

Vakuumdämmung im Bauwesen

Vorlesungsumdruck

Block II

Grundlagen der VIP-Technologie

angefertigt von der

Wolfgang Sorge IfB GmbH
Südwestpark 100
90449 Nürnberg

im Auftrag des
Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e. V.

ZAE Bayern
Am Hubland
97074 Würzburg

Nürnberg, September 2009



Gefördert durch das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Nutzungsbedingungen

1) Urheberrechtshinweis

Copyright ©

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern)

Am Hubland

97074 Würzburg

Alle Rechte vorbehalten.

Alle Urheberrechte der Webseite www.vip-bau.de und der vorliegenden Unterlagen für die Aus- und Weiterbildung liegen beim ZAE Bayern.

Diese Webseite, sowie die darauf eingestellten Dokumente dürfen kopiert, ausgedruckt und verteilt werden, vorausgesetzt:

- Sie werden nur zu Informationszwecken - insbesondere für die Aus- und Weiterbildung von Fachplanern, Architekten und Handwerkern - und nicht kommerziell verwendet, und
- jede Kopie - auch Auszüge - enthält den vorgenannten Urheberrechtshinweis.

2) Haftungshinweis

Das ZAE Bayern haftet nicht für die Inhalte externer Links, dafür sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich.

Das ZAE Bayern ist bemüht, sein Webangebot stets aktuell und inhaltlich richtig sowie vollständig anzubieten. Dennoch ist das Auftreten von Fehlern nicht völlig auszuschließen und das ZAE Bayern übernimmt daher keine Haftung für die Aktualität, die inhaltliche Richtigkeit sowie für die Vollständigkeit der eingestellten Informationen und Dokumente.

Geschützte Marken, Namen, Bilder und Texte werden in der Regel nicht als solche kenntlich gemacht. Das Fehlen einer solchen Kennzeichnung bedeutet aber nicht, dass es sich um einen freien Namen, ein freies Bild oder einen freien Text handelt.

3) Hinweis auf Fördermittelgeber

Der Aufbau und die Pflege der Informationsplattform www.vip-bau.de, wie auch die Ausarbeitung von Unterlagen für die Aus- und Weiterbildung werden und wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Forschungsschwerpunkts EnOB - Forschung für Energieoptimiertes Bauen - mit dem Forschungsakzent ViBau gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichungen liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Seite

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1 | Motivation | 2 |
| 2.2 | Historie von VIP | 4 |
| 2.3 | Funktionsweise von Wärmedämmstoffen | 6 |
| 2.3.1 | Grundlagen | 6 |
| 2.3.2 | Optimierungspotential | 9 |
| 2.3.3 | Wärmebrücken | 10 |
| 2.4 | Prinzip der Vakuumdämmung | 11 |
| 2.4.1 | Aufbau und Funktionsweise von VIP | 11 |
| 2.4.2 | Kernmaterialien von VIP [18] | 13 |
| 2.4.3 | Hüllmaterialien von VIP [18] | 14 |
| 2.4.4 | Lebensdauer von VIP | 16 |
| 2.5 | Anwendungen im Bereich der Gebäudehülle | 18 |
| 2.5.1 | Vor- und Nachteile von VIP | 18 |
| 2.5.2 | Einsatzgebiete im Bauwesen | 19 |

2.1 Motivation

Die Ursache und Problematik des mittlerweile spürbaren Klimawandels ist derzeit gegenwärtiger denn je - in nahezu jeder Nachrichtensendung und in zahlreichen Dokumentationen wird darüber berichtet und teilweise sehr kontrovers debattiert. Mitunter unumstritten bleibt, dass der Ausstoß von Treibhausgasen maßgeblich zur bevorstehenden Erderwärmung beiträgt. Zum Schutz und Erhalt der Erdatmosphäre fordert die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages eine Senkung der Kohlendioxid-Emissionen (CO₂) um 80 % bis zum Jahr 2050, bezogen auf die Emissionen von 1990 mit 1.015 Millionen Tonnen pro Jahr. Als Zwischenziel hat sich die Bundesregierung im Rahmen des Kyoto-Gipfels 1997 verpflichtet, die CO₂-Emission bis 2012 um insgesamt 21 % zu senken [1]. Das Kyoto-Abkommen trat am 16. Februar 2005 in Kraft und endet im Jahr 2012. Bis dahin soll der jährliche Ausstoß von Treibhausgasen der Industriestaaten um durchschnittlich 5,2 % gegenüber 1990 reduziert werden.

In Deutschland werden 40 % der Endenergie für Trinkwarmwasser und Gebäudebeheizung verbraucht. Ein Großteil des Verbrauchs entfällt auf die privaten Haushalte. Dieser stieg von 1990 bis 1996 stetig an. Ab 1997 ist eine Trendwende eingetreten, die mitunter auf die verzögerte Wirkung der Wärmeschutzverordnung 1995 (WSVO95) zurückzuführen ist. Denn trotz weiterem Zuwachs der Wohnfläche durch Neubaumaßnahmen um über 10 % sind die Verbrauchszahlen seitdem rückläufig und entsprachen 2006 in etwa dem Stand von 1990. So hat der Gesetzgeber bereits mit der WSVO95 eine Beschränkung des Heizwärmebedarfs für Neubauten gefordert und mit der Einführung der Energieeinsparverordnung EnEV2002 und nicht zuletzt mit der Ankündigung der Energieeinsparverordnung EnEV2012 konsequent fortgeschrieben.

Der CO₂-Ausstoß privater Haushalte im Wohnbereich konnte durch bessere Maßnahmen an der Gebäudehülle und dem verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien von 1990 bis 2005 um 13 Prozent, d.h. um rund 16 Mio. Tonnen gesenkt werden [2].

Untersuchungen über erzielbare Maßnahmen zur Energieeinsparung und Reduktion des CO₂-Ausstoßes im Bauwesen, zum Beispiel durch Modernisierung einer veralteten Anlagentechnik oder Erhöhung des Dämmniveaus, kommen zu dem Schluss [3], dass die Gebäudedämmung derzeit zu den effektivsten und wirtschaftlichsten Maßnahmen zählt. Gerade im Bereich von Bestandsgebäuden, in denen etwa 90 % des Heizwärmebedarfs verbraucht werden, existiert ein sehr großes Einsparpotential. Ebenso kann im Bereich des Neubaus derzeit die Energieeffizienz - etwa durch die Verbreiterung des Passivhausstandards - weiter gesteigert, fossile Energieträger eingespart, sowie der Ausstoß von CO₂ weiter reduziert werden.

