

F 3036

Christoph Sprengard, Sebastian Treml, Max Engelhardt Holger Simon, Florian Kagerer

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) in der Bauanwendung: vom Dämmstoff zum Dämmsystem Verarbeitung, Befestigung, Dauerhaftigkeit



Fraunhofer IRB Verlag

## F 3036

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0023-4

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

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



## Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) in der Bauanwendung: vom Dämmstoff zum Dämmsystem

## Verarbeitung, Befestigung, Dauerhaftigkeit

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard Dr.-Ing. Sebastian Treml Max Engelhardt B. Eng. Dipl.-Ing. Holger Simon M.BP. Dipl.-Ing. Florian Kagerer

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) Aktenzeichen: : II 3-F20-11-1-039 / SWD-10.08.18.7-12.32

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



Forschungsbericht FO-2012/08



Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle von Baustoffen und Bauteilen. Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Wärme- und Feuchteschutzes



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München Lochhamer Schlag 4 | DE-82166 Gräfelfing Geschäftsführender Institutsleiter:



FIW Bericht FO-2012/08

## Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) in der Bauanwendung: vom Dämmstoff zum Dämmsystem

## Verarbeitung, Befestigung, Dauerhaftigkeit

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard Dr.-Ing. Sebastian Treml Max Engelhardt B. Eng. Dipl.-Ing. Holger Simon M.BP. Dipl.-Ing. Florian Kagerer

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) Aktenzeichen: : II 3-F20-11-1-039 / SWD-10.08.18.7-12.32

Mitfinanzierende Stellen: Variotec GmbH & Co. KG Porextherm Dämmstoffe GmbH

Der Bericht umfasst 155 Seiten 75 Abbildungen 58 Tabellen

Gräfelfing, den 5. Dezember 2016 Institutsleiter Abteilungsleiter

Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm Dipl.-Ing. Christoph Sprengard





# Inhaltsverzeichnis

| 1 | Einleitung                        |  |  |  |
|---|-----------------------------------|--|--|--|
|   | 1.1                               | Energieeinsparpotentiale im Gebäudebereich   | 7  |  |
|   | 1.2                               | Vakuum-Isolations-Paneele (VIP)  | 9  |  |
|   | 1.3                               | Einsatz von VIP im Bauwesen  | 10   |  |
| 2 | Stan                              | d von Wissenschaft und Technik   | 13   |  |
|   | 2.1                               | Herstellung, Rohstoffe, Lieferformen und Verarbeitung von VIP  | 13   |  |
|   |                                   | VIP Hüllfolien   | 13   |  |
|   |                                   | VIP Kernmaterialien  | 15   |  |
|   |                                   | VIP-Herstellung  | 15   |  |
|   |                                   | Verarbeitung   | 16   |  |
|   | 2.2                               | Bauphysikalisch wichtige Eigenschaften von VIP   | 16   |  |
|   | 2.3                               | Innovationen im Bereich der VIP Technologie  | 17   |  |
|   | 2.4                               | VIP in Bausystemen   | 19   |  |
|   | 2.5                               | Alterung von VIP   | 20   |  |
|   | 2.6                               | Warmebrucken an VIP Konstruktionen   | 23   |  |
|   | 2.1                               | wissenschaftlicher Untersuchung der Permeationsvorgänge  | 23   |  |
| 3 | Prot                              | plemstellung und Forschungsansatz  | 26   |  |
|   | 3.1                               | Forschungsbereich A "Untersuchung der Dauerhaftigkeit von VIP-Elementen unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen "  | ~~~  |  |
|   |                                   |  | 26   |  |
|   |                                   | Problemstellung  | 26<br>26   |  |
|   |                                   | Problemstellung<br>Forschungsansatz  | 26<br>26<br>27   |  |
|   | 3.2                               | Problemstellung<br>Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"   | 26<br>26<br>27<br>28   |  |
|   | 3.2                               | Problemstellung<br>Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"<br>Problemstellung  | 26<br>26<br>27<br>28<br>28   |  |
|   | 3.2                               | Problemstellung<br>Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"<br>Problemstellung<br>Forschungsansatz  | 26<br>26<br>27<br>28<br>28<br>28<br>29                               |  |
|   | 3.2<br>3.3                        | Problemstellung<br>Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"<br>Problemstellung<br>Forschungsansatz<br>Forschungsbereich C "Bauphysikalische Fragestellungen bei Schadensfällen<br>Qualitätssicherung"   | 26<br>26<br>27<br>28<br>28<br>29<br>und<br>29                        |  |
|   | 3.2<br>3.3                        | Problemstellung<br>Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"<br>Problemstellung<br>Forschungsbereich C "Bauphysikalische Fragestellungen bei Schadensfällen<br>Qualitätssicherung"<br>Problemstellung  | 26<br>26<br>27<br>28<br>28<br>29<br>und<br>29<br>29                  |  |
|   | 3.2<br>3.3                        | Problemstellung<br>Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"<br>Problemstellung<br>Forschungsbereich C "Bauphysikalische Fragestellungen bei Schadensfällen<br>Qualitätssicherung"<br>Problemstellung<br>Forschungsansatz  | 26<br>26<br>27<br>28<br>28<br>29<br>und<br>29<br>29<br>29            |  |
| 4 | 3.2<br>3.3<br>Fors                | Problemstellung<br>Forschungsansatz<br>Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"<br>Problemstellung<br>Forschungsansatz<br>Forschungsbereich C "Bauphysikalische Fragestellungen bei Schadensfällen<br>Qualitätssicherung"<br>Problemstellung<br>Forschungsansatz  | 26<br>26<br>27<br>28<br>28<br>29<br>und<br>29<br>29<br>29            |  |
| 4 | 3.2<br>3.3<br>Fors<br>Elen        | Problemstellung<br>Forschungsansatz<br>Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"<br>Problemstellung<br>Forschungsansatz<br>Forschungsbereich C "Bauphysikalische Fragestellungen bei Schadensfällen<br>Qualitätssicherung"<br>Problemstellung<br>Forschungsansatz  | 26<br>26<br>27<br>28<br>29<br>29<br>29<br>29<br>29<br>29<br>30       |  |
| 4 | 3.2<br>3.3<br>Fors<br>Elen<br>4.1 | Problemstellung<br>Forschungsansatz<br>Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"<br>Problemstellung<br>Forschungsansatz<br>Forschungsbereich C "Bauphysikalische Fragestellungen bei Schadensfällen<br>Qualitätssicherung"<br>Problemstellung<br>Forschungsansatz<br><b>chungsbereich A "Untersuchung der Dauerhaftigkeit von VIP-</b><br><b>nenten unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen"</b><br>Material | 26<br>26<br>27<br>28<br>29<br>29<br>29<br>29<br>29<br>29<br>30<br>30 |  |



| 4.2 | Methoden  | 32                 |
|-----|---|--------------------|
|     | Messung des Innendruck  | 32                 |
|     | Berechnung der Partialdrücke  | 34                 |
|     | Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit   | 36                 |
|     | Versuchseinrichtungen zur künstliche Alterung   | 36                 |
|     | Verwendete Software zur hygrothermischen Bauteilsimulation  | 38                 |
|     | Zu untersuchende Musteranwendungen für die Bauteilsimulation mit WUFI   | 38                 |
|     | Ableitung des Innendruckanstiegs bei baupraktischen Temperatur- und Feuchteverteilungen auf Basis von $p_i = f(T, \phi)$  | 43                 |
| 4.3 | Versuchsplanung zu Forschungsbereich A  | 43                 |
|     | Laborversuche zur Alterung von VIP  | 43                 |
| 4.4 | Ergebnisse zu Forschungsbereich A   | 44                 |
|     | Ergebnisse der Innendruckanstiege (Gesamt- und Partialdrücke) und<br>Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der jährlichen<br>Innendruckanstiegsraten als Funktion von Temperatur und relativer | 44                 |
|     | Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Innendruckanstiegs in VIP  | in                 |
|     | einer bestimmten baulichen Anwendung  | 54                 |
|     | Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Anstiegs der Wärmeleitfähi<br>von VIP auf Basis des Anstiegs der Partialdrücke trockener Luftgase und<br>Wasserdampfs                                | gkeit<br>des<br>56 |
|     | Simulationen des Langzeit-Alterungsverhaltens   | 62                 |
|     | Einfluss der Paneeldicke auf das Alterungsverhalten   | 70                 |
|     | Bewertung von Referenzklimaten zur Bestimmung des Alterungsverhalten ur<br>zur Ableitung von Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit  | າd<br>74           |
| 4.5 | Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse aus Forschungsbereich A   | 78                 |
| For | schungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"  | 80                 |
| 5.1 | Untersuchung von Wärmbrückeneffekten am Vakuumdämmpaneel durch Randverbund und Deckmaterialien  | 81                 |
|     | Methodik  | 81                 |
|     | Wärmebrücken durch Randverbund und Deckmaterial bei 20mm<br>Vakuumdämmung   | 84                 |
|     | Wärmebrücken durch Randverbund und Deckmaterial bei 30mm<br>Vakuumdämmung   | 88                 |
|     | Wärmebrücken durch Randverbund und Deckmaterial bei 40mm<br>Vakuumdämmung   | 91                 |



| 5.2  | Dreidimensionale Berechnungen längenbezogener und punktförmiger<br>Wärmebrücken           | 94          |
|------|---|-------------|
|      | Einleitung  | 94          |
|      | Generischer Dübel   | 94          |
|      | Dämmung aus Vakuumisolationspaneelen (VIP), Deckschichten und Randstreifen                | 95          |
|      | Einbausituationen der Vakuumisolationspaneele (VIP)                                       | 97          |
|      | Berechnungsvarianten  | 99          |
|      | Ergebnisse  | 100         |
|      | Berücksichtigung im U-Wert  | 107         |
| 5.3  | VIP als Kerndämmung in Betonfertigteilen  | 110         |
|      | Beschreibung des Dämmsystems  | 111         |
|      | Zweidimensionale Wärmebrücken   | 112         |
|      | Dreidimensionale Wärmebrückeneffekte  | 112         |
|      | Grundlagen für die Berechnungen   | 112         |
|      | Ergebnisse  | 113         |
| 5.4  | Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse aus Forschungsbereich B                       | 117         |
|      | Einfluss von Randstreifen und Decklagen – linienförmige Wärmebrückeneffe<br>am Paneelrand | ekte<br>117 |
|      | Einfluss von Befestigungsmitteln – punktförmige Wärmebrücken                              | 117         |
| Fors | schungsbereich C "Bauphysikalische Fragestellungen bei                                    |             |
| Sch  | adensfällen und Qualitätssicherung"   | 121         |
| 6.1  | Methoden  | 121         |
|      | Belüftung einzelner Paneele bei VIP-gedämmten Bauteilen                                   | 121         |
| 6.2  | Ergebnisse zu Forschungsbereich C   | 125         |
|      | Belüftung einzelner Paneele bei VIP-gedämmten Bauteilen                                   | 125         |
| 6.3  | Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse aus Forschungsbereich C                       | 133         |
| Fazi | it  | 134         |
| 7.1  | Dauerhaftigkeit von VIPs  | 134         |
|      | Einflüsse aus Standort, Orientierung und Feuchtebelastung                                 | 135         |
|      | Einfluss der Paneeldicke  | 135         |
|      | Anwendungsspezifische Bemessungswerte   | 136         |
|      | Beurteilung der Bemessungswerte   | 137         |

6

7



|       |                     | Beurteilung des Sicherheitszuschlags im Rahmen der abZ | 140 |
|-------|---------------------|--|-----|
|       | 7.2                 | Wärmebrücken   | 140 |
|       |                     | Einflüsse aus Randstreifen und Befestigungen           | 140 |
|       | 7.3                 | Einfluss belüfteter Paneele                            | 141 |
|       | 7.4                 | Zusammenfassung  | 141 |
| 8     | Weit                | erer Forschungsbedarf                                  | 143 |
| Liter | atur                |  | 144 |
| Abbi  | ldung               | jsverzeichnis  | 146 |
| Tabe  | Tabellenverzeichnis |  | 152 |



# 1 Einleitung

Vakuumisolationspaneele (VIP) sind Hochleistungsdämmstoffe mit einer sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit. Die Frischwerte nach Produktion erreichen je nach verwendetem Kernmaterial und dem eingestellten Innendruck ca. 0,002 – 0,004 W/(m K). Typische Bemessungswerte von VIP in Deutschland liegen bei 0,007 W/(m K). Im Vergleich mit konventionellen Dämmstoffen (Hartschäume und Mineralwolle mit Bemessungswerten von ca. 0,035 W/(m K)) können konstruktiv also in etwa um den Faktor 5 niedrigere Wärmeleitfähigkeiten angesetzt werden, was schlanke und trotzdem energetisch hocheffiziente Bauteile ermöglicht.

Trotz dieser Vorteile, werden VIP bisher eher zögerlich im Bauwesen eingesetzt. Hemmnisse und Vorbehalte der Bauausführenden resultieren dabei insbesondere aus der Skepsis hinsichtlich der Qualität und Dauerhaftigkeit der Paneele, der Wärmebrückenproblematik der notwendigen Befestiger sowie einer generellen Scheu vor dem Zusatzaufwand bei der Planung und Ausführung einer Konstruktion mit VIP.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit können helfen, diese Hemmnisse zu beseitigen und die VIP-Bauweise zu stärken. Das Forschungsvorhaben wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) gefördert. Mitfinanzierende Stellen sind die Variotec GmbH in Neumarkt und die Porextherm GmbH in Kempten.

#### 1.1 Energieeinsparpotentiale im Gebäudebereich

Eine stabile und unabhängige Energieversorgung ist für die Sicherheit und Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft von überragender Bedeutung. In Europa wird nach wie vor mehr als 50 % der benötigten Energie importiert, wobei insbesondere die Versorgung mit Erdgas fast ausschließlich von einem einzigen Drittlandslieferanten (Russland) abhängig ist. Wertmäßig stellen die Energieimporte mehr als 20 % der Importkosten der europäischen Union dar. In einem Strategiepapier der Europäischen Kommission ist als eine zentrale Maßnahme zur Sicherung der Energieversorgung die Dämpfung der Energienachfrage benannt. Durch die strikte Umsetzung der Energieeffizienz-Richtlinie und der Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden könnten signifikante Einsparungen in den Sektoren Wohnungsbau, Verkehrswesen und der Industrie erzielt werden. Als vorrangiger Sektor wird dabei explizit der Gebäudebereich benannt, auf den rund 40 % des Energieverbrauchs in der EU und etwa ein Drittel des Erdgasverbrauchs fallen. Durch eine beschleunigte Gebäuderenovierung könnte der Energieverbrauch im Gebäudebereich um bis zu drei Viertel verringert werden. [Anonymus 2014]

Die Verteilung des Endenergieverbrauchs in Deutschland zeigt im Wesentlichen die gleichen Tendenzen. Auch hier sind vorrangig die Sektoren Industrie, Verkehr und private Haushalte für den Verbrauch maßgeblich. Eine weiterführende Aufschlüsse-



lung auf die Anwendungsfelder unterstreicht auch hier die Bedeutung des Raumwärmebedarfs. In Abbildung 1 sind die Daten der letzten Erhebung der AG Energiebilanzen zur Analyse des Verbrauchs nach Anwendungsfeldern [Ziesing 2013] mit den prozentualen Anteilen des Endenergieverbrauchs nach Sektoren [AGEB 2016] verrechnet. Dargestellt ist also der prozentuale Anteil der Anwendungsfelder am gesamten Endenergieverbrauch.



# Abbildung 1 Prozentualer Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland, aufgeschlüsselt nach Sektoren und Anwendungen [AGEB 2016] [Ziesing 2013]

Der Verbrauch an mechanischer Energie im Sektor Verkehr ist alleine für ca. 29 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich, gefolgt von der Prozesswärme in der Industrie, die ca. 19 % des Endenergieverbrauchs beansprucht. In einer ähnlichen Größenordnung liegt an dritter Stelle der Raumwärmebedarf der privaten Haushalte der mit ca. 18 % immer noch einen bedeutenden Beitrag zum Energieverbrauch leistet.

Seit Einführung der Wärmeschutzverordnung (WSchV) bzw. Energieeinsparverordnung (EnEV) wurden im Neubaubereich bereits große Effizienzsteigerungen erreicht. Trotzdem besteht vor allem im Bestand immer noch großes Optimierungspotential. Über 80 % der Gebäude in Deutschland wurden vor der Einführung der WSchV 1995 gebaut. Betrachtet man innerhalb dieses Bestandsauschnitts die Gebäude mit Bauteilen die überwiegend nicht bis gering modernisiert sind, so sind überschlägig etwa 65 % der Gebäude in Deutschland sanierungsbedürftig [Walberg et al. 2011]. Eine energetische Ertüchtigung allein der sanierungsbedürftigen Bauteile in den Gebäudealtersklassen bis 1978 auf einen Zustand der EnEV 09 würde eine Verringerung der Transmissionswärmeverluste über die Gebäudehülle um ca. 46 % bewirken – bezogen auf den gesamten Gebäudebestand wäre dies immerhin noch eine Einsparung von ca. 33 %. Überragende Bedeutung haben hierbei Maßnahmen zur Dämmung der Fassade [Sprengard et al. 2014].



Verstärkte Materialforschung zur Verbesserung der Eigenschaften der eingesetzten Dämmstoffe ist eine essentielle Voraussetzung zur Akzeptanz und Umsetzung der angestrebten Sanierungsfahrpläne. Vor einigen Jahren galt eine 60 - 100 mm starke Dämmung noch als ausreichender Wärmeschutz, vor dem beschriebenen Hintergrund steigender Anforderungen an die Energieeffizienz werden heute unter Einsatz konventioneller Dämmstoffe weit höhere Dämmstärken erreicht.

Die voluminöser werdenden Wandaufbauten führen allerdings schon heute dazu, dass gerade im Falle einer Sanierung zahlreiche Probleme auftreten können, die der energetischen Sanierung ein Hemmnis sind. Dazu gehören beispielsweise ein ungünstiger Lichteinfall an den Fenstern und unzureichende Dachüberstände. Bei dem Teil des Gebäudebestandes der innenseitig gedämmt werden muss, ist zudem der Verlust an Wohnfläche beträchtlich. An diesen Stellen können die hochwärmedämmenden Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) einen vielversprechenden Lösungsansatz darstellen.

Denn VIP haben im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen eine sehr viel niedrigere Wärmeleitfähigkeit. Entsprechend sind nur geringe Dämmstoffdicken erforderlich, um einen bestimmten vorgegebenen U-Wert zu erreichen. Bei einem typischen Bemessungswert von 0,007 W/(m K) für VIP, sind beispielsweise zur energetischen Sanierung eines Bestandsbauteils mit einem U-Wert von 1,4 W/(m<sup>2</sup> K) auf den Zielwert von 0,24 W/(m<sup>2</sup> K) nur 2,5 cm Dämmstoffdicke erforderlich. Konventionelle Dämmstoffe mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von beispielsweise 0,032 W/(m K) benötigen in der gleichen Anwendung eine Dicke von 11 cm. Ist die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs höher oder sollen noch niedrigere Ziel-U-Werte erreicht werden steigt der Abstand zwischen den Systemen noch deutlicher an.

Gerade im Bereich der Sanierung von Bestandsgebäuden (um beispielsweise Fensterrücksprünge zu minimieren oder die Verbreiterung von Ortgängen zu vermeiden) und generell bei Anwendungen mit reduziertem Installationsraum (z. B. Terassen- und Balkondämmung, Innendämmung, Kellerdeckendämmung, etc.) bieten sich VIP deshalb als Alternative zu konventionellen Dämmstoffen an und garantieren auch bei sehr geringen Dämmstoffdicken die Einhaltung der gestiegenen Anforderungen aus den einschlägigen Bauregelungen (EnEV).

#### 1.2 Vakuum-Isolations-Paneele (VIP)

Die Vakuumtechnik ist eine Disziplin, deren Ursprünge bis ins 17. Jahrhundert zurückreichen, als erstmals Versuche zur Quantifizierung der Kräfte des atmosphärischen Luftdruckes auf evakuierte Objekte durchgeführt wurden (Halbkugel-Experiment von Otto von Guericke). Die Anwendungsgebiete sind mittlerweile vielfältig und bieten unverzichtbare technische Möglichkeiten beispielsweise in der Fertigungs-, Förder- und Verfahrenstechnik, der Analytik und der Forschung. Heute alltägliche Gerätschaften wie Dewargefäße (Thermoskannen) sind in ihrer Funktionsweise auf die Aufrechterhaltung ihres evakuierten Zustandes angewiesen. Bei der



angesprochenen Thermoskanne ist das Vakuum für die thermische Entkopplung von der Umgebung verantwortlich. Dieser Effekt wird bei Vakuum-Isolation-Paneelen genutzt und auch hier ist die Aufrechterhaltung des niedrigen Innendrucks eine wichtige Eigenschaft des Produktes.

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) werden im Baubereich seit Ende der 1990er Jahre verwendet. Die ersten Patente für evakuierte Isolationspaneele wurde schon 1930 von O. Hemmann und S. Dortmund beim Deutschen Reichspatentamt angemeldet [Wutz, Adam, Walcher 2000]. Erste Anwendung fanden flache Vakuum-Paneele in den 70er Jahren im Bereich der Kältetechnik in Kühlhäusern. Hier kamen bereits erste Hochbarrierelaminate zum Einsatz um auf Stahl oder Glas als Hülle verzichten zu können. Erste Untersuchungen zum Einsatz von VIP im Bauwesen begannen etwa gegen Ende der 1980er Jahre. Ende der 1990er Jahre waren die ersten Systeme so weit entwickelt, dass Anwendungen zunächst mit Zustimmung der obersten Baubehörde der Länder im Einzelfall im Gebäudebereich eingesetzt wurden. Größeren Aufschwung erfuhr die Technologie dann nach Erteilung der ersten bauaufsichtlichen Zulassungen im Jahr 2007.

Die sehr viel niedrigere Wärmeleitfähigkeit der VIP gegenüber konventionellen Dämmstoffen beruht auf der Ausschaltung der Wärmeleitfähigkeit der Luft durch die Evakuierung des Dämmstoffvolumens (Thermoskannenprinzip) bei einer gleichzeitig sehr geringen Wärmeleitfähigkeit des das Volumen bestimmenden Feststoffgerüsts. Die Wärmeleitfähigkeit eines VIP ist aus diesen Gründen aber auch zwangsläufig von der (dauerhaften) Erhaltung eines bestimmten Schwellenwertes des Innendrucks abhängig, was insbesondere in den Bereichen Transport, Handling auf der Baustelle sowie der Permeation trockener Luftgase und Wasserdampf durch die Umhüllungsfolien zu hohen technischen und fachlichen Anforderungen führt.

Die tatsächlich erzielbare Wärmeleitfähigkeit des VIP als Dämmstoffsystem ist bedingt durch den Aufbau der Paneele und eventuell nötiger Verarbeitungs- und Montagemittel abhängig von einer Reihe von Faktoren:

- dem Stützkernmaterial und dessen Rohdichte und Wassergehalt
- der Art der anorganischen Barriereschichten und deren Dicke
- der Größe und der Dicke der Paneele
- dem Niveau des Vakuums in den Paneelen und dessen Dauerhaftigkeit
- der Verwendung zusätzlicher Randstreifen und Deckschichten
- der Art und der Anordnung der Verschweißung der Folie
- den Befestigungselementen und deren Wärmebrückenwirkung

#### 1.3 Einsatz von VIP im Bauwesen

VIPs stellen derzeit noch einen Nischenmarkt im Baugewerbe dar. Die geringe Marktgröße bedeutet auch ein hohes Preisniveau und geringe finanzielle Spielräume für Weiterentwicklung und Erprobung neuer Techniken. Zur Verbesserung der Qualitätssicherung wurde über die Anforderungen des Deutschen Instituts für Bau-



technik (DIBt) hinaus als freiwilliger Qualitätsstandard für VIP vom Deutschen Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. (RAL) ein Gütezeichen ausgearbeitet.

Die Landesbauordnungen schreiben für Bauprodukte bestimmte Anforderungen fest, die über die gesamte geforderte Lebensdauer erfüllt sein müssen, um Gebrauchstauglichkeit zu besitzen. Zu diesen Anforderungen gehört beispielsweise die Standsicherheit, die Verkehrssicherheit und ein ausreichender Brand-, Schall- und Wärmeschutz.

Nach den Bestimmungen des DIBt sind VIP als ungeregeltes Bauprodukt nur mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung oder einer Zustimmung im Einzelfall anzuwenden. Die Zustimmung im Einzelfall ist für speziell angefertigte Formteile erforderlich, für die kein Zulassungsverfahren Iohnenswert ist. Paneele mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) werden bis dato nur von wenigen Herstellern vertrieben. Durch eine abZ werden Einzelprüfungen unnötig, was für Bauherren und Architekten, die mit den jeweiligen Produkten arbeiten möchten, erhebliche Entlastung bedeutet.

Im Gegensatz zu konventionellen Dämmstoffen, deren Einsatz aufgrund langjähriger Anwendungserfahrung auf Grundlage gesicherter Erkenntnisse zur Dauerhaftigkeit der Eigenschaftsprofile erfolgen kann, sind insbesondere die Erfahrungen im Bereich der Langzeitstabilität des Innendrucks der VIP immer noch gering, was sich unter anderem in den hohen Zuschlägen auf die Messwerte ( $\lambda_{tr,10}$ ) zur Bestimmung des Bemessungswertes der Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) niederschlägt.

Direkt nach der Produktion (Frischwerte) liegt die Wärmeleitfähigkeit von VIP mit Kieselsäure-Stützkernen in einem Bereich von ca. 0,0035 - 0,005 W/(m K). Verglichen mit den in der Baupraxis anzusetzenden Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit von 0,007 - 0,009 W/(m K) bedeutet dies also einen Zuschlag auf die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit in Höhe von bis zu 100 %. Für Paneele mit Stützkernen aus Glasfasern werden i.d.R. noch niedrigere Frischwerte der Wärmeleitfähigkeit gemessen (bis unter 0,002 W/(m·K)), diese sind aufgrund ihrer kürzeren Lebensdauer jedoch im Baubereich nicht verbreitet und werden vor allem in Haushaltsgeräten eingesetzt.

Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit ergab sich bisher in Deutschland aus der Wärmeleitfähigkeit der VIP nach dem Durchlaufen eines definierten Schnellalterungsverfahrens (DIBT Verfahren, siehe auch Kapitel 2.5) und der Berücksichtigung der Wärmebrückeneffekte der Ränder für eine Mindest-Paneelgröße. Darauf wird noch ein Zuschlag von 25 % aufgeschlagen. Neben dem Wärmebrückeneffekt der Ränder soll dieser Faktor auch eventuelle Maßtoleranzen, geringe Anzahlen kleinerer Paneele, sowie eine eventuell höhere Auffeuchtung und den etwaigen Ausfall einzelner Paneele abdecken.



Vergleicht man dies mit den üblichen Sicherheitszuschlägen von ca. 5 % für konventionelle Dämmstoffe, so wird trotzdem deutlich, dass im Bereich der VIP in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Seiten der bauaufsichtlichen Stellen aktuell noch sehr vorsichtig agiert wird.



## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

Im Folgenden werden der Stand des Wissens bezüglich der Herstellung, Verarbeitung, Innovationen und wissenschaftlicher Aufklärung der Wirkmechanismen zu Permeation und Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit von VIP einschließlich der verwendeten Messmethoden erläutert.

#### 2.1 Herstellung, Rohstoffe, Lieferformen und Verarbeitung von VIP

Vakuumisolationspaneele bestehen aus einem mikroporösen, druckfesten Stützkern, welcher von einer sogenannten Hochbarrierefolie umhüllt wird. Es werden im Wesentlichen zwei verschiedene Folientypen mit herstellerspezifischen Variationen verwendet. Zum Einsatz kommen typischerweise Aluminium-Verbundfolien und metallisierte Polymerfolien. Das durch den Stützkern offen gehaltene Volumen wird im Herstellungsprozess evakuiert und die gasdichte Hülle passgenau verschweißt.



Abbildung 2: Vakuumisolationspaneele (VIP)

#### **VIP Hüllfolien**

Einschichtige Folien sind industriell gefertigte Massenware, die in verschiedensten Bereichen eingesetzt werden. Übliche Materialien sind Polypropylen, Polyethylen oder Polyamid. Die Herstellung geschieht nach dem Blasfolienextrusionsverfahren, bei dem durch eine Ringdüse erhitztes Granulat gepresst wird und der so entstandene Folienschlauch anschließend durch Luftströme abgekühlt wird. Aus den Folienschläuchen werden in weiteren Prozessschritten Folienbahnen als Rollenmaterial hergestellt. Alternativ können durch die Extrusion per Breitschlitzdüse auf eine gekühlte Walze Folien im Flach-/Gießfolienverfahren hergestellt werden (vgl. Nentwig 2006).



Diese bilden auch die Grundlage für Verbundfolien. Deren Eigenschaften können durch die gezielte Kombination unterschiedlicher Folienmaterialien eingestellt werden. Zur Minimierung von Permeationen finden zusätzliche Barriere-Schichten Anwendung.

Verbundfolien werden entweder durch Klebekaschierung (die Trägerfolie wird mit einer Kleberschicht beaufschlagt, auf die eine Siegelfolie aufgewalzt wird), Extrusionskaschierung (Die Trägerfolie wird mit einem Primer beaufschlagt und über eine mit Breitschlitzdüse extrudierte Polyolefin-Siegelschicht mit einer weiteren Folie über Walzen verbunden) oder (Co-)Extrusionsbeschichtung (zusätzliche Folienschicht wird direkt auf eine Trägerfolie extrudiert. Bei der Coextrusionsbeschichtung werden in der Extruderdüse verschiedene Polymere in einen mehrschichtigen Verbund überführt.) Durch Coextrusion können auch direkt mehrschichtige Folien erzeugt werden.

Bei VIP-Hüllfolien, die die Premiumvariante der Mehrschichtfolien darstellen, sind im Vergleich zu den genannten Standardverfahren noch weitere Produktionsschritte wie zusätzliche Beschichtungs- und Bedampfungsvorgänge notwendig, was den Ablauf komplizierter und damit störanfälliger macht. Deshalb sind dort wiederum aufwändigere Qualitätssicherungssysteme in der Produktionslinie zu integrieren. Die Bedampfung geschieht mit Metall(-oxiden), die dem Verbund hohe Diffusionswiderstände verleihen. Durch die thermische und mechanische Beanspruchung der Folie bei der Kaschierung können nicht beliebig vielschichtige Aufbauten realisiert werden, ohne dabei den bisherigen Verbund wieder zu schädigen und diffusionsoffener zu machen. Dadurch ergeben sich technisch realisierbare Obergrenzen der Permeation für praktikable Foliendicken bei dieser Art der Herstellung, deren Optimierung Gegenstand der Forschung und Entwicklungsarbeit der Hersteller ist.

Aluminiumverbundfolien sind zwar dünn, bewirken als VIP-Hüllfolie eingesetzt dennoch starke Wärmebrückeneffekte durch hohe Wärmeströme durch die Aluminiumschicht entlang der Schmalflächen.

Mehrschichtige Polymerfolien können so hergestellt werden, dass die thermischen und mechanischen Eigenschaften deutlich besser sind als die der Aluminiumverbundfolien, reine Polymerfolien jedoch besitzen deutlich höhere Permeationsraten. Wenn deshalb zusätzlich metallische Schichten durch Bedampfung eingebracht werden, steigt neben dem technologischen Aufwand der Herstellung auch die Anfälligkeit gegen Knickbeanspruchungen an, die thermischen Eigenschaften bleiben aufgrund der geringen Schichtdicken der Metallschicht jedoch deutlich unkritischer als Aluminiumverbundfolien.



#### **VIP Kernmaterialien**

Die wichtigste Anforderung an den Stützkern eines VIPs ist die möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit die bereits bei einem möglichst hohen Innendruck erreicht wird. Dieser Zusammenhang wird bei schaum- und pulverförmigen Materialien maßgeblich durch die Porengröße beeinflusst. Das Material muss zudem offenzellig sein, um die Evakuierung zu ermöglichen und benötigt eine ausreichende Stabilität gegen Druckbeanspruchungen.

Als Stützkern wird in der Regel pyrogene Kieselsäure verwendet, da dieser Stoff aufgrund der sehr kleinen Porendurchmesser gegenüber dem über der Zeit auftretenden Druckanstieg die geringsten Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit zeigt (Knudsen-Effekt). Bei 100 mbar liegt die Wärmeleitfähigkeit der pyrogenen Kieselsäure bei etwa 7 mW/(m·K) und schon im Bereich des Grobvakuums sind Wärmeleitfähigkeiten von unter 4 mW/(m·K) möglich. Alternative Stützkernmaterialien sind Mineralwolle und einige andere offenzellige Dämmstoffe. Um mit diesen Materialien mit deutlich gröberer Porenstruktur eine dauerhaft niedrige Wärmeleitfähigkeit des Produkts zu ermöglichen, muss die Diffusionsdichtheit der Hüllfolien noch weiter verbessert werden. Die Permeation trockener Gase (Sauerstoff und Stickstoff aus der Luft) und von Wasserdampf geschieht über die Folie in der Fläche der VIPs, aber auch über die Siegelnähte. Eingedrungene Gase und Wasserdampf erhöhen die Wärmeleitfähigkeit. Der Einfluss auf und der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit ist umso größer, je größer der Porendurchmesser des Kernmaterials ist.

#### **VIP-Herstellung**

Gängig sind zwei verschiedene Herstellungsverfahren, deren Optimierung derzeit Gegenstand der Forschung ist:

- Der Rohstoff des Stützkernes wird in eine Form gegeben und auf eine definierte Höhe komprimiert. Diese Rohlinge können anschließend auf Maß geschnitten werden und werden anschließend umhüllt, evakuiert und versiegelt. Durch einen individuellen Zuschnitt vor der Umhüllung ist das Verfahren sehr flexibel für eine große Anzahl an Formaten einsetzbar.
- Der Rohstoff des Stützkerns wird in vorkonfektionierte Foliensäcke gefüllt, die in einer entsprechenden Pressform komprimiert werden. Anschließend wird analog zu oberer Methode evakuiert und versiegelt. Das Verfahren ist bei wenigen Größen schneller und günstiger. Für unterschiedliche Formate werden jedoch immer die passenden Pressformen und Foliensäcke benötigt. Zudem weisen die Ränder der evakuierten Folienbeutel derzeit noch sehr unregelmäßige Kanten auf, was die Paneele für den Baubereich ohne weitere Maßnahmen nahezu unbrauchbar macht.

Die Elemente lassen sich abhängig von der Größe der Schweißkammer bis zu einer Abmessung (Länge x Breite) von 3000 x 1250 mm herstellen. Dabei sind ein Großteil der produzierten VIP Elemente Anfertigungen nach Maß. Übliche Lieferformate



sind 600 x 500 mm, 1200 x 500 mm und 1000 x 600 mm. Lieferbare Dicken liegen im Bereich von 10 bis 50 mm. Zwischendicken sind möglich. Derzeit werden überwiegend rechteckige Plattenformate hergestellt. Durchdringungen zur Aufnahme oder Durchführung von Befestigungsmitteln wie Anker und Dübel sind an den Stoßstellen zweiter Paneele möglich, müssen jedoch bereits während der Produktion vorgenommen werden, was ein exaktes Aufmaß am Bau und eine Vorplanung der Verlegemuster erfordert. Daher werden derzeit praktisch alle für den Bau produzierten VIPs als rechteckige Platten ohne solche Aussparungen an den Rändern hergestellt.

#### Verarbeitung

Bei der Verarbeitung darf die Vakuumhülle nicht beschädigt werden. Um das Material zu schützen werden deshalb auch Produkte mit Ummantelungen aus EPS oder Deckschichten aus einer Vielzahl an Materialien angeboten. Es ist auf einen sorgfältigen und zwängungsfreien Einbau der Paneele zu achten. Da Zuschnitte nicht möglich sind, müssen die Elemente genau auf die zu dämmende Fläche passen. Dies kann im Bereich der Fassadendämmung mittels spezieller Optimierungsalgorithmen unterstützt werden, die eine ideale Belegung bei möglichst geringer Diversität der Plattenformate errechnen. Trotzdem bleiben häufig im Bereich von Anschlusssituationen kleinere Teilflächen übrig, die mit herkömmlichen Dämmstoffen aufgefüllt werden müssen.

#### 2.2 Bauphysikalisch wichtige Eigenschaften von VIP

Folgende Tabelle enthält einen Überblick über bauphysikalische und baupraktische, wichtige Eigenschaften von VIP.



#### Tabelle 1:Eigenschaften von VIP

| Eigenschaft                                   | Kurzzeichen     | Einheit           | Wert                                  |
|---|-----------------|-------------------|---------------------------------------|
| Rohdichte                                     | ρ               | kg/m <sup>3</sup> | 170 - 210                             |
| Wärmeleitfähigkeit                            | λ               | W/(m·K)           | 0,007 - 0,009                         |
| Wasserdampfdiffusionskoeffizient              | μ               | -                 | 8                                     |
| Brandklasse                                   | -               | -                 | B2 (DIN 4102-1)                       |
| Druckspannung bei 10 % Stau-<br>chung         | σ <sub>10</sub> | kPa               | > 180                                 |
| Zugfestigkeit senkrecht zur Plat-<br>tenebene | σ <sub>mt</sub> | kPa               | > 30                                  |
| Dimensionsstabilität                          | -               | %                 | < 1 - 3                               |
| Umweltproduktdeklaration                      | EPD             | -                 | Vorhanden                             |
| Anwendung<br>(Kurzzeichen nach DIN 4108-10)   | -               | -                 | DAD, DAA, DZ, DI,<br>DEO, WAB, WH, WI |
| Produktnorm                                   | -               | -                 | In der Erstellung                     |

#### 2.3 Innovationen im Bereich der VIP Technologie

Maßgebliche Innovationen der letzten Jahre sind vor allem auf dem Gebiet der Dauerhaftigkeit der VIP erreicht worden. Durch die wesentliche Verbesserung der Barriereeigenschaften der Folien vor allem in der Fläche aber auch an den Siegelnähten, konnte die Permeation trockener Gase (Luft) und vor allem von Wasserdampf deutlich reduziert werden. Der Druckanstieg in den Paneelen fällt dadurch wesentlich kleiner aus, was in der Folge die Wärmeleitfähigkeit weniger stark ansteigen lässt.

Weiterentwicklungen und Optimierungen an VIP für Bauanwendungen konnten bei allen Bestandteilen der Paneele, vielen Schritten der Produktion und fast allen Teilbereichen zur Bestimmung der Bemessungswerte erreicht werden. Viele Innovationen lassen sich nur unter Berücksichtigung der VIP-spezifischen Vorgehensweise darstellen.

Die Verbesserung der Produkte zwischen 2003 und 2009 wurde für das Forschungsprojekt "Optimierung VIP" aus den Zulassungsuntersuchungen zusammengestellt [Sprengard und Spitzner 2011a]. Im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 3) sind die Messreihen zur Alterung der Wärmeleitfähigkeit in der ungestörten Mitte der Paneele über dem Herstellungsjahr der Produkte aufgetragen. Dargestellt sind die Frischwerte nach der Herstellung ("null"), die Werte nach 90, sowie nach 180 Tagen Lagerung bei 80°C. Die Wärmeleitfähigkeit konnte im Betrachtungszeitraum tendenziell weiter verringert werden, sowohl beim Frischwert als auch bei den gealterten Werten. Im Jahr 2008 weicht eine Messreihe vom Trend ab, was jedoch eine herstellerspezifische Besonderheit ist. Die Messreihe aus dem Jahr 2003 zeigt allerdings, dass es mit einer Folie mit geringer Durchlässigkeit und hohem Aufwand bei der Herstellung schon mit den damaligen Produkten möglich war, günstige Wer-





te bei der Alterung zu erreichen, jedoch nicht für alle Hersteller und für die breite Masse der Produkte.

Abbildung 3: Darstellung der Messreihen zur Alterung nach Hersteller und Herstellungsjahr des Produkts

Weitere Innovationssprünge gab es bei der Folientechnik – sowohl in der Erhöhung der Dichtigkeit der Fläche als auch in der Verbesserung der Siegelnähte. Hier galt es unterschiedliche Ansätze zu optimieren: dichtere Folien erreicht man am einfachsten durch die Erhöhung der Dicke der anorganischen Barriereschichten. Dicke Barriereschichten – derzeit wird fast ausschließlich Aluminium als Barrierematerial verwendet – bedingen jedoch sehr große Rand-Wärmebrücken am Paneel. Hier konnten höhere Dichtigkeiten der Folien gegenüber trockenen Gasen und auch Wasserdampf ohne eine signifikante Erhöhung der Wärmebrückeneffekte der Paneelränder erreicht werden.

In einem Beitrag in der Zeitschrift Bauphysik werden umfangreiche Berechnungen zu den Einflussfaktoren der Rand-Wärmebrücken aufgrund der Paneelstöße und Barrierefolien dargestellt [Sprengard und Spitzner 2011b]. Viele Hersteller haben für ihre Produkte die Einflussfaktoren mittlerweile analysiert und ihre Produktion entsprechend angepasst. Optimiert wurden hier z. B. die folgenden Punkte:

- Anordnung der längeren Schweißnähte als Mittelnaht in der Fläche der VIP, damit die mehrlagige Ausführung nur noch an den kürzeren Kanten eingesetzt wird
- Verwendung von Folien mit dünnen anorganischen Barriereschichten (Alu)
- Herstellung möglichst rechtwinkliger und passgenauer VIP, zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Spalten zwischen Paneelen
- Anordnung von Deckschichten aus herkömmlichen Dämmstoffen auf den VIP Oberflächen zur Überdämmung der Stoßstelle

VIP sind aufgrund der sehr geringen Dämmstoffdicken ein interessanter Dämmstoff für sehr energieeffiziente Sanierungen und beengte Verhältnisse. Durch die wesentlich verbesserte Produktqualität und die gesunkenen Preise werden VIP zunehmend



auch als Alternative für herkömmliche Dämmstoffe in großvolumigen Anwendungen interessant, z. B. für die Dämmung von Fassaden, Dächern oder obersten Geschoßdecken. Durch ihre geringe Dicke und große Dämmwirkung bietet sich auch der Einsatz für Innendämmungen an. Interessant und effizient wird ihr Einsatz bisher vor allem aber,

- wenn durch den Einsatz von VIPs insbesondere bei der wärmetechnischen Sanierung weitere Ma
  ßnahmen eingespart werden können, wie z. B. der Versatz von T
  ür- und Fensteröffnungen oder die Verl
  ängerung eines Dach
  überstandes,
- wenn es darum geht, aus einer vorgegebenen Grundfläche möglichst viel Nutzfläche zu erzielen, z. B. bei Innenstädten von Großstädten mit hohen Grundstückspreisen wie London, München etc.
- wenn aus architektonischen Gesichtspunkten, bei Dachterrassen zur Vermeidung von Stufen, bei kleinen Anbauten mit ungünstigem Oberfläche-Volumen-Verhältnis (Dachgauben), bei Fassaden in Element- und Pfosten-Riegel-Konstruktionen nicht genügend Platz zur Verfügung steht.

Ein hochinnovativer Ansatz mit funktionalen Eigenschaften stellt die schaltbare Wärmedämmung (SWD), die eine gezielte Nutzung der Sonnenenergie ermöglicht und auf VIP-Technologie basiert. Die Paneele können gezielt wärmeleitend "geschaltet" werden, indem im Paneel enthaltene Metallhydride durch eine angelegte Spannung um mehrere hundert Grad erhitzt werden. Dadurch wird Wasserstoffgas frei und der Innendruck im Paneel steigt an.

