

Vakuumdämmung im Bauwesen

Vorlesungsumdruck

Block IV

Werkstoffe

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, Juli 2010

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

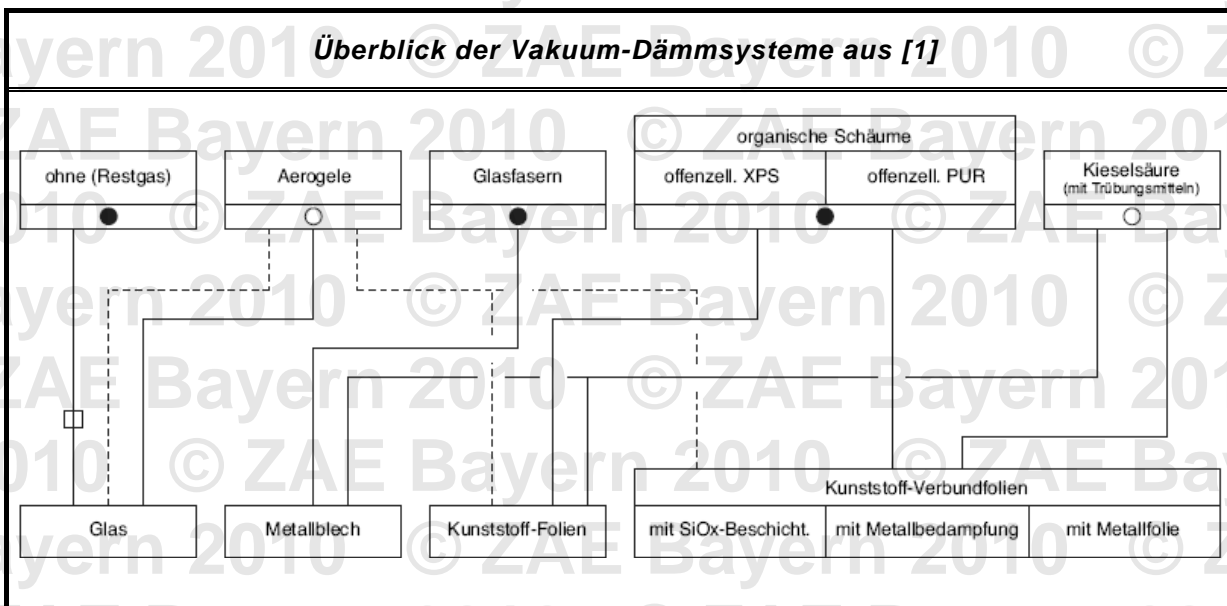
Seite

4.1	Grundlagen	2
4.2	Hüllmaterialien	3
4.2.1	Folienherstellung allgemein	3
4.2.2	VIP Hüllfolien	9
4.2.3	Vor- und Nachteile von Foliensystemen	14
4.3	Kernmaterialien	19
4.3.1	Anforderungen	19
4.3.2	Übersicht der verwendeten Kernmaterialien	23
4.4	VIP auf Basis nanostrukturierter Kernmaterialien	29

4.1 Grundlagen

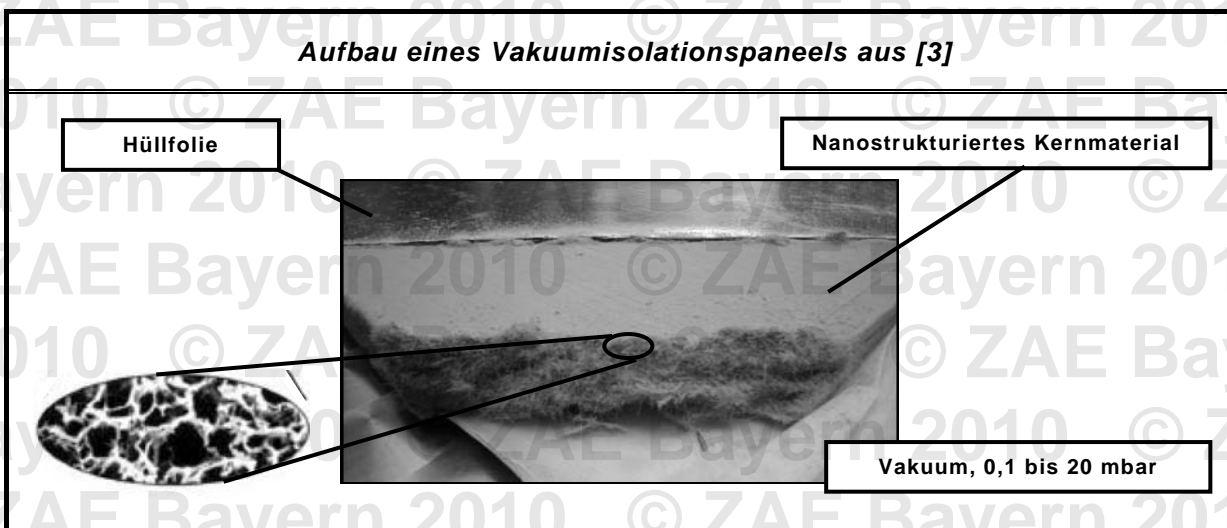
VIP weisen eine bereits 20 jährige Historie, beginnend im Bereich der Kühlschranksdämmung, auf (siehe Block II). Die hocheffizienten Dämmpaneele bestehen im Wesentlichen aus einem Atmosphärendrucktragenden Kernmaterial und einer ausreichend gasdichten Hülle.

Überblick der Vakuu-Dämmsysteme aus [1]



Wie aus Block II bereits bekannt, wird die bestimmende Kenngröße des Wärmetransports durch ein VIP durch die Evakuierung des Kernmaterials unterbunden [2].

Aufbau eines Vakuu-Isolationspaneels aus [3]



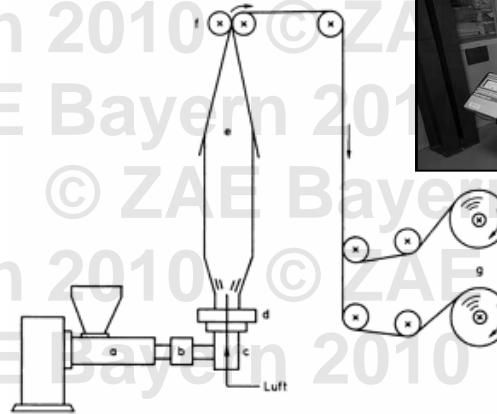
4.2 Hüllmaterialien

4.2.1 Folienherstellung allgemein

Folien begegnen uns überall: als Verpackungsmaterial, Informationsträger, Isoliermaterial, in der Landwirtschaft und im Bauwesen. Generell wird zwischen Einschicht- und Mehrschichtfolien (sog. Verbundfolien) unterschieden. Einschichtfolien werden derzeit überwiegend aus Polypropylen (PP), aus Polyethylen (PE) oder aus Polyethylenterephthalat (PET) produziert. Neben der direkten Verarbeitung als Verpackungsmaterial dienen Einschichtfolien als Basis zur Herstellung von Verbundfolien. Diese finden vorwiegend in der Verpackungsindustrie, in der Bauindustrie, in der Recyclingindustrie sowie im Transportwesen Verwendung. Die gängigsten Rohstoffe hierfür sind PE-LD, PE-HD, PP und Polyamid (PA).

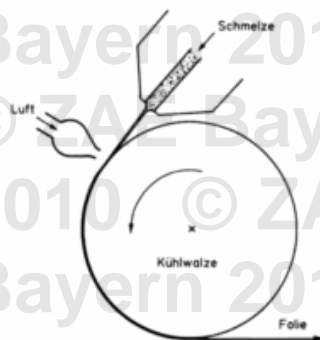
Die Herstellung dünner Folien ist in [4], [5] und [6] im Detail beschrieben und auf der nachfolgenden Seite schematisch dargestellt. Zu ihrer Herstellung wird bei der so genannten Blasfolienextrusion eine Kunststoffschmelze mit Hilfe einer Ringdüse zu einem Schlauch geformt. Hierbei wird Kunststoffgranulat durch Erwärmung, Reibung und Druck in einem Extruder auf eine Temperatur von 150 °C bis 250 °C erhitzt und durch ein Siebpaket in einen Blaskopf gepresst. Dieser Blaskopf kann aus mehreren Kanälen (für Mehrschichtfolien) bestehen, die in einem gemeinsamen ringförmigen Spalt enden. Beim Austritt aus dem Blaskopf entsteht eine vertikale Folienblase deren Qualität und Durchlässigkeit im Inneren überprüft wird. Der Folienschlauch wird über eine Ringspaldüse mit Luft tangential angeblasen, um das Material auf kurzmöglichstem Weg abzukühlen. Der so entstandene Folienschlauch wird über eine Flachlegung zusammengelegt und zwischen zwei Rollen abgequetscht. Über das Folienabzugswerk und die Folienleitbahn wird die Folie zum "Wickler" befördert, wo sie zur Lagerung und weiteren Verwendung auf Rollen aufgewickelt wird.

Blasfolienextrusion aus [4] und [7]



Im Gegensatz zur Blasfolienextrusion wird bei der Flachfolienextrusion bzw. Gießfolienextrusion keine Folienblase verarbeitet. Bei diesen Verfahren wird die Granulatschmelze durch eine breite Düse gepumpt. Über diese Düse gelangt die Schmelze auf einen rotierenden und gekühlten Walzenkörper und wird anschließend aufgewickelt.

Blasfolienextrusion aus [4] und [8]



Verbundfolien:

Verbundfolien sind mehrschichtige Einschichtfolien mit verschiedenen Materialzusammensetzungen, aus denen flexible Verpackungen hergestellt werden.