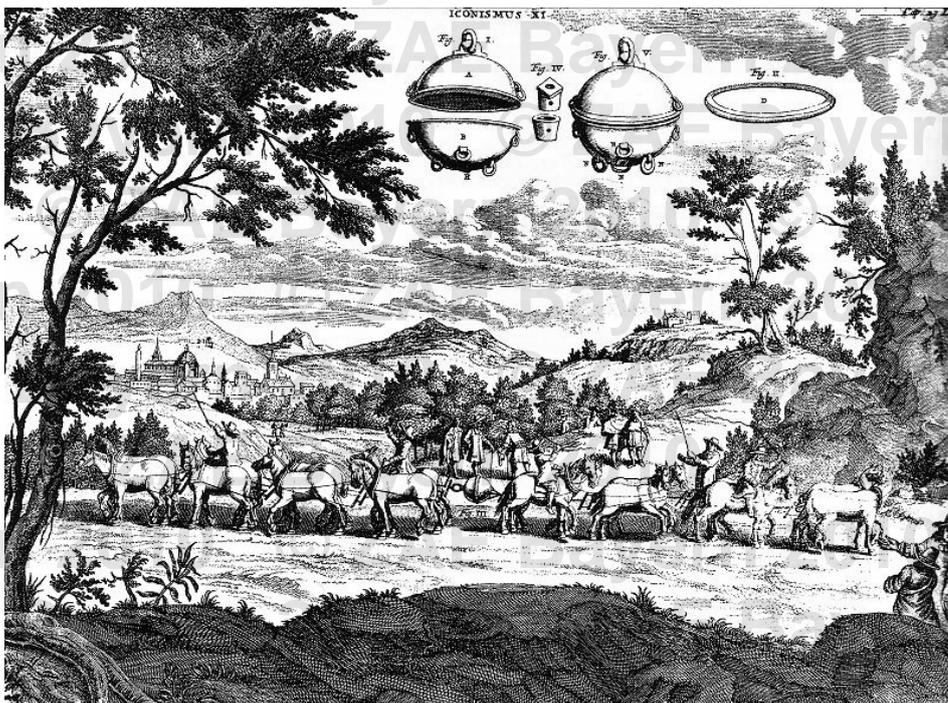
Lange Zeit galt eine 0,1 [m] dicke Wärmedämmung aus Polystyrol, PU-Schaum oder Mineralwolle als guter Wärmedämmstandard - um jedoch vorgenannter Forderung nachzukommen, wird nach Einschätzung von Experten zukünftig das ökonomische Optimum je nach Klimazone bei 0,3 bis 0,5 [m] konventioneller Wärmedämmung, wie beispielsweise Mineralfasern, Polystyrolschaum, Polyurethan-Hartschaum, Schaumglas, Schafwolle, Zellulose oder Flachs liegen [4].

Vorgenannte Dämmstoffdicken, die aus energetischer Sicht wünschenswert sind, können in der Praxis zu zahlreichen Problemen und Nachteilen, wie beispielsweise tiefe Fensteröffnungen mit ungünstigem Lichteinfall oder zu geringe Dachüberstände, führen. Diese können aufgrund baulicher Vorgaben oftmals nicht mehr wirtschaftlich umgesetzt werden. So sind bei Neubauten architektonisch und bauphysikalisch bedingte Probleme sowie bei der Altbaumodernisierung die Restriktionen aufgrund geometrischer Zwänge zu lösen. Bei derartigen Anwendungen wird der Wunsch nach schlanken hocheffizienten Dämmstoffen mit Bemessungswerten für die Wärmeleitfähigkeit von weit unter den derzeit üblichen Werten zwischen 0,025 bis 0,055 [W m⁻²K⁻¹] verständlich. Hier bietet die Dämmung mit Vakuuisolationspaneelen (VIP) neue und äußerst interessante Lösungsansätze.

2.2 Historie von VIP

Die Vakuumtechnik ist heutzutage eine erprobte und seit langem eingeführte Technik. Sie ist von Thermoskannen längst bekannt und aus einer Vielzahl industrieller Verfahren und Untersuchungstechniken nicht mehr wegzudenken. Bereits Mitte des 17. Jahrhunderts wurden durch Otto von Guericke die Grundlagen dieser Technik gelegt, als er 1654 auf dem Regensburger Reichstag zwei zusammengepresste Halbkugeln evakuierte.

Skizze Caspar Schotts von Guerickes Halbkugel-Experiment



Das heutige Spektrum der Vakuumtechnik reicht im industriellen Fertigungsbereich vom Glühen und Schmelzen von Metallen, dem Aufdampfen von Metallen über Trocknungsverfahren für unterschiedliche Stoffe bis zur Produktion von Glühlampen, im Bereich physikalischer und chemischer Untersuchungen vom Massenspektrometer über den Teilchenbeschleuniger bis zur Elektronenmikroskopie [4]. Eine Übersicht ist in [5], ausführliche Informationen hierzu in [6] gegeben.

Das Prinzip des Evakuierens bietet ebenso alltägliche Anwendungen. Beispielsweise erzeugt ein Staubsauger an der Düse ein partielles Vakuum und saugt damit den Staub an. Aufgrund der wärmedämmenden Wirkung des Vakuums sind auch die doppelten, mit einem wärereflektierenden Material beschichteten Wandungen von Thermoskannen evakuiert. Derartige Dewargefäße wurden um 1890 von dem Physiker James Dewar erfunden.

Um die hocheffiziente Dämmtechnik von Dewargefäßen auf flache evakuierte Vakuümisolationspaneele zu übertragen, wird ein Stützmaterial zwischen den Berandungen benötigt, welches sich evakuieren lässt, ausgasungsarm ist, eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist und dem einwirkenden Luftdruck von 1 [bar] entsprechend einer Gewichtslast von 10 [t m⁻²] standhält. Flache evakuierte Vakuümisolationspaneele haben mittlerweile eine mehrere Jahrzehnte lange Geschichte. Gemäß den Angaben aus [7] wurde das erste Patent über evakuierte Dämmplatten O. Hemmann und S. Dortmund 1930 vom Deutschen Reichspatent erteilt. Weitere Patente folgten 1951 von H.M. Strong und F.P. Bundy, 1955 von H.J. Bovenkerk sowie 1964 von P.E. Glaser, A.G. Emslie und W.A. Salmon, in denen die zuvor beschriebene Dämmtechnik präzisiert und geeignete Kernmaterialien entwickelt wurden.

Flache evakuierte Dämmungen in der Ausführung von VIP wurden in den 70er Jahren für den Einsatz in Kühl- und Tiefkühlgeräten entwickelt. Hier wurde anders als bei Thermoskannen nicht Edelstahl oder Glas als Hüllmaterial verwendet, vielmehr kamen speziell entwickelte sogenannte Hochbarriere-lamine zum Einsatz. VIP haben sich in den letzten Jahren insbesondere im Gebäudesektor stark entwickelt. Umfassende Informationen zur geschichtlichen Entwicklung der Vakuumdämmtechnik sind in [5], [6] sowie [7] gegeben.