Das Gas hat eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit und erhöht so die Leitfähigkeit des Panels um Faktoren im Bereich von 40 [Horn 1997]. Wird die Spannung abgeschaltet, kühlt das Metallhydrid ab und resorbiert den Wasserstoff. Der Strombedarf der SWD liegt bei wenigen Watt pro m<sup>2</sup>.

Durch intelligente Schaltung der Paneele kann so während der Heizperioden ein signifikanter Netto-Wärmegewinn durch die Nutzung der Sonneneinstrahlung realisiert werden.

#### 2.4 VIP in Bausystemen

Neben der Anwendung von VIP Elementen als Paneel ohne weitere Verstärkung oder evtl. mit Deckschichten, sind in zwischen auch VIP Elemente als Bausystem erhältlich.

Das im Folgenden vorgestellt System mit einem Kern aus VIP in EPS Formteilen ermöglicht hocheffiziente Sanierungen von Fassaden in einer schlanken Ausführung. Ein U-Wert nach der Sanierung von 0,15 W/(m<sup>2</sup>·K) ist auf Bestandswänden aus üblichen Mauerwerksmaterialien bereits in der Dämmdicke 10 cm möglich. Das System erlaubt hierbei eine Bearbeitung der EPS-Ränder in zwei Dimensionen. Über eine zugehörige Software lassen sich Wände mit fast beliebigen Fensterra-



stern ohne nennenswerte Restflächen mit den VIP-gedämmten Platten belegen. Die Software übernimmt hierbei die Dimensionierung der Platten und gibt dem Verarbeiter die berechnete Breite für den Zuschnitt vor, den er am Heißdraht nur noch einstellen muss.

Durch die VIP-gedämmte Überdeckung der Befestigung der ersten Lage kann das System annähernd wärmebrückenfrei an der Fassade befestigt werden. Durch die modulare Bauweise mit überdeckten Bearbeitungsrändern kommt das System mit nur wenigen Elementgrößen aus, was sich bereits in einer halbautomatisierten Fertigung der VIPs bezahlt macht. L. Kubina beschreibt in seinem Beitrag für das International Vacuum Insulation Symposium 2011 die Vorteile des Systems vor allem hinsichtlich der Flexibilität bei Fensterrastern und in der sicheren Befestigung mittels zugelassener Dämmstoffdübel [Kubina 2011]. Ein Innovationssprung ist die Reduzierung auf 3 Elementgrößen mit den Vorteilen einer günstigeren Herstellung über größere Stückzahlen.



Abbildung 4: Erste Lage des Systems. Die Befestigung der ersten Lage erfolgt in den Plattenstößen mittels üblicher Dämmstoffdübel. Die Befestigungen werden durch eine zweite VIP-gedämmte Lage, den sog. LockPlates, überdämmt.

#### 2.5 Alterung von VIP

Bei der Alterung von VIP-Paneelen kommt der Qualität der verwendeten Folienumhüllungen eine überragende Bedeutung zu. Die Folienumhüllung trennt das Vakuum im Inneren von der umgebenden Atmosphäre und die Permeationseigenschaften der Folie bzgl. Wasserdampf (WVTR) und trockenen Luftgasen (z. B. O<sub>2</sub>TR) bestimmen die langfristige Aufrechterhaltung des niedrigen Innendrucks.



Eine Prüfung der Barrierefolien findet üblicherweise durch die Folienhersteller und die VIP-Hersteller statt. In IEA/ECBCS Annex 39 2005 sind mögliche Prüfverfahren zur Güteüberwachung der Folien zusammengestellt (Tabelle 2).

| Eigenschaft                                  | Prüfmethode          |  |
|--|----------------------|--|
| Hafteigenschaft der Metallbedampfung         | z. B. DIN 53357      |  |
| Hafteigenschaft des Laminataufbaus           | z. B. DIN 53357      |  |
| Qualität der Metallbedampfung                | Herstellerspezifisch |  |
| Water vapor transmission rate (WVTR)         | Herstellerspezifisch |  |
| Oxygen transmission rate (O <sub>2</sub> TR) | Herstellerspezifisch |  |

Tabelle 2: Mögliche Prüfungen zur Güteüberwachung der Folien für VIP-Umhüllungen

Für die Gütesicherung der VIP Hersteller existieren aber noch eine ganze Reihe an eigenen Untersuchungen, die an den Folien durchgeführt werden, um die Dauerhaftigkeit der produzierten Paneele frühzeitig abschätzen zu können. Kommerziell erhältliche Permerationsmesstechnik stößt bei den sehr dichten Folien der neuesten Generation schnell an ihre Grenzen. Zudem erhöht sich mit der Dichtigkeit auch die Prüfdauer, die bei aktuellen Produkten und bestimmten Messgeräten durchaus einige Wochen betragen kann.

Die Permeationseigenschaften der Folien wurden in den letzten Jahren ständig verbessert. Dabei mussten bei der Entwicklung gegenläufige Einflussfaktoren ausgesteuert werden. Reine Polymerfolien weisen zu hohe Permeationsraten auf und können daher nicht eingesetzt werden. Durch Laminate aus Polymer- und Metallfolien oder Metallbedampfungen kann die Dichtigkeit der Folien deutlich verbessert werden. Dabei ist aber darauf zu achten dass die Verwendung entsprechend dicker Metallfolien Probleme durch erhöhte Randwärmebrücken nach sich ziehen und im Weiteren auch die Knicksteifigkeit im Bereich der Paneelränder und Verschweißungen ausreichend erhalten bleiben muss. Zum Einsatz kommen heute zumeist durch Laminierung hergestellte mehrschichtige Strukturen mit Aluminiumfolien/bedampfungen als Barriereschicht.

Aktuelle Foliengenerationen haben so niedrige Permeationsraten, dass die Messung der Permeation einen hohen Aufwand erfordert.

In IEA/ECBCS Annex 39 2005 sind typische Messmethoden zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit von Folien zusammengestellt.



| Prüfmethode   | Untere Messgrenze  |
|---|--|
| Manometrische Methode (DIN 53380, T2, draft)                            | 1 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> d bar)  |
| Elektrochemische Bestimmung der Sauerstoff-<br>permeation (DIN 53380-3) | 0,05 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> d bar)   |
| Wasserdampfpermeation, gravimetrische Metho-<br>de (ISO 15106-3)        | 1 g/(m <sup>2</sup> d)   |
| Elektrolytische Bestimmung der Wasserdampf-<br>permeation (DIN 53122-2) | k. A.  |
| Calcium-Test der Wasserdampfpermeation                                  | $10^{-1} - 10^{-5} \text{ g/(m}^2 \text{ d})$  |
| Mocon Testgerät   | Sauerstoff bis 0,0005 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> d)<br>Wasserdampf bis0,0005 cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> d) |
| Massenspektrometer  | Je nach Prüfgas  |

Der Druckanstieg im VIP ist neben den Permeationseigenschaften der Folie natürlich durch die Qualität der Verarbeitung bestimmt. Insbesondere im Bereich der Siegelnähte können verarbeitungsbedingte Fehlstellen auftreten, die den Druckanstieg im VIP maßgeblich beeinflussen können.

Aus diesem Grund werden neben der Qualitätsüberwachung der Produktion hinsichtlich der Einhaltung des angestrebten Innendrucks (siehe auch Kapitel 2.7) auch Schnellalterungsuntersuchungen mit Klimawechselbeanspruchungen und Lagerung der Paneele bei erhöhter Temperatur getestet.

Während dieser künstlichen Alterung wird mehrmals die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Gemessen wird die Wärmeleitfähigkeit in der durch die Wärmebrückeneffekte des Randbereichs ungestörten Mitte des Paneels. Durch numerische Simulationen der Wärmebrückeneffekte des Randbereichs kann für die unterschiedlichen Paneelgrößen die jeweilige spezifische Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Paneele wird noch mit einem Sicherheitsaufschlag versehen in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen verankert. Der nachfolgend dargestellte Ablauf beschreibt die derzeit in Deutschland übliche Vorgehensweise zur Festlegung eines Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit:

- Messung des Wärmedurchlasswiderstands bzw. der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit im Anlieferungszustand mit dem Plattengerät nach DIN EN 12667
- Klimawechselbeanspruchung 7 Tage Wechselklima –15 °C/+80 °C mit einem kompletten Zyklus pro Tag
- 90 Tage Lagerung bei 80 °C (Laborluft von 23 °C/50 % r. F. wird auf 80 °C erwärmt – die relative Feuchte beträgt bei 80 °C ca. 3 % – der absolute Feuchtegehalt der Luft bleibt jedoch konstant)
- Zweite Messung des Wärmedurchlasswiderstands im Plattengerät nach DIN EN 12667
- 90 Tage Lagerung bei 80 °C/ca. 3 % r. F.
- Dritte Messung des Wärmedurchlasswiderstands im Plattengerät nach DIN EN 12667



Mit dem gealterten Wert der Wärmeleitfähigkeit werden die numerischen Simulationen der Randeffekte durchgeführt. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit eines gealterten Paneels inklusive der Randeffekte wird für verschiedene Paneelgrößen bestimmt und derzeit, mit einem Sicherheitsaufschlag versehen, zum Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit gemacht.

#### 2.6 Wärmebrücken an VIP Konstruktionen

Der Dämmstoff VIP ist durch seine inhomogenen Eigenschaften und dem damit einhergehenden hohen Planungsaufwand nicht immer einfach in Bauentwürfe zu integrieren. Maßgeblichen Einfluss hat hier bei einer Betrachtung des reinen Dämmproduktes die Hüllfolie. Neben den Randeffekten und Querleitungen aufgrund der Hüllfolie sind Luftschichten im Stoßbereich und konstruktionsbedingte Unregelmäßigkeiten (Durchdringungen, Anschlussdetails etc.) zwingend zu beachten, um Planungsfehler zu vermeiden.

Die Wärmebrückeneffekte sind aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes in ungestörten Bereichen von größerer Bedeutung als bei konventionellen Dämmstoffen. Zum Einfluss der Wärmebrücken wurden in den vergangenen Jahren bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt (vgl. z.B. [Fricke, Beck, Binder 2007] und [Willems 2004] und [Sprengard und Spitzner 2011]). Da jedoch umfängliche und zugängliche Planungsunterlagen und erprobte und anerkannte Richtlinien nicht vorliegen, sollten Wärmebrücken bei VIP-Konstruktionen bereits in der Planungsphase durch hygrothermische Berechnungen analysiert und beurteilt werden.

#### 2.7 Messung des Innendrucks im Spannungsfeld zwischen Qualitätssicherung und wissenschaftlicher Untersuchung der Permeationsvorgänge

Zur Messung des Innendrucks stehen unterschiedliche Messmethoden zur Verfügung. Je nach Messbereich können unterschiedliche Messprinzipien eingesetzt werden.

Um geringe Drücke im Bereich von 0,1 – 100 mbar zu messen, stehen unterschiedliche Messgeräte zur Verfügung (Tabelle 4). Je nach Messprinzip variiert die erreichbare Genauigkeit der Messung.



#### Tabelle 4: Unterschiedliche Prinzipien der Druckmessung

| Messprinzip                                     | Messbereich                              |
|---|--|
| Piezo-Membranvakuummeter                        | $10^{-1} - 10^3$ mbar                    |
| Kapazitives Membranvakuummeter                  | $10^{-5} - 10^3$ mbar                    |
| Pirani-Vakuummeter (Heißdrahtmethode)           | 10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-1</sup> mbar |
| Kugelreibungsvakuummeter (Spinning Rotor Gauge) | 10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-3</sup> mbar |

Eine direkte Messung des Innendrucks mit einem der angegebenen Verfahren würde eine Verbindung zwischen dem Kernmaterial des VIP und dem Messgerät erfordern. Dies ist verständlicherweise nur für Versuchsaufbauten unter Laborbedingungen umsetzbar – die Prüfung des Innendrucks von VIP Elementen für den Einsatz im Bauwesen erfordert andere Messprinzipien (Tabelle 5).

Tabelle 5: Innendruckmessung von VIP Paneelen

| Messprinzip                                    | Genauigkeit       |
|--|-------------------|
| Vakuumkammer-Verfahren (Folienabhebeverfahren) | hoch              |
| Saugglocken-Verfahren (Folienabhebeverfahren   | Mittel bis hoch   |
| va-Q-check (indirektes Verfahren)              | Gering bis mittel |
| Wärmeleitfähigkeit (indirektes Verfahren)      | Gering bis mittel |

Die Genauigkeit der Messung variiert je nach Verfahren und steht im Konflikt zu dem nötigen Aufwand der Messung. Verfahren zur Produktionskontrolle wie das va-Q-check Verfahren sind sehr schnell anwendbar und führen zu verlässlichen Aussagen über den Zustand des Innendrucks. Das Messprinzip beruht auf der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit eines in das VIP Element eingebrachten Vliesstreifens vom Innendruck, die mit einem entsprechenden Messgerät sehr schnell ermittelt werden kann. Durch die schnelle Anwendung kann eine große Zahl an Paneelen geprüft werden, was eine entsprechend gute statistische Absicherung der Produktionsgüte ermöglicht. Auch auf der Baustelle kann mit dem System der Zustand der VIP Elemente überprüft werden.

Für wissenschaftliche Messungen sind aufgrund der höheren Messgenauigkeit die genannten Folienabhebeverfahren zu bevorzugen. Übersteigt der Umgebungsdruck des VIP den Innendruck des Paneels, so hebt sich die Folienumhüllung vom Kernmaterial ab. Zur Messung wird das gesamte VIP (Vakuumkammer-Verfahren) in eine Vakuumkammer gebracht, oder alternativ nur ein Bereich über der Folie (Saugglockenverfahren) evakuiert. Die Folienoberfläche wird mit geeigneten Sensoren beobachtet und der Innendruck detektiert bei dem sich die Folie vom Kernmaterial abhebt. Der in diesem Moment gemessene Druck in der Vakuumkammer oder unter der Saugglocke ist repräsentativ für den Innendruck im VIP.

Zur wissenschaftlichen Untersuchung der Permeationsvorgänge an den VIP ist es aufschlussreich, Informationen über die Menge des diffundierten Wasserdampfs und die Menge diffundierter trockener Luftgase zu erhalten.



FIW Bericht FO-2012/08

> Eine differenzierte Untersuchung dieser Einflussfaktoren auf den Druckanstieg kann sowohl mittels zerstörender als auch mittel zerstörungsfreier Methoden erfolgen.

> Eine zerstörende Prüfung ist die Bestimmung des Wassergehalts des VIP Kernmaterials. Dabei wird die pyrogene Kieselsäure nach Öffnen der Folienumhüllung gewogen, anschließend bis zur Massenkonstanz getrocknet und erneut gewogen. Die ermittelte Massendifferenz entspricht dem Wassergehalt im VIP. Unter Kenntnis der Sorptionsisotherme des Materials kann anschließend der dem ermittelten Wassergehalt zugehörige Wasserdampfpartialdruck bestimmt werden. Unter Kenntnis des Innendrucks im VIP vor dem Öffnen (z. B. Folienabhebeverfahren) kann durch Differenzbildung der Druckanstieg aufgrund trockener Luftgase ermittelt werden.

> Ein zerstörungsfreier Prüfablauf, der auf dem gleichen Prinzip beruht ist in Kapitel 4.2 beschrieben. Die Bestimmung des Wassergehalts im VIP wird hierbei durch zyklische Wiegung während der Alterung bestimmt. Eine Wiegung des Paneels in einer Vakuumkammer bei Druckgleichgewicht zwischen dem Innendruck des Paneels und dem Umgebungsdruck würde eine direkte Wiegung der Masse an adsorbiertem Wasser ermöglichen. Der Versuchsablauf ist jedoch schwierig umzusetzen und der Fehler gegenüber der Wiegung bei Normaldruck ist aufgrund des Verhältnisses zwischen der Masse an diffundiertem Wasser und der Masse der diffundierten trockenen Luftgase gering.

> Eine interessante Methode zur Bestimmung der Partialdrücke von trockenen Luftgasen und Wasserdampf ist außerdem in Kraus et al. 2005 beschrieben und wird in vorliegender Arbeit gemäß der Methodenbeschreibung in Kapitel 4.2 umgesetzt.



## 3 **Problemstellung und Forschungsansatz**

Gemäß Antragstellung werden in vorliegendem Forschungsvorhaben im Wesentlichen drei unterschiedliche Untersuchungsfelder aufgespannt, die in ihrer Gesamtheit die Bewertung der baupraktischen Anwendung von VIP präzisieren sollen.

Diese sind zusammengefasst:

- 1. Die Dauerhaftigkeit von VIP-Elementen soll unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen untersucht werden.
- 2. Die Wärmebrückenproblematik an Stößen als auch an den Anschlussbauten soll numerisch berechnet und bewertet werden.
- 3. Allgemeine bauphysikalische Fragestellungen, z. B. zu belüfteten Paneelen und Überlegungen zur Qualitätssicherung sollen erörtert und bewertet werden.

## 3.1 Forschungsbereich A "Untersuchung der Dauerhaftigkeit von VIP-Elementen unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen "

#### Problemstellung

Eine Erhöhung des Innendrucks von VIP kann aufgrund von Fehlstellen während der Produktion z. B. im Bereich der Siegelnähte oder durch Fehlverhalten bei Transport oder Einbau z. B. durch Verletzung der Folie verursacht werden. Die genannten Probleme führen dabei in aller Regel zu einem relativ schnellen und deutlichen Anstieg des Innendrucks. Um diese fehlerhaften Paneele möglichst direkt nach der Produktion oder auf der Baustelle kurz vor dem Einbau zu identifizieren, wurden verschiedene Schnelltests entwickelt, die eine zuverlässige und einfach zu erhebende Aussage über den Innendruck des Paneels liefern (siehe auch Kapitel 2.7). Schadhafte Paneele können auf diese Weise identifiziert und möglichst noch vor dem Einbau ausgetauscht werden.

Aber auch ein fehlerfrei produziertes und eingebautes VIP unterliegt aufgrund der Permeationseigenschaften der Folienumhüllung einem schleichenden Druckanstieg (siehe auch Kapitel 2.5). Die Permeation trockener Luftgase und von Wasserdampf ist dabei abhängig vom Folientyp, der Qualität der Verschweißung und den Umgebungsbedingungen die sich im Wesentlichen durch Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit charakterisieren lässt.

Je nach Anwendungsfall, Standort und Orientierung des Bauteils sind VIP sehr unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt, die neben den erwähnten Temperatur- und Feuchtebelastungen u. U. auch durch anderweitige Belastungen (z. B. erhöhter Chloridgehalt der Luft in Meeresnähe) die Belastung für die typischerweise verwendeten metallisierten Folien verstärken kann.



Wie einleitend beschrieben werden aktuell noch sehr hohe Zuschläge auf die Frischwerte von VIP angewendet, um Bemessungswerte zu erhalten die in jedem Fall auf der sicheren Seite liegen.

#### Forschungsansatz

- Typische Anwendungsfelder für VIP im Bauwesen, mit einem Fokus auf der Anwendung in Wand- und Deckenkonstruktionen von Wohn- und Bürogebäuden werden identifiziert und durch Beispielkonstruktionen repräsentiert.
- Mittels thermo-hygrischer Simulationssoftware (WUFI) werden die Anwendungsrandbedingungen f
  ür die ausgew
  ählten Beispielkonstruktionen anhand unterschiedlicher Klimadatens
  ätze f
  ür exemplarische Standorte ermittelt
- Durch eine systematische Erfassung des Innendruckanstiegs (p<sub>i</sub>) sowie der Teildrücke des Anteils trockener Luftgase (p<sub>i,dry</sub>) und eindringenden Wasserdampfs (p<sub>i,H2O</sub>) und der Wärmeleitfähigkeit von VIP in Abhängigkeit von der Temperatur (T) und der relativen Luftfeuchtigkeit (φ) in einem Laborversuch wird der Einfluss des Umgebungsklimas auf die Entwicklung von Innendruck und Wärmeleitfähigkeit dargestellt.
- Mit Kenntnis des Zusammenhangs p<sub>i</sub> = f(T, φ), dem Sorptionsverhalten des Kernmaterials und der zeitlich aufgelösten Verteilung von T und φ am VIP Paneel in den verschiedenen Anwendungen wird ein Alterungsmodell entwickelt, mit dem der Verlauf des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit über der Zeit abgeschätzt wird.
- Das Ergebnis der Modellierung des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit wird durch eine Anpassung der Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials an die messtechnisch ermittelten Werte angepasst.
- Der aus der Simulation ermittelte Wärmeleitfähigkeitsanstieg während einer Nutzungsdauer von 25 Jahren, wird mit den derzeitigen Bemessungszuschlägen verglichen.
- Zur Ermittlung geeigneter Klimabedingungen zur Bewertung der Alterung von VIP durch künstliche Alterung im Labor, wird der Einfluss einer Konstantklimalagerung bei 23/50 und 23/80 auf die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit modelliert und die Ergebnisse mit den Verläufen aus den untersuchten Anwendungen verglichen.

Abbildung 5 skizziert noch einmal die Systematik des Forschungsansatzes.





Abbildung 5: Skizze zum Forschungsansatz des Forschungsbereichs A "Untersuchung der Dauerhaftigkeit von VIP-Elementen unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen"

#### 3.2 Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"

#### Problemstellung

Die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit eines VIP ermöglicht wie beschrieben sehr schlanke Dämmaufbauten. Die besonderen Anforderungen der VIPs hinsichtlich Befestigung und Handling stellen auf der anderen Seite aber auch hohe Anforderungen an die Befestigungs- und Montagesysteme, weil Durchdringungen oder Beschädigungen der Barrierefolien zu einer Belüftung der VIP Elemente führen.

Zum Einsatz kommen typischerweise speziell auf den Einsatz bei VIP optimierte Standardverbindungsmittel wie Dübel/Bolzen, Profilschienen, Klebstoffe und –mörtel sowie Klebebänder.

Bislang wurden zumeist Wärmebrücken am Paneelrand rechnerisch erfasst. In diesem Zusammenhang wurden beispielsweise der Einfluss des Folientyps und des Abstands der Paneele zueinander untersucht. Insbesondere zwei- und dreidimensionale Wärmebrücken im Bereich der Anschlüsse an andere Bauteile, andere Wärmedämmstoffe und im Bereich der Befestigungen der Paneele wurden bislang nicht systematisch untersucht. Auch Einflüsse aus Zwängungen, Untermaßigkeit und Spaltmaße aufgrund thermischer Ausdehnungen sind wärmebrückentechnische für die Gesamtperformance des Systems relevant und bislang noch nicht hinreichend charakterisiert.



#### Forschungsansatz

Durch eine systematische rechnerische Untersuchung der Einflussfaktoren von

- Randausbildung
- Material und Dicke der Barriereschichten
- Spaltweite zwischen zwei Paneelen und Füllmaterial
- Einfluss der Deckschichten
- Montage- und Befestigungsmaterial

sollen die für die Gesamtperformance des Dämmsystems relevanten Wärmebrückeneffekte quantifiziert werden.

Aus den ermittelten Datensätzen soll eine Sensibilitätsanalyse abgeleitet werden, die einerseits eine Optimierung der Konstruktionen erlaubt und andererseits eine genauere Abschätzung der Wärmeverluste möglich macht.

### 3.3 Forschungsbereich C "Bauphysikalische Fragestellungen bei Schadensfällen und Qualitätssicherung"

#### Problemstellung

Auch wenn VIP Paneele aufgrund einer Verletzung der Barrierefolie belüftet werden, weisen die Paneele durch die als Kernmaterial verwendete pyrogene Kieselsäure immer noch eine vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,018 – 0,021 W/(m K) auf. Im Vergleich mit der intakten Fläche ergeben sich jedoch große Unterschiede im U-Wert nebeineinaderliegender Bereiche.

#### Forschungsansatz

Aus Anwendersicht ergeben sich hieraus Fragestellungen, deren Beantwortung Voraussetzung für eine bessere Akzeptanz der Vakuumdämmung am Bau ist. Insbesondere sollen folgende Sachverhalte bauphysikalisch aufgeklärt werden. Grundlage der Bearbeitung ist die Zusammenführung der Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten und den Ergebnissen des Forschungsbereichs B des vorliegenden Projekts.

- Welche Auswirkungen hat ein belüftetes Paneel auf den Wärmedurchgang eines Bauteils?
- Kann der Mindestwärmeschutz hinsichtlich Tauwasserfreiheit und Vermeidung von Schimmelpilzwachstum jederzeit eingehalten werden?
- Wie viele belüftete Paneele sind tolerierbar, damit die EnEV- und KfW-Nachweise eingehalten bleiben?



## 4 Forschungsbereich A "Untersuchung der Dauerhaftigkeit von VIP-Elementen unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen"

Im Folgenden werden das eingesetzte Material und die angewendeten Methoden sowie die Versuchsplanung und die erarbeiteten Ergebnisse zum Forschungsbereich A "Untersuchung der Dauerhaftigkeit von VIP-Elementen unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen" beschrieben.

#### 4.1 Material

### VIP Paneele für die Untersuchung der Dauerhaftigkeit unter Laborbedingungen

Zur Untersuchung des Alterungsverhaltens unter Laborbedingungen wurden VIP Elemente eines Herstellers verwendet. Das Material repräsentiert den Stand der Technik aktueller VIP. Die Ergebnisse können daher als repräsentativ angesehen werden. Die Paneele wurden speziell für das Untersuchungsprogramm dieses Forschungsprojekts in einer Charge hergestellt. Insgesamt wurden für die Untersuchung 40 Paneele mit den Abmessungen 400 x 400 x 15 [mm] verwendet. Das Kernmaterial besteht aus pyrogener Kieselsäure vom Typ Wacker HDK® N20. Der verwendete Folientyp ist ein Laminat aus drei metallisierten Polyesterfilmen mit einer LLDPE Siegelschicht. Laut Datenblatt des Herstellers erreicht das Laminat eine GTR (gas transmission rate) bei 22°C und 50 % r. F. < 3,0 cc(STP)/(m<sup>2</sup> a) und eine MVTR (moisture vapor transmission rate) bei 38°C und 90 % r. F. < 0,01 g/(m<sup>2</sup> day).



#### Abbildung 6: Verlauf experimentell ermittelter Sorptionsisothermen nach IUPAC

Zur Modellierung des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit ist die Kenntnis des Sorptionsverhaltens des Kernmaterials ein wichtiger Parameter. Zur Beschreibung des Sorptionsverhaltens hygroskopischer Stoffe werden so genannte Sorptionsisothermen verwendet, die bei einer konstanten Temperatur die Entwicklung der Materialfeuchte in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte beschreiben. Experimentell ermit-



telte Isothermen können nach IUPAC [Sing et al. 1984] in sechs Typenklassen unterteilt werden (Abbildung 6).

Der Typ der Sorptionsisotherme der verwendeten pyrogenen Kieselsäure wird mittels Dynamic Vapor Sorption Analysis (DVS) bestimmt. Dazu wird eine kleine Materialmenge (im vorliegenden Fall ca. 40 – 50 mg) zunächst getrocknet und anschließend definierten Klimabedingungen ausgesetzt. Die Massenänderungen werden mittels einer hochpräzisen Waage bestimmt. Aus den Zu- und Abnahmen der Masse kann anschließend eine Ad- und Desorptionsisotherme bestimmt werden. Zur Anwendung kommt eine Messanlage der Firma Surface Measurement Systems. Aus Gründen des besseren Probenhandlings wurde die Probe zu einer Tablettenform verdichtet. Mit der beschriebenen Methode wurden Sorptionsisothermen bei 20°C und 40°C ermittelt. Abbildung 7 zeigt den Verlauf der mittleren Sorptionsisotherme aus Ad- und Desorption.



Abbildung 7: Mittlere Sorptionsisotherme des Kernmaterials (pyrogene Kieselsäure, Wacker Typ N20) bei 20°C und 40°C

Die verwendete pyrogene Kieselsäure weist einen Verlauf auf, der einer Typ III Isotherme (linearer Anfangsbereich) entspricht. Bis etwa 60 % r. F. kann daher für die untersuchten Temperaturen von einem annähernd linearen Zusammenhang zwischen der r. F. der Umgebung und der korrespondierenden Materialfeuchte ausgegangen werden. Die Materialfeuchte als Funktion der r. F. kann damit entsprechend Gleichung 1 angegeben werden.

$$X_{w,m}(\varphi) \approx \alpha \cdot \varphi$$

(1)

Ein Einfluss der Temperatur ist auf Basis der durchgeführten Messungen schwer abschätzbar. Im Bereich zwischen 0 – 50 % r. F. kann auf Basis der Messungen mit der DVS (Abbildung 7) eine Steigung  $\alpha \approx 0,027 - 0,045$  m-%/% r. F. abgeschätzt werden.

Da im Bereich von 0 – 60 r. F. ein linearer Anstieg ( $\alpha$ ) der Sorptionsfeuchte nachgewiesen wurde, werden zur genauen Bestimmung von  $\alpha$  größere Probenmengen (jeweils ca. 2 g) in Aluminiumschalen bei 23°C / 50 % r. F. bis zur Massenkonstanz gelagert. Die Massenänderungen werden auf 0,1 mg genau bestimmt.



Nach dem Erreichen der Massenkonstanz wird die Probe bei 140°C gedarrt und anschließend die Masse im absolut trockenen Zustand bestimmt. Aus insgesamt drei Proben wird auf diese Weise ein mittlerer Feuchtegehalt von 0,94 % bei Lagerung im Klima 23°C / 50 % r. F. bestimmt. Für die durchzuführenden Untersuchungen wird daraus eine Steigung von  $\alpha = 0,0188 \text{ m-}\%/\% \text{ r}$ . F. abgeleitet, die unter Kenntnis der mittels der DVS nachgewiesenen Typ III Isotherme für den Bereich von 0 – 60 % r. F. angesetzt wird.

#### 4.2 Methoden

Im Folgenden werden die verwendeten Methoden beschrieben. Ausführlich werden explizit neu aufgebaute Messverfahren beschrieben.

#### Messung des Innendruck

Da eine wissenschaftlich exakte und auch im Bereich kleiner Druckschwankungen präzise Innendruckmessung notwendige Voraussetzung zur Anwendung der Verfahren zur Partialdruckberechnung ist, wurde ein Vakuumkammerverfahren mit hochpräziser Druckmessung und Laser-Weg-Sensor aufgebaut, mit der eine Bestimmung des Innendrucks auf 0,003 mbar genau möglich ist.

Zur Bestimmung der Partialdrücke von Wasserdampf und trockenen Luftgasen gemäß Kapitel 4.2, ist es überdies notwendig, den Innendruck der VIP bei verschiedenen Temperaturen zu messen. Hierzu kann die Außenhülle der Vakuumkammer exakt temperiert werden. Die VIP werden vor der Messung in einer Klimakammer bei trockenen Bedingungen auf die Prüftemperatur gebracht. Mittels WUFI Simulationen wurde der Zeitrahmen abgeschätzt, den das VIP benötigt, um auch im Kern die Zieltemperatur zu erreichen. Anschließend wird das Paneel aus der Klimakammer heraus direkt in die beheizte Vakuumkammer eingebracht. Das VIP und die Innenseite der Vakuumkammer stehen nach der Evakuierung im Wesentlichen nur noch über einen Strahlungsaustausch thermisch in Verbindung, weshalb die Temperatur des VIP während der Messung konstant bleibt.

Abbildung 8 zeigt die Messapparatur als Prinzipskizze. Die verwendete Messtechnik ist in Tabelle 6 zusammengefasst.





Abbildung 8: Messaufbau zur Bestimmung des Innendruck der VIP

| Tabelle 6: | Kenndaten der verwendeten Vakuumkammer und der Messtechnik zur Be- |
|------------|--|
|            | stimmung des Innendrucks und der Wegmessung an der Barrierefolie   |

| Vakuumkammer                                    |   |  |
|---|---|--|
| Hersteller                                      | Trinos Vakuum-Systeme GmbH                    |  |
| Kammertyp                                       | Hochvakuumkammer, kubisch                     |  |
| Маßе  | 1000 x 1000 x 400 [mm]                        |  |
|   | Vakuumpumpe                                   |  |
| Hersteller                                      | Leybold                                       |  |
| Тур   | D16A  |  |
| Förderleistung                                  | 400 l/min                                     |  |
| Kleinster Partialdruck                          | 4 * 10 <sup>-4</sup> mbar                     |  |
| Kleinster Partialdruck unter<br>Gasbelastung    | 4 * 10 <sup>-3</sup> mbar                     |  |
|   | Messung des Kammerdrucks                      |  |
| Hersteller                                      | Trinos Vakuum-Systeme GmbH                    |  |
| Тур   | CMR 362                                       |  |
| Messprinzip                                     | kapazitiver Drucktransmitter                  |  |
| Messbereich                                     | 0,01 – 100 mbar                               |  |
| Auflösung                                       | 0,003 mbar                                    |  |
| Genauigkeit                                     | 0,2 % Messwert                                |  |
| Weg-Messung zur Detektierung der Folienbewegung |   |  |
| Hersteller                                      | Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG       |  |
| Тур   | optoNCDT 2300LL                               |  |
| Messprinzip                                     | Laserliniensensor für metallische Oberflächen |  |
| Messbereich                                     | 10 mm   |  |
| Auflösung                                       | 0,15 μm                                       |  |
| Linearität                                      | 2 µm  |  |


Das Verfahren zur Innendruckbestimmung wird in Anlehnung an Simmler und Brunner 2005 folgendermaßen durchgeführt. Das VIP wird in der Vakuumkammer auf zwei Linienlagern positioniert. Die Vakuumkammer wird verschlossen und mittels der Vakuumpumpe evakuiert. Ab 100 mbar Kammerinnendruck p<sub>i,K</sub> wird die Entwicklung von p<sub>i,K</sub> und dem Abstand s zwischen Laser-Weg-Sensor und Folienoberfläche mit einer Abtastfrequenz von 10 Hz abgetastet und als Wertetabelle gespeichert. Erreicht der Kammerinnendruck das Niveau des Innendrucks im VIP hebt sich die Folienumhüllung vom Kernmaterial ab. Aus dem Zusammenhang

$$s = f(p_i) \tag{2}$$

wird mittels eines Tangentenverfahrens (Abbildung 9) der Innendruck p<sub>i</sub> des VIP bestimmt. Dieser ist definiert als der Schnittpunkt der beiden Tangenten.





#### Berechnung der Partialdrücke

In Kraus et al. 2005 ist eine Methode zur Bestimmung der Partialdrücke beschrieben, die ohne eine Sorptionsisotherme des Kernmaterials auskommt. Das Verfahren beruht auf der Innendruckmessung des VIPs bei zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus.

Der Partialdruck der trockenen Luftgase als auch der Partialdruck des Wasserdampfes sind von der Temperatur der jeweiligen Gase beeinflusst. Da sich die Gesetzmäßigkeiten jedoch unterscheiden, kann von der Änderung der gemessenen Innendrücke bei unterschiedlichen Temperaturen auf die Anteile von trockenen Gasen und Wasserdampf geschlossen werden.

Die Temperaturabhängigkeit trockener Luftgase kann bekanntlich sehr gut durch die ideale Gasgleichung beschrieben werden, was einen linear proportionalen Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Partialdruck der Luft im Paneel bedeutet:



$$p_{Luft}(T) = \frac{N \cdot k}{V} \cdot T \left[ Pa \right] \tag{3}$$

Dabei ist T die absolute Temperatur in Kelvin, N die Teilchenzahl und k die Boltzmann-Konstante (siehe ideale Gasgleichung in gängiger Literatur).

Der Sättigungsteildruck des Wasserdampfes steht jedoch in einem exponentiellen Verhältnis zur Temperatur. Im Bereich zwischen Schmelz- und Siedepunkt kann die Druck-Temperaturkurve mit hoher Genauigkeit mit der Magnus-Gleichung beschrieben werden:

$$p_{WD,ges\"attigt}(T) = 6,11 \ mbar \ \cdot \ e^{\left(\frac{17,08 \cdot (T-273,15 \ K)}{T-38,97 \ K}\right)} \ [mbar]$$
(4)

Damit ergibt sich bei einer relativen Luftfeuchte  $\phi$  im VIP mit

$$p_{WD} = \varphi \cdot p_{WD,ges\"attigt} \tag{5}$$

ein Gesamtinnendruck von:

$$p(T) = p_{Luft}(293,15 K) \cdot \frac{T}{293,15 K} + \varphi \cdot 6.11 \ mbar \cdot e^{\left(\frac{17,08 \cdot (T - 273,15 K)}{T - 38,97 K}\right)} \ [mbar]$$
(6)

Wenn man diese Gleichung für eine Temperatur T<sub>1</sub> nach  $p_{Luft}$  auflöst und den so erhaltenen Term

$$p_{Luft}(293,15 K) = \frac{p(T) - [6,11 \ mbar \cdot \varphi \cdot e^{\frac{17,08 \cdot (T - 273,15 K)}{T - 38,97 K} \cdot 293,15 K}}{273,15 K}$$
(7)

in die entsprechende Summengleichung für eine Temperatur T<sub>2</sub> einsetzt, lässt sich die relative Luftfeuchtigkeit als Gleichung der Druck- und Temperaturpaare  $p_1/T_1$  und  $p_2/T_2$  darstellen:

$$\varphi = \frac{\frac{T_1}{T_2} p(T_2) - p(T_1)}{6.11 \, mbar \left[ \frac{T_1}{T_2} \cdot e^{\frac{17,08 \cdot (T_2 - 273,15 \, K)}{T_2 - 38,97 \, K}} - e^{\frac{17,08 \cdot (T_1 - 273,15 \, K)}{T_1 - 38,97 \, K}} \right]}$$
(8)

Damit können der Wasserdampfteildruck und der Teildruck der trockenen Luftgase entsprechend den Gleichungen

$$p_{WD} = \varphi \cdot 6,11 \, mbar \cdot e^{\left(\frac{17,08 \cdot (T - 273,15 \, K)}{T - 38,97 \, K}\right)} \, [mbar] \tag{9}$$

und



(10)

$$p_{Luft}(T) = \frac{p(T) - [6,11 \, mbar \cdot \varphi \cdot e^{\frac{17,08 \cdot (T - 273,15 \, K)}{T - 38,97 \, K} \cdot T]}}{273,15 \, K}$$

berechnet werden.

#### Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die Messungen der Wärmeleitfähigkeit werden im Plattengerät nach DIN EN 12667 durchgeführt. Bestimmt wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bei einer mittleren Probekörpertemperatur von 10°C.

Bei diesem Verfahren wird die Probe vollflächig zwischen einer temperaturgeregelten Heizplatte auf der einen Paneelseite und einer Kühlplatte auf der gegenüberliegenden Seite positioniert.

Zur Bestimmung werden 3 Messpunkte bei Probenmitteltemperaturen (T<sub>mittel</sub>) von 10°C, 20°C und 30°C angefahren. Die Soll-Temperaturdifferenz über der Probe beträgt jeweils 10 K. Jeder Messpunkt wird solange angesprochen bis sich ein stationärer Zustand der Leistung der Heizplatte und der Temperaturdifferenz über der Probe einstellt. Nach Erreichen des stationären Zustands wird der nächste Messpunkt angefahren.

Aus den Messgrößen Leistung der Heizplatte [W], Fläche der Heizplatte [m<sup>2</sup>], Dicke der Probe [m] und der Temperaturdifferenz über der Probe [K] errechnet sich die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/(m·K)].

Um die Werte auf eine einheitliche Probenmitteltemperatur zu beziehen, wird aus den ermittelten Messwerten eine Regression zum Ansatz

$$\lambda = f(T_{mittel}) = m \cdot T_{mittel} + b \tag{11}$$

durchgeführt. Aus dem nach (11) bestimmten funktionalen Zusammenhang wird schließlich die Wärmeleitfähigkeit bei  $T_{mittel} = 10^{\circ}C$ ,  $\lambda_{10^{\circ}C}$  ermittelt, welche üblicherweise für Bauprodukte in Deutschland angegeben wird.

#### Versuchseinrichtungen zur künstliche Alterung

Zur künstlichen Alterung bei erhöhter Temperatur und Feuchtebeanspruchung werden die Paneele bei unterschiedlichen Temperaturen über gesättigten Salzlösungen gelagert. Je nach Umgebungstemperatur stellt sich über den gesättigten Salzlösungen ein typischer Wasserdampfpartialdruck ein. Diese Art der Klimalagerung bietet insbesondere bei langen Expositionszeiten sehr stabile klimatische Verhältnisse und ist wartungsarm. Die Paneele werden in speziellen Probenhaltern in ausreichend



diffusionsdichten Kunststoffboxen eingelagert. Die gesättigten Salzlösungen werden in Erlenmeyerkolben angesetzt und in den Kunststoffkisten befestigt.



Abbildung 10: Lagerungsbehälter mit Salzlösung in Erlenmeyerkolben und Probenhalterung (links ohne Proben, rechts mit 4 Proben)



Abbildung 11: Probenhalterung zur vollständigen Luftumspülung der VIP (links); Übersättigte Salzlösung zur Einstellung einer konstanten Luftfeuchtigkeit im Lagerungsbehälter (rechts).

Die Langzeitlagerung der Paneele soll bei insgesamt drei Temperaturen (23°C, 45°C und 70°C) in drei Feuchtestufen im Bereich von etwa 10 – 95 % r. F. durchgeführt werden. In jeder Temperaturstufe sollten annähernd ähnliche r. F. erzielt werden, weshalb die ausgewählten Salzlösungen eine möglichst geringe Abhängigkeit der r. F. von der Temperatur aufweisen sollten. Zur Anwendung kamen die Salze Lithiumchlorid (LiCI), Natriumbromid (NaBr) und Kaliumsulfat (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). In der Anwendung ergeben sich durch die individuelle Position der Klimakiste in den verwendeten Öfen, bzw. der Klimakammer und die Regelungscharakteristik der Einrichtungen



leichte Abweichungen der Solltemperaturen. Für die Berechnungen wurden die sich entsprechend den Ist-Temperaturen einstellenden r. F. verwendet (Tabelle 7).

Tabelle 7: Für die weiterführenden Berechnungen angesetzte Klimata

| Salz                           | Klimata     |             |             |  |  |  |  |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|
| LiCl                           | 23°C / 11 % | 42°C / 11 % | 70°C / 11 % |  |  |  |  |
| NaBr                           | 23°C / 57 % | 45°C / 51 % | 69°C / 45 % |  |  |  |  |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 23°C / 97 % | 46°C / 96 % | 71°C / 95 % |  |  |  |  |

#### Verwendete Software zur hygrothermischen Bauteilsimulation

Zur Modellierung der Temperatur- und Feuchteverteilung in den repräsentativen Anwendungsbeispielen wird das Programmpaket WUFI® Pro 5.2 (Release: 5.2.0.972.DB.24.76) verwendet.

Die Modelle werden als 1-dimensionale Schichtenmodelle umgesetzt. Als Ergebnisdatei wird eine stundengenaue Darstellung der mittleren Temperatur und Feuchte jeweils auf der Warm- und Kaltseite der untersuchten VIP ausgegeben. Die ermittelten Daten werden in Kapitel 4.2 zur Berechnung des Innendruckanstiegs in baupraktischen Anwendungen verwendet.

#### Zu untersuchende Musteranwendungen für die Bauteilsimulation mit WUFI

Um die Anzahl der zu untersuchenden Anwendungsfälle sinnvoll einzugrenzen, werden Musteranwendungen ausgewählt, die typische Einsatzfelder von VIP repräsentieren.

| Anwendungsbeispiel     | Konstruktion | Neigung |  |
|------------------------|--------------|---------|--|
| Dachterrasse           | K1           | 0°      |  |
| Steildach              | K2           | 30°     |  |
| Wärmedämmverbundsystem | K3           | 90°     |  |
| Innendämmung           | K4           | 90°     |  |
| Hinterlüftete Fassade  | K5           | 90°     |  |

Tabelle 8: Musteranwendungen für die Bauteilsimulation mit WUFI®

Für die Modellierungen mit WUFI® werden 5 Anwendungsbeispiele ausgewählt (Tabelle 8). Variiert werden jeweils Bekleidungen der VIP mit unterschiedlichen Deckschichten (Keine Deckschicht, XPS, GFK), der Standort (Freiburg, Holzkirchen), das Innenraumklima (Normale und Hohe Feuchtelast nach EN 15026) sowie die Orientierung des Bauteils (Süd- und Nordausrichtung).