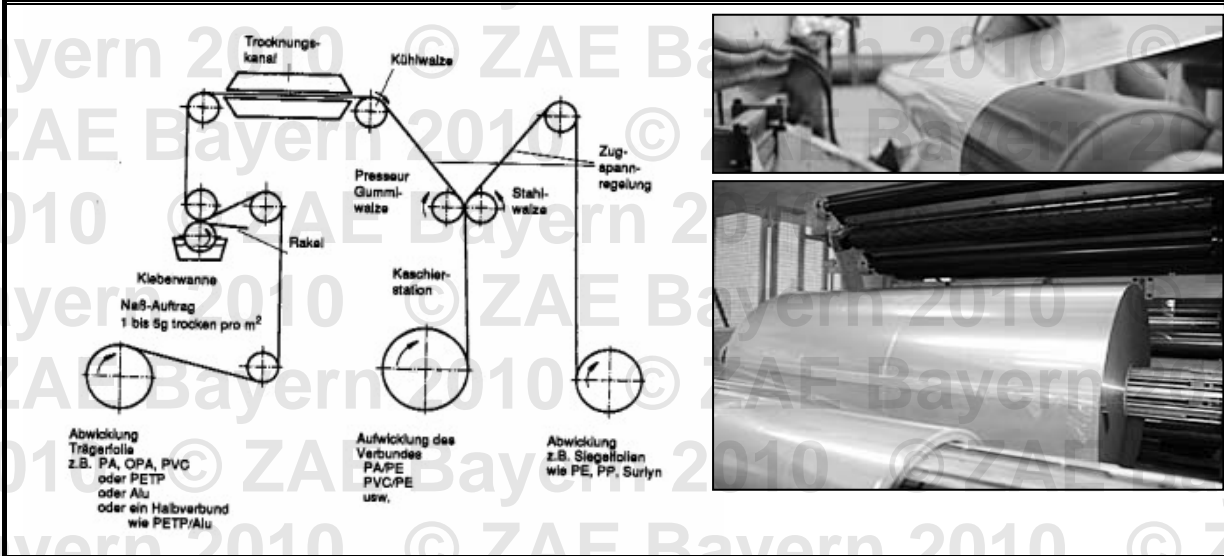
Das Eigenschaftsprofil von Verbundfolien kann durch Kombination der verschiedenen Eigenschaften der einzelnen Schichten auf den jeweiligen Anwendungszweck angepasst werden. Besonders wichtige Gruppen von Verbundfolien sind Kunststoff-Aluminium-Verbunde, PA/PE-Folien und Barriere-lamine.

Um die Wasser- und Gasdurchlässigkeit von Verbundfolien zu reduzieren, kann die Folie mit einer zusätzlichen Barrierschicht versehen werden. Häufig wird ein in PE eingebetteter Polyvinylalkohol (EVOH) verwendet [4]. EVOH ist wasserlöslich, besitzt eine sehr hohe Reißfestigkeit, eine gute Dehnbarkeit im feuchten Zustand, eine sehr hohe Beständigkeit gegen organische Chemikalien, eine sehr gute Fett- und Aromadichte sowie eine sehr gute Licht- und Alterungsbeständigkeit. Zur Herstellung von Verbundfolien werden derzeit lösemittelfreie oder lösemittelhaltige Kaschierungen und Laminierungen verwendet. Alternativ, wenn auch heutzutage seltener, können Verbundfolien durch eine Extrusionskaschierung oder -beschichtung produziert werden. Die Besonderheiten und Auswirkungen der verschiedenen Produktionsverfahren sind in [5] dargestellt und können wie folgt zusammengefasst werden:

Kleberkaschierung:

- Polyolefine ab 20 [μm] Dicke, ggf. mit Gleit- und/oder Antiblockmittel sind als Heißsiegelschicht und für alle Trägerfolien möglich,
- dicke Kleberschichten und ggf. Polyolefine höherer Dichte ergeben eine höhere Steifigkeit (Kleber einfärbbar),
- transparente Verbunde sind relativ klarsichtig und homogen,
- rollneigungsarme Fertigung möglich, sowie
- geruchsneutral.

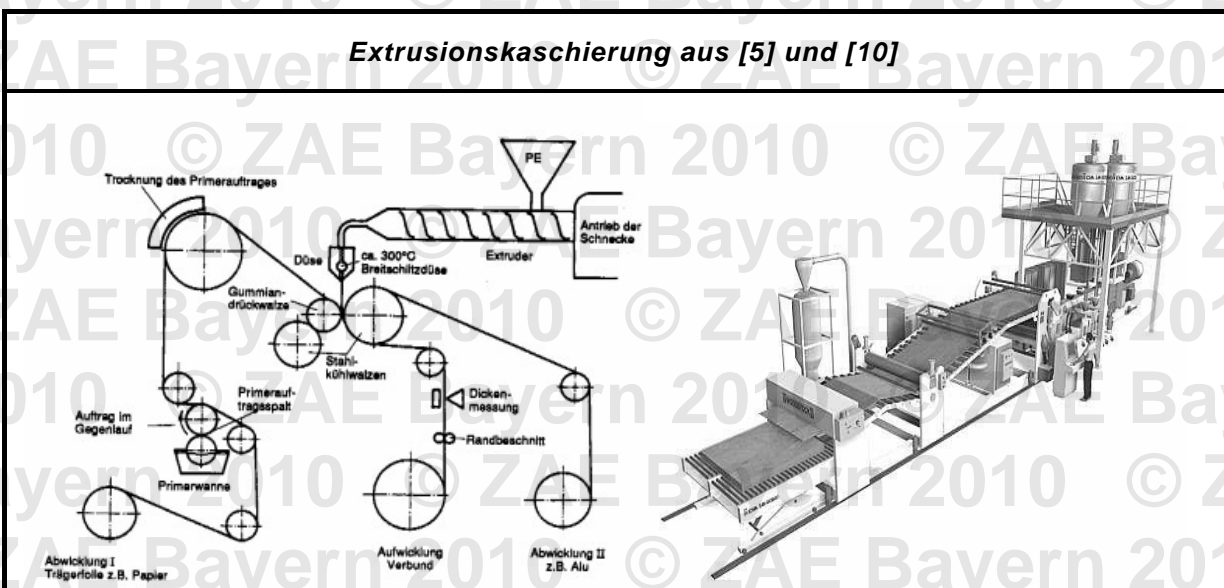
Kleberkaschierung aus [5] und [9]



Extrusionskaschierung:

- Polyolefine (siehe oben) als Heißsiegelschicht möglich,
- hitzeempfindlichere Trägerfolien (OPP, PVC) sind weniger geeignet,
- die Heißsiegelschicht kann dünn (preiswert) sein,
- dünne Primerschicht möglich (deshalb flexibel),
- nicht rollneigungsfrei, sowie
- produktionsbedingt leichter PE-Geruch.

Extrusionskaschierung aus [5] und [10]



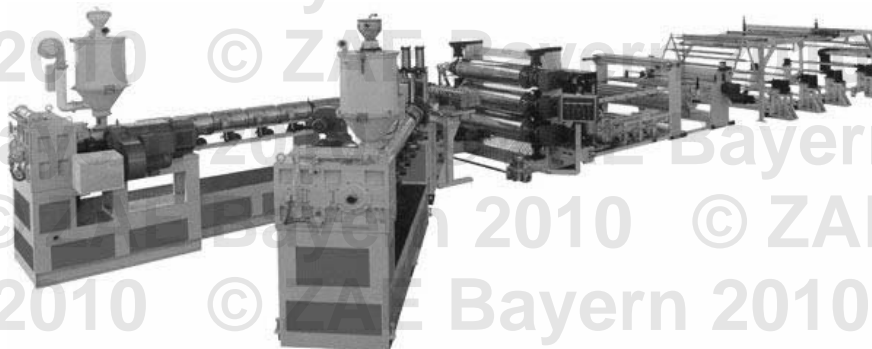
Extrusions- und Coextrusionsbeschichtung:

- PE-LD und Ionomere ab 10 [μm] Dicke als Heißsiegelschicht möglich,
- hitzeempfindlichere Trägerfolien (OPP, PVC) sind weniger geeignet,
- dünne Primerschicht möglich (deshalb flexibel),
- zur Schlupfverbesserung leichte Puderung oder Mattierung der PE-Oberfläche empfehlenswert,
- transparente Verbunde weniger homogen und klarsichtig sowie
- produktionsbedingt leichter PE-Geruch (bei Coex günstiger).

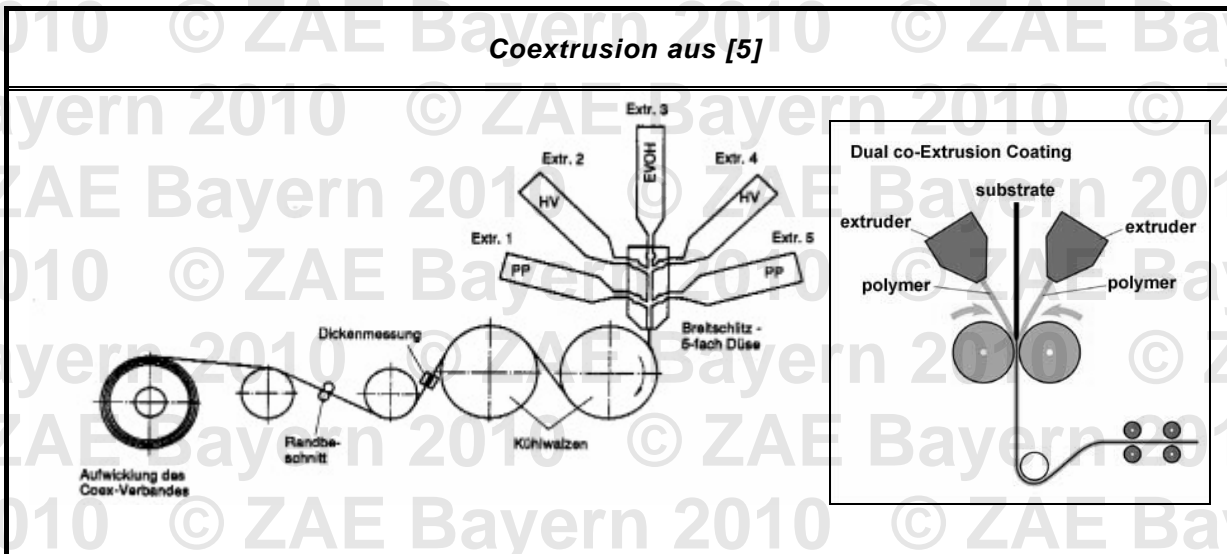
Extrusionsbeschichtung aus [10]



Coextrusionsbeschichtung aus [11]



Coextrusion aus [5]



Die durch vorgenannte Herstellungsprozesse erzielbare Qualität der Hüllfolien reicht für Standardanwendungen meist aus. Bestehen hingegen erhöhte Anforderungen an die Eigenschaften und die Funktionalität der Folie, werden darüber hinausgehende Verarbeitungsprozesse erforderlich. Das einfachste Beispiel ist im Schneiden und Wickeln der Rohrollen zur weiteren Verwendung zu sehen. Durch die Folienverarbeitung werden Verbundfolien erzeugt, die meist nicht in einem Arbeitsgang durch z. B. Coextrusion produziert werden können. Durch ergänzende Produktions- und Veredelungsprozesse wie das Bedampfen, das Beschichten, das Bedrucken oder das Beflocken kann die Folienoberfläche veredelt werden. So können auch Folien mit höheren Barriereigenschaften hergestellt werden. Beispiele für Verbunde von derart veredelten Barrierefolien sind Fisch- und Fleischwarenverpackungen, standfeste sterilisierbare Verpackungen, wie auch Hüllen von VIP.