Zu Beginn des Forschungsprojektes Annex 39, das im Rahmen des Umsetzungsabkommens "Energy Conversation in Buildings and Community Systems" ECBCS der Internationalen Energieagentur IEA von 2001 bis 2005 durchgeführt wurde, waren VIP im Bauwesen praktisch unbekannt. Zentrale Fragen wie Dauerhaftigkeit, Gasdichtigkeit, Verhalten unter Feuchte und Temperatur waren unbeantwortet. Mit dem Projektabschluss des Annex 39 im Juni 2005, [8] sowie [9], war festzustellen, dass die Eigenschaften von VIP bekannt sind und einige Schwächen bereits ausgeräumt wurden. Aus der Praxis lagen gut dokumentierte Erfahrungen vor, die von Produzenten und Unternehmen aufgenommen wurden und die Produktion professionalisiert und die Produkte besser auf den Baumarkt abgestimmt haben [10]. Heute kann ein sehr breites Interesse in der Baufachwelt festgestellt werden.

Die Anwendung von VIP im Baubereich wird allerdings immer noch durch Hindernisse gehemmt, deren Beseitigung Bestandteil weiterer Forschungsarbeiten sein wird. Insbesondere die Entwicklung von optimierten Folien und modifizierten Füllkernen sind zentraler Bestandteil der zukünftigen Forschung.

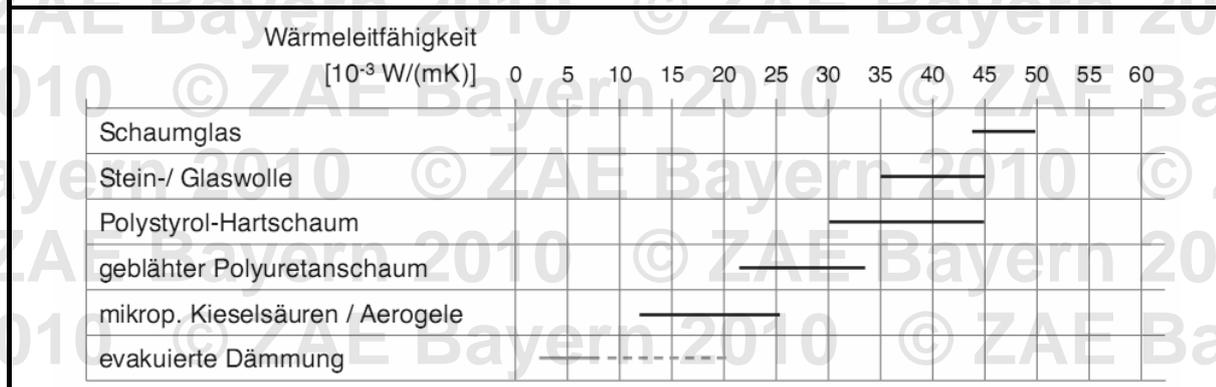
2.3 Funktionsweise von Wärmedämmstoffen

2.3.1 Grundlagen

Dämmstoffe sind gemäß DIN 4108 "Wärmeschutz im Hochbau" Materialien, deren Wärmeleitfähigkeit kleiner oder gleich $0,10 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ ist. Hauptaufgabe von Wärmedämmstoffen ist die möglichst umfassende Behinderung des Wärmetransports. Hierbei ist die Wärmeleitfähigkeit die entscheidende Größe für das Verhalten des jeweiligen Stoffes gegenüber der Weitergabe von Wärme. Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes beschreibt den Wärmestrom in $[\text{W}]$ pro $[\text{m}^2]$ Stoffoberfläche durch eine 1 [m] dicke Schicht, der durch einen konstanten Temperaturunterschied von 1 [K] zwischen den Oberflächen hervorgerufen wird. Je geringer die Wärmeleitfähigkeit einer Materials desto größer ist dessen Dämmwirkung [11]. Die meisten im Bauwesen eingesetzten Dämmstoffe weisen bei Umgebungstemperatur Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von etwa $0,030 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ bis $0,050 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ auf.

Wie nachfolgende Übersicht zeigt, beträgt die Wärmeleitfähigkeit der derzeit effizientesten, belüfteten Dämmstoffe etwa $0,021 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$:

Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe und Dämmsysteme [5]



Mit evakuierten Dämmmaterialien sind Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von etwa $0,002 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$ bis $0,008 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$ erzielbar [12]. Im Vergleich zu belüfteten Dämmstoffen weisen VIP somit ein Verbesserungspotential von einem Faktor zwischen 5 bis 10 auf. Wird der Verbrauch an konventionell verwendeten Dämmstoffen im Baubereich betrachtet, so ist erstens der enorm hohe Bedarf an Dämmmaterialien und somit das Potential von VIP abschätzbar, zweitens zeigt sich, dass Dämmstoffe aus Mineralfasern mit 56 % und Dämmstoffe aus Polystyrolhartschaum mit 33 % den derzeit größten Marktanteil aufweisen:

Auswahl verschiedener Dämmstoffe für den Baubereich im Jahre 2001 [5]

| Material | Verbrauch im Baubereich im Jahre 2001 | |
|-----------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| | ...in Deutschland in m^3 | ...in Europa in m^3 |
| Mineralfaser | 16.254.000 | 64.804.000 |
| EPS | 9.550.000 | 28.396.000 |
| PU / Polyisocyanurate | 1.600.000 | 5.864.800 |
| XPS | 1.100.000 | 3.900.900 |
| Perlite | 260.000 | 655.370 |
| Schaumglas | 130.000 | 296.160 |
| Vermiculite | 44.000 | 71.820 |

Zum Verständnis des Wärmetransportes in belüfteten und evakuierten Wärmedämmstoffen werden nachfolgend die relevanten Zusammenhänge zusammenfassend aus den Arbeiten von [7], [12], [13], [14] sowie von den Inhalten des dritten Blocks dargestellt.

Unter dem Begriff Wärmetransport ist eine Form von Energiefluss zu verstehen. Er findet stets von der wärmeren, und damit energiereicheren, zur kälteren Seite statt. Für eine betrachtete Konstruktion ist die übertragende Energiemenge pro Zeit abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen den angrenzenden Seiten, der Schichtdicke und der Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien. In guter Näherung lässt sich der Wärmetransport in porösen Dämmungen durch die Summe der verschiedenen Beiträge nach [7] aus

- Wärmetransport über das Festkörpergerippe λ_s ,
- Infrarotstrahlungstransport λ_r und
- Wärmeleitung des darin enthaltenen, ruhenden Gases λ_g

beschreiben. Der Anteil dieser drei Mechanismen am Gesamtenergie-transport ist unter anderem von den klimatischen Randbedingungen (Temperatur und Feuchte) sowie den Materialeigenschaften (Rohdichte, Porosität und Systemdruck) abhängig, und wird infolge von Kopplungseffekten der verschiedenen Transportpfade durch einen weiteren Term λ_c ergänzt. Der zusätzliche Kopplungsterm kommt insbesondere dann zum Tragen, wenn die hohen Widerstände der punktförmigen Kontakte in Pulverschüttungen oder Faserlagen durch die Luftmoleküle thermisch kurzgeschlossen werden. Grundsätzlich lässt sich somit die Wärmeleitfähigkeit von porösen Dämmungen mit

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_r + \lambda_g + \lambda_c$$

bestimmen, wobei der Wärmetransport hauptsächlich über die Wärmeleitung der in den Poren befindlichen Gase sowie der Festkörperleitung des Porengerüsts erfolgt.