Je Konstruktion ergeben sich damit zwölf, bzw. beim Flachdach neun Varianten. Zur leichteren Identifikation wird ein Variantenschlüssel gemäß Tabelle 9 festgelegt. Die



Materialdaten der für das WUFI® Modell verwendeten Schichten sind in Tabelle 12 beschrieben.

| Tabelle 9: | Variantenschlüssel |
|------------|--------------------|
|            |                    |

| Anwendungsbeispiel        | Abkürzungen                                |
|---------------------------|--|
| Konstruktion              | K1 – K5                                    |
| Standort                  | FREiburg<br>HOLzkirchen                    |
| Orientierung des Bauteils | SÜD<br>NORd<br>WESt                        |
| Innenraumklima            | NORmale Feuchtelast<br>Erhöhte FEUchtelast |
| Deckschicht               | KEIne Deckschicht<br>XPS<br>GFK            |
| Dicke des VIP in mm       | 20<br>30<br>40                             |

Beispiel:

### K1\_FRE\_SÜD\_NOR\_KEI\_20

(Dachterasse, Freiburg, Süd-Orientierung des Bauteils, Normale Feuchtelast im Innenraum, Keine Deckschicht, Dicke des VIP 20 mm)

Die Orientierungen des Bauteils führen je nach Standort zu unterschiedlichen Temperaturbelastungen und Feuchteeinträgen durch Schlagregen in die Konstruktion. Tabelle 11 zeigt die Klimaanalyse der gewählten Standorte Freiburg und Holzkirchen.

Die Standorte Freiburg und Holzkirchen repräsentieren deutlich unterschiedliche Klimata. Freiburg weist gegenüber Holzkirchen eine höhere mittlere Temperatur auf (Freiburg 10,4°C vs. Holzkirchen 6,6°C). In Holzkirchen liegt dagegen ein insgesamt kühleres, dafür feuchteres Klima mit höherer relativer Luftfeuchte (Freiburg 74 % vs. Holzkirchen 81 %) und intensiverer Schlagregenbelastung vor.

Aufgrund der zu erwartenden Sensitivität des Innendruckanstiegs bei unterschiedlichen Temperaturen und r. F. sind bei den gewählten Außenklimata Unterschiede im Alterungsverhalten der VIP zu erwarten. Die Wahl der Standorte bietet in diesem Zusammenhang ein entsprechendes Differenzierungspotential.





#### Tabelle 10: Klimaanalyse zum Standort Freiburg (WUFI®)







Tabelle 12 enthält die Materialdaten der für die WUFI® Simulationen verwendeten Schichten. Die Daten entstammen größtenteils der WUFI® Materialdatenbank und wurden teilweise ergänzt.

| Nr. | Material                      | d        | ρ                 | Porosität                      | С              | λ             | μ      |
|-----|-------------------------------|----------|-------------------|--------------------------------|----------------|---------------|--------|
|     |                               | mm       | kg/m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | J/(kg K)       | W/(mK)        | -      |
| 1   | VIP                           | 20/30/40 | 200               | 0.99                           | 850            | 0.004         | ∞      |
| 2   | XPS                           | 5        | 40                | 0.95                           | 1500           | 0.03          | 100    |
| 3   | GFK                           | 3        | 1800              | 0.95                           | 1500           | 0.3           | 83600  |
| 4   | Diffusionshemmende<br>Schicht | 1        | 130               | 0.001                          | 2300           | 2.3           | 50000  |
| 5   | Unterspannbahn                | 1        | 130               | 0.001                          | 2300           | 2.3           | 200    |
| 6   | Fichtenholz                   | 20       | 455               | 0.73                           | 1500           | 0.09          | 130    |
| 7   | Gipskartonplatte              | 12.5     | 850               | 0.65                           | 850            | 0.2           | 8.3    |
| 8   | Kalksandstein                 | 115      | 1900              | 0.29                           | 850            | 1             | 28     |
| 9   | Innenputz, Gips               | 15       | 850               | 0.65                           | 850            | 0.2           | 8.3    |
| 10  | Außenputzsystem               | 20       | au                | s WUFI Datent                  | oank als Syste | m aus 4 Schic | hten   |
| 11  | Beton, C35/45                 | 175      | 2200              | 0.18                           | 850            | 1.6           | 248    |
| 12  | Beton, C12/C15                | 20       | 2200              | 0,118                          | 850            | 1,6           | 92     |
| 13  | Kaltklebebahn V13             | 20       | 2400              | 0.001                          | 1000           | 0.5           | 100000 |
| 14  | Kies                          | 50       | 1400              | 0.3                            | 1000           | 0.7           | 1      |
| 15  | Luftschicht                   | 50       | 1.3               | 0.999                          | 1000           | 0.28          | 0.32   |

Tabelle 12: Materialdaten der für die WUFI® Simulationen verwendeten Schichten

Der Schichtenaufbau der Konstruktionen K1 – K5 ist in Tabelle 13 enthalten. Die Konstruktion wird dabei durch eine Nummernfolge beschrieben. Die Nummern repräsentieren die Materialien gemäß Tabelle 12 in den dort angegebenen Dicken.

Jede Konstruktion enthält außerdem jeweils drei unterschiedliche Konfigurationen der VIP mit Deckschichten aus XPS und GFK. Dieser "Block" ist für alle Konstruktionen identisch und mit der Nummernfolge (-,3,2)/1/(-,2,3) beschrieben.

Da je nach verwendeten Deckschichten leicht unterschiedliche Gesamtdicken und U-Werte der Konstruktion erreicht werden, sind diese Daten ebenfalls in Tabelle 13 enthalten.

Die Verwendung von 20 mm dicken VIP in den angegebenen Konstruktionen führt zu U-Werten in einem Bereich von ca. 0,18 W/(m<sup>2</sup> K). Die Konstruktionen entsprechen damit einem üblichen wärmeschutztechnischen Standard.

In der Laboralterung wurden 15 mm dicke VIP eingesetzt, um in dem zur Verfügung stehenden Zeitrahmen auch bei den weniger anspruchsvollen Klimaten messtechnisch sicher bestimmbare Druckanstiege zu provozieren. Die Paneeldicke wird bei



der Anwendung der Alterungsmodelle berücksichtigt und entsprechend umgerechnet.

Die Verwendung von VIP mit 20 mm Dicke stellt den unteren Fall der sinnvoll einzusetzenden Paneeldicken dar und kann in diesem Zusammenhang als angemessenes worst case Szenario betrachtet werden. Durch das größere Volumen dickerer VIP verringern sich die Innendruckanstiege bei ansonsten gleicher Permeation.

| K1                               | Außen - 12/14/13/(-,3,2)/1/(-,2,3)/11/9 - Innen                         |                         |                               |                 |  |  |  |  |
|----------------------------------|---|-------------------------|-------------------------------|-----------------|--|--|--|--|
| Besonderheiten:                  | Feuchtequelle mit   | 1 % des Schlag<br>Schie | gregens auf den in<br>cht 14  | neren 5 mm der  |  |  |  |  |
|                                  |   | KEI (-)                 | XPS (2)                       | GFK (3)         |  |  |  |  |
|                                  | VIP 20 mm   | 0,184                   | 0,173                         | 0,183           |  |  |  |  |
| U-Wert<br>IW/(m <sup>2</sup> K)] | VIP 30 mm   | -                       | 0,121                         | -               |  |  |  |  |
| [(                               | VIP 40 mm   | -                       | 0,093                         | -               |  |  |  |  |
| K2                               | Außen - 6/(-,3,2)/1/(-,2,3)/4/7 - Innen                                 |                         |                               |                 |  |  |  |  |
| Besonderheiten:                  | Feuchtequelle durch Luftinfiltration auf den inneren 5 mm der Schi<br>6 |                         |                               |                 |  |  |  |  |
|                                  |   | KEI (-)                 | XPS (2)                       | GFK (3)         |  |  |  |  |
|                                  | VIP 20 mm   | 0,185                   | 0,174                         | 0,184           |  |  |  |  |
| U-Wert<br>IW/(m <sup>2</sup> K)] | VIP 30 mm   | -                       | 0,121                         | -               |  |  |  |  |
| [(                               | VIP 40 mm   | -                       | 0,093                         | -               |  |  |  |  |
| K3                               | Außen - 10/(-,3,2)/1/(-,2,3)/8/9 - Innen                                |                         |                               |                 |  |  |  |  |
| Besonderheiten:                  | Feuchtequelle mit   | 1 % Schlagrege<br>Schi  | enanteil auf den äu<br>icht 8 | ıßeren 5 mm der |  |  |  |  |
|                                  |   | KEI (-)                 | XPS (2)                       | GFK (3)         |  |  |  |  |
|                                  | VIP 20 mm   | 0,184                   | 0,174                         | 0,184           |  |  |  |  |
| U-Wert<br>[W/(m <sup>2</sup> K)] | VIP 30 mm   | -                       | 0,121                         |                 |  |  |  |  |
|                                  | VIP 40 mm   |                         | 0,093                         |                 |  |  |  |  |
| K4                               | Auße  | n - 10/8/9/(-,3,2       | 2)/1/(-,2,3)/4/7 - Ini        | nen             |  |  |  |  |
| Besonderheiten:                  |   |                         | -                             |                 |  |  |  |  |
|                                  |   | KEI (-)                 | XPS (2)                       | GFK (3)         |  |  |  |  |
|                                  | VIP 20 mm   | 0,182                   | 0,172                         | 0,182           |  |  |  |  |
| U-Wert<br>[W/(m <sup>2</sup> K)] | VIP 30 mm   | -                       | 0,120                         | -               |  |  |  |  |
|                                  | VIP 40 mm   | -                       | 0,092                         | -               |  |  |  |  |
| K5                               | Außen   | - 6/15/5/(-,3,2)        | /1/(-,2,3)/10/8/9 - I         | nnen            |  |  |  |  |
| Besonderheiten:                  | Luftwe  | chselquelle mit         | 100 h-1 in Schich             | it 15           |  |  |  |  |
|                                  |   | KEI (-)                 | XPS (2)                       | GFK (3)         |  |  |  |  |
|                                  | VIP 20 mm   | 0,173                   | 0,164                         | 0,172           |  |  |  |  |
| U-Wert<br>[W/(m <sup>2</sup> K)] | VIP 30 mm   | -                       | 0,116                         | -               |  |  |  |  |
| r ()1                            | VIP 40 mm   | -                       | 0,090                         | -               |  |  |  |  |

 Tabelle 13:
 Schichtenfolge der WUFI® Modelle (Nummern gemäß Tabelle 12)



# Ableitung des Innendruckanstiegs bei baupraktischen Temperatur- und Feuchteverteilungen auf Basis von $p_i = f(T, \phi)$

Zur Ableitung des Innendruckanstiegs in VIP bei baupraktischen Temperaturverteilungen gibt es Literaturangaben mit explizit beschriebenen Verfahren (u. a. [Simmler und Brunner 2005]).

Der durchzuführende Untersuchungsrahmen soll einerseits diese bereits bekannten Modelle auf einem erweiterten Anwendungsportfolio umsetzen, andererseits die Ansätze in der Literatur um den Aspekt der Umgebungsfeuchte der VIP erweitern. Als Referenzverfahren wird das in Simmler und Brunner 2005 beschriebene Vorgehen auf Basis von Temperaturverteilungen aus einer Bauteilsimulation (mit WUFI®) unter Verwendung von im vorliegenden Projekt gewonnenen Daten zum Innendruckanstieg bei erhöhten Temperaturen (siehe Kapitel 4.2) angewendet.

Aus den Innendruckmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen wird jeweils der Partialdruck trockener Luftgase und des Wasserdampfs an den bei unterschiedlichen Klimaten gelagerten VIP bestimmt. Hieraus ergibt sich jeweils ein Zusammenhang

| $\Delta p_{i,qes} = f(T, \varphi)$ | (12) |
|------------------------------------|------|
|                                    | ()   |

$$\Delta p_{i,dry} = f(T,\varphi) \tag{13}$$

$$\Delta p_{i,H2O} = f(T,\varphi) \tag{14}$$

Der funktionelle Ansatz aus Formel (12) – (14) wird auf die Realisierungen aus den Versuchen gemäß Kapitel 4.3 angewendet. Grundlage der Entscheidung für einen bestimmten funktionalen Ansatz ist die Güte der Flächenanpassung (Best-Fit-Kriterium).

Durch Anwendung der stündlich aufgelösten Klimadaten von T und  $\varphi$  aus den WUFI® Modellen auf die funktionalen Ansätze entsprechend (12) – (14) wird ein durchschnittlicher jährlicher Innendruckanstieg in einer bestimmten Anwendung errechnet, der für die Bestimmung des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit weiter verrechnet wird.

#### 4.3 Versuchsplanung zu Forschungsbereich A

#### Laborversuche zur Alterung von VIP

Um den Einfluss von Temperatur und Feuchte auf den Druckanstieg im VIP abzubilden, werden die Paneele wie beschrieben in Klimakisten über gesättigten Salzlösungen bei definierten Temperaturen gelagert. Die Lagerung bei 23°C erfolgte in ei-



ner Klimakammer, zur Einstellung der höheren Temperaturen wurden zwei Öfen genutzt. Wie beschrieben, wurde in den Kisten jeweils die Temperatur und r. F. gemessen. Tabelle 14 enthält die auf diese Weise im Mittel registrierten und für die weiteren Auswertungen genutzten Klimadaten.

| Salz                           | Klimakammer       | Trockenschrank 1  | Trockenschrank 2  |  |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|
| LiCl                           | 23°C / 11 % r. F. | 42°C / 11 % r. F. | 70°C / 11 % r. F. |  |
| NaBr                           | 23°C / 57 % r. F. | 45°C / 51 % r. F. | 69°C / 45 % r. F. |  |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 23°C / 97 % r. F. | 46°C / 96 % r. F. | 71°C / 95 % r. F. |  |

# Tabelle 14:Versuchsmatrix zur Bestimmung des Einfluss von Temperatur und r. F. auf den<br/>Innendruckanstieg – angegeben sind jeweils die mittleren Temperaturen und<br/>r. F., die in den Klimakisten gemessen wurden

Jeweils 3 Paneele (siehe Kapitel 4.1 VIP Paneele für die Untersuchung der Dauerhaftigkeit unter Laborbedingungen) werden in den unterschiedlichen Kombinationen von Temperatur und Feuchte gelagert und in zyklischen Abständen gemessen.

Nach einer Lagerungsdauer von ca. 0, 1, 3, 6 und 9 Monaten werden Messungen an den Paneelen durchgeführt. Bestimmt werden dabei der Innendruck bei verschiedenen Temperaturen (4.2 Messung des Innendruck) und die Wärmeleitfähigkeit (4.2 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit). Aus den ermittelten Daten zum Innendruckanstieg bei verschiedenen Temperaturen werden die Teildrücke des Wasserdampf und der trockenen Luftgase berechnet (4.2 Berechnung der Partialdrükke).

#### 4.4 Ergebnisse zu Forschungsbereich A

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Forschungsbereich A zusammengefasst und diskutiert.

#### Ergebnisse der Innendruckanstiege (Gesamt- und Partialdrücke) und Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der jährlichen Innendruckanstiegsraten als Funktion von Temperatur und relativer Luftfeuchte

Die an jeweils vier in einem bestimmten Klima eingelagerten Paneelen ermittelten Innendrücke ( $p_{ges}$ ,  $p_{dry}$ ,  $p_{H2O}$ ) wurden zunächst arithmetisch gemittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 – Tabelle 17 dargestellt. Anschließend wurde mittels linearer Regression aus den Messwerten für jedes Klima der jährliche Innendruckanstieg  $p_a$  in mbar/a ermittelt. Die Regression bezieht die Messwerte des gesamten Untersuchungszeitraums von 0 – 9 Monaten ein.

Direkt nach der Herstellung von VIP kann teilweise ein anfänglich stärkerer Innendruckanstieg ermittelt werden, der auf die Ausgasung der Folien und andere, teil-



weise produktionsabhängige Effekte zurückgeführt werden kann. Die Paneele in vorliegender Untersuchung lagerten vor Beginn der Alterung für ca. 3 Monate bei Laborklima mit annähernd 23°C und 50 % r. F., weshalb davon auszugehen ist, dass die angesprochenen Anfangseffekte zum Innendruckanstieg vernachlässigt werden können.

Die über den gesamten Zeitraum ermittelten jährlichen Innendruckanstiege ergaben außerdem im Vergleich mit den Ergebnissen für Regressionsanalysen unter Ausschluss der ersten 1 – 3 Monate für alle Teildrücke und Klimate die insgesamt schlüssigsten Ergebnisse.

Die Klimalagerung bei ca. 70°C und 95 % r. F. führte nach ca. 9 Monaten Lagerungsdauer zu einem Innendruckanstieg auf über 110 mbar. Der zur Bestimmung des Kammerinnendrucks bei der Innendruckmessung mittels Folienabhebeverfahren verwendete Drucksensor kann nur Drücke < 110 mbar detektieren. Die Paneele können in dieser Klimastufe daher nur im Zeitraum von 0 – 6 Monaten analysiert werden.

| Klima             |        | t     | t   | p <sub>ges</sub> | p <sub>dry</sub> | <b>р</b> н20 |      | pa                 |      |
|-------------------|--------|-------|-----|------------------|------------------|--------------|------|--------------------|------|
|                   |        | [d]   | [h] | [mbar]           | [mbar]           | [mbar]       |      | [mbar/a]           |      |
| Θ                 | [°C]   | 23    | 0   | 0                | 2.21             | 1.85         | 0.35 | p <sub>a,ges</sub> | 1.58 |
| Т                 | [K]    | 296   | 31  | 744              | 2.41             | 1.99         | 0.42 | p <sub>a,dry</sub> | 1.25 |
| φ                 | [%]    | 11    | 88  | 2112             | 2.77             | 2.35         | 0.42 | p <sub>a,H2O</sub> | 0.33 |
| p <sub>sat</sub>  | [mbar] | 28.03 | 179 | 4296             | 3.24             | 2.68         | 0.56 |                    |      |
| p <sub>part</sub> | [mbar] | 3.15  | 268 | 6432             | 3.32             | 2.73         | 0.59 |                    |      |
| Θ                 | [°C]   | 23    | 0   | 0                | 2.39             | 2.01         | 0.38 | p <sub>a,ges</sub> | 1.91 |
| Т                 | [K]    | 296   | 31  | 744              | 2.59             | 2.19         | 0.40 | p <sub>a,dry</sub> | 1.25 |
| φ                 | [%]    | 57    | 88  | 2112             | 3.20             | 2.81         | 0.38 | p <sub>a,H2O</sub> | 0.67 |
| p <sub>sat</sub>  | [mbar] | 28.03 | 179 | 4296             | 3.49             | 2.82         | 0.67 |                    |      |
| p <sub>part</sub> | [mbar] | 16.02 | 268 | 6432             | 3.80             | 2.96         | 0.84 |                    |      |
| Θ                 | [°C]   | 23    | 0   | 0                | 2.37             | 1.99         | 0.38 | p <sub>a,ges</sub> | 2.59 |
| Т                 | [K]    | 296   | 31  | 744              | 2.57             | 2.09         | 0.48 | p <sub>a,dry</sub> | 1.22 |
| φ                 | [%]    | 97    | 88  | 2112             | 3.19             | 2.65         | 0.55 | p <sub>a,H2O</sub> | 1.38 |
| p <sub>sat</sub>  | [mbar] | 28.03 | 179 | 4296             | 3.67             | 2.70         | 0.97 |                    |      |
| p <sub>part</sub> | [mbar] | 27.30 | 268 | 6432             | 4.29             | 2.90         | 1.39 |                    |      |

 Tabelle 15:
 Ergebnisse der Innendruckanstiege durch die Klimalagerung bei 23°C und unterschiedlichen r. F.



|                   | Klima  |       | t   | t    | p <sub>ges</sub> | p <sub>dry</sub> | <b>р</b> <sub>Н2О</sub> |                    | pa       |
|-------------------|--------|-------|-----|------|------------------|------------------|-------------------------|--------------------|----------|
| Klima             |        |       | [d] | [h]  | [mbar]           | [mbar]           | [mbar]                  |                    | [mbar/a] |
| Θ                 | [°C]   | 42.4  | 0   | 0    | 2.67             | 2.24             | 0.43                    | p <sub>a,ges</sub> | 2.79     |
| Т                 | [K]    | 315.4 | 31  | 744  | 3.22             | 2.69             | 0.53                    | p <sub>a,dry</sub> | 1.96     |
| φ                 | [%]    | 11    | 88  | 2112 | 3.69             | 3.11             | 0.58                    | p <sub>a,H2O</sub> | 0.83     |
| p <sub>sat</sub>  | [mbar] | 83.67 | 179 | 4296 | 4.27             | 3.35             | 0.91                    |                    |          |
| p <sub>part</sub> | [mbar] | 9.33  | 268 | 6432 | 4.84             | 3.83             | 1.02                    |                    |          |
| Θ                 | [°C]   | 44.7  | 0   | 0    | 2.81             | 2.36             | 0.45                    | p <sub>a,ges</sub> | 5.17     |
| Т                 | [K]    | 317.7 | 31  | 744  | 3.56             | 2.52             | 1.03                    | p <sub>a,dry</sub> | 2.39     |
| φ                 | [%]    | 51    | 88  | 2112 | 4.14             | 2.84             | 1.30                    | p <sub>a,H2O</sub> | 2.78     |
| p <sub>sat</sub>  | [mbar] | 94.32 | 179 | 4296 | 5.57             | 3.40             | 2.16                    |                    |          |
| p <sub>part</sub> | [mbar] | 48.43 | 268 | 6432 | 6.69             | 4.13             | 2.56                    |                    |          |
| Θ                 | [°C]   | 45.7  | 0   | 0    | 2.43             | 2.04             | 0.39                    | p <sub>a,ges</sub> | 9.02     |
| Т                 | [K]    | 318.7 | 31  | 744  | 3.47             | 2.42             | 1.05                    | p <sub>a,dry</sub> | 3.93     |
| φ                 | [%]    | 96    | 88  | 2112 | 4.94             | 2.83             | 2.11                    | p <sub>a,H2O</sub> | 5.09     |
| p <sub>sat</sub>  | [mbar] | 99.31 | 179 | 4296 | 7.96             | 3.90             | 4.05                    |                    |          |
| p <sub>part</sub> | [mbar] | 95.42 | 268 | 6432 | 8.78             | 4.95             | 3.83                    |                    |          |

Tabelle 16:Ergebnisse der Innendruckanstiege durch die Klimalagerung bei ca. 42 - 46°C<br/>und unterschiedlichen r. F.

| Tabelle 17 | Ergebnisse der Innendruckanstiege durch die Klimalagerung bei ca. 70°C und |
|------------|--|
|            | unterschiedlichen r. F.  |

| Klima             |        | t      | t   | p <sub>ges</sub> | p <sub>dry</sub> | <b>р</b> <sub>Н2О</sub> |      | pa                 |       |
|-------------------|--------|--------|-----|------------------|------------------|-------------------------|------|--------------------|-------|
|                   |        | [d]    | [h] | [mbar]           | [mbar]           | [mbar]                  |      | [mbar/a]           |       |
| Θ                 | [°C]   | 69.8   | 0   | 0                | 2.51             | 2.11                    | 0.40 | p <sub>a,ges</sub> | 10.67 |
| Т                 | [K]    | 342.8  | 31  | 744              | 3.41             | 2.67                    | 0.74 | p <sub>a,dry</sub> | 7.64  |
| φ                 | [%]    | 11     | 88  | 2112             | 5.79             | 3.71                    | 2.08 | p <sub>a,H2O</sub> | 3.03  |
| p <sub>sat</sub>  | [mbar] | 311.24 | 179 | 4296             | 8.53             | 5.69                    | 2.83 |                    |       |
| p <sub>part</sub> | [mbar] | 34.31  | 268 | 6432             | 10.12            | 7.70                    | 2.42 |                    |       |
| Θ                 | [°C]   | 69     | 0   | 0                | 2.45             | 2.06                    | 0.39 | p <sub>a,ges</sub> | 15.82 |
| Т                 | [K]    | 342    | 31  | 744              | 4.08             | 2.64                    | 1.44 | p <sub>a,dry</sub> | 7.91  |
| φ                 | [%]    | 45     | 88  | 2112             | 5.97             | 3.65                    | 2.32 | p <sub>a,H2O</sub> | 7.92  |
| p <sub>sat</sub>  | [mbar] | 300.51 | 179 | 4296             | 9.88             | 5.56                    | 4.32 |                    |       |
| p <sub>part</sub> | [mbar] | 134.75 | 268 | 6432             | 14.32            | 7.93                    | 6.39 |                    |       |
| Θ                 | [°C]   | 70.6   | 0   | 0                | 2.11             | 1.77                    | 0.34 | p <sub>a,ges</sub> | 33.44 |
| Т                 | [K]    | 343.6  | 31  | 744              | 5.83             | 2.68                    | 3.14 | p <sub>a,dry</sub> | 16.67 |
| φ                 | [%]    | 95     | 88  | 2112             | 8.83             | 4.36                    | 4.47 | p <sub>a,H2O</sub> | 16.77 |
| p <sub>sat</sub>  | [mbar] | 322.30 | 179 | 4296             | 19.05            | 9.92                    | 9.13 |                    |       |
| p <sub>part</sub> | [mbar] | 304.92 | 268 | 6432             |                  |                         |      |                    |       |



Das lineare Verhalten der Innendrücke über der Lagerungsdauer ist zur Veranschaulichung in Abbildung 12 nochmal graphisch dargestellt. Um den Einfluss der relativen Luftfeuchte auf den Innendruckanstieg zu veranschaulichen wurden die Messwerte anhand der r. F. während der Lagerung sortiert. In jeweils einem Diagramm ist die Entwicklung des Innendrucks bei trockenen (Abbildung 12, oben), mittleren (Abbildung 12, Mitte) und hoch feuchten Bedingungen (Abbildung 12, unten) dargestellt.



Abbildung 12: Innendruck (Gesamtinnendruck) über der Lagerungsdauer von 0 – 9 Monaten

Neben dem in der Literatur beschriebenen und untersuchten Einfluss der Temperatur auf die Permeation von Gasen durch die Folienumhüllung des VIP ist offensichtlich auch die relative Luftfeuchte ein entscheidender Einflussparameter. Die Abhän-





gigkeit der Partialdrücke der trockenen Luftgase und des Wasserdampfs von den Klimabedingungen zeigt Abbildung 13.

Abbildung 13: Innendruck (Partialdruck trockener Luftgase, linke Spalte; Partialdruck des Wasserdampfs, rechte Spalte) über der Lagerungsdauer von 0 – 9 Monaten

Es zeigt sich, dass die jährlichen Anstiegsraten der Partialdrücke spezifisch ausfallen. Der Einfluss der umgebenden relativen Luftfeuchte auf den Partialdruckanstieg des Wasserdampfs ist stärker ausgeprägt als auf den Partialdruckanstieg trockener Luftgase. Im Weiteren wird deshalb ein Modell entwickelt, das die Entwicklung der Teildrücke der trockenen Luftgase und des Wasserdampf in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit beschreibt.

Hierzu sollen die ermittelten jährlichen Anstiegsraten (entsprechend Tabelle 15 -Tabelle 17) als Funktion der Variablen Temperatur in °C und relativer Luftfeuchte in % dargestellt werden. Um das vorliegende funktionale Verhalten zu analysieren werden zunächst die ermittelten jährlichen Anstiegsraten getrennt für die drei Bereiche relativer Luftfeuchte (ca. 11%, ca. 50 % und ca. 96 %) als Funktion der Temperatur  $\Theta$  [°C] dargestellt (Abbildung 14).

Es ist zu erkennen, dass für den Gesamtinnendruckanstieg sowie für die Teildrücke der trockenen Luftgase und des Wasserdampfs ein exponentielles Verhalten über der Temperatur in °C vorliegt. Diese vorliegende Abhängigkeit von der Temperatur deutet auf ein Arrheniusverhalten innerhalb der den unterschiedlichen relativen Luftfeuchten zugeordneten Datensätze hin.

Erwartungsgemäß sind die Partialdruckanstiege der trockenen Luftgase bei variierender r. F. während der Lagerung nicht so ausgeprägt differenziert wie der Partial-



druckanstieg des Wasserdampfs (vgl. Abbildung 14 Mitte vs. Unten). Trotzdem ist auch bei den trockenen Luftgasen im Bereich hoher r. F. (ca. 50 % vs. ca. 96 %) ein deutlicher Einfluss der r. F. auf den Druckanstieg zu erkennen, weshalb eine Berücksichtigung der r. F. im Alterungsmodell auch für die Partialdruckanstiege der trockenen Luftgase sinnvoll erscheint.



Abbildung 14: Innendruckanstieg (Gesamtinnendruck, oben; Partialdruck trockener Luftgase, Mitte; Partialdruck des Wasserdampfs, Unten) aufgetragen über der Temperatur Θ [°C]

Wird der Innendruckanstieg zur Basis e logarithmiert und über dem Kehrwert der absoluten Temperatur in K aufgetragen, ergibt sich ein linearer Zusammenhang, dessen Koeffizienten mittels Regression bestimmt werden können.





Abbildung 15: Arrheniusdiagramm der Innendruckanstieg (Gesamtinnendruck, oben; Partialdruck trockene Luftgase, Mitte; Partialdruck Wasserdampf, Unten)

Auf diese Weise erstellte Arrheniusdiagramme sind in Abbildung 15 dargestellt. Während sich die Arrheniusplots für den Teildruck des Wasserdampfs entsprechend den Bereichen relativer Luftfeuchte deutlich differenzieren (Abbildung 15, unten), sind die Arrheniusplots für den Teildruck der trockenen Luftgase (Abbildung 15, Mitte) dem diskutierten Verhalten folgend, teilweise überlagert.

Um den Zusammenhang  $p_a = f(\Theta, \varphi)$  zu ermitteln, wird zunächst aus den Koordinatensätzen (x = T<sup>-1</sup>, y =  $\varphi$ , z = ln( $p_a$ )) eine Flächenapproximation erstellt. Durch Rücktransformation kann anschließend direkt der Innendruckanstieg als Funktion der Temperatur in °C und der relativen Feuchte in % angegeben werden.



Im Folgenden sind die Ergebnisse der Flächenapproximation zur Beschreibung des Innendruckanstiegs pro Jahr (Gesamtinnendruck) von Temperatur und relativer Luftfeuchte abgebildet.

| Ansatz        | ln(p <sub>a,ges</sub> ) = a · T <sup>-1</sup> + b · φ + c |                |                |  |  |  |  |  |  |
|---------------|---|----------------|----------------|--|--|--|--|--|--|
| Koeffizienten | Wert  | Standardfehler | R <sup>2</sup> |  |  |  |  |  |  |
| а             | -4885.39357   | 290.59598      | 0.97536        |  |  |  |  |  |  |
| b             | 0.01025   | 0.00157        | Fehlerquadrate |  |  |  |  |  |  |
| С             | 16.57359  | 0.91798        | 0.16187        |  |  |  |  |  |  |

Tabelle 18:Koeffizienten der Flächenapproximation für den Zusammenhang  $ln(p_{a,ges}) = f(1/T, \phi)$ 



Abbildung 16: Flächenapproximation  $ln(p_{a,ges}) = f(1/T [K^{-1}], \phi [\%])$ 

Delta p\_part\_gesamt(T,r.F.)



Abbildung 17: Flächenapproximation  $p_{a,ges}$  [mbar/a] = f( $\Theta$  [°C],  $\phi$  [%])



Im Folgenden sind die Ergebnisse der Flächenapproximation zur Beschreibung des Anstiegs des Partialdrucks durch trockene Luftgase pro Jahr von Temperatur und relativer Luftfeuchte abgebildet.

| Tabelle 19: | Koeffizienten der Flächenapproximation für den Zusammenhang In(p <sub>a,dry</sub> ) = |
|-------------|---|
|             | f(1/T, φ )  |

| Ansatz        | $ln(p_{a,dry}) = a \cdot T^{-1} + b \cdot \varphi + c$ |                |                |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------|--|----------------|----------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Koeffizienten | Wert   | Standardfehler | R <sup>2</sup> |  |  |  |  |  |  |  |
| а             | -4612.23649  | 444.03998      | 0.93169        |  |  |  |  |  |  |  |
| b             | 0.00509  | 0.0024         | Fehlerquadrate |  |  |  |  |  |  |  |
| с             | 15.41905   | 1.40271        | 0.37794        |  |  |  |  |  |  |  |



Abbildung 18: Flächenapproximation  $ln(p_{a,dry}) = f(1/T [K^{-1}], \phi [\%])$ 



Abbildung 19: Flächenapproximation  $p_{a,dry}$  [mbar/a] = f( $\Theta$  [°C],  $\phi$  [%])



Im Folgenden sind die Ergebnisse der Flächenapproximation zur Beschreibung des Anstiegs des Wasserdampfpartialdrucks pro Jahr von Temperatur und relativer Luftfeuchte abgebildet.

| Tabelle 20: | Koeffizienten der Flächenapproximation für den Zusammenhang In(p $_{a,H2O})$ = f(1/T, $\phi$ ) |
|-------------|--|
| Ansatz      | $\ln(p_{a,H2O}) = a \cdot T^{-1} + b \cdot \varphi + c$  |

| Ansatz        | $ln(p_{a,H2O}) = a \cdot T + b \cdot \phi + c$ |                |                |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------|--|----------------|----------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Koeffizienten | Wert   | Standardfehler | R <sup>2</sup> |  |  |  |  |  |  |  |
| а             | -5407.12735                                    | 283.71359      | 0.98396        |  |  |  |  |  |  |  |
| b             | 0.01839  | 0.00154        | Fehlerquadrate |  |  |  |  |  |  |  |
| С             | 16.8653  | 0.89624        | 0.15429        |  |  |  |  |  |  |  |



Abbildung 20: Flächenapproximation  $ln(p_{a,H2O}) = f(1/T [K^{-1}], \phi [\%])$ 



Abbildung 21: Flächenapproximation  $p_{a,H20}$  [mbar/a] = f( $\Theta$  [°C],  $\phi$  [%])



# Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Innendruckanstiegs in VIP in einer bestimmten baulichen Anwendung

Zur Beschreibung des Innendruckanstiegs in VIP in einer bestimmten baulichen Situation wurden zunächst WUFI® Simulationen durchgeführt. Variiert wurden dabei die Konstruktion, der Standort, die Orientierung des Bauteils, die Nutzung des Innenraums sowie die Dicke des VIP und die Verwendung von Deckschichten mit unterschiedlichen Diffusionswiderständen. Die Variationsbreite der durchgeführten Untersuchung ist in Punkt 4.2 Zu untersuchende Musteranwendungen für die Bauteilsimulation mit WUFI beschrieben.

Die Simulation wurde mit einer Laufzeit von drei Jahren durchgeführt. Als Startbedingung wurden bautypische Feuchten sowie eine Temperatur von 20°C zugeordnet. Ausgewertet wurden die Temperaturen und relativen Luftfeuchten an der Grenzschicht zum VIP. Hierzu wurden im WUFI® Modell an den, dem Paneel jeweils auf Warm- und Kaltseite benachbarten Materialschichten, Monitore gesetzt, die im Stundentakt Messwerte aufnehmen. Um einen stabil eingeschwungenen Zustand zu bewerten, wurden nur die Messwerte des dritten Jahres für die Auswertung herangezogen.



#### Abbildung 22: Verteilung von Temperatur [°C] und relativer Luftfeuchtigkeit [%] (Häufigkeit in Stunden) getrennt für Kaltseite (blau) und Warmseite (rot) in der Anwendung Steildach, VIP mit 20 mm Dicke, XPS Deckschicht, Standort Freiburg, Normale Feuchtelast im Innenraum und südlicher Orientierung

Die Modellierung des jährlichen Druckanstiegs (getrennt für die trockenen Luftgase und Wasserdampf) erfolgt durch das Einsetzen der stündlich ermittelten Datenpaare von Temperatur und relativer Luftfeuchte (exemplarisch Abbildung 22) aus dem WUFI Modell in die Funktionen zum Ansatz (13) (14)  $p_{a,dry/H2O}$  [mbar/a] = f( $\Theta$  [°C],  $\varphi$ [%]). Da die Laborversuche zur Ermittlung der Druckanstiege an VIP mit einer Paneeldicke von 15 mm durchgeführt wurden, werden die modellierten Druckanstiege proportional zu den Dicken auf 20 mm Paneeldicke umgerechnet.

Durch Summenbildung erhält man auf diese Weise einen charakteristischen Anstieg der Partialdrücke im VIP im ersten Jahr der Exposition  $p_a(t = 0)$ .



Da auf Warm- und Kaltseite der Konstruktion unterschiedliche Verteilungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte vorliegen, werden die Innendruckanstiege für beide Seiten getrennt berechnet und anschließend gemittelt.

Um nun das Langzeitverhalten der Partialdrücke abzubilden, wird der auf diese Weise ermittelte Innendruckanstieg im ersten Jahr mit einer Sättigungsfunktion zum Ansatz

$$p(t) = (p_{end} - p_0) \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)}\right) + p_o$$
(15)

verrechnet.

| p <sub>end</sub>      | (Partial-)druck für t → unendlich<br>1013,25 mbar für trockene Luftgase<br>Entsprechend dem mittleren Außenklima für Wasserdampf              |  |
|-----------------------|---|--|
| <i>p</i> <sub>0</sub> | Initialdruck zu Beginn des Betrachtungszeitraums<br>2,5 mbar (Gesamtinnendruck)<br>2,125 mbar (Trockene Luftgase)<br>0,375 mbar (Wasserdampf) |  |
| τ                     | Abklingkonstante<br>$(p_{end} - p_0)/p_a(t = 0)$  |  |

Die Annahmen zu den Startwerten der Partialdrücke wurden aus den vorliegenden Messungen abgeschätzt. Demnach werden 85 % des Startwerts des Innendrucks den trockenen Luftgasen zugeordnet und 15 % dem enthaltenen Wasserdampf.

Der methodische Ansatz zur Ermittlung des Innendruckanstiegs in VIP in bestimmten baulichen Anwendungen ist in Abbildung 23 zusammengefasst dargestellt.



Abbildung 23: Ansatz zur Ermittlung des Innendruckanstiegs in VIP in konkreten spezifischen Bauteilen/Konstruktionen



In Abbildung 24 ist der Anstieg des Innendrucks in einem VIP in der Anwendung Steildach, VIP mit 20 mm Dicke, XPS Deckschicht, Standort Freiburg, Normale Feuchtelast im Innenraum und südlicher Orientierung dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Entwicklung des Partialdrucks des Wasserdampfs in dem betrachteten Zeitraum einen deutlich degressiven Funktionsverlauf einnimmt. In der konkreten Anwendung wird im Jahresmittel ein Klima von 16,4°C und 53,7 % r. F. erreicht. Hieraus ergibt sich ein mittlerer Partialdruck des Wasserdampfs von ca. 9,98 mbar. Dieser Grenzwert wird am Ende des Betrachtungszeitraumes von 50 Jahren fast erreicht.



Abbildung 24: Ergebnis der Simulation zum Anstieg des Innendrucks (pi Gesamtinnendruck, pi,dry Partialdruck trockener Luftgase, pi,H20 Partialdruck Wasserdampf) in VIP in einem Zeitraum von 50 Jahren in der Anwendung Steildach, VIP mit 20 mm Dicke, XPS Deckschicht, Standort Freiburg, Normale Feuchtelast im Innenraum und südlicher Orientierung

Auf der anderen Seite zeigt der Partialdruck der trockenen Luftgase praktisch keine Abflachung der Steigung was auf den deutlich höheren Enddruck (im Bereich des Umgebungsdrucks von 1013,25 mbar) zurückgeführt werden kann. Der Innendruckanstieg ist die Summe der beiden simulierten Partialdrücke und zeigt dementsprechend einen leicht abflachenden Verlauf der Steigung.

### Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit von VIP auf Basis des Anstiegs der Partialdrücke trockener Luftgase und des Wasserdampfs

Die Anstiege der trockenen Luftgase, des Wasserdampfpartialdrucks und der im Kern des VIP gebundenen Feuchtigkeit tragen in unterschiedlicher Weise zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bei. Das nachfolgende Modell ermöglicht die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund dieser Einzelfaktoren. Dadurch kann durch das anhand der Innendrücke gemessene Permeationsverhalten auf die Anstiege der Wärmeleitfähigkeit über lange Zeiträume geschlossen werden.



Die Wärmeleitfähigkeit von VIP setzt sich zusammen aus der Wärmeleitfähigkeit der Gasphase ( $\lambda_G$ ), der Wärmeleitfähigkeit des Festkörpergerüsts ( $\lambda_F$ ), der Wärmeübertragung durch Strahlung ( $\lambda_S$ ) und einem Kopplungsterm ( $\lambda_K$ ).

$$\lambda = \lambda_G + \lambda_F + \lambda_S + \lambda_K \tag{16}$$

Der Anteil der Gaswärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Gasdrucks (Partialdrucks) kann nach Schwaab 2004 unter Kenntnis des Halbwertsdrucks  $p_{1/2,Gas}$  und der Wärmeleitfähigkeit des freien Gases  $\lambda_{Gas,frei}$  entsprechend Formel (17) berechnet werden.

$$\lambda_{Gas}(p_{Gas,part}) = \frac{\lambda_{Gas,frei}}{1 + \frac{p_{1/2}}{p_{Gas,part}}}$$
(17)

Die Parameter  $p_{1/2,Gas}$  und  $\lambda_{Gas,frei}$  werden aus Schwaab 2004 entnommen. Für die Anteile der trockenen Luftgase werden demnach vereinfachend die Werte für Stickstoff angesetzt. Die Parameter für den enthaltenen Wasserdampf wurden in Schwaab 2004 abgeschätzt (Tabelle 21).

## Tabelle 21:Parameter zur Berechnung der Gaswärmeleitfähigkeit als Funktion der Partial-<br/>drücke trockener Luftgase (vereinfachend N2) und Wasserdampf (H2O)

|                  | $\lambda_{Gas,frei}$ | <i>p</i> <sub>1/2</sub> |
|------------------|----------------------|-------------------------|
|                  | mW/(m K)             | mbar                    |
| N <sub>2</sub>   | 25,6                 | 600                     |
| H <sub>2</sub> O | 18,2                 | 240                     |

Neben der Veränderung der Gaswärmeleitfähigkeit durch den Anstieg der Partialdrücke im VIP sollen in dem Modell auch Erhöhungen der Wärmeleitfähigkeit des Festkörpergerüsts durch die adsorbierte Feuchtigkeit abgebildet werden. Hierzu werden aus dem modellierten Anstieg des Partialdrucks des Wasserdampfes im VIP entsprechend dem ermittelten Sorptionsverhalten die korrespondierenden mittleren Sorptionsfeuchtegehalte im Kern errechnet. Auf diese Weise lässt sich die zeitliche Veränderung der Materialfeuchte des Kerns bestimmen.

Zur Berechnung der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Auffeuchtung des Kerns benötigt man anschließend noch einen Faktor entsprechend Gleichung (18), was einen linearen Zusammenhang zwischen der Erhöhung der Materialfeuchte im Kern und der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit unterstellt.

$$C = \frac{\Delta \lambda}{\Delta X_{w,m}} \tag{18}$$

Zum Einfluss der Materialfeuchte im Kern auf die Wärmeleitfähigkeit von VIP existieren praktisch nur wenige Literaturangaben. Da außerdem davon auszugehen ist, dass das individuelle Kernmaterial einen Einfluss auf die Ausprägung dieses Effekts hat, wurde der Faktor C anhand von Messungen der Wärmeleitfähigkeit an den in dieser Untersuchung gealterten Paneelen abgeschätzt.