Grundsätzlich ist die Gefahr von Bahnfehlern bei der Herstellung von Verbundfolien aufgrund der zahlreichen Einzelkomponenten wesentlich größer als bei der Fertigung von Einschichtfolien. Zur Vermeidung von Unregelmäßigkeiten und Produktionsfehlern werden in modernen Produktionsanlagen die Produktionsabläufe so auch die Dicken der Einzelfolien durch Mess- und Regeleinrichtungen kontinuierlich überprüft und nachjustiert.

4.2.2 VIP Hüllfolien

Die heutigen Hochbarrierelaminats von VIP stellen aufgrund der hohen Anforderungen an die Dichtheit, der Langzeitstabilität, der thermischen Wärmeleitfähigkeit und der Kompatibilität zu anderen Bauprodukten (siehe auch Block II) die derzeitige Premiumklasse unter den Verbundfolien dar. Die gängigsten Folienkonzepte bestehen aus drei bis fünf Folienlaminaten. Hierbei sind vorwiegend die innen liegenden Schichten metallisiert, d. h. mit einem Metall wie Aluminium bedampft, oder mit einer hochgasdiffusionsdichten Beschichtung z. B. aus Siliziumoxid (SiO_x) oder Metalloxiden der zweiten oder dritten Hauptgruppe des periodischen Systems versehen.

Schichtenfolie eines Hochbarrierelaminats aus [14]

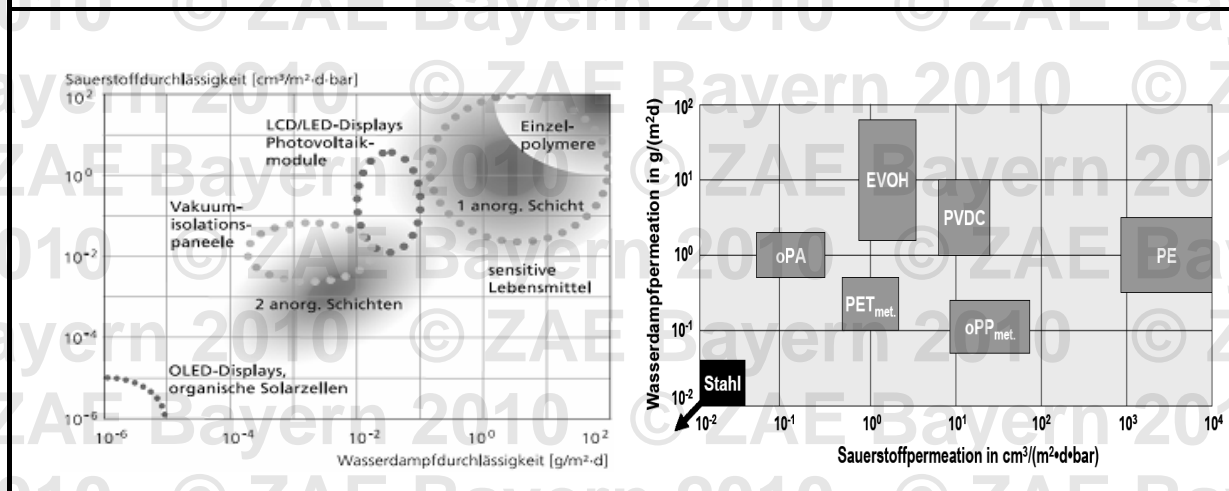


Schicht	Material	Funktion	Dicke [µm]
1	PET	Schutzschicht, Trägerschicht für 2	12
2	Al	Barrierschicht	0,03
3	PUR	Klebstoff	2
4	Al	Barrierschicht	0,03
5	PP	Trägerschicht für 4	18
6	PUR	Klebstoff	2
7	Al	Barrierschicht	0,03
8	PET	Trägerschicht für 7	12
9	PUR	Klebstoff	2
10	PE-LD	Siegelschicht	60

Als Metalloxide für die Beschichtung bzw. Bedampfung kommen vorwiegend Magnesiumoxid, Aluminiumoxid, Kalziumoxid, und Berylliumoxid in Frage [2]. Metallisierte Folien sollten bei der Kaschierung einer nicht zu hohen Dehnung ausgesetzt werden. Sie sollten möglichst faltenfrei aufgewickelt werden. Grund hierfür ist, dass die Folie bei jedem Kaschierschritt eine zusätzliche mechanische und thermische Belastung erfährt, wodurch die Barrierewirkung des vorangegangenen Laminats mehr oder weniger reduziert wird.

So kann die Gesamtpermeation des Folienverbundes nicht durch einfache Addition der Einzelpermeationen bestimmt werden [12] und [13]. Die bekannten Folien lassen sich daher durch Hinzunehmen weiterer, üblicher Diffusions-sperrschichten nicht wesentlich verbessern.

Sauerstoff- und Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener Materialien aus [15]



Die äußerste Schicht eines Hochbarrierelaminats besteht aus einem Substrat, welches die restlichen Komponenten des VIP vor Umwelt- und Umgebungseinflüssen schützen muss. Je nach Randbedingung und Anforderung an das VIP wird Polyester, Polypropylen oder auch Polyethylen verwendet. Als Siegelschicht dient in der Regel ein Polyethylen, bevorzugt Linear Low Density Polyethylen (LLDPE), Polybutylen (PB), Ethylenvinylacetat (EVA), Polypropylen (PP), High Density Polyethylen (HDPE), Ionomere (IO) und Mischungen dieser Stoffe [12] und [13]. Die Dicke der Siegelschichten beträgt zwischen 20 und 100 μm , vorzugsweise 30 bis 60 μm .

Dichtheit - Permeation:

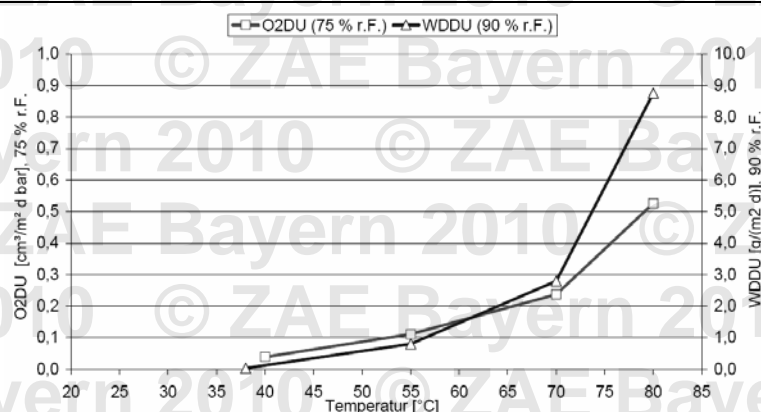
Die Lebenserwartung eines VIP hängt entscheidend von der Dichtigkeit der verwendeten Hülle ab. Einzelne Sperrschichten können von den Gasmolekülen durch mikroskopisch kleine Fehlstellen, so genannten Pinholes, durchdrungen werden. Im Wesentlichen erfolgt der Transport von Gasmolekülen in dem Folienverbund wie aber auch in den Siegelnähten durch Lösungsdiffusion. Dies ist ein Prozess bei dem Gase in den einzelnen Materiallagen

chemisch gelöst und entsprechend dem (Partialdruck-)Gradienten durch die einzelne Schicht, wie auch dann durch das gesamte Laminat getrieben werden. Im Gesamtaufbau einer Vakuumschicht stellt die Siegelnaht eine Schwachstelle dar. Hier fehlen die zusätzlichen Sperrschichten des Verbundaufbaus. Da Wasserdampf weit stärker als die trockenen Komponenten der Luft in den Kunststoffen gelöst wird, ist der Wasserdampftransport gegenüber diesen um mehr als drei Größenordnungen stärker ausgeprägt.

Als stellvertretender Wert für die Permeation von trockenen Komponenten der Luft, von unpolaren Stoffen, steht die *Sauerstoffpermeation*. Die Permeation wird in den Einheiten Volumeneinheit bei Standarddruck ($p = 1.013$ [hPa]) und Standardtemperatur ($T = 298,15$ [K]) - dies steht für eine Gasmenge -, je Fläche Folie, je Tag und je bar Druckdifferenz angegeben. Aufgrund der hohen Anforderung an die Lebensdauer eines VIP werden für die eingesetzten Hochbarrierelamine extrem niedrige Permeationsraten in der Größenordnung $0,005$ [(cm³ Std)/(m² d bar)] gefordert. Die derzeitige Messgrenze für die Sauerstoffdurchlässigkeiten liegt für Standardmessgeräte bei etwa $0,01$ [(cm³ Std)/(m² d bar)]. Herstellerseitig können Permeationsraten bis zu diesem Grenzwert angegeben und im Produktionsprozess entsprechend überwacht werden.