Der Anteil des Wärmetransportes über das Festkörpergerippe kann anhand einer Reihe von Modellen abgeschätzt werden. Er ist für Schäume weitgehend unabhängig vom Belastungsdruck und steigt mit der Dichte linear an. Für die leichtesten Dämmstoffe liegt die Festkörperwärmeleitung bei $0,001 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ und kann für Dämmstoffe mit geringer Porosität durchaus zehnmal so hoch sein [7].

Der Strahlungsbeitrag am Wärmetransport ist hingegen umgekehrt proportional zur Dichte und kann für Dämmungen mit hoher Porosität Werte um $0,01 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ aufweisen. Zur Verringerung des Strahlungstransfers müssen effiziente Streuzentren und/oder die Wärmestrahlung absorbierende "Trübungsmittel" im Dämmmaterial vorhanden sein. Werden beispielsweise effiziente Infrarottrübungsmittel (siehe Block IV) in die Dämmstoffe integriert, so kann der Strahlungsbeitrag bei 300 K auf unter $0,001 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ reduziert werden [7].

Die Gaswärmeleitung in einem freien, nicht durch Wände begrenzten Gas erfolgt durch Stöße der Gasmoleküle untereinander und lässt sich durch einen Diffusionsprozess in Abhängigkeit von spezifischer Wärmekapazität, der Gasdichte, der mittleren freien Weglänge sowie der Schallgeschwindigkeit beschreiben [7]. Die Gaswärmeleitung für Luft liegt bei der Normklimabedingung mit einer Umgebungstemperatur von 20 °C bei $0,026 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ und stellt somit den größten und maßgeblichsten Anteil der Gesamtwärmeleitung dar.

2.3.2 Optimierungspotential

Unter Vernachlässigung des bei sehr kleinen Porenradien gegen Null tendierenden Einflusses der Konvektion ergibt sich nach [4] für übliche Wärmedämmstoffe das Verhältnis Luftleitung:Strahlung:Festkörperleitung zu 25:13:2. Um den Wärmefluss zu reduzieren, müssen die zur Wärmeleitfähigkeit beitragenden Wärmetransportmechanismen getrennt betrachtet und durch zielführende Maßnahmen verringert werden.

Wird beispielsweise die in den Poren eingeschlossene Luft durch ein geeignetes Stütz- oder Treibgas substituiert, so kann die Wärmeleitung im Poren gas deutlich reduziert, und durch Erzeugung eines Vakuums nahezu vollständig unterbunden werden. Zusätzlich kann durch geeignete Wahl eines Dämmstoffes mit Mikroporenstruktur, beispielsweise pyrogener Kieselsäure, die Porenweite des Gerüstkörpers so klein gehalten werden, dass die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle größer ist als der Abstand der Zellwände oder der Porenweite. Bei Porenweiten von kleiner als $0,5 \text{ } [\mu\text{m}]$ kann eine Wärmeleitfähigkeit bei Normaldruck von $0,025 \text{ } [\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ erzielt werden. Diese lässt sich durch Zugabe zusätzlicher Infrarottrübungsmittel auf unter $0,020 \text{ } [\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ reduzieren [15].

Diese wärmeschutztechnisch optimierten Dämmstoffe weisen nach [4] dann ein Verhältnis von Gasleitung:Strahlung:Festkörperleitung von 0:1:3 auf, so dass die Wärmeleitfähigkeit dieser Dämmstoffe bis zu einem Faktor von 10 gegenüber konventionellen Dämmstoffen verbessert werden kann. Bei VIP kommen diese Effekte mit vorgenanntem Optimierungspotential zur praktischen Anwendung.

2.3.3 Wärmebrücken

Eine Stelle mit einem, relativ gesehen, deutlich höheren Wärmefluss gegenüber dem betrachteten Gesamtgefüge wird nach [14] als Wärmebrücke bezeichnet. In einem homogenen und flächigen Gefüge kann somit per Definition keine Wärmebrücke existieren, selbst wenn die Wärmeleitfähigkeit absolut gesehen sehr hoch ist. Bei räumlichen, nicht flächigen Gefügen treten im Bereich von Kanten und Ecken geometrische Wärmebrücken auf. Der erhöhte Wärmefluss ist im Verhältnis von Innenwand- zu Außenwand-Oberfläche begründet.

Die Stege im Materialgerüst eines Dämmstoffes könnten ebenfalls als Wärmebrücke bezeichnet werden. Allgemein wird der Begriff jedoch in einem Betrachtungsmaßstab angewendet, der konstruktive Zusammenhänge im Bauwesen beschreibt. Daher spricht man auch von *baulichen* oder

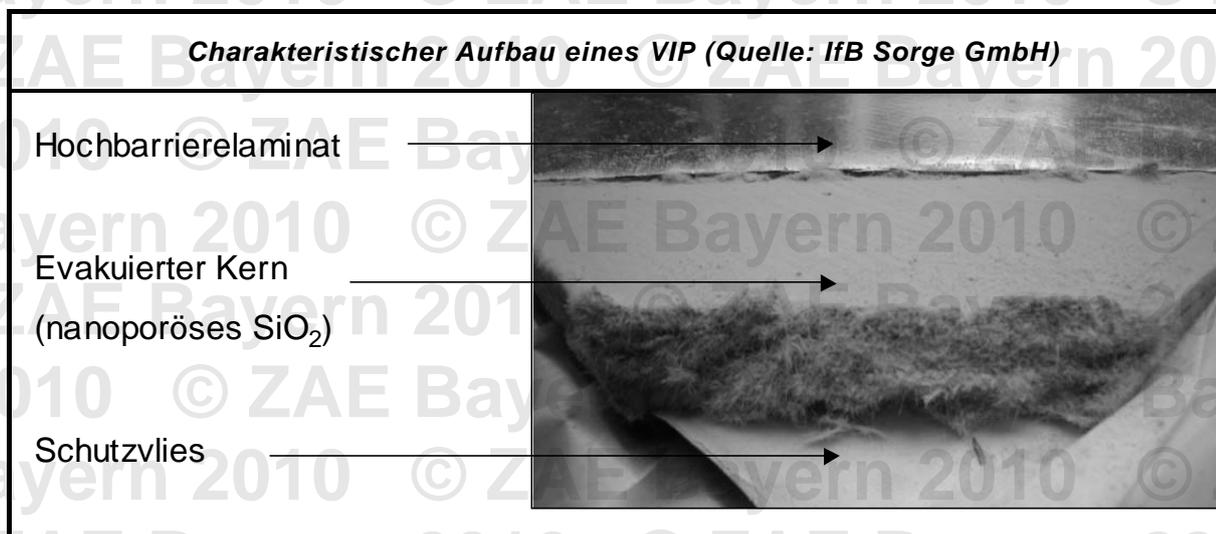
konstruktiven Wärmebrücken, die entweder punktförmig, linienförmig, flächig oder als Kombinationen hieraus auftreten. Beim Einsatz von Hochleistungs-dämmungen wie beispielsweise VIP ist grundsätzlich eine Verschärfung der Wärmebrückenproblematik zu beachten. Die deutlich geringere Dämmstoffdicke bei gleichzeitiger Minimierung der Wärmeleitung in der Fläche hat zur Folge, dass bei gleicher Konstruktion und Materialwahl jede Wärmebrücke stärker ins Gewicht fällt als bei konventionellen Dämmstoffen.