An jeweils einem Paneel der in den neun Klimastufen eingelagerten VIP wurde neben den Innendrücken auch die Wärmeleitfähigkeit bei einer Mitteltemperatur von 10°C bestimmt. Die Messungen erfolgten parallel zu der Bestimmung der Innendrücke im Frischzustand (vor der Alterung), nach drei, sechs und neun Monaten. Jedes der neun Paneele wurde somit in jeweils vier unterschiedlichen Zuständen (variierende Innendrücke und Feuchtegehalte im Kern) charakterisiert.

Die Ergebnisse der Messungen der Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12667 sind in nachfolgender Tabelle und Abbildung dargestellt.

|                   | Alterungsdauer in Tagen (abzüglich Unterbrechungen) |      |      |      |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------|---|------|------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|
|                   | 0   | 268  |      |      |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                   | Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]                        |      |      |      |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 23°C / 11 % r. F. | 4,41  | 4,50 | 4,55 | 4,58 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 23°C / 57 % r. F. | 4,15  | 4,24 | 4,30 | 4,33 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 23°C / 97 % r. F. | 4,23  | 4,34 | 4,43 | 4,48 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 42°C / 11 % r. F. | 4,29  | 4,47 | 4,61 | 4,66 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 45°C / 51 % r. F. | 4,30  | 4,54 | 4,76 | 4,87 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 46°C / 96 % r. F. | 4,49  | 4,86 | 5,24 | 5,34 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 70°C / 11 % r. F. | 4,29  | 4,43 | 4,57 | 4,72 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 69°C / 45 % r. F. | 4,35  | 4,92 | 5,35 | 5,73 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 71°C / 95 % r. F. | 4,09  | 5,45 | 6,85 | 8,22 |  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabelle 22:Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeit an gealterten VIP bei unterschiedlichen<br/>Lagerungsbedingungen und Alterungsdauern



Abbildung 25: Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeit an gealterten VIP bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und Alterungsdauern

Für das weitere Vorgehen zur Bestimmung des Faktors C wurden zunächst aus dem bei 20°C und 40°C bestimmten Gesamtinnendruck, die Anteile trockener Luftgase und des enthaltenen Wasserdampfs bei 20°C berechnet (siehe Kapitel 4.2 Methoden, Berechnung der Partialdrücke). Mit der gleichen Methodik wurden diese



Teildrücke anschließend auf 10°C umgerechnet (Mitteltemperatur bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit).

Mit den Teildrücken  $p_{dry,10^{\circ}C}$  und  $p_{H2O,10^{\circ}C}$  kann nun der Anteil der Gaswärmeleitfähigkeit entsprechend Gleichung (30) sowie der Sorptionsfeuchtegehalt im Kernmaterial entsprechend Gleichung (1) mit  $\alpha = 0,0188 \text{ m}-\%/\% \text{ r}$ . F. bestimmt werden. Aus dem Sorptionsfeuchtegehalt und dem Faktor C kann dann mit einem beliebigen Startwert für C der Anteil der Wärmeleitfähigkeit der Materialfeuchte des Kerns bestimmt werden.

Die Summe der auf diese Weise ermittelten Beiträge zur Gesamtwärmeleitfähigkeit der VIP stellt den als in Abhängigkeit von Druck und Kernfeuchte veränderlichen Anteil der Wärmeleitfähigkeit während der Alterung der Paneele dar. Folglich kann die Differenz zum Messwert der Wärmeleitfähigkeit als Anteil der (trockenen) Festkörperwärmeleitfähigkeit ( $\lambda_F$ ) und der Wärmeübertragung durch Strahlung ( $\lambda_S$ ) angenommen werden. Aus den jeweils vier Messungen in unterschiedlichen Zuständen wird dieser unveränderliche Anteil ( $\lambda_F + \lambda_S$ ) für jedes Paneel gemittelt.

Anschließend wird mit numerischen Methoden der Faktor C solange variiert, bis die Differenz zwischen den auf diese Weise rechnerisch ermittelten Anstiegen der Wärmeleitfähigkeit der in einem bestimmten Klima eingelagerten Paneele mit den Messwerten nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate minimiert ist.

Auf diese Weise wurde der Einfluss der Materialfeuchte des Kernmaterials auf die Wärmeleitfähigkeit mit C = 0,00278 W/(m K)/m-% ermittelt.

Der mit diesem Faktor C rechnerisch ermittelte Anstieg der Wärmeleitfähigkeit in Gegenüberstellung zu den mittels Messung ermittelten Anstiegsraten der Wärmeleitfähigkeit zeigt Abbildung 26.





#### Abbildung 26: Anstiegsraten der Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen – Vergleich der Messwerte nach DIN EN 12667 und dem Alterungsmodell

Die modellierte Wärmeleitfähigkeit in Gegenüberstellung zu den Messwerten für jede Einzelmessung ist in Abbildung 27 graphisch aufbereitet. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung.





Abbildung 27: Verlauf der Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen – Vergleich der Messwerte nach DIN EN 12667 und dem Alterungsmodell



#### Simulationen des Langzeit-Alterungsverhaltens

Anhand der Daten zu Temperatur und relativer Luftfeuchte auf der Warm- und Kaltseite der VIP in den Konstruktionen gemäß Kapitel 4.2 Zu untersuchende Musteranwendungen für die Bauteilsimulation mit WUFI, wurde wie vorausgehend beschrieben der Anstieg des Innendrucks und daraus abgeleitet die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit während der Nutzungsdauer modelliert.

Die Parameter zu den in der Simulation angesetzten VIP sind in Tabelle 23 zusammengefasst. Die Annahme zum Teildruck trockener Luftgase im Frischzustand, mit 85 % des Gesamtinnendrucks, wurde aus den untersuchten Paneelen ermittelt.

Tabelle 23:Parameter zu den VIP für die Modellierung des Langzeitverhaltens der Wärme-<br/>leitfähigkeit

| Parameter                          |                         | Einheit     | Wert       |  |
|------------------------------------|-------------------------|-------------|------------|--|
| Dicke                              | d                       | mm          | 20, 30, 40 |  |
| Innendruck                         | p <sub>ges</sub>        | mbar        | 2,5        |  |
| Teildruck tr. Luftgase             | p <sub>dry</sub>        | mbar        | 2,125      |  |
| Teildruck Wasserdampf              | <b>р</b> <sub>Н2О</sub> | mbar        | 0,375      |  |
| Frischwert Wärmeleitfähigkeit      | λ <sub>0</sub>          | W/(m K)     | 0,004      |  |
| Sorption (0 – 60 % r. F.)          | α                       | m-%/% r. F. | 0,0188     |  |
| Feuchteeinfluss Wärmeleitfähigkeit | С                       | W/(m K)/m-% | 0,00278    |  |

Im Folgenden sind zunächst für die Konstruktionen K1 – K5 die Verläufe der Wärmeleitfähigkeit über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angegeben.



Abbildung 28: Simulation der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Nutzungsdauer für die Konstruktion K1 – Dachterrasse in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima und Innenraumnutzung über einen Zeitraum von 0 – 50 Jahren







Abbildung 30: Simulation der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Nutzungsdauer für die Konstruktion K3 – Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung über einen Zeitraum von 0 – 50 Jahren



Abbildung 31: Simulation der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Nutzungsdauer für die Konstruktion K4 – Innendämmung in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung über einen Zeitraum von 0 – 50 Jahren





In allen Konstruktionen zeigt sich ein, dem Verlauf des Innendrucks entsprechend, degressiver Funktionsverlauf der Wärmeleitfähigkeit. Die Unterschiede zwischen den betrachteten Variationen innerhalb einer Konstruktion fallen spezifisch aus. Ins-



besondere bei den Konstruktionen K3 "WDVS" und K5 "Hinterlüftete Fassade" zeigen sich deutlichere Differenzierungen, die im Folgenden näher diskutiert werden.

Als Nennwert der Wärmeleitfähigkeit wird dem aktuellen Entwurf der Produktnorm für VIP folgend, die mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung angesetzt. In der ersten Nutzungshälfte werden auf diese Weise der Wärmestrom durch die Dämmung überschätzt und in der zweiten Nutzungshälfte unterschätzt. Durch den degressiven Verlauf des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit werden mit weiterer Nutzungsdauer die Anstiegsraten der Wärmeleitfähigkeit von Jahr zu Jahr geringer.

Im Folgenden soll untersucht werden, ob die modellierte mittlere Wärmeleitfähigkeit in den betrachteten Fällen im Bereich der Bemessungswerte typischer VIP von ca. 0,007 W/(m K) bleibt sowie die relevanten Parameter, die einen Einfluss auf das in den Konstruktionen und Varianten unterschiedliche Alterungsverhalten haben, diskutiert werden.

Hierzu wird die mittlere Wärmeleitfähigkeit der ersten 25 Jahren aus den bereits vorgestellten Verläufen ermittelt und getrennt nach den untersuchten Konstruktionen in Balkendiagrammen dargestellt.

Für jede Konstruktion sind außerdem ausgewählte Parameter angegeben, die das Alterungsverhalten beeinflussen, bzw. beschreiben:

 $\begin{array}{l} T_{\text{mittel}} : \text{arithmetisch gemittelte Temperatur an den Randflächen des VIP} \\ T_{\text{effektiv}} : \text{effektive mittlere Temperatur an den Randflächen des VIP} \\ \phi_{\text{mittel}} : \text{arithmetisch gemittelte r. F. an den Randflächen des VIP} \\ \phi_{\text{effektiv}} : \text{effektive mittlere r. F. an den Randflächen des VIP} \\ p_{a,dry} : \text{Partialdruckanstieg trockener Luftgase im VIP im 1. Jahr} \\ p_{a,H2O} : \text{Partialdruckanstieg des Wasserdampfs im VIP im 1. Jahr} \\ p_{\text{end},H2O} : \text{Partialdruck des Wasserdampfs im VIP nach unendlicher langer Zeit} \end{array}$ 

Die effektive mittlere Temperatur und Luftfeuchtigkeit stellen die Klimadaten dar, die notwendigerweise während des Jahres konstant anliegen müssten, um einen zu dem untersuchten Fall (mit Verteilungen von Temperatur und r. F.) gleichwertigen Innendruckanstieg zu erhalten. Durch die exponentielle Gewichtung (S. 54 ff.) verschieben sich die effektiven Temperaturen und r. F. gegenüber den arithmetisch gemittelten Werten tendenziell in Richtung höherer Werte.

Konkret wurde die Bestimmung der Effektivwerte folgendermaßen vorgenommen. Aus dem Zusammenhang

$$\ln(p_{a,H20}) = \frac{a_{H20}}{T_{eff}} + b_{H20} \cdot \varphi_{eff} + c_{H20}$$
(19)

wird zunächst nach Teff umgestellt. Man erhält hieraus

$$T_{eff} = \frac{u_{H20}}{\ln(p_{H20}) - b_{H20} \cdot \varphi_{eff} - c_{H20}}$$
(20)



Aus dem Zusammenhang

$$\ln(p_{a,dry}) = \frac{a_{dry}}{T_{eff}} + b_{dry} \cdot \varphi_{eff} + c_{dry}$$
(21)

erhält man durch Umstellen nach  $\phi_{\text{eff}}$ 

$$\varphi_{eff} = \frac{a_{H2O} \cdot \ln(p_{dry}) - a_{H2O} \cdot c_{dry} - a_{dry} \cdot \ln(p_{H2O}) + a_{dry} \cdot c_{H2O}}{a_{H2O} \cdot b_{dry} - a_{dry} \cdot b_{H2O}}$$
(22)

Durch Einsetzen von (35) in (33) wird dann T<sub>eff</sub> berechnet.





In der Anwendung "Dachterasse" (Abbildung 33) kann aufgrund der horizontalen Bauteillage kein Einfluss der Orientierung des Bauteils ermittelt werden. Der Einfluss der Deckschichten auf die am VIP anliegenden mittleren Temperaturen ist mit ca. 0,1°C gering. Die effektiven Temperaturen fallen im Schnitt ca. 1,5°C höher aus.

Der geringe, aber vorhandene Einfluss der Deckschichten auf den Anstieg der Wärmeleifähigkeit ist eher auf den zusätzlichen Diffusionswiderstand zurückzuführen, der zu einer geringeren relativen Luftfeuchte an den Folien der VIP führt. Dem entsprechend zeigen sich an den VIP mit Deckschichten niedrigere Werte des Anstiegs des Wasserdampfpartialdrucks p<sub>a,H2O</sub>. Der Partialdruckanstieg trockener Luftgase ist nicht in dem Maße von der r. F. abhängig (vgl. die Koeffizienten b in Abbildung 18 und Abbildung 20) und reagiert in der betrachteten Anwendung dem entsprechend mit einer geringeren Sensitivität.

Bei ansonsten gleicher Nutzung ist der Einfluss des Standorts (Freiburg vs. Holzkirchen) in dieser Anwendung vernachlässigbar, was wieder auf die exponentielle Gewichtung von Temperatur und r. F. zurückzuführen ist. Während die mittlere am VIP in dieser Anwendung anliegende Temperatur in Freiburg ca. 0,9°C höher ist als in Holzkirchen fällt die effektive Temperatur nur um 0,5°C höher aus. Noch deutlicher



ist der Unterschied zwischen mittleren und effektiven Werten bei der relativen Luftfeuchtigkeit, die sich bei den Effektivwerten zwischen Freiburg und Holzkirchen praktisch anpasst. Die Unterschiede in den Anstiegsraten der Partialdrücke sind demnach gering.

Ein deutlicherer Einfluss lässt sich durch die Nutzung des Innenraums mit erhöhter Feuchtelast erkennen. Bei annähernd identischen Temperaturen führt hier die deutliche erhöhte relative Luftfeuchtigkeit zu erhöhten Anstiegsraten der Partialdrücke.

In Abbildung 34 sind die Ergebnisse für die untersuchte Anwendung "Steildach" zusammengefasst. Im Vergleich mit der Anwendung "Dachterrasse" (Abbildung 33) ist die mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung hier insgesamt auf einem niedrigeren Niveau, was vor allem auf die insgesamt deutlich niedrigere anliegende relative Luftfeuchtigkeit (im Schnitt ca. 50 % - 60 %) zurückgeführt werden kann.

| 0.007                       |                 |        |       |                 |         |                 |       |                 |       |                 |         |       |       |         |       |
|-----------------------------|-----------------|--------|-------|-----------------|---------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|---------|-------|-------|---------|-------|
| <u></u> 0.0065              |                 |        |       |                 |         |                 |       |                 |       |                 |         |       |       |         |       |
| E 0.006                     |                 |        |       |                 |         |                 |       |                 |       |                 |         |       |       |         |       |
| 0.0055                      | -               | -      |       |                 |         |                 | -     | -               | -     | -               | -       | -     | -     | -       |       |
| 0.005 <sup>2</sup>          |                 | -      | -     | -               | -       | -               |       |                 | -     |                 |         | -     |       |         | -     |
| ∼ 0.0045                    | -               | -      | -     |                 | -       |                 | -     | -               |       | -               | -       | -     |       |         | -     |
| 0.004                       |                 |        |       |                 |         |                 |       |                 |       |                 |         |       |       |         |       |
| T <sub>mittel</sub> [°C]    | 16.4            | 16.4   | 16.4  | 15.8            | 15.8    | 15.8            | 15.8  | 15.8            | 15.8  | 14.6            | 14.7    | 14.6  | 15.3  | 15.3    | 15.3  |
| T <sub>effektiv</sub> [°C]  | 18.2            | 18.1   | 18.1  | 18.3            | 18.2    | 18.1            | 18.2  | 18.1            | 18.1  | 16.6            | 16.5    | 16.5  | 17.5  | 17.5    | 17.4  |
| $\phi_{mittel}$ [%]         | 54.2            | 54.0   | 53.7  | 48.5            | 48.2    | 48.4            | 54.6  | 54.4            | 54.3  | 61.7            | 61.3    | 60.3  | 57.5  | 57.2    | 56.7  |
| φ <sub>eff ektiv</sub> [%]  | 55.6            | 55.8   | 55.7  | 50.5            | 50.7    | 50.7            | 57.2  | 57.4            | 57.3  | 62.9            | 63.0    | 62.8  | 59.5  | 59.7    | 59.6  |
| p <sub>a,dry</sub> [mbar/a] | 0.661           | 0.658  | 0.658 | 0.645           | 0.642   | 0.641           | 0.666 | 0.663           | 0.662 | 0.627           | 0.625   | 0.625 | 0.649 | 0.647   | 0.646 |
| p <sub>a,H2O</sub> [mbar/a] | 0.384           | 0.383  | 0.383 | 0.350           | 0.350   | 0.349           | 0.396 | 0.395           | 0.393 | 0.396           | 0.395   | 0.394 | 0.395 | 0.394   | 0.393 |
| p <sub>end,H2O</sub> [mbar] | 10.1            | 10.1   | 10.0  | 8.7             | 8.7     | 8.7             | 9.8   | 9.8             | 9.7   | 10.3            | 10.2    | 10.0  | 10.0  | 9.9     | 9.8   |
| Deckschicht                 | Keine           | XPS    | GFK   | Keine           | XPS     | GFK             | Keine | XPS             | GFK   | Keine           | XPS     | GFK   | Keine | XPS     | GFK   |
| Raumklima                   | Normale Feuchte |        | uchte | Normale Feuchte |         | Erhöhte Feuchte |       | Erhöhte Feuchte |       | Erhöhte Feuchte |         |       |       |         |       |
| Orientierung                | g Süd           |        | Süd   |                 | Süd     |                 | Nord  |                 |       | West            |         |       |       |         |       |
| Standort                    | F               | reibur | g     | Ho              | lzkirch | en              | Ho    | lzkirch         | en    | Ho              | lzkirch | en    | Ho    | lzkirch | en    |

### Abbildung 34: Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K2 – Steildach in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung

Die Unterschiede zwischen den Standorten fallen auch hier tendenziell geringer aus, als die Klimadatensätze vermuten lassen. Die Zusammenhänge sind hier ähnlich wie bei der Anwendung "Dachterasse". In erster Linie gleichen sich die effektiven Temperaturen weitgehend an. Die etwas niedrigere relative Luftfeuchtigkeit am Standort Holzkirchen führt zu den niedrigeren Anstiegsraten des Wasserdampfpartialdrucks.

Die Varianten mit erhöhter Feuchtebelastung im Innenraum führen in den untersuchten Orientierungen von Süd, Nord und West zu leicht differenzierten Ergebnissen auf einem ggü. der Nutzung bei normaler Feuchte insgesamt leicht erhöhtem Niveau. Der Einfluss der in den Orientierungen deutlich unterschiedlichen Schlagregenbelastungen (vgl. Tabelle 11) bleibt gering, da das Modell einen Feuchteein-



trag in die Schalung nur über Luftinfiltration berücksichtigt, die nicht in dem Maße vom Schlagregen beeinflusst wird wie bspw. die Konstruktionen "Dachterasse" und "WDVS" (vgl. Tabelle 13).

Insgesamt bleibt die mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung auch in der Anwendung "Steildach" deutlich unter den derzeit üblichen Bemessungswerten von 0,007 W/(m K).

In Abbildung 35 sind die Ergebnisse für die untersuchte Anwendung "WDVS" zusammengefasst. Gegenüber den bisher diskutierten Anwendungen fällt hier die mittlere Wärmeleitfähigkeit insgesamt etwas höher aus und ist zwischen den Standorten und Bauteilorientierungen deutlich stärker differenziert.



Abbildung 35: Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K3 – Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung

Das kühlere und trockenere Klima in der Variante Holzkirchen, Süd, Normale Feuchtelast ggü. der Variante Freiburg, Süd, Normale Feuchtelast führt zu deutlich niedrigeren Anstiegsraten der Innendrücke trockener Luftgase und des Wasserdampfs.

Die erhöhte Feuchtelast im Innenraum führt bei annähernd gleichen Temperaturen zu einer deutlichen Erhöhung der effektiven Luftfeuchte, was sich in erhöhten Anstiegsraten des Wasserdampfpartialdrucks bemerkbar macht.

Bei der Anwendung "WDVS" ist auch ein deutlicher Einfluss der Bauteilorientierung erkennbar. Im zugehörigen WUFI® Modell wird 1 % des Schlagregens im Außenputz hinter dem WDVS angesetzt. Der Schlagregen in Holzkirchen ist überwiegend aus Orientierungen West bis Süd-West zu erwarten (Tabelle 11). Ein Wechsel der Bauteilorientierung von Süd auf Nord führt demnach zu um ca. 1°C niedrigeren ef-



FIW Bericht FO-2012/08

> fektiven Temperaturen und zu um ca. 7 % geringeren relativen Luftfeuchten an den Randflächen der VIP. Eine Orientierung nach Westen hebt die Temperaturen wieder an und führt gleichzeitig durch die Orientierung in Hauptrichtung des Schlagregens zu einer sehr hohen Feuchtebelastung. Gegenüber der günstigsten gerechneten Variante in Holzkirchen (Süd, Normale Feuchte) erhöht sich die mittlere Wärmeleitfähigkeit über die ersten 25 Jahre der Nutzung demnach um ca. 0,6 mW (ca. + 10 %).

> Insgesamt wird bei der Anwendung WDVS eine mittlere Wärmeleitfähigkeit im Bereich von ca. 0,0060 - 0,0067 W/(m K) erreicht. Auch hier bleiben die Werte damit unter dem angegebenen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für VIP von 0,007 W/(m·K).

In Abbildung 36 sind die Ergebnisse für die untersuchte Anwendung "Innendämmung" zusammengefasst. Die Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten sind hier im Vergleich zur Anwendung "WDVS" wieder insgesamt unausgeprägter. Da das Paneel bei der Innendämmung auf der Warmseite der Konstruktion liegt, sind die Unterschiede in den Temperaturen zwangsläufig geringer. Die am VIP anliegende relative Luftfeuchtigkeit steigt bei erhöhter Feuchtelast im Innenraum an.



#### Abbildung 36: Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K4 – Innendämmung in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung

Gegenüber der Anwendung "WDVS" ist im WUFI® Modell zur Innendämmung keine Beaufschlagung der an das VIP angrenzenden Bauteilschichten mit Schlagregenanteilen vorgesehen. Bei Variation der Orientierung des Bauteils ergeben sich daher nur geringe Unterschiede in der anliegenden Feuchtelast.


Insgesamt bleibt die mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung in der Anwendung "Innendämmung" deutlich unter den derzeit üblichen Bemessungswerten von 0,007 [W/(m K)]

In Abbildung 37 sind die Ergebnisse für die untersuchte Anwendung "hinterlüftete Fassade" zusammengefasst. Die Abhängigkeit der Anstiegsraten der Partialdrücke und damit der Wärmeleitfähigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte folgt den bereits diskutierten Zusammenhängen.

Obwohl hier im Vergleich mit den anderen untersuchten Konstruktionen zwischen der Variation des Standorts Freiburg und Holzkirchen mit ca. 1,7°C die größten Temperaturunterschiede bestehen, ist die mittlere Wärmeleitfähigkeit bei vergleichbarer Nutzung und Bauteilorientierung an beiden Standorten annähernd identisch.

Auch bei der hinterlüfteten Fassade wiegt der Einfluss der vorhandenen Unterschiede in der Feuchtebelastung also deutlicher als die Temperaturunterschiede.

| 0.007                       |          |        |       |       |         |       |       |         |       |       |         |       |       |         |       |
|-----------------------------|----------|--------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|
| ○ 0.0065                    |          |        |       |       |         |       |       |         |       |       |         |       |       |         |       |
| E 0.006                     |          |        | _     |       |         |       | -     | _       | -     | -     | -       | -     | _     | _       | -     |
| 0.0055                      | -        | -      | -     | -     |         |       |       | -       | -     |       | -       | -     | -     |         |       |
| ଞ୍ଚୁ 0.005                  | -        |        | -     | -     |         |       |       |         | -     |       | -       | -     | -     |         | -     |
| ∕⁻ 0.0045                   | =        | -      | -     | -     | -       |       | -     |         | -     | -     | -       |       | -     |         |       |
| 0.004                       | <b>-</b> |        |       |       |         |       |       |         |       |       |         |       |       |         |       |
| T <sub>mittel</sub> [°C]    | 15.9     | 15.9   | 15.9  | 13.7  | 13.7    | 13.7  | 13.7  | 13.7    | 13.7  | 13.7  | 13.7    | 13.7  | 13.7  | 13.7    | 13.7  |
| T <sub>effektiv</sub> [°C]  | 16.8     | 16.7   | 16.8  | 15.1  | 15.0    | 15.1  | 15.1  | 15.0    | 15.1  | 15.1  | 15.1    | 15.1  | 15.1  | 15.0    | 15.1  |
| $\phi_{mittel}$ [%]         | 67.9     | 67.6   | 69.3  | 67.9  | 67.6    | 69.5  | 76.2  | 75.9    | 78.0  | 76.3  | 76.0    | 78.2  | 76.1  | 75.8    | 77.8  |
| φ <sub>eff ektiv</sub> [%]  | 67.8     | 68.1   | 70.4  | 67.3  | 67.6    | 69.8  | 77.4  | 77.8    | 80.4  | 77.6  | 78.0    | 80.7  | 77.1  | 77.6    | 80.1  |
| p <sub>a,dry</sub> [mbar/a] | 0.649    | 0.649  | 0.658 | 0.590 | 0.589   | 0.597 | 0.623 | 0.621   | 0.631 | 0.624 | 0.622   | 0.633 | 0.621 | 0.620   | 0.630 |
| p <sub>a,H2O</sub> [mbar/a] | 0.438    | 0.439  | 0.459 | 0.389 | 0.390   | 0.407 | 0.470 | 0.471   | 0.496 | 0.472 | 0.473   | 0.499 | 0.467 | 0.468   | 0.492 |
| p <sub>end,H2O</sub> [mbar] | 12.2     | 12.2   | 12.5  | 10.6  | 10.6    | 10.9  | 11.9  | 11.9    | 12.2  | 12.0  | 11.9    | 12.2  | 11.9  | 11.9    | 12.2  |
| Deckschicht                 | Keine    | XPS    | GFK   | Keine | XPS     | GFK   | Keine | XPS     | GFK   | Keine | XPS     | GFK   | Keine | XPS     | GFK   |
| Raumklima                   | Norm     | ale Fe | uchte | Norm  | ale Fe  | uchte | Erhö  | hte Fe  | uchte | Erhö  | hte Fe  | uchte | Erhö  | hte Feu | uchte |
| Orientierung                |          | Süd    |       |       | Süd     |       |       | Süd     |       |       | Nord    |       |       | West    |       |
| Standort                    | F        | reibur | g     | Ho    | lzkirch | en    | Ho    | lzkirch | en    | Ho    | lzkirch | en    | Hc    | lzkirch | en    |

Abbildung 37 Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K5 – Hinterlüftete Fassade in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung

Insgesamt bleibt die mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung in der Anwendung "hinterlüftete Fassade" deutlich unter den derzeit üblichen Bemessungswerten von 0,007 [W/(m K)].

#### Einfluss der Paneeldicke auf das Alterungsverhalten

Für die prognostizierten Innendruckanstiege führt die Anwendung von VIP mit größerer Dicke zu günstigeren Ergebnissen. Die Permeation durch die Folienflächen



und Siegelnähte bleibt mit steigender Dicke annähernd gleich, während sich das Volumen der VIP proportional zur Dicke verhält. Bei ansonsten gleichen Randbedingungen wird sich der Anstieg des Innendrucks eines doppelt so dicken Paneels also halbieren.

Die Auswirkung der Verwendung entsprechend dickerer Paneele auf die mittlere Wärmeleitfähigkeit während 25 Jahren Nutzungsdauer zeigt Abbildung 38 - Abbildung 42.

Für jede Konstruktion wird dabei am Standort Holzkirchen die Anwendung bei Südorientierung und normaler Feuchtelast der Orientierung nach Westen mit erhöhter Feuchtelast im Innenraum gegenübergestellt. Die Dicke der VIP variiert von 20 mm – 40 mm. Ein Vergleich der an den Randflächen der VIP ermittelten mittleren Temperaturen und relativen Luftfeuchten zeigt, dass der Einfluss der Dicke der VIP auf die an das Paneel anliegende Klimabelastung praktisch vernachlässigbar ist.



Die Verwendung von Paneelen mit größerer Dicke führt in allen untersuchten Anwendungen zu deutlich niedrigeren Anstiegsraten der Wärmeleitfähigkeit.

Abbildung 38:

Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K1 – Dachterasse in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung für VIP unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40 mm) mit einer Deckschicht aus 5 mm XPS





#### Abbildung 39:

Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K2 – Steildach in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung für VIP unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40 mm) mit einer Deckschicht aus 5 mm XPS



#### Abbildung 40:

 Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K3 – WDVS in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung für VIP unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40 mm) mit einer Deckschicht aus 5 mm XPS





#### Abbildung 41:

Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K4 – Innendämmung in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung für VIP unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40 mm) mit einer Deckschicht aus 5 mm XPS



#### Abbildung 42:

Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K5 – hinterlüftete Fassade in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung für VIP unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40 mm) mit einer Deckschicht aus 5 mm XPS



## Bewertung von Referenzklimaten zur Bestimmung des Alterungsverhalten und zur Ableitung von Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit

Der aktuelle Entwurf einer Produktnorm für VIP (TC 88, WI 00088333) beschreibt ein Verfahren zur künstlichen Alterung von Paneelen bei 50°C und 70 % r. F.. Im Gegensatz zum bisherigen deutschen Verfahren wird auch ein erhöhtes Wasserdampfpotenzial angesetzt, um diesem Alterungsmechanismus besser gerecht zu werden als bei der reinen Temperaturlagerung. Nach bestimmten Zeitabständen werden die Paneele entnommen und der Anstieg des Innendrucks sowie die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Aus diesen Messwerten können anschließend jährliche Druckanstiegsraten und Anstiegsraten der Wärmeleitfähigkeit berechnet werden.

Anschließend werden die Anstiegsraten der Wärmeleitfähigkeit auf Bedingungen bei 23°C und 50 % r. F. umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt unter Kenntnis des Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchte auf die Permeationsraten der Folienumhüllung. Dieses Verhalten wird getrennt für die Permeation trockener Luftgase und Wasserdampfs mit sogenannten Beschleunigungsfaktoren beschrieben, die ebenfalls nach einem in dem Normentwurf beschriebenen Verfahren bestimmt werden. Als Grundlage für den Nennwert der Wärmeleitfähigkeit wird anschließend die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Paneels während der ersten 25 Jahre der Nutzung bei konstanten Klimabedingungen von 23°C und 50 % r. F. herangezogen.

Im Folgenden soll anhand des in dieser Untersuchung spezifisch entwickelten Alterungsmodells unter Berücksichtigung der vorgestellten Variation von Anwendungsfällen und klimatischen, bzw. nutzungsbedingten Einflussfaktoren untersucht werden, ob das in dem aktuellen Entwurf zur Produktnorm angesetzte Klima von 23°C und 50 % r. F. zur Beurteilung des Alterungsverhalten von VIP geeignet ist.

In der Abbildung 33 - Abbildung 42 sind für jede untersuchte Variante der Anwendung die mittleren und effektiven Temperaturen und relativen Luftfeuchten mit angegeben. Die effektiven Werte repräsentieren dabei die klimatischen Bedingungen, die konstant am Paneel anliegen müssten, um das der vorliegenden spezifischen Verteilung von Temperatur und relativer Feuchte entsprechende Alterungsverhalten zu erzeugen. Die meisten effektiven Klimate liegen in einem Bereich von ca.  $15^{\circ}$ C –  $18^{\circ}$ C und ca. 50 % - 95 % r. F..

Das in dieser Arbeit entwickelte Alterungsmodell berücksichtigt zunächst eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch die Erhöhung des Innendrucks und damit der Veränderung der Gaswärmeleitfähigkeit (getrennt für trockene Luftgase und Wasserdampf).

Um zu überprüfen, ob der Innendruckanstieg durch eine Konstantklimalagerung bei bei 23°C und 50 % r. F. die durch die effektiven Klimate provozierten Innendruckanstiege abdeckt, werden aus dem Zusammenhang  $p_{a,ges}$  [mbar/a] = f( $\Theta$ ,  $\varphi$ ) (Abbildung 17) Isolinien mit einem Innendruckanstieg  $p_{a,ges}$  = f(23°C, 50 %) und  $p_{a,ges}$  = f(23°C, 80 %) ermittelt (Abbildung 43).





Abbildung 43: Isolinien für Innendruckanstige p<sub>a,ges</sub> [mbar/a] = f(23°C, 50 % r. F.) und p<sub>a,ges</sub> [mbar/a] = f(23°C, 80 % r. F.)

Es ist zu erkennen, dass die Effektivklimate aus den untersuchten Anwendungen (Standorte Freiburg und Holzkirchen mit Konstruktionen gemäß Tabelle 8) bis auf wenige Ausnahmen unter, bzw. im Bereich der Isolinien entsprechend einem Druckanstieg einer Konstantklimalagerung bei 23°C und 50 % r. F. entsprechen.

Mit Bezug auf die Innendruckanstiege lässt sich demnach feststellen, dass ein Bezug der Alterung auf konstante Klimabedingungen von 23°C und 50 % r. F., wie im aktuellen Entwurfsdokument zur Produktnorm für VIP enthalten, die baupraktischen Bedingungen repräsentiert. Ein Bezug auf das Feuchtklima 23°C und 80 % r. F. – als typisches Referenzklima für wärmetechnische Kennwerte nach DIN 4108-4 für hygroskopische Materialien – deckt die ermittelten Druckanstiege aller untersuchten Anwendungen auf der sicheren Seite ab.

Um das Alterungsverhalten bei 23°C und 50 % r. F. bzw. 23°C und 80 % r. F. mit den untersuchten Anwendungsfällen zu vergleichen, wurden diese Klimate in das entwickelte Alterungsmodell eingesetzt und die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit entsprechend dem vorgestellten Vorgehen berechnet.

Dabei wurden zwei Fälle unterschieden. Zusätzlich zu dem degressiven Ansatz, der ein Sättigungsverhalten der Druckanstiege und Auffeuchtung des Kernmaterials berücksichtigt, wurde der Druckanstieg des ersten Jahres linear fortgeschrieben. Dieses Vorgehen entspricht der Methodenbeschreibung im aktuellen Entwurfsdokument der Produktnorm von VIP. Diese Berechnungsart schiebt intentionsgemäß die Anstiege des Innendrucks und der Wärmeleitfähigkeit auf die sichere Seite. Im Folgenden werden beide Ansätze verglichen und der Kurvenschar an Wärmeleitfähigkeitsanstiegen entsprechend dem untersuchten Anwendungsspektrum gegenübergestellt (Abbildung 44 - Abbildung 45).





Abbildung 44: Vergleich der Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit bei Lagerung im Klima 23/50 mit den untersuchten Anwendungen, Blaue Strichlinie: lineare Fortschreibung des Druckanstiegs im ersten Jahr, Orange Strichlinie: Ansatz mit Sättigungsfunktion





Während der jährliche Innendruckanstieg bei Lagerung im Klima 23°C und 50 % r. F. noch die meisten untersuchten Anwendungen gut repräsentiert, liegen die ermittelten zeitlichen Verläufe der Wärmeleitfähigkeit nahezu aller Anwendungen deutlich über dem Verlauf der Wärmeleitfähigkeit der Konstantklimalagerung bei 23°C und



50 % r. F.. Der lineare Ansatz der Anstiegsraten aus dem ersten Jahr führt zwar zu höheren Werten, trotzdem werden auch hier von einigen Anwendungen höhere Werte von  $\lambda_{m,25}$  erreicht.

Der Grund für dieses Verhalten liegt in der Sensitivität des Modells bezüglich der Auffeuchtung des Kernmaterials. Der hier angesetzte Faktor zur Beschreibung der Abhängigkeit der Festkörperwärmeleitfähigkeit von der Materialfeuchte des Kerns ist mit ca. 2,7 mW/% im Vergleich zu Literaturwerten (z. B. wird im aktuellen Entwurf der Produktnorm der VIP ein Einfluss von 0,5 mW/% angesetzt) relativ hoch. Der Wert wurde wie beschrieben aus der Anpassung der Messdaten aus den Laborversuchen an das Rechenmodell ermittelt. Der Faktor kann also neben dem Wärmeleitfähigkeitsanstieg aufgrund der enthaltenen Kernfeuchte auch noch andere Einflüsse enthalten. Der gewählte Ansatz des Faktors zur Berücksichtigung der Kernfeuchte liefert jedoch wie gezeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und den Ergebnissen der Laboruntersuchung (Abbildung 27).

Zudem repräsentiert die Konstantklimalagerung bei 23°C und 80 % r. F. unter Ansatz der ermittelten Randbedingungen sowohl für den linearen als auch für den degressiven Ansatz realistische Werte von  $\lambda_{m,25}$  die mit ca. 0,0065 – 0,0070 W/(m K) praktisch alle untersuchten Anwendungsfälle abdecken (Abbildung 45).

In Abbildung 46 sind die ermittelten Werte von  $\lambda_{m,25}$  für die Konstantklimalagerungen bei 23°C / 50 % r. F., 23°C / 80 % r. F. und 50°C / 70 % r. F. für den degressiven und linearen Ansatz zusammengestellt.







#### 4.5 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse aus Forschungsbereich A

Zusammenfassend können folgende Kernaussagen für die im Forschungsbereich A durchgeführten Untersuchungen abgeleitet werden.

Das Alterungsverhalten von VIP wird durch die Anwendung, den Standort des Gebäudes, die Orientierung des Bauteils und das Innenraumklima beeinflusst. Neben dem Einfluss der Temperatur ist insbesondere auch die anliegende relative Luftfeuchte entscheidend für die Entwicklung des Innendrucks während der Nutzung. Dabei werden die Anstiege der Partialdrücke der trockenen Luftgase und des im Paneel enthaltenen Wasserdampfs in unterschiedlicher Weise beeinflusst. Während der Partialdruckunterschied der trockenen Luftgase während der im Bauwesen betrachteten Zeiträume und dem in dieser Zeit zu verzeichenden Innendruckanstieg des Paneels prozentual nur unbedeutend abgebaut wird, strebt der Wasserdampfpartialdruck im Paneel innerhalb der ersten 25 Jahre der Nutzung einem Grenzwert entgegen, der dem durchschnittlichen Wasserdampfpartialdruck der Umgebung in der bestimmten Nutzung entspricht. Aus diesem Grund zeigt sich ein degressiver Verlauf des Innendruckanstiegs.

Prinzipiell folgen der Innendruckanstieg durch Permeation trockener Luftgase und Wasserdampf jeweils einer Exponentialfunktion mit den Variablen Temperatur und relativer Luftfeuchte (Arrheniusverhalten). Aus dem ermittelten exponentiellen Zusammenhang und einem bekannten, gemessenen oder berechneten Druckanstieg auf Basis real ermittelter oder durch Simulationen berechneter Verteilungen von anliegenden Klimata können effektive Wertepaare von Temperatur und relativer Luftfeuchte berechnet werden.

Diese Effektivklimate entsprechen den Konstantklimabedingungen, die an einem Paneel dauerhaft anliegen müssen, um einen äquivalenten Innendruckanstieg zu erzeugen, wie dieser bei den vorher untersuchten tages- und jahreszeitlich schwankenden Klimata auftreten würde. Durch die exponentielle Gewichtung der in realen Anwendungen vorliegenden Verteilungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte ergeben sich effektive Werte von Temperatur und relativer Luftfeuchte die höher sind als die Mittelwerte der zu Grunde liegenden Verteilungen.

Die in vorliegender Untersuchung ermittelten Effektivklimate repräsentieren an den Barrierefolien von VIP anliegende Randbedingungen von Temperatur und relativer Feuchte, die für unterschiedliche Standorte, - Konstruktionen, - Bauteilorientierungen, - Innenraumnutzungen und Paneelaufbauten (Deckschichten) repräsentativ sind. Dementsprechend können diese Effektivklimate zur Abschätzung möglicher sinnvoller Referenzklimate zur Beurteilung der künstlichen Alterung von VIP verwendet werden. Hierzu wurden mit dem entwickelten Modell die Innendruckanstiege für eine Konstanzklimalagerung bei 23°C / 50 % r. F. und 23°C / 80 % r. F. ermittelt und mit den Innendruckanstiegen bei Anwendung der ermittelten Effektivklimate verglichen.



Zur Beurteilung des Alterungsverhaltens von VIP bzgl. der Innendruckanstiege scheint eine Konstantklimalagerung bei 23°C und 50 % r. F. ausreichend. Es liegen nur vereinzelte Effektivklimata vor, die zu leicht höheren Innendruckanstiegsraten führen. Ein Ansatz des Referenzklimas 23°C und 80 % r. F. liegt bzgl. einer Beurteilung der Innendruckanstiege der VIP in jedem Fall auf der sicheren Seite.

Da zur Beurteilung des Alterungsverhaltens von VIP bzgl. der Wärmeleitfähigkeit jedoch zusätzlich der Einfluss der Erhöhung der Gerüstwärmeleitfähigkeit des Kernmaterials als Funktion der Materialfeuchte zu berücksichtigen ist, muss die Betrachtung auf die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit ausgeweitet werden. Diese Zusammenhänge sind jedoch je nach verwendetem Kernmaterial spezifisch und daher nicht allgemeingültig.

Zur Beurteilung des Alterungsverhaltens von VIP bzgl. des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit erscheint unter Ansatz der Randbedingungen vorliegender Untersuchung – das heißt unter Ansatz des degressiven Verhaltens – der Vergleich mit einer Konstantklimalagerung bei 23°C und 80 % r. F. angemessen. Nur zwei Anwendungen weisen während dem betrachteten Zeitraum von 50 Jahren phasenweise leicht höhere Wärmeleitfähigkeit auf.

Im aktuellen Entwurf der Produktnorm von VIP wird als Referenzklima zur Beurteilung der Alterung ein Konstanzklima von 23°C und 50 % r. F. zu Grunde gelegt. Im Unterschied zu dem in dieser Arbeit angewendeten genauen Modell, das einen degressiven Funktionsverlauf der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit ansetzt, wird hier jedoch der im ersten Jahr ermittelte Anstieg des Innendrucks bzw. der Wärmeleitfähigkeit linear fortgeschrieben, was zu realistischen Werten führt, welche die meisten untersuchten Anwendungen abdecken.

Die mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung liegt bei den in dieser Arbeit untersuchten Varianten der Nutzung für VIP mit einer Dicke von 20 mm im Bereich von ca. 5,5 – 6,7 mW/(m K). Die aktuellen Bemessungswerte von ca. 7 mW/(m K) können damit als ausreichend bestätigt werden, was die Signifikanz und Aussagekraft der aktuell angewendeten Verfahren zur künstlichen Alterung von VIP bestätigt. Bei dickeren Paneelen verringern sich die Anstiegsraten der Wärmeleitfähigkeit signifikant.



# 5 Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen"

Bedingt durch die hohe Dämmwirkung der Vakuumelemente ergeben sich an den Rändern der Paneele und aufgrund von Durchdringungen – z.B. durch Befestigungselemente - massive Wärmebrücken. Die Wärmebrückenwirkung ist hier gegenüber ähnlichen Konstruktionen mit herkömmlichen Dämmstoffen noch deutlicher ausgeprägt. Die Wärmebrückenwirkung der zwei- und dreidimensionalen Wärmebrücken wird mittels numerischen Simulationen mit zwei- oder dreidimensionalen Finite-Differenzen (FD-) bzw. Finite-Elemente (FE-) Methoden bestimmt und in einer erhöhten äquivalenten Wärmeleitfähigkeit für die VIP-Elemente oder mittels eines Zuschlags zum U-Wert der ungestörten Konstruktion berücksichtigt. Hierbei müssen die spezifischen Werte für alle vorliegenden Bauteilgrößen, Setzdichten der Befestiger und Befestigerabmessungen berücksichtigt werden. Die Ermittlung der spezifischen äquivalenten Wärmeleitfähigkeit bzw. des Zuschlags zum U-Wert des ungestörten Aufbaus kann dann über einen Baukasten in einem Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen.