Die Gasdurchlässigkeit nimmt in der Regel mit steigender Temperatur und steigender Luftfeuchtigkeit zu. So steigt nach [12] die Permeationsrate um etwa 5 bis 7 % pro 1 [K] Temperaturerhöhung an:

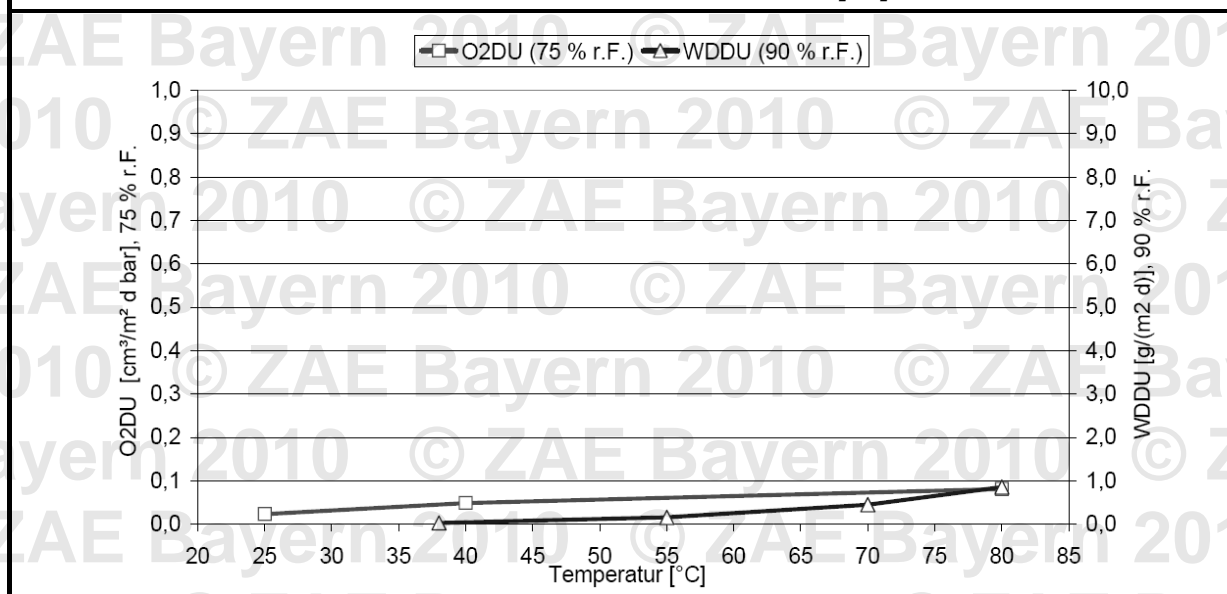
Permeationsanstieg infolge einer Temperaturerhöhung bei einer nicht angepassten VIP-Folie aus [12]



Der zweite entscheidende Kennwert von Hochbarrierelaminaten ist deren *Wasserdampfdurchlässigkeit*. Entsprechend der deutlich größeren Menge wird die Menge nicht mehr als Gasvolumen bei Standardbedingungen sondern als Masse in Gramm je Folienfläche und Tag angegeben. Die Wasserdampfdurchlässigkeit von den speziellen Hochbarrierelaminaten beträgt typischerweise bei 38 [°C] sowie 90 % [r. H.] weniger als 0,05 [g/(m²d)]. Auch hier ist die Angabe von Temperatur und Luftfeuchtigkeit wichtig, da die Wasserdampfdurchlässigkeit von Hochbarrierefolien temperatur- und feuchteabhängig ist.

Im Jahresverlauf sind VIP im Bauwesen großen Temperatur- und Feuchte-schwankungen ausgesetzt. Nur die Kombination aus guten Sperrwirkungen gegen die trockenen Komponenten der Luft, wie auch gegen die von Wasserdampf ergibt eine ausreichend gute Gesamtbarriere. Durch die richtige Wahl und Optimierung der Einzelfolien kann die Permeation auch bei höheren Temperaturen gering gehalten werden.

**Optimierte Barrierefolien für den Baubereich
hier: Covexx BE M DL 165 B2 aus [12]**



Die Weiterentwicklung und Optimierung von Hochbarrierelaminaten wird derzeit durch die nach unten begrenzte Empfindlichkeit der zur Verfügung stehenden Messgeräte zur Bestimmung der Durchlässigkeiten eingeschränkt

[12]. Neben der Problematik, dass selbst bei geringen Abweichungen der Umgebungs- und Randbedingungen die Messergebnisse entscheidend beeinflusst werden, spielt die Weiterentwicklung der derzeit verfügbaren Messgeräte eine wichtige Rolle.

Mechanische Eigenschaften:

Bei den mechanischen Eigenschaften ist, neben einer guten Verbundhaftung der einzelnen Lagen, eine qualitativ hochwertige Siegelnaht erforderlich. Neben der Erfahrung des Verarbeiters ist die Wahl der Siegelschicht entscheidend. Um produktionsbedingt eine erhöhte Permeation zu vermeiden, ist darauf zu achten, dass sich zu keinem Zeitpunkt Verunreinigungen wie z. B. Körner in der Siegelnaht befinden. Allerdings sollte die Siegelschicht auch in einem breitem Temperatur/Druck und Zeit-Fenster siegelfähig sein [12]. Weiterhin sollte das Hüllmaterial eine ausreichende Durchstoßfestigkeit aufweisen, um den hohen Anforderungen für den Einsatz im Bauwesen standzuhalten (siehe Block II).

Stoffresistenz:

Da im Baubereich auch stark alkalische Bauprodukte verwendet werden, ist insbesondere die Naht/Schnittkante der Folie als empfindlichste Stelle zu werten und entsprechend auszubilden. Gelangt beispielsweise Zement in den Schnittbereich der Folie, kann sich die metallisierte Schicht auflösen, was zu einer Delamination und somit zu einem verfrühten Ausfall der Folie führt [12]. Wie die bisherigen Erfahrungen am Bau gezeigt haben kann die Naht/Schnittkante der Folie durch ein einfaches Umkleben der Schnittkanten ausreichend geschützt werden. Grundsätzlich muss für den Einsatz von VIP die Verträglichkeit mit den verwendeten Baumaterialien (Klebern, Putz) sichergestellt werden. Dies ist derzeit ausschließlich durch eine intensive Kommunikation zwischen Anwender, VIP-Produzent und Folien-Lieferant realisierbar.

4.2.3 Vor- und Nachteile von Foliensystemen

Aluminium-Verbundfolien:

Speziell für den Einsatz in VIP entwickelte Aluminiumverbundfolien haben typischerweise Schichtdicken von etwa 7 bis 12 [μm] bei einer extrem hohen Sperrwirkung. Auf der Außenseite einer Aluminiumfolie ist eine Schicht eines Basispolymeres angebracht. Dieses übernimmt den Schutz der empfindlichen Aluminiumverbundfolie und stellt die Schnittstelle zur Umgebung dar. Je nach Art des Basispolymeres sind damit unterschiedliche chemische und physikalische äußere Beanspruchungen denkbar. Die Basismaterialien sind relativ günstig und als Verbundfoliensysteme bei Chemikalien- oder Kaffeeverpackungen bereits bekannt und gut verfügbar.

Trotz ihrer geringen Dicken zeigen Aluminiumverbundfolien aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums bei kleiner Paneelgröße immer noch einen ausgeprägten Randeffect, der sich negativ auf die effektive Wärmeleitfähigkeit des VIP auswirkt. Die Korrosionsempfindlichkeit von Aluminium bei saurer Umgebung schränkt den Einsatzbereich dieses Folientyps auf pH neutrale bzw. alkalische Bereiche ein. Darüber hinaus kann Aluminium unter Knickbeanspruchung brechen, was bei unsachgemäßer Handhabung zu einer mechanischen Schädigung der Folie und zu einer Verminderung der Barrierefunktion führt. Bei Schichtdicken von weniger als 12 [μm] entstehen im Aluminium so genannte Pinholes, welche die Barriereeigenschaft der Folie je nach verwendeter Aluminiumlegierung und Herstellung beeinflusst [2], [12].

Reine polymere Folien:

Barrierefolien mit einer rein polymeren Barriere bestehen immer aus mehreren Schichten von Polymeren. Dabei hat jedes Polymere eigene charakteristische Barriereeigenschaften, die je nach Kombination unterschiedliche Barrierepotentiale erschließen. Die Herstellung kann direkt durch Coextrusion oder durch Klebekaschierung von Einzelfolien erfolgen. In der Regel wird ein

Polyurethanklebstoff verwendet, der je nach Zusammensetzung zusätzliche Eigenschaften (chemische Resistenz, mechanische Stabilität, Barrierefunktion) der Verbundfolie verstärken kann. Vorteile von rein polymeren Folien sind neben der optischen Transparenz die hohe Belastbarkeit, insbesondere bei Knickbruch und Durchstich sowie die geringe Wärmeleitfähigkeit. Die Barriereigenschaften von rein polymeren Folien sind, insbesondere bei Gasen wie Sauerstoff, trotz ihrer relativ großen Schichtdicken relativ gering [2].

Permeationsraten verschiedener Hochbarrierefolien aus [12]

COVEXX	Eigenschaften	Siegelung	WVTR¹⁾	OTR²⁾
BE M DL 105	Langlebige VIPs z.B. Kühlschrank	a/a	0,05	0,01
BE M DL 110	Kurzlebige VIPs z.B. Kühlboxen	a/b	0,07	0,05
BE M DL 165	Langlebige VIPs z.B. Haus-Isolierung	a/b	0,03	0,01
BE M DL 165 B2	Langlebige VIPs, Erfüllung der Baustoffklasse B2 z.B. Haus-Isolierung	a/b	0,04	0,01
BE M DL 165 S	Langlebige VIPs, hohe Temperaturstabilität	a/b	0,03	0,01
BE M DL 135 I	Langlebige VIPs, Hohe Anbindung zu EPS-Schaum	a/a	0,04	0,01
AL P 85	Folien mit einer Barrierschicht aus Aluminium z.B.: VIPs in denen der Randeffekt eine untergeordnete Rolle spielt	a/a	n. m.	n. m.

n. m.: nicht messbar, a: VIP Innere-Seite, b: VIP Äußere-Seite

1) WVTR in [g/(m²d)] bei 38 °C, 90 % rel. H.

2) OTR in [cm³/(m²bar d)] bei 23 °C, 0 % rel. H.

