{-3}$ | $81 \cdot 10^{-3}$  |
| e   | gedämmt | 6 $\mu$ m Aluminium  | $6 \cdot 10^{-3}$         | $51 \cdot 10^{-3}$             | $53 \cdot 10^{-3}$ | $71 \cdot 10^{-3}$  |
|     |         | 3-lagig metallisiert | $8 \cdot 10^{-3}$         | $22 \cdot 10^{-3}$             | $23 \cdot 10^{-3}$ | $26 \cdot 10^{-3}$  |

\*MDF: mitteldichte Holzfaserverplatte

Auf Grundlage der ermittelten  $\Psi$ -Werte ist die effektive Wärmeleitfähigkeit,  $\lambda_{eff}$ , eines  $1.00 \times 1.00 \text{ m}^2$  Fassadenpaneels mit 20 mm VIP für verschiedene Deckschichten in Abbildung 14 (Randkonstruktionen a bis d) und Abbildung 15 (Varianten Randkonstruktion e) dargestellt. Demnach ist Konstruktion a, die herkömmliche Aluminiumprofil-Randverbundkonstruktion, für den Einsatz in Fassadenpaneelen mit VIP aufgrund der hohen  $\Psi$ -Werte von bis zu  $347 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , ungeeignet. Bei diesem  $\Psi$ -Wert beträgt die effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eff} = 34 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  im Vergleich zu  $\lambda_{cop} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und der effektive U-Wert  $1.31 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  im Vergleich zu  $U_{cop} = 0.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , was einer Zunahme von über 400% entspricht. Bessere Werte werden mit den Randkonstruktionen b, d und e erreicht, wobei mit dem verstärkten nicht-metallisierten Klebeband die besten Ergebnisse erzielt werden. Für VIP mit laminiertes Aluminiumfolie liegen die  $\lambda_{eff}$ -Werte bei  $11 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und  $U_{eff} = 0.51 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , mit metallisiertem Film beträgt  $\lambda_{eff} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und  $U_{eff} = 0.41 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Wärmebrücken der Fassadenkonstruktion (z.B. Pfosten-Riegel-Konstruktion) sind zusätzlich zu berücksichtigen. Die Randkonstruktion mit verstärktem nicht-metallisiertem Klebeband übernimmt keine lastabtragende Funktion (Sandwichkonstruktion), gewährleistet jedoch einen Schutz vor Beschädigung.

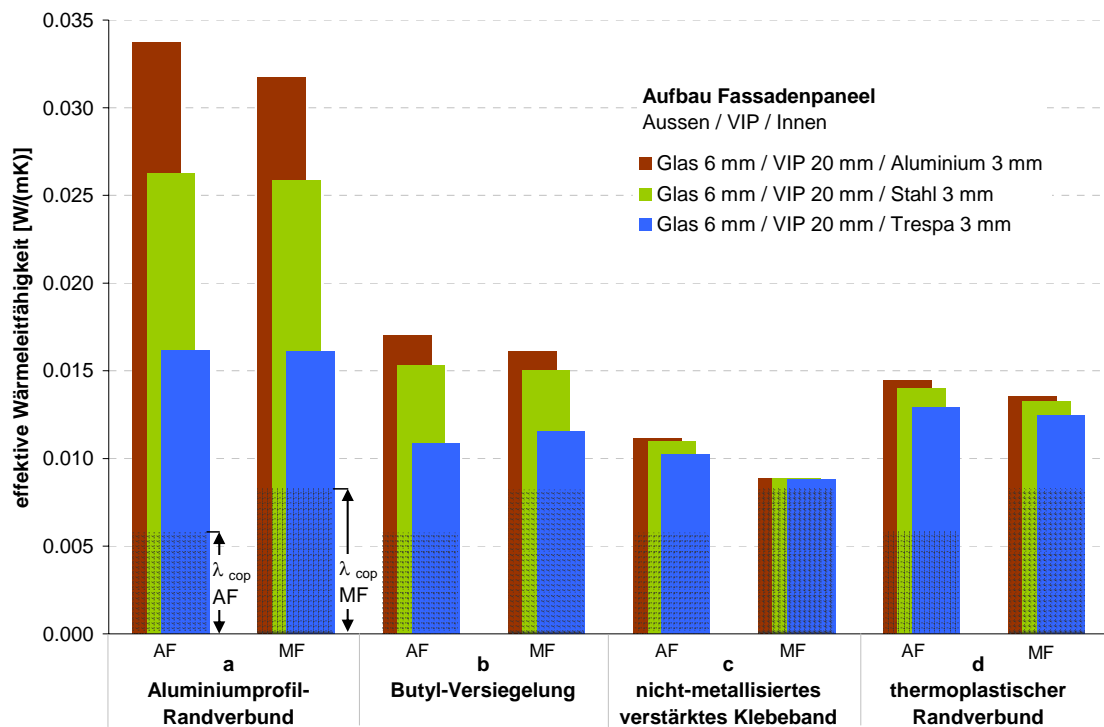


Abbildung 14: Effektive Wärmeleitfähigkeit,  $\lambda_{eff}$ , eines Fassadenpaneels  $1.00 \times 1.00 \text{ m}^2$  mit integrierter VIP für die Randkonstruktionen a) bis d) und verschiedene innere Deckschichten; AF = Aluminiumfolie,  $\lambda_{cop} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , MF = Mylar Film,  $\lambda_{cop} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

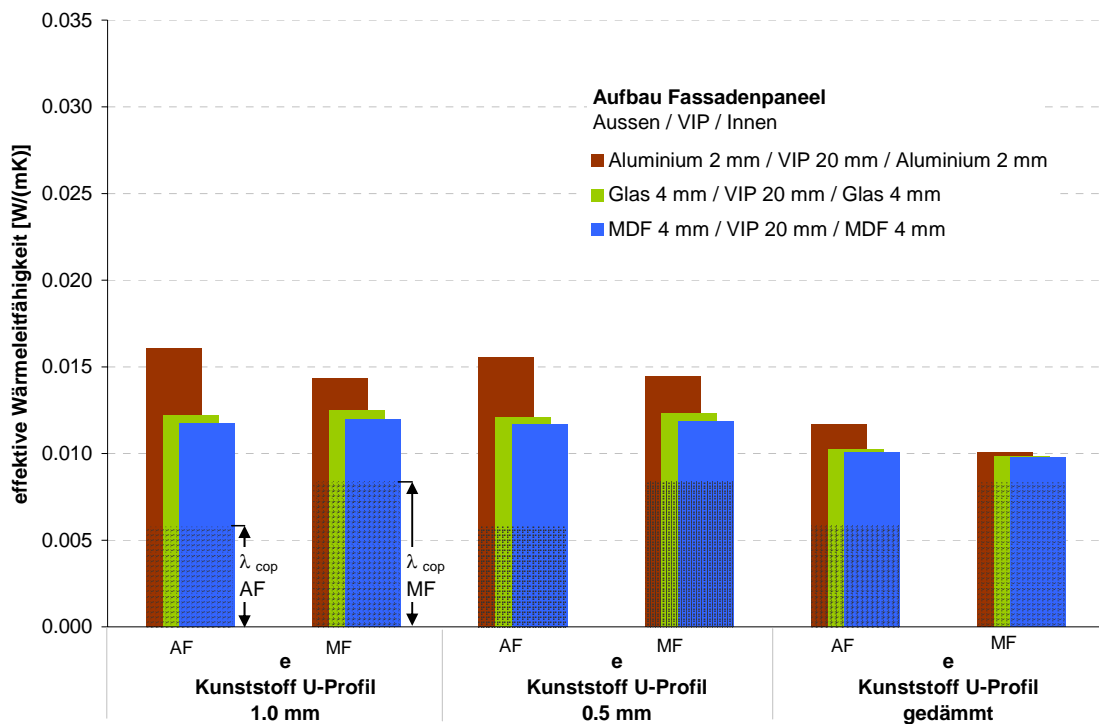


Abbildung 15: Effektive Wärmeleitfähigkeit,  $\lambda_{eff}$ , eines Fassadenpaneels  $1.00 \times 1.00 \text{ m}^2$  mit integrierter VIP für Varianten der Randkonstruktion e) und verschiedene Deckschichten; AF = Aluminiumfolie,  $\lambda_{cop} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ; MF = dreilagig metallisierter Film,  $\lambda_{cop} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

### 3.3 Ökobilanz von Vakuum-Isolations-Paneelen

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) stellen zunehmend eine Alternative zu bekannten Dämmstoffen dar. Die fünf- bis achtfach geringere Dämmstärke bei gleichem Wärmedurchlasswiderstand erweist sich in sehr vielen Baukonstruktionen als enormer Vorteil, für den gerne mehr bezahlt wird. In der Schweiz werden VIP bereits in beachtlichem Umfang eingesetzt. Immer wieder aber taucht die Frage auf, ob aus energetischer und ökologischer Sicht der Einsatz von VIP nicht problematisch sei, ob nicht letztlich mehr Energie in die Produktion von VIP hineingesteckt werde, als damit schliesslich gespart werde und ob bei der Herstellung nicht mehr ökologischer Schaden angerichtet werde, als Nutzen gestiftet werde.

Das Institut für Energie der Fachhochschule beider Basel ist im Rahmen einer Studie den Fragen der Umweltwirkungen von VIP nachgegangen [15]. Mit den drei Bewertungsmethoden Eco-indicator 99 [8], Methode der ökologischen Knappheit UBP97 [9] und dem Kumulierten Energieaufwand KEA [10] wird das VIP mit zwei bekannten Dämmstoffen (Glaswolle, Polystyrol EPS) verglichen. In der Sachbilanz werden die Energie- und Stoffflüsse der zur Herstellung des VIP benötigten Prozesse erfasst. Für Hintergrundprozesse (Energiebereitstellung, Transportdienstleistungen, Entsorgungsdienstleistungen, etc.) wird dabei auf bereits verfügbare Sachbilanzdaten aus der Datensammlung "Ökoinventare von Energiesystemen" [11] und die firmeninterne Datenbank von ESU-services [12] zurückgegriffen.

Für eine vergleichende Ökobilanz-Studie über Wärmedämmstoffe müssen viele Annahmen getroffen, Rahmenbedingungen festgelegt und von heutigen, teils schnell vergänglichen Fakten ausgegangen werden, von denen einige das Resultat massgeblich beeinflussen. Einige der wichtigen Vorgaben der vorliegenden Ökobilanzstudie sind:

- Der Vergleich der Dämmstoffe bezieht sich auf einen Quadratmeter Wandkonstruktion mit einem U-Wert von  $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  bzw. die dafür benötigten Mengen an Dämmstoff oder VIP.
- Es wird von einem VIP mit einem Kern aus pyrogener Kieselsäure ausgegangen, der von gasdichtem Hüllmaterial umhüllt wird. Die Bedeutung unterschiedlicher Hüllmaterialien wird untersucht, Alternativen für den Kern jedoch nicht.
- Pyrogene Kieselsäure ist ein Koppelprodukt der Reinsilizium-Herstellung für die Chip-Produktion. Das gemeinsame Vorprodukt Siliziumtetrachlorid beispielsweise ist in der Herstellung sehr energieintensiv. Die Zuordnung der Umweltbelastung dieser Vorprozesse zu den einzelnen Produkten erfolgt im Verhältnis ihrer Marktpreise. Die Herstellung von Tetrasiliziumchlorid prägt die Resultate der Ökobilanz zu über 60%.
- Die Bewertung erfolgt mit allen drei in der Schweiz aktuellen Ökobilanz-Bewertungsmethoden, nach Eco-Indicator 99, mit Umweltbelastungspunkten UBP97 und der Methode des kumulierten Energieaufwandes KEA (graue Energie). Die Daten für Polystyrol und Glaswolle stammen aus Weibel/Stritz 1995 [13] bzw. Richter et al. 1995 [14].

Die Wirksamkeit konventioneller Dämmstoffe beruht darauf, dass möglichst viel Luft mit möglichst wenig Material in möglichst kleine Zellen eingeschlossen wird. Dämmstoffe sind daher leichte Materialien, d.h. sie enthalten wenig Material, im Vergleich etwa zu Baustoffen wie Backstein, Beton, Glas, oder auch Holz. Die Ökobilanzen von Dämmstoffen zeigen daher im allgemeinen auch, dass beim Einsatz von Dämmstoffen in der Gebäudehülle der Nutzen die ökologischen Belastungen klar übertrifft, auch wenn sehr gut gedämmt wird. Die Wärmedämmung spielt in der Umweltwirkungsbilanz eines ganzen Gebäudes eine untergeordnete Rolle. Zusammenfassende Haupterkennnis der vorliegenden Ökobilanzstudie ist, dass dies

im Wesentlichen auch für Vakuumdämmung gilt. Ob, je nach Bewertungsmethode, VIP gegenüber Glaswolle oder Polystyrol etwas schlechter abschneidet, kann diesen grundlegenden Sachverhalt nicht verdecken. Ausserdem ist das VIP, das der Studie zugrunde liegt, eine Art Vorserien-Produkt, das hinsichtlich seiner Umweltwirkungen noch nicht optimiert ist, das aber diesbezüglich ein grosses Potenzial hat. So wird etwa, weil es ein Koppelprodukt ist, mit hochreinem Siliziumtetrachlorid gearbeitet, was für die VIP alleine in keiner Weise nötig wäre. Wenn VIP im grossen Umfang hergestellt werden, dürften deshalb auch die Herstellungsprozesse weniger energieintensiv und umweltbelastend werden. Alle bekannten und heute eingesetzten Alternativen zu pyrogener Kieselsäure als Kernmaterial sind ebenfalls mit geringerem Herstellungs-Energieaufwand verbunden (weisen aber nicht die gleich guten Voraussetzungen für VIP aus).

Die Ökobilanz von VIP ist in erster Linie geprägt durch den hohen Herstellungs-Energieaufwand. Die Materialfluss-Aspekte treten demgegenüber stark in den Hintergrund. So spielt auch das aluminiumbeschichtete Hüllmaterial bzw. welcher Typus von Hüllmaterialien gewählt wird, eine völlig untergeordnete Rolle. In diesem Sinne ist es aus der Sicht der Ökobilanzierung des Materials unwichtig, ob VIP einlagig oder zweilagig eingebaut werden (um dank versetzten Plattenstössen bei Metallfolien-VIP die Randwärmebrücken zu verringern).

Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die Resultate der Ökobilanz für alle untersuchten Dämmstoffe, inkl. VIP, grundsätzlich gut sind, erstaunt es auch nicht, dass die Anwendung unterschiedlicher Bewertungsmethoden zu einer Umkehr der Rangfolge führen kann. Je kleiner die Unterschiede, desto eher können solche Umkehrungen stattfinden. Die Bewertung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP97) weist VIP leicht schlechter, insgesamt aber in gleicher Grössenordnung wie Glaswolle und Polystyrol aus (Abbildung 16 rechts). Ausschlaggebend ist hier vor allem der hohe energetische Aufwand (besonders elektrisch) bei der Produktion des VIP. Aus der Sicht des Eco-indicator 99 wird allerdings v.a. durch die Bewertung des Ressourcenverbrauches von EPS die Vakuumdämmung ins Mittelfeld der Bewertungen verschoben (Abbildung 16 links).

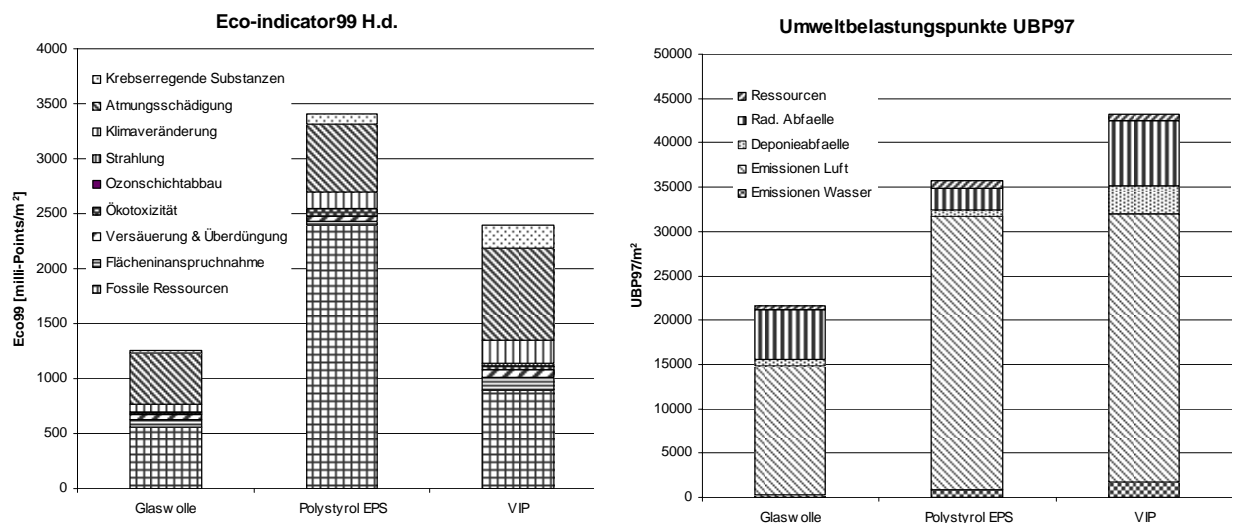


Abbildung 16 links: Vergleich der Wirkkategorien für die Dämmmaterialien Glaswolle, Polystyrol EPS und VIP nach der Methode Eco-indicator 99.

rechts: Vergleich der Dämmmaterialien Glaswolle, Polystyrol EPS und VIP nach der Methode der ökologischen Knappheit mit Umweltbelastungspunkten UB97.



Vor allem in der Dominanzanalyse nach Eco-indicator 99 schlägt sich nieder, dass der Grossteil der VIP-Bestandteile auf sehr energieaufwändigem Weg (v. a. elektrisch) hergestellt wird. 90% der Gesamtbewertung von VIP gehen auf diesen Bereich (Silizium verarbeitende Industrie) zurück.

Mit der Sensitivitätsabschätzung werden Prozessoptimierungsmöglichkeiten aufgezeigt, durch die die Bewertung der VIP in den Bereich von Glaswolle gerückt wird. Diese wurde im vorliegenden Vergleich am besten bewertet. Durch Substitution eines energiekritischen Bestandteils (Siliziumkarbid SiC) durch einen geeigneten Ersatz und durch die Optimierung des Vorproduktbezuges eines weiteren Bestandteils (Siliziumtetrachlorid) kann die Wirkungsbilanz für alle Methoden um etwa 45% verbessert werden. Mit Prozessoptimierungen dieser Art kann fest gerechnet werden, wenn VIP in grösserem Umfang hergestellt werden. Die ökologische Unbedenklichkeit wird sich mit zunehmender Marktdurchdringung also weiter verbessern.

## 4 Praxisreport

Die in diesem Kapitel wiedergegebenen U-Werte basieren auf  $\lambda$ -Wert-Angaben der VIP-Hersteller. Alterungseffekte und Wärmebrücken-Randeffekte (siehe Kapitel 3) konnten aus diesem Grund nicht einheitlich berücksichtigt werden. Eine Übernahme der aufgeführten Details erfordert eine der jeweiligen Situation entsprechende individuelle bauphysikalische Abklärung und Berechnung.

### 4.1 Boden- und Deckendämmung eines Atelier-Neubaus Anbau an ein Einfamilienhaus in Zug/Schweiz

Standort:  
Höhenweg 5  
CH-6300 Zug

Architekt und Bauherrschaft:  
R. Zai, Zai & Partner  
Zugerstr. 53  
CH-6340 Baar

VIP: Vacucomp 20 mm in Boden- und Decken-Konstruktion, ZZWancor



Abbildung 17: Eingeschossiger Atelieranbau in der Böschung, über offener Auto-Einstellhalle und unter begehbare Terrasse.

Der Anbau eines eingeschossigen Atelierraumes mit Autogarage im Untergeschoss erfolgt in einer topografisch komplizierten Situation in eine steile Böschung hinein. Die knappen Höhenverhältnisse machen eine Dämmung mit konventionellem Dämmstoff, selbst bei Beschränkung auf den gesetzlichen Mindestwärmeschutz, praktisch unmöglich. Der Atelierraum wird konsequent mit Innendämmung ausgestattet. Die Wände, mehrheitlich gegen Erdreich, werden raumseitig mit 18 cm Schaumglas gedämmt. Auf den Betonboden (mit darunterliegender Garage) wird 2 cm VIP verlegt. Über der Decke liegt die begrünte Terras-

se des Hauses. An der Decke werden innenseitig ebenfalls 2 cm VIP montiert.

**Kommentar:**

*Der Architekt ist im vorliegenden Fall gleichzeitig Bauherr und Nutzer des Atelier-Anbaus. Er ist in dieser Situation bewusst Risiken eingegangen, um das neue Material einer Praxiserprobung zu unterziehen und das Verhalten und die Bewährung als Innendämmung mit sehr tiefem U-Wert auszuloten. Er hält diese Art des Einsatzes von VIP derzeit für den Einsatz für Fremd-Bauherrschaften für noch zu wenig erprobt.*

**4.1.1 Material und Konstruktion**

An der Decke wurden die VIP zwischen eine Holzlattung eingepasst.

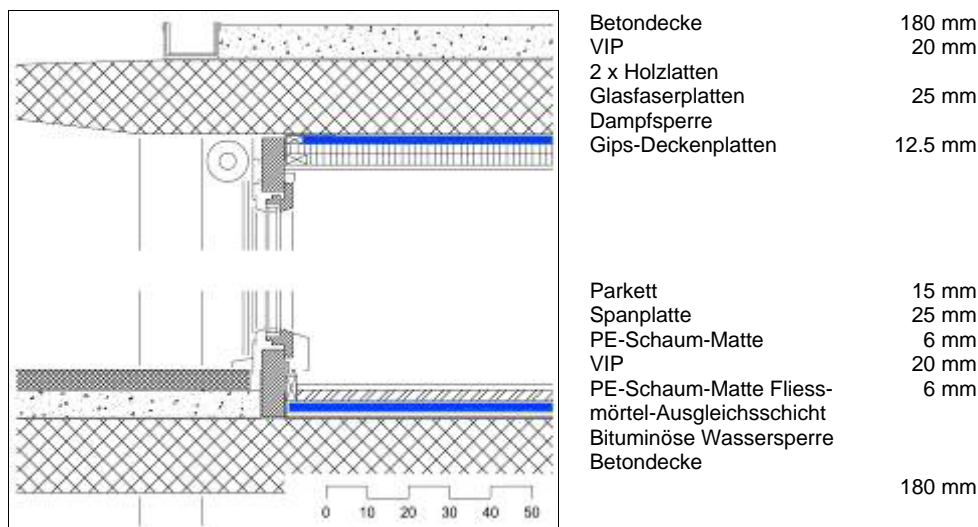


Abbildung 18: Vertikalschnitt, Anschluss der VIP-Konstruktion im Bereich der Fensterfront.

**4.1.2 Bauphysikalische und bautechnische Aspekte**

**Wärmebrücken**

Der Atelier-Anbau ist konsequent innen gedämmt. Da es sich im Wesentlichen um einen einzigen grossen Raum handelt (mit nur leichten, mobilen Abtrennungen), ist es auch möglich, Durchdringungen der Dämmschicht weitgehend zu vermeiden. Eine Ausnahme bilden drei Stahlbeton-Stützen, welche sowohl im Decken- wie im Bodenbereich starke Wärmebrücken bilden. Diese Stützen wurden (zumindest vorerst) unverkleidet belassen und werden bei kalter Witterung sehr tiefe Oberflächentemperaturen aufweisen. Da es sich nicht um einen Wohnraum, sondern um eine Büronutzung handelt und der Eigentümer und Architekt die Problematik kennt, kann die Raumfeuchte in kritischen Zeiten durch entsprechende Massnahmen tief gehalten werden. Sollte Oberflächenkondensat auftreten ist nachträglich eine Dämmung und Verkleidung der Stützen vorzusehen.

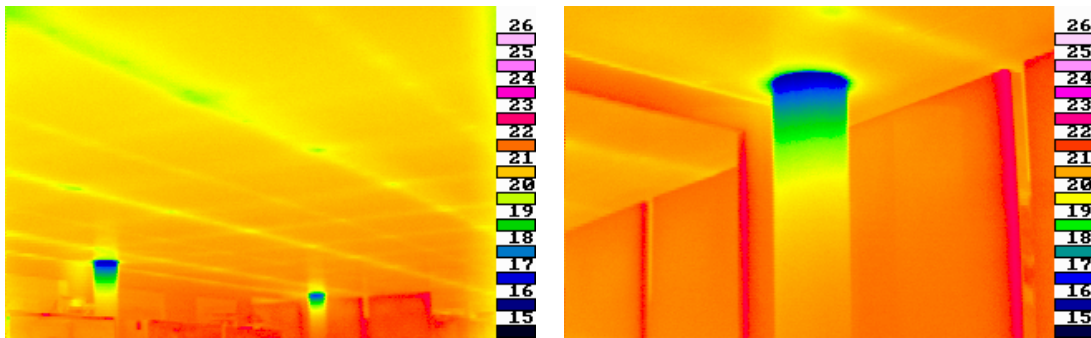


Abbildung 19: Aufnahmen mit einer IR-Kamera. Die Betonstützen durchdringen die VIP-Dämmebene und bilden eine Wärmebrücke.

### Dampfdiffusion und Materialfeuchte

Sowohl am Boden wie an der Decke wurden die VIP mit einem Alu-Klebeband verklebt und an die Ränder angeschlossen. Die VIP bilden eine absolute Dampfsperre. Die Flachdachdichtungsbahn auf der Aussenseite bildet ebenfalls eine Dampfsperre, so dass sorgfältig darauf geachtet werden muss, dass keine Feuchtigkeit (Baufeuchte oder Regenwasser) zwischen diese beiden Dampfsperren eingebaut wird. Im vorliegenden Fall liegt eine ähnliche Situation auch beim Boden vor, wo eine bituminöse Wassersperre unter dem Fliesesestrich eingebracht wurde. Die Austrocknung dieses Estrichs vor dem Einbau der VIP war deshalb besonders wichtig.