Auf die Untersuchung einer Interaktion (aufgrund des bei manchen Bauelementen geringen Abstands der mechanischen Befestigungsmittel untereinander) der dreidimensionalen Wärmebrückeneffekte kann verzichtet werden. Die gemeinsame Wärmebrückenwirkung zweier Befestigungsmittel, deren Einflussbereiche sich überschneiden, ist geringer als die Summe der beiden Wärmebrücken bei nicht überschneidenden Einflussbereichen. Die berechneten Ergebnisse für die  $\chi$ -Werte liegen somit "auf der sicheren Seite", da deren Einflussbereiche sich in kleinteiligeren Bauelementen überschneiden.

Für die Bauelemente wird der korrigierte U-Wert eines jeden einzelnen Elements mit den folgenden Formeln bestimmt:

$$U_{Element} = \frac{Q_{Element}}{A_{Element} \cdot \Delta \vartheta}$$
(23)

$$Q_{Element} = \Delta \vartheta \cdot (U_0 \cdot A_{Element} + \sum \psi_i \cdot l_i + \sum \chi_i \cdot n_i)$$
(24)

Hierbei ist:

| U <sub>Element</sub> | korrigierter U-Wert eines Bauelementes in W/(m <sup>2</sup> ·K)         |
|----------------------|---|
| Q <sub>Element</sub> | Wärmestrom durch das Bauelement in W                                    |
| A <sub>Element</sub> | Fläche des Bauelements in m <sup>2</sup>                                |
| $\Delta \vartheta$   | Temperaturdifferenz in K  |
| U <sub>0</sub>       | U-Wert des Aufbaus im ungestörten Bereich (ohne Wärmebrücken,           |
|                      | eindimensional ermittelt in Paneelmitte) in W/(m²·K)                    |
| $\psi_i$             | linearer Wärmedurchgangskoeffizient (z.B. der Fugen zwischen den        |
|                      | VIP-Platten oder z.B. für die Ränder der VIP-Platten, die nicht an eine |
|                      | andere VIP-Platte stoßen) in W/(m·K)                                    |



- $\chi_i$  punktueller Wärmedurchgangskoeffizient für die untersuchten Durchdringungen oder Befestigungsmittel in W/K
- I,n Länge der Fugen/Ränder bzw. Anzahl der jeweiligen Durchdringungen eines Bauelements in m bzw. einheitslos

In den dreidimensionalen Simulationen zur Ermittlung der punktuellen Wärmebrückeneffekte der Befestigungsmittel wird die Hüllfolie der VIPs nicht abgebildet, da dieses bei dreidimensionalen Simulationen zu immens großen Modellen und dementsprechend langen Berechnungszeiten führt. Für die VIPs wird der in vielen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen festgelegte Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von 0,007 W/(m·K) angesetzt. Hierin sind für das Zulassungsverfahren die Wärmebrückeneffekte der Folienränder (und nur dieser) bereits berücksichtigt.

Im Folgenden werden die durchgeführten Untersuchungen zum Forschungsbereich B "Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen" vorgestellt. Im Wesentlichen werden zwei Berechnungsansätze verfolgt.

Im Kapitel 5.1 werden Wärmebrückeneffekte an VIP, verursacht durch die Variation unterschiedlicher Randverbünde und Deckmaterialien untersucht. Dieser Teil der Untersuchung behandelt also die linienförmigen Wärmebrücken an einem als ideal angenommenen Paneelverband. Die Verwendung von Randstreifen und Deckmaterialien für VIP erleichtert insbesondere die bauliche Anwendung, da die Paneele einerseits sicherer gehandhabt werden können (Deckschichten), andererseits die Verlegung und Befestigung vereinfacht wird (Randstreifen).

In Kapitel 5.2 sind Untersuchungen zu punktförmigen Wärmebrücken der Befestigungsmittel (Dübel und Anker) zusammengefasst. Die hier vorgestellten Berechnungen decken exemplarisch typische Beispielkonstruktionen ab und diskutieren unter Ansatz realer Randbedingungen die Einflüsse der unterschiedlichen Konstruktion der Befestigung auf die Wärmebrückeneffekte. Die linienförmige Wärmebrücke aus dem Randvebund wird hier wie bereits beschrieben in einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Paneels berücksichtigt.

# 5.1 Untersuchung von Wärmbrückeneffekten am Vakuumdämmpaneel durch Randverbund und Deckmaterialien

#### Methodik

Zur einfacheren und sicheren Handhabung und Verarbeitung der Vakuumpaneele im Bauwesen, ist es notwendig, die dünnen Folien, die das Vakuum gewährleisten, vor den alltäglichen mechanischen Belastungen auf Baustellen zu schützen. Hierzu erhalten die Paneele eine Decklage bzw. Kaschierung, die eine einfache Beschädigung während des Bauablaufs verhindern bzw. zumindest erschweren sollen. Oftmals werden auch Randstreifen oder vorkomprimierte Dichtbänder eingesetzt, die



das Vakuum zusätzlich schützen und zudem - sofern notwendig - eine mechanische Befestigung der Dämmplatten auf den Untergrund erlauben.

Sowohl für die Decklage als auch für den Randstreifen stehen unterschiedliche Materialien zur Verfügung, die sich in ihren thermischen Eigenschaften deutlich von den Vakuumpaneelen unterscheiden. Durch den Materialwechsel am Rand werden die ohnehin am Folienrand vorhandenen Wärmebrücken verstärkt, deren Einflüsse bei der Angabe von U- bzw.  $\lambda_{eff}$ -Werten von Vakuumpaneelen sowie bei der konkreten Planung und Umsetzung zu berücksichtigen sind.

Anhand von 2-dimensionalen Wärmebrückenberechnungen in der Simulationsumgebung HEAT wurden dazu die Wärmeverluste über den Randverbund und die Decklagen untersucht und quantifiziert.

Dabei wurden unterschiedliche Ausführungen durch Variation der Materialien (für Randverbund und Decklage), der Dämmstärken (Vakuumdämmung) und der Verbundbreite (Randverbund) abgebildet und ausgewertet.

Als Decklagen wurden extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS), glasfaserverstärkter Kunsstoff (GFK) und Metall in geeigneten Stärken untersucht (Tabelle 1). Die Materialien sind so gewählt, dass damit übliche Wärmeleitfähigkeiten solcher Randstreifen abgedeckt werden.

| Tabelle 24: | Materialien für die Decklage von Vakuumpaneelen, deren Wärmeleitfähigkeit |
|-------------|---|
|             | und Schichtdicke.   |

| Material Decklage/ Kaschierung           | λ-Wert [W/(m K)] | Dicke [mm] |
|--|------------------|------------|
| Extrudierter Polystyrol Hartschaum (XPS) | 0,030            | 5          |
| Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)    | 0,30             | 3          |
| Metall                                   | 160              | 1,5        |

Zusätzlich wurden die Stärke der Vakuumdämmung mit 20, 30 und 40mm und die Breite des Randverbunds mit 5, 10, 25 und 50mm, wie nachfolgend in Tabelle 25 dargestellt, variiert. Damit werden alle derzeit bauüblichen Dicken abgedeckt. Die Randstreifenbreiten repräsentieren unterschiedlichste Befestigungsarten, angefangen bei dünneren Randstreifen wie diese bei geklebten Systemen bzw. der Verlegung unter Estrich angewendet werden, bis hin zu breiten Randstreifen, welche je nach Anwendung eine Durchdringung der Dämmebene mit unterschiedlichen Typen von Dübeln oder Flachankern ermöglichen.



# Tabelle 25:Materialien für den Randverbund von Vakuumpaneelen, Wärmeleitfähigkeit und<br/>Schichtdicken.

| Material Randverbund          | Lambda [W/(m K)] | Dicke [mm]       |
|-------------------------------|------------------|------------------|
| Aerogel (Aero)                | 0,015            | 0, 5, 10, 25, 50 |
| Expandiertes Polystyrol (EPS) | 0,035            | 0, 5, 10, 25, 50 |
| Calciumsilikat (CaSi)         | 0,065            | 0, 5, 10, 25, 50 |

Die Vergleichsbasis bildet jeweils (d.h. je Randstreifen-Material) die "ideale" Variante ohne Randstreifen, mit Decklagen. Ausgehend von der Vakuumdämmung in verschiedenen Dämmstärken werden Material und Breite des Randverbunds sowie die Decklage variiert, womit sich letztlich 135 Varianten ergeben. Abbildung 47 zeigt die Methodik der systematischen Variation der Untersuchungsvarianten.



#### Abbildung 47: Methodik und Varianten.

Die  $\psi$ -Werte entsprechend den durchgeführten Berechnungen beziehen sich jeweils auf den Paneelrand.

In Abbildung 48 - Abbildung 56 sind jeweils die errechneten  $\psi$ -Werte für die untersuchten Ausführungen als Funktion der Breite des Randverbundes dargestellt. Die Ordinate ( $\psi$ -Werte) ist in allen Abbildungen auf 0,16 W/(m K) skaliert, um einen direkten Vergleich zwischen den Größenordnungen der Wärmebrückenwirkung der untersuchten Varianten zu ermöglichen.



## Wärmebrücken durch Randverbund und Deckmaterial bei 20mm Vakuumdämmung

Die Kombination einer Vakuumdämmung von 20 mm Stärke mit unterschiedlichen Randstreifen und Deckmaterialien führt zu folgenden Ergebnissen in den Berechnungen.

#### 20 mm dicke VIP mit Aerogel-Randverbund

Erwartungsgemäß fallen die  $\psi$ -Werte für den Randverbund bei Ausführung in Aerogel-Dämmung im Vergleich der hier untersuchten Materialien am niedrigsten aus. Die Wärmeleitfähigkeit des Aerogels ist mit  $\lambda$ =0,015 W/(mK) bereits sehr niedrig und am nächsten zur Vakuumdämmung. Dennoch liegt dieser Wert im Vergleich zur Vakuumdämmung um Faktor 2 höher, weshalb bereits hier gut zu erkennen ist, dass sich mit zunehmender Breite des Randverbunds die  $\psi$ -Werte erhöhen.

Die Breite des Randverbunds steht zudem in Wechselwirkung zu den verwendeten Materialien für die Decklage. Ausgehend von der "idealen" Vakuumdämmung ohne Randverbund steigen die  $\psi$ -Werte bei Verwendung der unterschiedlichen Deckmaterialien zunächst nur marginal (5 und 10mm). Erst bei größeren Breiten für den Randverbund (25 und 50mm) ergeben sich erkennbare Unterschiede: Die Wärmeleitung über den Randverbund nimmt zu, wobei GFK und Metall als Decklagen durch ihre hohen Wärmeleiteigenschaften diesen Effekt begünstigen. Im Vergleich verhalten sich Metall und GFK trotz sehr unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten letztlich ähnlich ( $\psi$ 50-Wert = 0,020 vs. 0,0196 W/(m K)), der Einsatz von XPS als Deckmaterial bewirkt jedoch bereits eine signifikante Verbesserung ( $\psi$ 50=0,0146 W/(m K)).

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen nach Deckmaterial und Breite des Randverbundes für 20mm Vakuumpaneele als Tabelle (Tabelle 26) und Grafik (Abbildung 48) abgebildet.

| Material | Einheit | 0 mm | 5 mm   | 10 mm  | 25 mm  | 50 mm  |
|----------|---------|------|--------|--------|--------|--------|
| Metall   | W/(m K) | 0    | 0,0020 | 0,0040 | 0,0100 | 0,0200 |
| GFK      | W/(m K) | 0    | 0,0019 | 0,0039 | 0,0098 | 0,0196 |
| XPS      | W/(m K) | 0    | 0,0015 | 0,0029 | 0,0072 | 0,0144 |

Tabelle 26:berechnete ψ-Werte für 20 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungs-<br/>breite des Aerogel-Randverbundes und unter Berücksichtigung des Deckmate-<br/>rials.





Abbildung 48: Verlauf der ψ-Werte für 20 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des Aerogel-Randverbundes und für verschiedene Deckmaterialien.

#### 20 mm dicke VIP mit EPS-Randverbund

Insgesamt werden die Wärmebrückeneffekte durch den Randverbund bei einem Wechsel des Materials noch deutlicher. Die höhere Wärmeleitfähigkeit von EPS ( $\lambda$ =0,035 W/(m K)) bewirkt für den schlechtesten Fall (50 mm Variante) einen Anstieg der  $\psi$ -Werte um bis zu Faktor 3,5 gegenüber der Aerogel-Ausführung. Zudem macht sich auch die Auswahl des Deckmaterials stärker bemerkbar, denn durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Randverbundes gewinnt auch die Wärmeleitfähigkeit des Deckmaterials an Bedeutung. Die Unterschiede zwischen Metall und GFK sind zwar weiterhin gering, gegenüber der XPS-Variante sind die Wärmeverluste mit zunehmendem Randverbund im Vergleich jedoch deutlich höher.

| Tabelle 27: | berechnete w-Werte für 20 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungs- |
|-------------|--|
|             | breite des EPS-Randverbundes und unter Berücksichtigung des Deckmateri-  |
|             | als.   |

| Material | Einheit   | 0 mm | 5 mm   | 10 mm  | 25 mm  | 50 mm  |
|----------|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| Metall   | [W/(m K)] | 0    | 0,0070 | 0,0140 | 0,0350 | 0,0700 |
| GFK      | [W/(m K)] | 0    | 0,0067 | 0,0134 | 0,0336 | 0,0672 |
| XPS      | [W/(m K)] | 0    | 0,0042 | 0,0082 | 0,0201 | 0,0399 |



VIP 20mm, EPS-Randverbund,



#### 20 mm dicke VIP mit CaSi-Randverbund

Mit 0,065 W/(mK) weist Calciumsilikat die im Vergleich ungünstigste Wärmeleifähigkeit der Randverbünde auf. Die bereits zuvor bei EPS beschriebenen Trends verstärken sich dadurch nochmals. Der Wärmebrückeneffekt des Randverbundes nimmt deutlich zu und die Wahl des Deckmaterials gewinnt weiter an Bedeutung. Gegenüber den anderen Deckmaterialien bewirkt schon die Verwendung von XPS eine Halbierung der berechneten ψ-Werte.

Tabelle 28: berechnete w-Werte für 20 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und unter Berücksichtigung des Deckmaterials.

| Material | Einheit   | 0 mm | 5 mm   | 10 mm  | 25 mm  | 50 mm  |
|----------|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| Metall   | [W/(m K)] | 0    | 0,0145 | 0,0290 | 0,0725 | 0,1450 |
| GFK      | [W/(m K)] | 0    | 0,0136 | 0,0270 | 0,0677 | 0,1353 |
| XPS      | [W/(m K)] | 0    | 0,0070 | 0,0131 | 0,0318 | 0,0630 |





Abbildung 50: Verlauf der ψ-Werte für 20mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und für verschiedene Deckmaterialien.

Nachfolgend sind die Ergebnistabellen und -grafiken für die höheren Vakuum-Dämmstärken mit 30 und 40mm dargestellt, die in gleicher Weise wie zuvor beschrieben zu interpretieren sind.



## Wärmebrücken durch Randverbund und Deckmaterial bei 30 mm Vakuumdämmung

#### 30 mm dicke VIP mit Aerogel-Randverbund

# Tabelle 29:berechnete ψ-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungs-<br/>breite des Aerogel-Randverbundes und unter Berücksichtigung des Deckmate-<br/>rials.

| Material | Einheit   | 0 mm | 5 mm   | 10 mm  | 25 mm  | 50 mm  |
|----------|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| Metall   | [W/(m K)] | 0    | 0,0013 | 0,0026 | 0,0066 | 0,0133 |
| GFK      | [W/(m K)] | 0    | 0,0013 | 0,0027 | 0,0066 | 0,0132 |
| XPS      | [W/(m K)] | 0    | 0,0011 | 0,0022 | 0,0054 | 0,0107 |



Abbildung 51: Verlauf der ψ-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des Aerogel-Randverbundes und für verschiedene Deckmaterialien.



#### 30 mm dicke VIP mit EPS-Randverbund

#### Tabelle 30: berechnete ψ-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und unter Berücksichtigung des Deckmaterials.

| Material | Einheit   | 0 mm | 5 mm   | 10 mm  | 25 mm  | 50 mm  |
|----------|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| Metall   | [W/(m K)] | 0    | 0,0046 | 0,0093 | 0,0233 | 0,0466 |
| GFK      | [W/(m K)] | 0    | 0,0046 | 0,0091 | 0,0227 | 0,0454 |
| XPS      | [W/(m K)] | 0    | 0,0034 | 0,0065 | 0,0158 | 0,0314 |





Abbildung 52: Verlauf der ψ-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und für verschiedene Deckmaterialien.



#### 30 mm dicke VIP mit CaSi-Randverbund

#### Tabelle 31: berechnete ψ-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und unter Berücksichtigung des Deckmaterials.

| Material | Einheit   | 0 mm | 5 mm   | 10 mm  | 25 mm  | 50 mm  |
|----------|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| Metall   | [W/(m K)] | 0    | 0,0096 | 0,0193 | 0,0483 | 0,0966 |
| GFK      | [W/(m K)] | 0    | 0,0093 | 0,0185 | 0,0462 | 0,0923 |
| XPS      | [W/(m K)] | 0    | 0,0058 | 0,0110 | 0,0267 | 0,0527 |





Abbildung 53: Verlauf der ψ-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und für verschiedene Deckmaterialien.



## Wärmebrücken durch Randverbund und Deckmaterial bei 40 mm Vakuumdämmung

#### 40 mm dicke VIP mit Aerogel-Randverbund

# Tabelle 32:berechnete ψ-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungs-<br/>breite des Aerogel-Randverbundes und unter Berücksichtigung des Deckmate-<br/>rials.

| Material | Einheit   | 0 mm | 5 mm   | 10 mm  | 25 mm  | 50 mm  |
|----------|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| Metall   | [W/(m K)] | 0    | 0,0010 | 0,0020 | 0,0050 | 0,0100 |
| GFK      | [W/(m K)] | 0    | 0,0010 | 0,0020 | 0,0049 | 0,0099 |
| XPS      | [W/(m K)] | 0    | 0,0008 | 0,0017 | 0,0042 | 0,0084 |



Abbildung 54: Verlauf der ψ-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des Aerogel-Randverbundes und für verschiedene Deckmaterialien.



#### 40 mm dicke VIP mit EPS-Randverbund

#### Tabelle 33: berechnete ψ-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und unter Berücksichtigung des Deckmaterials.

| Material | Einheit   | 0 mm | 5 mm   | 10 mm  | 25 mm  | 50 mm  |
|----------|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| Metall   | [W/(m K)] | 0    | 0,0035 | 0,0070 | 0,0175 | 0,0350 |
| GFK      | [W/(m K)] | 0    | 0,0034 | 0,0069 | 0,0017 | 0,0343 |
| XPS      | [W/(m K)] | 0    | 0,0027 | 0,0052 | 0,0129 | 0,0257 |





Abbildung 55: Verlauf der ψ-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und für verschiedene Deckmaterialien.



# Tabelle 34:berechnete ψ-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungs-<br/>breite des CaSi-Randverbundes und unter Berücksichtigung des Deckmateri-<br/>als.

| Material | Einheit   | 0 mm | 5 mm   | 10 mm  | 25 mm  | 50 mm  |
|----------|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| Metall   | [W/(m K)] | 0    | 0,0073 | 0,0145 | 0,0363 | 0,0725 |
| GFK      | [W/(m K)] | 0    | 0,0070 | 0,0140 | 0,0350 | 0,0700 |
| XPS      | [W/(m K)] | 0    | 0,0048 | 0,0093 | 0,0227 | 0,0449 |





Abbildung 56: Verlauf der ψ-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und für verschiedene Deckmaterialien.



# 5.2 Dreidimensionale Berechnungen längenbezogener und punktförmiger Wärmebrücken

#### Einleitung

Wird für das VIP-Sandwich-Element ein Wärmedurchlasswiderstand (R-Wert) deklariert, sollten darin die R-Werte für das VIP, die Deckschichten und den Randstreifen (Rand) sowie die Wärmebrückenwirkung aus dem Folienverbund am VIP-Rand und die Wärmebrückenwirkung aus dem Verbund VIP mit Randstreifen enthalten sein. Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ( $\Psi$ -Wert) für den Stoß zweier VIP-Sandwich-Paneele ist in diesem Fall  $\Psi = 0$ .

Ist die wärmetechnische Angabe für das VIP-Sandwich-Element "unvollständig" und wird anstelle des R-Wertes z. B. nur die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des VIP (incl. Wärmebrückenwirkung aus dem Folienverbund am VIP-Rand) angegeben, sind die Wärmedurchlasswiderstände der Deckschichten und des Randstreifens sowie die Wärmebrückenwirkung aus dem Verbund VIP mit Randstreifen zusätzlich zu ermitteln (siehe Kapitel 5.1).

Es ist daher sinnvoll, den R-Wert für das VIP-Sandwich-Element vollständig, wie oben dargestellt, zu deklarieren. Die Wärmebrückenwirkung punktförmiger Befestigungsmittel, wie Dübel, muss darüber hinaus ermittelt werden. Falls die Befestigung der Paneele einen maßgeblichen Einfluss auf den U-Wert der Konstruktion hat, ist sie zu berücksichtigen. I. d. R. ist das der Fall, wenn die Befestigungsmittel den U-Wert der Konstruktion um mehr als drei Prozent erhöhen.

Im Folgenden soll die Wärmebrückenwirkung der Befestigungsmittel für VIP-Sandwich-Elemente anhand unterschiedlicher Einbausituationen dargestellt werden.

#### Generischer Dübel

Da übliche, für WDVS konzipierte Dübel, aufgrund ihrer Geometrie meist nicht für sehr dünne Dämmplatten geeignet sind, wird zur Bestimmung der X-Werte an gedübelten VIP-Systemen ein vereinfachter, generischer Dübel erstellt, der für die Befestigung der Paneele geeignet ist. Abbildung 57 zeigt den Dübel als 3D-Modell und im Schnitt.





Abbildung 57: Generischer Dübel mit einem nominalen X(20-50 mm)-Wert von 0,002 W/K

Die maximale Dämmstoffdicke beträgt für den generischen Dübel  $h_{Dmax} = 50$  mm, mit einem Toleranzausgleich  $t_{tol} = 10$ mm. Die minimale Verankerungstiefe ist  $h_{ef} =$ 40 mm. Somit ergibt sich eine Dübellänge von L<sub>a</sub> = 100 mm. Der Dübel besteht aus Polypropylen (PP) und einer Schraube aus Edelstahl, die oben mit einem Stopfen aus EPS abgedeckt ist. Der nominale  $\chi$ -Wert wird nach TR 025<sup>1</sup>, stellvertretend für alle Untergründe, auf dem Untergrund Beton bestimmt und beträgt  $\chi$ (20-50 mm) = 0,002 W/K. Dieser Wert repräsentiert eine mittlere thermische Qualität heutiger WDVS-Dübel.

# Dämmung aus Vakuumisolationspaneelen (VIP), Deckschichten und Randstreifen

In der Untersuchung werden VIPs betrachtet, die oben und unten eine Deckschicht von je 3 mm oder 5 mm aufweisen, abhängig vom Material. Die Dicke des VIP-Kerns beträgt 20 mm bzw. 40 mm, woraus sich eine Gesamtdicke für das Sandwich-Element von 26 oder 30 mm bzw. 46 oder 50 mm ergibt. Der Randstreifen im Randbereich ist zwischen 10 mm und 50 mm breit. Die Abmessungen eines Elementes betragen b = 0,50 m und I = 1,00 m, woraus sich eine Fläche von A = 0,50 m<sup>2</sup> ergibt. Die Fläche des VIP beträgt damit  $A_{VIP} = A - A_{Rand}$ , entsprechend  $A_{VIP} = 0,41 \text{ m}^2$  bis 0,48 m<sup>2</sup>.

Abbildung 58 zeigt exemplarisch den Halbschnitt durch einen Dübel im Modell mit einem 40 mm dicken VIP-Kern und einem 10 mm breiten Randstreifen (Rand).

TR 025:2007-06 Determination of point thermal transmittance of plastic anchors for the anchorage of external thermal insulation composite systems (ETICS)





Abbildung 58: Generischer Dübel im Sandwich-Element mit einer Fläche von A = 0,50 m<sup>2</sup>. Dargestellt ist hier exemplarisch der Halbschnitt durch einen Dübel im Element mit einem 40 mm dicken VIP-Kern und einem 10 mm breiten Randstreifen (Rand).

In den Berechnungsmodellen der Anwendungen VIP im WDVS und als Innendämmung wird der Dübel mittig zur langen Kante des Paneels angesetzt, d. h. zwischen zwei Paneele. In der Anwendung VIP hinter der vorgehängten Fassade (VHF) wird der L-Winkel, der die Last der Fassade in den Wand-Untergrund einleitet, im Eckbereich der kurzen Kante des Paneels, d. h. im Fugenkreuz aus vier Paneelen angesetzt. Das VIP wird als Block abgebildet, d. h. sein Stützkern und der Folienverbund werden nicht separat modelliert. Der Wärmebrückenanteil, der sich aus dem Folienverbund am Rand des VIP ergibt, ist in der (äquivalenten) Wärmeleitfähigkeit des Blocks enthalten.

Als Wärmeleitfähigkeit wird ein üblicher Bemessungswert in Höhe von  $\lambda_{Bem} = 0,007$  W/(m·K) angesetzt. Die Verwendung eines üblichen Messwertes in Höhe von 0,0055 W/(m·K) erscheint hier nicht geeignet, da bei der Ermittlung des U-Wert-Zuschlags in Verbindung mit dem  $\chi$ -Wert auch mit Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit gerechnet wird. Darüber hinaus spiegelt der Bemessungswert den tatsächlichen Sachverhalt besser wieder, indem eine evtl. Alterung des VIP sowie mögliche Schwankungen in der Produktion berücksichtigt werden.

Für die Deckschichten werden extrudiertes Polystyrol (XPS) mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{Bem} = 0,030 \text{ W/(m·K)}$  bzw. glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_{Bem} = 0,30 \text{ W/(m·K)}$  angesetzt. Tabelle 35 zeigt die Eigenschaften der Deckschichten.



# Tabelle 35:Dicke, Material und Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für die Deck-<br/>schichten

| Nr. | Dicke [mm] | Material                              | Bemessungswert der<br>Wärmeleitfähigkeit  □<br>[W/(m·K)] |
|-----|------------|---------------------------------------|--|
| 1   | 5          | Extrudiertes Polystyrol (XPS)         | 0,030  |
| 2   | 3          | Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) | 0,30   |

Die Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens (Rand) wird über drei Werte variiert, nämlich  $\lambda_{Bem} = (0,015; 0,035; 0,065) W/(m \cdot K)$ , stellvertretend für die Materialien Aerogel, expandiertes Polystyrol (EPS) und Kalziumsilikat (CaSi). Tabelle 36 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten des Randstreifens.

Tabelle 36: Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für den Randstreifen (Rand)

| Material                      | Bemessungswert der<br>Wärmeleitfähigkeit λ<br>[W/(m·K)] |
|-------------------------------|---|
| Aerogel                       | 0,015   |
| Expandiertes Polystyrol (EPS) | 0,035   |
| Kalziumsilikat (CaSi)         | 0,065   |

## Einbausituationen der Vakuumisolationspaneele (VIP)

Der Wärmebrückeneinfluss wird für die VIP in drei Einbausituationen untersucht, die im Folgenden dargestellt sind.

### Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

In der Anwendung als WDVS besteht das Sandwich-Element aus einem Kern mit VIP und Randstreifen (Rand) sowie den beiden 5 mm dicken Deckschichten aus XPS. Die Dicke des Kerns sowie Breite und Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens werden wie angegeben variiert.

Die VIP in der Anwendung als WDVS werden auf einer 175 mm dicken Betonwand untersucht. Hinsichtlich der *x*-Werte ist dieser Untergrund nach TR 025 der ungünstigste, d. h. die hier ermittelten punktförmigen Wärmedurchgangskoeffizienten dekken andere Untergründe auf der sicheren Seite liegend ab. Auf der Warmseite ist die Betonwand 10 mm dick verputzt und auf der Außenseite der Dämmung befindet sich eine 15 mm dicke Schicht Außenputz. Eine Kleberschicht wird hier mit der Dikke von 5 mm berücksichtigt. Tabelle 37 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten der Materia-lien im Wandaufbau.



#### Tabelle 37: Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für den Wandaufbau mit WDVS und Innendämmung

| Material  | Bemessungswert der<br>Wärmeleitfähigkeit λ<br>[W/(m·K)] |
|-----------|---|
| Beton     | 2,3   |
| Innenputz | 0,57  |
| Außenputz | 1,0   |
| Kleber    | 1,0   |

#### Innendämmung

In der Anwendung als Innendämmung besteht das Sandwich-Element aus einem Kern mit VIP und Randstreifen (Rand) sowie den beiden 3 mm dicken Deckschichten aus GFK. Die Dicke des Kerns sowie Breite und Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens werden wieder wie angegeben variiert.

In der Anwendung als Innendämmung werden die VIP ebenfalls auf einer 175 mm dicken Betonwand untersucht, die außen 15 mm dick verputzt ist. Nach innen folgen eine 5 mm dicke Kleberschicht, das Sandwich-Element und 10 mm Innenputz. Tabelle 37 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten der Materialien im Wandaufbau.

#### Vorgehängte Fassade (VHF)

In der Anwendung mit vorgehängter Fassade besteht das Sandwich-Element aus einem Kern mit VIP und Randstreifen (Rand) sowie den beiden 3 mm dicken Deckschichten aus GFK. Die Dicke des Kerns sowie Breite und Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens werden wieder wie angegeben variiert.

In der Anwendung mit VHF werden die VIP auf einer 175 mm dicken Betonwand mit vorgehängter Fassade untersucht. Zwischen Paneel und Betonwand befindet sich eine 8 mm dicke Kleber- und Ausgleichsschicht. Die Fassade ist über L-Winkel aus Edelstahl und einer thermischen Trennung mit dem Wand-Untergrund verbunden. Die Betonwand ist raumseitig 10 mm dick verputzt. Tabelle 38 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten der Materialien im Wandaufbau.

| Tabelle 38: | Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für den Wandaufbau mit VHF. |
|-------------|--|
|             | Democeangemente ach framenenengiert far ach framaaansaa mit fri    |

| Material                           | Bemessungswert der<br>Wärmeleitfähigkeit λ<br>[W/(m·K)] |
|------------------------------------|---|
| Beton                              | 2,3   |
| Innenputz                          | 0,57  |
| Außenputz                          | 1,0   |
| Kleber                             | 1,0   |
| Fassadenplatten                    | 3,5   |
| L-Winkel und Befestigungsschrauben | 17  |
| Thermische Trennung                | 0,30  |



#### Berechnungsvarianten

Tabelle 39 zeigt die Berechnungsvarianten für die drei Einbausituationen der Sandwich-Elemente. Ein dreistelliger Variantenschlüssel kennzeichnet die betrachteten Fälle. Unterschieden wird die Dicke der VIP Kerne (1.X.X = 20 mm, 2.X.X = 40 mm), die Breite der Randstreifen (X.1.X =10 mm, X.2.X = 15 mm, ...X.5.X = 50 mm) und die Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens (X.X.1 = 0,015 W/(m K), X.X.2 = 0,035 W/(m K), X.X.3 = 0,065 W/(m K)). Die Wärmeleitfähigkeit der Randstreifen repräsentiert wieder die bereits unter Abschnitt 5.1 verwendeten Materialien Aerogel, EPS und CaSi.

In den Anwendungen VIP als WDVS und als Innendämmung werden sämtliche Varianten und in der Anwendung hinter VHF die Varianten 1.1.1 bis 1.1.3 und 2.1.1 bis 2.1.3 untersucht (siehe Tabelle 39).

| Variante Nr. | Dicke VIP-Kern | Breite Randstreifen | WLF Randstreifen |
|--------------|----------------|---------------------|------------------|
|              | [mm]           | [mm]                | [W/(m·K)]        |
| 1.1.1        |                |                     | 0,015            |
| 1.1.2        |                | 10                  | 0,035            |
| 1.1.3        |                |                     | 0,065            |
| 1.2.1        |                |                     | 0,015            |
| 1.2.2        |                | 15                  | 0,035            |
| 1.2.3        |                |                     | 0,065            |
| 1.3.1        |                |                     | 0,015            |
| 1.3.2        | 20             | 20                  | 0,035            |
| 1.3.3        |                |                     | 0,065            |
| 1.4.1        |                | 25                  | 0,015            |
| 1.4.2        |                |                     | 0,035            |
| 1.4.3        |                |                     | 0,065            |
| 1.5.1        |                | 50                  | 0,015            |
| 1.5.2        |                |                     | 0,035            |
| 1.5.3        |                |                     | 0,065            |
| 2.1.1        |                |                     | 0,015            |
| 2.1.2        |                | 10                  | 0,035            |
| 2.1.3        | 40             |                     | 0,065            |
| 2.2.1        |                |                     | 0,015            |
| 2.2.2        |                | 15                  | 0,035            |
| 2.2.3        |                |                     | 0,065            |
| 2.3.1        |                |                     | 0,015            |
| 2.3.2        | 40             | 20                  | 0,035            |
| 2.3.3        |                |                     | 0,065            |

Tabelle 39: Übersicht zu den Berechnungsvarianten



| Variante Nr. | Dicke VIP-Kern | Breite Randstreifen | WLF Randstreifen |
|--------------|----------------|---------------------|------------------|
|              | [mm]           | [mm]                | [W/(m·K)]        |
| 2.4.1        |                |                     | 0,015            |
| 2.4.2        |                | 25                  | 0,035            |
| 2.4.3        |                |                     | 0,065            |
| 2.5.1        |                |                     | 0,015            |
| 2.5.2        |                | 50                  | 0,035            |
| 2.5.3        |                |                     | 0,065            |

## Ergebnisse

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse für die drei Einbausituationen dargestellt.

#### Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

Tabelle 40 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Untersuchung am 20 mm dikken WDVS (Kerndicke).

| Tabelle 40: | Ergebnisse der X-Wert-Berechnung für den Dübel im 20 mm dicken WDVS |
|-------------|---|
|             | (Kerndicke) mit VIP   |

| Variante Nr. | Dicke VIP-Kern | Breite Randstreifen | WLF Randstreifen | χ-Wert  |
|--------------|----------------|---------------------|------------------|---------|
|              | [mm]           | [mm]                | [W/(m·K)]        | [W/K]   |
| 1.1.1        |                |                     | 0,015            | 0,00166 |
| 1.1.2        |                | 10                  | 0,035            | 0,00153 |
| 1.1.3        |                |                     | 0,065            | 0,00141 |
| 1.2.1        |                |                     | 0,015            | 0,00164 |
| 1.2.2        |                | 15                  | 0,035            | 0,00149 |
| 1.2.3        |                |                     | 0,065            | 0,00136 |
| 1.3.1        |                |                     | 0,015            | 0,00163 |
| 1.3.2        | 20             | 20                  | 0,035            | 0,00145 |
| 1.3.3        |                |                     | 0,065            | 0,00130 |
| 1.4.1        |                |                     | 0,015            | 0,00162 |
| 1.4.2        |                | 25                  | 0,035            | 0,00143 |
| 1.4.3        |                |                     | 0,065            | 0,00128 |
| 1.5.1        |                |                     | 0,015            | 0,00159 |
| 1.5.2        |                | 50                  | 0,035            | 0,00136 |
| 1.5.3        |                |                     | 0,065            | 0,00117 |

Abbildung 59 zeigt die berechneten  $\chi$ -Werte für das VIP-Sandwich-Element als WDVS mit der VIP Kerndicke von 20 mm.







Tabelle 41 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Untersuchung am 40 mm dikken WDVS (Kerndicke).

| Variante Nr. | Dicke VIP-Kern | Breite Randstreifen | WLF Randstreifen | χ-Wert  |
|--------------|----------------|---------------------|------------------|---------|
|              | [mm]           | [mm]                | [W/(m·K)]        | [W/K]   |
| 2.1.1        | 40             |                     | 0,015            | 0,00152 |
| 2.1.2        |                | 10                  | 0,035            | 0,00145 |
| 2.1.3        |                |                     | 0,065            | 0,00135 |
| 2.2.1        |                | 15                  | 0,015            | 0,00151 |
| 2.2.2        |                |                     | 0,035            | 0,00142 |
| 2.2.3        |                |                     | 0,065            | 0,00131 |
| 2.3.1        | 40             |                     | 0,015            | 0,00152 |
| 2.3.2        |                | 20                  | 0,035            | 0,00142 |
| 2.3.3        |                |                     | 0,065            | 0,00129 |
| 2.4.1        |                | 25                  | 0,015            | 0,00150 |
| 2.4.2        |                |                     | 0,035            | 0,00139 |
| 2.4.3        |                |                     | 0,065            | 0,00126 |
| 2.5.1        |                |                     | 0,015            | 0,00150 |
| 2.5.2        |                | 50                  | 0,035            | 0,00135 |
| 2.5.3        |                |                     | 0,065            | 0,00119 |

| Tabelle 41: | Ergebnisse der X-Wert-Berechnung für den Dübel im 40 mm dicken WDVS |
|-------------|---|
|             | (Kerndicke) mit VIP   |



Abbildung 60 zeigt die berechneten  $\chi$ -Werte für das VIP-Sandwich-Element als WDVS mit der VIP Kerndicke von 40 mm.



Abbildung 60: X-Werte beim gedübelten VIP-Sandwich-Element als WDVS mit der VIP-Kerndicke von 40 mm



Tabelle 42 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Untersuchung an der Innendämmung mit 20 mm Kerndicke.

| Variante Nr. | Dicke VIP-Kern | Breite Randstrei-<br>fen | WLF Randstreifen | χ-Wert  |
|--------------|----------------|--------------------------|------------------|---------|
|              | [mm]           | [mm]                     | [W/(m·K)]        | [W/K]   |
| 1.1.1        | 20             |                          | 0,015            | 0,00202 |
| 1.1.2        |                | 10                       | 0,035            | 0,00180 |
| 1.1.3        |                |                          | 0,065            | 0,00150 |
| 1.2.1        |                | 15                       | 0,015            | 0,00199 |
| 1.2.2        |                |                          | 0,035            | 0,00170 |
| 1.2.3        |                |                          | 0,065            | 0,00134 |
| 1.3.1        |                |                          | 0,015            | 0,00196 |
| 1.3.2        |                | 20                       | 0,035            | 0,00162 |
| 1.3.3        |                |                          | 0,065            | 0,00122 |
| 1.4.1        |                | 25                       | 0,015            | 0,00194 |
| 1.4.2        |                |                          | 0,035            | 0,00156 |
| 1.4.3        |                |                          | 0,065            | 0,00113 |
| 1.5.1        |                |                          | 0,015            | 0,00187 |
| 1.5.2        |                | 50                       | 0,035            | 0,00140 |
| 1.5.3        |                |                          | 0,065            | 0,00093 |

| Tabelle 42: | Ergebnisse der X-Wert-Berechnung für den Dübel in der 20 mm dicken Innen- |
|-------------|---|
|             | dämmung (Kerndicke) mit VIP   |

Abbildung 61 zeigt die berechneten  $\chi$ -Werte für das VIP-Sandwich-Element in der Innendämmung mit der VIP Kerndicke von 20 mm.





Abbildung 61: X-Werte beim gedübelten VIP-Sandwich-Element in der Innendämmung mit der VIP-Kerndicke von 20 mm

Tabelle 43 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Untersuchung an der 40 mm dicken Innendämmung (Kerndicke).

| Variante Nr. | Dicke VIP-Kern | Breite Randstrei-<br>fen | WLF Randstreifen | χ-Wert  |
|--------------|----------------|--------------------------|------------------|---------|
|              | [mm]           | [mm]                     | [W/(m·K)]        | [W/K]   |
| 2.1.1        |                |                          | 0,015            | 0,00186 |
| 2.1.2        |                | 10                       | 0,035            | 0,00177 |
| 2.1.3        | 40             |                          | 0,065            | 0,00164 |
| 2.2.1        |                |                          | 0,015            | 0,00185 |
| 2.2.2        |                | 15                       | 0,035            | 0,00173 |
| 2.2.3        |                |                          | 0,065            | 0,00155 |
| 2.3.1        | 40             |                          | 0,015            | 0,00184 |
| 2.3.2        |                | 20                       | 0,035            | 0,00169 |
| 2.3.3        |                |                          | 0,065            | 0,00148 |
| 2.4.1        |                |                          | 0,015            | 0,00183 |
| 2.4.2        |                | 25                       | 0,035            | 0,00166 |
| 2.4.3        |                |                          | 0,065            | 0,00142 |
| 2.5.1        |                |                          | 0,015            | 0,00179 |
| 2.5.2        |                | 50                       | 0,035            | 0,00156 |
| 2.5.3        |                |                          | 0,065            | 0,00126 |

Tabelle 43:Ergebnisse der X-Wert-Berechnung für den Dübel in der 40 mm dicken Innen-<br/>dämmung (Kerndicke) mit VIP



Abbildung 62 zeigt die berechneten *x*-Werte für das VIP-Sandwich-Element in der Innendämmung mit der VIP Kerndicke von 40 mm.



Abbildung 62: X-Werte beim gedübelten VIP-Sandwich-Element in der Innendämmung mit der VIP-Kerndicke von 40 mm

Vorgehängte Fassade (VHF)

Tabelle 44 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Untersuchung hinter VHF mit 20 mm dicken VIP (Kerndicke).

Tabelle 44:Ergebnisse der X-Wert-Berechnung für die VHF mit 20 mm dicken VIP (Kern-<br/>dicke)

| Variante Nr. | Dicke VIP-Kern | Breite Randstrei-<br>fen | WLF Randstreifen | χ-Wert  |
|--------------|----------------|--------------------------|------------------|---------|
|              | [mm]           | [mm]                     | [W/(m·K)]        | [W/K]   |
| 1.1.1        |                |                          | 0,015            | 0,03030 |
| 1.1.2        | 20             | 10                       | 0,035            | 0,02901 |
| 1.1.3        |                |                          | 0,065            | 0,02749 |

Abbildung 63 zeigt die berechneten  $\chi$ -Werte für das VIP-Sandwich-Element hinter VHF mit der VIP Kerndicke von 20 mm.




Abbildung 63: X-Werte beim VIP-Sandwich-Element hinter VHF mit der VIP-Kerndicke von 20 mm. Beachte: Die Skalierung der X-Werte ist hier um den Faktor 10 größer als bei den Abbildungen zu den Anwendungen WDVS und Innendämmung, da die Wärmebrückenwirkung des untersuchten L-Winkels größer ist, als die des Dübels.

Tabelle 45 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Untersuchung hinter VHF mit 40 mm dicken VIP (Kerndicke).

| Variante Nr. | Dicke VIP-Kern | Breite Randstrei-<br>fen | WLF Randstreifen | χ-Wert  |
|--------------|----------------|--------------------------|------------------|---------|
|              | [mm]           | [mm]                     | [W/(m·K)]        | [W/K]   |
| 1.1.1        |                |                          | 0,015            | 0,02611 |
| 1.1.2        | 40             | 10                       | 0,035            | 0,02547 |
| 1.1.3        |                |                          | 0,065            | 0,02462 |

# Tabelle 45:Ergebnisse der X-Wert-Berechnung für die VHF mit 40 mm dicken VIP (Kern-<br/>dicke)

Abbildung 64 zeigt die berechneten  $\chi$ -Werte für das VIP-Sandwich-Element hinter VHF mit der VIP Kerndicke von 40 mm.