2.4 Prinzip der Vakuumdämmung

2.4.1 Aufbau und Funktionsweise von VIP

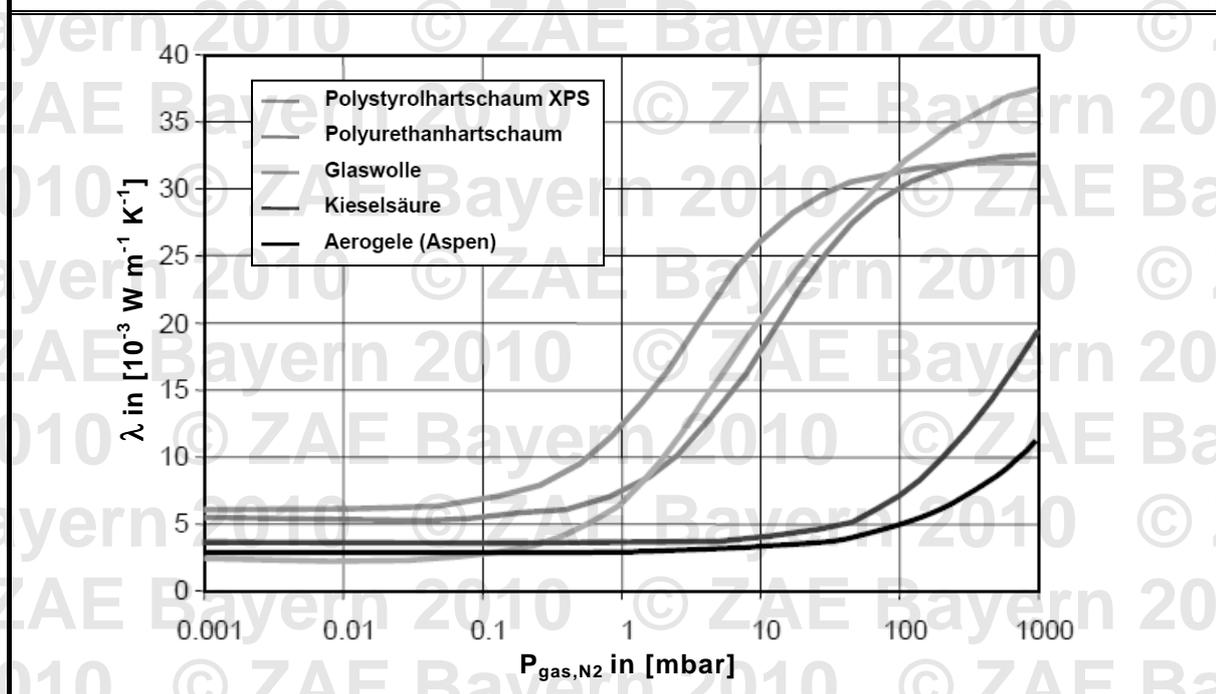
Das Prinzip von VIP beruht auf der Unterdrückung der Gaswärmeleitung durch Absenkung des Gasdrucks in dem zu evakuierenden Volumen (siehe Ziffer 2.3.2). Dabei muss der Druck soweit abgesenkt werden, dass die Gasmoleküle nicht mehr aneinander, sondern nur noch an die Volumenränder stoßen [16]. Gemäß nachstehender Abbildung besteht ein VIP im Wesentlichen aus einem plattenförmigen, hochporösen Kernmaterial und einer ausreichend dichten Umhüllung. Somit ist VIP weniger ein Dämmmaterial, das nach Bedarf bearbeitet und zurechtgeschnitten werden kann, sondern vielmehr ein vorgefertigtes Dämmelement, vergleichbar mit einem Fenster.

Charakteristischer Aufbau eines VIP (Quelle: IfB Sorge GmbH)



Der Kern eines VIP muss offenporig und evakuierbar sein und die Belastung durch den Atmosphärendruck aufnehmen können. Am ZAE Bayern wurden verschiedene Füllmaterialien für den Einsatz in Vakuumdämmungen optimiert. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Gasdruck ist in untenstehender Grafik aufgetragen.

Wärmeleitfähigkeit von Füllmaterialien in Abhängigkeit vom Gasdruck aus [17]



Der Übergang von einem evakuierten Material, bei dem Beiträge des Gases zur Gesamtwärmeleitfähigkeit zu vernachlässigen sind, zu einem nicht evakuierten Material, bei dem die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Gasdruckes konstant wird, erfolgt über zwei bis drei Größenordnungen im Gasdruck. In welchem Druckbereich dieser Übergang stattfindet, hängt im Wesentlichen von der Porengröße im Kernmaterial ab. Je feiner das Material, je kleiner die Poren, umso geringer sind die Anforderungen an die Qualität des Vakuums, das erreicht und aufrecht erhalten werden muss. Unter dem Aspekt des technischen Risikos einer Beschädigung oder eines Versagens der Vakuumschicht ist hervorzuheben, dass bei den nanostrukturierten pyrogenen Kieselsäuren die Wärmeleitfähigkeit auch im belüfteten Zustand nur etwa halb so groß wie bei konventionellen Dämmstoffen ist [12].

2.4.2 Kernmaterialien von VIP [18]

Grundsätzlich können verschiedene, druckbelastbare und hinreichend evakuierbare, poröse Materialien als VIP-Kernmaterial zum Einsatz kommen. Um den Anforderungen einer möglichst geringen Gesamtwärmeleitfähigkeit, ausreichender Druckstabilität und möglichst geringen Anforderungen an den erforderlichen "Vakuumdruck" zu genügen, sind diese Materialien entsprechend zu optimieren (siehe Block IV). Als Kernmaterialien, die bereits vor mehreren Jahren am ZAE Bayern ausführlich untersucht wurden, können

- offenporige Polymerschäume (z. B. Polyurethanschaum),
- Glasfasern (z. B. getemperte Fasermatten),
- Pulver (z. B. Schüttungen oder Preßlinge aus Kieselsäuren) und
- Aerogele (z. B. Silica-Aerogelpulver).

verwendet werden. Neben einer niedrigen Festkörperwärmeleitfähigkeit sind bei den Kernmaterialien eine hohe Abschwächung der Wärmestrahlung und eine möglichst bis zu hohen Restgasdrücken hin unterdrückte Gaswärmeleitfähigkeit erwünscht. Da kein Füllmaterial alle Vorteile in sich vereint, hängt die Wahl der VIP-Füllung vor allem von physikalischen Eigenschaften der Umhüllung und dem Anwendungszweck ab. Zusammenfassend können die verschiedenen VIP-Kernmaterialien wie folgt dargestellt werden:

offenporige Schäume:

Mit offenporigen Polyurethan- oder Polystyrolschäumen lassen sich bei Raumtemperatur Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,005$ und $0,008$ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$] im evakuierten Zustand erzielen. Gemäß der Abbildung unter Ziffer 2.4.1 steigt die Gaswärmeleitung bereits ab $0,1$ [mbar] merklich an und ist bei 20 [mbar] voll entwickelt. Dies ist auf die relativ großen Porendurchmesser in der Größenordnung von 20 [10^{-6} m] zurück zu führen. Vorteile der Schäume sind bei guter Druckbelastbarkeit ihre geringe Dichte mit etwa 50 [kg m^{-3}] bei einfacher Verarbeitung und Handhabung.

Glasfasern:

Thermisch behandelte und gegebenenfalls gepresste Matten aus Glasfasern weisen bei Raumtemperatur im Vakuum eine Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,0015 und 0,003 [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$] auf. Jedoch sind wegen der relativ großen Porengrößen von 20 bis 100 [10^{-6} m] geringe Gasdrücke unter 0,1 [mbar] erforderlich, um die Gaswärmeleitung zu unterbinden. Die Gaswärmeleitung steigt bereits ab 0,1 [mbar] deutlich an und ist bei 10 [mbar] nahezu vollständig ausgeprägt (siehe Ziffer 2.4.1).

Nanostrukturierte Pulver:

Diese Pulver sind meist nur im gepressten Zustand hinreichend gut zu handhaben und im VIP-Herstellprozess zu verarbeiten. Die Pulverfüllungen sollten möglichst feinkörnig sein. Um den Wärmetransport über Wärmestrahlung gering zu halten, müssen dem Basispulver Trübungsmittel zugesetzt werden. Für VIP geeignete Pulverbasismaterialien sind Perlite, Aerogele und verschiedene Kieselsäuren. Vor allem Fällungskieselsäuren und pyrogene Kieselsäuren sind aufgrund ihrer Nano-Struktur besonders gut für VIP geeignet. Die Wärmeleitfähigkeiten liegen bei Raumtemperatur im evakuierten Zustand zwischen 0,003 und 0,007 [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]. Erst bei Drücken größer 10 [mbar] ist ein signifikanter Anstieg der Gaswärmeleitfähigkeit erkennbar (siehe Ziffer 2.4.1). Selbst bei normalem Atmosphärendruck ist die Gaswärmeleitung aufgrund der Nano-Struktur noch nicht voll ausgeprägt.

2.4.3 Hüllmaterialien von VIP [18]

Um die Dauerhaftigkeit eines VIP sicherzustellen, sollte das Hüllmaterial eine

- möglichst hohe Gasdichtigkeit,
- möglichst hohe mechanische Belastbarkeit,
- möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit, sowie
- möglichst große Form- und Langzeitstabilität

aufweisen.

Für die Umhüllung von VIP werden verschiedene Materialien und Systeme verwendet. Die häufigsten sind:

- Metallbleche oder Metallfolien aus Stahl- bzw. Edelstahl,
- Aluminiumverbundfolien und
- mehrfach aluminiumbedampfte Kunststoffhochbarrierelamine.

Metallische Hüllmaterialien:

Für den Bau von VIP-Umhüllungen eignen sich prinzipiell verschiedene Metalle in "Folien"-Form. Sie sollten eine möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen und zumindest für den Randbereich möglichst dünn zu fertigen sein. Da Metallfolien nur in geringem Maße plastisch verformbar sind, muss die geometrische Form am Rand mit speziellen Faltungen erstellt werden. Der Vorteil der metallischen Umhüllung ist ihre hohe Gasdichtigkeit, so dass sie im Prinzip mit allen VIP-Kernmaterialien kombiniert werden können. Der Nachteil ist vor allem der starke Wärmefluss über den metallischen Paneelrand. Die Potenziale von VIP mit metallischen Hüllmaterialien werden erst ab Paneelgeometrien von größer gleich 1 [m²] voll ausgeschöpft.

Aluminiumverbundfolien:

Bei diesem Folientyp werden eine reine Aluminiumfolie mit einer Schichtdicke typischerweise zwischen 6 und 12 [10⁻⁶ m] und in der Regel zwei Kunststofffolien mit einem Kleber zu einer Aluminiumverbundfolie kaschiert. Mit derartigen Folien werden im Vergleich zu reinen Kunststofffolien deutlich niedrigere Gasdurchlässigkeiten erzielt. Dem Vorteil der hohen Dichtigkeit durch die Aluminiumschicht steht jedoch eine starke Wärmebrückenbildung über den Paneelrand gegenüber, da die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium mit 200 [W m⁻¹ K⁻¹] etwa 50.000 mal größer ist, als die Wärmeleitfähigkeit des evakuierten Kernmaterials.

Metallisierte Hochbarrierelamine:

Kunststoffe besitzen nur eine vergleichsweise geringe Sperrwirkung. Insbesondere Wasserdampf wird aufgrund einer hohen Löslichkeit für Wasser über einen Diffusionsprozess durch die Folie hindurch transportiert. Um die Dichtheit zu erhöhen, wird eine anorganische Sperrschicht (Aluminium, AlO_x , SiO_x) z. B. durch Bedampfen im Vakuum, aufgebracht. Um die Dichtigkeit noch weiter zu steigern, werden mehrere solcher derart beschichteter Kunststofffolien zu einem so genannten Hochbarrierelaminat verarbeitet. Im Unterschied zur Aluminiumverbundfolie beträgt bei diesem Folientyp die Schichtdicke des Aluminiums lediglich wenige zig Nanometer. Der Wärmebrückeneffekt am Paneelrand ist bei diesen geringen Aluminiumschichten deutlich reduziert.

Aluminiumverbundfolien wie auch die speziellen Kunststoffhochbarrierelamine werden durch Heißsiegeln miteinander verbunden. Bei dem Heißsiegeln handelt es sich um ein außerordentlich wirtschaftliches Verfahren zur Verbindung thermoplastischer Schmelzschichten, meist PE, durch Heißpressen.

2.4.4 Lebensdauer von VIP

Die Dauerhaftigkeit ist neben den physikalischen Eigenschaften ein entscheidendes Einsatzkriterium eines Dämmstoffes. Als Kriterium für das Lebensende wird meist das Überschreiten von festgelegten Grenzwerten physikalischer Eigenschaften definiert. Da der Hauptunterschied zwischen einem konventionellen Dämmstoff und einem VIP in der Unterbindung der Gaswärmeleitung zu sehen ist, eignet sich der Innendruck als maßgebliches Kriterium für das Lebensende. Die Lebensdauer eines VIP kann somit bis zur Überschreitung eines Innendrucks von z. B. 100 [hPa] für VIP mit pyrogener Kieselsäure definiert werden [19].

Bei VIP kommt es aufgrund eindringender Gase mit der Zeit zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Die natürliche Lebensdauer von VIP wird u. a. durch die jeweiligen Betriebsbedingungen beeinflusst, da die Durchlässigkeit der Sperrfolie und der Versiegelung gegenüber Wasserdampf und Gasen feuchte- und temperaturabhängig ist. Insbesondere höhere Temperaturen begünstigen das Eindringen von Gasen, während niedrige Temperaturen die Permeation durch die Folie verlangsamen [siehe Block IV]. Das Zeitverhalten des Innendrucks ist nach [4], [8] und [19] eine Überlagerung nachfolgender Effekte und hängt stark von äußeren Einflüssen wie Temperatur- und Feuchte ab:

- Anfangswert des Innendrucks,
- Eindringen atmosphärischer Gase (v.a. N_2 , O_2 , H_2O) durch die Folie bzw. das Laminat, sowie durch die Siegelnähte,
- Ausgasen des Kernmaterials oder der Hüllfolie,
- Sorptionseigenschaften des Kernmaterials,
- Kriechverhalten des Kernmaterials infolge der hohen Druckbelastung,
- mechanische oder chemische Einflüsse auf das VIP-Element.

Insbesondere beim Transport und beim Einbau sind die Paneele einem hohen Risiko der Beschädigung der VIP-Hülle ausgesetzt. Dies gilt speziell für die Ecken und Kanten. Scharfkantige Gegenstände, Steine oder raue Oberflächen sind jedoch auch ein Risiko für die Flächen eines VIP. Das Ausfallrisiko lässt sich maßgeblich durch einen fachgerechten Umgang mit VIP reduzieren. Das Deutsche Institut für Bautechnik DiBt hat daher in den hersteller- und produktspezifischen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen vorgeschrieben, dass nur eingewiesenes, speziell geschultes Fachpersonal VIP verarbeiten darf (siehe auch "Bestimmungen für die Ausführungen" der Zulassungen durch den DiBt). Um die Paneele robuster zu gestalten, sind einige Hersteller dazu übergegangen, die VIP beidseitig durch dünne konventionelle Dämmstoffschichten, Hartkunststoffe oder Bleche zusätzlich zu schützen. Der Dickenvorteil gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen reduziert sich dann entsprechend.

2.5 Anwendungen im Bereich der Gebäudehülle

2.5.1 Vor- und Nachteile von VIP

Bauphysikalisch und vor allem wirtschaftlich sinnvolle Einsatzgebiete von VIP lassen sich im Bereich der Gebäudehülle aufgrund ihrer Vor- und Nachteile definieren. Diese leiten sich neben der erzielbaren Lebensdauer (siehe Ziffer 2.4.4) anhand ihres Aufbaus, der verwendeten Kern- und Hüllmaterialien sowie anhand ihrer Funktionsweise (siehe Ziffer 2.4.1) ab. Die Vor- und Nachteile von VIP können grundsätzlich wie folgt zusammengefasst werden:

Vorteile:

- Faktor 5 bis 10 geringere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen,
- neue gestalterische und konstruktive Möglichkeiten bei schlanken Dämmstoffdicken,
- Raumgewinn,
- neue Möglichkeiten der Altbausanierung.

Nachteile:

- empfindlich gegenüber mechanischer Beschädigung,
- klassischer "Offen"-Einbau auf dem Bauplatz ist heikel,
- aufwändige Vorplanung mit Verlegeplan, Anschlüssen, Schutzschichten und Lagerung,
- Wärmebrückeneffekte sind bei der geringen Dämmstärke deutlich kritischer,
- hoher Planungsaufwand, da ein Zuschnitt oder die Anpassung eines VIP auf der Baustelle nicht möglich ist,
- derzeit hoher Preis.

Die aus vorgenannter Aufzählung abzuleitenden Einsatzgebiete von VIP sind in [4], [5], [6], [9] und [13] beschrieben, in Block VI anhand zahlreicher Praxisbeispiele ausführlich behandelt und im Folgenden als Übersicht zusammengefasst.

2.5.2 Einsatzgebiete im Bauwesen

VIP sind derzeit wesentlich teurer als konventionelle Wärmedämmstoffe. Sie werden letztere nicht auf dem Markt ersetzen, wohl aber in sinnvoller Weise ergänzen [8]. Durch Wohnraumgewinn in Ballungsgebieten mit hohen Grundstückspreisen können VIP wirtschaftlich eingesetzt werden. In Sanierungssituationen mit engen Baulinien, knappen Dachüberständen oder bei gestalterischen Problemen mit großen Dämmstoffdicken bieten sie einen effizienten Wärmeschutz bei geringer Aufbauhöhe. Konkrete Fälle, in denen meist wenig Platz zur Verfügung steht, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Fassade:

- geringer Dachüberstand,
- knappe Baulinie (z. B. Gehweg),
- optimierte Ausnutzungsziffer bei Neubauten,
- Innendämmungen,
- Rollladenkasten und Sonnenschutz,
- Fensteranschlüsse, Laibungsdämmung.

Geschosstrennendecke:

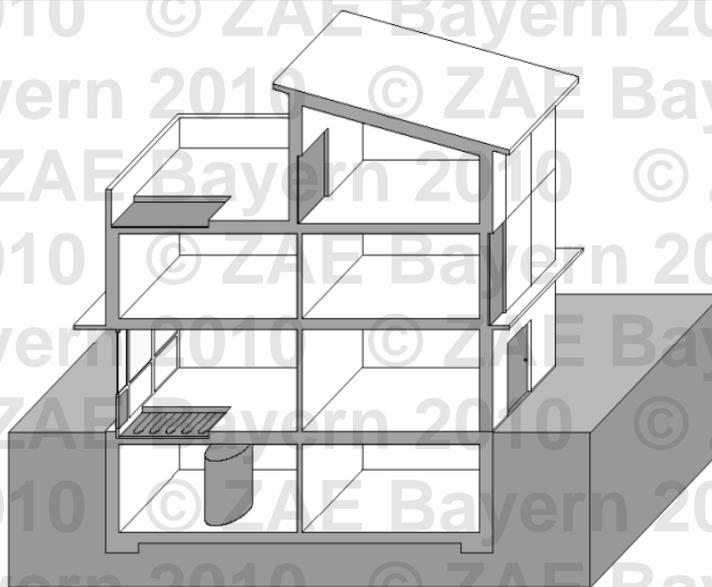
- Raumhöhe, Anschlüsse Türen.

Dach:

- Traufhöhe, Firsthöhe und Attika,
- Dachterrasse,
- Dachgaube.

Durch die optimierte Dämmstoffdicke können VIP in bestimmten Fällen als "Problemlöser" eingesetzt werden, so dass aufwändige Nebenarbeiten entfallen, wie beispielsweise Verlängerung des Daches oder Versetzen von Tür- und Fensteröffnungen. Nach [20] sind die derzeitigen Einsatzgebiete von VIP wie folgt darstellbar:

Einsatzbereiche von VIP im Gebäude [20]



Grundsätzlich eignen sich VIP bei allen Konstruktionen, bei denen aus konstruktiven oder gestalterischen Gründen keine großen Dämmstoffdicken möglich sind, wie

- leichte Flächentragwerke,
- Kuppeln und Filigrandecken,
- Flachdächer,
- Balkone und Terrassen,
- Außenfassaden sowie
- Fußboden und Kellerdecken.

Insbesondere bei Bauwerken im Passiv- und Niedrigenergiehausstandard finden VIP zur Vermeidung von Wärmebrücken bei Außentüren und Fensterbrüstungen sowie bei Jalousie- und Raffstorekästen Anwendung.

Vorgefertigte Bauteile mit VIP wie Türen, Fensterbrüstungen und -stürze, Fassaden- und Dachelemente sowie Rollladenkästen haben den Vorteil, dass die empfindlichen VIP unter Fabrikationsbedingungen vorab eingebaut werden. Prinzipiell bieten sich VIP sowohl in der Altbauanierung als auch im Neubau immer dann an, wenn eine Dämmschicht mit wenig Durchdringungen angebracht werden kann. Derzeit verfügbare Produkte und Anwendungen in der Übersicht:

Neubau:

- Betonfertigteile,
- Holztafelelemente,
- Ziegel- Mauerwerkskonstruktionen,
- Wärmedämmverbundsysteme,
- Pfosten-Riegel-Konstruktionen,
- Dämmung von Terrassen und Balkonen,
- Dämmung von begehbaren Flachdächern,
- Außentüren.

Altbau:

Anders als beim Neubau, in dem gewünschte Dämmstoffdicken eingeplant und daher meist frei festgelegt werden können, liegen bei der energetischen Gebäudesanierung die geometrischen Randbedingungen meist vor. Die maximale Dämmstoffdicke ist jedoch häufig durch Grenzabstände oder anschließende Bauteile festgelegt. VIP bieten hier die Möglichkeit, trotz beengter Platzverhältnisse als Problemlöser hohe Ansprüche an den Wärmeschutz zu erfüllen. Einsatzgebiete sind beispielsweise:

- Fußbodensanierung,
- Dämmung von Laibungen und Stürzen,
- Außendämmung von Fassaden,
- Innendämmung von Wänden.

Literaturverzeichnis

- [1] Enquete-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des 12. Deutschen Bundestages, Mehr Zukunft für die Erde, Bonn 1995
- [2] CO₂-Gebäudereport 2007 - Kurzfassung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)
- [3] Institut Wohnen und Umwelt, "Baustelle Klimaschutz" Potenziale und Strategien für die Reduktion der CO₂-Emission aus der Beheizung von Gebäuden, Studie im Auftrag der Umweltstiftung WWF, Darmstadt 1997
- [4] Willems, W.: Vakuumdämmung, Bauphysik Kalender 2004, Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2004
- [5] Cremers, J.: Einsatzmöglichkeiten von Vakuu-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle. Dissertation, TU München 2005
- [6] Wutz, M., Adam, H., Walcher, W.: Handbuch der Vakuu-technik, 7. erw. Auflage, Vieweg Verlag 2000
- [7] Fricke, J., Beck, A., Binder, M.: Vakuu-Isolations-Paneele für Gebäude - ein Lehrbuch, ZAE Bayern, Würzburg 2007

- [8] Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K., Mukhopadhyaya, P., Quénard, D., Sallée, H., Stramm, C., Tenpierik, M., Cauberg, H., Erb, M.: Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications, Annex 39 "HiPTI - High Performance Thermal Insulation" of IEA/ECBCS-Implementation Agreement, Report on Subtask A, published on www.vip-bau.de, 2005
- [9] Binz A., Moosman, A., Stenke, G., Schonhardt, U., Fregnan, F., Simmler, H., Brunner, S., Ghazi, K., Bundi, R., Heinemann, U., Schwab, H., Cauberg, H., Tenpierik, M., Johannesson, G., Thorsell, T., Erb, M., Nussbaumer, B.: Vacuum Insulation in the Building Sector, Systems and Applications, Annex 39 "HiPTI - High Performance Thermal Insulation" of IEA/ECBCS-Implementation Agreement, Report on Subtask B, published on www.vip-bau.de, 2005
- [10] Erb, M.: Vakuumdämmung "State of the Art" und Chancen für die Gebäudesanierung, Tagung "Ökologische Gebäudesanierung", 2005
- [11] Hohmann, R., Setzer, M., Wehling, M.: Bauphysikalische Formeln und Tabellen. Wärmeschutz - Feuchteschutz - Schallschutz, 4. Auflage, Werner-Verlag, München 2004
- [12] Heinemann, U.: Wesen, Potentiale und Besonderheiten von Vakuu-isolationspaneelen, 2. Fachtagung "VIP-Bau", Wismar 2005
- [13] Willems, W., Schild, K., Völkner, S.: Dämmstoffe im Bauwesen, Bauphysik Kalender 2007, Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2007
- [14] Dietrich, B.: RWE Energie Bau-Handbuch, 13. Auflage, Energie-Verlag, Heidelberg 2004
- [15] Reisacher, H.: VIP - Stand der Technik, VIP-Bau: 1. Fachtagung (2003), Rostock-Warnemünde

- [16] Schwab, H.: Vakuumisulationspaneele - Gas- und Feuchteintrag sowie Feuchte- und Wärmetransport, Dissertation, Julius-Maximilians-Universität, Würzburg 2004
- [17] Eicher, H.-P., Erb, M., Binz, A.: Hochleistungswärmedämmung HLWD, Schlussbericht 2000, im Auftrag des Bundesamtes für Energie
- [18] Schwab, H., Wachtel, J., Scheuerpflug, H., Stark, C., Heinemann, U., Ebert, H-P., Fricke, J.: Entwicklung und Anwendung von evakuierten höchsteffizienten Dämmungen für Gebäude (Vakuumdämmung für Gebäude), Abschlussbericht, ZAE Bayern, Würzburg 2003
- [19] Simmler H.: Vakuumdämmung - Qualitätssicherung und bauphysikalische Grundlagen, Jahresbericht 2002, EMPA Bauphysik
- [20] Steinke, G.: Vakuumdämmung im Gebäudesektor Ergebnisse IEA Subtask A, Präsentation, Institut Energie am Bau, Nordwestschweiz 2006