### Verhalten bei Vakuum-Versagen

Bei partiellem oder grossflächigem Versagen der Vakuumdichtigkeit würde sich der U Wert der Boden-Konstruktion wesentlich verschlechtern, nämlich von  $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  auf  $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Trotzdem ist damit aber der bauphysikalische Mindestwärmeschutz (Kondensatrisiken) nicht unterschritten. Bei der Deckenkonstruktion ist wegen der zusätzlichen 5 cm Glasfaserdämmung die Situation unkritischer (Verschlechterung von  $0.24$  auf  $0.38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ). Hingegen muss bei der Deckendämmung bedacht werden, dass die (absolut) dampfdichte VIP-Oberfläche warmseitig durch 5 cm Faserdämmstoff abgedeckt ist. Bei  $-10 \text{ °C}$  Aussentemperatur liegt die innere Oberflächentemperatur der VIP bei  $9 \text{ °C}$ , im Vakuum-Versagensfall bei  $4 \text{ °C}$ . Im Bereich der Holzlatten zwischen den VIP liegt die Temperatur noch deutlich tiefer. Es muss also nicht nur für den Versagensfall mit einer Dampfsperre warmseitig der Faserdämmstoffplatten dafür gesorgt werden, dass kein Kondensat an den VIP bzw. Holzlatten entsteht.

#### 4.1.3 Ablauf von Planung und Ausführung

Vom VIP-Lieferanten wurden auf der Basis von Planunterlagen exakte Verlegepläne und daraus sich ergebende Stücklisten erstellt. Basis-Plattenformat war  $1000 \times 600 \text{ mm}$ . 255 Platten mit diesem Format decken über 90% der Fläche ab, für die restliche Fläche wurden über 30 „massgeschneiderte“ Platten in Stückzahlen zwischen 1 und 13 geliefert.

Die VIP wurden in grossen Kartons angeliefert, die unhandlich und über hundert Kilogramm schwer waren. Die Kartons mussten von Hand in den ersten Stock getragen werden und es war unbedingt notwendig, sie vor der Verlegung logistisch richtig zu lagern, damit nicht im Verlauf der Arbeit mit vollen Kartons über den teilweise verlegten Boden gegangen werden musste.

Der Boden wurde in folgenden Arbeitsschritten aufgebaut:

- Einmessen des Plattenrasters. Bautoleranzen wurden mit Mineralfaserstreifen entlang der raumumschliessenden Wände aufgenommen. Füllflächen, z.B. um die Stützen, wurden teilweise mit zerschnittenen, fehlerhaften VIP ausgefüllt.
- Entfernung von scharfkantigen Unebenheiten und Überständen auf dem Boden und entlang der Wandanschlüsse. In der Praxis zeigt sich, dass verschiedenste solcher „Störelemente“ vorhanden sind, die auf den Plänen nicht vermutet werden und die es nötig machen, beim Erstellen des Verlegeplans eine grundsätzliche Toleranz entlang der Ränder einzuplanen. So waren im vorliegenden Fall Winkeleisen für die Fensterbefestigung vorhanden oder die Fussführungsschiene des Schiebefensters ragte entgegen der Detailzeichnung in den Verlegebereich des VIP etc.
- Gründliche Reinigung des Bodens mit Besen und Staubsauger, um der Beschädigung der VIP durch herumliegende Kleinteile vorzubeugen.
- Verlegung der Schutzmatte, in diesem Fall eine PE-Weichschaumbahn.
- Verlegung der VIP, satt gestossen. Abkleben der VIP-Platten mit Alu-Klebeband. Dies ergibt eine durchgängige Dampfsperre und gleichzeitig einen festen Plattenverband, der nicht mehr verrutscht.
- Füllen der Anschluss-Spalten und Aussparungen mit Faserdämmplatten bzw. teilweise mit VIP-Verschnitt.
- Abdeckung mit PE-Weichschaum-Schutzmatte und Verlegung der Deckplatten. Die Abdeckung erfolgte fortlaufend, um die VIP-Lage möglichst rasch zu schützen.



Abbildung 20: Aufbau des Bodens mit VIP.

Die wesentlichen Arbeitsschritte des Deckenaufbaus sind:

- Die erste Lage besteht aus der Holzlattung mit dazwischen liegenden VIP. Damit die VIP satt zwischen die Latten eingepasst sind, jedoch auch nicht gequetscht werden, ist es von Vorteil, eine Latte zu setzen, dann die erste Lage VIP satt anschliessend an die Decke zu kleben, dann die nächste Latte zu setzen etc.
- Setzen einer zweiten, gekreuzten Lattung für die erste Lage Faserdämmstoff von 25 mm Dicke. Die Lattung wird in den Lattungs-Kreuzpunkten in die Betondecke verschraubt.
- Montage der dritten Lattung mit teilweiser Faserdämmschicht bzw. Leitungsführung.
- Dampfsperre und Gipsplatten mit Verputz.

*Kommentar:*

*Der Bodenaufbau mit VIP erfolgt bei sorgfältiger Vorbereitung (Verlegeplan, Einmass etc.) relativ rasch. Die Probleme bestehen darin, dass die VIP doch ziemlich exponiert sind. Es ist nicht möglich, immer sofort alles mit den begehbaren Platten abzudecken. In Arbeitspausen (Mittag, Nacht) besteht das Risiko, dass die VIP betreten werden (die Materialien ziehen auch neugierige Baubeteiligte an). Gegenstände können auf die VIP fallen. Auch wenn in Socken gearbeitet wird, können scharfkantige Kleingegenstände an den Socken haften. Insbesondere für das Verkleben der Platten muss auf den Platten gekniet werden, was nicht unerhebliche Dellen verursacht.*

*Der Deckenaufbau hat zwar die Schwierigkeit, dass für die Deckenaufhängung eine Befestigungsgrundlage montiert werden muss (Lattenrost). Trotzdem ist der Einsatz von VIP eher einfacher, weil sie weder durch betreten noch durch herabfallende Gegenstände gefährdet sind.*

#### **4.1.4 Kosten, Nutzen, Risiken**

Der Gesamtpreis für die 2 cm starken VIP (Materialpreis inkl. MwSt.) für Decke und Boden dieses 92 m<sup>2</sup> grossen Raumes lag bei rund CHF 25'000.-- (Materialpreis inkl. MwSt.). Das ergibt einen mittleren Quadratmeterpreis für das Material von 135 CHF/m<sup>2</sup>. Sonderformat-Platten kosteten 25% mehr, als Platten im Standardformat (60 x 100 cm<sup>2</sup>).



## 4.2 Innendämmung und Lukarne bei einer Altbausanierung Modernisierung eines Mehrfamilienhauses in Zürich/Schweiz

Standort:

Nietengasse 20

CH-8004 Zürich

Architekt:

Viridén + Partner

Andreas Büsser

Häringstrasse 20

CH-8001 Zürich

VIP: Vacucomp 30 mm

Ausführung: 2003



Abbildung 21: Die sanierte Altstadtliegenschaft in Zürich.

Als hauptsächlicher Grund für den Einsatz von VIP wird die Platzersparnis angegeben. Dies ist im vorliegenden Fall besonders zutreffend, weil ein sehr hoher Dämmstandard, nämlich Passivhaus-Niveau anvisiert wurde. Zudem erhoffte sich das Architekturbüro durch das „Ausprobieren“ innovativer Technologie einen Know-How-Vorsprung. Die Sanierung wurde als Pilot- und Demonstrationsprojekt wegen des Einsatzes von VIP vom Bundesamt für Energie finanziell unterstützt.

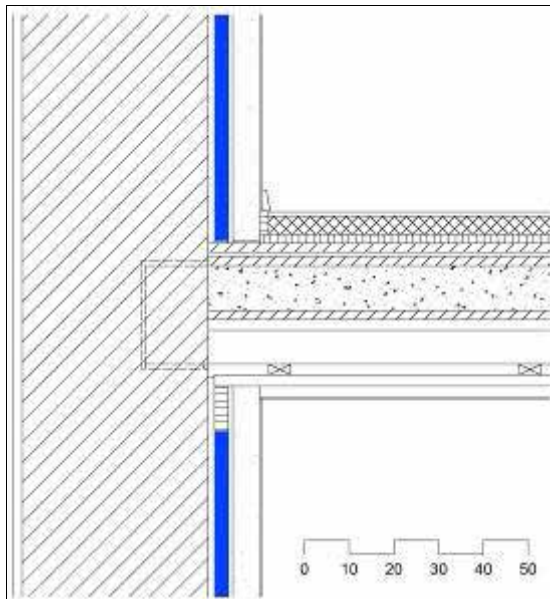
*Kommentar:*

*Dank der VIP-Technologie konnte die Lukarne trotz Passivhausstandards ästhetisch befriedigend gelöst werden (schlanke Bauteile). Die Vorfabrikation ist für den Architekten eine sinnvolle Anwendung, da das Anbringen der VIP auf der Baustelle zu viele Gefahren birgt (fehlendes Wissen der Handwerker, Materialschutz kann kaum gewährleistet werden). Zudem scheinen speziell bei Innendämmungen viele Vorgänge noch improvisiert (Fugenab-*

dichtung, komplizierte Stücklisten, Anpassstücke) und gewichtige Fragen ungelöst zu sein (Kondensatproblematik Balkenkopf, klimatische Rahmenbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur) der VIP).

Alles in allem fehlt für den Einsatz von VIP als Innendämmung bei Sanierungen die Routine und Sicherheit. Als Architekt und Bauherr in einer Person konnte das Experiment eingegangen werden. Positiver wird der Einsatz in vorfabrizierten Lukarnen mit VIP gesehen, die auch weiterhin zum Einsatz kommen sollen.

#### 4.2.1 Material und Konstruktion



#### Wandaufbau Innendämmung

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| Aussenputz, alt          | 20 mm  |
| Bruchsteinmauerwerk, alt | 430 mm |
| Innenputz, alt           | 15 mm  |
| VIP, neu                 | 30 mm  |
| Luftspalt                | 10 mm  |
| Vollgipsplatte, neu      | 60 mm  |
| Innenputz, neu           | 5 mm   |

Abbildung 22: Vertikalschnitt durch die innen gedämmte Backstein-Aussenwand.

Die VIP werden, fugenlos gestossen, auf den bestehenden Innenputz der Aussenwand geklebt. Mit den Korkstreifen im oberen Abschlussbereich werden die Toleranzen aufgenommen. Zudem wird dadurch auf die Wärmebrücke reagiert. Kork kann den Feuchtehaushalt positiv beeinflussen und die Problematik um den Balkenkopf entschärfen.

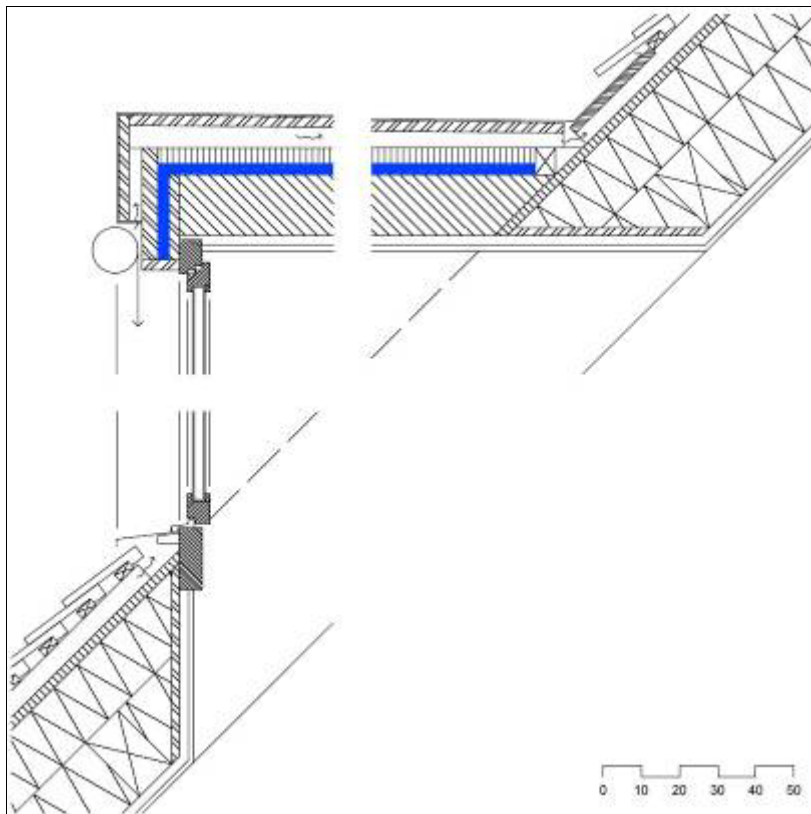


Abbildung 23 links: VIP-Innendämmung mit teilweise erstellten Gipswand.  
rechts: Fertige Lukarne.



Um Durchdringungen der VIP-Schicht mit Halterungen der inneren Verkleidung zu vermeiden und einen gewissen Schutz vor nachträglichen Verletzungen durch Befestigungen zu vermindern, wurde eine freistehende Gipswand aus Vollgipsplatten mit einem Zentimeter Abstand zu den VIP gesetzt.

## Lukarne



### Dachaufbau Lukarne

|                        |          |
|------------------------|----------|
| Blech-Dachdeckung      |          |
| Dreischichtplatte      | 27 mm    |
| Konterlattung, konisch | 40-60 mm |
| Unterdachbahn          |          |
| Weichfaserplatte       | 40 mm    |
| VIP                    | 30 mm    |
| Brettstapeldecke       | 160 mm   |
| Dampfbremse            |          |
| Lattung                |          |
| Vidiwal-Platte         | 12.5 mm  |

Abbildung 24: Vertikalschnitt durch die Lukarnenkonstruktion.

Damit die VIP in der vorgefertigten Lukarnenkonstruktion nicht durch Unterkonstruktionen unterbrochen werden, wird die Lastabtragung der Dachabdeckung über die Konterlattung und Stirnkonstruktion zum Fensterrahmen bewerkstelligt. Das VIP wird durch die Weichfaserplatte vor Verletzungen geschützt.

#### Kommentar:

Bei der Innendämmung fallen die vielen, verschiedenen Plattenformate und die Anpassstücke auf. Der Bauablauf ist noch zu wenig harmonisch, die blanken VIP zu lange ungeschützt. Die vorgefertigte Lukarne scheint ein guter Einsatzort für VIP zu sein. Die Paneele werden unter kontrollierten Bedingungen eingebaut und sind gut geschützt vor äusseren Einwirkungen (Montagearbeiten, Beschädigungen während späteren Arbeitsgängen).

## 4.2.2 Bauphysikalische und bautechnische Aspekte

### Wärmebrücken und Kondensattrisiken

Neben dem Aufnehmen der Toleranzen war auch der Umgang mit Wärmebrücken bei Wand-, Decken- und Fensteranschlüssen (inkl. Sims, Sturz und Leibungen) eine grosse Herausforderung. Wie bei jeder Innendämmung sind aus bauphysikalischer Sicht die Wärmebrücken besonders kritisch. Im Vergleich zu einer konsequenten Aussenwärmedämmung wird hier immer mit erhöhten Kondensattrisiken an den Wärmebrücken zu rechnen sein. Die enorme Leistungsfähigkeit der VIP akzentuiert diese Probleme noch. Der Architekt behalf sich hier mit dem Material Kork, welches positive Eigenschaften betreffend Feuchtehaushalt aufweist. Als Dämmmaterial mit einem sechs- bis achtmal schlechteren Dämmvermögen als VIP, führt es aber auch zu einer Schwächung des Wärmebrückeneffektes an den heiklen Stellen.

Der Anschluss der Decke ist (bauphysikalisch) komplex. Der Holzbalken lagert in der Aussenwand auf. In der Holzbalkendecke sind Hohlräume, welche der Raumlufffeuchte einen guten Zugang zu den Balkenköpfen ermöglichen. Die hinter der Dämmung liegenden Balkenköpfe sind in der Winterzeit deutlich kälter und werden damit einem erhöhten Kondensattrisiko ausgesetzt sein.

Das allgemeine Kondensattrisiko wird im vorliegenden Fall durch den Einsatz einer kontrollierten Wohnungslüftung vermindert.

#### *Kommentar:*

*Die Innendämmung mit VIP ist - noch mehr als mit konventionellen Dämmstoffen - mit bauphysikalischen Risiken verbunden, bzw. erfordert eine möglichst weitgehende bautechnisch-baukonstruktive Optimierung und einen bewussten Umgang mit der Raumlufffeuchte. Allerdings liegt in vielen Fällen auch im ursprünglichen Zustand eine bauphysikalische „Hochrisiko-Situation“ vor, ohne dass Schäden entstanden sind. In alten Bruchsteinhäusern mit Einzelraum-Öfen lagen die Oberflächentemperaturen an den Wärmebrücken (und an den Balkenköpfen) weit im kritischen Bereich. Das heisst aber nicht, dass man nicht bei Sanierungen mit Innendämmung alle möglichen Entschärfungsmassnahmen treffen sollte:*

- *Flankenwärmedämmungen (Dämmstreifen entlang Decken- und Wand-Anschlüssen) sind ein gutes Mittel, allerdings oft nicht mit realistischem Aufwand zu leisten und auch gestalterisch nur schwierig befriedigend zu lösen.*
- *Schwächung der Dämmschicht entlang der Wärmebrücken, führt zu erhöhten Wärmeverlusten, welche aber an den kritischen Stellen die Temperatur etwas erhöht und das Kondensattrisiko vermindert.*
- *Oberflächenmaterialien mit gutem Feuchtepufferverhalten vermindern zwar nicht die Kondensathäufigkeit und -menge, aber den Pilzbefall.*
- *Hohlräume in Decken, v.a. im Bereich von Balkenköpfen, sollten ausgestopft (oder ausgeblasen) werden. Besonders geeignet sind Zellulosefaserprodukte, welche eine relativ luftdichte Schicht bilden und ein gutes Feuchtepufferverhalten haben. Damit ist für die Raumlufffeuchtigkeit nur noch ein diffusiver und kein konvektiver Zugang mehr zur Aussenwand bzw. zu den Balkenköpfen möglich. Die Feuchtezufuhr wird erheblich verringert.*
- *Kontrollierte Wohnungslüftungen (in Gebäuden im Niedrigenergiestandard häufig integrierter Teil des Haustechnikkonzeptes) vermindern das Kondensattrisiko.*

### **Verhalten bei Versagen des Vakuums**

Innendämmung: Beim Versagen einer VIP müsste die Vormauerung abgeschlagen, das fehlerhafte Paneel ersetzt und erneut aufgemauert werden. Die Wärmedämmung würde zwar durch den Ausfall des Vakuums in einem Paneel lokal drastisch verschlechtert (von einem U-Wert von  $0.22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  auf ca.  $0.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ). Bauphysikalisch würden dadurch aber keine neuen Risiken entstehen.

Lukarne: Mit zusätzlichen Schichten wird darauf geachtet, dass der U-Wert beim Versagen der VIP nicht unter  $0.27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  fällt. Damit minimiert sich das Bauschadensrisiko.

### **Befestigungsaspekte und –lösungen**

Innendämmung: Die VIP werden an den bestehenden Innenputz geklebt. Hier taucht die Frage bezüglich Verträglichkeit des VIP- Hüllmaterials mit den verwendeten Leimen auf.

### **4.2.3 Ablauf von Planung und Ausführung**

Die bauphysikalischen Abklärungen traf der Architekt in Zusammenarbeit mit einem Spezialisten. Der VIP-Lieferant wurde nicht für eine Beratung in konstruktiver und bauphysikalischer Hinsicht angefragt. Erst bei dem Erstellen der Stücklisten wurde mit dem Lieferanten zusammengearbeitet. Dieser bestimmte zudem den Montage-Kleber. Er informierte und begleitete schliesslich die beteiligten Handwerker während der Montage.

*Kommentar:*

*Die erfolgte Begleitung durch den VIP-Lieferanten wird als genügend und absolut notwendig bezeichnet (v.a. Information auf Baustelle).*

### **4.2.4 Kosten, Nutzen, Risiken**

Die kleine Menge einerseits und die vielen unterschiedlichen Formate andererseits trieben die Kosten auf eine durchschnittliche Höhe von CHF  $220/\text{m}^2$  (inkl. Transport, Sonderformate, MwSt.). Zudem ist der Planungsaufwand grösser als bei der Verwendung herkömmlicher Dämmstoffe (Arbeitsvorbereitung, Timing und Überwachung auf Baustelle). Da VIP geschützt werden sollten (z.B. Schutzschicht in Gaubenkonstruktion), muss mit weiteren Zusatzkosten gerechnet werden.

Die Architekten reagierten auf die mangelnde Garantiesituation (nur Fristen gemäss SIA) und die Unsicherheiten betreffend Lebensdauer je nach Bauteil auf unterschiedliche Weise (siehe Kap. Verhalten bei Vakuum-Versagen).

*Kommentar:*

*Die hohen Kosten und vielen Unsicherheiten werden als die grössten Probleme angesehen. Daher wäre es hilfreich, wenn baldmöglichst Lebensdauer-Abschätzungen (oder sogar Garantiefrieten?) zur Verfügung stehen würden.*

### 4.3 Terrassendämmung in einer Neubausiedlung Mehrfamilienhäuser in Kerzers/Schweiz

Standort:  
Mühlegasse  
CH-3210 Kerzers

Architekt:  
3-D Architekten AG  
Peter Kunz  
Murtenstrasse 13  
CH-3210 Kerzers

Ausführung 2003



Abbildung 25: Terrassenartige Bebauung in leichter Hanglage (Ansicht und Visualisierung Architekt).

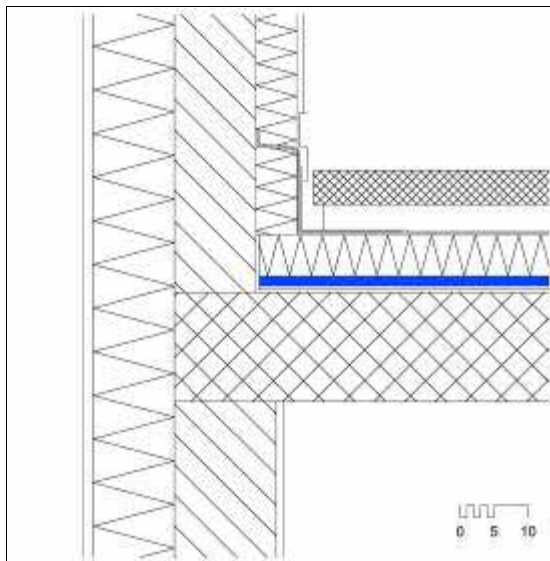
Sämtliche Terrassen-Fenster eines Gebäudes in einer Neubausiedlung wurden zu gross geliefert, sodass die vorgesehene Terrassendämmung (Polyurethan) von 12 cm nicht eingebracht werden konnte. Da man sich die Kosten einer erneuten Fensterproduktion ersparen wollte, die geplanten Wärmedämmwerte jedoch eingehalten werden mussten, wurde die Anwendung von VIP geprüft und schliesslich beschlossen.

Die Gesamteinschätzung wird vom Architekten als durchaus positiv wahrgenommen. An einem weiteren Projekt (Baubeginn November 2003) wird ein erneuter Einsatz von VIP evaluiert.

*Kommentar:*

*VIP wird hier als Notmassnahme verwendet. Architekt und Unternehmer kannten das Material nicht und wurden nur durch Zufall auf die Möglichkeiten von VIP aufmerksam. Terrassendämmungen sind die momentan weitaus häufigste Anwendungsart von VIP. Dank dieser Routine und Erfahrung verstand es der Lieferant, die anfänglich grosse Skepsis der Beteiligten in eine positive Einschätzung umzumünzen.*

### 4.3.1 Material und Konstruktion



#### Bodenaufbau

|                           |        |
|---------------------------|--------|
| Gehwegplatten             | 20 mm  |
| Stelzlager (Entwässerung) | 30 mm  |
| PU Platten                | 60 mm  |
| VIP                       | 15 mm  |
| PE Schaummatte            | 5 mm   |
| Abdichtung                |        |
| Betondecke                | 200 mm |

Abbildung 26: Vertikalschnitt Anschluss an Brüstung.

### 4.3.2 Bauphysikalische und bautechnische Aspekte

#### Wärmebrücken

Vom VIP-Lieferanten wurde ein exakter Verlegeplan erstellt, damit die Randanschlüsse ohne dämmreduzierende Passtücke aus konventionellen Dämmmaterialien ausgeführt werden konnten. Die Vordachstützen durchdringen die Dämmschicht, was zu punktuellen Schwachstellen führt. Es wird davon ausgegangen, dass dadurch keine Kondensat an den Deckeninnenseiten entsteht, da auf der Innenseite durch die Betondecke ein guter Wärmezufluss gewährleistet ist.

#### Dampfdiffusion und Materialfeuchte

Verschiedene Schichten der Konstruktion (Betondecke mit Abdichtungsfolie / VIP / wasserführende Schicht) sind für sich dampfsperrende Ebenen. Es ist nicht damit zu rechnen, dass Kondensat in der Konstruktion auftritt.

Die VIP sind allseitig gut geschützt. Neben den mechanischen Schutzmassnahmen (Dämmmatten resp. -platten) sorgen insbesondere auch die wassersperrenden Schichten für eine tadellose, den heutigen Erkenntnissen entsprechend optimale bauphysikalische Situation – keine Extremtemperaturen, kein Eindringen von Feuchtigkeit. Allerdings ist eine fachgerechte Montage der Konstruktion Voraussetzung. Insbesondere muss darauf geachtet werden, dass trockenes Material eingesetzt wird und im Verlauf der Montage kein Regenwasser eindringt.

#### Verhalten bei Vakuum-Versagen

Im vorliegenden Fall sorgen die zusätzlichen 60 mm Dämmmaterial dafür, dass im Versagensfall ein genügend guter Wärmeschutz vorhanden ist, um das Kondensatrisiko zu minimieren. Der U-Wert der Konstruktion beträgt bei einem Ausfall des Vakuums  $0.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

#### Kommentar:

Die situationsbedingten zusätzlichen Dämmschichten sind nicht der Regelfall bei Flachdach-

oder Terrassendämmungen. Sie bewirken, dass ein Ersatz eines defekten VIP nur sehr umständlich möglich ist.