Abbildung 64: X-Werte beim VIP-Sandwich-Element hinter VHF mit der VIP-Kerndicke von 40 mm. Beachte: Die Skalierung der X-Werte ist hier um den Faktor 10 größer als bei den Abbildungen zu den Anwendungen WDVS und Innendämmung, da die Wärmebrückenwirkung des untersuchten L-Winkels größer ist, als die des Dübels.

#### Berücksichtigung im U-Wert

Wenn der Einfluss punktförmiger Befestigungsmittel für die VIP-Sandwich-Elemente den U-Wert der Konstruktion um mehr als drei Prozent erhöht, müssen diese berücksichtigt werden. Ob dies der Fall ist, hängt vom X-Wert der Befestigung, der Anzahl und natürlich vom U-Wert der Konstruktion ab. Im Folgenden soll anhand der bisher dargestellten Beispiele gezeigt werden, welchen Einfluss die Befestigungsmittel auf den U-Wert der Konstruktionen mit VIP-Sandwich-Elementen haben.

#### Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

Tabelle 46 zeigt die zulässige Anzahl von Dübeln für die Untersuchung am WDVS, für die eine Korrektur des U-Wertes gerade noch nicht notwendig ist. Im U-Wert "Konstruktion" sind der gesamte Schichtaufbau der Konstruktion und die Wärmeübergangswiderstände enthalten. Für das VIP-Sandwich-Element wurden die Deckschichten und der Randanteil (Randstreifen), wie eingangs erwähnt, berücksichtigt.



# Tabelle 46:Ergebnisse der %-Wert-Berechnung für den Dübel im WDVS mit VIP: Maximal<br/>zulässige Dübelanzahl, ohne dass der U-Wert der Konstruktion erhöht werden<br/>muss.

| Variante Nr. | Dicke<br>VIP-Kern | Breite<br>Randstreifen | WLF<br>Randstreifen | U-Wert<br>Konstruktion | <b>Χ-Wert</b> | Zul. Dübel-<br>anzahl |
|--------------|-------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------|-----------------------|
|              | [mm]              | [mm]                   | [W/(m·K)]           | [W/(m²K)]              | [W/K]         | [Stück/m²]            |
| 1.1.1        |                   |                        | 0,015               | 0,30                   | 0,00166       | 5                     |
| 1.1.2        |                   | 10                     | 0,035               | 0,32                   | 0,00153       | 6                     |
| 1.1.3        |                   |                        | 0,065               | 0,33                   | 0,00141       | 7                     |
| 1.2.1        |                   |                        | 0,015               | 0,30                   | 0,00164       | 5                     |
| 1.2.2        | 20                | 15                     | 0,035               | 0,33                   | 0,00149       | 6                     |
| 1.2.3        |                   |                        | 0,065               | 0,35                   | 0,00136       | 7                     |
| 1.3.1        |                   |                        | 0,015               | 0,31                   | 0,00163       | 5                     |
| 1.3.2        |                   | 20                     | 0,035               | 0,34                   | 0,00145       | 7                     |
| 1.3.3        |                   |                        | 0,065               | 0,37                   | 0,00130       | 8                     |
| 1.4.1        |                   |                        | 0,015               | 0,31                   | 0,00162       | 5                     |
| 1.4.2        |                   | 25                     | 0,035               | 0,35                   | 0,00143       | 7                     |
| 1.4.3        |                   |                        | 0,065               | 0,39                   | 0,00128       | 9                     |
| 1.5.1        | 20                |                        | 0,015               | 0,33                   | 0,00159       | 6                     |
| 1.5.2        |                   | 50                     | 0,035               | 0,41                   | 0,00136       | 8                     |
| 1.5.3        |                   |                        | 0,065               | 0,47                   | 0,00117       | 11                    |
| 2.1.1        |                   |                        | 0,015               | 0,16                   | 0,00152       | 3                     |
| 2.1.2        |                   | 10                     | 0,035               | 0,18                   | 0,00145       | 3                     |
| 2.1.3        |                   |                        | 0,065               | 0,19                   | 0,00135       | 4                     |
| 2.2.1        |                   |                        | 0,015               | 0,17                   | 0,00151       | 3                     |
| 2.2.2        |                   | 15                     | 0,035               | 0,19                   | 0,00142       | 3                     |
| 2.2.3        |                   |                        | 0,065               | 0,21                   | 0,00131       | 4                     |
| 2.3.1        |                   |                        | 0,015               | 0,17                   | 0,00152       | 3                     |
| 2.3.2        | 40                | 20                     | 0,035               | 0,19                   | 0,00142       | 4                     |
| 2.3.3        |                   |                        | 0,065               | 0,22                   | 0,00129       | 5                     |
| 2.4.1        |                   |                        | 0,015               | 0,17                   | 0,00150       | 3                     |
| 2.4.2        |                   | 25                     | 0,035               | 0,20                   | 0,00139       | 4                     |
| 2.4.3        |                   |                        | 0,065               | 0,23                   | 0,00126       | 5                     |
| 2.5.1        |                   |                        | 0,015               | 0,19                   | 0,00150       | 3                     |
| 2.5.2        |                   | 50                     | 0,035               | 0,24                   | 0,00135       | 5                     |
| 2.5.3        |                   |                        | 0,065               | 0,30                   | 0,00119       | 7                     |

### Innendämmung

Tabelle 47 zeigt die zulässige Anzahl von Dübeln für die Untersuchung an der Innendämmung, für die eine Korrektur des U-Wertes gerade noch nicht notwendig ist.



FIW Bericht FO-2012/08

> Im U-Wert "Konstruktion" sind wieder der gesamte Schichtaufbau der Konstruktion und die Wärmeübergangswiderstände enthalten. Für das VIP-Sandwich-Element wurden die Deckschichten und der Randanteil (Randstreifen) berücksichtigt.

| Variante Nr. | Dicke<br>VIP-Kern | Breite<br>Randstreifen | WLF<br>Randstreifen | U-Wert<br>Konstruktion | <b>χ-Wert</b> | Zul. Dübel-<br>anzahl   |    |
|--------------|-------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------|-------------------------|----|
|              | [mm]              | [mm]                   | [W/(m·K)]           | [W/(m²K)]              | [W/K]         | [Stück/m <sup>2</sup> ] |    |
| 1.1.1        |                   |                        | 0,015               | 0,33                   | 0,00202       | 4                       |    |
| 1.1.2        |                   | 10                     | 0,035               | 0,36                   | 0,00180       | 5                       |    |
| 1.1.3        |                   |                        | 0,065               | 0,39                   | 0,00150       | 7                       |    |
| 1.2.1        |                   |                        | 0,015               | 0,33                   | 0,00199       | 5                       |    |
| 1.2.2        |                   | 15                     | 0,035               | 0,38                   | 0,00170       | 6                       |    |
| 1.2.3        |                   |                        | 0,065               | 0,43                   | 0,00134       | 9                       |    |
| 1.3.1        |                   |                        | 0,015               | 0,34                   | 0,00196       | 5                       |    |
| 1.3.2        | 20                | 20                     | 0,035               | 0,39                   | 0,00162       | 7                       |    |
| 1.3.3        |                   |                        | 0,065               | 0,46                   | 0,00122       | 11                      |    |
| 1.4.1        |                   |                        | 0,015               | 0,35                   | 0,00194       | 5                       |    |
| 1.4.2        |                   | 25                     | 0,035               | 0,41                   | 0,00156       | 7                       |    |
| 1.4.3        |                   |                        | 0,065               | 0,49                   | 0,00113       | 12                      |    |
| 1.5.1        |                   |                        | 0,015               | 0,37                   | 0,00187       | 6                       |    |
| 1.5.2        |                   |                        | 50                  | 0,035                  | 0,49          | 0,00140                 | 10 |
| 1.5.3        |                   |                        | 0,065               | 0,62                   | 0,00093       | 20                      |    |
| 2.1.1        |                   |                        | 0,015               | 0,17                   | 0,00186       | 2                       |    |
| 2.1.2        |                   | 10                     | 0,035               | 0,19                   | 0,00177       | 3                       |    |
| 2.1.3        |                   |                        | 0,065               | 0,21                   | 0,00164       | 3                       |    |
| 2.2.1        |                   |                        | 0,015               | 0,18                   | 0,00185       | 2                       |    |
| 2.2.2        |                   | 15                     | 0,035               | 0,20                   | 0,00173       | 3                       |    |
| 2.2.3        | 40                |                        | 0,065               | 0,23                   | 0,00155       | 4                       |    |
| 2.3.1        |                   |                        | 0,015               | 0,18                   | 0,00184       | 2                       |    |
| 2.3.2        |                   | 20                     | 0,035               | 0,21                   | 0,00169       | 3                       |    |
| 2.3.3        |                   |                        | 0,065               | 0,25                   | 0,00148       | 5                       |    |
| 2.4.1        |                   | 05                     | 0,015               | 0,18                   | 0,00183       | 3                       |    |
| 2.4.2        |                   | 20                     | 0,035               | 0,22                   | 0,00166       | 4                       |    |
| 2.4.3        | 40                | 25                     | 0,065               | 0,27                   | 0,00142       | 5                       |    |
| 2.5.1        |                   |                        | 0,015               | 0,20                   | 0,00179       | 3                       |    |
| 2.5.2        | 40                | 50                     | 0,035               | 0,27                   | 0,00156       | 5                       |    |
| 2.5.3        | 1                 |                        | 0,065               | 0,36                   | 0,00126       | 8                       |    |

# Tabelle 47:Ergebnisse der X-Wert-Berechnung für den Dübel in der Innendämmung mit<br/>VIP: Maximal zulässige Dübelanzahl, ohne dass der U-Wert der Konstruktion<br/>erhöht werden muss.



# Vorgehängte Fassade (VHF)

Tabelle 48 zeigt die zulässige Anzahl von Dübeln für die Untersuchung an der vorgehängten Fassade, für die eine Korrektur des U-Wertes gerade noch nicht notwendig ist. Im U-Wert "Konstruktion" sind wieder der gesamte Schichtaufbau der Konstruktion und die Wärmeübergangswiderstände enthalten. Für das VIP-Sandwich-Element wurden die Deckschichten und der Randanteil (Randstreifen) berücksichtigt.

Bei allen Varianten zeigt sich, dass die zur Befestigung erforderlichen Dübel in jedem Fall im U-Wert zu berücksichtigen sind (Zulässige Dübelanzahl = 0 Stck./m<sup>2</sup>)

| Variante Nr. | Dicke<br>VIP-Kern | cke Breite W<br>Kern Randstreifen Rands |           | U-Wert<br>Konstruktion | X-Wert  | Zul. Dübel-<br>anzahl   |
|--------------|-------------------|---|-----------|------------------------|---------|-------------------------|
|              | [mm]              | [mm]                                    | [W/(m·K)] | [W/(m²K)]              | [W/K]   | [Stück/m <sup>2</sup> ] |
| 1.1.1        |                   |   | 0,015     | 0,33                   | 0,03030 | 0                       |
| 1.1.2        | 20                | 10                                      | 0,035     | 0,37                   | 0,02901 | 0                       |
| 1.1.3        |                   |   | 0,065     | 0,41                   | 0,02749 | 0                       |
| 2.1.1        |                   |   | 0,015     | 0,17                   | 0,02611 | 0                       |
| 2.1.2        | 40                | 10                                      | 0,035     | 0,20                   | 0,02547 | 0                       |
| 2.1.3        | ſ                 |   | 0,065     | 0,23                   | 0,02462 | 0                       |

# Tabelle 48:Ergebnisse der X-Wert-Berechnung für den L-Winkel in der Anwendung VHF<br/>mit VIP: Maximal zulässige Dübelanzahl, ohne dass der U-Wert der Konstrukti-<br/>on erhöht werden muss.

# 5.3 VIP als Kerndämmung in Betonfertigteilen

Zur Kerndämmung von Beton-Fertigteilwänden werden VIP-Platten mit Deckschichten aus Metallen oder massiven Kunststoffen eingesetzt. Da übliche Fertigteilwandelemente deutlich größer sind als die mittlere Plattengröße der VIPs, müssen mehrere VIPs in einem Fertigteilelement verwendet werden. Hierfür ist an den VIPs umlaufend ein Rand aus einem Dichtband oder aus einem Dämmstoff notwendig, der von den üblicherweise eingesetzten Drahtankern für die Verbindung der inneren und äußeren Betonschalen durchdrungen werden kann. Hier können extrudiertes Polystyrol (XPS) oder Polyurethan als Ortschaumstreifen eingesetzt werden. Um eine Verletzung der Folienhülle zu vermeiden, sollten die Randstreifen nicht schmäler als 10 mm in der Ansichtsbreite sein. Die obere Grenze für die Randstreifenbreite ergibt sich aus der Wärmebrückenwirkung der herkömmlichen Dämmstoffe in Verbindung mit dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für die VIP Kerne und ist in Abschnitt 5.1 beschrieben. Hier sollte 20 mm in der Ansichtsbreite möglichst nicht überschritten werden. Ist der Bearbeitungs- bzw. Verankerungsrand breiter, sollte eine Abdeckung der Wärmebrücken mit einer zweiten Lage Dämmung in Betracht gezogen werden. Beim Einsatz von Ortschaum in der Herstellung der Fertigteilelemente können die VIPs mit ausreichend Abstand zueinander verlegt werden, um die



Anker durchstecken zu können. Der dann verbleibende Spalt von etwa 10 mm zwischen den Platten wird im Werk z.B. mit PUR Ortschaum vergossen.

Zwischen den einzelnen Fertigteilelementen sind zur Abdichtung der montierten Elemente vorkomprimierte Dichtbänder oder ebenfalls Ortschaumfugen möglich. Diese sind üblicherweise breiter als die Fugen zwischen den VIPs innerhalb der einzelnen Fertigteilelemente und weisen dementsprechend auch höhere Wärmebrückeneffekte auf.

Die Verbindung der inneren und äußeren Betonschalen der Fertigteilelemente erfolgt über sog. Verbundankernadeln. Zusätzlich sind für jedes Fertigteilelement – abhängig von seiner Größe – noch weitere einzelne Anker notwendig, die ein Verdrehen oder Verschieben der Betonschalen gegeneinander während Transport und Montage verhindern. Hier werden abhängig vom Systemanbieter entweder Rundanker mit tangentialen Edelstahl-Stabstählen oder Flachanker in Verbindung mit Kastenförmigen Ankern oder L-förmigen Ankern eingesetzt. Die Wärmebrückenwirkung aller dieser punktuellen Verbindungen der inneren und äußeren Schalen wird in dreidimensionalen numerischen Simulationen ermittelt. Über die Befestigerdichte pro Quadratmeter für die Verbundankernadeln und die Anzahl der Einzelanker pro Element lässt sich dann mit den o.g. Formeln der Wärmedurchgangskoeffizient jedes einzelnen Fertigteilelementes ermitteln.

Für diese Untersuchung im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden Konstruktionen mit Verbundankernadeln und Flachstahlanker berechnet. Mit den punkt- und längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\chi$  und  $\psi$ , werden die effektiven U-Werte berechnet. Zur Abschätzung der Bandbreite des Einflusses werden ein gering bewehrtes Fertigteil und ein hoch bewehrtes Fertigteil untersucht. Für ein konkretes Bauvorhaben müsste für alle Elemente ein flächenanteilig gemittelter U-Wert bestimmt werden, der dann im Nachweis für z.B. die EnEV verwendet werden könnte.

### Beschreibung des Dämmsystems

Untersucht wird ein Dämmsystem mit einem Kern aus Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) der Dicke 50 mm mit beidseitigen Deckschichten aus PVC der Dicke 2 mm – der Rand der Paneele wird geschützt durch ein umlaufendes Klebeband bzw. bei einigen Elementen zum Vergleich auch durch einen umlaufenden Streifen aus extrudiertem Polystyrol XPS der Ansichtsbreite 20 mm. Die Fugen zwischen den Platten ohne Rand-Dämmstreifen werden nach dem Verlegen zwischen den Verbundankernadeln und den Einzelankern mit PUR Ortschaum vergossen. Die Abmessungen werden so an das Raster der Ankernadeln und Flachanker angepasst, dass sich ein 10 mm breiter Streifen zwischen den VIP-Platten ergibt.

Die Dämmplatten werden als einlagig verlegt berechnet. Die Dicke beträgt mit den Deckschichten 54 mm. Die Durchdringung der Dämmebene mit mechanischen Befestigungselementen erfolgt zwischen den VIP-Platten. Eingesetzt werden hier Ver-



bund-Ankernadeln und Flachstahlanker aus Edelstahl V4A. Die Ankernadeln bestehen aus zwei runden, gewellten Stahldrähten mit dem Durchmesser 4 mm. Die Flachstahlanker haben eine Blechdicke von 1,5 mm und sind je nach statischen Erfordernissen 80; 120 oder 160 mm breit. Die Länge der Anker beträgt 175 mm.

## Zweidimensionale Wärmebrücken

An den Rändern der einzelnen Dämmelemente entstehen durch die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten von XPS bzw. PUR und dem VIP-Kern linienförmige Wärmebrücken. Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient  $\psi$  in W/(m·K) an diesen Kanten wird in einer zweidimensionalen Berechnung ermittelt.

Für die Berechnung wird als Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit der VIP-Elemente ein Wert von 0,007 W/(m·K) eingesetzt. Dieser Wert beinhaltet bereits die Wärmebrückeneffekte am Folienrand, weswegen das VIP als homogener Block mit der oben genannten Wärmeleitfähigkeit in die Berechnung für die Dämmsysteme eingesetzt wird.

## Dreidimensionale Wärmebrückeneffekte

In den numerischen Berechnungen mit der FE/FD-Methode sind die Wärmeströme aus den Deckschichten zu den Fugen in allen Richtungen enthalten. Zusätzlich entstehen durch die mechanischen Befestigungen der Betonschalen nennenswerte Wärmebrücken. Die Größe dieser zusätzlichen punktuellen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\chi$  (in W/K) hängt von der Beschaffenheit, der Anzahl und der Überdeckung der verwendeten Befestigungsmittel mit Dämmschichten ab. Die Wärmebrückenwirkung solcher Befestigungsmittel ist nach DIN EN ISO 6946 zu berücksichtigen, wenn sie mehr als 3 % des U-Werts der ungestörten Konstruktion (ohne diese Befestigungsmittel) beträgt.

# Grundlagen für die Berechnungen

Als Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit werden Werte nach DIN 4108-4, DIN EN ISO 10456, DIN EN ISO 10077-2 und DIN EN ISO 6946 beziehungsweise Herstellerangaben verwendet. In der nachfolgenden Tabelle sind die Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Materialien der VIP-Elemente dargestellt.



Tabelle 49:Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit der Materialien für die Berechnung<br/>der Wärmebrückenwirkung im Beton-Fertigteilbau. Für Polyurethan Ortschaum<br/>wird der Bemessungswert 0,030 W/(m·K) für im Beton-Fertigteilbau übliche,<br/>überwachte Ortschäume verwendet

| Material                  | Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ |
|---------------------------|---|
|                           | [W/(m·K)]                               |
| Vakuum-Isolations-Paneele | 0,007                                   |
| PUR/PIR Hartschaum**      | 0,030                                   |
| XPS-Randstreifen          | 0,035                                   |
| Edelstahl V4A             | 17                                      |
| Betonstahl BSt 500        | 50                                      |
| Beton mit 1% Bewehrung    | 2,3                                     |
| PVC Deckschichten         | 0,17                                    |

### Ergebnisse

Der eindimensional berechnete U-Wert im ungestörten Bereich (ohne zwei- und dreidimensionale Wärmebrückeneffekte) ergibt sich mit dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von 0,007 W/(m·K) für die VIP zu:

 $U_0 = 0,135 \text{ W/(m^2 \cdot K)}$ 

Für die beiden unterschiedlichen Randausbildungen (XPS-Fuge der Breite 40 mm (entsprechend umlaufender XPS-Rand der Ansichtsbreite 20 mm) und PUR-Ortschaum-Fuge der Breite 10 mm (entsprechend Rand umlaufend 5 mm) ergeben sich die folgenden längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für die Stoßfugen zwischen zwei VIP-Platten und an den Rändern der Fertigteilelemente.

Tabelle 50:Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten der Ränder der VIP-Platten<br/>und der Ränder der Fertigteilelemente bei Ausführung der Bauteilfugen analog<br/>der VIP-VIP Fugen

|   | Ausführung mit 40 mm XPS-Fuge<br>(entsprechend 20 mm XPS-Rand<br>umlaufend) | Ausführung mit 10 mm PUR-<br>Ortschaum-Fuge (entspre-<br>chend 5 mm PUR-Ortschaum<br>Rand umlaufend) |
|---|---|--|
|   | Ψ [W/(m·K)]   | Ψ [W/(m·K)]  |
| Fuge zwischen zwei VIP-<br>Platten              | 0,020   | 0,0042   |
| Rand der VIP-Platten am<br>Rand der Fertigteile | 0,010   | 0,0021   |

Für die beiden unterschiedlichen Randausbildungen (XPS-Fuge der Breite 40 mm (umlaufender XPS-Rand der Ansichtsbreite 20 mm) und PUR-Ortschaum-Fuge der Breite 10 mm (entsprechend Rand umlaufend 5 mm) ergeben sich die folgenden punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für die Verbund-Ankernadeln und die drei untersuchten Ausführungen der Flachstahlanker.



Die Berechnungen basieren auf üblichen Verbundankernadeln im Beton-Sandwichbau. Nachfolgend ist als Beispiel für die berechnete Geometrie aus zwei einzelnen Rundstählen die die Dämmschicht durchdringen ein Produkt der Fa. Pfeiffer dargestellt.



Abbildung 65: Verbundankernadeln im Beton Sandwichbau (exemplarisch: Fa. Pfeiffer)

Die in der Berechnung als exemplarisch für solche Konstruktionen angesetzten Flachstahlanker werden in die Bewehrungslagen der Innen- und Außenschalen eingeknüpft. Die Anker unterscheiden sich in der Länge des Flachstahles und ggf. auch in der Blechdicke (für diese generische Untersuchung nicht variiert). Nachfolgend sind exemplarisch ebenfalls Produkte der Fa. Pfeiffer dargestellt.



Abbildung 66: Flachstahlanker die in die Bewehrungslagen der Innen- und Außenschale eingeknüpft werden (exemplarisch: Fa. Pfeiffer)

Die Ankernadeln und die Flachstahlanker werden in der inneren Bewehrungslage der statisch tragenden Wand verankert. Eine Skizze der Eindringtiefe ist nachfolgend dargestellt.





Abbildung 67 Systemskizze zum Verbund von Trag- und Außenschale mittels Ankernadeln und Flachankern

| Tabelle 51 | Ergebnisse zu den ermittelten x-Werten bei Variation der Verankerung und der |
|------------|--|
|            | Fugenausbildung  |

|   | Ausführung mit 40 mm XPS-Fuge<br>(entsprechend 20 mm XPS-Rand<br>umlaufend) | Ausführung mit 10 mm PUR-<br>Ortschaum-Fuge (entspre-<br>chend 5 mm PUR-Ortschaum<br>Rand umlaufend) |
|---|---|--|
|   | χ [W/K]   | χ [W/K]  |
| Verbundankernadeln aus<br>nichtrostendem Stahl V4A<br>Durchmesser 2 x 4mm | 0,0043  | 0,0051   |
| Flachstahlanker B=80 mm;<br>d=1,5 mm; L=175 mm                            | 0,021   | 0,022  |
| Flachstahlanker<br>B=120 mm; d=1,5 mm;<br>L=175 mm                        | 0,031   | 0,032  |
| Flachstahlanker<br>B=160 mm; d=1,5 mm;<br>L=175 mm                        | 0,041   | 0,043  |



### Korrigierte U-Werte einzelner Fertigteilelemente:

Tabelle 52:Beispielberechnung für 3 Fertigteil-Elementgrößen in den beiden Ausfüh-<br/>rungsvarianten mit 20 mm XPS Rand bzw. mit 5 mm PUR Rand – Abmessungen<br/>und Fugenlängen sowie Flächen und U-Werte für kleine, mittlere und große<br/>Elemente

| Rand-<br>ausbil-<br>dung | Element<br>Nr. | Außen-<br>länge des<br>Elements | Außenhö-<br>he des<br>Elements | Gesamt-<br>summe<br>Fugen-<br>länge<br>zwischen<br>zwei VIP<br>für dieses<br>Element | Randfu-<br>genlänge<br>des ge-<br>samten<br>Elements | Fläche<br>des Ele-<br>ments | U <sub>0</sub> |
|--------------------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------|--|--|-----------------------------|----------------|
|                          |                | [m]                             | [m]                            | [m]  | [m]  | [m <sup>2</sup> ]           | [W/(m K)]      |
| PUR                      | 1 – groß       | 6,46                            | 3,07                           | 19,06  | 24,580   | 17,94                       |                |
| Rand 5<br>mm um-         | 2 – mittel     | 0,705                           | 3,3                            | 6,68   | 8,010  | 2,33                        |                |
| laufend                  | 3 – klein      | 0,315                           | 3,07                           | 6,36   | 19,06  | 0,97                        | 0 125          |
| XPS                      | 1 – groß       | 6,46                            | 3,07                           | 19,06  | 24,580   | 17,94                       | 0,135          |
| Rand 20<br>mm um-        | 2 – mittel     | 0,705                           | 3,3                            | 6,68   | 8,010  | 2,33                        |                |
| laufend                  | 3 – klein      | 0,315                           | 3,07                           | 6,36   | 6,770  | 0,97                        |                |

Tabelle 53:Beispielberechnung für 3 Fertigteil-Elementgrößen in den beiden Ausfüh-<br/>rungsvarianten mit 20 mm XPS Rand bzw. mit 5 mm PUR Rand – Anzahl der<br/>Verbundankernadeln und Flachanker sowie resultierende U-Werte für kleine,<br/>mittlere und große Elemente

| Rand-<br>ausbil-<br>dung | Element<br>Nr. | Anzahl<br>Ver-<br>bundna-<br>deln im<br>Element | Anzahl<br>Flachan-<br>ker FLA-<br>80 im<br>Element | Anzahl<br>Flachan-<br>ker FLA-<br>120 im<br>Element | Anzahl<br>Flachan-<br>ker FLA-<br>160 im<br>Element | U <sub>gesamt</sub>    | ΔU  |
|--------------------------|----------------|---|--|---|---|------------------------|-----|
|                          |                | -   | -  | -   | -   | [W/(m <sup>2</sup> K)] | [%] |
| PUR                      | 1 – groß       | 28  | 1  | 2   | 0   | 0,155                  | 15  |
| Rand 5<br>mm um-         | 2 – mittel     | 12  | 2  | 1   | 0   | 0,214                  | 58  |
| laufend                  | 3 – klein      | 12  | 2  | 2   | 0   | 0,354                  | 162 |
| XPS                      | 1 – groß       | 28  | 1  | 2   | 0   | 0,181                  | 34  |
| Rand 20<br>mm um-        | 2 – mittel     | 12  | 2  | 1   | 0   | 0,280                  | 108 |
| laufend                  | 3 – klein      | 12  | 2  | 2   | 0   | 0,497                  | 269 |



# 5.4 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse aus Forschungsbereich B

Vakuumdämmung für sich betrachtet weist eine konkurrenzlos niedrige Wärmeleitfähigkeit auf. Bei Berücksichtigung praktischer Anforderungen wie beispielsweise Handhabung und Verarbeitung sind jedoch bestimmte Anpassungen notwendig, um die Folienkaschierung, die das Vakuum sicherstellt, wirksam zu schützen. Dazu eignen sich besonders Deckschichten und Randstreifenverbünde, die aber aufgrund anderer thermischer Eigenschaften die effektive Wärmeleitfähigkeit des Verbundprodukts maßgeblich beeinflussen.

# Einfluss von Randstreifen und Decklagen – linienförmige Wärmebrückeneffekte am Paneelrand

Um Wärmebrückeneffekte des Randverbundes zu minimieren, ist deshalb darauf zu achten, dass die verwendeten Materialien eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, eine höhere Dämmstärke gewählt wird und gleichzeitig aber die Ausführungsbreite des Randstreifens möglichst gering ist. Je (thermisch) besser und schmäler der Randverbund damit ausgebildet ist, desto geringer sind die Wärmeverluste und desto niedriger ist der zusätzliche Einfluss des verwendeten Deckmaterials.

Ist dies aus fertigungs- oder verarbeitungstechnischen Gründen nicht möglich, sollte auch bei der Decklage darauf geachtet werden, dass diese eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, um die Brückeneffekte nicht zu verstärken.

Dementsprechend schneiden die Varianten mit Aerogel-Randverbund im Vergleich am günstigsten ab. Mit steigender Dämmstärke (exemplarisch von 20 mm auf 40 mm) reduziert sich dabei der Effekt des Deckmaterials soweit, dass dieser für die Praxis vernachlässigbar wäre. Jedoch sind Aerogel-Dämmplatten, die für eine Ausbildung des Randes geeignet wären, derzeit keine marktgängige Lösung und noch im Entwicklungsstadium.

Damit stellen die Varianten mit Randstreifen auf Basis von CaSi und EPS aktuell verfügbare Möglichkeiten für den Randverbund dar. Für beide gilt, dass der Randeinfluss auf die Gesamtwärmeleitfähigkeit des Dämmpaneels nicht zu vernachlässigen ist. EPS schneidet aufgrund der günstigeren thermischen Eigenschaften gegenüber CaSi etwas besser ab.

### Einfluss von Befestigungsmitteln – punktförmige Wärmebrücken

Durch die Notwendigkeit zur Befestigung der (Verbund-)paneele an einer Tragkonstruktion entstehen aufgrund der erhöhten Wärmedurchgänge durch die Befestigungsmittel (Dübel, Anker, etc.) punktförmige Wärmebrücken. Exemplarisch wurden



für unterschiedliche Konstruktionen die  $\chi$ -Werte unter Variation von Dämmstärken und Randstreifenverbund ermittelt.

#### WDVS (Deckschicht aus XPS)

Für das untersuchte WDVS ergeben sich  $\chi$ -Werte im Bereich von ca. 0,0012 – 0,0017 W/K bei 20 mm Dämmstärke, bzw. ca. 0,0012 – 0,0015 W/K bei 40 mm Dämmstärke.

Im Rahmen der untersuchten Varianten lassen sich folgende Sensitivitäten feststellen. Mit steigender Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens und steigender Breite des Randstreifens werden geringere X-Werte ermittelt, da der punktförmige Wärmedurchgang durch den Befestiger im Vergleich zu der linienförmigen Wärmebrücke durch den thermisch ungünstigeren Randverbund geringer bewertet wird. Bei Aerogel als Randstreifenmaterial wirkt sich die Erhöhung der Randstreifenbreite praktisch nicht aus, da das Aerogel selbst eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit hat – die thermische Performance des Randverbundes bei steigender Randstreifenbreite also nicht wesentlich schlechter wird.

Bei geringen Randstreifenbreiten führt eine Erhöhung der Dämmstärke von 20 mm auf 40 mm zu tendenziell niedrigeren χ-Werten. Hierzu ist anzumerken, dass bei der Berechnung von punktförmigen Wärmebrücken komplexe Zusammenhänge vorliegen. Einerseits wird der Wärmestrom durch das ungestörte Bauteil (also das VIP Paneel ohne Randstreifen) geringer, andererseits sinken bei steigender Dämmstärke normalerweise auch die linienförmigen Wärmebrücken aus dem Randverbund. Aus diesen Abhängigkeiten kann geschlossen werden, dass für diese Einbausituation bei steigender Dämmdicke auch der Einfluss des punktförmigen Befestigers auf den Wärmedurchgang im Vergleich zu den genannten Einflüssen überproportional abnehmen muss.

### Innendämmung (Deckschicht aus GFK)

Für die untersuchte Innendämmung ergeben sich  $\chi$ -Werte im Bereich von ca. 0,0010 – 0,0020 W/K bei 20 mm Dämmstärke, bzw. ca. 0,0013 – 0,0019 W/K bei 40 mm Dämmstärke.

Insgesamt liegt zumindest für die Randstreifen aus Aerogel und EPS ein deutlich höheres Niveau der  $\chi$ -Werte als beim WDVS vor. Hierzu lässt sich anmerken, dass die Deckschicht aus GFK (ggü. den Deckschichten aus XPS beim WDVS) eine Kollektorwirkung auf den Dübel hat. Für Randstreifen aus CaSi (höchste Wärmeleitfähigkeit) werden bei größeren Randstreifenbreiten und dünner Dämmdicke geringere  $\chi$ -Werte als bei WDVS berechnet. Hier tritt die Kollektorwirkung mit zunehmender Breite des Randstreifens in den Hintergrund, Der Grund ist, dass der Temperaturgradient über das Bauteil, insbesondere im Bereich des VIP, kleiner ist als beim dikkeren Paneel und sich der Dübel mit zunehmender Breite des Randstreifens aus dem Einflussbereich des auf dem VIP gegenüber dem CaSi höheren Temperaturniveaus entfernt.



Ansonsten liegen verglichen mit WDVS qualitativ ähnliche, jedoch quantitativ ausgeprägtere Abängigkeiten von Randstreifenbreite und Randstreifenmaterial vor. Eine Erhöhung der Dämmstärke führt innerhalb der betrachteten Varianten zu einer geringeren Spreizung der Werte und einem geringeren Einfluss der Randstreifenbreite auf den *χ*-Wert.

## VHF (Deckschicht aus GFK)

Bei der vorgehängten Fassade werden L-Winkel als Befestigungsmittel verwendet. Dabei werden um den Faktor 10 höhere χ-Werte berechnet, da die Wärmebrückenwirkung des L-Winkels im Vergleich zum Dübel deutlich größer ist.

Für die untersuchte VHF ergeben sich  $\chi$ -Werte im Bereich von ca. 0,028 – 0,030 W/K bei 20 mm Dämmstärke, bzw. ca. 0,025 – 0,026 W/K bei 40 mm Dämmstärke.

Die Abstufung der χ-Werte bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Materialien für die Randstreifen verhält sich entsprechend den bereits diskutierten Zusammenhängen, d.h. je niedriger die Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens ist, umso stärker wirkt sich der zusätzliche Wärmedurchgang durch den Befestiger aus. Eine Erhöhung der Dämmstärke reduziert wieder die erreichten χ-Werte.

# Zur Auswirkung der Befestiger auf den U-Wert

Die Wärmebrücken durch punktförmige Befestigungsmittel müssen im U-Wert der Konstruktion berücksichtigt werden, wenn diese den U-Wert um mehr als drei Prozent erhöhen. Für die untersuchten Varianten werden die jeweils zulässige Anzahl an Dübeln/Befestigern je m<sup>2</sup> berechnet, die unter Beachtung des Drei-Prozent-Kriteriums noch eingesetzt werden können, ohne den U-Wert korriegieren zu müssen.

Für das untersuchte WDVS ergeben sich bei 20 mm Paneeldicke, je nach Randstreifenausbildung, 5 bis 11 Dübel/m<sup>2</sup>. Je nach Windlast und Orientierung ist damit eine sichere Befestigung des Systems möglich. Für die erhöhte Dämmdicke mit 40 mm ergeben sich niedrigere U-Werte und damit eine geringere Anzahl an Befestigern ohne Berücksichtigung im U-Wert. Je nach Konstruktion können dann noch 3 bis 7 Dübel/m<sup>2</sup> eingesetzt werden. Je nach Windlast und Orientierung ist dies u. U. für eine systemgerechte Befestigung nicht ausreichend – beim Einsatz von mehr Dübeln muss dann der Einfluss der punktförmigen Wärmebrücken berücksichtigt werden.

Bei der untersuchten Innendämmung können bei 20 mm Paneeldicke je nach Randstreifenausbildung 4 bis 20 Dübel/m<sup>2</sup> eingesetzt werden. Bei 40 mm Paneeldicke reduziert sich die Anzahl wieder auf 2 bis 8 Dübel/m<sup>2</sup>. Auch wenn die Anforderungen bei der Innendämmung hinsichtlich Windsog deutlich geringer sind, erscheinen bei höheren Dämmstärken 2 bis 3 Dübel/m<sup>2</sup> zu wenig um das System zu befestigen. Auch hier ist dann bei Verwendung von mehr Dübeln eine Berücksichtigung im U-Wert erforderlich.



Bei der vorgehängten Fassade ist durch die deutlich größere Wärmebrücke des eingesetzten L-Winkels in jedem Fall eine Berücksichtigung im U-Wert erforderlich.

# VIP als Kerndämmung in Betonfertigteilen

Werden VIP als Kerndämmung in Betonfertigteilen verwendet, ergeben sich je nach Elementgröße, Randausbildung, Anzahl der Verbundnadeln im Element und Anzahl der Flachanker teilweise deutliche Zuschläge auf den U-Wert. Diese liegen für die durchgeführten Beispielrechnungen bei 15 % bis 269 %.



# 6

# Forschungsbereich C "Bauphysikalische Fragestellungen bei Schadensfällen und Qualitätssicherung"

In der Praxis ergeben sich bei Vakuum-Isolations-Paneelen viele Fragen in der Anwendung. Insbesondere die Auswirkung eines belüfteten Paneels auf den Wärmedurchgang eines Bauteils ist unter dem Gesichtspunkt der Anwendungssicherheit relevant. Hierbei sollte insbesondere untersucht werden ob der Mindestwärmeschutz hinsichtlich Tauwasserfreiheit und Vermeidung von Schimmelpilzwachstum jederzeit eingehalten wird und wie viele belüftete Paneele in diesem Zusammenhang tolerierbar sind.

Die Klärung dieser Fragen ist für die rechtssichere Anwendung der VIP Bauweise sehr wichtig. Dadurch kann Vertrauen bei den Bauschaffenden aufgebaut und die Verbreitung der VIP Bauweise gefördert werden, was dazu beiträgt, eine nachhaltige Reduzierung des Energiebedarfs von Gebäuden zu erreichen.

Angesichts vieler offener Fragen steht man vor der Herausforderung, Sicherheit für die Anwender zu schaffen und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller zu steigern (überwiegend deutscher Mittelstand).

Im Folgenden werden zunächst die angewendeten Methoden zur Berechnung des Einfluss belüfteter Paneele auf den Wärmedurchgang erläutert und anschließend die Ergebnisse diskutiert.

# 6.1 Methoden

# Belüftung einzelner Paneele bei VIP-gedämmten Bauteilen

Das Ausfallrisiko bei VIPs durch die Möglichkeit der Beschädigung und der damit einhergehenden Belüftung der Paneele kann durch die Verwendung von Randstreifen und geeigneten Deckschichten sowie eine angepasste Arbeitsweise auf der Baustelle effektiv reduziert werden. Dennoch ist eine im Regelfall unerkannt bleibende Belüftung der VIP nicht auszuschließen und ist daher in seinen Auswirkungen auf die schutztechnischen Eigenschaften der Fassade interessant.

### Auswirkungen auf die Dämmwirkung eines Bauteils

Durch die Belüftung von einzelnen VIP in einer gedämmten Bauteilfläche erhöht sich im Bereich des belüfteten VIP-Kerns die Wärmeleitfähigkeit um bis zu über 100 %. Gleichzeitig verringert sich dadurch der Wärmebrückeneinfluss des Randstreifens, im Falle von Aerogelrandstreifen kann der  $\psi$ -Wert sogar negativ werden. Für eine rechnerische Betrachtung des Einflusses von belüfteten Paneelen muss dies daher mit berücksichtigt werden.



Dazu werden die Wärmebrückenberechnungen (Forschungsbereich B) auf belüftete Paneele erweitert. Für eine gedämmte Fläche wird für unterschiedliche Paneelgrößen die Auswirkung auf den Wärmedurchlasswiderstand in Abhängigkeit vom Anteil an belüfteten Paneelen betrachtet.

Für die betrachteten Varianten an VIP mit verschiedenen Randstreifen und Deckschichten soll untersucht werden, welcher Anteil der belüfteten VIP toleriert werden kann. Dabei wird das Bagatellkriterium der DIN EN ISO 6946 von höchstens 3 % Erhöhung des U-Werts als Grenzwert herangezogen.

Die Ergebnisse der  $\psi$ -Werte für Stoßstellen und belüfteten und von unbelüfteten VIP sind in nachfolgender Tabelle dargestellt. Dabei handelt es sich um die  $\psi$ -Werte einer halben Stoßstelle, zur Berechnung von mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten ist also die gesamte Umfangslänge der VIP anzusetzen.

| Tabelle 54: | Wärmebrücken bei unbelüfteten und belüfteten Paneelen mit - längenbezogene |
|-------------|--|
|             | und punktförmige Wärmedurchgangskoeffizienten (Generischer Befestiger und  |
|             | Stoßstellen der Paneele) für verschiedene VIP-Varianten mit 5 mm EPS-      |
|             | Deckschichten  |

| Variante<br>Nr. | Dicke<br>VIP | Breite<br>Randstreifen | Wärmeleit-<br>fähigkeit<br>Randstreifen | ψ-Wert<br>unbelüftet | ψ-Wert<br>belüftet |         |
|-----------------|--------------|------------------------|---|----------------------|--------------------|---------|
|                 | [mm]         | [mm]                   | [W/(m·K)]                               | [W/(m·K)]            | [W/(m·K)]          |         |
| 111             |              |                        | 0,015                                   | 0,0029               | -0,0009            |         |
| 112             |              | 10                     | 0,035                                   | 0,0082               | 0,0043             |         |
| 113             |              |                        | 0,065                                   | 0,0131               | 0,0092             |         |
| 141             |              |                        | 0,015                                   | 0,0072               | -0,0022            |         |
| 142             | 20           | 25                     | 0,035                                   | 0,0201               | 0,0105             |         |
| 143             |              |                        | 0,065                                   | 0,0318               | 0,0222             |         |
| 151             |              |                        |   | 0,015                | 0,0144             | -0,0046 |
| 152             |              | 50                     | 0,035                                   | 0,0399               | 0,0208             |         |
| 153             |              |                        | 0,065                                   | 0,0630               | 0,0439             |         |
| 211             |              |                        | 0,015                                   | 0,0017               | -0,0006            |         |
| 212             |              | 10                     | 0,035                                   | 0,0052               | 0,0029             |         |
| 213             |              |                        | 0,065                                   | 0,0093               | 0,0069             |         |
| 241             |              |                        | 0,015                                   | 0,0042               | -0,0015            |         |
| 242             | 40           | 25                     | 0,035                                   | 0,0129               | 0,0072             |         |
| 243             |              |                        | 0,065                                   | 0,0227               | 0,0169             |         |
| 251             |              |                        | 0,015                                   | 0,0084               | -0,0029            |         |
| 252             |              | 50                     | 0,035                                   | 0,0257               | 0,0143             |         |
| 253             |              |                        | 0,065                                   | 0,0449               | 0,0335             |         |

Durch die Belüftung der VIP reduzieren sich die  $\psi$ -Werte. Die relative Änderung ist hauptsächlich durch die Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens bestimmt. Bei Randstreifen mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,015 W/(m·K) reduziert sich der  $\psi$ -Wert



um über 130 %, wird also negativ. Bei einer Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens von 0,035 W/(m·K) reduziert sich der  $\psi$ -Wert um etwa 45 – 50 %, bei einer Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens von 0,065 W/(m·K) nur noch um 25 – 30 %.