Beschichtete / metallisierte Folien:

Bei diesen Folientypen beträgt die Dicke der aufgedampften metallischen oder organischen Schicht nur noch mehrere 10 [nm] und ist somit etwa 200-mal dünner als die oben beschriebener Aluminiumfolien. Die Bedampfung findet in der Regel im Hochvakuum statt und besteht aus Aluminium, Aluminiumoxid oder Siliziumoxid. Der Unterschied der Schichten liegt hauptsächlich

in der Transparenz der Oxidschichten und dem Glanz der Aluminiumschicht;
ansonsten sind die Schichten technologisch vergleichbar.

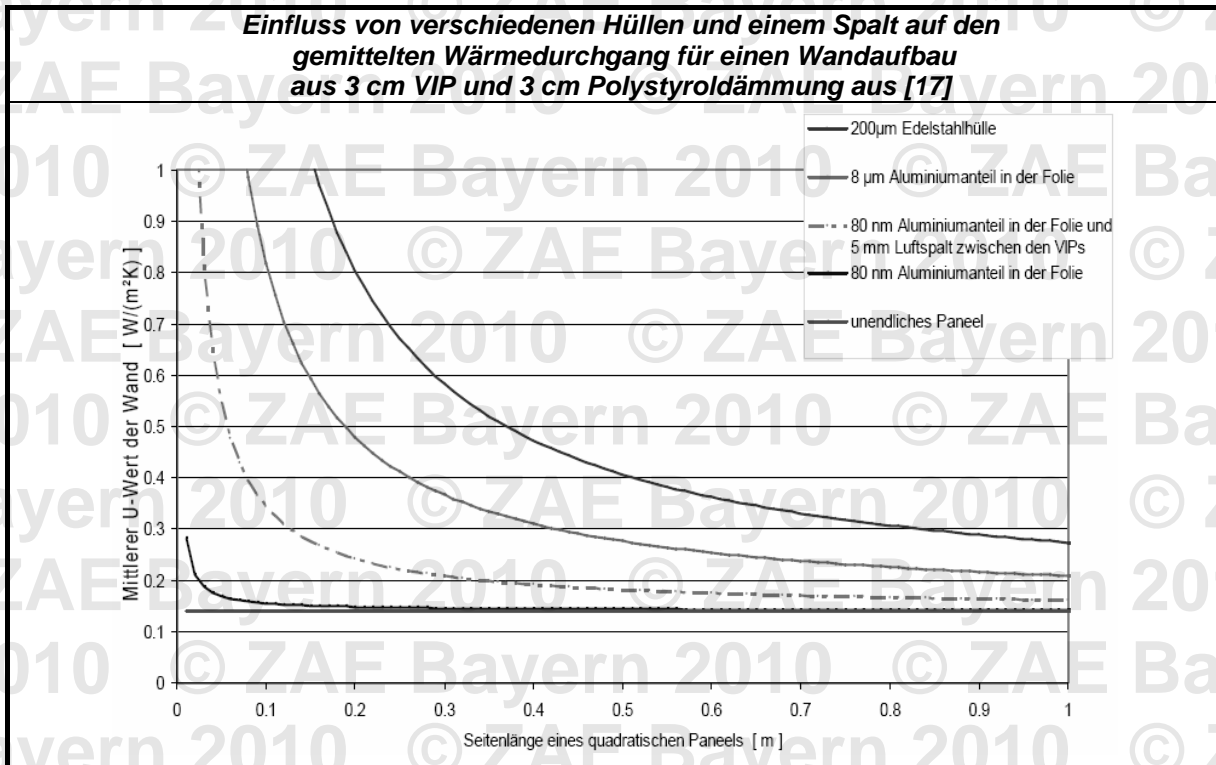
Der größte Vorteil dieser beschichteten mehrlagigen Systeme liegt in ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit, die keinen signifikanten Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit des VIP mehr hat. Nachteilig wirkt sich der hohe technologische Aufwand und das erforderliche Wissen zur Herstellung der Verbundfolien aus, was nicht zuletzt durch patentrechtliche Einschränkungen die am Markt verfügbaren Hersteller überschaubar macht [2]. Vergleichbar mit Aluminium-Verbundfolien sind metallisierte Folien ebenso knickbruchgefährdet und, sofern Aluminium als Bedampfungsschicht eingesetzt wird, korrosionsanfällig.

<i>Anforderung</i>	<i>Aluminium Barriere</i>	<i>Polymere Barriere</i>	<i>Metallisierte Barriere</i>
O ₂ -Sperr	+++	-	++
WD-Sperr	+++	-	++
Festigkeit	+	++	+
Preis	++	-	o
Leitfähigkeit	---	+++	++
Langzeitstabilität	++	+	++
Kompatibilität	o	o	o
Korrosion	o	+	o
Fazit	o	o	+

Der Randverbund [17]:

Aluminium-Verbundfolien werden aufgrund ihrer enorm hohen Dichtigkeit als Barrierefolie von VIP bevorzugt. Es ist zu erwarten, dass weitgehend Pinhole-freie Aluminiumverbundfolien mit Al-Schichtdicken von 7 bis 8 [µm] den mehrlagigen Kunststoffhochbarrierelaminaten mit mehreren nur wenige zig Nanometer „dünnen“ aufgedampften Al-Sperrschichten in Bezug auf die Dichtigkeit überlegen sind. Der zum Teil gravierende Einfluss der Al-Schichtdicke auf die Wärmeleitung der Hülle, aber auch der Fügungsstoß zwischen zwei VIP, zeigt sich auf einen über mehrere Paneele gemittelten Wärmedurchgangskoeffizienten. Die vorhandenen Wärmebrücken führen je nach Größe der VIP zu einem Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit des gesamten VIP. Dieser Randeffect ist umso ausgeprägter, je dicker die Aluminiumschicht und je kleiner das Paneel ist. Selbst bei Paneelen mit 1 m Kantenlänge ist dieser

Effekt beachtlich. Laminate mit einer Schichtdicke von insgesamt nur etwa 80 [nm] sind aus wärmetechnischen Gründen daher vorzuziehen.



Die Permeation durch die Siegelnaht des Randverbundes ist proportional zur Länge der Siegelnaht, zur Dicke der Siegelschicht und zum Permeationsvermögen des Siegelmaterials. Bei Folienverbundmaterialien als Hüllmaterial sind abgerundete Ecken die ideal Form, um starke Belastungen der Folien zu vermeiden. Dennoch wird mittels einer geeigneten Faltechnik ein möglichst rechteckiger Randverbund angestrebt.



Für den thermoplastischen Verschluss des Randverbundes sind grundsätzlich folgende Verfahren geeignet:

- Infrarotschweißen,
- Laserschweißen,
- Ultraschallschweißen,
- kapazitives Hochfrequenzschweißen,
- Induktionsschweißen sowie
- Wärmekontaktschweißen (am häufigsten im Gebrauch).

4.3 Kernmaterialien

4.3.1 Anforderungen

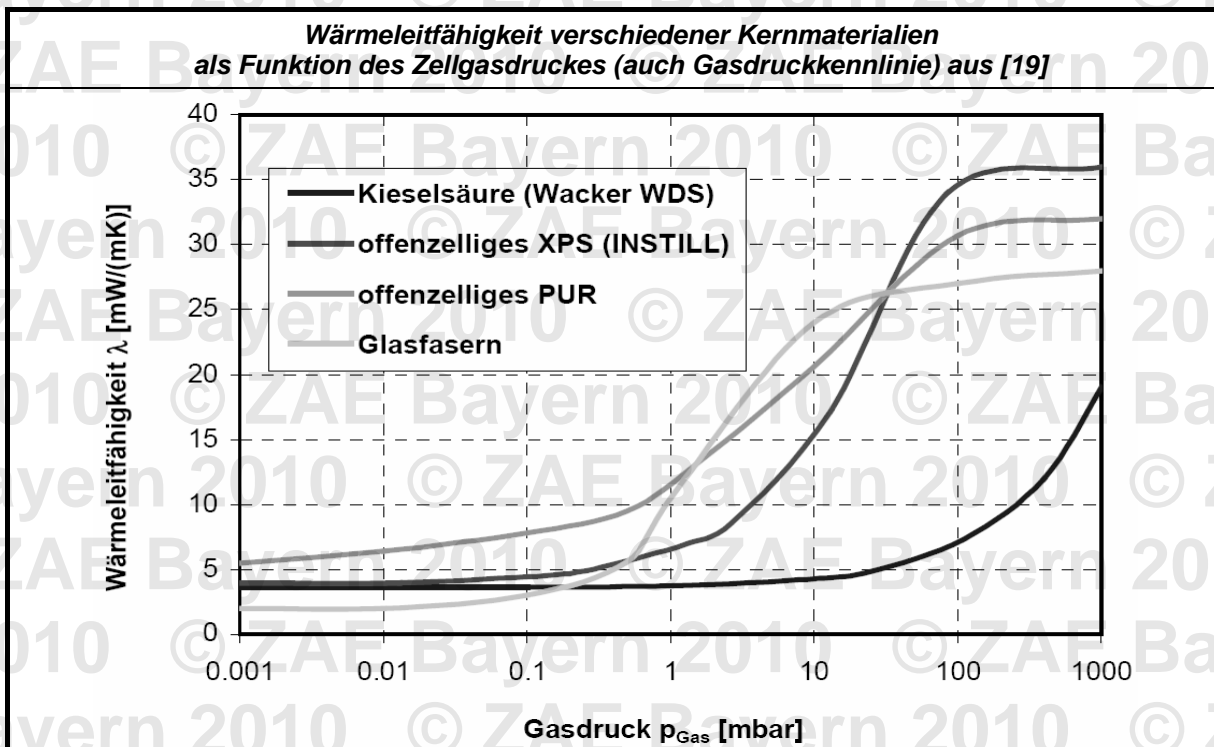
Damit ein Werkstoff als Kernmaterial für VIP in Frage kommt, sollte dieser eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit bei einem möglichst hohen zulässigen Restgasdruck und bei einer ausreichenden Druckstabilität gegenüber dem Atmosphärendruck aufweisen (siehe auch Block II). Hieraus leiten sich definierte Anforderungen an die Offenzelligkeit, die Porengröße, die Druckfestigkeit sowie die Infrarotdurchlässigkeit von VIP-Kernen wie folgt ab:

Offenzelligkeit [1] und [18]:

Zur Sicherstellung der Evakuierung ist ein 100 % offenzelliges Gefüge des Kernmaterials zwingend erforderlich. Bei Schaummaterialien führt dies zu relativ hohen Anforderungen an die Fertigungstechnik. Faser- und Pulvermaterialien sind aufgrund ihrer strukturellen Eigenschaften grundsätzlich offenzellig. Das Restgas und der Restwassergehalt werden durch Erhitzen dem Kernmaterial entzogen. Dieser Vorgang findet je nach Kernmaterial zwischen 70 und 200 [°C] statt und dauert 15 bis 60 Minuten.