#### 4.3.3 Ablauf von Planung und Ausführung

Der VIP-Lieferant hat den gesamten, VIP-spezifischen Planungsablauf stark mitgeprägt: Begonnen mit der Information der Planenden (Materialeigenschaften, Einsatzmöglichkeiten, bauspezifische Massnahmen etc.), dem Erstellen der Aufnahme-, Detail- und Verlegepläne samt Stücklisten bis zum Informieren der beteiligten Handwerker auf dem Bau sowie der Begleitung der Ausführung wurde sehr eng mit dem Architekten und der ausführenden Unternehmung zusammengearbeitet. Auf der Baustelle wurde zudem darauf geachtet, dass die VIP möglichst rasch vor Beschädigungen geschützt wurden.

Die VIP wurden auf die Polyethylenschaumfolie (Ethafoam) gelegt, die Fugen mit Aluklebeband abgeklebt. Praktisch im selben Arbeitsgang wurde dann die Zusatzdämmungen verlegt, was die Exposition der VIP auf der Baustelle minimiert.



Abbildung 27: Baustelle und fertiggestellte Terrasse. Die VIP werden bereits während des Einbaus gut geschützt.

#### Kommentar:

Das frühe Einbinden aller Beteiligten in die VIP-spezifische Materie und die enge Mitarbeit einer mit der VIP-Technologie vertrauten Person während dem gesamten Prozess (inkl. Ausführung) hat sich sehr bewährt. Der anfänglichen Skepsis betr. Massgenauigkeit, Bauablauf und Beschädigungsgefahr konnte so entgegen gewirkt werden, was am Ende gar zu einer Begeisterung über die Möglichkeiten dieser neuen Technologie mündete.

#### 4.3.4 Kosten, Nutzen, Risiken

Mit durchschnittlich CHF 120.-- (inkl. Transport, Sonderformate, MwSt.) werden die Materialkosten als das hauptsächliche Handicap von VIP betrachtet. Zudem mussten dem ausführenden Unternehmer die VIP-spezifischen Zusatzaufwendungen vergütet werden.

Die ausgeführte Lösung des Ursprungproblems war damit teurer als dies das erneute Liefern der Fensterfronten gewesen wäre.

Sollten einzelne VIP versagen, so müsste stellenweise die wasserführende Schicht aufgeschnitten, die Paneele ersetzt und erneut abgedichtet werden. Die Lösung mit Stelzlager / Gartenplatten ermöglicht eine optimale Zugänglichkeit zur wasserführenden Schicht.



*Kommentar:*

*Nach Äusserungen der Architekten wäre es hilfreich, wenn baldmöglichst verlässliche Lebensdauer-Abschätzungen (wenn möglich sogar mit entsprechenden Garantien) zur Verfügung stehen würden. Obwohl beim Lieferanten mehrmals nachgefragt wurde, waren die Architekten zum Zeitpunkt des Gespräches nicht im Besitz einer materialspezifischen Garantieschrift. Es wird von den SIA-Garantiefrieten ausgegangen, was im Gespräch mit Bauherrschaften neben den Kosten als weiteres grosses Problem in Erscheinung treten dürfte.*

#### **4.4 Bodendämmung eines Kühl- und Tiefkühlraumes Modernisierung eines Geschäftshauses in Winterthur/Schweiz**

Standort:

COOP Center Grüze

Rudolf Diesel-Strasse 19

CH-8404 Winterthur

Planung und Realisierung der Vakuumdämmung:

Schneider Dämmtechnik

Im Hölderli 26

CH-8405 Winterthur

VIP: VACUtex 20 oder 40 mm im Bodenaufbau



Abbildung 28: Baustelle der Bodendämmung im Kühlraum.

Die Dämmvorschriften verlangen, dass bei Kühl- und Tiefkühlräumen die Wärmeverluste pro Quadratmeter Bauteil 5 Watt nicht übersteigen (bei 20 °C Aussentemperatur). Insbesondere bei Tiefkühlräumen sind Dämmstärken von 30 bis 40 cm notwendig, je nach Dämmstoff bzw. Temperaturniveau des Tiefkühlraumes. Dies führt vor allem zu Platzproblemen, wenn Kühl- und Tiefkühlräume nachträglich eingebaut werden. Besonders kritisch ist die Situation dann

meist im Bodenbereich. Ein zusätzlicher Bodenaufbau in dieser Grössenordnung schafft für den praktischen Gebrauch enorm hinderliche Stufen und auch die Entfernung der obersten Lagen des bestehenden Bodens reicht in der Regel nicht, um dies zu vermeiden. VIP bieten in diesen Situationen einen grossen Nutzen. Demzufolge spielt der Materialpreis von VIP für diese Anwendung auch eine untergeordnete Rolle. Zudem liegt auch die Erwartung bezüglich Funktionsdauer nicht so hoch wie bei Wohnbauten. Kühl- und Tiefkühlräume bleiben selten länger als 15 bis 20 Jahre unverändert in Betrieb. Meist führen betriebliche Änderungen, Umstellungen im Sortiment oder baulich-architektonische Umgestaltungen bereits früher zu einem Ersatz oder der Aufhebung von solchen Raumzellen. Mit der verkürzten Lebensdauererwartung werden auch die Ungewissheiten und Versagensrisiken von VIP relativiert. Kühl- und Tiefkühlräume gehörten denn auch zu den ersten Anwendungen von VIP im Baubereich.

#### 4.4.1 Material und Konstruktion

Der Untergrund muss eben sein (bzw. geebnet werden). Darauf wird als erste Lage die Dampfsperre (Alu 10 B) eingebracht und als weitere Schutzmassnahme eine PE-Weichschaumfolie ausgerollt, auf welche die VIP satt gestossen verlegt werden. Damit die VIP nicht durch Begehung oder durch herabfallende Gegenstände verletzt werden, wird jede Platte bereits beim Lieferanten formatgenau oberseitig mit einer Polyolefinfolie (Dachbahn) beklebt. Die VIP-Lage wird anschliessend mit einer 6 mm starken Gummischrotmatte abgedeckt, welche auch groben „Attacken“ standhält. Auf einer Trennlage (PE-Folie) wird schliesslich der 40 mm starke Epoxi-Mörtel als Gehbelag eingebracht. Bei Kühlräumen (Raumtemperatur 2 bis 10 °C) werden 2 cm starke VIP eingebaut. Die VIP werden vom einen Rand her beginnend verlegt und am gegenüberliegenden Anschlag in die Kühlraumwand (Blech-PU-Blech) eingelassen, wobei die dabei entstehenden Fugen mit PU ausgeschäumt werden.

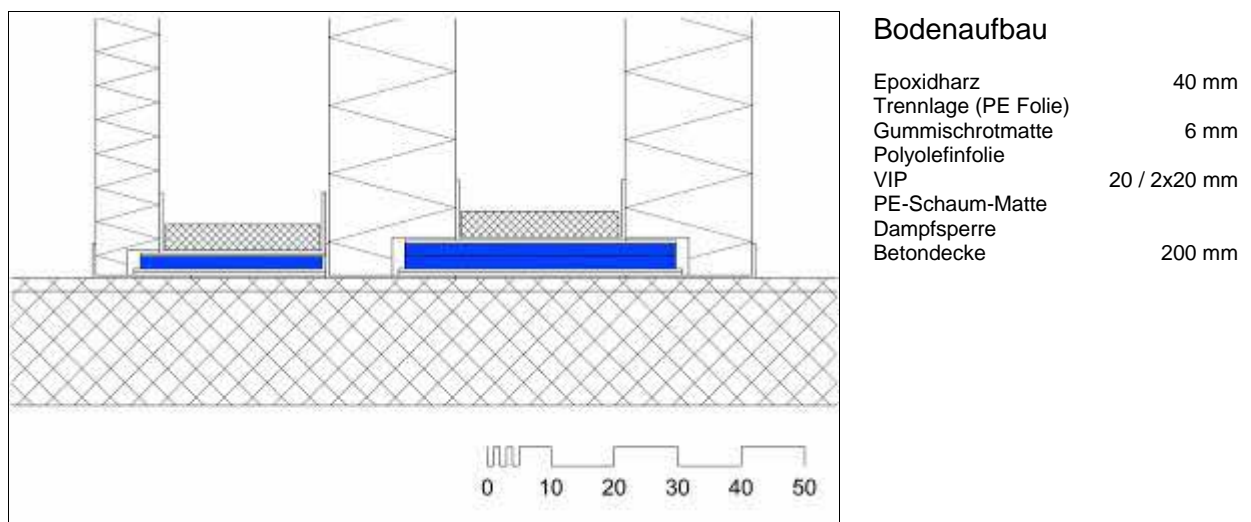


Abbildung 29: Vertikalschnitt durch den Bodenaufbau des Kühlraumes (links) und des Tiefkühlraumes (rechts).

Bei Tiefkühlräumen (-18° und kälter) werden die VIP zweilagig eingebracht. Auch hier sind alle Platten oberseitig mit Polyolefinfolie geschützt. Die Platten werden mit im Minimum um 20 cm versetzten Stössen verlegt, um die Wärmebrückenwirkung der Stösse zu minimieren.



Die VIP-Lage wird in diesem Fall allseitig in die umgebenden Wände eingelassen, um auch im Randbereich keine thermische Schwächung herbeizuführen.

#### **4.4.2 Bauphysikalische und bautechnische Aspekte**

##### **Wärmebrücken**

Bei Tiefkühlräumen sind Wärmebrücken in der Dämmschicht unzulässig. Tiefkühltürfälze beispielsweise, wo thermische Schwächungen nicht zu vermeiden sind, müssen beheizt werden, damit sich kein Eis bildet. Bei Kühlräumen können milde thermische Schwächungen, z.B. in Form von einfacheren Anschlussdetails, in Kauf genommen werden.

##### **Dampfdiffusion und Materialfeuchte**

Kühlraum- und insbesondere Tiefkühlraumkonstruktionen sind dampfdichte Konstruktionen. Auch die innere Lage der Bodenkonstruktion mit dem Epoxi-Mörtel, der aus bauphysikalischer Sicht nicht dicht zu sein bräuchte, ist faktisch dampfdicht. Die bauphysikalisch notwendige Dampfsperre muss bei gekühlten Räumen auf der Aussenseite der Wärmedämmung liegen (oder der Dämmstoff selbst ist dampfdicht, d.h. Schaumglas). Anders als im Wohnungsbau besteht bei Kühlräumen ein permanentes Dampfdruckgefälle und kein Wechselspiel von Kondensations- und Austrocknungsphase. Die eingesetzten Dampfsperren müssen daher sehr dicht sein. Bei VIP wird mit einer sehr geringen Dampfwanderung gerechnet. Nach heutigem Stand der Erkenntnis ist aber nicht damit zu rechnen, dass sich im Zeitraum der Funktionsdauer im inneren des VIP tiefkühlraumseitig Eis bildet.

##### **Verhalten bei Vakuum-Versagen**

Versagt das VIP bei Kühlräumen steigt der U-Wert erheblich auf ca.  $0.75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  an. Wegen der geringen Temperaturdifferenzen sind aber bei der vorliegenden Konstruktion keine negativen bauphysikalischen Auswirkungen zu befürchten. Überraschenderweise ist das Schadenrisiko durch Vakuumversagen bei den VIP sogar bei Tiefkühlräumen nicht sehr gross. Selbst wenn zwei aufeinanderliegende VIP versagen, stellen sie in der vorliegenden Konstruktion immer noch den weitaus dominierenden Anteil des Wärmedurchlasswiderstandes, so dass die Temperatur auf der Aussenseite des VIP relativ nahe bei der Aussenlufttemperatur zu liegen kommt und die Kondensationsperioden an dem Hüllmaterial kurz sind (und hier ja Austrocknung nach aussen stattfinden kann). Ausserdem wirkt die Betonplatte als effizienter Wärmeverteiler, der dem ausgekühlten Bereich Wärme zuführt und das Kondensationsrisiko weiter vermindert.

Wegen des fugenlosen, hochwertigen Mörtelbelages, der als Bodenbelag benötigt wird, ist der Ersatz eines einzelnen VIP nicht, bzw. nur mit enormem Aufwand möglich.

#### **4.4.3 Ablauf von Planung und Ausführung**

Die Firma Schneider Dämmtechnik führt die Kühlraumdämmungen mit VIP mit eigenen Handwerker-Teams aus. Dies erlaubt eine gute Instruktion der Handwerker und die Ausführungserfahrung bleibt für weitere Objekte erhalten. Es werden detaillierte Verlegepläne erstellt. Die Flächen werden dabei zunächst mit dem Standardformat  $1000 \times 500 \text{ mm}$  gefüllt. Dann werden die notwendigen Sonderformate ermittelt. Es werden auch sehr komplizierte Formen aufgenommen und bestellt. Es werden grundsätzlich keine Restflächen toleriert, die mit einem zuschneidbaren Ersatzdämmstoff (z.B. PU) gefüllt würden.

#### 4.4.4 Kosten, Nutzen, Risiken

Die Firma Schneider Dämmtechnik arbeitet mit VACUtex VIP. Jede einzelne Platte enthält einen Sensor, der die Messung des Druckes als Endkontrolle erlaubt. Die Platten sind dadurch teurer als Konkurrenzprodukte. Der Quadratmeterpreis liegt für die Normformate bei den 2 cm starken Platten bei CHF 162.--.

### 4.5 Nichttragende Sandwich-Elemente Neubau eines Einfamilienhauses in Landschlacht/Schweiz

Standort:

Oberer Seeweg 9

CH-8597 Landschlacht/TG

Architekt:

Architekturbüro Beat Consoni

Pestalozzistr. 38

CH-9400 Rorschach/SG

Andere Beteiligte:

VIP-Lieferant: SAES Italien (Microtherm)

Produzent der Wandelemente: NIKOL MULTIPLAC, CH-5412 Gebenstorf

Metallbau ALGE, Widnau, (ausführendes Unternehmen)

Metallbau-Ingenieurbüro: Reto Gloor, Guntershausen, [www.mbtgloor.ch](http://www.mbtgloor.ch)

Bauphysik: IPG Keller, Kreuzlingen, Frau Adolph

Baujahr 2003



Abbildung 30: Einfamilienhaus mit VIP-Wandelementen.

Beim Erstellen des behördlichen Wärmeschutznachweises stellten die Beteiligten fest, dass zur Kompensation des hohen Glasanteils der Fassade zusätzliche Wärmedämmung in der Fassade eingesetzt werden muss. Dem entgegen wünschte der Architekt, wegen des engen Bauperimeters, eine Aussenwand von möglichst geringer Stärke und war bereit, eine neuartige Materialtechnologie einzusetzen. Diese behördlichen und architektonische Vorgaben führten zu einem konstruktiv neuartigen Wandaufbau als VIP-Warmfassade. Die Beteiligten

sind mit dem Einbau der acht VIP-Wandelemente im Erdgeschoss mit einer Fläche von rund 50 Quadratmeter zufrieden.

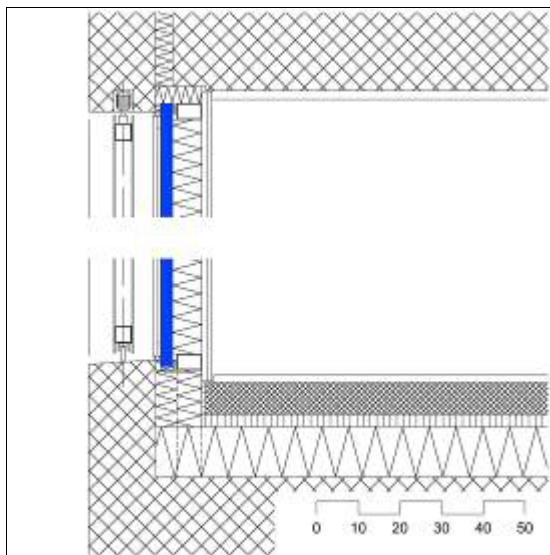
*Kommentar:*

*Der Wunsch nach Bauteilen von geringer Stärke ist verbreitet und begünstigt die Prüfung von konstruktiven Varianten mit VIP. Im vorliegenden Fall gelang es, dank der Kompetenz und des Engagements der beteiligten Planer und Firmen eine neuartige, gute Lösung umzusetzen.*

**4.5.1 Material und Konstruktion**

Im vorliegenden Projekt wurden acht Fassadenelemente als Warmfassade in NIKOL-MULTIPLAC-Sandwichplatten ausgeführt. Die Sandwichplatten wurden vor einem Metallrahmen eingebaut. Auf der Innenseite erfolgte der Einbau einer sechs Zentimeter starken Mineralwollplatte, abgedeckt mit zwei Gipskartonplatten.

Aufbau der NIKOL-MULTIPLAC-Sandwichelemente von Innen nach Aussen:



**Wandaufbau**

|  |           |
|--|-----------|
| Gipskartonplatte   | 2x12.5 mm |
| Mineralwolle   | 60 mm     |
| Stahlblech, feuerverzinkt  | 1.5 mm    |
| Microtherm VIP Element   | 25 mm     |
| Alu-Blech, farblos eloxiert  | 2 mm      |
| Luftzwischenraum und Klebung   | 1 mm      |
| Glas, Schwarz hinterlegt   | 6 mm      |
| Hinterlüftung bis zu geschosshohen, beweglichen, fahrbaren Sandwichplatten als Blend-, Sonnenschutz und Lichtregler            | 20 mm     |
| Umleimer: Acquacombi (rezykliertes Polyurethan, gemischt mit Thermoplasten und Hilfsstoffen; Wärmeleitfähigkeit 0.073 W/(m·K)) |           |

Abbildung 31: Vertikalschnitt mit VIP-Wandelementen.

*Kommentar:*

*Nachdem die EMPA die Empfehlung publizierte, wonach das VIP wegen der Verstärkung des Wärmebrückeneffektes nicht direkt mit einer Metallbeplankung in Berührung stehen sollte, würde heute von der Firma NIKOL eine zusätzliche PVC-Platte oder eine Flieseinlage auf beiden Seiten eingebaut, um den direkten Kontakt der VIP mit dem Sandwichblech zu vermeiden. Zur Zeit der Detailplanung wurde ein besonderer Schutz des VIP im Sandwich nicht in Betracht gezogen. Die Fassade verfügt über geschosshohe, bewegliche Schiebladenelemente, die in Ruheposition vor den VIP-Sandwichen stehen. Die Fassadenelemente sind nicht ausserordentlich sonnenexponiert, da das auf beiden Seiten auskragende Obergeschoss auch zu Beschattungen führt. Die Temperatureinwirkung durch die auf das schwarz hinterlegte Glas auftreffende Sonne ist unklar. Einerseits bewirkt das Glas einen Schutz, andererseits führt die schwarze Farbe tendenziell zu einer Überwärmung. Die VIP sind in direktem Kontakt mit den Metallbeplankungen eingebaut und damit dem Einfluss von andauernd sich wiederholenden Temperaturschwankungen ausgesetzt, was zu Verschleisserscheinungen führen könnte. Zu diesen physikalischen Phänomenen wurden keine Berechnungen oder Simulationen durchgeführt.*



Abbildung 32: Fassaden- und Sockeldetail mit den Schiebeelementen in Ruheposition vor den VIP-Wandelementen.

Bei den verwendeten VIP der Firma SAES müssen einige Eigenschaften beachtet werden, die den Einsatz am Bau einschränken:

- Limitierte Plattengrösse: Die maximalen Liefermasse (max. 600 x 1200 mm) sind klein. Das Zusammensetzen grosser Abmessungen aus mehreren kleinformatigen VIP ist wärmedämmtechnisch ungünstig.
- Massgenauigkeit: Die zu gewärtigenden Toleranzen von +/- 6mm sind gross. Der Randbereich muss grosszügig bemessen, mit wärmetechnisch schlechterem Dämmmaterial ausgefüllt werden und das Einpassen erfordert sorgfältige Handarbeit.
- Lieferung: Kleine Stückzahlen und uneinheitliche Grössen sind für die italienische Produktionsfirma eher uninteressant, was zu Lieferverzögerungen führen kann.

#### 4.5.2 Bauphysikalische und bautechnische Aspekte

##### Wärmebrücken

Die Sandwichplatten sind an einen zwischen die Stahlstützen befestigten Metallriegel eingepasst, angeklebt und beidseitig mit Aluklebeband luft- und dampfdicht abgeklebt. Der Randabschluss aus 2 cm starkem PU-Schaum-Rezyklat (Acquacombi) stellt wärmetechnisch den schwächsten Teil des Sandwichs dar ( $\lambda = 0.073 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ). Das Füllmaterial für die Restflächen wird aus Polyurethan, beidseitig alubeschichtet, ausgeschnitten und eingesetzt. Auf der Aussenseite des Sandwichs befindet sich vor der Glasabdeckung (10 mm) ein Luftspalt (8 mm). Raumseitig bedeckt eine 6 cm dicke Mineraldämmung die ganze Konstruktion. Es handelt sich um ein konstruktiv und ausführungstechnisch anspruchsvolles Detail mit gravierenden Wärmebrücken im Stützenfussbereich. Wärmebrückenberechnungen wurden nicht durchgeführt.

##### Dampfdiffusion und Materialfeuchte

Die NIKOL-MULTIPLAC-Sandwichplatten sind vollständig aus feuchteunempfindlichen Materialien wasserfest zusammengeklebt und weisen eine gute Luft- und Dampfdichtheit auf. Nach dem Einbau wurden die VIP beidseitig mit Aluklebeband luft- und dampfdicht abgeklebt.

### **Verhalten bei Vakuum-Versagen**

Das VIP steht auf beiden Seiten in direktem Kontakt mit der Metallbeplankung der Sandwichplatte (Alu und verzinktes Stahlblech). Bei wiederkehrenden, starken Temperatureinwirkungen, könnte eine Verminderung der VIP-Lebensdauer erfolgen. Im Versagensfall der Vakuumdichtigkeit würde sich der U-Wert der Wand-Konstruktion dank der 60 mm Mineralwolldämmung ( $U = 0.33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) nicht in unzulässigem Masse verschlechtern, so dass der bauphysikalische Mindestwärmeschutz (Kondensattrisiken) nicht unterschritten würde.

### **4.5.3 Ablauf von Planung und Ausführung**

Der Architekt entwickelte das Detail zusammen mit dem Metallbauingenieur, der auch die Ausschreibungsunterlagen mit allen Massangaben erstellte. Die Ausführungsplanung erfolgte durch den Metallbauer, die Ausführungspläne sowie die Produktionsüberwachung der Sandwichplatten erfolgte durch die Firma NIKOL MULTIPLAC. Beim Eintreffen der Sandwich-Elemente in der Metallbauwerkstatt wurden diese mit „Vorsicht“-Hinweisen angeschrieben, zwischengelagert und erst zum geeigneten Zeitpunkt zum Einbau auf die Baustelle transportiert.

Unter den Beteiligten fand kein Informationsaustausch über die Handhabung der VIP-Sandwichelemente statt.

### **4.5.4 Kosten, Nutzen, Risiken**

Die VIP-Sandwichelemente kosten etwa CHF 300-350/m<sup>2</sup>, was bei 80 Quadratmetern zu einem Totalpreis von CHF 24-28'000.-- führt.

Die Firma NIKOL MULTIPLAC gewährt die normalen Garantiefristen nach OR und SIA. Bis heute ist noch kein Garantiefall eingetroffen. Es bestehen keine besonderen Garantievereinbarungen mit der italienischen VIP-Produktionsfirma SAES.

#### *Kommentar:*

*Bei VIP handelt es sich um ein neuartiges Dämmmaterial, welches im Ausland produziert, laufend technisch verbessert wird und mit welchem die beteiligten Akteure noch wenig Erfahrungen sammeln konnten. Aus diesen Gründen ist es sehr ratsam, beim Einsatz von VIP ein gutes Fachteam zu bilden und alle konstruktiven, materialtechnischen und bauphysikalischen Probleme und Risiken zu erörtern und genau abzuklären*

*Für den Versagensfall der VIP sollen geeignete Vorkehrungen getroffen werden (z.B. minimaler Wärmeschutz (kein Kondensattrisiko) und Raumkomfort sollen gewährleistet sein, Auswechseln der Paneele soll einfach sein etc.).*

### Ergänzung

Die NIKOL MULTIPLAC Sandwichelemente sind in verschiedenen Ausführungen und in Grössen nach Mass erhältlich. VIP können ein- oder zweilagig eingebaut werden. Sie werden geschützt mit zusätzlichen dünnen PU-Schichten oder Hart-PVC-Platten. Als äussere und innere Element-Abdeckungen werden Blech, Kunststoff oder Holz eingesetzt.

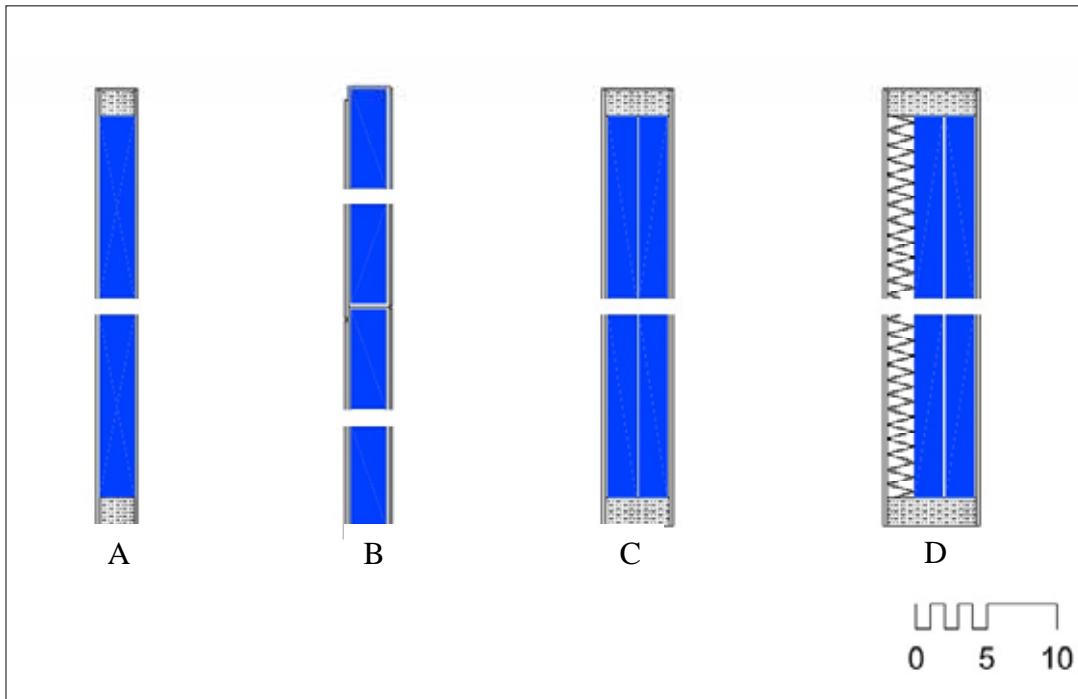


Abbildung 33: VIP-MULTIPLAC Elemente

A für Pfosten-Riegel-Fassaden-Systeme

B für Aussenanwendungen

C, D mit erhöhtem Wärmeschutz und Schutz gegen hohe Temperaturen.

## 4.6 Brüstungsdämmung in einem Fensterelement Mehrfamilienhausumbau mit Fensterersatz in Basel/Schweiz

Standort:  
Hagentalerstr. 53  
CH-4053 Basel

Bauträgerin:  
Judith Bucher, Basel

Bauplaner und Bauphysiker:  
Franco Fregnan, Basel  
www.fregnan.ch

VIP: Vacucomp 30 mm in der Brüstung eines Fensterelements, ZZWancor



Abbildung 34: Fensterelement mit eingepasstem VIP.

Eine von zwei Balkontüren wurde entfernt und durch ein Fensterelement ersetzt. Das Brüstungsteil dieses Elements wurde als Rahmenverbreiterung konstruiert und angeschlagen. Im Brüstungsbereich schliesst raumseitig die Küchenkonstruktion an das Element an.

*Kommentar:*

*Das Bauteil eignete sich gut für den Einbau von VIP. Für Bauteile wie Fensterbrüstungen oder Rahmenverbreiterungen, die eine gewisse Grösse aufweisen, konstruktiv nicht anspruchsvoll sind und bei denen das Beschädigungsrisiko beim Einbau und im Betrieb gering ist, sind VIP vorteilhaft einzusetzen.*



#### 4.6.1 Material und Konstruktion

Die anfängliche Absicht, das VIP raumseitig in die Brüstung einzubauen, wurde wegen Lieferverzögerung des VIP fallen gelassen, da nach der Montage der Küche der Einbau hinter der Küchenkombination stark erschwert gewesen wäre. Der VIP-Einbau (586 x 588 x 30 mm<sup>3</sup>) erfolgte von der Balkonseite, und die Brüstung wurde mit einer verschraubten Beplankung geschlossen.

*Kommentar:*

*Es ist darauf zu achten, dass das VIP-Panel auch verspätet, z.B. bei verzögerter Lieferung, eingebaut werden kann. Auch die Möglichkeit eines späteren Ersatzes sollte in den konstruktiven Entwurf mit einbezogen werden.*

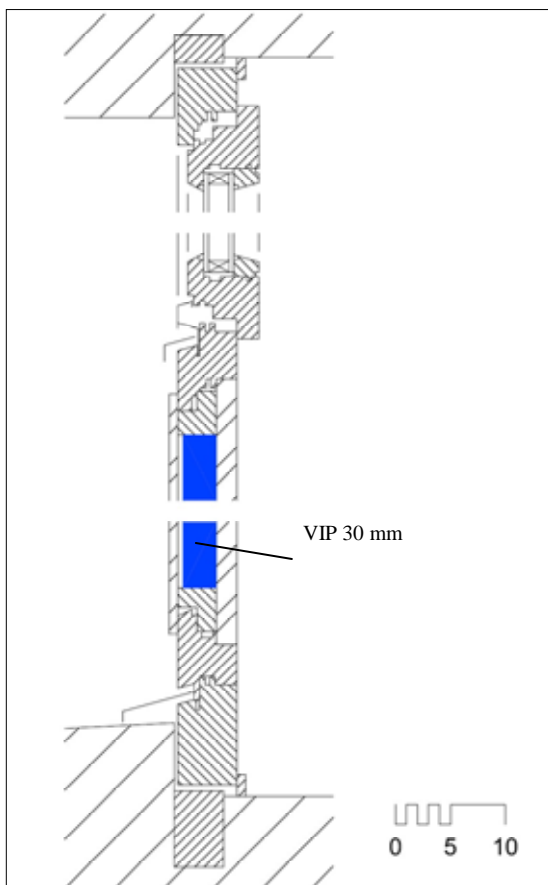


Abbildung 35: Brüstung mit VIP-Panel (Schnittskizze des Fensterbauers Schwald AG, Basel).

#### 4.6.2 Bauphysikalische und bautechnische Aspekte

##### Wärmebrücken

Im vorliegenden Fall schliesst das VIP direkt an die Holzprofile der Rahmenverbreiterung an. Es wurde passgenau bestellt und konnte mit leichtem Druck in die Brüstungsaussparung eingefügt werden. Für den Randbereich musste kein Füllmaterial verwendet werden. Es bestehen keine gravierenden Wärmebrücken. Der Einfluss des Randbereichs des VIP auf die Dämmwirkung wurde nicht untersucht.



### **Dampfdiffusion und Materialfeuchte**

Die innere Brüstungsbeplankung wurde wasserfest verleimt und ist damit luft- und auch dampfdichter als die äussere, geschraubte Abdeckung. Feuchtigkeitsprobleme und -risiken sind nicht zu erwarten.

### **Verhalten bei Vakuum-Versagen**

Sollte das Vakuum versagen, schützt der Dämmwiderstand des Stützkörpers immer noch besser, als Dämmmaterialien in handelsüblichen Rahmenverbreiterungen. Der U-Wert wäre dann anstelle von  $0.30 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  noch  $0.70 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , d.h. immer noch besser als bei einer normalen Rahmenverbreiterung (U-Wert ca.  $1.0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).

### **4.6.3 Ablauf von Planung und Ausführung**

Der Bauplaner entwickelte das Detail zusammen mit dem Fensterbauer, welcher das Panel beim VIP-Lieferanten bestellte. Es wurde vom Bauplaner festgesetzt, dass dieser vor dem Einbau informiert wird und beim Einbau zu Dokumentationszwecken und zur Qualitätsüberwachung dabei sein kann.

Die Anlieferung und der Einbau des VIP erfolgten ohne besondere Vorkehrungen. Das VIP wurde mit leichtem Druck in die Konstruktion eingebracht. Die Belastung des Hüllmaterials beim Überwinden des Einpasswiderstands führte nicht zu einer Beschädigung.

#### *Kommentar:*

*VIP sollten eher zu klein als exakt bestellt werden. Beim passgenauen Einbau muss geeignetes Füllmaterial zur Verfügung stehen.*

*Bei den VIP-Herstellern und -Händlern sollen Planungshinweise verlangt werden, in welchen Angaben zum mittleren Wärmedurchgang in Abhängigkeit der Abmessung des VIP genannt werden.*

### **4.6.4 Kosten, Nutzen, Risiken**

Die Mehrkosten von ca. CHF 200.-- (entspricht einem Quadratmeterpreis von CHF 580.--) wurden untergeordnet beurteilt. Es wurde sehr geschätzt, dass mit wenig Aufwand ein innovatives Zukunftsmaterial eingesetzt und ein wärmetechnisches bzw. bauphysikalisches Problemteil entschärft werden konnte. Eine detaillierte Kosten/Nutzen-Betrachtung wurde nicht durchgeführt.

Es wurden keine besonderen Garantievereinbarungen getroffen.

## 4.7 Fassade mit vorfabrizierten Vakuumdämmelementen Reihenhäuser in Binningen/Schweiz

Standort:  
Kirchweg/Florastrasse  
CH-4102 Binningen

Architekt:  
Architektenbüro Feiner Pestalozzi  
Bärenfelsenstrasse 21  
CH-4057 Basel

Fassadensystem: Häring AG, Pratteln, Schweiz  
Lieferant der Vakuumelemente: lambdasave GmbH, Emden, Deutschland

Baujahr: 2005

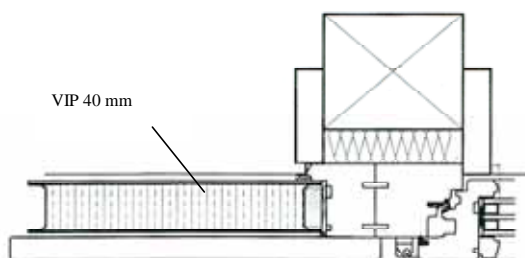


Abbildung 36 links: Ansicht der Reihenhausbauweise und Horizontalschnitt durch die Konstruktion.  
rechts: Installation eines Vakuumdämmelements.

An der Nord- und Südfassade der fünf in Holzbauweise errichteten Reihenhäuser werden geschosshohe Vakuumdämmelemente (ca.  $2.60 \times 1.60 \text{ m}^2$ ) in einer Holzfensterrahmenkonstruktion eingesetzt. Die Elemente der Firma Lambdasave bestehen aus einem mikroporösen Stützkern und Deckschalen aus Edelstahl ( $>0.5 \text{ mm}$ ), die mit einem dünnen Edelstahlprofil als Randverbund verschweisst werden. Es sind Paneeldicken von 15, 30 und 40 mm in den Abmessungen von  $0.50 \times 0.50 \text{ m}^2$  bis  $3.00 \times 8.00 \text{ m}^2$  lieferbar. Die in diesem Projekt eingesetzten Vakuumdämmelemente ( $d = 40 \text{ mm}$ ) haben in Paneelmitte laut Hersteller einen U-Wert von  $0.14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , ohne Berücksichtigung der Verluste des Randverbundes und der Rahmenkonstruktion. Die Paneele sind aus ästhetischen Gründen aussenseitig mit einer zusätzlichen Verkleidung aus Metall versehen. Innenseitig wird eine Holzverkleidung installiert. Eine spätere Reparatur der Elemente ist durch Schweißen der Beschädigung und nachträgliches Evakuieren möglich. Die Kosten für das gesamte Fassadensystem belaufen sich auf ca.  $450 \text{ CHF}/\text{m}^2$ .

## 4.8 Kompaktfassade mit Schienensystem Modernisierung eines Zweifamilienhauses in Nürnberg/Deutschland

Konstruktion:

Schnös Trockenbau, Knetzgau, Deutschland

VIP-Lieferant:

WACKER CHEMIE GmbH, Kempten, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: November 2000

Förderung: Bay. Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie



Abbildung 37: Aufnahmen der Giebelwand vor (links) und nach (mitte) der Dämmung. Die IR-Aufnahme (von 2003) zeigt die Grenzen zwischen den VIP als helle Streifen (Wärmebrücken) genauso wie Passstücke aus Polystyrol (z.B. im Bereich der Fensterstürze).

Die 1.5 cm dicken VIP der Grösse 0.5 x 0.5 m<sup>2</sup> wurden mit PVC-Schienen und einer Abdeckung auf Polystyrol ( als Putzträger ) an der Wand befestigt. Der U-Wert der Wand verbessert sich von vorher 0.6-0.75 W/(m<sup>2</sup>·K) auf 0.19 W/(m<sup>2</sup>·K). Die PVC-Schienen ermöglichten ein unproblematisches Befestigen und stellen keine wesentliche Wärmebrücke dar. Die Baumassnahmen wurden von Firma Schnös Trockenbau (Knetzgau) ausgeführt. Das System "Vakudämm" ist auch für Innendämmungen geeignet.

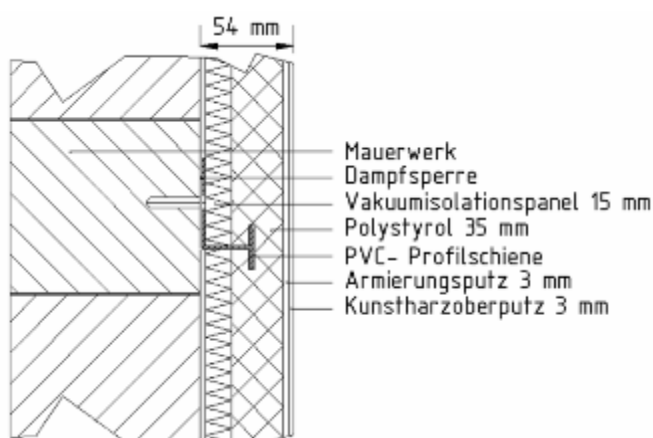


Abbildung 38 links: Querschnitt durch den Wandaufbau. rechts: Giebelwand beim Einbau. Die VIP sind bereits in das Schienensystem eingefügt. Die Polystyrolplatten werden gerade aufgebracht.

## 4.9 Dämmung der Gebäudehülle eines Massivholzhauses Neubau eines Zweifamilienhauses in München/Deutschland

Planung und Bauleitung:  
Lichtblau (Architekten), München, Deutschland

Kontakt:  
Florian Lichtblau, lichtblau-fw@t-online.de

VIP-Lieferant:  
WACKER CHEMIE GmbH, Kempten, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: Januar 2002

Förderung: Bay. Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

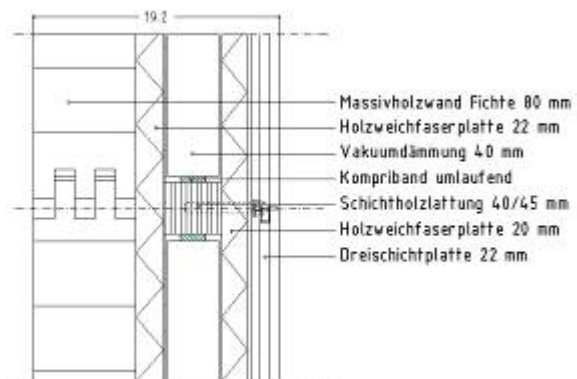


Abbildung 39 links: Südansicht, zwischen den Fenstertüren sind Fassadenkollektoren integriert. rechts: Querschnitt durch den nördlichen Wandaufbau.

Es wurde ein Niedrigstenergiehaus in Massivholzbauweise errichtet, bei dem die hocheffiziente Dämmhülle mit schlanken und architektonisch hochwertigen Konstruktionen eingesetzt wurde. Der Aufbau erlaubt ein Austauschen von belüfteten VIP. Die Gesamtwanddicke beträgt weniger als 20 cm bei einem U-Wert von  $0.14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Um die Wärmebrücken zu minimieren ist es notwendig, massgenaue VIP einzubauen. Die Grösse der hauptsächlich eingesetzten VIP betrug  $100 \times 105 \times 4 \text{ cm}^3$ . Auch für Dach und Aussentüren kamen VIP zum Einsatz.

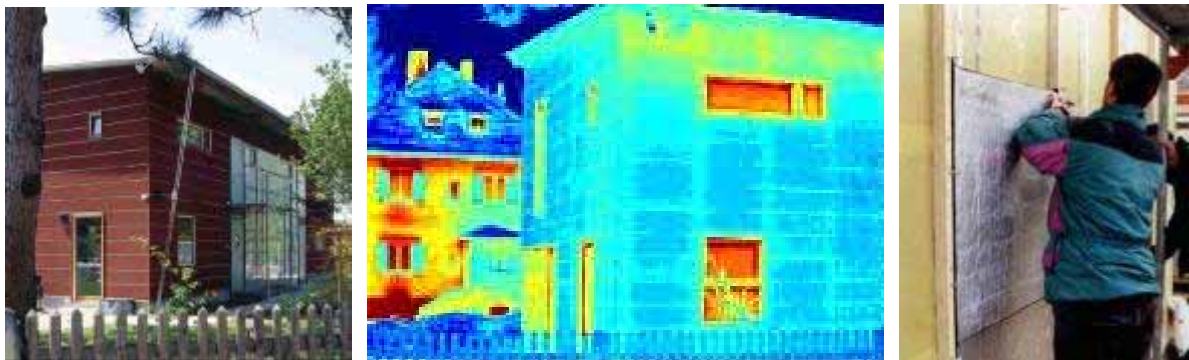


Abbildung 40 links: Nord-Ost-Ansicht des Gebäudes. mitte: IR-Aufnahme mit ungedämmtem Altbau im Hintergrund; die Holzlattung ist klar zu erkennen. rechts: Installation der VIP in die Holzlattung.



## 4.10 Dämmung der Gebäudehülle eines Reihenhauses Modernisierung eines Reihenmittelhauses in München/Deutschland

Planung und Bauleitung:  
Lichtblau (Architekten), München, Deutschland

Kontakt:  
Florian Lichtblau, lichtblau-fw@t-online.de

VIP-Lieferant:  
WACKER CHEMIE GmbH, Kempten, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: Dezember 2001

Förderung: Bay. Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

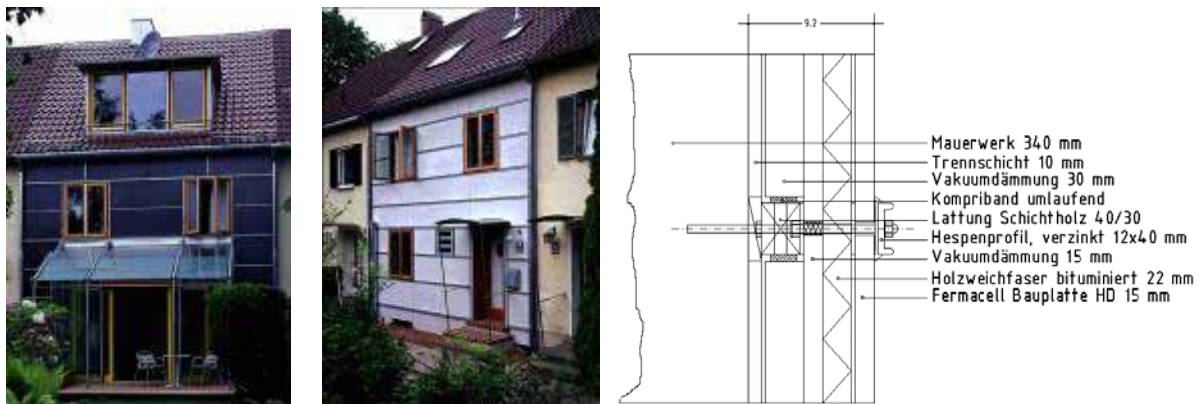


Abbildung 41: Ansicht von Süden (links) und Norden (mitte) nach der Sanierung mit den vollflächig integrierten Solarabsorbern unter Prismenglas, das von Stahlprofilen gehalten wird. Aufgrund der Regenwasserfallrohre ist der Übergang der Dämmkonstruktion zu den Nachbargebäuden sehr unauffällig. Dies konnte nur mit der schlanken, vakuumgedämmten Konstruktion erreicht werden. rechts: Querschnitt des Wandaufbaus der Nordseite.

Die Vakuumdämmung wurde eingesetzt, um einen optimalen Wärmeschutz bei schlankem Aufbau und geringem Konstruktionsgewicht zu erreichen. Wichtig war ein minimaler Fassadenvorsprung zu den unsanierten Nachbarhäusern. Die VIP ermöglichten eine schlanke Ergänzungsdämmung in Dachschrägen, Gauben und Kellerdecke. Der U-Wert beträgt 0.15 W/(m<sup>2</sup>K). Der Gesamtheizenergiebedarf wurde um den Faktor 10 reduziert.

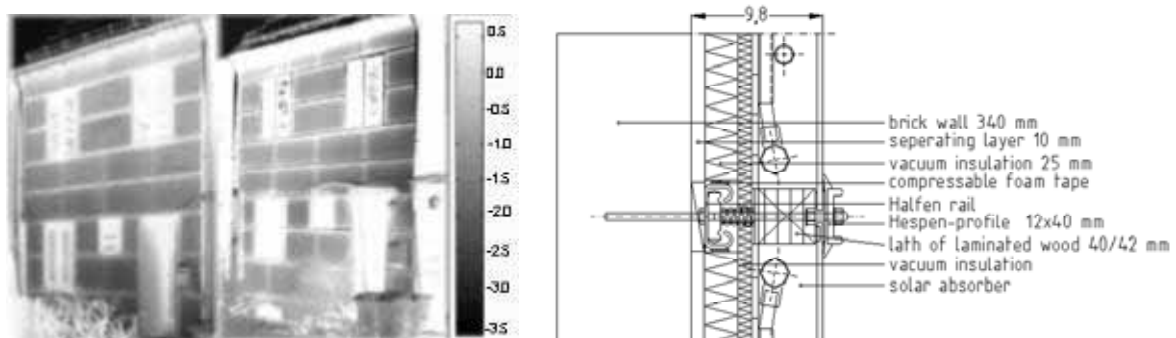


Abbildung 42 links: IR-Aufnahme der Nordseite (2002 und 2003). Es sind die vertikal verlaufenden Fugen zwischen den VIP zu erkennen. rechts: Querschnitt des Wandaufbaus der Südseite.

## 4.11 Dämmung einer Wandheizung Sanierung einer ehemaligen Kirche in Wernfeld/Deutschland

Konstruktion:

Architekt Werner Haase, Karlstadt, Deutschland

VIP-Lieferant:

va-Q-tec AG, Würzburg, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: Mai 2003

Förderung: Bay. Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

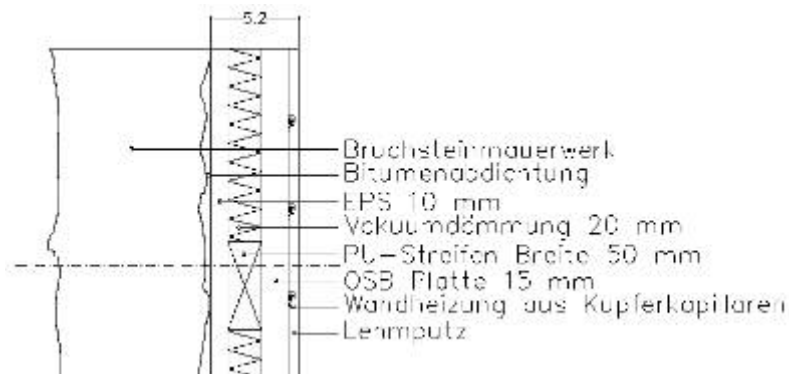


Abbildung 43 links: Montage der VIP mit Dispersionsklebstoff auf die Polystyrolplatten; das Foto zeigt auch die horizontal verlaufenden Polyuretan-Streifen. rechts: Wandinnenseite, nachdem die Vakuumdämmung aufgebracht ist. unten: Querschnitt durch den Wandaufbau.

Aus denkmalpflegerischen Gründen war eine konventionelle Dämmung nicht möglich. Dennoch war eine gute Dämmung erforderlich um die Wärmeverluste über das massive Bruchsteinmauerwerk zu reduzieren. VIP der Größe  $0.5 \times 1.0 \text{ m}^2$  wurden auf die EPS-Platten mit Dispersionsmörtel aufgeklebt. Um ein Eindringen von Raumluftfeuchte in die Wand zu verhindern, wurden die Fugen innenseitig abgeklebt. Zwischen den VIP-Reihen wurde ein 50 mm dicker PU-Streifen eingelegt. Zur Befestigung der Wandheizung wurden 15 mm dicke OSB-Platten vor den VIP über die PU-Streifen angeschraubt, auf denen die Heizschlangen aufgebracht wurden. Diese wurden direkt mit Lehm verputzt.

## 4.12 Fassadenpaneele in einer Pfosten-Riegel-Konstruktion Anbau am Krankenhaus in Erlenbach/Deutschland

Konstruktion:

GLASKEIL GmbH & Co. KG, Würzburg, Deutschland

Kontakt:

Thomas Fiedler, thomas.fiedler@glaskeil.de

VIP-Lieferant:

WACKER CHEMIE GmbH, Kempten & va-Q-tec AG, Würzburg, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: September 2001

Förderung: Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

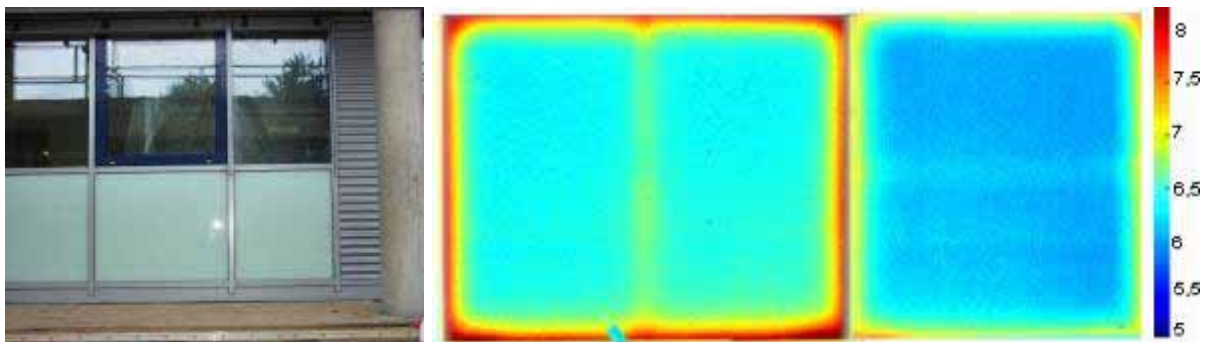


Abbildung 44 links: Aussenansicht der Fassade.

rechts: Thermografie von zwei Fassadenpaneelen. Links wurde ein Edelstahl-Randverbund, rechts ein Purenit-Randverbund eingesetzt.

Es wurde ein konventionelles Pfosten-Riegel-System aus Aluminium verwendet. Die Gesamtdicke der Fassadenelemente war auf 32 mm festgelegt. Die vakuumgedämmten Brüstungselemente wurden anstelle einer 7 cm dicken konventionellen Dämmung eingebaut. Abbildung 44 zeigt die Aussenansicht der Fassade. Dabei ergibt sich theoretisch eine Verbesserung des Wärmedurchlasskoeffizienten von  $0.57 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  auf  $0.22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  bei 18 mm VIP-Dicke. Aufgrund der Wärmebrücken am Rand des vakuumgedämmten Fassadenelementes ergibt sich bei der eingebauten Elementgrösse (etwa  $1 \text{ m}^2$  mit je zwei VIP der Grösse  $0.5 \times 1.0 \text{ m}^2$ ) für den Wärmedurchgangskoeffizienten U-Wert von  $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Vorteilhaft ist, dass die Elemente im Werk angefertigt werden können und auf der Baustelle wie herkömmliche Isoliergläser eingebaut werden können. Bei den Elementen wurde das Material der Abstandshalter variiert: Edelstahl und Purenit.

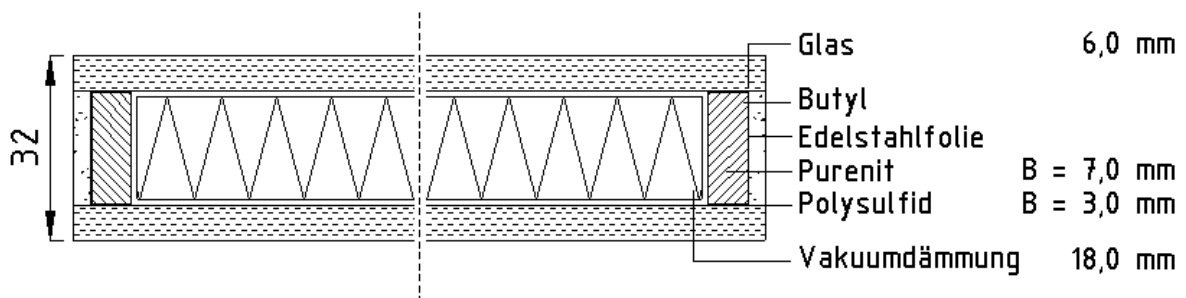


Abbildung 45: Querschnitt durch ein Fassadenelement. Statt der Glasscheibe wurde bei einigen Brüstungselementen ein 3 mm dickes Aluminiumblech verwendet.

## 4.13 Fassadenpaneel mit Heizkörper Testfassade im ZAE Bayern in Würzburg/Deutschland

Konstruktion:

Metallbau Ralf Bötter GmbH, Stuhr, Deutschland

VIP-Lieferant:

ZAE Bayern, Würzburg, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: Februar 2000

Förderung: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, DBU

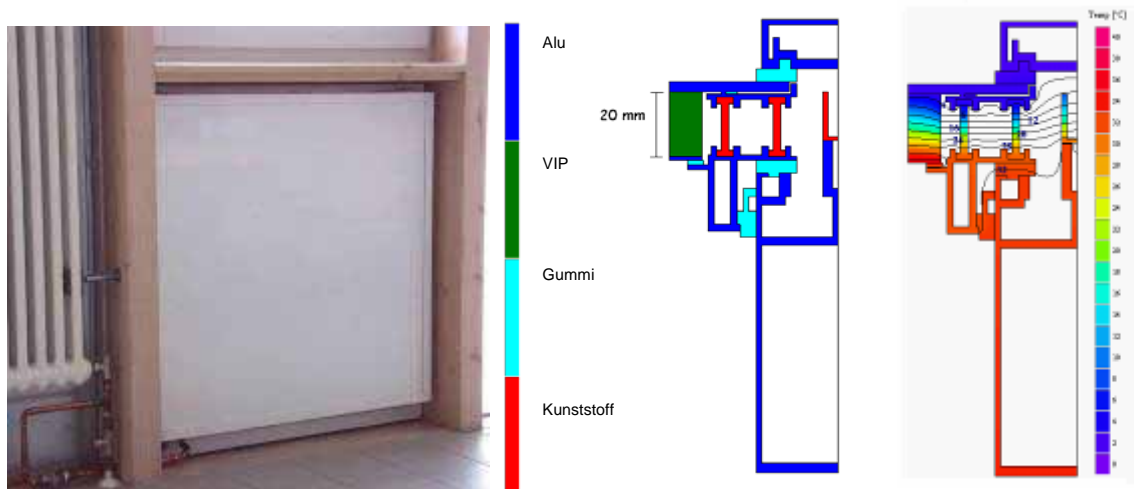


Abbildung 46 links: Innenansicht des Klimapaneels mit Heizkörper.

rechts: Querschnitt durch den Aufbau ohne Heizung. Es wurde die Temperaturverteilung mit einem Finite-Elemente-Programm simuliert. Die Temperaturen sind farblich dargestellt und die Isothermen eingezeichnet.

Es wurde ein schlankes Fassadenverbundsystem mit hinterlüftetem Heizkörper und Vakuumdämmung entwickelt. Das vorgestellte Wandelement besitzt bei einer geringen Dicke von nur 24 mm eine sehr gute Wärmedämmwirkung. Eingebaut sind zwei VIP der Größe 0.5 x 1.0 m<sup>2</sup>. Obwohl der U-Wert im Zentrum nur 0.24 W/(m<sup>2</sup>·K) beträgt, liegt der U-Wert des Gesamtsystems bei 1.0 W/(m<sup>2</sup>·K) und ist sehr stark abhängig von dem U-Wert des Rahmens.



## 4.14 Vorgefertigte Beton-Fassadenelemente mit VIP Bürogebäude mit Apartment in Ravensburg/Deutschland

Konstruktion:

Albert Hangleiter GmbH & Co. KG, Ravensburg, Deutschland

Kontakt:

Dipl.-Ing (TU) M. Hangleiter, Tel: +49 751 36160-0

VIP-Lieferant:

WACKER CHEMIE GmbH, Kempten, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: Mai 2004

Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Förderkennzeichen 0327321 C

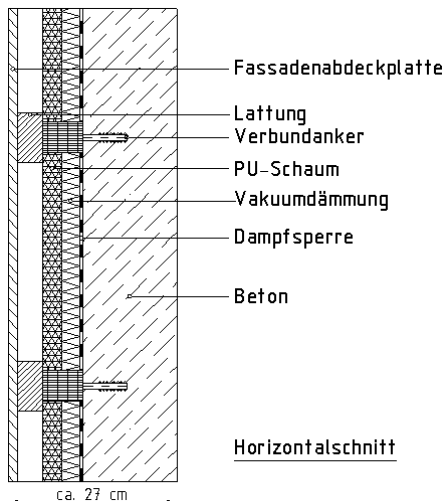
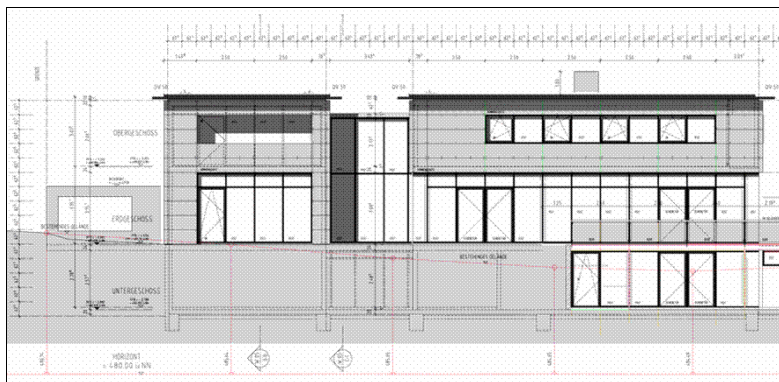


Abbildung 47 oben: Ansicht des geplanten Gebäudes aus Betonfertigteilen. Man erkennt die für den VIP-Einbau notwendige horizontale und vertikale Rasterung.

unten links: Geplanter Wandaufbau der Fertigteile. Bei einer Gesamtdicke von nur 27 cm wird ein mittlerer U-Wert von  $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht.

unten rechts: Ansicht eines fertigen Wandelements.

Für dieses Bauvorhaben werden die VIP bereits werksseitig auf frisch gegossene Betonfertigteile aufgelegt und durch wenige glasfaserverstärkte Anker auf Zug am Beton gehalten. Die Aussenseite bildet eine hinterlüftete Fassade, so dass bei Bedarf jeder Zeit einzelne VIP ausgetauscht werden können. Damit ist eine sehr schlanke wärmebrückenarme Konstruktion (U-Wert  $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) bei hohem Vorfertigungsgrad und Qualitätssicherung gegeben.

## 4.15 Kompaktfassade mit eingeschäumten VIP Einfamilienhaus in Passivhausbauweise in Bersenbrück/Deutschland

Konstruktion VIP-System:  
Sto AG, Stühlingen, Deutschland

Kontakt:  
Sto AG, Markus Zwerger, m.zwerger@stoeu.com

VIP-Lieferant:  
Sto AG / Porextherm Dämmstoffe GmbH

Ausführungszeitpunkt: 2002/2003

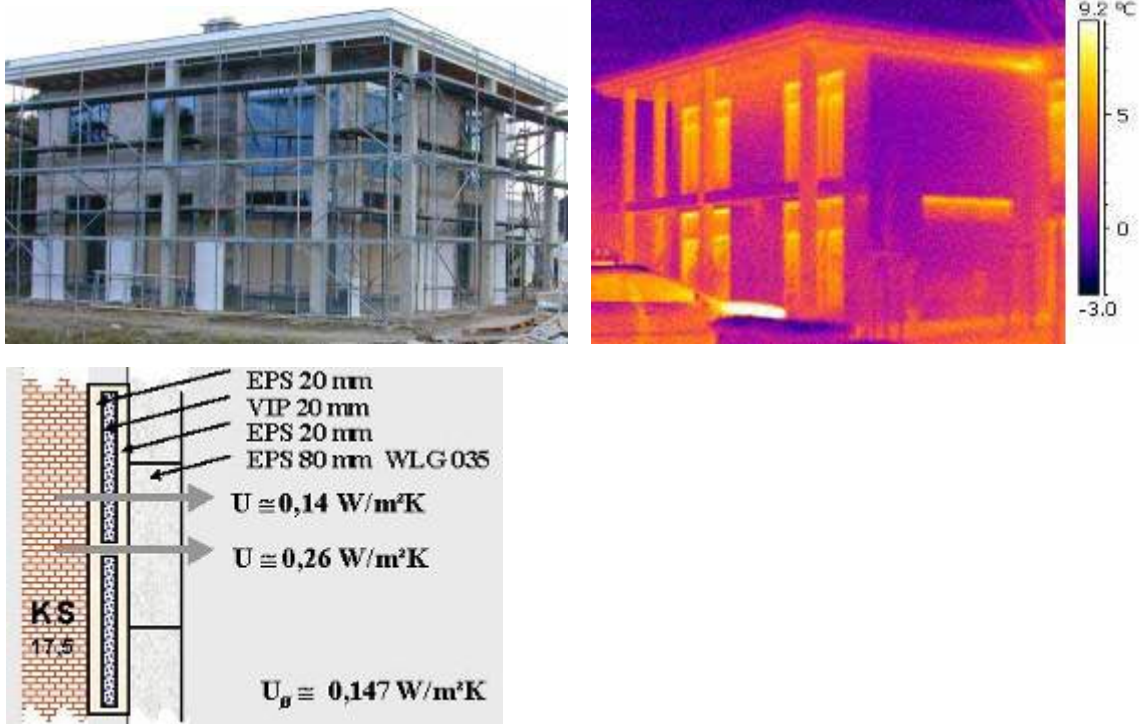


Abbildung 48 links: Süd- und Westansicht des Passivhauses, das bereits teilweise mit eingeschäumten VIP belegt ist.

rechts: Thermografie-Aufnahme des Gebäudes nach Verlegung der zweiten Dämmstofflage.

unten: Querschnitt durch den Wandaufbau. Angegeben sind die Wärmedurchgangskoeffizienten im Zentrum der Paneele, an den Stossfugen und gemittelt über die gesamte Fläche.

Das Passivhaus in Bersenbrück wurde komplett mit eingeschäumten Vakuum-Isolations-Paneelen belegt. Es handelt sich um 20 mm starke VIP, die allseitig mit 20 mm Polystyrol WLG 035 ummantelt sind. Um mögliche Fugenabzeichnungen und Wärmebrückeneffekte zu minimieren wurde eine zweite Dämmstofflage mit einer Dicke von 80 mm aufgebracht. Die Sollvorgabe von  $0,15 W/(m^2 \cdot K)$  konnte mit einem mittleren, rechnerisch ermittelten U-Wert von  $0,147 W/(m^2 \cdot K)$  somit erreicht werden. Thermografische Aufnahmen des Gebäudes vor und nach der Verlegung der zweiten Dämmstofflage belegen, dass die ursprünglichen Wärmebrücken in den Fugenbereichen deutlich reduziert werden konnten.

## 4.16 Kompaktfassade mit Polystyrol-kaschierten VIP Reihenhäuser in Passivhausbauweise am Petrisberg in Trier/Deutschland

Konstruktion VIP-System:  
Sto AG, Stühlingen, Deutschland

Kontakt:  
Sto AG, Markus Zwerger, m.zwerger@stoeu.com

VIP-Lieferant:  
va-Q-tec AG, Würzburg, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: 2004

Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Fördernummer 0327321 J

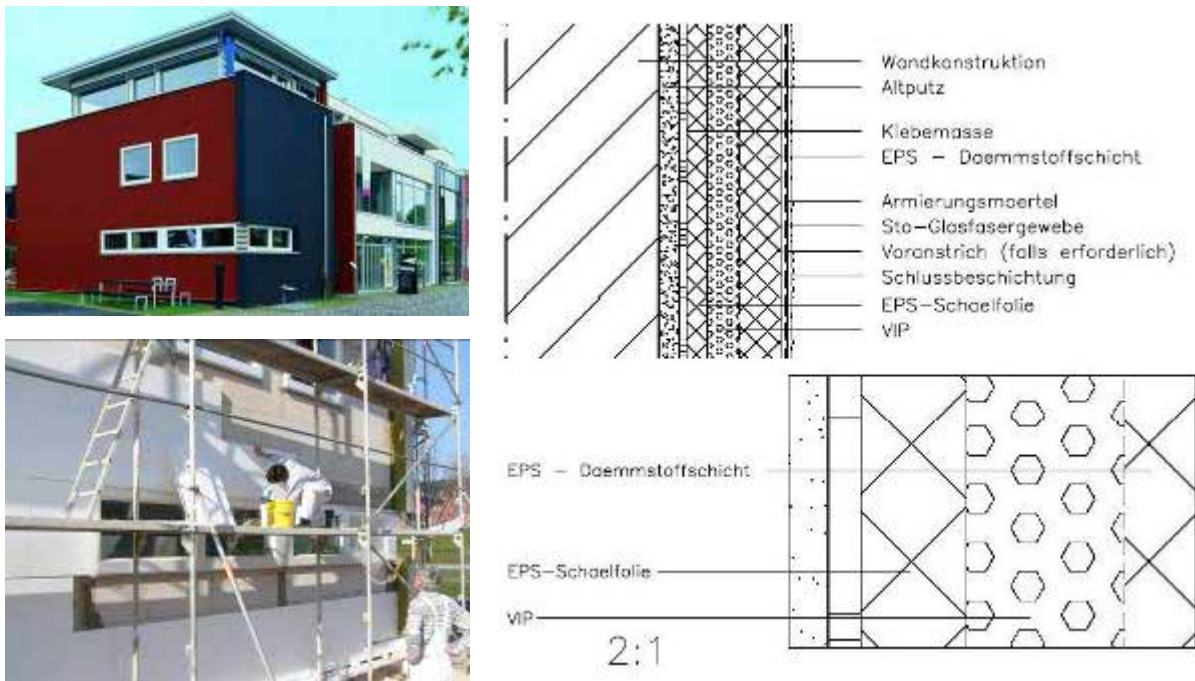


Abbildung 49 links: Ansicht des Passivhauses mit kaschierten VIP. Die schwarze Fassadenfläche wurde konventionell in 30 cm WDVS ausgeführt um die Dickendifferenz zu der VIP-Fassade in rot zu demonstrieren. Ansicht der Fassade, die bereits teilweise mit kaschierten VIP belegt ist. rechts: Querschnitt durch den Wandaufbau.

Im Rahmen der Bauausstellung der Landesgartenschau Trier 2004 wurden zwölf Reihenhäuser mit innovativer Technik erstellt. Die Passivhäuser der Architekten Lamberty / Schmitz & Hoffmann wurden teilweise mit EPS-kaschierten VIP ausgeführt. Es handelt sich um 20 mm starke VIP, die front- und rückseitig mit Polystyrolschichten kaschiert sind. Dadurch können die VIP fugenlos im Stossverbund mit minimalen Wärmebrückeneffekten verlegt werden.

## 4.17 Kompaktfassade mit VIP und PU-Dämmung Neubau eines Wohn- und Geschäftshauses in München/Deutschland

Konstruktion:

energie-tib, Bindel, Jenne, Krauter & Becker, Korb, Deutschland

Kontakt:

info@energie-tib.de

VIP-Lieferant:

va-Q-tec AG, Würzburg, Deutschland

Ort des Einbaus:

Ultraniedrigenergie-Wohn- und Geschäftshaus in München, Seitzstr. 23

Ausführungszeitpunkt: März - August 2004



Abbildung 50 links: Anblick der fertig gestellten und verputzten Fassade.  
rechts: Montage der Putzträgerplatten aus Polyurethanschaum an Balkondecke und Test des Gasdruckes der installierten Vakuumdämmplatten mit dem tragbaren "va-Q-check"-System.

Es wurde die Ost-, Süd- und Westfassade des Gebäudes mit ca. 850 m<sup>2</sup> Vakuumwärmesystem ausgerüstet. Die Vakuumdämmplatten wurden mit einem Kleber auf der Betonwand befestigt. Zwischen den einzelnen Vakuumdämmplatten verläuft in der Senkrechten eine verdübelte Leiste aus Polyurethan-Recyclingmaterial ("Purenit"), um die darüber sitzende Putzträgerplatte aus Polyurethanschaum sicher befestigen zu können. Auf der Polyurethanschaumplatte wurde der Putz appliziert.



## 4.18 Fussbodensanierung mit VIP Modernisierung des eza!-Hauses in Kempten/Deutschland

Konstruktion:

BaumitBayosan GmbH & Co. KG (Bad Hindelang) und Prill & Schurr Architekten

Kontakt:

Rudolf Schäfer, rudolf.schaefer@baumitbayosan.com

VIP-Lieferant:

WACKER CHEMIE GmbH, Kempten, Deutschland

Ort des Einbaus:

Allgäu Energie und Umwelt Zentrum (eza!-Haus), Kempten, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: 2001

Förderung: Bay. Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie



Abbildung 51: Aussenansicht des eza!-Hauses.  
(Foto: may.schurr.architekten, Bad Wörishofen)

### Bodendämmung aussen

Ein zu dämmender Kellerraum ragte unter dem Eingangsbereich über die oberirdische Gebäudehülle hinaus. Im Rahmen einer Sanierung wurde die Kellerdecke von aussen mit EPS ummantelten VIP gedämmt. Die Abmessung der Elemente betrug  $50 \times 50 \times 3 \text{ cm}^2$ , wobei die VIP die Abmessung  $48 \times 48 \times 1 \text{ cm}^2$  aufwies. Der Vorteil der EPS-ummantelten VIP ist die problemlose Handhabbarkeit auf der Baustelle. Jedoch fehlt bei einer vollständigen Umhüllung die Möglichkeit einer optischen Qualitätskontrolle. Der EPS-Rand erhöht den U-Wert, der im ungestörten Bereich  $0.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  beträgt, auf  $0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  in der Gesamtfläche.

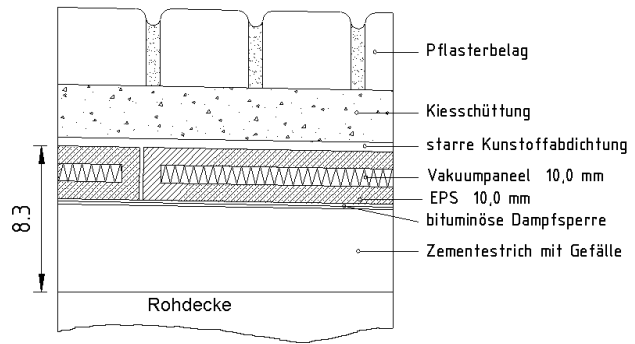


Abbildung 52 links: Einbau der EPS-ummantelten VIP. Der Randstreifen zum angrenzenden Gebäude wurde mit Polystyrol-Passstücken aufgefüllt.  
(Foto: may.schurr.architekten, Bad Wörishofen)  
rechts: Aufbau der Bodendämmung im Aussenbereich.

### Bodendämmung innen

Der zu dämmende Kellerraum sollte nach der Sanierung als Schulungsraum genutzt werden. Wegen der beschränkten Höhe wurde zur Dämmung des Fussbodens eine Sandwichlösung realisiert, bei der 2 cm dicke VIP zwischen eine Weichfaserplatte und eine Polystyrolplatte eingelegt wurden. Den Oberboden bilden OSB-Platten. Mit diesem Aufbau konnte ein Wärmedurchlasskoeffizient von  $0.17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  erreicht werden.

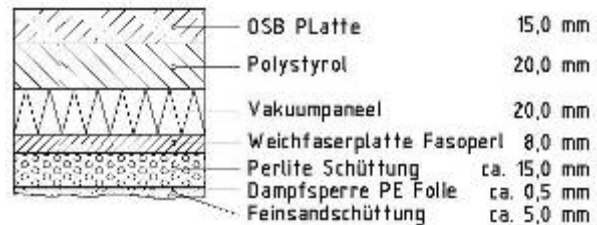


Abbildung 53 links: Einbau der VIP in die Fussbodendämmung. Im Hintergrund sind die Weichfaserplatten und im Vordergrund die OSB-Platten zu sehen.  
(Foto: may.schurr.architekten, Bad Wörishofen)  
rechts: Schichtaufbau des vakuumgedämmten Kellerbodens.



## 4.19 Fussbodendämmung mit VIP Sanierung des historischen Gerichtsgebäudes in Schaffhausen/Schweiz

Konstruktion:

Mion-AG, Neuhausen am Rheinfall; Architekt: Rolf Lüscher, Schaffhausen, Schweiz

Kontakt:

Gregor Erbenich, gregor.erbenich@porextherm.com

Guido Bründler, guido.bruendler@zzwancor.ch

VIP-Lieferant:

Porextherm Dämmstoffe GmbH - ZZWancor, Schweiz

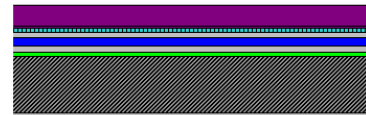
Ausführungszeitpunkt: August 2002



### Aufbau und U-Werte mit Vacupor

Unterlagsboden

U-Werte: mit 15 mm Vacupor 0.30 W/m²K



Aufbau von Innen nach Aussen

- Unterlagsboden 40 mm (Anhydrit oder Maxit) (Bauseits)
- PE Folie (Bauseits)
- Ethafoam SD 5 mm (Extrudierter PE-Schaumstoff)
- Vacucomp 15 mm
- Ethafoam SD 5 mm (Extrudierter PE-Schaumstoff)
- Dampfsperre 3 mm (Bauseits)
- Stahlbeton 200 mm
- Innenputz 10 mm

Total Aufbauhöhe mit Vacucomp 15 mm über Beton 70 mm

Abbildung 54 links: Eingangsbereich zum historischen Gerichtsgebäude in Schaffhausen / Schweiz. Türen im Innenbereich stammten ebenfalls aus dem 17. Jahrhundert und sollten unverändert erhalten bleiben.

mitte: Verlegung der Vakuumpaneele nach einem Verlegeplan. Speziell für den Randbereich mussten VIP in trapezform oder mit schrägen Kanten geliefert werden. Sämtliche VIP waren gemäss Verlegeplan durchnummeriert.

rechts: Typischer Bodenaufbau mit Vacupor® - Vakuum-Isolations-Paneeelen bei 15 mm VIP-Stärke.

Die Aufgabe bestand darin, einen unbeheizten Raum des im 17. Jahrhundert erbauten Gerichtsgebäudes in einen beheizten und somit nutzbaren Bereich umzuwandeln.

Zwei Probleme gab es dabei zu lösen:

1. Dieser Teil des Gebäudes war bereits unterkellert
2. Der Platz / die Höhe war limitiert, durch die Tatsache, dass es nicht möglich war neue Türen zu installieren.

Die alten Türen und Türrahmen waren ebenfalls historisch wertvoll und sollten erhalten bleiben. Bedingt durch die niedrige Höhe der Türrahmen war eine dicke Dämmschicht nicht möglich. Um eine akzeptable Dämmung des Bodens gegen den kalten Keller zu erreichen, ohne dabei zu viel Höhe im Aufbau zu erzeugen war die einzige Lösung mit Vacucomp® (Handelsmarke ZZWancor) Vakuum-Isolations-Paneeelen zu dämmen. Mit Hilfe eines dreilagigen Aufbaus aus 5 mm Dow "Ethafaom SD", 10 mm VIP und nochmals 5 mm, Dow "Ethafaom SD" konnte das Dämmproblem gelöst werden ohne dass der historische Charakter des Gebäudes zerstört wurde.

## 4.20 Fussbodenheizung mit VIP Modernisierung einer Sporthalle in Gemünden/Deutschland

Konstruktion:

Ingenieurbüro Rosel, Würzburg, Deutschland

Kontakt:

ZAE Bayern, Hubert Schwab, Schwab.Hubert@zae.uni-wuerzburg.de

VIP-Lieferant:

WACKER CHEMIE GmbH, Kempten, Deutschland

Ausführungszeitpunkt: Juli 2001

Förderung: Bay. Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

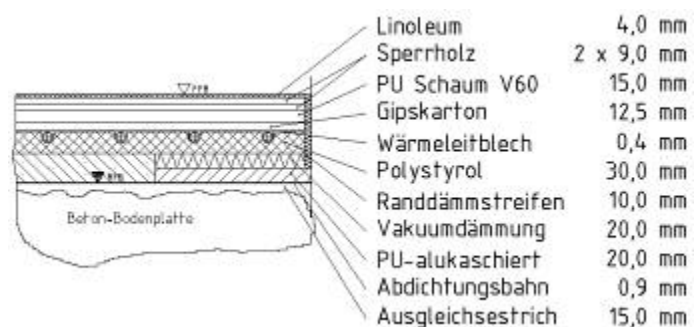


Abbildung 55 links: Fotografie des Fussbodens während des Einbaus. Zu sehen sind die silbrig glänzenden VIP auf dem mattsilbrigen, aluminiumkaschierten PU-Schaum. Darauf liegen die weissen Polystyrolplatten mit den Vertiefungen für die Heizschleifen.  
rechts: Querschnitt durch den Fussbodenaufbau sowohl mit als auch ohne Vakuumdämmung.

Der Turnhallenfussboden war defekt und sollte bei der Sanierung mit einer Fussbodenheizung versehen werden. Die Aufbauhöhe des Bodens war begrenzt. Eine Teilfläche wurde daher mit VIP gedämmt. Es wurden VIP der Grösse 0.5 x 1.0 m<sup>2</sup> eingebaut und mit Klebestreifen verbunden. Bei gleicher Dämmschichtdicke von 7 cm beträgt der Wärmedurchlasskoeffizient im konventionell gedämmten Bereich 0.43 W/(m<sup>2</sup>·K) und im vakuumgedämmten Bereich 0.15 W/(m<sup>2</sup>·K).

## 5 Einsatz von VIP – Empfehlungen

Aufgrund zahlreicher Firmenkontakte, umfangreicher Praxisreportagen und Forschungsarbeiten können für den Einbau von VIP die nachstehenden Empfehlungen abgegeben werden.

Es wird im Folgenden unterschieden zwischen

- Empfehlungen, welche für den gesamten Baubereich Gültigkeit haben,
- Empfehlungen, welche spezifisch den Einsatz von „roh“ auf die Baustelle gelieferten und erst dort montierten VIP betreffen, und
- Empfehlungen für vorfabrizierte Bauteil-Systeme, in welche VIP integriert sind und mehr oder weniger geschützt auf der Baustelle erscheinen.

Neben den jeweiligen Empfehlungen werden auch einige typische Anwendungen dargestellt und kritisch diskutiert.

### 5.1 Gesamter Baubereich

#### 5.1.1 Information / Beratung

VIP ist mehr als ein neues Material, es muss eher als System – von grosser Komplexität und Empfindlichkeit – betrachtet werden. Daher ist wichtig, dass sich alle am Planungs- und Bauprozesses Beteiligten möglichst früh informieren, beraten und während des gesamten Planungs- und Verarbeitungsprozesses fachlich begleiten lassen (vorzugsweise durch VIP-Lieferanten). Postpakete mit empfindlichem Inhalt werden mit einem „Handle with care“-Kleber versehen. VIP im Baubereich sollten über eine adäquate Kennzeichnung verfügen. An die Lebensdauer von Materialien und Bauteilen werden hohe Anforderungen gestellt. VIP müssen ihre Funktion über Jahrzehnte erfüllen. Wo sie nicht absolut beschädigungssicher verbaut sind, sollten Mieter, Eigentümer und Handwerker ebenfalls informiert, und mit einem Warnkleber auf den empfindlichen Inhalt von Baukonstruktionen aufmerksam gemacht werden. Wir empfehlen deshalb VIP-Herstellern und VIP-Lieferanten, einen Warnkleber zu entwickeln. Abbildung 56 illustriert diesen Gedanken im Sinne einer Anregung.



Abbildung 56: Entwurfsskizze einer selbstklebenden Warnbeschriftung zur Kennzeichnung von VIP-Panel und Bauteilen mit VIP.

### 5.1.2 Wärmebrücken-Randeffekt

VIP besitzen eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit im ungestörten Bereich. Wegen der im Gegensatz dazu hohen Wärmeleitfähigkeit der Plattenränder (Aluminiumanteil des Hüllmaterials) verschlechtert sich jedoch der  $\lambda$ -Wert des gesamten Paneels. Je nach Plattengrösse und Format, Hüllmaterial und Wärmeleitfähigkeit der angrenzenden Materialien kann dieser Effekt die Vorteile des Materials praktisch zunichte machen. Dies ist vor allem bei Hüllmaterialien mit Metallfolien zu beachten. Unmittelbar an das VIP angrenzende Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit verstärken den Wärmebrücken-Randeffekt durch ihre Wirkung als "Wärmekollektor". Wie der effektive  $\lambda$ -Wert von VIP-Lagen quantitativ abgeschätzt werden kann, ist in Abschnitt 3.2 angegeben. Als Richtschnur zur Beschränkung der Randeffekte auf ein Minimum können folgende Hinweise gegeben werden:

- Wahl möglichst quadratischer und grosser Paneele (mind. 0.5 x 0.5 m<sup>2</sup>)
- Direkt an VIP angrenzende Materialien sollten eine geringe Wärmeleitfähigkeit haben
- Bei Hüllmaterialien mit Metallfolien wird ein doppellagiges und mindestens um 5 cm überlappendes Verlegen der Paneele empfohlen.

### 5.1.3 Alterungseffekte

Um die Zunahme des Innendrucks und des Feuchtegehalts und damit die Verschlechterung der Dämmfähigkeit über die Lebensdauer möglichst gering zu halten, sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Paneele grösserer Dicke haben aufgrund des günstigeren Volumen-Oberflächen-Verhältnisses eine höhere Lebensdauer
- Hüllmaterialien mit höherer Gasdichtheit wirken sich positiv auf die Lebensdauer der VIP aus, besitzen allerdings oftmals einen höheren Metallanteil (verstärkter Wärmebrücken-Randeffekt)
- Dauerhaft hohe Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Bereich der VIP kann sich ungünstig auf deren Lebensdauer auswirken.

### 5.1.4 Detailbearbeitung

Im Gegensatz zu herkömmlichen Dämmstoffen haben VIP nach der Produktion bestimmte Abmessungen und können nachträglich nicht auf Mass zugeschnitten werden. Die lieferbaren Paneelabmessungen und Fertigungstoleranzen (Länge und Breite: +2/-5 mm; Dicke +/- 1 mm je nach Fabrikat) sind zu beachten. Es ist wünschenswert, dass die Fertigungstoleranzen der VIP von den Herstellern zukünftig minimiert werden.

VIP müssen gut vor mechanischen Beschädigungen geschützt sein. Dies gilt sowohl für funktionsbedingte (z.B. Bodenbelastung) und ungewollte Belastungen (z.B. Dilatationen) sowie für nachträgliche Manipulationen (z.B. Befestigungen).

In der Planungsphase und der Bauausführung ist den diversen Anschlussdetails besondere Beachtung zu schenken, da vorstehende Bauteile, Befestigungselemente und Durchdringungen der Dämmebene die VIP beschädigen können (Gerüstanker, Winkeleisen für Fensterbefestigung, Sonnenschutz-Führungsschienen, Regenfallrohr-Befestigungen, Anker für Werbeschilder, Befestigung von Vordächern und Aussenleuchten, Rankgerüste, Zargen, Heizkörper etc.). Auch in der Nutzungsphase des Gebäudes muss sichergestellt werden,

dass Beschädigungen der VIP durch Befestigungen (Möbel, Leuchten, Bilder etc.) vermieden werden. Hierzu müssen die VIP in geeigneter Weise von schützenden Materialschichten umgeben in die Konstruktion eingebettet sein.

Im Falle eines Vakuumversagens sollte der bauphysikalisch notwendige Mindestwärmeschutz gewährleistet sein, um einer dauerhaften Schädigung der Bausubstanz vorzubeugen. Da das Kernmaterial auch ohne Vakuum eine tiefe Wärmeleitfähigkeit von  $0.018 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  besitzt, sind bei entsprechender Dimensionierung keine gravierenden Probleme zu befürchten.

Durch die geringere Dämmstärke im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen können sich konstruktiv neue Möglichkeiten ergeben. In Abhängigkeit zur gewählten Konstruktion können statisch notwendige Elemente oftmals geringer dimensioniert werden (z.B. Ankersysteme für vorgehängte hinterlüftete Fassaden).

### **5.1.5 Dampfdiffusion, Feuchtigkeit und Temperatur**

Bei VIP handelt es sich um dampfdichte Dämmsysteme, was bei der Planung der Schichtenreihenfolge und Schichtdicken eines Bauteils oder Bauteilsystems beachtet werden muss. Weiter muss den Plattenfugen grosse Beachtung geschenkt werden. Meist werden die Fugen und Ränder mit einem speziellen Alu-Klebeband verklebt, welches zwar die Dichtigkeit gewährleistet, jedoch relativ brüchig ist.

Eine dauerhafte Anreicherung von Feuchte auf Grund von Wasserdampfkondensation im Bereich der VIP muss durch bauphysikalische Abklärungen in der Planung und geeignete Massnahmen in der Praxis vermieden werden, da sich eine erhöhte Feuchte negativ auf die Lebensdauer der Paneele auswirkt. Zudem ist sicherzustellen, dass die verwendeten Baumaterialien trocken in die Konstruktion eingebaut werden.

Darüber hinaus ist die Konstruktion so auszubilden, dass die VIP nicht über einen längeren Zeitraum zu hohen Temperaturen ausgesetzt werden. Dies kann durch die Wahl geeigneter Konstruktionen und Bauteiloberflächen (aussen) erreicht werden.

### **5.1.6 Ersetzbarkeit der VIP**

Obwohl die bisher vorliegenden Untersuchungen und Erfahrungen darauf hindeuten, dass VIP heutiger Technologie bei fachgerechter Handhabung über die erwarteten vier bis fünf Jahrzehnte in ihrer Funktionsdauer erhalten bleiben, sollte das Versagen einzelner Platten oder ganzer Flächen als Risiko in die Planung und Ausführung einbezogen werden. Wünschbar wäre eine Strategie, die darauf abzielt, die VIP im Versagensfall ersetzen zu können. Das bedeutet zwei Dinge, die bisher aber meist nicht beachtet werden:

- Die VIP sollten so in die Konstruktion eingebettet sein, dass sie ersetzt werden können, ohne dass ein allzu grosser Folge- bzw. Vorbereitungsanfang nötig ist (z.B. mechanisch befestigte Abdeckungen). Alternativ sollte der Austausch eines ganzen Bauteils mit integrierten VIP zu einem späteren Zeitpunkt möglich sein.
- Einbau der VIP in einer Art und Weise, welche eine Überprüfung ihrer Funktionstauglichkeit, insbesondere mit Infrarot-Thermografie, ermöglicht. Dies ist in der Regel nicht möglich, wenn beidseitig entweder gut leitende massive Abdeckungen (z.B. Beton) oder hinterlüftete Konstruktionen vorliegen (sofern letztere zum Zweck der VIP-Überprüfung nicht relativ einfach entfernt werden können).

In der Regel beschränkt man sich bisher darauf den Versagensfall so abzufedern, dass eine Verschlechterung des U-Wertes in Kauf genommen wird und sichergestellt wird, dass bei Vakuumverlust keine Komfort- oder Feuchte-Risiken entstehen.

### **5.1.7 Handhabung von VIP**

Die Handwerker, welche VIP verarbeiten, müssen im Umgang mit diesen Materialien geschult sein. Ausserdem sollten ihnen adäquate Verarbeitungshilfsmittel zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund unserer Beobachtungen wären vor allem für die Verarbeitung von VIP auf der Baustelle zwei Hilfsmittel sinnvoll, die vom VIP-Lieferanten mitgeliefert werden sollten:

- Filz-Überziehpantoffeln o.ä.
- Filzbespanntes Brett mit Haltegriff o.ä. als Plattform und Druckverteilschicht um auf neu verlegten VIP knien zu können, ohne Dellen zu verursachen und Beschädigungen zu riskieren.

## **5.2 VIP auf der Baustelle**

Bisher werden VIP noch überwiegend direkt auf der Baustelle verarbeitet und eingebaut. Neben einer gründlichen Vorbereitung der Arbeitsabläufe und einer sorgfältigen Abstimmung mit den anderen Gewerken muss vor allem der Schutz der Paneele vor Beschädigung während des Transports, der Lagerung und Montage sichergestellt werden.

### **5.2.1 Allgemeine Empfehlungen**

#### **Stücklisten und Verlegepläne**

Da mit VIP keine Toleranzen aufgenommen und die Paneele auf der Baustelle nicht zugeschnitten werden können, müssen frühzeitig exakte Stücklisten und Verlegepläne erarbeitet werden (Zusammenarbeit mit VIP-Lieferanten). Auf Grund der zum Teil erheblichen Toleranzen und Abweichungen von der Planung in der Ausführung sollten die Verlegepläne nach einem exakten Aufmass vor Ort erstellt werden. Hierbei müssen die Fertigungstoleranzen der Paneele berücksichtigt werden, um mechanische Beanspruchung durch Zwängung zu vermeiden. Für die Aufnahme von Toleranzen bzw. die Anpassungen an Rändern müssen geeignete Dämmmaterialien bezeichnet und bereitgestellt werden.

#### **Lieferung und Lagerung**

Es muss abgeklärt werden, wie (Paket, Gewicht, Schutz, Zugänglichkeit) und wann die VIP geliefert werden, um den permanenten Schutz des Materials gewährleisten zu können. Die Bestellung der Paneele muss rechtzeitig vorgenommen werden, da vor allem für Sonderformate ein Vorlauf für die Produktion und Lieferung notwendig ist. Der Zeitpunkt der Lieferung muss mit dem Zeitablauf auf der Baustelle abgestimmt werden. Grosse Gebinde mit VIP weisen rasch ein hohes Gewicht auf (wegen der doch relativ hohen Rohdichte des Kieselsäure-Kerns) und erschweren ein sorgfältiges Handling.



### **Reinigung**

Die Arbeitsfläche muss gründlich gereinigt und scharfkantige Unebenheiten und Überstände müssen entfernt werden.

### **Montage der VIP**

Die Arbeiten mit VIP auf der Baustelle müssen sorgfältig mit den anderen Gewerken koordiniert werden (Arbeitsablauf und Zeitplan). Vor allem die offene Montage von VIP in Bodenkonstruktionen erfordert ein sorgfältiges vorgehen nach folgendem Ablauf: Verlegen einer Schutzmatte, Einbringen der VIP, sofortiges Verlegen einer erneuten Schutzmatte. In Arbeitspausen (Mittag, Nacht) besteht das Risiko, dass die VIP betreten werden (die Materialien ziehen auch neugierige Baubeteiligte an). Gegenstände können auf die VIP fallen. Auch wenn in Socken gearbeitet wird, können scharfkantige Kleingegenstände an den Socken haften.

### **Feuchtigkeit**

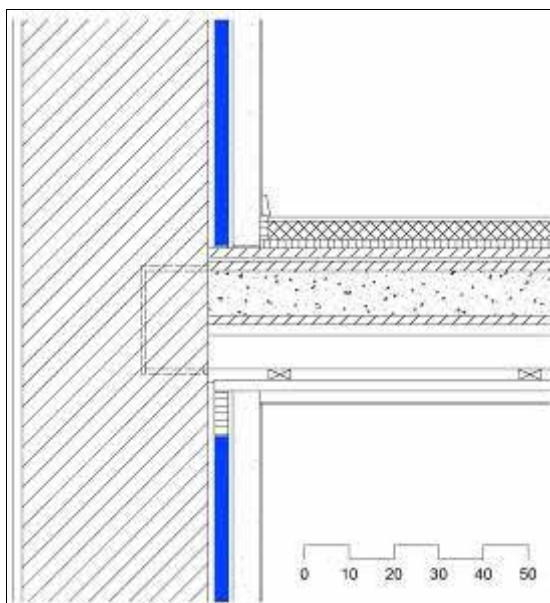
Beim Einbau ist auf entsprechend trockene Materialien und bei der Montage im Aussenbereich auf trockene Witterung zu achten. Bei dampfdichten umgebenden Sperrschichten (z.B. Dachterasse) können schon geringe Mengen an Wasser zu einem dauerhaft erhöhten Dampfdruck in der gesamten Konstruktion führen, was langfristig die Dämmfähigkeit der VIP in Mitleidenschaft ziehen kann

### 5.2.2 Bauteil Innendämmung

Die bauphysikalisch sensiblen Punkte innen gedämmter Gebäude sind lange bekannt und hinreichend diskutiert worden: Wärmebrücken an Wand- und Deckenanschlüssen sind kaum zu umgehen, Wärmeverluste und eine erhöhte Kondensatanfälligkeit sind die Folgen. Dennoch wird diese Massnahme aus unterschiedlichen Gründen häufig durchgeführt. Architektonische aber auch bautechnische Vorteile, vor allem im Sanierungsbereich, scheinen stärker ins Gewicht zu fallen als die genannten Nachteile. Angesichts der grossen Anzahl historischer Bauten wird offenkundig, dass die Innendämmung ein zunehmend wichtiger Ansatz bei energetischen Sanierungen werden wird. Bei Bauvorhaben dieser Art ist die Reduktion der Dämmstärke von besonderer Bedeutung, da jeder eingesparte Zentimeter Dämmstärke den Erhalt wertvoller Nutzfläche zur Folge hat.

Aus der Vielzahl konstruktiver Gegebenheiten wird an dieser Stelle eine typische Situation herausgegriffen (Abbildung 57). Beispiele vom hier gezeigten Typus können nicht ohne vorherige sorgfältige bauphysikalische Abklärung der ortsspezifischen Gegebenheiten auf andere Situationen übertragen werden.

Die dargestellte Konstruktion hat bei der Verwendung von 20 mm dicken VIP (1.30 x 0.60 m<sup>2</sup>) mit metallisiertem Hüllmaterial ( $\lambda_{\text{cop}} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) unter Berücksichtigung der Wärmebrücken einen U-Wert von 0.35 W/(m<sup>2</sup>·K), bei 30 mm VIP von 0.25 W/(m<sup>2</sup>·K).



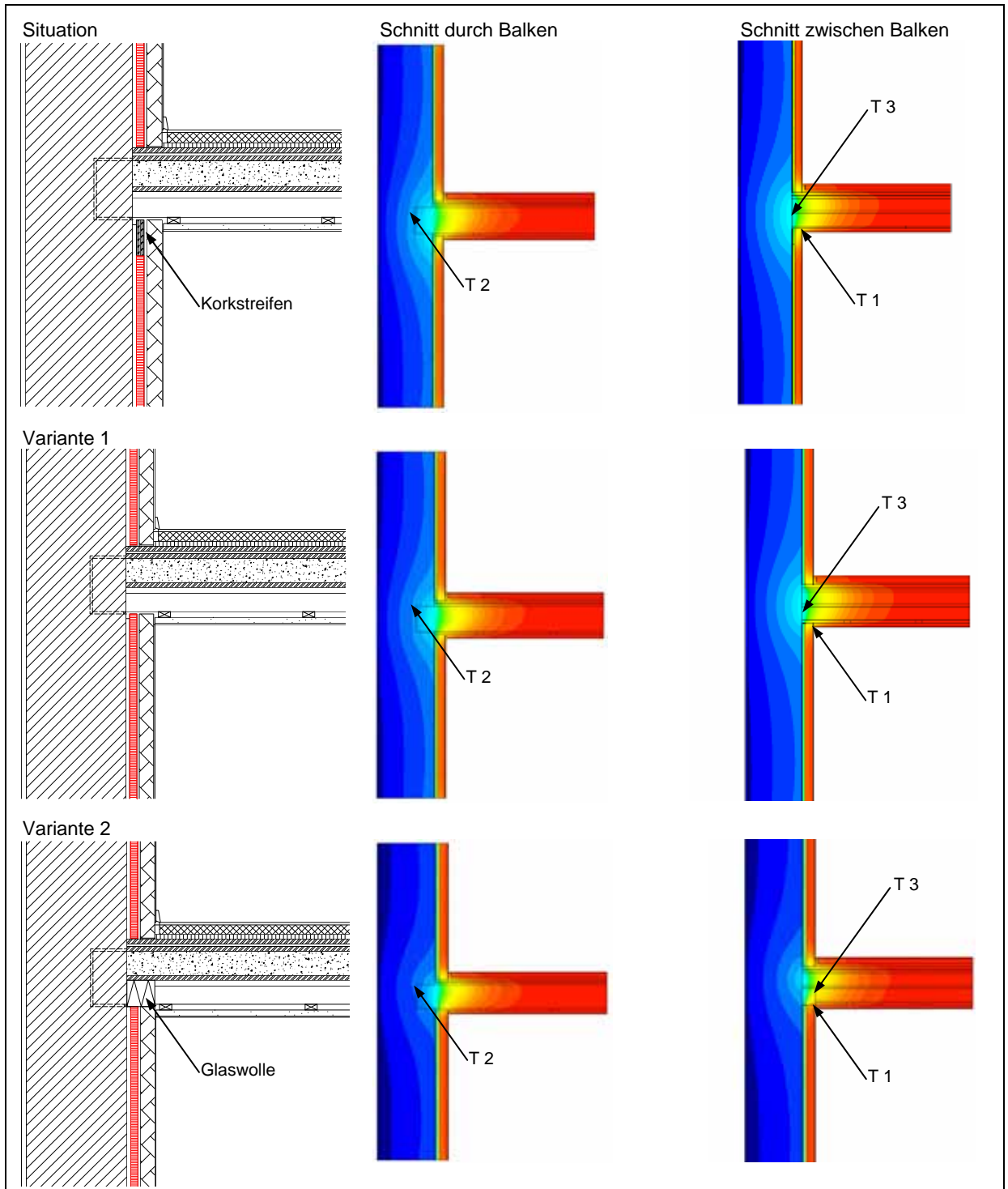
Wandaufbau Innendämmung

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| Aussenputz, alt          | 20 mm    |
| Bruchsteinmauerwerk, alt | 430 mm   |
| Innenputz, alt           | 15 mm    |
| VIP, neu                 | 20/30 mm |
| Luftraum                 | 10 mm    |
| Vollgipsplatte, neu      | 60 mm    |
| Innenputz, neu           | 5 mm     |
| Randstreifen Kork, neu   | 140 mm   |

Abbildung 57: Vertikalschnitt durch das Deckenauflager.

#### Bautechnik

Im Rahmen von Sanierungen müssen bei der Erstellung exakter Stücklisten und Verlegepläne der VIP entsprechende Toleranzbereiche berücksichtigt werden. Der Einbau herkömmlicher Dämmmaterialien in diesen Toleranzzonen führt – neben den Wärmebrücken – zu einer zusätzlichen Schwächung des Dämmperimeters. Zudem ist zu bedenken, dass nicht zu viele kleinformatische VIP eingesetzt werden, da ansonsten die Dämmwirkung des Bauteils aufgrund der grösseren Randverluste der einzelnen Paneele weiter verringert wird. Schliesslich gilt bei der Innendämmung auch dem Schutz der VIP vor Nutzereinflüssen eine besondere Beachtung (Verletzungen durch Schrauben, Nägel, Elektro-Installationen etc.).



| Beschreibung | [mm]               | Situation |           | Variante 1 |          | Variante 2 |          |
|--------------|--------------------|-----------|-----------|------------|----------|------------|----------|
|              |                    | VIP 20    | VIP 30    | VIP 20     | VIP 30   | VIP 20     | VIP 30   |
| T 1          | Min. Oberfläche    | [°C] 13   | 14        | 14.5       | 15       | 17         | 17       |
| T 2          | Min. Balkenkopf    | [°C] -5.5 | -6        | -5.5       | -6       | -6.5       | -7       |
| T 3          | Min. Hinterlüftung | [°C] -2.5 | -2.5      | -3         | -3       | 8.5        | 8.5      |
| $f_{rsi}$    | Ort / Wert         | T3 / 0.27 | T3 / 0.25 | T3 / 2.3   | T3 / 2.3 | T3 / 6.2   | T3 / 6.2 |

Abbildung 58: Vertikalschnitt durch das Deckenaufleger und dreidimensionale Wärmestromberechnung des Details.

## Feuchtigkeit

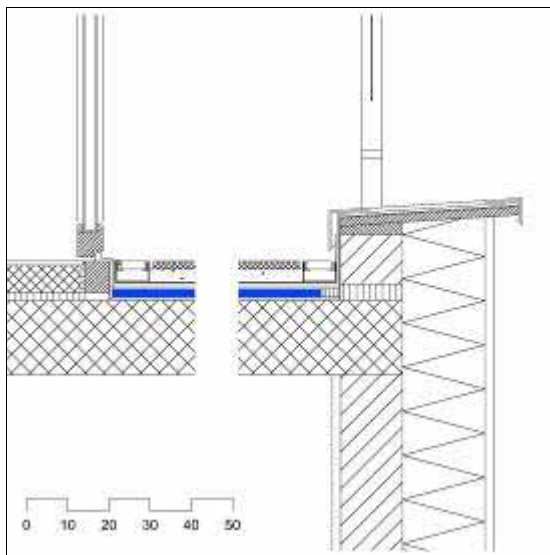
Bei Innendämmungen müssen die Aspekte einer möglichen Kondensation von Raumluftfeuchtigkeit beachtet werden. Dabei müssen alle vier Kondensationsrisiken gesondert betrachtet und vermieden werden. Das Risiko von **Oberflächenkondensat** an den Anschlussstellen der Innendämmung von Decken und Wänden wird mit VIP noch verschärft. Wie die Berechnungen zeigen (Abbildung 58), erhöht sich die Temperatur im kritischen Bereich nur minimal, wenn die ohnehin notwendigen Füllelemente zwischen VIP-Lage und Decken- / Wandanschluss mit normalem Dämmstoff ausgeführt werden (Abbildung 58, T1). Je nach Situation kommt die Konstruktion thermisch gesehen dem ungedämmten Zustand nahe, indem im Anschlussbereich Füllmaterialien mit relativ schlechten Dämmeigenschaften gewählt werden. Die Wahl von feuchtepuffernden Materialien im Anschlussbereich (z.B. Kork) hilft mit, Pilzbefall vorzubeugen. **Hinterlüftungskondensat** muss und kann relativ einfach vermieden werden: Die VIP müssen satt und möglichst hohlraumfrei auf die Aussenwand aufgebracht werden und Fugen und Anschlüsse müssen raumseitig sauber abgeklebt werden. Letztere Massnahme hilft auch zuverlässig gegen **Dampfdiffusionskondensat** in der Wandkonstruktion. VIP sind naturgemäss dampfdicht (im Sinne der bauphysikalisch relevanten Vorgänge), so dass vor allem die Fugen und Anschlüsse verklebt werden müssen. In angrenzenden Hohlraumdecken, wo in der Regel keine Dampfbremse eingebaut werden kann, sollte wenn möglich wenigstens durch ausstopfen oder ausblasen mit Faserdämmstoffen (Abbildung 58, Variante 2) dafür gesorgt werden, dass zumindest kein konvektiver Feuchtetransport an die kalten Oberflächen erfolgen kann. Gefährlich ist **Luftleckkondensat**, wie es bei von innen nach aussen durchgehenden Fugen und Ritzen entstehen kann. Sie müssen definitiv vermieden werden. Durch Luftleckkondensat, etwa im Bereich von Holzbalkenköpfen, können rasch sehr grosse Mengen an Kondensat abgelagert werden, was ebenso rasch zu Fäulnis in dieser wichtigen Zone führt. Bei sorgfältiger Vorabklärung kann aber mit hoher Sicherheit festgestellt werden, ob solche durchgehenden Öffnungen bestehen und ob und wie sie eliminiert werden können. Die Problematik des Luftleckkondensates tritt bei jeder Art von Dämmstoff auf, nicht nur bei VIP.

### 5.2.3 Terrassendämmung

Der Einsatz von VIP für die Wärmedämmung von Terrassenflächen ist gleichermassen für Neubau und Sanierungen interessant. Dies ist derzeit die häufigste Anwendung für VIP in der Schweiz. Im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen erlaubt der Einbau von VIP dank geringerer Konstruktionshöhe einen stufenlosen Übergang von Innen nach Aussen, ohne in der Stahlbetondecke einen Absatz vorsehen zu müssen. Dadurch kann der Komfort gesteigert und sogar eine Rollstuhlgängigkeit erreicht werden. Abbildung 59 zeigt einen Anschluss einer VIP gedämmten Terrasse an eine Balkonverglasung mit Holzrahmen.

### Bautechnik

Anhand eines Ausmasses vor Ort sollte ein exakter Verlegeplan für die VIP erstellt werden. Durch individuell konfektionierte Passtücke kann der Einsatz konventioneller Dämmung im Randbereich minimiert werden. Andernfalls muss eine Schwächung des U-Wertes in Kauf genommen werden. Ein zweilagiger VIP- Einbau mit versetzten Stössen führt beim Einsatz von Metallfolien-VIP zu einer weiteren Verbesserung, ist aber auch teurer. Beim Verlegen auf der Baustelle können die VIP durch herunterfallende Gegenstände und unvorsichtiges Betreten sehr leicht verletzt werden. Daher ist darauf zu achten, dass die VIP schnellstmöglich durch eine schützende Schicht überdeckt werden, um Beschädigungen zu vermeiden.



### Bodenaufbau

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| Gehwegplatten                | 20 mm  |
| Stelzlager<br>(Entwässerung) | 30 mm  |
| PE Schaummatte               |        |
| Abdichtung                   |        |
| Gummischrotmatte             |        |
| VIP                          | 20 mm  |
| PE Schaummatte               |        |
| Dampfsperre                  |        |
| Betondecke                   | 200 mm |

Abbildung 59: Vertikalschnitt durch die Terrassenkonstruktion.

### Feuchtigkeit

Einzelne Bauteilschichten der Konstruktion (Betondecke, VIP und Abdichtung) besitzen eine hohe Dampfdichtheit. Bei fachgerechter Ausführung ist ein Tauwasserausfall in der Konstruktion auszuschließen. Zudem sind die VIP durch das Einbetten in konventionellen Dämmstoff und durch die Abdichtung gut gegen mechanische Beschädigung, hohe Temperaturschwankungen und Feuchtigkeit geschützt. An der EMPA wurden detaillierte bauphysikalische Untersuchungen hierzu durchgeführt [5]. Abbildung 60 zeigt ein dreidimensionales Wärmeflussdiagramm des Details.

Beim Einbau ist auf entsprechend trockene Materialien und trockene Witterung zu achten. Schon geringe Mengen an Wasser (Regentropfen) können wegen des allseitig dichten Abschlusses zu einem dauerhaft erhöhten Dampfdruck in der gesamten Konstruktion führen, was die Dämmfähigkeit der VIP in Mitleidenschaft ziehen kann.

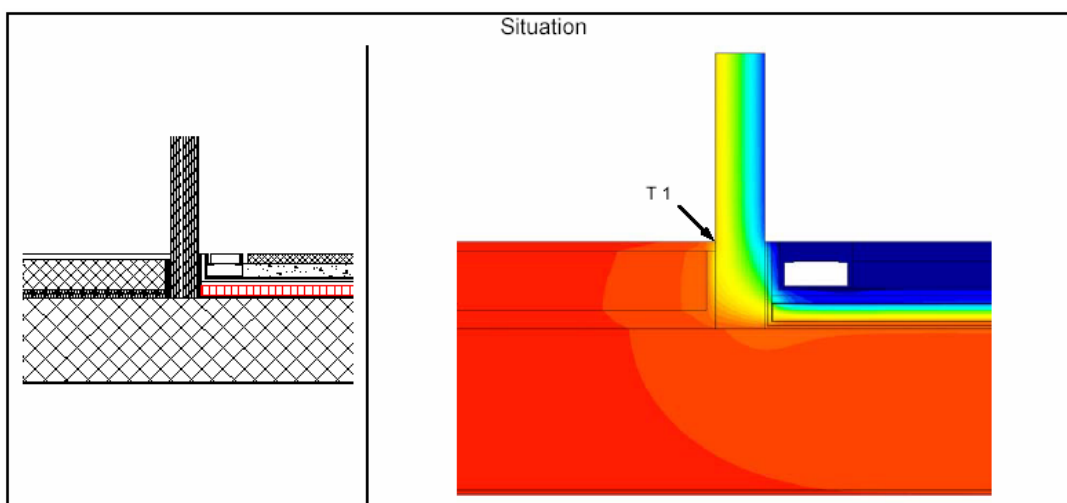


Abbildung 60: Vertikalschnitt durch die Terrassenkonstruktion und dreidimensionale Wärmestromberechnung des Details. Die berechnete Temperatur an Punkt T1 beträgt 14 °C.

## 5.3 VIP in vorfabrizierten Bauteilsystemen

Ein grosses Potential für die Anwendung von VIP im Bausektor liegt im Einsatz in vorfabrizierten Bauteilsystemen. Hier können die Risiken der Beschädigung der Vakuum-Isolations-Paneele bei Transport, Lagerung und Montage minimiert werden, da der Einbau witterungsunabhängig unter kontrollierten Bedingungen im Werk erfolgt.

### 5.3.1 Allgemeine Empfehlungen

#### Abmessungen und Toleranzen

Die Geometrie und die Abmessungen vorfabrizierter Systeme sollten auf möglichst grosse Paneele und verfügbare VIP-Standardmasse ausgelegt sein. Sonderformate sind zwar lieferbar, aber auch teurer. Einzelheiten sollten frühzeitig mit dem VIP-Lieferanten geklärt werden. Die im Abschnitt 5.1.4 erwähnten Fertigungstoleranzen der Paneele müssen bei der Konzeption der vorfabrizierten Komponenten beachtet werden, um Zwängungen der VIP oder grössere Luftspalte am Rand der VIP zu vermeiden.

#### Wärmebrücken

Zur Minimierung der Wärmebrücken bei vorfabrizierten Bauteilsystemen sind vor allem die Ränder und Verbindungen der einzelnen Bauteile zu beachten. Durchdringungen durch die Dämmebene sollten weitestgehend reduziert und thermisch optimiert werden, um eine Schwächung der Dämmleistung gering zu halten.

#### Transport und Montage

Die vorfabrizierten Bauteile müssen so konstruiert sein, dass der Schutz der VIP vor Beschädigung gewährleistet ist. Beim Transport und der Montage ist sicherzustellen, dass vor allem die VIP an den Kanten der Bauteile ausreichend geschützt sind. In Abstimmung mit den anderen Gewerken und durch rechtzeitige Information aller Beteiligten muss sichergestellt werden, dass die VIP nicht durch Befestigungen anderer Bauteile beschädigt werden.

Allgemein gilt für die Montage vorfabrizierter Bauteilsysteme, dass für die Luftdichtheit der Gebäudehülle an den Fugen zwischen den einzelnen Bauteilen entsprechende Vorkehrungen getroffen werden müssen. Ähnliches kann je nach Konstruktion insbesondere auch für die Dampfdichtheit gelten, da VIP diffusionsdicht sind.

### 5.3.2 Fassadenpaneele mit VIP

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der VIP gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen können die Fassadenpaneele bei gleichem U-Wert schlanker ausgebildet werden. Der ideale U-Wert in Paneelmitte wird allerdings durch verschiedene Einflüsse abgeschwächt. Folgende Faktoren spielen für den tatsächlichen U-Wert der gesamten Fassadenkonstruktionen eine entscheidende Rolle: Die Ausbildung der Randkonstruktion des Fassadenpaneels, die Wärmeleitfähigkeit der Deckschichten des Paneels, die Grösse der verwendeten Fassadenpaneele und die thermischen Eigenschaften der Primärkonstruktion in die die Fassadenpaneele eingebracht werden. Die Auswirkungen der ersten beiden Faktoren sind in Abschnitt 3.2.3 näher untersucht worden. Für die Primärkonstruktion ist auf eine weitgehende thermische Entkopplung und Minimierung der Wärmebrücken zu achten. Darüber hinaus wurden verschiedene Aspekte der Anwendung in den dokumentierten Praxisbeispielen thematisiert.



Wichtige Punkte für die Konstruktion und den Einsatz von Fassadenpaneelen mit VIP:

- Schutz der VIP gegen Beschädigung, insbesondere am Rand der Fassadenpaneele
- Reduzierung der Wärmebrücken am Rand der Fassadenpaneele durch den Einsatz von Materialien geringer Wärmeleitfähigkeit und Minimierung des Profilquerschnitts
- Gas- und Luftdichtheit der Randkonstruktion
- Mechanische Verbindung der inneren und äusseren Deckschicht für den Fall eines Vakuumversagens
- Berücksichtigung des Platzbedarfs für die Schweissnaht des Hüllmaterials der VIP
- Beachtung der Fertigungstoleranzen der VIP (Abbildung 61).

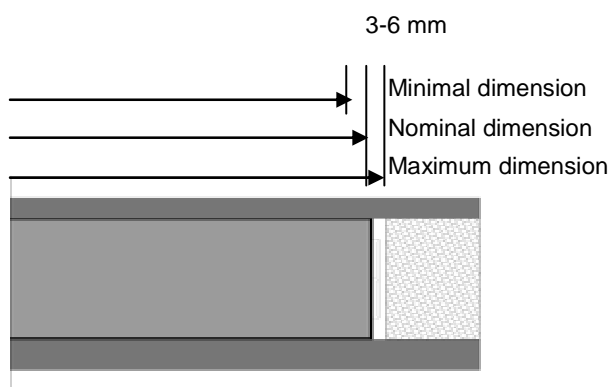
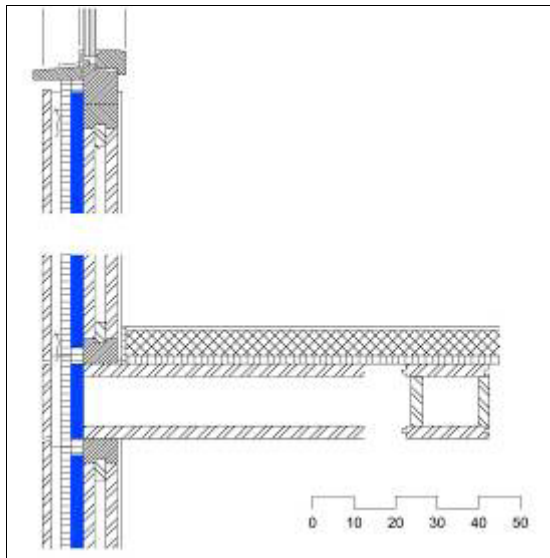


Abbildung 61: Toleranzen von VIP in Fassadenpaneelen.

### 5.3.3 Holzbausystem

Vorfabrizierte Fassadenelemente aus Holz sind ein viel versprechendes Einsatzgebiet für VIP. Die Vorfertigung im Holzbaubetrieb findet mit hoher Massgenauigkeit und unter kontrollierten Bedingungen statt. Dadurch kann bei entsprechender Planung zum einen auf teure Passtücke und Toleranzzonen, die mit herkömmlichem Dämmstoff ausgefüllt werden müssen verzichtet werden. Zum anderen wird die Gefahr der Beschädigung minimiert. Nach Möglichkeit sollte bei der Konstruktion darauf geachtet werden, dass einzelne VIP oder Teile der Fassade zu einem späteren Zeitpunkt ausgetauscht werden können.

Für ein MFH-Projekt in Itingen wurde ein Holzbausystem mit integrierten VIP entwickelt. Die hinterlüftete Wandkonstruktion zeichnet sich durch einen schlanken Wandaufbau von 19 cm bei 3 cm aus. Dadurch wird ein Raumgewinn gegenüber einer Wandkonstruktion mit konventionellem Dämmstoff erreicht. Abbildung 62 zeigt den Vertikalschnitt, Abbildung 63 den Grundriss der Konstruktion.



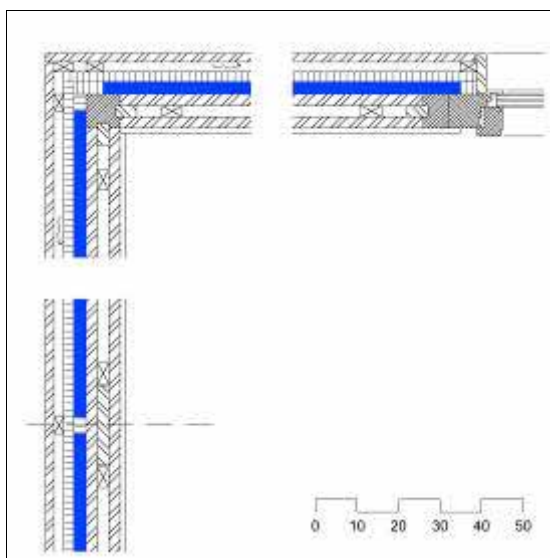
### Wandaufbau

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| Aussenhaut hinterlüftet       |       |
| Bituminierte Weichfaserplatte | 24 mm |
| VIP                           | 30 mm |
| Dreischichtplatte             | 27 mm |
| Installationsraum (Luft)      | 27 mm |
| Dreischichtplatte             | 27 mm |
| Gipskarton                    | 12 mm |

### Deckenaufbau

|                    |        |
|--------------------|--------|
| Parkett            | 10 mm  |
| Unterlagsboden     | 65 mm  |
| Trittschalldämmung | 20 mm  |
| Dreischichtplatte  | 30 mm  |
| Hohlraum           | 119 mm |
| Dreischichtplatte  | 30 mm  |

Abbildung 62: Vertikalschnitt durch den Fensteranschluss und das Deckenaufleger.



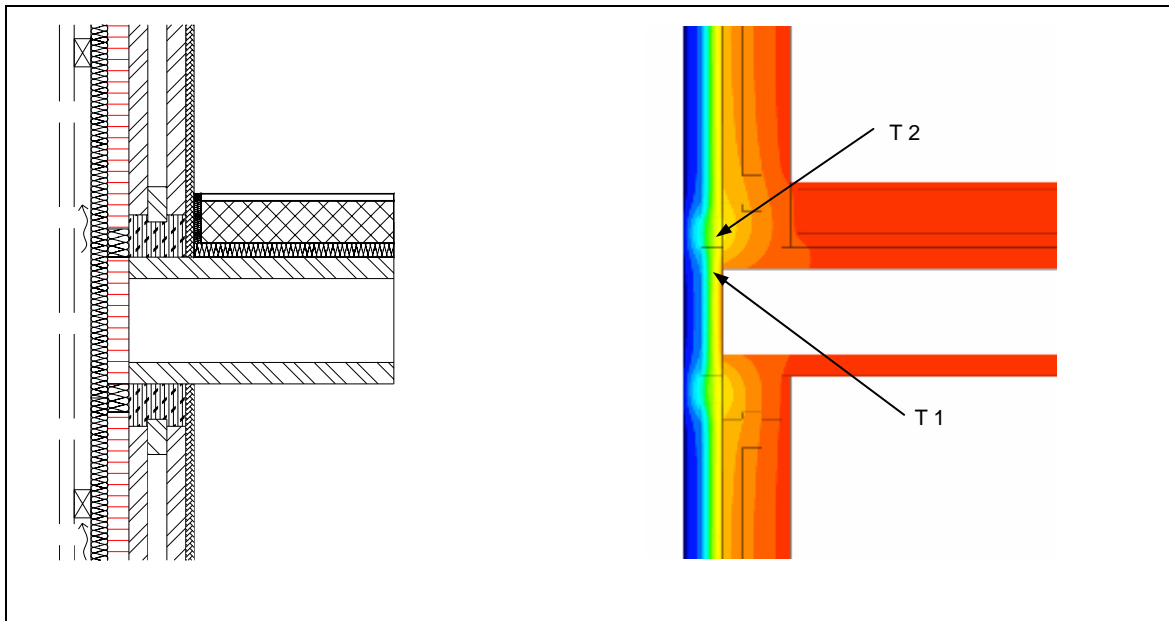
### Wandaufbau

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| Aussenhaut hinterlüftet       |       |
| Bituminierte Weichfaserplatte | 24 mm |
| VIP                           | 30 mm |
| Dreischichtplatte             | 27 mm |
| Installationsraum (Luft)      | 27 mm |
| Dreischichtplatte             | 27 mm |
| Gipskarton                    | 12 mm |

Abbildung 63: Horizontalschnitt durch den Fensteranschluss, die Ecke und die Verbindung zweier Elemente.

An der EMPA wurden detaillierte bauphysikalische Untersuchungen zu dieser Konstruktion durchgeführt, die in einer Bauteilsammlung dokumentiert sind [5]. Abbildung 64 zeigt exemplarisch den Anschluss der Holzbalkendecke an die Aussenwand. Hier muss auf eine dampfdichte Ausführung geachtet werden, um den Ausfall von Kondensat zu vermeiden (Abbildung 64, T2). Im ungestörten Wandbereich hat die Konstruktion beim Einsatz eines 2 cm VIP einen U-Wert von  $0.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , bei 3 cm von  $0.23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Die Berechnungen basieren auf VIP von  $100 \times 60 \text{ cm}^2$  mit einem Lambda-Wert in Paneelmitte von  $8 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , die Lattung zwischen den VIP ist berücksichtigt.

Die Stossfuge der einzelnen Holzbauelemente stellt keine problematische Wärmebrücke dar. Die Untersuchungen an der EMPA haben gezeigt, dass im Bereich der Lattung zwischen den VIP die Temperatur auf der Innenoberfläche der Aussenwand um 0.3 K tiefer als im ungestörten Bereich ist. Auch hier muss auf eine dampfdichte Ausführung der Elementfugen geachtet werden, ansonsten ist beim Einsatz vom VIP mit 2 cm Dicke auf der VIP-Innenseite mit Kondensat zu rechnen.



| Beschreibung |                         | VIP 20 mm | VIP 30 mm |
|--------------|-------------------------|-----------|-----------|
| T 1          | Auf VIP-Oberfläche [°C] | 15.5      | 16.2      |
| T 2          | Fuge zwischen VIP [°C]  | 10.5      | 12.0      |
| $f_{rsi}$    | Ort / Wert              | T1 / 0.85 | T1 / 0.87 |

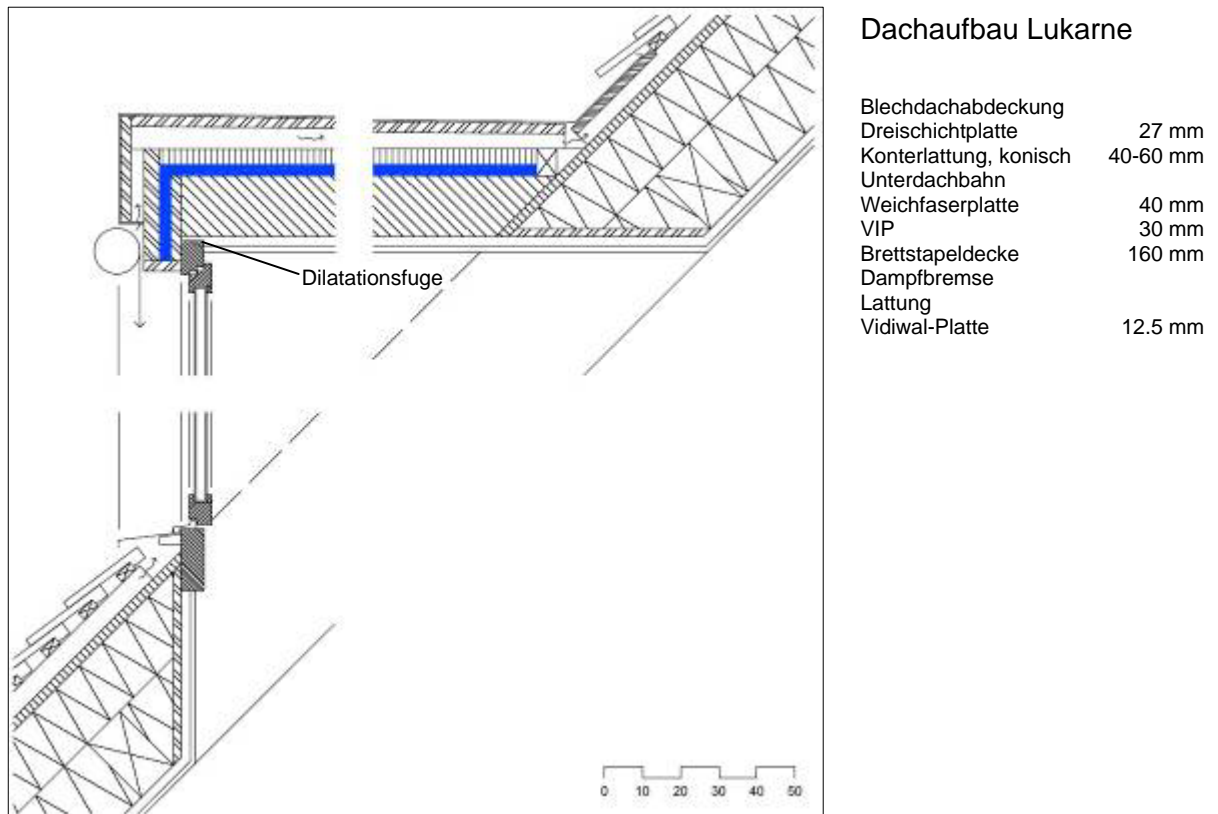
Abbildung 64: Vertikalschnitt durch das Deckenaufleger und dreidimensionale Wärmestromberechnung des Details.

### 5.3.4 Lukarne (Dachgaube)

Im Zuge von Modernisierungsmassnahmen an bestehenden Gebäuden wird häufig ein Dachausbau vorgenommen, um zusätzlichen Wohnraum zu schaffen. Eine Lukarne bietet hier die Möglichkeit sowohl die räumliche Situation als auch die Belichtung zu verbessern. Steigende Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz erfordern neue Ansätze, um auch gestalterisch befriedigende Lösungen zu finden. Dank VIP können schlanke Konstruktionen realisiert werden.

Das Detail zeigt eine vorgefertigte Lukarne, die als fertiges Element auf den vorbereiteten Dachausschnitt aufgesetzt wird. Diese Konstruktion ist für eine Modernisierung eines Altbaus entwickelt und realisiert worden (siehe Kapitel 4.2). Durch den zweisehaligen lastabtragenden Aufbau der Konstruktion kann auf eine Lattung zwischen den VIP verzichtet werden, wodurch die Wärmeverluste weiter verringert werden. Abbildung 65 zeigt den Vertikalschnitt, Abbildung 66 den Horizontalschnitt der Konstruktion.

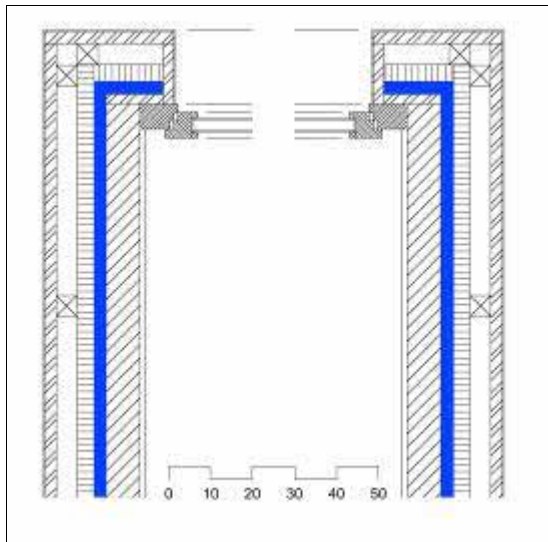
Bei der Montage des Sonnenschutzes sowie dessen Führungen muss darauf geachtet werden, dass die angrenzenden VIP nicht durch Befestigungsschrauben beschädigt werden.



#### Dachaufbau Lukarne

|                        |          |
|------------------------|----------|
| Blechdachabdeckung     |          |
| Dreischichtplatte      | 27 mm    |
| Konterlattung, konisch | 40-60 mm |
| Unterdachbahn          |          |
| Weichfaserplatte       | 40 mm    |
| VIP                    | 30 mm    |
| Brettstapeldecke       | 160 mm   |
| Dampfbremse            |          |
| Lattung                |          |
| Vidiwal-Platte         | 12.5 mm  |

Abbildung 65: Vertikalschnitt durch die vorgefertigte Lukarne.  
(Architekt: Viridén + Partner, Zurich, Schweiz)



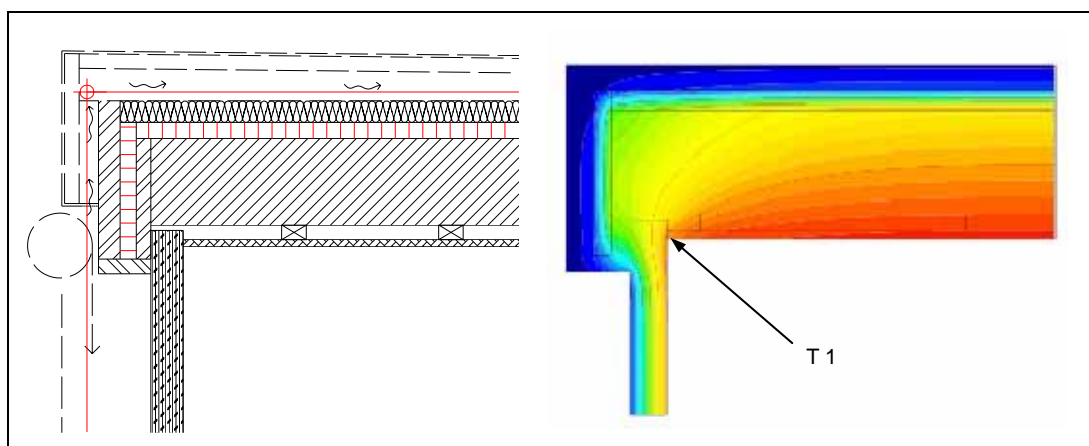
### Wandaufbau Lukarne

|                   |         |
|-------------------|---------|
| Blechverkleidung  |         |
| Dreischichtplatte | 27 mm   |
| Lattung           | 40 mm   |
| Weichfaserplatte  | 40 mm   |
| VIP               | 30 mm   |
| Brettstapelwand   | 80 mm   |
| Dampfbremse       |         |
| Vidiwal-Platte    | 12.5 mm |

Abbildung 66: Horizontalschnitt durch die vorgefertigte Lukarne.  
(Architekt: Viridén + Partner, Zurich, Schweiz)

An der EMPA wurden detaillierte bauphysikalische Untersuchungen zu dieser Konstruktion durchgeführt, die in einer Bauteilsammlung dokumentiert sind [5]. In der Sommersituation ist sicherzustellen, dass die Temperatur auf der VIP-Oberfläche nicht zu hoch ansteigt. Die verwendete Zusatzdämmung (Holz-Weichfaserplatte) senkt die Oberflächentemperatur an diesem Punkt deutlich.