Aus den in oberer Tabelle dargestellten  $\psi$ -Werten werden für eine flächige Dämmschicht die mittleren R-Werte einer Dämmschicht in Abhängigkeit des Flächenanteils an belüfteten Paneelen berechnet. Die T- und/oder Kreuzstöße werden dabei nicht berücksichtigt. Dadurch werden die Wärmebrückenwirkungen tendenziell überschätzt – allerding in vernachlässigbar kleinem Ausmaß.

Der mittlere R-Wert wurde wie folgt berechnet:

$$R_{mean} = \frac{1}{(\psi_{VIP} \cdot (1 - a_{bl}) + \psi_{VIP,bl} \cdot a_{bl} + k_{D,a} \cdot \chi_D) \cdot \frac{l_{VIP}}{A_{VIP}} + (\frac{a_{bl} \cdot \lambda_{VIP,bl} + (1 - a_{bl}) \cdot \lambda_{VIP}}{d_{VIP,Kern}}) + 2R_D$$
(25)

Dabei ist

| $a_{bl}$              | der Flächenanteil an belüfteten VIP im Bauteil in %  |
|-----------------------|--|
| k <sub>D,a</sub>      | Dübeldichte (Anzahl Befestiger pro Bauteilfläche) in m <sup>-2</sup>                               |
| ΧD                    | der punktförmige Wärmebrückenkoeffizient des Befestigers für<br>den jeweiligen Randstreifen in W/K |
| l <sub>VIP</sub>      | die Umfangslänge eines VIP in m  |
| A <sub>VIP</sub>      | die Fläche eines VIP in m²   |
| d <sub>VIP,Kern</sub> | die Dicke des VIP-Kerns ohne Deckschichten in m  |
| $\psi_{_{VIP}}$       | der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient einer halben<br>VIP Stoßstelle in W/(m·K)            |
| $\psi_{VIP,bl}$       | der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient einer halben<br>Stoßstelle belüfteter VIP in W/(m·K) |
| $\lambda_{VIP}$       | die Wärmeleitfähigkeit des VIP-Kernmaterials im evakuierten<br>Zustand in W/(m⋅K)                  |



- $\lambda_{VIP,bl}$  die Wärmeleitfähigkeit des VIP-Kernmaterials im belüfteten Zustand in W/(m·K)
- *R<sub>D</sub>* der Wärmedurchlasswiederstand einer VIP-Deckschicht

Für einen Großteil der im Forschungsbereich B betrachteten Varianten an VIP mit Randstreifen und Deckschichten werden längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient auch für den Fall von belüfteten Paneelen betrachtet.

Es wird davon ausgegangen, dass die belüfteten Paneele sich mit einer zufälligen Verteilung auf der betrachteten Bauteilfläche befinden.

In einer Voruntersuchung wird der Querleitungseinfluss zwischen 2 Paneelen untersucht, für den Fall, dass ein Paneel belüftet und das benachbarte unbelüftet ist. Hier zeigt sich, dass der Querleitungseffekt vernachlässigbar klein ist und somit die Anordnung der belüfteten Paneele auf der Bauteilfläche keinen signifikanten Einfluss auf den mittleren Wärmeverlust hat.

Für die Berechnung des mittleren R-Werts einer gedämmten Fläche mit teilweise belüfteten Paneelen werden anteilig die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient eines Stoßes von belüfteten Paneelen und einer VIP-Stoßstelle von unbelüfteten Paneelen angesetzt. Dabei wird jeweils der halbe längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient einer Stoßstelle mit der gesamten Umfangslänge des jeweiligen Paneels berücksichtigt.

Des Weiteren werden die punktförmigen Wärmedurchgangskoeffizienten eines generischen Dübels mit einer 0,002 W/K – Klassifizierung nach EOTA TR 025 aus den Berechnungen in Forschungsbereich B in der Anwendung als WDVS für alle Varianten und Paneelgrößen mit einer konstanten Dübeldichte von 4 St./m<sup>2</sup> berücksichtigt.

### Randbedingungen:

Das VIP wird als Block (ohne Folie) modelliert. Stattdessen wird der Einfluss der Barrierefolien im angesetzten Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des VIP berücksichtigt.

Die betrachteten VIP werden mit einer 5 mm EPS-Deckschicht modelliert.

Für intakte VIP wird ein Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von 0,007 W/(m·K) angesetzt. Bei belüfteten Paneelen wird eine Wärmeleitfähigkeit von 0,018 W/(m·K) angesetzt. Dieser entspricht üblichen Werten für pyrogene Kieselsäure.

Es wird nur die Dämmschicht ohne Unterkonstruktion modelliert. Auch findet im Modell keine Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände statt. Dadurch fallen die  $\psi$ -Werte etwas höher aus und die berechneten Werte sind für alle Anwendungen auf der sicheren Seite. Vergleicht man diese Werte mit den konstruktionsspezifi-



schen Werten (siehe Ergebnisteil unter Forschungsbereich B) ist ersichtlich, dass die Werte aber nur geringfügig größer sind.

#### Mindestwärmeschutz

Die Beschädigung eines VIP resultiert in lokal verringerten Wärmedurchlasswiderständen des Bauteils. Dadurch tritt dort raumseitig eine niedrigere Oberflächentemperatur auf.

Dieser Effekt kann anhand des Temperaturfaktors  $f_{Rsi}$  nach DIN 4108-2 bewertet werden. Liegt der Temperaturfaktor bei einer mit VIP gedämmten Konstruktion auch im belüfteten Fall über dem Grenzwert von 0,70, sind der Mindestwärmeschutz und die darin verankerten hygienischen Anforderungen eingehalten.

Die Betrachtung wird generisch für ein flächiges Bauteil mit U-Werten zwischen 2,0 W/(m<sup>2</sup>·K) und 0,6 W/(m<sup>2</sup>·K) durchgeführt. Diese werden mit belüfteten VIP mit Deckschicht aus GFK und VIP-Kernen aus pyrogener Kieselsäure mit Kerndicken zwischen 5 mm und 20 mm kombiniert.

Die Berechnung der Temperaturfaktoren erfolgt eindimensional für den ungestörten Bereich des VIP nach den Vorgaben der DIN 4108-2.

Die Temperaturen im Bereich von Wärmebrücken durch Randstreifen oder Stoßfugen werden hier nicht betrachtet, ergäben aber u.U. noch etwas kritischere Werte. Bei VIP-Produkten, deren Randstreifen nennenswerte Wärmebrücken verursachen, sollte die Betrachtung der Innenoberflächentemperatur im Zweifelsfall durch eine dreidimensionale Finite-Elemente-Berechnung geschehen.

### 6.2 Ergebnisse zu Forschungsbereich C

### Belüftung einzelner Paneele bei VIP-gedämmten Bauteilen

### Auswirkungen auf die Dämmwirkung eines Bauteils

Nachfolgende Abbildungen stellen den Einfluss verschiedener Parameter der VIPs auf die Reduktion des R-Werts einer VIP-Dämmschicht in Anhängigkeit des Flächenanteils an belüfteten VIP dar.

Die Abbildung 68 zeigt den Verlauf des Wärmedurchlasswiderstands in Abhängigkeit des Flächenanteils an belüfteten VIP für verschiedene Paneelgrößen. Es wird ein 20 mm VIP-Kern mit 5 mm EPS-Deckschichten und einem 10 mm Randstreifen mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,015 W/(m·K) (z. B. Aerogel) betrachtet. Die geringen Abmessungen und die niedrige Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens bewirken nur geringe Wärmebrückeneffekte in der Dämmung.

Wird ein Paneel belüftet, wird im Bereich des Randstreifens sogar die Dämmwirkung höher als im Bereich des VIP-Kerns. Die theoretische Vergleichskurve, bei der keine Stoßfugen mit Wärmebrücken betrachtet werden, zeigt die isolierten Auswirkungen der höheren Wärmeleitfähigkeit des Kerns.



Die Paneele verhalten sich trotz der Größenunterschiede ähnlich, da die Wärmebrückenwirkung der gut dämmenden Randstreifen gering ist.



Abbildung 68: Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (20 mm VIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Vergleich unterschiedlicher Paneelgrößen bei 20 mm VIP mit 10 mm Randstreifen mit Wärmeleitfähigkeit 0,015 W/(m·K)

In Abbildung 69 ist derselbe Vergleich für ein VIP mit 20 mm Kerndicke und 25 mm Randstreifen mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,065 W/(m·K) dargestellt. Hier ist der Einfluss der Paneelgröße deutlich ausgeprägter, wenn man die relative Änderung des Wärmedurchlasswiderstands betrachtet.

Dadurch, dass der R-Wert auch ohne belüftete Paneele durch den höheren Wärmebrückenverlust der kleineren Paneele deutlich niedriger ist, tolerieren die kleineren Paneele höhere Flächenanteile an belüfteten Paneelen. Während bei 1,0 x 2,0 m großen Paneelen die Änderung des R-Werts bei 10 % belüfteter Paneele über -10 % beträgt, reduziert sich der R-Wert bei gleichem Anteil an belüfteten Paneelen der Größe 0,5 x 0,5 m nur um knapp 8 %.

Der mittlere R-Wert der großen Paneele ist jedoch aufgrund der geringeren Wärmebrückenverluste durch die Stoßstellen unabhängig vom Belüftungsgrad deutlich höher. Vergleicht man die relative Änderung des R-Werts zweier unterschiedlich dicker VIP mit gleichen Randstreifen und gleichem Flächenanteil an belüfteten VIP, (siehe Abbildung 69, Abbildung 70 und Abbildung 72) so zeigt sich, dass diese bei dickeren VIP kleiner ausfällt.





Abbildung 69: Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (20 mm VIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Vergleich unterschiedlicher Paneelgrößen bei 20 mm VIP mit 25 mm Randstreifen mit Wärmeleitfähigkeit 0,065 W/(m·K)



Abbildung 70: Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (40 mm VIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Vergleich unterschiedlicher Paneelgrößen bei 40 mm dicken VIP mit 25 mm Randstreifen mit Wärmeleitfähigkeit 0,065 W/(m·K)





Abbildung 71: Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (VIP mit 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Vergleich unterschiedlicher VIP-Kern-Dicken bei VIP Paneelen mit 25 mm breiten Randstreifen mit Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(m·K)

Die Wärmebrückenwirkung der Stoßstellen ist stark abhängig von der Breite und der Wärmeleitfähigkeit der Randstreifen. Die Reduktion des Wärmedurchlasswiderstands durch Belüftung ist auch in diesem Vergleich bei denjenigen VIP-Varianten niedriger, bei denen die Wärmebrückenverluste durch die Randstreifen am größten sind, also bei breiten Randstreifen (Abbildung 72) und bei Randstreifen mit hoher Wärmeleitfähigkeit (Abbildung 73).

Allgemein gilt, je besser das Paneel im Randbereich thermisch optimiert ist, desto ausgeprägter sinkt der mittlere R-Wert der Dämmschicht in Abhängigkeit des Flächenanteils an belüfteten VIP. Gerade bei gut optimierten VIP.Produkten muss demnach auf die Vermeidung von Belüftung geachtet werden.





Abbildung 72: Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (40 mm VIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Vergleich unterschiedlicher Randstreifenbreiten bei VIP Paneelen mit 1,0 m x 1,0 m und Randstreifen mit Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(m·K)



Abbildung 73: Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (40 mm VIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Vergleich unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten der Randstreifen bei VIP Paneelen mit 1,0 m x 1,0 m und 25 mm breiten Randstreifen

Das Bagatellkriterium in der DIN EN ISO 6946 sieht ab einer Verschlechterung des U-Werts von 3 % eine Berücksichtigung beim wärmeschutztechnischen Nachweis vor. In den vorliegenden Berechnungen wurde die Auswirkung auf den R-Wert der Dämmung unabhängig von der Unterkonstruktion betrachtet.

Begrenzt man die Verringerung des R-Werts der Dämmschicht auf 2,9 % entspricht das einem Anstieg des U-Werts dieser Dämmschicht um unter 3 %. Diese Grenze kann universell auf alle Unterkonstruktionen übertragen werden, da hier der Anstieg des U-Werts je nach U-Wert der ungedämmten Unterkonstruktion entsprechend kleiner ausfällt.



# Tabelle 55:Belüftung von VIP – Grenzwert des Flächenanteils an belüfteten Paneelen (3-%<br/>ΔU-Kriterium nach DIN EN ISO 6946) für verschiedene VIP Varianten mit 5 mm<br/>EPS-Deckschichten (ΔU ohne Berücksichtigung einer Unterkonstruktion)

| Varian-<br>te | Dicke VIP | Breite       | Wärmeleit-<br>fähigkeit<br>Randstrei- | Paneelgröße (L [m] x B [m])   |           |           |           |
|---------------|-----------|--------------|---------------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|
|               |           | Randstreifen |                                       | 0,5 x 0,5   | 0,5 x 1,0 | 1,0 x 1,0 | 1,0 x 2,0 |
| Nr.           | [mm]      | [mm]         | fen<br>[W/(m⋅K)]                      | Grenzwert des Flächenanteils<br>an belüfteten Paneelen<br>(3-% ΔU-Kriterium nach DIN EN ISO 6946) |           |           |           |
| 111           |           | 10           | 0,015                                 | 3,0 %   | 2,9 %     | 2,8 %     | 2,7 %     |
| 112           |           |              | 0,035                                 | 3,3 %   | 3,1 %     | 3,0 %     | 2,9 %     |
| 113           |           |              | 0,065                                 | 3,7 %   | 3,3 %     | 3,1 %     | 3,0 %     |
| 141           |           | 25           | 0,015                                 | 3,6 %   | 3,3 %     | 3,0 %     | 2,9 %     |
| 142           | 20        |              | 0,035                                 | 4,6 %   | 3,9 %     | 3,5 %     | 3,3 %     |
| 143           |           |              | 0,065                                 | 5,5 %   | 4,3 %     | 3,9 %     | 3,6 %     |
| 151           |           | 50           | 0,015                                 | 4,9 %   | 4,3 %     | 3,6 %     | 3,3 %     |
| 152           | ]         |              | 0,035                                 | 7,4 %   | 5,3 %     | 4,6 %     | 4,0 %     |
| 153           |           |              | 0,065                                 | 9,9 %   | 6,2 %     | 5,5 %     | 4,7 %     |
| 211           | 40        | 10           | 0,015                                 | 2,9 %   | 2,8 %     | 2,7 %     | 2,7 %     |
| 212           |           |              | 0,035                                 | 3,4 %   | 3,1 %     | 2,9 %     | 2,8 %     |
| 213           |           |              | 0,065                                 | 3,9 %   | 3,4 %     | 3,2 %     | 3,0 %     |
| 241           |           | 25           | 0,015                                 | 3,6 %   | 3,3 %     | 3,0 %     | 2,9 %     |
| 242           |           |              | 0,035                                 | 4,9 %   | 4,0 %     | 3,6 %     | 3,3 %     |
| 243           |           |              | 0,065                                 | 6,4 %   | 4,6 %     | 4,2 %     | 3,8 %     |
| 251           |           |              | 0,015                                 | 5,3 %   | 4,5 %     | 3,6 %     | 3,3 %     |
| 252           |           | 50           | 0,035                                 | 8,5 %   | 5,7 %     | 4,9 %     | 4,2 %     |
| 253           |           |              | 0,065                                 | 12,4 %  | 6,8 %     | 6,3 %     | 5,2 %     |

Die Tabelle 55 zeigt, dass der obere Grenzwert der belüfteten VIP-Flächen für alle Anwendungen und betrachteten VIP-Varianten nicht unter 2,5 % beträgt.

Je größer das Flächenverhältnis der Randstreifen zum VIP-Kern und je größer die Wärmebrückeneffekte der Randstreifen, desto größer wird der obere Grenzwert.

Bei 0,5 m x 0,5 m kleinen VIP mit 40 mm Dicke und mit einem 50 mm breiten Randstreifen mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,065 W/( $m \cdot K$ ) liegt der Grenzwert bei über 10 %.

Die Werte sind für VIP mit 5 mm EPS-Deckschichten berechnet. Variiert man die Deckschicht und führt oben beschriebene Berechnungen durch, liegen die Grenzwerte auch für eine metallische Deckschicht ebenfalls nicht unter 2,5 %. Bei breiten Randstreifen mit hohen Wärmeleitfähigkeiten werden bei metallischen Deckschichten sogar deutlich höhere Grenzwerte des Flächenanteils an belüfteten Paneelen erreicht. Bei Variante 253 beträgt dieser Grenzwert bei 5 mm EPS-Deckschichten



12,3 %, bei 3 mm starken Metalldeckschichten schon über 16 %. Dies hängt mit der verstärkten Kollektorwirkung der metallischen Deckschicht zusammen.

Aus den Ergebnissen dieser Betrachtung lässt sich schließen, dass für gängige VIP-Produkte auf Basis von Kieselsäure-Kernen in allen Anwendungen in der Gebäudehülle ein Grenzwert des Flächenanteils an belüfteten Paneelen von 2,5 % verwendet werden kann. Dabei werden stets Anstiege des mittleren U-Werts von unter 3 % gewährleistet. Der mittlere U-Wert berücksichtigt sowohl die erhöhte Wärmeleitfähigkeit in der Fläche, als auch die Wärmebrückeneffekte am Rand und den Befestigern (vgl. Tabelle 54 und Gleichung (25)).

## **Mindestwärmeschutz**

VIP20 mit GFK

VIP 30 mit GFK

VIP 40 mit GFK

10

15

20

Der Wärmedurchlasswiderstand von belüfteten VIP wird mit einer Wärmeleitfähigkeit des Kerns im belüfteten Zustand von 0,018 W/(m·K) berechnet. Bei VIP mit beidseitiger 3 mm GFK- Deckschicht (Wärmeleitfähigkeit 0,3 W/(m·K)) ergeben sich folgende Wärmedurchlasswiderstände in Abhängigkeit der Dicke des VIP-Kerns:

| durch Randsteifen/Stoßstellen) |                            |                 |  |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------|--|
|                                | d <sub>VIP,K</sub><br>[mm] | R<br>[(m²·K)/W] |  |
| VIP10 mit GFK                  | 5                          | 0,3             |  |

0,6

0,9

1,1

 Tabelle 56:
 Wärmedurchlasswiderstand eines belüfteten VIP (ohne Wärmebrückeneinfluss durch Randsteifen/Stoßstellen)

Auf Basis oberer Wärmedurchlasswiderstände ist für flächige Bauteile mit unterschiedlichen U-Werten (Angaben ohne VIP-Dämmung), die mit belüfteten VIP gedämmt sind, ist in nachfolgender Tabelle der Temperaturfaktor f<sub>Rsi</sub> nach DIN 4108-2 bei eindimensionaler Betrachtung dargestellt.

Die roten Markierungen einzelner Werte deuten die Unterschreitung des Grenzwerts von 0,70 an.



| f <sub>Rsi</sub> [-]                   |     | Dicke belüfteter VIP Kern [mm] |      |      |      |      |
|--|-----|--------------------------------|------|------|------|------|
|  |     | ohne VIP                       | 5    | 10   | 15   | 20   |
| U-Wert Unterkonstruktion<br>[W/(m²-K)] | 2,0 | 0,50                           | 0,69 | 0,77 | 0,82 | 0,85 |
|  | 1,8 | 0,55                           | 0,71 | 0,78 | 0,82 | 0,85 |
|  | 1,6 | 0,60                           | 0,73 | 0,79 | 0,83 | 0,86 |
|  | 1,4 | 0,65                           | 0,75 | 0,81 | 0,84 | 0,86 |
|  | 1,2 | 0,70                           | 0,78 | 0,82 | 0,85 | 0,87 |
|  | 1,0 | 0,75                           | 0,81 | 0,84 | 0,87 | 0,88 |
|  | 0,8 | 0,80                           | 0,84 | 0,86 | 0,88 | 0,90 |
|  | 0,6 | 0,85                           | 0,87 | 0,89 | 0,90 | 0,91 |

Tabelle 57:Temperaturfaktoren im ungestörten Bereich bei Bauteilen mit belüfteten VIP<br/>(ohne Wärmebrückeneinflüsse)

Die Ergebnisse zeigen, dass für VIP-Produkte ohne nennenswerte Wärmebrückeneffekte durch Randstreifen der Grenzwert des Temperaturfaktors von 0,7 auch im Bereich belüfteter Paneele eingehalten wird, sofern der U-Wert der Bestandskonstruktion höchstens 1,8 W/(m<sup>2</sup>·K) beträgt und ein VIP mit einer Mindestdicke von 5 mm verwendet wird.

| Tabelle 58: | Wärmedurchlasswiderstand R verschiedener Unterkonstruktionen mit belüfte- |
|-------------|---|
|             | ten VIP (ohne Wärmebrückeneinflüsse)                                      |

| R (mit VIP) [(m²·K)/W]                 |     | Dicke belüfteter VIP Kern [mm] |     |     |     |
|--|-----|--------------------------------|-----|-----|-----|
|  |     | 5                              | 10  | 15  | 20  |
| U-Wert Unterkonstruktion<br>[W/(m²·K)] | 2,0 | 0,6                            | 0,9 | 1,2 | 1,5 |
|  | 1,8 | 0,7                            | 1,0 | 1,2 | 1,5 |
|  | 1,6 | 0,8                            | 1,0 | 1,3 | 1,6 |
|  | 1,4 | 0,8                            | 1,1 | 1,4 | 1,7 |
|  | 1,2 | 1,0                            | 1,2 | 1,5 | 1,8 |
|  | 1,0 | 1,1                            | 1,4 | 1,7 | 2,0 |
|  | 0,8 | 1,4                            | 1,7 | 1,9 | 2,2 |
|  | 0,6 | 1,8                            | 2,1 | 2,4 | 2,6 |

Die Tabelle 58 stellt die R-Werte für Kombinationen der betrachteten Unterkonstruktionen mit zusätzlichen belüfteten VIP dar. Die roten Markierungen einzelner Werte deuten die Unterschreitung der Anforderung des Mindestwärmeschutzes nach DIN 4108-2 an Außenwände von R  $\ge$  1,2 (m<sup>2</sup>·K)/W.

Vergleicht man die Unterschreitungen der betrachteten Kombinationen, ist ersichtlich, dass der Grenzwert des Temperaturfaktors im ungestörten Bereich in jeden Fall eingehalten wird, wenn die Auslegung der VIP so erfolgt, dass der Mindestwärmedurchlasswiderstand von 1,2 (m<sup>2</sup>·K)/W auch im Bereich belüfteter VIP eingehalten wird.



Da der Temperaturfaktor jedoch auch in Bereichen von Wärmebrücken eingehalten werden muss, sollte eine Wärmebrückenbetrachtung bei mit VIP gedämmten Bauteilen immer auch den Fall der Belüftung der VIP einbeziehen.

### 6.3 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse aus Forschungsbereich C

Zusammenfassend können folgende Kernaussagen für die im Forschungsbereich C durchgeführten Untersuchungen abgeleitet werden.

Die Auswirkungen der Belüftung einzelner Paneele auf den mittleren U-Wert der Fassade steigen mit der Verwendung von dünnen und hochwärmedämmenden Randstreifen an.

Bleibt der Flächenanteil an belüfteten Paneelen unter 2 – 3 % ist i.d.R. keine Berücksichtigung der belüfteten Paneele im U-Wert des Bauteils notwendig (siehe Bagatellkriterium DIN EN ISO 6946).

Am Bau sollte ein entsprechendes Qualitätsmanagement sicherstellen, dass das Risiko einer Belüftung von VIPs entsprechend diesen Anforderungen gering gehalten wird.

Die Oberflächentemperaturen im Bereich belüfteter VIP auf Kieselsäurebasis sind als unkritisch zu betrachten, da das Kernmaterial auch bei Umgebungsdruck eine ausreichende Dämmwirkung behält um hygienischen Anforderungen zu genügen. Maßgeblich für die Betrachtung des Mindestwärmeschutz ist die Oberflächentemperatur im Bereich belüfteter VIP, da der Mindestwärmedurchlasswiderstand gemäß DIN 4108-2 eine bauteilbezogene Anforderung darstellt, die lokal auch unterschritten werden darf.

Bei der Verwendung von VIP ab 15 mm ist auch im Bereich eines belüfteten VIP keine lokale Unterschreitung der Mindestwärmedurchlasswiderstand von 1,2 (m<sup>2</sup>·K)/W zu erwarten.



# 7 Fazit

Der vorliegende Forschungsbericht behandelt Fragen der Dauerhaftigkeit von VIP unter baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhältnissen, Berechnungen zu Wärmebrücken an Stößen und Anschlussbauteilen und die Auswirkung belüfteter VIP auf den Wärmedurchgang der gedämmten Fläche. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse in den drei Forschungsbereichen findet sich in den Unterkapiteln 4.5, 5.4 und 6.3.

# 7.1 Dauerhaftigkeit von VIPs

Die Dauerhaftigkeit von VIP wird von mehreren Faktoren bestimmt. Zunächst ist in diesem Zusammenhang natürlich die Qualität der Produktion, insbesondere im Hinblick auf die Verschweißung der Siegelnähte wichtig und im Weiteren muss durch entsprechende Vorsichtsmaßnahmen beim Transport, Handling und Einbau die mechanische Unversehrtheit der Hülle gewährleistet sein. Letzteres wird z. B. durch die Verwendung von Decklagen aus Hartschaum, GFK oder Metall gewährleistet.

Trotzdem steigt der Innendruck von VIP durch die unvermeidliche Permeation von trockenen Luftgasen und Wasserdampf über die Jahre an, was mit einer entsprechenden Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit einhergeht. Unter den untersuchten baupraktischen Klimaten zeigt sich, dass insbesondere auch die Permeation von Wasserdampf, entscheidend zum Anstieg der Wärmeleitfähigkeit beiträgt. Neben der Erhöhung des Innendrucks spielt hier auch der Wärmeleitfähigkeitsanstieg des Kernmaterials aufgrund der erhöhten Kernfeuchte eine Rolle. Während der Druckanstieg aufgrund Permeation trockener Luftgase während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren praktisch linear ansteigt, lassen die Innendruckanstiege aufgrund von Permeation des Wasserdampfs im gleichen Zeitraum merklich nach. Nach etwa 25 Jahren befindet sich der Kern der VIP im Feuchtegleichgewicht mit der Umgebung.

Das beschriebene Verhalten der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Zeit führt also während der betrachteten 50 Jahre der Nutzung zu degressiven Funktionsverläufen. Um einen vergleichbaren Bezugswert der Wärmeleitfähigkeit zu erhalten wird im Weiteren die mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung  $(\lambda_{m,25} [W/(m K)])$  herangezogen. Dieser Wert wird auch im aktuellen Entwurfsdokument der Produktnorm für VIP als Bezugsgröße zur Berechnung der Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit verwendet. Zu Beginn der Nutzung erhält der Verbraucher also eine etwas niedrigere, gegen Ende der Nutzung eine etwas höhere Wärmeleitfähigkeit als der Nennwert deklariert.

Die folgenden Werte gelten für VIP mit einer Dicke von 20 mm. Die Anwendung von VIP dieser Dicke stellt für viele Konstruktionen einen unteren sinnvollen Grenzfall der Nenndicke dar. Die Anwendung von VIP größerer Dicke führt zu geringeren Druckanstiegen und damit auch zu geringeren Anstiegen der Wärmeleitfähigkeit.



Die angesprochene Verwendung unterschiedlicher Decklagen kann die an der Hüllfolie anliegende relative Luftfeuchte beeinflussen. Entsprechend diffusionsdichte Decklagen führen zu einer Verringerung der relativen Luftfeuchte an der Hüllfolie, was niedrigere Werte von  $\lambda_{m,25}$  mit sich bringt. Der Effekt ist in den untersuchten Anwendungen sichtbar, aber gegenüber dem Standort des Gebäudes und der Konstruktion von untergeordneter Bedeutung.

# Einflüsse aus Standort, Orientierung und Feuchtebelastung

Größeren Einfluss auf  $\lambda_{m,25}$  haben der Standort und die Orientierung des Gebäudes, wobei diese Effekte wiederum konstruktionsspezifisch sind. Beispielsweise werden bei einem WDVS am Standort Freiburg in Südorientierung ein  $\lambda_{m,25}$  von etwa 6,5 mW/(m K) ermittelt, das 0,5 mW/(m K) höher ist, als die vergleichbare Konstruktion und Orientierung am Standort Holzkirchen ( $\lambda_{m,25} = 6,0$  mW/(m K). Wird am Standort Holzkirchen jedoch die Feuchtebelastung im Innenraum erhöht und die Bauteilorientierung auf die Hauptschlagregenrichtung (West) gedreht, steigt das  $\lambda_{m,25}$  auf Werte von ca. 6,6 mW/(m K). Zwischen dem günstigsten und ungünstigsten Fall ist an einem Standort also eine Schwankungsbreite von  $\lambda_{m,25}$  im Bereich von ca. 10 % auszumachen. (Abbildung 35)

Deutlich geringer ist die Schwankungsbreite in Abhängigkeit von Standort und Orientierung bei der Anwendung als Innendämmung. Hier liegt  $\lambda_{m,25}$  in Holzkirchen im günstigsten Fall (Südorientierung, Normale Feuchtelast im Innenraum) bei ca. 5,85 mW/(m K) und im ungünstigsten Fall (Südorientierung, Erhöhte Feuchtelast im Innenraum) bei ca. 6,0 mW/(m K). Die Schwankungsbreite ist hier mit ca. 2,5 % also erklärlicherweise deutlich geringer, weil die VIP auf der Warmseite der Konstruktion liegen. (Abbildung 36)

Die anderen untersuchten Fälle liegen zwischen diesen Extremen. (Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 37) Insgesamt liegt die maximale Schwankungsbreite der Mittelwerte für die ersten 25 Jahre, aus Standort, Anwendung und Orientierung für die untersuchten, für Deutschland repräsentativen Standorte, in einem Bereich von ca. 0,0055 – 0,0067 W/(m K).

# Einfluss der Paneeldicke

Bei größerer Paneeldicke wird die Hüllfläche nur geringfügig vergrößert, das Volumen erhöht sich jedoch proportional zur Dickenänderung. Durch diesen Effekt werden die Innendruckanstiege über der Zeit geringer. Eine Erhöhung der Paneeldicke führt bei dem bereits diskutierten WDVS, Standort in Holzkirchen, erhöhte Feuchtebelastung im Innenraum, Westorientierung zu einer Verringerung von  $\lambda_{m,25}$ von 6,6 mW/(m K) (20 mm Paneeldicke) auf 5,9 mW/(m K) (30 mm Paneeldicke) sowie 5,5 mW/(m K) (40 mm Paneeldicke). Für die anderen Varianten gelten die Abstufungen in ähnlicher Größenordnung. Hinsichtlich der Alterungseinflüsse ver-



halten sich dickere Paneele somit noch deutlich gutmütiger als dünne Paneele, wenn ansonsten gleiche Abmessungen untersucht werden.

#### Anwendungsspezifische Bemessungswerte

Die vorgestellte Methodik der Modellierung der Wärmeleitfähigkeit von VIP unter baupraktischen Klimabedingungen kann zudem zur Ableitung von Nenn- und Bemessungswerten genutzt werden.

Ein naheliegender Gedanke ist die Erstellung von Nutzungsklassen (z. B. nach Gebäudestandort, Konstruktion, Orientierung und Innenraumnutzung) und die Zuteilung entsprechender spezifischer Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit. Gleichwohl dieses Vorgehen prinzipiell möglich ist, wäre die Diversifizierung so groß, dass eine Ausnutzung der Spielräume hier kaum praktikabel erscheint. Denkbar wäre jedoch ein vereinfachter Ansatz unterschiedlicher Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für die unterschiedlichen Anwendungen. Auf Basis der jeweils höchsten Werte in der jeweils untersuchten Anwendung für den ungünstigsten Standort könnten dann unterschiedliche Bemessungswerte definiert werden. In ähnlicher Form wird das bereits für konventionelle Dämmstoffe in bestimmten Anwendungen umgesetzt, beispielsweise im Umkehrdach oder als Perimeterdämmung, wo erhöhte Feuchtegehalte aus der Anwendung sich in erhöhten Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit niederschlagen. Bzw. für wenig anspruchsvollere Anwendungen auch günstigere Bemessungswerte attestiert werden. EPS und XPS weisen hier beispielsweise in der Anwendung als Innendämmung deutlich niedrigere Bemessungswerte auf als vergleichbare Produkte in der Anwendung Umkehrdach oder Perimeterdämmung. Abschätzung der Leistungsfähigkeit über der GebrauchsdauerMit Hilfe der aus den Verteilungen der Klimadaten durch Wichtung abgeleiteten Effektivklimaten kann untersucht werden, ob das für die Ermittlung der Lebensdauer von VIPs in Deutschland angesetzte Bezugsklima (z.B. 23°C / 50 % r.F.) zu Berechnungsergebnissen führt, die hinsichtlich der tatsächlich zu erwartenden Partialdruckanstiege aufgrund der schwankenden Klimate auf der sicheren Seite zu erwarten sind. Hierbei werden zunächst die ermittelten Effektivklimate aus den untersuchten Anwendungen in dem Graphen des Druckanstiegs im VIP aufgrund der durchgeführten Laboruntersuchungen (Abbildung 17) verortet. Anschließend können Isolinien eingezeichnet werden die einem Druckanstieg bei konstanter Lagerung in einem frei zu wählendem Bezugsklimas entsprechen (beispielsweise 23°C/50 % r. F. oder 23°C/80 % r. F.).

Für die Ermittlung der Nennwerte wird nun ein Bezugsklima ausgewählt, dass im Hinblick auf den Druckanstieg im Paneel auf der sicheren Seite liegt (vgl. Abbildung 43). Die Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit der VIP sollten dann für eine Dauerlagerung in einem Bezugsklima ermittelt werden, das die angestrebten Anwendungen abdeckt.



In einem erweiterten Ansatz können natürlich auch direkt die Wärmeleitfähigkeitsanstiege als Funktion der Nutzungsdauer mit dem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei Lagerung in einem Bezugsklima verglichen werden (Abbildung 44 und Abbildung 45). Aus Gründen der Vereinfachung kann hierbei auch der Wärmeleitfähigkeitsanstieg im ersten Jahr linear fortgeschrieben werden.

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen deckt ein Bezugsklima von 23°C und 80 % r. F. die untersuchten Anwendungen über den gesamten Betrachtungszeitraum auf der sicheren Seite liegend ab. Hierbei liegt der lineare Ansatz auf Basis des linearen Anstiegs im ersten Jahr (gestrichelte dicke blaue Linie in Abbildung 45) ab dem 10. Jahr sehr deutlich auf der sicheren Seite. Sehr gut passt der Ansatz mit Berücksichtigung der Sättigungsfunktion (gelbe gestrichelte Linie in Abbildung 45) zu den in typischen Anwendungen in Deutschland herrschenden Bedingungen. Es werden damit praktisch alle Anwendungen abgedeckt, ohne dass das Produkt VIP zu ungünstig beurteilt würde.

Das Bezugsklima 23°C / 50% r.F. wie es für alle europäisch harmonisierten Dämmstoffe verwendet wird, ergibt in der Hochrechnung der Wärmeleitfähigkeit aus den Partialdrücken Werte die für Anwendungen in Deutschland für die ersten 35 Jahre nicht auf der sicheren Seite liegen (Abbildung 44). Die Betrachtung zum Vergleichszeitpunkt "25 Jahre" zeigt jedoch, dass mit diesem linearen 23°C / 50 % r.F. – Ansatz etwa drei Viertel der untersuchten Anwendungen zutreffend beschrieben werden. Das betrifft vor allem trockene, warme Standorte und Anwendungen mit geringen internen Feuchtelasten.

Um hieraus ein allgemein gültiges Bemessungsmodell zu ermitteln, müssten die Untersuchungen jedoch auf weitere Anwendungsfelder und unterschiedliche Permeationsraten von Hüllfolien ausgeweitet werden.

### Beurteilung der Bemessungswerte

Wenn man das Modell der mittleren Wärmeleitfähigkeit der ersten 25 Jahre ansetzt, bestätigen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung die bisher ermittelten Bemessungswerte im Bereich von 0,007 W/(m K) für VIP. Diese treffen für die Gesamtbetrachtung dieses Zeitraums zu. Die dem Anwender in den ersten Jahren zugutekommenden Werte liegen teilweise deutlich unter dem Bemessungswert von 0,007 W/(m·K). Hier sind die Transmissionswärmeverluste der mit VIP gedämmten Gebäudehülle deutlich niedriger als für den Bemessungsfall. Die tatsächlichen U-Werte der Bauteile liegen deutlich unter den für die Berechnung des Energiebedarfs angesetzten Werten.Gleichwohl wird der Bemessungswert von 0,007 W/(m K) abhängig von der untersuchten Anwendung nach ca. 13 - 30 Jahren erstmals überschritten, d. h. nach diesem Zeitraum weist das Paneel in der jeweiligen Anwendung eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf, als im Bemessungswert ausgewiesen ist. Erst nach 25 Jahren – einer für Dämmstoffe üblichen Betrachtungsdauer – ist die Wär-



meleitfähigkeit der VIPs in etwa 75 % der Anwendungen höher als der etikettierte Bemessungswert.

Interessant ist die Betrachtung, wann die über die Jahre - aufgrund der gegenüber dem Bemessungswert von 0,007 W/(m·K) deutlich kleineren Wärmeleitfähigkeit der VIPs - aufsummierten Einsparungen durch die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit über 0,007 W/(m·K) wieder aufgebraucht sind.



Abbildung 74

Differenz zwischen den kumulierten Transmissionswärmeverlusten [kWh] eines Bauteils mit 100 m<sup>2</sup> Fläche unter Ansatz der realen U-werte ( $Q_{kum,eff}$ ) und der U-Werte auf Grundlage des Bemessungswertes ( $Q_{kum,Bem}$ ) während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren unter Berücksichtigung eines Gradtagzahlfaktors von F<sub>Gt</sub> = 66 kKh und unterschiedlicher Dicken der eingesetzten VIP Oben: K2, Steildach, Holzkirchen, Südorientierung, Normale Feuchtelast (günstigster untersuchter Fall)

Unten: K3, WDVS, Holzkirchen, Westorientierung, Erhöhte Feuchtelast (ungünstigster untersuchter Fall)



In Abbildung 74 ist die Differenz zwischen den kumulierten Transmissionswärmeverlusten eines Bauteils (in kWh) mit 100 m<sup>2</sup> Fläche unter Ansatz der realen U-werte ( $Q_{kum,eff}$ ) und der U-Werte auf Grundlage des Bemessungswertes ( $Q_{kum,Bem}$ ) während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren aufgetragen. Negative Werte zeigen demnach eine Einsparung gegenüber dem virtuellen Verbrauch unter Ansatz der Bemessungswerte für die eingesetzten VIP; positive Werte hingegen indizieren einen Mehrverbrauch.

Verglichen wird der in dieser Untersuchung günstigste Fall (Konstruktion K2, Steildach, Standort Holzkirchen, Südorientierung, Normale Feuchtelast, XPS Deckschicht) und der ungünstigste Fall (Konstruktion K3, WDVS, Holzkirchen, Westorientierung, Erhöhte Feuchtelast, XPS Deckschicht). Die betrachteten Fälle stellen also die oberste und unterste Kurve des Verlaufs der Wärmeleitfähigkeit entsprechebnd Abbildung 44 dar. Variiert wurde außerdem die Dicke der Paneele.

Der Ansatz eines Gradtagszahlfaktors von 66 kKh beeinflusst nur die Höhe der Einsparung, bzw. des Mehrverbrauchs, bei einer Anpassung ergeben sich ledigliche quantitative, keine qualitativen Änderungen – d. h. insbesondere die Lage der lokalen Maxima und die Nullstellen bleiben gleich.

Es zeigt sich, dass im Falle des betrachteten Steildachs auch bei Anwendung dünnerer Paneele mit 20 mm Dicke während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren die Einsparungen gegenüber dem angesetzten Bemessungswert aus den ersten Jahren der Nutzung nicht von den Mehrverbräuchen aus der späteren Nutzung kompensiert werden (Abbildung 74, oben).

Der ungünstigste Fall des untersuchten WDVS zeigt im Falle der Verwendung von 20 mm dicken VIP nach 33 Jahren eine Kompensation der Einsparungen aus den ersten Jahren durch die danach auftretenden Mehrverbräuche. Bei Verwendung dickerer VIP mit entsprechend geringeren Anstiegsraten der Wärmeleitfähigkeit verschiebt sich dieser Zeitpunkt weiter nach hinten. Bei Anwendung von 30 mm dicken VIP überwiegen die gegenüber dem Bemessungsfall kumulierten Mehrverbräuche nach 47 Jahren, bei Anwendung von 40 mm dicken VIP bleibt die Einsparung auch über einen Zeitraum von >50 Jahren hinweg erhalten.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die hier untersuchten VIPs mit dem Bemessungswert von 0,007 W/(m·K) aus energetischer Sicht während der Nutzungsdauer von 25 Jahren auch im ungünstigsten betrachteten Fall auf der sicheren Seite liegen. Bei Verwendung von VIP mit größerer Dicke oder weniger anspruchsvollen Klimabedingungen verlängern sich diese Zeiträume entsprechend und bieten in vielen Fällen auch bei Nutzungsdauern >50 Jahre hinweg reale Einsparungen gegenüber dem Bemessungsfall.



# Beurteilung des Sicherheitszuschlags im Rahmen der abZ

Für die in Deutschland im Rahmen der Erteilung der bauaufsichtlichen Zulassungen bisher angewendete Praxis des Sicherheitszuschlags von 25 % sind jedoch Änderungen notwendig. Durch die Berücksichtigung eines erhöhten Feuchteangebots in der Klimalagerung der Paneele wird der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit der Paneele viel realistischer erfasst. Die Lebensdauer bzw. die Leistungsfähigkeit über der Gebrauchsdauer kann sehr genau berechnet werden. Da die Feuchtigkeit bereits in der Alterung mit abgebildet wird, ist der Anteil des Feuchtezuschlags am Sicherheitszuschlag nicht mehr notwendig. Der Sicherheitszuschlag im Rahmen des Zulassungsverfahrens müsste nur noch das Ausfallrisiko einiger Paneele in der Anwendung abdecken. Dieses ist aber ebenfalls durch die in den letzten Jahren deutlich verbesserte Folientechnologie und die bei den Herstellern etablierten Qualitätssicherungsmaßnahmen deutlich zurückgegangen. In der Folge kann der Sicherheitszuschlag ohne Einbußen für die Anwender von Vakuumpaneelen deutlich gesenkt werden. Ein konkreter Vorschlag kann jedoch erst nach dem Vorliegen von Alterungsuntersuchungen weiterer Produkte nach dem im Entwurf der Produktnorm vorgeschlagenen Verfahren von 50° C / 70 % r.F. über einen Zeitraum von 180 Tagen gemacht werden. Derzeit scheint aber ein Sicherheitszuschlag von mehr als 10 % nicht mehr gerechtfertigt.

## 7.2 Wärmebrücken

Zur Verbesserung des Handlings und einer einfacheren Verlegung werden VIP mit Randstreifen und Decklagen ausgestattet. Wie beschrieben kommen für die Decklagen üblicherweise Hartschäume, GFK oder Metall zum Einsatz. Randstreifenmaterialien bestehen zumeist aus Hartschäumen. Kommen Anforderungen an den Brandschutz dazu, bieten sich Lösungen aus Calziumsilikat an. Neuere Entwicklungen wie Aerogelmatten/-platten bieten verglichen mit konventionellen Materialien eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit, sind jedoch teuer und (noch) nicht marktgängig.

### Einflüsse aus Randstreifen und Befestigungen

Um die Wärmebrückeneffekte gering zu halten sollten sowohl die Decklagen als auch die Randstreifen eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Der Wärmebrückeneinfluss der Randstreifen ( $\psi$ -Werte) ist jedoch in keinem Fall vernachlässigbar und sollte herstellerseitig im Nennwert der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt sein.