Porengröße [1], [19] und [20]:

Die Wärmeleitung eines Kernmaterials wird maßgeblich über die Porengröße bestimmt. Ist die druckabhängige mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle in den Poren größer als die Pore, so wird die Wärmeleitung über das Zellgas merklich reduziert. Die mittlere freie Weglänge ist die durchschnittliche Weglänge, die ein Teilchen (z. B. Atom, Molekül, Ion oder Elektron) ohne Wechselwirkung mit anderen Teilchen zurücklegt. Unter einer Wechselwirkung wird dabei jede Art von Energie- bzw. Impulsänderung des Teilchens verstanden. Innendruck und Porengröße des Kernmaterials sind die maßgeblichen Kenngrößen zur Auslegung der Wärmeleitfähigkeit eines VIP. Somit spielt das erforderliche Vakuumniveau innerhalb des Produktionsprozesses von VIP, insbesondere aber auch bei den Anforderungen an die Dichtigkeit der Hülle eine Schlüsselrolle. Je nach Kernmaterial bewegt sich der zulässige Restgasdruck in den Paneelen in einem Bereich zwischen 0,1 und etwa 20 [mbar] (Grobvakuum). Bei Atmosphärendruck beträgt die mittlere freie Weglänge der Luftmoleküle etwa 70 [nm], bei 1 [mbar] etwa 70 [µm].



Derzeit sind eine Vielzahl von organischen und anorganischen Dämmstoffen mit offenzelligen Strukturen und sehr kleinen Porenradien verfügbar. Die Abbildung oben zeigt, dass mit pyrogener Kieselsäure schon ab einem Grobvakuum von 20 [mbar] Werte von unter 4 [mW/(mK)] erzielt werden können. Auch bei Drücken von 100 [mbar] liegt die Wärmeleitfähigkeit immer noch etwa bei 7 [mW/(mK)], was eine sehr gute Voraussetzung für eine Langzeitstabilität bildet [19]. Aufgrund dieses Merkmals ist die pyrogene Kieselsäure derzeit das meistverwendete Kernmaterial für VIP.

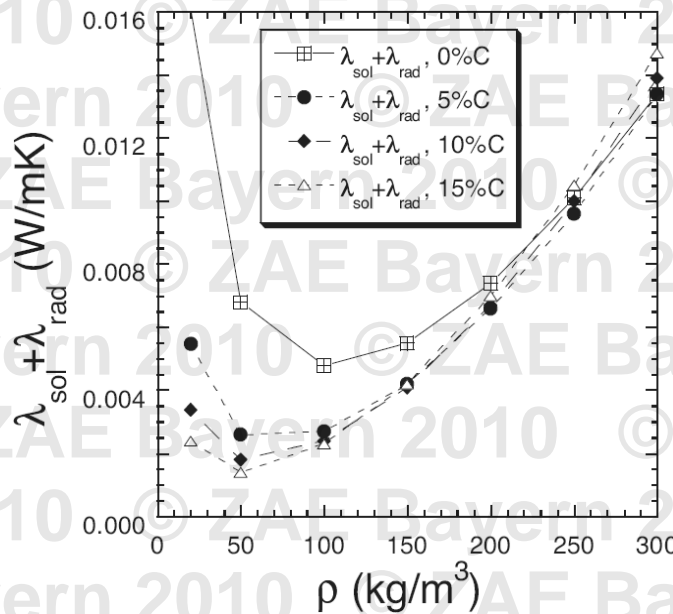
Druckfestigkeit [18]:

Nach einer vollständigen Evakuierung lastet der gesamte Atmosphärendruck von 1 [bar] auf dem VIP - dies entspricht etwa 10 Tonnen pro m². Um dieser Dauerdruckbelastung standzuhalten, muss das Gefüge des Kernmaterials eine entsprechende Steifigkeit aufweisen. Beim Evakuierungsprozess eventuell auftretende Stauchungen und Pressungen müssen beim Zuschnitt der Kerne entsprechend berücksichtigt werden.

Infrarotdurchlässigkeit [1] und [18]:

Entsprechend den Ausführungen in Block III - Bauphysik ist neben der Wärmeleitung des Fluids (hier: Zellgas) und der Wärmeleitung über das Feststoffgerüst auch die Wärmestrahlung eine wichtige Größe der Gesamtwärmeübertragung bei besonders geringen Druckverhältnissen. Insbesondere werden bei VIP mit Kernmaterialien aus Aerogelen oder aus pyrogener Kieselsäure Infrarottrübungsmittel im Verhältnis 1 zu 6 bis 1 zu 3 beigemischt, um den Infrarot-Strahlungstransport zu reduzieren. Zum Einsatz kommen unter anderem Ruß, Eisenoxid, Titanoxid und Siliziumcarbid.

Wärmeleitfähigkeit eines Kernmaterials mit verschiedenen Rohdichten (hier: Aerogel) mit unterschiedlichen Anteilen eines Trübungsmittels aus [1]



Diese Zusätze wirken zwar strahlungsabsorbierend, besitzen allerdings selbst eine hohe Wärmeleitfähigkeit (Siliziumcarbid: $\lambda = 45 \text{ W/(mK)}$). Neben einer gleichmäßigen Verteilung des Trübungsmittels ist daher ein optimales Mischungsverhältnis erforderlich, um die Wärmeübertragung bestmöglich zu reduzieren.

Trocknungsmittel und Getter [1]:

Trocknungsmittel und Getter können durch Bindung verschiedener Gase (v. a. Wasserdampf) den Druckanstieg der evakuierten Bereiche verzögern. So kann der Herstellungsprozess beschleunigt sowie die Lebensdauer des VIP verlängert werden. Kombinierte Trocknungsmittel und Getter werden in der Regel in kleinen tablettenförmigen Containern in solche VIP eingebracht, deren Kernmaterial nur eine geringe Sorptionsfähigkeit besitzen, also nicht auf Kieselsäure basieren. Dort wirken Sie mittelfristig wie eine eingebaute Vakuumpumpe. Die Zusammensetzung des Getters wird nach der Art und Menge der zu absorbierenden Gase gewählt. Die Art und Menge des

Trocknungsmittels hängt dabei ab von der Art und Menge der ausgasenden bzw. von Außen eindringenden Gase. Dies wiederum hängt ab von

- dem Kernmaterial,
- dem Folien- bzw. Hüllentyp,
- der Paneelgröße und
- der geforderten Lebensdauer.

Barium und Lithium kommen für Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid zum Einsatz, hingegen Kalzium-, Kobalt-, oder Bariumoxide werden zur Getterung von Wasserdampf verwendet [1].

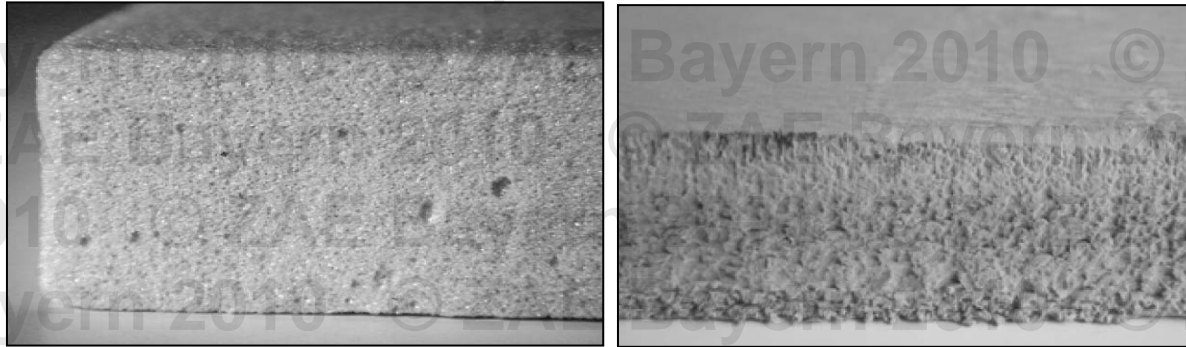
4.3.2 Übersicht der verwendeten Kernmaterialien

Bislang wurden vor allem organische Schäume, Glasfasern, Aerogele sowie Pulver auf Basis von Siliziumdioxid (z. B. pyrogene oder Fällungskieselsäure) als Kernmaterial verwendet. Im Bereich der Forschung und Weiterentwicklung von VIP ist das größte Optimierungspotential derzeit in der Entwicklung alternativer Kernmaterialien zu sehen.

Als Basismaterialien von organischen Schäumen wurden anfänglich extrudiertes Polystyrol sowie Polyurethan verwendet. Entsprechend der Gasdruckkennlinie muss für eine vergleichbar geringe Wärmeleitfähigkeit von organischen Schäumen ein etwa um einen Faktor 100 geringerer Restgasdruck erzeugt und aufrechterhalten werden. Die Schäume müssen vollständig offenporig sein.

links: offenzelliger Polyurethanschaum

rechts: offenzelliger Polystyrolschaum [1]



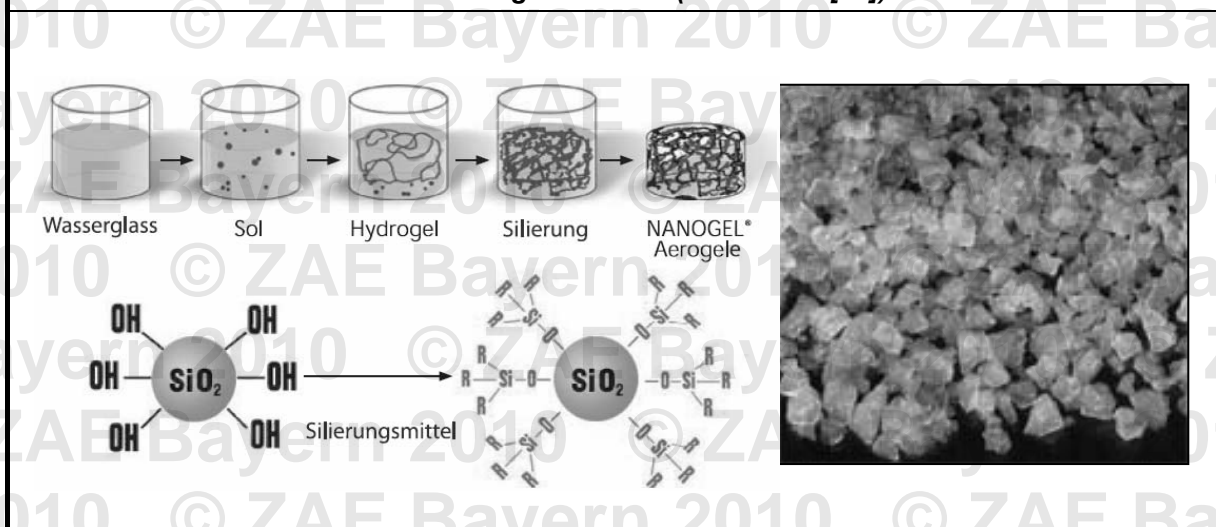
Zudem besteht die Gefahr, dass bei unzureichend langer Lagerung und Vortrocknung der Schäume nach Einbau eine weitere „Ausgasung“ stattfindet. Um die am Bau geforderte Lebensdauer von VIP mit einem Kernmaterial aus Kunststoffschäumen sicherzustellen, müssen grundsätzlich Trocknungsmittel und Getter verwendet werden [1]. Ein großer Vorteil von Kernmaterialien auf Basis von Schäumen besteht jedoch in der sehr geringen Dichte.

Temperaturbehandelte, gepresste und ausgerichtete Glasfasern sind als Kernmaterial von VIP ebenfalls denkbar. Um vergleichbare Wärmeleitfähigkeiten wie bei anderen Kernmaterialien zu erzielen, ergeben sich gemäß der Gasdruckkennlinie für dieses Material gesteigerte Anforderungen an den zulässigen Restgasdruck und somit auch an das Hüllmaterial. Mit evakuierten Glasfasern können jedoch extrem geringe Wärmeleitfähigkeiten von 1,5 bis 3 [mW/(mK)] erzielt werden, welche nach [1] die von jedem anderen Vakuum-Dämmsystem unterschreiten. Aufgrund des zuvor beschriebenen erforderlichen Feinvakuums und der gesteigerten Anfälligkeit von Gaspermeation durch das Barrierelaminat finden VIP aus Glasfasern im Baubereich derzeit keine Anwendung.

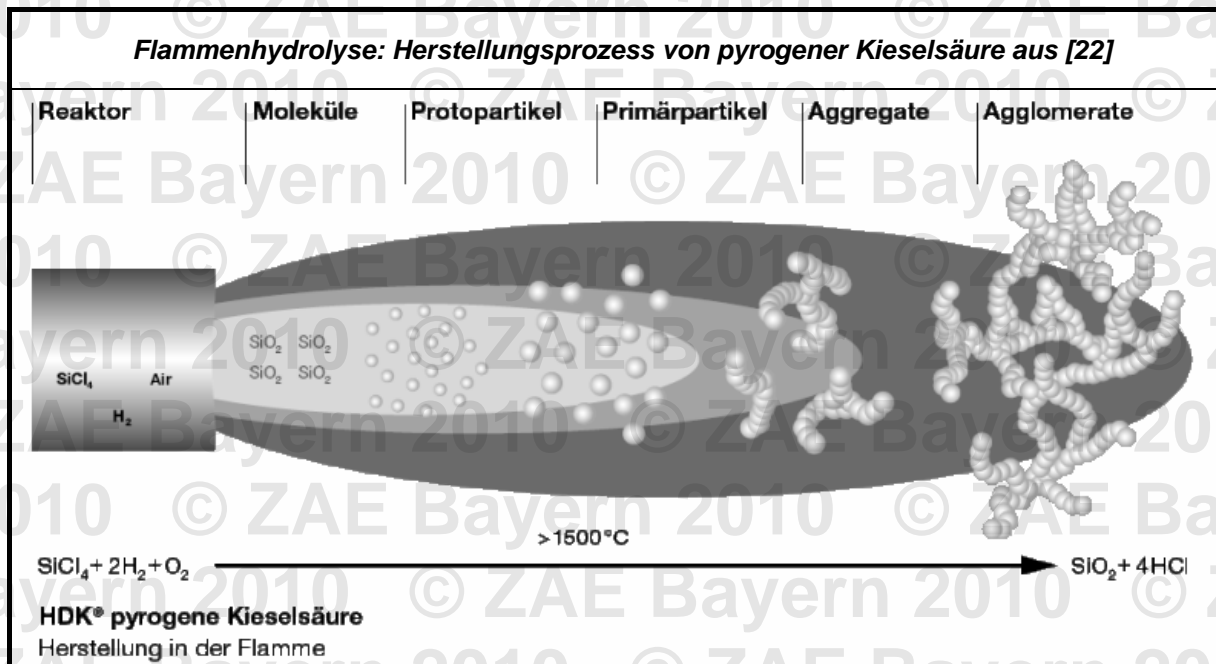
Aerogele sind ebenfalls als Kernmaterial von VIP denkbar und derzeit vor allem als Pulver, Granulate und monolithische Blöcke verfügbar. Silika-Aerogele sind organische Silizium-Verbindungen. Aktuelle Aerogel-Materialien sind nach [21] opak bis transluzent, unbrennbar, umweltfreundlich rezyklierbar, bis 800 [°C] temperaturbeständig, UV-beständig, hydrophob und langzeitstabil. Demnach wären bei Verwendung von geeigneten Hochbarriere-laminaten transluzente VIP möglich.

Aufgrund der extrem hohen Porosität (95 % Luft, 5 % Feststoff) und den nanostrukturierten Poren in der Größenordnung von 20 bis 40 [nm] erreichen Aerogele schon unter Atmosphärendruck Wärmeleitfähigkeiten von 9 bis 12 [mW/(mK)]. Nachteilig wirken sich die verbleibenden Bereiche zwischen den Granulaten aus und stellen damit hohe Anforderungen an den zulässigen Restgasdruck im Kern. Bei einem Restgasdruck von 0,01 [mbar] erzielen Aerogele in Granulatform bis zu 3 [mW/(mK)]. Monolithischen Aerogele scheidet nach [1] derzeit aufgrund des sehr aufwendigen Herstellungsprozesses für die Verwendung von VIP als Kernmaterial aus.

*links: Herstellungsprozess von transluzentem Aerogel
rechts: Aerogel-Granulat (beides aus [21])*

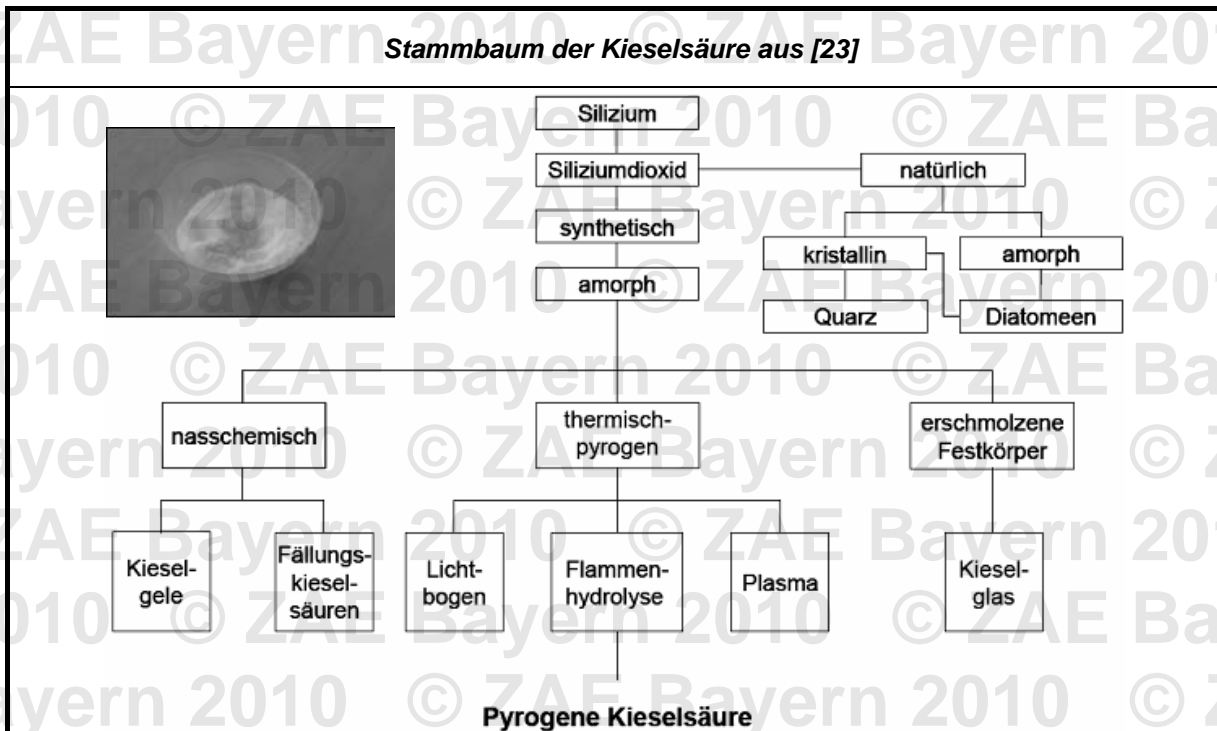


Mikroporöse Kieselsäuren werden aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften derzeit am häufigsten als Kernmaterial von VIP eingesetzt. In der Natur kommen sie als sogenannte Silikate vor und werden als Sauerstoffsäuren des Siliziums bezeichnet. Ähnlich wie Aerogele sind auch Kieselsäuren toxikologisch unbedenklich, emissionsfrei, gut rezyklierbar sowie nicht brennbar. Die Kieselsäuren weisen ein vernachlässigbares Schwindverhalten auf und werden je nach Herstellungsprozess in Fällungskieselsäure und pyrogene Kieselsäure unterschieden. Nanostrukturierte pyrogene Kieselsäure wird durch die Verbrennung von Silane (sog. Flammenhydrolyse) hergestellt und ist ein Nebenprodukt aus der Wafer-Silizium-Produktion:



Die großtechnische Synthese von pyrogener Kieselsäure lässt sich nach [22] im Wesentlichen als kontinuierliche Flammenhydrolyse von Siliciumtetrachlorid (SiCl_4) bei einer Temperatur von etwa $1.500 [^\circ\text{C}]$ beschreiben. Hierbei wird SiCl_4 in die Gasphase übergeführt und reagiert anschließend innerhalb einer Knallgasflamme mit dem intermediär gebildeten Wasser spontan und quantitativ unter Bildung des gewünschten Siliziumdioxids. Unter den Reaktionsbedingungen in der Flamme entstehen zunächst hochviskose Siliziumdioxid-Primärteilchen. Die SiO_2 -Oberfläche dieser Teilchen ist glatt und nicht mikroporös. Diese Primärteilchen verschmelzen in der Flamme fest zu größeren

Einheiten, den so genannten Aggregaten. Beim Abkühlen bilden diese offen strukturierten Aggregate flockige Agglomerate, so genannte Tertiärstrukturen mit einer Größe zwischen 10 und 100 [μm].



Ein Vorteil von pyrogener Kieselsäure besteht im strukturbedingten minimalen Abstand der Porenwände (Größenordnung wenige 100 [nm]). Die Porengröße von Pulverpresslingen aus pyrogener Kieselsäure ist damit in der gleichen Größenordnung wie die mittlere freie Weglänge der Luftmoleküle bei Atmosphärendruck. Daher ist die Wärmeleitfähigkeit selbst bei den nicht-evakuierten Kernen kleiner als die von ruhender Luft. Ein zweiter Vorteil liegt in der hohen Sorptionsfähigkeit des Materials für Wasserdampf [22]. Durch die reaktiv isolierten Silanolgruppen an der gewaltig großen inneren Oberfläche von mehreren hundert Quadratmetern pro Gramm Material können Fremdmoleküle wie beispielsweise Wasser angelagert werden.

Pyrogene Kieselsäure wird durch Mischung von Faser-Filamenten und Trübungsmitteln und anschließender Verpressung zu den eigentlichen Kernplatten aufbereitet. Hierbei ist auf eine vollständige Durchmischung der Komponenten zu achten. Meist werden zur Fertigung nicht nur frisch angelieferte

Materialien, sondern auch wiederaufbereitete und vermahlene Mischungen ehemaliger Stützkörper verwendet.

Die Kieselsäure bietet den Vorteil, dass sie nach Gebrauch als Wärmedämmung zu 100 % recyclebar ist und somit bedenkenlos dem Rohstoffkreislauf zugeführt werden kann. Pyrogene Kieselsäure besteht nach [22] und [23] aus etwa 80 % Siliziumdioxid (SiO_2), aus etwa 15% Siliziumcarbid (SiC) als Trübungsmittel sowie aus etwa 5 % andere Materialien (z. B. Glasfasern).

Stammbaum der Kieselsäure aus [23] [24]

Eigenschaften	Einheit	Pyrogene Kieselsäure	Fällungskieselsäure
Spez. Oberfläche nach BET	m ² /g	50 bis 600	30 bis 800
Primärteilchengröße	nm	5 bis 50	5 bis 100
Aggregat- bzw. Agglomerat-größe	µm	0,1 bis 100	1 bis 40
Dichte	g/cm ³	2,2	1,9 bis 2,1
Stampfvolumen	ml/100 g	1000 bis 2000	200 bis 2000
Trocknungsverlust	%	max. 2,5	3 bis 7
Glühverlust	%	1 bis 3	3 bis 7
pH-Wert		3,6 bis 4,3	5 bis 9
Porendurchmesser	nm	50 - 150 nicht porös bis 300	mind. 30
Struktur der Aggregate und Agglomerate		Kettenförmige Agglomerate	Mäßig aggregierte, nahezu-sphärische Teilchen

Fällungskieselsäure ist mit etwas geringerem Aufwand als pyrogene Kieselsäure herstellbar, allerdings derzeit etwa um einen Faktor von drei gröber strukturiert. Hieraus ergeben sich ungünstigere Eigenschaften als bei pyrogener Kieselsäure mit erhöhten Anforderungen an den zulässigen Restgasdruck. Durch eine Optimierung im Herstellungsprozess könnte das Material zukünftig jedoch für den Einsatz als Kernmaterial für VIP attraktiver werden.

4.4 VIP auf Basis nanostrukturierter Kernmaterialien

In [18] und [23] werden die beiden wichtigsten Produktionsverfahren eines VIP beschrieben. Nach dem Mischprozess der Rohstoffe folgt die Herstellung des Stützkörpers. Beim ersten Verfahren (A) fließt die Mischung in eine Form, in der sie zu einer Platte mit vorgegebener Höhe gepresst wird. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, die gepresste Grundplatte auf beliebige Plattenformate zurechtzuschneiden. Dies ist wiederum der Nachteil des zweiten Verfahrens (B). Hier wird das Schüttmaterial direkt in eine so genannte "Bag" gefüllt und anschließend verpresst. Somit wird für jede Plattengröße eine spezielle Pressform benötigt, was die Flexibilität im Fertigungsprozess einschränkt.

Im Wesentlichen entspricht die Herstellung der Vakuum-Dämmplatten der Vakuumverpackungstechnik aus der Lebensmittelindustrie. Die Hauptunterschiede liegen in den Abmessungen der VIP und den gesteigerten Anforderungen an den zulässigen Restgasdruck. Zur Reduktion der Abpumpzeit werden das Restgas und das Restwasser im Kernmaterial unmittelbar vor der Weiterverarbeitung durch Trocknung reduziert. Hierbei wird das Halbzeug in einem weiteren Prozessschritt zwischen 80 und 120 Minuten in einem Durchlaufofen auf etwa 130 [°C] erhitzt und der Feuchtegehalt auf mindestens 0,5 % reduziert.

Zur besseren Handhabung werden die nach Verfahren A hergestellten Platten vor dem Evakuierungsprozess in eine Polyethylenfolie eingeschrumpft - nach Verfahren B befindet sich die Kieselsäure bereits in einem Vliesbag. Beide Verpackungsarten sind offenporig und stellen während der Evakuierung kein Hindernis für die aus dem Stützkörper abzusaugenden Gasmoleküle dar. Zum Schutz des Kerns und zur dauerhaften Evakuierung werden die Stützkörper in vorgefertigte Dreirand-Siegelbeutel geschoben. Diese mehrschichtige Hüllfolie wird aus speziellen Hochbarrierelaminaten mit Aluminium- oder metallisierten Kunststoffschichten gefertigt.

Die Evakuierung des VIP erfolgt grundsätzlich in einer Vakuumkammer, deren Größe die maximalen Abmessungen des VIP bestimmt. Nach der Evakuierung wird die verbleibende offene Seite in der Vakuumkammer mit Hilfe eines eingebauten Schweißbalkens geschlossen.

Herstellung eines VIP in Anlehnung an [23]

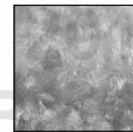
Kieselsäure



IR-Trübungsmittel



Faser-Filamente



Mischen



Pressen

Pulver zu Platte gepresst:
Dichte 160 - 220 kg/m³

Verfahren I

Einfüllen in Presswerkzeug

Pressen einer Grundplatte

Konfektionieren

Einschrumpfen in PE



Trocknen im Durchlaufofen

PP-Vlies als Partikelschutz

Verpacken in Barrierefolie
und Evakuierung

Verfahren II

Einfüllen in Bags

Pressen auf Endmaß in
Endmaßwerkzeug



Literaturverzeichnis

- [1] J. Cremers: Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle, 2006
- [2] S. Jacobsen: Hochbarrierefolien für Vakuum-Isolationspaneele - eine Übersicht, 2003
- [3] IfB Sorge GmbH: unveröffentlicht
- [4] J. Nentwig: Kunststoff-Folien: Herstellung - Eigenschaften - Anwendung, 2006
- [5] Nabenhauer R.: Verpackungslexikon: Fachbegriffe und Anwendungsbeispiele von Experten erklärt, 2009
- [6] F. Peters, C. Ruppel: Ruhr-Universität Bochum; Strömungsmechanische Untersuchung der Blasfolienextrusion
- [7] IVV Fraunhofer: Jahresbericht 2006/2007
- [8] Bischof + Klein GmbH & Co. KG, 2009
- [9] StaniPac AG, 2009
- [10] DirectIndustry, 2009
- [11] Qingdao Royal Machinery Co., 2009

- [12] D. Kaczmarek, Wipak Walsrode GmbH & Co. KG: Barrierefolien für Vakuumisolationspaneele im Bauwesen, 2005
- [13] D. Kaczmarek, S. Jacobsen: Europäische Patentanmeldung für Folienlaminat mit wenigstens einer Diffusionssperrschicht und deren Verwendung bei Vakuumisolationspaneelen, 2005
- [14] 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
- [15] IVV Fraunhofer: Jahresbericht 2005/2006
- [16] Levebre, G.: VIP packaging materials and technologie, in: High Performance Thermal Insulation Systems - Vacuum Insulated Products, Proceedings of the International Conference and Workshop, pages 37 - 46, EMPA Duebendorf, January 22th - 24th, 2002
- [17] U. Heinemann: Wesen, Potentiale und Besonderheiten von Vakuumisolationspaneelen, 2005
- [18] Dr. Eicher+Pauli AG: Hochleistungs-Wärmedämmung HLWD; Schlussbericht, 2000
- [19] A. Binz, M. Erb, Hp. Eicher, H. Simmler, K. Ghazi Wakili: Vakuumdämmung im Baubereich, 2002
- [20] D. Hänel: Molekulare Gasdynamik; 2004
- [21] Herstellerangaben der Cabot Corporation, 2009

[22] Wacker Chemie AG, 2009

[23] H. Eberhardt: Vom Pulver zur Paneele - Wie entsteht ein VIP?, 2005

[24] Beck, A., Binder, M.: Wärme- und Feuchtetransport in Vakuuisolationspaneelen, Bauphysik 30, Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2008