Um das Fenster von den Bewegungen des Daches zu entkoppeln wurde zwischen der tragenden Dachschicht und dem Elementrahmen eine Dilatationsfuge vorgesehen. Wie die Isothermenbilder zeigen, ist bei der Dilatationsfuge mit Kondensat zu rechnen (Abbildung 67, T 1). Zur Verhinderung müsste vor der Kondensationsebene eine Dampfbremse dafür sorgen, dass die warmfeuchte Innenluft nicht an diesen Punkt gelangen kann.



| Beschreibung |                         | VIP 20 mm  | VIP 30 mm  |
|--------------|-------------------------|------------|------------|
| T 1          | min. Bewegungsfuge [°C] | 5.4        | 5.9        |
| $f_{rsi}$    | Ort / Wert              | T 1 / 0.51 | T 1 / 0.53 |

Abbildung 67: Vertikalschnitt durch den oberen Fensteranschluss der Lukarne und dreidimensionale Wärmestromberechnung des Details.

## 6 Ökonomische Aspekte

### 6.1 Kosten

Bei der aus einer Fülle von angebotenen Produkten zu treffenden Dämmstoffwahl ist der entsprechende Zusatznutzen von dominanter Bedeutung. Neben der erforderlichen Druckfestigkeit, der Dampfdichtheit oder -dichtheit, der Feuchtebeständigkeit, der Materialökologie und der Lebensdauer wird der Platzbedarf und damit der materialspezifische Wärmedurchlasswiderstand zunehmend wichtiger. Dämmschichten um 16 cm bei Standard-Neubauten und Schichtdicken von bis ca. 40 cm bei Passivhäusern können erhebliche konstruktive Probleme verursachen, bzw. in vielen Fällen sogar die Bauweise vorgeben (Leichtbau anstelle von Massivbau).

Abbildung 68 zeigt die spezifischen Dämmkosten verschiedener Dämmstoffe im Vergleich. Die Kosten pro Wärmedurchlasswiderstandseinheit schwanken dabei erheblich, je nach erforderlichem Zusatznutzen.

| Material                                     | WD-Kosten<br>bei d=100mm         | W-Leitfähigkeit          | Kosten pro Wärme-<br>durchlasswiderstand                  |
|--|----------------------------------|--------------------------|---|
|  | $e_{WD}$<br>[Fr/m <sup>3</sup> ] | $\lambda$<br>[W/mK]      | $K_{R, spez}$<br>[Fr/m <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> K/W)] |
| Glasfaserplatten 16 kg/m <sup>3</sup>        | 134.00                           | 0.036                    | 4.82  |
| Glasfaserplatten 40 kg/m <sup>3</sup>        | 235.00                           | 0.033                    | 7.76  |
| Glasfaserplatten 70 kg/m <sup>3</sup>        | 255.00                           | 0.034                    | 8.67  |
| Glasfaserplatten 80 kg/m <sup>3</sup>        | 360.00                           | 0.032                    | 11.52   |
| Steinwolle 32 kg/m <sup>3</sup>              | 122.00                           | 0.036                    | 4.39  |
| Steinwolle 50 kg/m <sup>3</sup>              | 222.00                           | 0.036                    | 7.99  |
| Steinwolle 75 kg/m <sup>3</sup>              | 265.00                           | 0.036                    | 9.54  |
| Steinwolle 100 kg/m <sup>3</sup>             | 352.00                           | 0.034                    | 11.97   |
| EPS 20 kg/m <sup>3</sup>                     | 206.00                           | 0.037                    | 7.62  |
| EPS 30 kg/m <sup>3</sup>                     | 330.00                           | 0.035                    | 11.55   |
| XPS 33 kg/m <sup>3</sup>                     | 566.00                           | 0.032                    | 18.11   |
| PU 30 kg/m <sup>3</sup> Vlies kaschiert      | 397.00                           | 0.028                    | 11.12   |
| PU 30 kg/m <sup>3</sup> Alu kaschiert        | 423.00                           | 0.024                    | 10.15   |
| gonon pf, Superdämmplatte                    | 459.00                           | 0.023                    | 10.56   |
| Schaumglas 130 kg/m <sup>3</sup>             | 524.00                           | 0.040                    | 20.96   |
| Holz-Weichfaserplatten 170 kg/m <sup>3</sup> | 335.00                           | 0.040                    | 13.40   |
| Zelluloseplatten, 70 kg/m <sup>3</sup>       | 205.00                           | 0.039                    | 8.00  |
| Kork 120 kg/m <sup>3</sup>                   | 460.00                           | 0.042                    | 19.32   |
| Kokos 66 kg/m <sup>3</sup>                   | 300.00                           | 0.045                    | 13.50   |
| VIP 1a                                       | 6'500.00                         | 0.008                    | 52.00   |
| VIP 1b                                       | 6'500.00                         | 0.005                    | 32.50   |
|  | $e$ [Fr/m <sup>2</sup> ]         | $U$ [W/m <sup>2</sup> K] | [Fr/m <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> K/W)]                  |
| Verglasung 2-IV                              | 116.00                           | 1.200                    | 176.20  |

Abbildung 68: Spezifische Wärmedämmkosten verschiedener Dämmstoffe (Preisbasis Oktober 2004). Die Kostenangaben verstehen sich exklusive Montage- und Unterkonstruktionskosten.

VIP A: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 8 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K), VIP B:  $\lambda = 5 \cdot 10^{-3}$  W/(m·K).



Bei VIP handelt es sich um ein noch junges Produkt, dessen Produktionsabläufe und Vertriebsnetze noch nicht optimiert sind. Die augenfälligen Preisunterschiede illustrieren diesen Zustand eines noch wenig transparenten Marktes. Je nach Plattengrösse verändert sich zudem der  $\lambda$ -Wert massgebend. Dies hat zur Folge, dass ein Vergleich zu den herkömmlichen Massen-Dämmprodukten einen vor allem illustrativen Charakter hat. Trotzdem zeigt die Tabelle, dass die relativ hohen Materialkosten der VIP durch die guten Dämmeigenschaften zum Teil kompensiert werden können.

## 6.2 Ökonomischer Nutzen

Mit dem Einsatz von VIP wird gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien umbauter Raum eingespart. Ihr Wärmedurchlasswiderstand ist um den Faktor 4 bis 8 höher und damit die erforderliche Schichtdicke entsprechend kleiner.

Nicht überall ist diese Ersparnis quantifizierbar (geringere Geschosshöhe beim Einsatz unter Fussbodenheizung, schwellenlose Übergänge im Terrassenbereich, schlanke Ansichten von Bauteilstirnseiten), doch oft macht erst die Anwendung von VIP gewisse (Sanierungs-) Baumassnahmen möglich (Ersparnis bei Sanierungen von Flachdach, Fassaden, Innendämmung). Die derzeitigen Produktentwicklungen zielen stark auf Anwendungen im Bau ab, welche genau diese ökonomisch schwer quantifizierbare Platzersparnis bieten.

### 6.2.1 Baulandersparnis

Das Dämmstoff-Volumen macht bei einem Niedrigenergie-Einfamilienhaus etwa 20-25% des gesamten beheizten Gebäudevolumens aus. Dementsprechend steigt bei vorgegebener Ausnützungs- oder Überbauungsziffer die benötigte Baulandfläche. Wie die nachstehende Tabelle zeigt, können mittels Einsatz von VIP Baulandkosten eingespart werden und die Dämmstoff-Mehrkosten somit mindestens zu einem grossen Teil gedeckt werden.

| Gebäudeabmessungen<br>(beheiztes Volumen, Innenmasse) |                 |                       |        | Dämmstoffdicke                            |            |                       | VIP  |        | WD |  |
|---|-----------------|-----------------------|--------|---|------------|-----------------------|------|--------|----|--|
| Breite  | b               | [m]                   | 8.00   | d   | [m]        |                       | 0.06 | 0.27   |    |  |
| Länge   | l               | [m]                   | 10.00  | Beheiztes Gebäudevolumen<br>(Aussenmasse) | $V_G$      | [m <sup>3</sup> ]     | 429  | 508    |    |  |
| Höhe  | h               | [m]                   | 5.10   | Volumen Wärmedämmung                      | $V_W$      | [m <sup>3</sup> ]     | 21   | 100    |    |  |
| Bebauungsziffer                                       | ÜZ              |                       | 0.25   |   |            | [%]                   | 5%   | 20%    |    |  |
| Baulandpreis  | P               | [Fr./m <sup>2</sup> ] | 650.00 | Bebaute Fläche                            | F          | [m <sup>2</sup> ]     | 82   | 90     |    |  |
| Wärmeleitfähigkeit WD                                 | $\lambda_{WD}$  | [W/mK]                | 0.036  | Mehrbedarf bebaute Fläche                 | $\Delta F$ | [m <sup>2</sup> ]     |      | 8      |    |  |
| Wärmeleitfähigkeit VIP                                | $\lambda_{VIP}$ | [W/mK]                | 0.008  | Erforderliche Parzellenfläche             | A          | [m <sup>2</sup> ]     | 329  | 360    |    |  |
|   |                 |                       |        | Mehrbedarf Parzellenfläche                | $\Delta A$ | [m <sup>2</sup> ]     |      | 31     |    |  |
|   |                 |                       |        | Mehrkosten Bauland                        | K          | [Fr.]                 |      | 20'377 |    |  |
|   |                 |                       |        | Zulässige Mehrkosten VIP                  | $K_{zul.}$ | [Fr./m <sup>3</sup> ] |      | 1'837  |    |  |
|   |                 |                       |        |   | $K_{zul.}$ | [Fr./m <sup>2</sup> ] |      | 110    |    |  |

Abbildung 69: Dämmstoffvolumen am Beispiel eines einfachen Einfamilienhauses. Dank des Einsatzes von VIP kann eine erhebliche Landflächensparnis erzielt werden. Die Materialmehrkosten werden dadurch zu einem grossen Teil gedeckt.

## 6.2.2 Nutzflächenmaximierung

Ist die Baulandfläche gegeben oder erfordert eine Sanierung eine Innendämmung (Stadtbild, Denkmalpflege, minimale lichte Fenstergrösse etc.), so interessiert vor allem die Nutzflächenmaximierung des Bau- oder Sanierungsvorhabens. Stellt man nun die Nutzflächenkosten (oder Mieteinnahmen) den durch die Dämmmassnahme entstehenden Kosten (Material, Nutzflächenverlust) gegenüber, so kann der Mehr- oder Minderwert der gewählten Dämmmassnahme beurteilt werden. Je höher die Nutzflächenkosten einer Liegenschaft sind, desto interessanter wird der Einsatz von Platz sparenden VIP.

Die Abbildung 70 zeigt die zulässigen Quadratmeter- bzw. Kubikmeterkosten von VIP, wenn durch ihren Einsatz Fläche eingespart werden kann. Je nach Ausgangslage handelt es sich dabei um teure Nutzfläche, die eingespart wird (Innendämmung), um Erstellungskosten (Neubau mit nicht ausgeschöpfter Baulandausnutzung) oder zumindest um die Kosten des Baulandes. Die Berechnungen zeigen, dass VIP ein Mehrfaches von konventionellen Dämmstoffen kosten dürfen, um sich immer noch als wirtschaftlich interessante Alternative am Markt durchsetzen zu können.

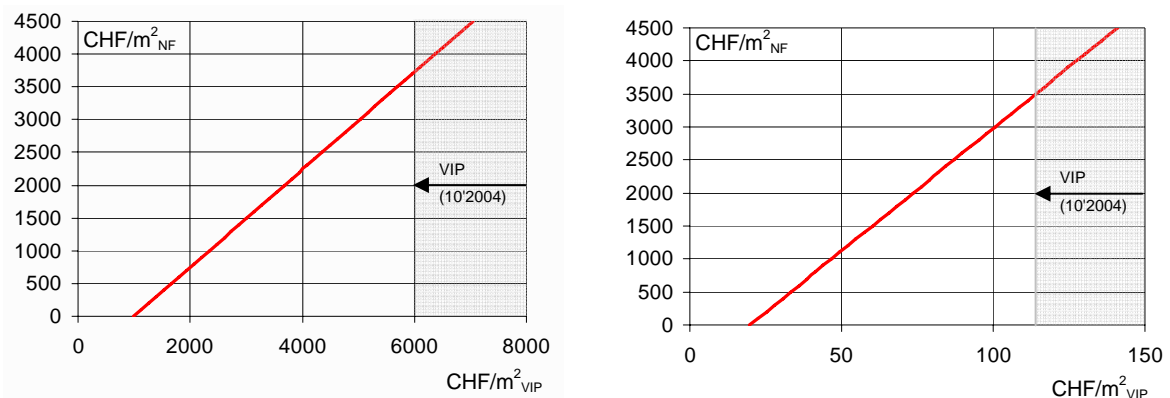


Abbildung 70: Zulässige Kubikmeter- (links) und Quadratmeterkosten (rechts) von VIP in Abhängigkeit des Wertes der eingesparten Nutzfläche bei folgenden Annahmen: 2 cm VIP statt 9 cm konventioneller Dämmstoff; Raumhöhe 2.60 m; 220 CHF/m<sup>3</sup> konventioneller Dämmstoff.

## 7 Annex 39 – Ausblick

VIP wurden während der Laufzeit dieses Forschungsprojektes stark weiterentwickelt. Zu Beginn des Projektes waren VIP in der Baupraxis praktisch unbekannt und erst einzelne Versuchsanwendungen wurden unternommen. Zentrale Fragen wie Dauerhaftigkeit, Gasdichtigkeit, Verhalten unter Feuchte und Temperatur waren unbeantwortet. Nun, gegen Ende des Projektes, kann festgestellt werden, dass die Eigenschaften von VIP sehr gut bekannt sind und dass einige Schwächen auch bereits ausgeräumt wurden. Gut dokumentierte Erfahrungen aus der Praxis liegen vor und werden derzeit von Produzenten und Unternehmen aufgenommen. Die Produktion wurde professionalisiert und die Produkte besser auf den Bauproduktmarkt abgestimmt. Heute kann ein sehr breites Interesse in der Baufachwelt festgestellt werden und ein Gesamtüberblick über die Verwendung von VIP ist heute bereits nicht mehr möglich. Die Anwendung von VIP im Baubereich wird allerdings immer noch durch vor allem zwei Hindernisse gehemmt:

- Hoher Preis
- Fehlendes Vertrauen in die Technik und deren Anwendbarkeit im Baubereich

### Heutige Kosten

Die Arbeiten im Annex haben auch gezeigt, dass bei der Auslegung von VIP-Dämmungen nicht mit dem Startwert der Wärmeleitfähigkeit in Paneelmitte von  $4 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , sondern eher mit 6 bis  $8 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  gerechnet werden muss. Damit steigen die ohnehin hohen Materialkosten in einen Bereich, der die Massenanzugung stark behindert. Auch wenn der Raumgewinn und konstruktive Einsparungen beim VIP-Einsatz berücksichtigt werden, resultieren heute Kosten, die bei Standarddämmaufgaben kaum akzeptabel sind. Noch wenig genutzt werden heute die wiedergewonnenen gestalterischen Möglichkeiten, die sich durch die schlanke Wärmedämmungen ergeben. VIP wird heute deshalb nur in speziellen Anwendungen eingesetzt, in denen zusätzlich Vorteile erzielt werden. Bei Sanierungen können durch VIP zusätzliche Massnahmen vermieden werden, wie das Verlängern des Dachüberstands bei der Fassadenaussendämmungen. Häufig wird VIP heute auch als eine Art Problemlöser eingesetzt, beispielsweise in der Terrasse, wo ein Niveauunterschied zwischen Innen- und Aussenbodenfläche (Stufe) verhindert wird.

Dass sich heute primär der eher kritisch zu beurteilende direkte Einsatz von wenig bis nicht geschützten Paneelen auf der Baustelle etabliert hat, hat seinen Grund wohl auch im hohen Preis. Produzenten von vorgefertigten Halbprodukten und Systemen (Sandwichplatten, Türblätter, Metallfassaden, Haustechnikkomponenten usw.) investieren nicht, da der VIP-Einsatz ihre Produkte so stark verteuern würden, dass diese im Massenmarkt nicht bestehen könnten.

### Kostenreduktionspotentiale

Soll sich Vakuum-Dämmung im Baubereich breiter durchsetzen, so ist eine Reduktion der Preise unumgänglich. Um abzuschätzen, ob und in welchem Umfang mit Preisreduktionen zu rechnen ist, wäre es interessant, die heute bestimmenden Faktoren zu kennen, was nur ansatzweise der Fall ist. Beispielsweise ist bekannt, dass bereits die Materialkosten (Kieselsäure und Hüllmaterial) einen nicht unwesentlichen Anteil am Endpreis haben. Beim Hüllma-

terial bestimmt wohl primär die Absatzmenge den Preis. Beim Stützkörper hingegen ist es physikalisch vorstellbar, den Anteil der teuren Kieselsäure zu reduzieren, oder durch andere kostengünstigere Materialien zu ersetzen (z.B. organischer Schaum). Insbesondere letzteres bedingt dichtere Hüllmaterialien, weil ein tieferer Druck aufrechterhalten werden muss. Solch Hüllmaterialien sind übrigens nicht nur bei der Verwendung von kostengünstigeren Stützkörpermaterialien sondern auch bei Bauanwendungen mit erhöhten Feuchten/Temperaturen notwendig. Entsprechende Hüllmaterialien werden auch für andere Anwendungen benötigt (z.B. OLED), welche ähnlichen Anforderungen stellen. Es ist deshalb gut vorstellbar, dass in diesem Bereich mittelfristig entsprechende Hüllmaterialien verfügbar sein werden.

Weiter ist die Produktion von VIP noch zu einem grossen Teil teure Handarbeit, insbesondere wenn nicht Standardformate nachgefragt werden. Die Automatisierung der VIP-Produktion - vergleichbar der Produktion von Fenstergläsern - hat in den vergangenen Jahren aber zugenommen. Diese Entwicklung wird wohl in absehbarer Zeit einen positiven Effekt auf die Produktionskosten haben. Inwieweit der Zwischenhandel den Endpreis beeinflusst, ist nicht im Detail bekannt.

Für die nächsten fünf bis zehn Jahre ist aber davon auszugehen, dass VIP deutlich teurer sein werden, als konventionell gedämmte Konstruktionen mit gleicher Dämmleistung. Dies auch, weil die konventionelle Konkurrenz ihre Produkte ebenfalls verbessert.

### **Qualitätssicherung**

Der Annex 39 hat zwar dazu beitragen, dass das Vertrauen in die Vakuum-Dämmtechnik gewachsen ist. Es wurde beispielsweise nachgewiesen, dass die Verhältnisse in der Betriebsphase von vielen Bauanwendungen heute VIP-Lebensdauern von 50 Jahren und mehr zulassen.

Es besteht aber Handlungsbedarf in der Qualitätssicherung. Hier geht es darum, sicherzustellen, dass die am Bau eingesetzten Produkte während des vorgängigen Handlings keinen Schaden genommen haben, welcher die Lebensdauer des VIP negativ beeinflusst. Durch systematische Messungen des VIP-Innendruckes könnten hier einerseits schadhafte VIP aufgespürt werden, andererseits wäre aber auch eine Analyse der kritischen Schritte in der Verarbeitung möglich. Die heute verfügbare Messtechnik kann aus Kostengründen nur bedingt für eine breite Qualitätskontrolle der gesamten Prozesskette eingesetzt werden. Laufende Entwicklungsaktivitäten lassen aber den Schluss zu, dass schon bald mit deutlich kostengünstigerer und einfach handhabbarer Messtechnik gerechnet werden kann.

### **Behördliche Zulassung**

Weiterhin ein Hindernis sind die in den meisten Ländern noch fehlenden behördlichen Zulassungsprozeduren, resp. Zulassungen für Paneele und ganze VIP-Systeme.

## 8 Lieferanten

Lieferanten von Vakuumdämmelementen, die an den dokumentierten Projektbeispielen beteiligt waren (alphabetische Reihenfolge):

Häring + Co. AG  
Schlossstraße 3  
4133 Pratteln / Schweiz  
Tel.: +41 (0) 61 826 86 86  
E-Mail: [info@haring.ch](mailto:info@haring.ch)  
Internet: <http://www.haring.ch>

lambdasave GmbH  
Ekkehard Nowara  
Am Duckeldamm  
26725 Emden / Deutschland  
Tel.: +49 (4921) 9768 00  
E-mail: [nowara@lambdasave.com](mailto:nowara@lambdasave.com)  
Internet: <http://www.lambdasave.de>

microtherm international LTD  
Marc Vanhoeyland  
Industriepark Noord 1  
9100 Sint-Niklaas / Belgium  
Tel.: +32 (3) 760 1980  
E-mail: [marc.vanhoeyland@microtherm.be](mailto:marc.vanhoeyland@microtherm.be)  
Internet: <http://www.microtherm.uk.com>

microtherm Deutschland  
Josef Kloo  
Rosenstr. 4  
83052 Bruckmühl / Deutschland  
Tel.: +49 (8062) 4635  
E-mail: [josefkloo@aol.com](mailto:josefkloo@aol.com)  
Internet: <http://www.microtherm.uk.com>

Porextherm Dämmstoffe GmbH  
Gregor Erbenich  
Müller-Thurgau-Str. 3  
65366 Geisenheim / Deutschland  
Tel.: +49 (6722) 750 150  
E-mail: [gregor.erbenich@porextherm.com](mailto:gregor.erbenich@porextherm.com)  
Internet: <http://www.porextherm.com>

SAES Getters GmbH  
Stephan Paetz  
Gerolsteiner Str.1  
50937 Köln / Deutschland  
Tel.: +49 (221) 944075 15  
E-mail: [stephan\\_paetz@saes-group.com](mailto:stephan_paetz@saes-group.com)  
Internet: <http://www.saesgetters.com/default.aspx?idPage=131>

Schneider Dämmtechnik  
Jürg Fehr  
Im Hölzli 26  
8405 Winterthur / Schweiz  
Tel.: +41 (52) 235 2121  
E-mail: [j.fehr@sdt.ch](mailto:j.fehr@sdt.ch)  
Internet: <http://www.sdt.ch>

va-Q-tec AG  
Dr. Roland Caps  
Karl-Ferdinand-Braun-Str. 7  
97080 Würzburg / Deutschland  
Tel.: +49 (931) 35942 0  
E-mail: [info@va-q-tec.com](mailto:info@va-q-tec.com)  
Internet: <http://www.va-q-tec.de>

Wacker Chemie AG  
Geschäftsfeld Wärmedämmstoffe wurde übernommen von  
Porextherm Dämmstoffe GmbH  
(1.11.2004)

ZZ Wancor  
Stefan Abegg  
Althardstrasse 5  
8105 Regensdorf / Schweiz  
Tel.: +41 (1) 871 32 32  
E-mail: [info@zzwancor.ch](mailto:info@zzwancor.ch)  
Internet: <http://www.zzwancor.ch>



## Literaturverzeichnis

- [1] IEA/ECBCS Annex 39 (2005). "VIP – Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications", Abschlussbericht Teilprojekt A
- [2] IEA/ECBCS Annex 39 (2005). "Vacuum Insulation in the Building Sector – Systems and Applications", Abschlussbericht Teilprojekt B
- [3] Ghazi Wakili, K., R. Bundi und B. Binder (2004). "Effective Thermal Conductivity of Vacuum Insulation panels.", Building Research and Information 32(4), S. 293-299.
- [4] Cauberg, J.J.M. und M.J. Tenpierik (2004). "An Approximating Model for Calculating Thermal Bridge Effects of Aluminium Based Thin Foil High Barrier Envelopes around Vacuum Insulation Panels.", Arbeitspapier im Rahmen des IEA/ECBCS Annex 39 HiPTI-Projektes.
- [5] Ghazi Wakili, K., R. Bundi und A. Binz (2005). "Building constructions with integrated vacuum insulation panels – calculated thermal bridge effects.", Arbeitspapier im Rahmen des IEA/ECBCS Annex 39 HiPTI-Projektes.
- [6] Simmler, H. und Brunner, S. (2005). "Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life.", zur Publikation in Energy & Buildings akzeptiert.
- [7] e.g. EN 13165: "Thermal insulation products for buildings - Factory made rigid polyurethane foam (PUR) products."
- [8] Goedkoop, Spiensma (2000). "The Eco-indicator 99.", Methodology Report April 2000, 2<sup>nd</sup> Edition, NL.
- [9] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1998). "Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit.", Schriftenreihe Umwelt N. 297, Ökobilanzen, CH.
- [10] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1999). "Ökologische Bewertung mit Hilfe der Grauen Energie.", Schriftenreihe Umwelt N. 307, Ökobilanzen, CH.
- [11] Bundesamt für Energiewirtschaft (1996). "Ökoinventare von Energiesystemen.", 3. Auflage, ENET, CH.
- [12] ESU-services, R. Frischknecht (2001). firmeneigene Datenbanken mit Inventardaten von Prozessen und Produkten, CH.
- [13] Weibel, Stritz (1995). "Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien.", Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Hochbaukonstruktionen, Zürich, CH.
- [14] Richter et al. (1995). "Energie- und Stoffbilanzen bei der Herstellung von Wärmedämmstoffen.", Dübendorf, CH.
- [15] Schonhardt, U. et al. (2003). "Oekobilanz eines Vakuum-Isolations-Panels (VIP).", 68 Seiten, Fachhochschule beider Basel, Institut für Energie, Basel, CH.
- [16] Spoel, W.H. van der (2003). "Memo: Warmtedoorgang door deuren met/zonder vacuum insulation panel-paneel.", Department of Civil Engineering TUDelft, 3 Seiten.