Die Montage von VIP kann bei Verwendung von Randstreifen durch punktförmige Befestiger im Bereich der Randstreifen erfolgen. Der Wärmebrückeneinfluss ( $\chi$ -Werte) ist dann abhängig von der Breite und der Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens. Prinzipiell ist festzustellen, dass mit höherer Wärmeleitfähigkeit des Randstreifens und steigender Breite des Randstreifens die punktförmige Wärmebrücke des



Befestigers gegenüber der linienförmigen Wärmebrücke des Randstreifens an Bedeutung nachlässt. Eine Erhöhung der Dämmstärke führt ebenfalls zu geringeren  $\chi$ -Werten.

Für die Planungspraxis muss der Wärmebrückeneinfluss der Befestiger erst berücksichtigt werden, wenn diese den U-Wert um mehr als drei Prozent erhöhen. Die untersuchten Systeme mit WDVS und Innendämmung erlauben je nach Randstreifenbreite und Material eine ausreichende Anzahl von Befestigern, ohne den U-Wert anpassen zu müssen. Für übliche Kunststoffdübel entfällt damit die Notwendigkeit einer Berücksichtigung im U-Wert, bzw. diese wäre nur bei sehr hohen Dübeldichten notwendig.

Werden massivere und damit thermisch ungünstigere Befestiger nötig, wie z. B. L-Winkel bei einer vorgehängten Fassade, ist der Wärmebrückeneinfluss so groß, dass eine Berücksichtigung im U-Wert in jedem Fall erforderlich ist. Auch bei der Anwendung als Kerndämmung in Betonfertigteilen müssen die notwendigen Verbundnadeln zur Konsolidierung der Schalen im U-Wert berücksichtigt werden. Je nach Paneelgröße und Randausbildung ergeben sich hier teilweise deutliche Zuschläge im Bereich von 15 % – 269 %.

# 7.3 Einfluss belüfteter Paneele

Ebenfalls untersucht wurde die Auswirkung belüfteter Paneele auf den Wärmedurchgang der gedämmten Fläche. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Berücksichtigung im U-Wert unter energetischen Gesichtspunkten nicht nötig ist, wenn der Flächenanteil belüfteter Paneele < 2 - 3 % bleibt (Bagatellkriterium nach DIN EN ISO 6946).

Unter der Berücksichtigung hygienischer Gesichtspunkte ist die Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials von VIP auch unter Normaldruck so niedrig, dass die Anforderungen an die Mindesttemperaturen der Oberflächen für die meisten Anwendungen eingehalten werden. Bei der Verwendung von VIP mit einer Stärke von mindestens 15 mm ist auch im Bereich eines belüfteten VIP keine Unterschreitung der Mindestwärmedurchlasswiderstände von 1,2 (m<sup>2</sup> K)/W zu erwarten.

# 7.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass VIP die unter dem aktuellen Stand der Technik produziert wurden problemlos baupraktisch typische Nutzungsdauern von 25 – 50 Jahren ermöglichen und während der gesamten Nutzungsdauer eine konkurrenzlos niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

Während eines Nutzungszeitraums von 25 Jahren wurden in der vorliegenden Untersuchung je nach Anwendung mittlere Wärmeleitfähigkeiten in einem Bereich von


ca. 0,0055 - 0,0067 W/(m K) und in einem Zeitraum von 50 Jahren von ca. 0,0064 - 0,0081 W/(m K) ermittelt.

Die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit nach 25 Jahren liegt entsprechend bei 0,0066 – 0,0086 W/(m K) und nach 50 Jahren bei 0,0079 – 0,0105 W/(m K).





Je nach Anwendung stehen unterschiedliche Befestigungsmittel zur Verfügung. Für viele Anwendungen ist keine weitere Berücksichtigung der punktförmigen Wärmebrücken durch die Dübel im U-Wert nötig.

Die Paneele bieten zudem aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit von pyrogener Kieselsäure genügend Anwendungssicherheit um auch beim Ausfall einzelner Paneele durch Belüftung aufgrund mechanischer Verletzungen der Hüllfolie weder energetische noch hygienische Probleme zu verursachen.

Durch den Einsatz entsprechender Randstreifen und Decklagen werden VIP zudem sicherer in der Handhabung und einfacher in der Montage. Die dadurch entstehenden zusätzlichen Wärmebrücken im Randbereich beeinträchtigen die Leistungsfähigkeit des Systems nur gering und erhöhen den Planungsaufwand nicht, wenn diese bereits im Nennwert der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden.



## 8 Weiterer Forschungsbedarf

Das vorgestellte Modell zur Beschreibung der Permeation trockener Luftgase und Wasserdampf und der damit verbundenen Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit liefert wie beschrieben plausible Ergebnisse. Da insbesondere auch die Auffeuchtung des Kernmaterials einen großen Einfluss auf die Ergebnisse zeigt, sind weiterführende Untersuchungen zur Klärung des Einfluss der Kernfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit von VIP notwendig. Der in vorliegender Untersuchung angewendete Faktor basiert auf einer Anpassung der modellierten Wärmeleitfähigkeitsanstiege auf die im Labor ermittelten Messwerte. In der Literatur werden wie beschrieben tendenziell niedrigere Werte für den Einfluss der Kernfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit beschrieben, so dass anzunehmen ist, dass der in vorliegender Untersuchung angewendete Faktor noch andere Effekte subsummiert. Zu diesem Thema wird im Auftrag der Vacuum-Insulation-Panel-Association (VIPA) derzeit ein Forschungsvorhaben durchgeführt an dem das FIW München beteiligt ist. Aufbauend auf den dort zu erwartenden Ergebnissen könnten Anschlussuntersuchungen das hier entwickelte Modell ergänzen.

Der Einfluss unterschiedlicher Konstruktionen auf die am VIP anliegenden Klimabedingungen wurde mit hygrothermischen Simulationen ermittelt. Für anschließende Forschungsarbeiten wäre eine Ausweitung auf andere Standorte interessant. Gebiete mit unterschiedlichen Schlagregenbelastungen, Temperatur und Feuchtebedingungen – auch in anderen europäischen Ländern – sollten in weiterführende Untersuchungen einfließen. Dabei müssen auch unterschiedliche Bauweisen in anderen europäischen Ländern berücksichtigt werden.

Auf Grundlage der durchgeführten Betrachtungen zum Wärmebrückeneinfluss der Befestiger sollte in weiterführenden Forschungsarbeiten die Konstruktion wärmebrückentechnisch optimierter Bauteile untersucht werden. Bisher werden VIP überwiegend mit Befestigersystemen für konventionelle Dämmstoffe verbaut. Die Entwicklung spezifischer Befestigungssysteme, insbesondere unter Berücksichtigung der Gewährleistung einer Austauschbarkeit der Paneele im Falle von Belüftungen oder zu Wartungszwecken ist für die weitere Verbreitung der VIP im Bauwesen essentiell. Ein Bausystem mit austauschbaren VIP würde auch die Verwendung von VIP mit Faserkernen ermöglichen, die eine noch niedrigere Wärmeleitfähigkeit als VIP mit Kernen aus pyrogener Kieselsäure aufweisen, aber aufgrund geringerer Lebensdauer bislang fast ausschließlich in Kühlgeräten zum Einsatz kommen. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise Systeme auf Basis wiederlösbarer Klebstoffe denkbar.

Der Einfluss belüfteter VIP auf den Wärmedurchgang wurde unter energetischen und hygienischen Gesichtspunkten bewertet. Sinnvolle Anschlussuntersuchungen könnten mittels thermographischer Aufnahmen an ausgeführten VIP gedämmten Fassaden und Bauteilen die Ausfallquote von VIP in der Baupraxis ermitteln.



## Literatur

| AGEB 2016                 | Energieflussbild 2015 für die Bundesrepublik<br>Deutschland in Mio. t SKE. Arbeitsgemeinschaft<br>Energiebilanzen 07/2016   |
|---------------------------|---|
| Anonymus 2014             | Anonymus:<br>Mitteilung der Kommission an das europäische Par-<br>lament und den Rat. Strategie für eine sichere euro-<br>päische Energieversorgung. COM(2014) 330 final,<br>Europäische Kommission, 28.5.2014, Brüssel   |
| Cremers 2005              | Cremers, J.: Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-<br>Dämmsystemen im Be-reich der Gebäudehülle. Dis-<br>sertation, TU München 2005  |
| Fricke, Beck, Binder 2007 | Fricke, J., Beck, A., Binder, M.: Vakuum-Isolations-<br>Paneele für Gebäude (2007), ZAE-Bayern  |
| Horn 1997                 | Horn, R.: Zur thermischen Nutzung der Sonnen-<br>energie - Schaltbare Wärmedämmung, Sonnen-<br>energie, Heft 4/97, Präsidium der Deutschen Ge-<br>sellschaft für Sonnenenenergie (DGS), München,<br>1997  |
| Kraus et al. 2005         | Kraus, D., Büttner, D., Heinemann, U., Fricke, J.:<br>Non-destructive Method to Determine the Water<br>Vapour Pressure in Vacuum Insulation Panels (VIP),<br>Bavarian Centre for Applied Energy Research (ZAE<br>Bayern) 2005   |
| Kubina 2011               | Kubina, L.: Practice Experience with LockPlate.<br>2011, Proceedings of the International<br>Vacuum Insulation Symposium IVIS, Montreal, 2011   |
| Nentwig 2006              | Nentwig, J.: Kunststoff-Folien: Herstellung - Eigen-<br>schaften - Anwendung, Carl Hanser Verlag, Mün-<br>chen, 2006  |
| Simmler und Brunner 2005  | Simmler, H., Brunner, B.: Vacuum insulation panels<br>for building application Basic properties, aging<br>mechanisms and service life, Energy and Buildings<br>37 (2005) 1122-1131, Elsevier B.V. Amsterdam,<br>2005  |
| Sing et al. 1984          | Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L.,<br>Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T.: Re-<br>porting physisorption data for gas/solid systems with<br>special reference to the determination of surface<br>area and porosity. IUPAC Recommendations, Pure<br>Appl. Chem. 57, 603 – 619, 1984 |



| Sprengard und Spitzner<br>2011a | Sprengard, C.; Spitzner, M.: Optimierung der ener-<br>getischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit<br>von VIP-Paneelen durch die optimale Kombination<br>von Kieselsäure-, Mineralfaser- und EPS-<br>Dämmstoff. Forschungsbericht der Forschungsinitia-<br>tive Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen<br>und Paumordnung, BRP, Bopp, 2011 |
|---------------------------------|--|
| Walberg et al. 2011             | Walberg, D.; Holz, A.; Gniechwitz, T.; Schulze, Th.:<br>Wohnungsbau in Deutschland – 2011. Modernisie-<br>rungen oder Bestandsersatz. Studie zum Zustand<br>und der Zukunftsfähigkeit des deutschen "Kleinen<br>Wohnungsbaus". Bauforschungsbericht Nr. 59, Ar-<br>beitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.,<br>2011                           |
| Sprengard und Spitzner<br>2011b | Sprengard, C.; Spitzner, M.: Untersuchungen zu<br>Alterung und Wärmebrücken bei Vakuum-Isolations-<br>Paneelen (VIP) für Bauanwendungen. Bauphysik 33<br>(2011), Heft 4, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 2011.  |
| Sprengard et al. 2013           | Sprengard, C.; Treml, S.; Holm, A.:<br>Technologien und Techniken zur Verbesserung der<br>Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärme-<br>dämmstoffe – Metastuie Wärmedämmstoffe – Pro-<br>dukte – Anwendungen – Innovationen.   |
| Willems 2004                    | Willems, W. M.: Vakuumdämmung, Bauphysik Ka-<br>lender 2004  |
| Wutz et al. 2000                | Wutz, M., Adam, H., Walcher, W.: Handbuch der<br>Vakuumtechnik, 7. erw. Auflage, Vieweg Verlag<br>2000   |
| Ziesing 2013                    | Ziesing, HJ. (2013): Anwendungsbilanzen für die<br>Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren<br>2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012.<br>Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirt-<br>schaft und Technologie, Projektnummer: 23/11, Ar-<br>beitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V., Berlin,<br>November 2013               |



## Abbildungsverzeichnis

| Abbildung 1    | 1                | Prozentualer Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland,<br>aufgeschlüsselt nach Sektoren und Anwendungen [AGEB 2016] [Ziesing   | 0       |
|----------------|------------------|--|---------|
| Abbildung 2    | <b>.</b>         | 2013]<br>Vakuumisolationspaneele (V/IP)  | 8<br>13 |
| Abbildung 2    | <u>-</u> .<br>2. | Darstellung der Messreihen zur Alterung nach Hersteller und  | 15      |
|                | <i>.</i>         | Herstellungsjahr des Produkts  | 18      |
| Abbildung 4    | 4:               | Erste Lage des Systems. Die Befestigung der ersten Lage erfolgt in den<br>Plattenstößen mittels üblicher Dämmstoffdübel. Die Befestigungen<br>werden durch eine zweite VIP-gedämmte Lage, den sog. LockPlates, | 10      |
|                | _                | überdämmt.   | 20      |
| Abbildung 5    | 5:               | Skizze zum Forschungsansatz des Forschungsbereichs A<br>"Untersuchung der Dauerhaftigkeit von VIP-Elementen unter  | ~~~     |
|                |                  | baupraktischen Feuchte- und Temperaturverhaltnissen"   | 28      |
| Abbildung 6    | ):<br>7.         | Verlauf experimentell ermittelter Sorptionsisotnermen nach IUPAC   | 30      |
| Abbildung /    | :                | Mittlere Sorptionsisotherme des Kernmaterials (pyrogene Kieselsaure,   | 04      |
| Abbildupa C    | <b>.</b>         | Wacker Typ N20) bel 20°C und 40°C  | 31      |
|                | 5:               | Intersautoau zur Bestimmung des Innendruck der VIP   | 33      |
| Abbildung s    | 9.               | Messung des Kammerinnendrucks ( $p_{i,K}$ ) und des Abstands zwischen  |         |
| A la la !! al  | 10.              | Laser-weg-Sensor und Follenoberfläche (s)  | 34      |
| Abbildung 1    | 10:              | Lagerungsbehalter mit Salziosung in Erienmeyerkolden und   | 07      |
| Abbildupe 1    | 14.              | Probenhalterung (links onne Proben, rechts mit 4 Proben)   | 37      |
| Abbildung      | 11:              | Übersättigte Salzlösung zur Einstellung einer konstanten Luftfeuchtigkeit  | ~-      |
|                |                  | im Lagerungsbehälter (rechts).   | 37      |
| Abbildung 1    | 12:              | Innendruck (Gesamtinnendruck) über der Lagerungsdauer von 0 – 9  |         |
|                |                  | Monaten  | 47      |
| Abbildung 1    | 13:              | Innendruck (Partialdruck trockener Luftgase, linke Spalte; Partialdruck des Wasserdampfs, rechte Spalte) über der Lagerungsdauer von 0 – 9   | 40      |
| A la la !! al  |                  | Monaten  | 48      |
| Abbildung      | 14:              | Luftgase, Mitte; Partialdruck des Wasserdampfs, Unten) aufgetragen   | 40      |
| Alalah ya ay d | <u>ا</u> ر.      | Arrhanius discussion de la la sedencia (Conception de la sedencia)   | 49      |
| Abbildung 1    | 15:              | Partialdruck trockene Luftgase, Mitte; Partialdruck Wasserdampf, Unten)  | 50      |
| Abbildung 1    | 16:              | Flächenapproximation $ln(p_{a,ges}) = f(1/T [K^{-1}], \phi [\%])$  | 51      |
| Abbildung 1    | 17:              | Flächenapproximation $p_{a,ges}$ [mbar/a] = f( $\Theta$ [°C], $\phi$ [%])  | 51      |
| Abbildung 1    | 18:              | Flächenapproximation $\ln(p_{a,dry}) = f(1/T [K^{-1}], \phi [\%])$   | 52      |
| Abbildung 1    | 19:              | Flächenapproximation $p_{a,dry}$ [mbar/a] = f( $\Theta$ [°C], $\phi$ [%])  | 52      |
| Abbildung 2    | 20:              | Flächenapproximation $ln(p_{a,H2O}) = f(1/T [K^{-1}], \phi [\%])$  | 53      |
| Abbildung 2    | 21:              | Flächenapproximation $p_{a,H2O}$ [mbar/a] = f( $\Theta$ [°C], $\varphi$ [%])   | 53      |
| Abbildung 2    | 22:              | Verteilung von Temperatur [°C] und relativer Luftfeuchtigkeit [%]  |         |
|                |                  | (Häufigkeit in Stunden) getrennt für Kaltseite (blau) und Warmseite (rot) in der Anwendung Steildach, VIP mit 20 mm Dicke, XPS Deckschicht,  |         |



|               | Standort Freiburg, Normale Feuchtelast im Innenraum und südlicher                        |    |
|---------------|--|----|
|               | Orientierung   | 54 |
| Abbildung 23: | Ansatz zur Ermittlung des Innendruckanstiegs in VIP in konkreten                         |    |
|               | spezifischen Bauteilen/Konstruktionen  | 55 |
| Abbildung 24: | Ergebnis der Simulation zum Anstieg des Innendrucks (pi                                  |    |
|               | Gesamtinnendruck, p <sub>i,dry</sub> Partialdruck trockener Luftgase, p <sub>i,H2O</sub> |    |
|               | Partialdruck Wasserdampf) in VIP in einem Zeitraum von 50 Jahren in                      |    |
|               | der Anwendung Steildach, VIP mit 20 mm Dicke, XPS Deckschicht,                           |    |
|               | Standort Freiburg, Normale Feuchtelast im Innenraum und südlicher                        |    |
|               | Orientierung   | 56 |
| Abbildung 25: | Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeit an gealterten VIP bei                              |    |
|               | unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und Alterungsdauern                               | 58 |
| Abbildung 26: | Anstiegsraten der Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen                               |    |
|               | Umgebungsbedingungen – Vergleich der Messwerte nach DIN EN                               |    |
|               | 12667 und dem Alterungsmodell  | 60 |
| Abbildung 27: | Verlauf der Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlichen                                   |    |
|               | Umgebungsbedingungen – Vergleich der Messwerte nach DIN EN                               |    |
|               | 12667 und dem Alterungsmodell  | 61 |
| Abbildung 28: | Simulation der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Nutzungsdauer für                     |    |
|               | die Konstruktion K1 – Dachterrasse in Abhängigkeit von                                   |    |
|               | Gebäudestandort, Innenraumklima und Innenraumnutzung über einen                          |    |
|               | Zeitraum von 0 – 50 Jahren   | 62 |
| Abbildung 29: | Simulation der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Nutzungsdauer für                     |    |
|               | die Konstruktion K2 – Steildach in Abhängigkeit von Gebäudestandort,                     |    |
|               | Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung über einen                      |    |
|               | Zeitraum von 0 – 50 Jahren   | 63 |
| Abbildung 30: | Simulation der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Nutzungsdauer für                     |    |
|               | die Konstruktion K3 – Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit von                         |    |
|               | Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und                                    |    |
|               | Bauteilorientierung über einen Zeitraum von 0 – 50 Jahren                                | 63 |
| Abbildung 31: | Simulation der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Nutzungsdauer für                     |    |
|               | die Konstruktion K4 – Innendämmung in Abhängigkeit von                                   |    |
|               | Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und                                    |    |
|               | Bauteilorientierung über einen Zeitraum von 0 – 50 Jahren                                | 64 |
| Abbildung 32: | Simulation der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Nutzungsdauer für                     |    |
|               | die Konstruktion K5 – Hinterlüftete Fassade in Abhängigkeit von                          |    |
|               | Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und                                    |    |
|               | Bauteilorientierung über einen Zeitraum von 0 – 50 Jahren                                | 64 |
| Abbildung 33: | Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für                  |    |
|               | die Konstruktion K1 – Dachterrasse in Abhängigkeit von                                   |    |
|               | Gebäudestandort, Innenraumklima und Innenraumnutzung                                     | 66 |
| Abbildung 34: | Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für                  |    |
|               | die Konstruktion K2 – Steildach in Abhängigkeit von Gebäudestandort,                     |    |
|               | Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung                                 | 67 |
| Abbildung 35: | Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für                  |    |
|               | die Konstruktion K3 – Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit von                         |    |



|               | Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung   | 68 |
|---------------|---|----|
| Abbildung 36: | Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K4 – Innendämmung in Abhängigkeit von  |    |
| Abbildung 37  | Bauteilorientierung<br>Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für  | 69 |
|               | die Konstruktion K5 – Hinterlüftete Fassade in Abhängigkeit von Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und   |    |
| Abbildung 38: | Bauteilorientierung<br>Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für<br>die Konstruktion K1 – Dachterasse in Abhängigkeit von   | 70 |
|               | Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und<br>Bauteilorientierung für VIP unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40  | 74 |
| Abbildung 39: | Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für die Konstruktion K2 – Steildach in Abhängigkeit von Gebäudestandort,  | 71 |
|               | Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung für VIP<br>unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40 mm) mit einer Deckschicht   | 70 |
| Abbildung 40: | aus 5 mm XPS<br>Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für<br>die Konstruktion K3 – WDVS in Abhängigkeit von Gebäudestandort,<br>Innenraumklima, Innenraumnutzung und Bauteilorientierung für VIP                                      | 12 |
|               | unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40 mm) mit einer Deckschicht<br>aus 5 mm XPS   | 72 |
| Abbildung 41: | Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für<br>die Konstruktion K4 – Innendämmung in Abhängigkeit von<br>Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und<br>Bauteilorientierung für VIP unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40 |    |
| Abbildung 42: | mm) mit einer Deckschicht aus 5 mm XPS<br>Mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung für<br>die Konstruktion K5 – hinterlüftete Fassade in Abhängigkeit von<br>Gebäudestandort, Innenraumklima, Innenraumnutzung und                       | 73 |
|               | Bauteilorientierung für VIP unterschiedlicher Dicke (20 mm, 30 mm, 40 mm) mit einer Deckschicht aus 5 mm XPS  | 73 |
| Abbildung 43: | Isolinien für Innendruckanstige $p_{a,ges}$ [mbar/a] = f(23°C, 50 % r. F.) und $p_{a,ges}$ [mbar/a] = f(23°C, 80 % r. F.)   | 75 |
| Abbildung 44: | Vergleich der Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit bei Lagerung im Klima<br>23/50 mit den untersuchten Anwendungen, Blaue Strichlinie: lineare<br>Fortschreibung des Druckanstiegs im ersten Jahr, Orange Strichlinie:  |    |
| Abbildung 45: | Ansatz mit Sättigungsfunktion<br>Vergleich der Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit bei Lagerung im Klima<br>23/80 mit den untersuchten Anwendungen, Blaue Strichlinie: lineare<br>Fortschreibung des Druckanstiegs im ersten Jahr. Orange Strichlinie:               | 76 |
|               | Ansatz mit Sättigungsfunktion   | 76 |



| Abbildung 46:             | Vergleich der Bemessungswerte ( $\lambda_{m,25}$ ) bei Bezug auf unterschiedliche<br>Referenzklimate und unter Berücksichtigung eines linearen, bzw. |     |
|---------------------------|--|-----|
|                           | degressiven Ansatzes   | 77  |
| Abbilduna 47:             | Methodik und Varianten.  | 83  |
| Abbildung 48:             | Verlauf der w-Werte für 20 mm Vakuumpaneele in verschiedener   |     |
| <b>J</b>                  | Ausführungsbreite des Aerogel-Randverbundes und für verschiedene   |     |
|                           | Deckmaterialien  | 85  |
| Abbildung 49 <sup>.</sup> | Verlauf der w-Werte für 20 mm Vakuumpaneele in verschiedener   |     |
| , and a set of the set    | Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und für verschiedene   |     |
|                           | Deckmaterialien.   | 86  |
| Abbildung 50 <sup>.</sup> | Verlauf der w-Werte für 20mm Vakuumpaneele in verschiedener  |     |
| , abbildenig eer          | Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und für verschiedene  |     |
|                           | Deckmaterialien  | 87  |
| Abbildung 51              | Verlauf der u-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener   | 0.  |
| , abbildenig e li         | Ausführungsbreite des Aerogel-Randverbundes und für verschiedene   |     |
|                           | Deckmaterialien  | 88  |
| Abbildung 52              | Verlauf der u-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener   | 00  |
| , abbildenig oʻzi         | Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und für verschiedene   |     |
|                           | Deckmaterialien  | 89  |
| Abbildung 53 <sup>.</sup> | Verlauf der w-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener   | 00  |
| , abbildung ee.           | Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und für verschiedene  |     |
|                           | Deckmaterialien  | 90  |
| Abbildung 54 <sup>.</sup> | Verlauf der w-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener   | 00  |
| , abbildenig e n          | Ausführungsbreite des Aerogel-Randverbundes und für verschiedene   |     |
|                           | Deckmaterialien.   | 91  |
| Abbildung 55:             | Verlauf der w-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener   | •   |
| j ser                     | Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und für verschiedene   |     |
|                           | Deckmaterialien.   | 92  |
| Abbilduna 56:             | Verlauf der w-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener   |     |
| <b>J</b>                  | Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und für verschiedene  |     |
|                           | Deckmaterialien.   | 93  |
| Abbilduna 57:             | Generischer Dübel mit einem nominalen $\chi$ (20-50 mm)-Wert von 0.002   |     |
| <b>J</b>                  | W/K  | 95  |
| Abbildung 58:             | Generischer Dübel im Sandwich-Element mit einer Fläche von A = 0.50  |     |
| 5                         | m <sup>2</sup> . Dargestellt ist hier exemplarisch der Halbschnitt durch einen Dübel   |     |
|                           | im Element mit einem 40 mm dicken VIP-Kern und einem 10 mm breiten   |     |
|                           | Randstreifen (Rand).   | 96  |
| Abbildung 59:             | χ-Werte beim gedübelten VIP-Sandwich-Element als WDVS mit der VIP-   |     |
| 5                         | Kerndicke von 20 mm  | 101 |
| Abbildung 60:             | χ-Werte beim gedübelten VIP-Sandwich-Element als WDVS mit der VIP-   |     |
| <b>J</b>                  | Kerndicke von 40 mm  | 102 |
| Abbilduna 61:             | χ-Werte beim gedübelten VIP-Sandwich-Element in der Innendämmung   | -   |
|                           | mit der VIP-Kerndicke von 20 mm  | 104 |
| Abbilduna 62:             | χ-Werte beim gedübelten VIP-Sandwich-Element in der Innendämmuna   |     |
| 0                         | mit der VIP-Kerndicke von 40 mm  | 105 |
|                           |  |     |



| Abbildung 63:              | <ul> <li>X-Werte beim VIP-Sandwich-Element hinter VHF mit der VIP-Kerndicke</li> <li>von 20 mm. Beachte: Die Skalierung der X-Werte ist hier um den Faktor</li> <li>10 größer als bei den Abbildungen zu den Anwendungen WDVS und</li> <li>Innendämmung, da die Wärmebrückenwirkung des untersuchten L-</li> </ul> |     |
|----------------------------|--|-----|
|                            | Winkels größer ist, als die des Dübels.  | 106 |
| Abbildung 64:              | $\gamma_{\rm Werte beim VIP_Sandwich_Element binter VHE mit der VIP_Kerndicke$   |     |
| Abbildung 0 <del>4</del> . | ven 40 mm. Desekter Die Okelierung der V Marte ist kier um den Fakter  |     |
|                            | 40 million beachte. Die Skallerung der X-werte ist hier um den Faktor  |     |
|                            | To groiser als bei den Abbildungen zu den Anwendungen wDvS und   |     |
|                            | Innendammung, da die Warmebruckenwirkung des untersuchten L-   |     |
|                            | Winkels größer ist, als die des Dübels.  | 107 |
| Abbildung 65:              | Verbundankernadeln im Beton Sandwichbau (exemplarisch: Fa. Pfeiffer)   | 114 |
| Abbildung 66:              | Flachstahlanker die in die Bewehrungslagen der Innen- und  |     |
|                            | Außenschale eingeknüpft werden (exemplarisch: Fa. Pfeiffer)  | 114 |
| Abbildung 67               | Systemskizze zum Verbund von Trag- und Außenschale mittels   |     |
|                            | Ankernadeln und Flachankern  | 115 |
| Abbildung 68:              | Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (20  |     |
| 0                          | mm VIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Veraleich unterschiedlicher   |     |
|                            | Paneelorößen bei 20 mm VIP mit 10 mm Randstreifen mit  |     |
|                            | Wärmeleitfähigkeit 0 015 W/(m·K)   | 126 |
| Abbildung 69.              | Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (20  |     |
| / loondarig oo.            | mm VIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Veraleich unterschiedlicher   |     |
|                            | Panoolarößon hoi 20 mm VID mit 25 mm Pandetroifon mit  |     |
|                            | Wärmoloitfähigkoit 0.065 W/(m.K)   | 107 |
| Abbildung 70.              | Augustungen der Belöftung auf den B. Mart einer M.B. Dömmechicht (40   | 121 |
| Abbildung 70:              | Auswirkungen der Belultung auf den R-weit einer VIP-Dammschicht (40  |     |
|                            | mm vIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – vergleich unterschiedlicher   |     |
|                            | Paneeigroisen bei 40 mm dicken VIP mit 25 mm Randstreifen mit  |     |
|                            | Wärmeleitfähigkeit 0,065 W/(m·K)   | 127 |
| Abbildung 71:              | Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht  |     |
|                            | (VIP mit 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Vergleich unterschiedlicher VIP-  |     |
|                            | Kern-Dicken bei VIP Paneelen mit 25 mm breiten Randstreifen mit  |     |
|                            | Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(m·K)   | 128 |
| Abbildung 72:              | Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (40  |     |
|                            | mm VIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Vergleich unterschiedlicher   |     |
|                            | Randstreifenbreiten bei VIP Paneelen mit 1,0 m x 1,0 m und   |     |
|                            | Randstreifen mit Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(m·K)  | 129 |
| Abbildung 73:              | Auswirkungen der Belüftung auf den R-Wert einer VIP-Dämmschicht (40  |     |
| 0                          | mm VIP + 2 x 5 mm EPS Deckschicht) – Veraleich unterschiedlicher   |     |
|                            | Wärmeleitfähigkeiten der Randstreifen bei VIP Paneelen mit 1 0 m x 1 0   |     |
|                            | m und 25 mm breiten Randstreifen   | 129 |
| Abbildung 74               | Differenz zwischen den kumulierten Transmissionswärmeverlusten   | 120 |
| Abbildung 74               | [k/Wb] eines Bauteils mit 100 m <sup>2</sup> Eläche unter Ansatz der realen II werte   |     |
|                            | (O ) und der LL Worte auf Crundlage des Remeasungswortes   |     |
|                            | (Q <sub>kum,eff</sub> ) und der O-weite auf Grundlage des Demessungsweites   |     |
|                            | (w <sub>kum,Bem</sub> ) walliellu ellel ivulzuligsuauel voli 50 Jalliell ulitel  |     |
|                            | Deflucts schulgung eines Gradtagzanitaktors von $F_{Gt} = 66$ KKN und  |     |
|                            | unterschiedlicher Dicken der eingesetzten VIP Oben: K2, Steildach,   |     |
|                            | Holzkirchen, Südorientierung, Normale Feuchtelast (günstigster   |     |



|              | untersuchter Fall) Unten: K3, WDVS, Holzkirchen, Westorientierung,                  |     |
|--------------|---|-----|
|              | Erhöhte Feuchtelast (ungünstigster untersuchter Fall)                               | 138 |
| Abbildung 75 | Häufigkeit der Wärmeleitfähigkeit in den untersuchten Anwendungen bei               |     |
|              | einer Paneeldicke von 20 mm (größere Paneeldicken verringern,                       |     |
|              | kleinere Paneeldicken erhöhen die Werte der Wärmeleitfähigkeit): $\lambda_{m,25}$ = |     |
|              | mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 25 Jahre der Nutzung                 |     |
|              | $\lambda_{m,50}$ = mittlere Wärmeleitfähigkeit während der ersten 50 Jahre der      |     |
|              | Nutzung $\lambda_{25}$ = Wärmeleitfähigkeit nach einer Nutzungsdauer von 25         |     |
|              | Jahren $\lambda_{50}$ = Wärmeleitfähigkeit nach einer Nutzungsdauer von 50          |     |
|              | Jahren (insgesamt 69 Varianten untersucht)  | 142 |
|              |   |     |



## Tabellenverzeichnis

| Tabelle 1:  | Eigenschaften von VIP   | 17 |
|-------------|---|----|
| Tabelle 2:  | Mögliche Prüfungen zur Güteüberwachung der Folien für VIP-                          |    |
|             | Umhüllungen   | 21 |
| Tabelle 3:  | Mögliche Prüfungen zur Güteüberwachung der Folien für VIP-                          |    |
|             | Umhüllungen   | 22 |
| Tabelle 4:  | Unterschiedliche Prinzipien der Druckmessung  | 24 |
| Tabelle 5:  | Innendruckmessung von VIP Paneelen  | 24 |
| Tabelle 6:  | Kenndaten der verwendeten Vakuumkammer und der Messtechnik zur                      |    |
|             | Bestimmung des Innendrucks und der Wegmessung an der Barrierefolie                  | 33 |
| Tabelle 7:  | Für die weiterführenden Berechnungen angesetzte Klimata                             | 38 |
| Tabelle 8:  | Musteranwendungen für die Bauteilsimulation mit WUFI®                               | 38 |
| Tabelle 9:  | Variantenschlüssel  | 39 |
| Tabelle 10: | Klimaanalyse zum Standort Freiburg (WUFI®)  | 40 |
| Tabelle 11: | Klimaanalyse zum Standort Holzkirchen (WUFI®)                                       | 40 |
| Tabelle 12: | Materialdaten der für die WUFI® Simulationen verwendeten Schichten                  | 41 |
| Tabelle 13: | Schichtenfolge der WUFI® Modelle (Nummern gemäß Tabelle 12)                         | 42 |
| Tabelle 14: | Versuchsmatrix zur Bestimmung des Einfluss von Temperatur und r. F.                 |    |
|             | auf den Innendruckanstieg – angegeben sind jeweils die mittleren                    |    |
|             | Temperaturen und r. F., die in den Klimakisten gemessen wurden                      | 44 |
| Tabelle 15: | Ergebnisse der Innendruckanstiege durch die Klimalagerung bei 23°C                  |    |
|             | und unterschiedlichen r. F.   | 45 |
| Tabelle 16: | Ergebnisse der Innendruckanstiege durch die Klimalagerung bei ca. 42 -              |    |
|             | 46°C und unterschiedlichen r. F.  | 46 |
| Tabelle 17  | Ergebnisse der Innendruckanstiege durch die Klimalagerung bei ca.                   |    |
|             | 70°C und unterschiedlichen r. F.  | 46 |
| Tabelle 18: | Koeffizienten der Flächenapproximation für den Zusammenhang                         |    |
|             | $ln(p_{a,ges}) = f(1/T, \phi)$  | 51 |
| Tabelle 19: | Koeffizienten der Flächenapproximation für den Zusammenhang In(p <sub>a,dry</sub> ) |    |
|             | $= f(1/T, \phi)$  | 52 |
| Tabelle 20: | Koeffizienten der Flächenapproximation für den Zusammenhang                         |    |
|             | $ln(p_{a,H2O}) = f(1/T, \phi)$  | 53 |
| Tabelle 21: | Parameter zur Berechnung der Gaswärmeleitfähigkeit als Funktion der                 |    |
|             | Partialdrücke trockener Luftgase (vereinfachend N <sub>2</sub> ) und Wasserdampf    |    |
|             | (H <sub>2</sub> O)  | 57 |
| Tabelle 22: | Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeit an gealterten VIP bei                         |    |
|             | unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und Alterungsdauern                          | 58 |
| Tabelle 23: | Parameter zu den VIP für die Modellierung des Langzeitverhaltens der                |    |
|             | Wärmeleitfähigkeit  | 62 |
| Tabelle 24: | Materialien für die Decklage von Vakuumpaneelen, deren                              |    |
|             | Wärmeleitfähigkeit und Schichtdicke.  | 82 |
| Tabelle 25: | Materialien für den Randverbund von Vakuumpaneelen,                                 |    |
|             | Wärmeleitfähigkeit und Schichtdicken.   | 83 |



| Tabelle 26: | berechnete ψ-Werte für 20 mm Vakuumpaneele in verschiedener              |     |
|-------------|--|-----|
|             | Ausführungsbreite des Aerogel-Randverbundes und unter                    |     |
|             | Berücksichtigung des Deckmaterials.                                      | 84  |
| Tabelle 27: | berechnete $\psi$ -Werte für 20 mm Vakuumpaneele in verschiedener        |     |
|             | Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und unter Berücksichtigung       |     |
|             | des Deckmaterials.   | 85  |
| Tabelle 28: | berechnete ψ-Werte für 20 mm Vakuumpaneele in verschiedener              |     |
|             | Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und unter                       |     |
|             | Berücksichtigung des Deckmaterials.                                      | 86  |
| Tabelle 29: | berechnete ψ-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener              |     |
|             | Ausführungsbreite des Aerogel-Randverbundes und unter                    |     |
|             | Berücksichtigung des Deckmaterials.                                      | 88  |
| Tabelle 30: | berechnete ψ-Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener              |     |
|             | Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und unter Berücksichtigung       |     |
|             | des Deckmaterials.   | 89  |
| Tabelle 31: | berechnete $\psi$ -Werte für 30 mm Vakuumpaneele in verschiedener        |     |
|             | Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und unter                       |     |
|             | Berücksichtigung des Deckmaterials.                                      | 90  |
| Tabelle 32: | berechnete ψ-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener              |     |
|             | Ausführungsbreite des Aerogel-Randverbundes und unter                    |     |
|             | Berücksichtigung des Deckmaterials.                                      | 91  |
| Tabelle 33: | berechnete ψ-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener              |     |
|             | Ausführungsbreite des EPS-Randverbundes und unter Berücksichtigung       |     |
|             | des Deckmaterials.   | 92  |
| Tabelle 34: | berechnete ψ-Werte für 40 mm Vakuumpaneele in verschiedener              |     |
|             | Ausführungsbreite des CaSi-Randverbundes und unter                       |     |
|             | Berücksichtigung des Deckmaterials.                                      | 93  |
| Tabelle 35: | Dicke, Material und Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für die        |     |
|             | Deckschichten  | 97  |
| Tabelle 36: | Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für den Randstreifen (Rand)       | 97  |
| Tabelle 37: | Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für den Wandaufbau mit            |     |
|             | WDVS und Innendämmung  | 98  |
| Tabelle 38: | Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für den Wandaufbau mit VHF.       | 98  |
| Tabelle 39: | Übersicht zu den Berechnungsvarianten                                    | 99  |
| Tabelle 40: | Ergebnisse der $lpha$ -Wert-Berechnung für den Dübel im 20 mm dicken     |     |
|             | WDVS (Kerndicke) mit VIP   | 100 |
| Tabelle 41: | Ergebnisse der $\chi$ -Wert-Berechnung für den Dübel im 40 mm dicken     |     |
|             | WDVS (Kerndicke) mit VIP   | 101 |
| Tabelle 42: | Ergebnisse der $lpha$ -Wert-Berechnung für den Dübel in der 20 mm dicken |     |
|             | Innendämmung (Kerndicke) mit VIP   | 103 |
| Tabelle 43: | Ergebnisse der $\chi$ -Wert-Berechnung für den Dübel in der 40 mm dicken |     |
|             | Innendämmung (Kerndicke) mit VIP   | 104 |
| Tabelle 44: | Ergebnisse der $\chi$ -Wert-Berechnung für die VHF mit 20 mm dicken VIP  |     |
|             | (Kerndicke)  | 105 |
| Tabelle 45: | Ergebnisse der $\chi$ -Wert-Berechnung für die VHF mit 40 mm dicken VIP  |     |
|             | (Kerndicke)  | 106 |



| Tabelle 46:             | Ergebnisse der α-Wert-Berechnung für den Dübel im WDVS mit VIP:<br>Maximal zulässige Dübelanzahl, ohne dass der U-Wert der Konstruktion<br>erhöht werden muss   | 108 |
|-------------------------|---|-----|
| Tabelle 47:             | Ergebnisse der α-Wert-Berechnung für den Dübel in der Innendämmung<br>mit VIP: Maximal zulässige Dübelanzahl, ohne dass der U-Wert der  | 100 |
|                         | Konstruktion erhöht werden muss.  | 109 |
| Tabelle 48:             | Ergebnisse der α-Wert-Berechnung für den L-Winkel in der Anwendung<br>VHF mit VIP: Maximal zulässige Dübelanzahl, ohne dass der U-Wert der<br>Konstruktion erhöht werden muss                         | 110 |
| Tabelle 49:             | Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit der Materialien für die<br>Berechnung der Wärmebrückenwirkung im Beton-Fertigteilbau. Für<br>Behursthen Orteebeum wird der Bemessungswert 0.020 W//m K) für im | 110 |
|                         | Polyuretnan Ortschaum wird der Bernessungswert 0,030 W/(m·K) für im<br>Beton-Fertigteilbau übliche, überwachte Ortschäume verwendet   | 113 |
| Tabelle 50:             | Längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten der Ränder der VIP-<br>Platten und der Ränder der Fertigteilelemente bei Ausführung der   | 115 |
|                         | Bauteilfugen analog der VIP-VIP Fugen   | 113 |
| Tabelle 51              | Ergebnisse zu den ermittelten $\chi$ -Werten bei Variation der Verankerung  |     |
|                         | und der Fugenausbildung   | 115 |
| Tabelle 52:             | Beispielberechnung für 3 Fertigteil-Elementgrößen in den beiden<br>Ausführungsvarianten mit 20mm XPS Rand bzw. mit 5mm PUR Rand<br>– Abmessungen und Fugenlängen sowie Flächen und U-Werte für        |     |
|                         | kleine, mittlere und große Elemente   | 116 |
| Tabelle 53:             | Beispielberechnung für 3 Fertigteil-Elementgrößen in den beiden<br>Ausführungsvarianten mit 20mm XPS Rand bzw. mit 5mm PUR Rand   |     |
|                         | – Anzahl der Verbundankernadeln und Flachanker sowie resultierende  |     |
|                         | U-Werte für kleine, mittlere und große Elemente   | 116 |
| l abelle 54:            | Warmebrucken bei unbelufteten und belufteten Paneelen mit –<br>längenbezogene und punktförmige Wärmedurchgangskoeffizienten<br>(Generischer Befestiger und Stoßstellen der Paneele) für verschiedene  |     |
|                         | VIP-Varianten mit 5 mm EPS-Deckschichten  | 122 |
| Tabelle 55:             | Belüftung von VIP – Grenzwert des Flächenanteils an belüfteten<br>Paneelen (3-% $\Delta$ U-Kriterium nach DIN EN ISO 6946) für verschiedene   |     |
|                         | einer Unterkonstruktion)  | 130 |
| Tabelle 56 <sup>.</sup> | Wärmedurchlasswiderstand eines belüfteten VIP (ohne   | 150 |
| Tabelle 50.             | Wärmebrückeneinfluss durch Randsteifen/Stoßstellen)   | 131 |
| Tabelle 57 <sup>.</sup> | Temperaturfaktoren im ungestörten Bereich bei Bauteilen mit belüfteten  | 101 |
|                         | VIP (ohne Wärmebrückeneinflüsse)  | 132 |
| Tabelle 58:             | Wärmedurchlasswiderstand R verschiedener Unterkonstruktionen mit  |     |
|                         | belüfteten VIP (ohne Wärmebrückeneinflüsse)   | 132 |



FIW Bericht FO-2012/08



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München Lochhamer Schlag 4 | DE-82166 Gräfelfing Geschäftsführender Institutsleiter:

Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle von Baustoffen und Bauteilen.

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Wärme- und Feuchteschutzes

T+49 89 85800-0 | F +49 89 85800-40 info@fiw-muenchen.de | www.fiw-muenchen.de Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm