

Vom Pulver zur Paneele – Wie entsteht ein VIP ?

Hans-Frieder Eberhardt, Porextherm Dämmstoffe GmbH

1 Rohstoffe, Eigenschaften und physikalische Grundlagen

Basierend auf Siliziumdioxid (SiO_2) stellt die Firma Porextherm Dämmstoffe GmbH ihr Produkt Vacupor® - eine Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) mit ausgezeichneten Wärmedämmeigenschaften – her.

Silizium ist mit 27,8 Gew.-% das nach dem Sauerstoff (46,6 Gew.-%) zweithäufigste Element der 17 km mächtigen Erdkruste. In der Natur ist Silizium fast immer mit Sauerstoff verbunden, und zwar entweder nur mit Sauerstoff als SiO_2 , oder, wie in den Silikaten, mit weiteren Elementen.

Die natürlichen Silikate bilden die Rohstoffbasis für wichtige technische Produkte wie Zement, Glas, Porzellan, Ziegel, usw.

Das Siliziumdioxidbeeinflusst in der Natur das Wachstum einiger Pflanzen und deren Resistenz gegen Pilze und Insekten. Gelöste Kieselsäure ist z.B. auch im Trinkwasser oder Bier (aus der Gerste stammend) enthalten; von Menschen und Tieren wird sie daher mit der natürlichen Nahrung in erheblichen Mengen aufgenommen.

Neben dem natürlichen Vorkommen können Kieselsäuren auch synthetisch hergestellt werden.

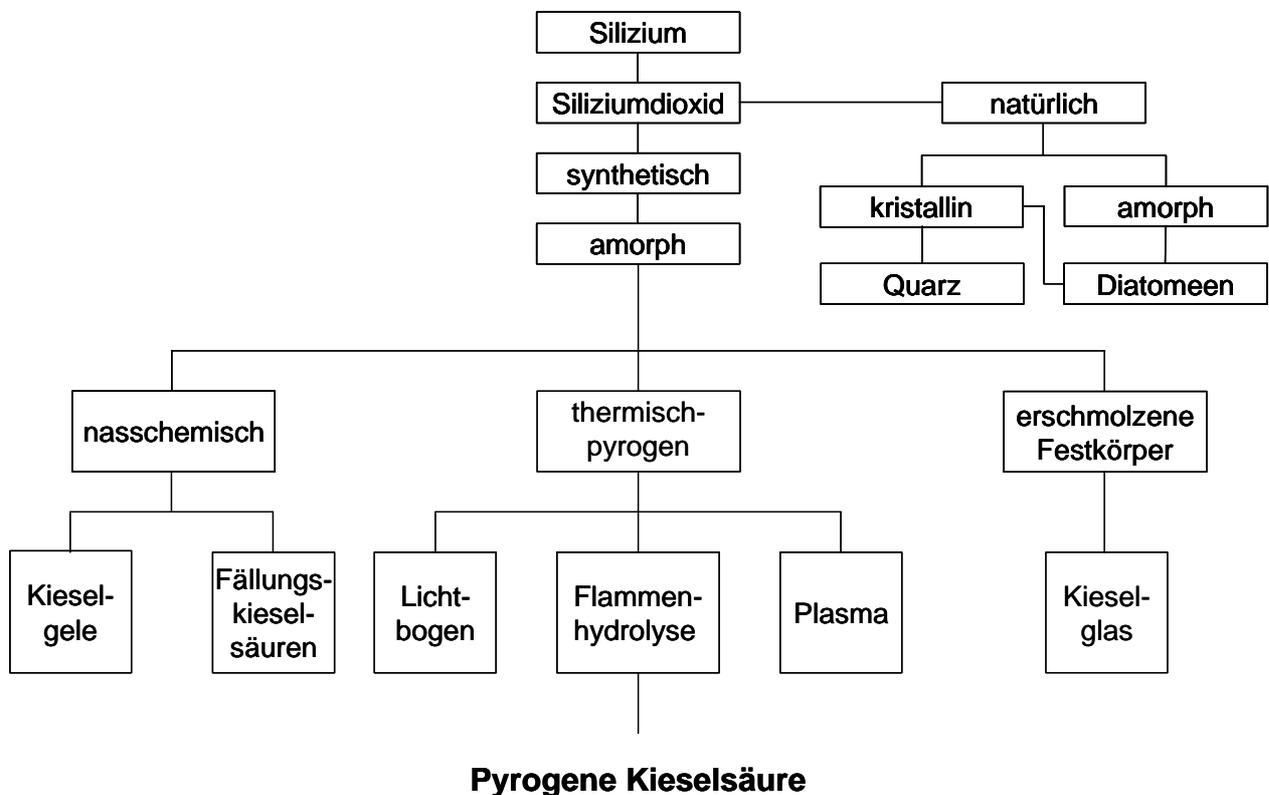
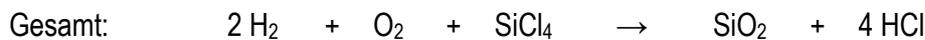


Abb. 1:

Kieselsäure-Stammbaum

Synthetische Kieselsäuren sind heute fest verwurzelte Bestandteile oder Rohstoffe für vielfältige hochtechnisierte Produkte. In der westlichen Hemisphäre wurden 1990 schätzungsweise 1.000.000 Tonnen pro Jahr hergestellt.

Die großtechnische Synthese von pyrogener Kieselsäure lässt sich im wesentlichen als kontinuierliche Flammenhydrolyse von Siliciumtetrachlorid (SiCl_4) bei einer Temperatur von ca. 1200°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 Siliciumdioxids.



Unter den Reaktionsbedingungen in der Flamme entstehen zunächst hochviskose Siliciumdioxid-Primärteilchen. Ihre Größenordnung liegt bei ca. $5 - 50 \text{ nm}$ (10^{-9} m). 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. Die Größenordnung dieser Partikel liegt im Bereich von 100 bis 500 nm . Beim Abkühlen bilden diese Aggregate flockige Agglomerate, so genannte Tertiärstrukturen. Die Größe dieser Agglomerate liegt im Bereich von $10 - 100 \mu\text{m}$ (10^{-6} m). Aggregate sind offen strukturiert und daher makroporös. Die große zugängliche Oberfläche der Aggregate und Agglomerate führt zu einer hohen spezifischen Oberfläche nach BET (S. Brunauer – P. H. Emmett – E. Teller; Vorschrift zur Bestimmung der Oberfläche eines Adsorbens).

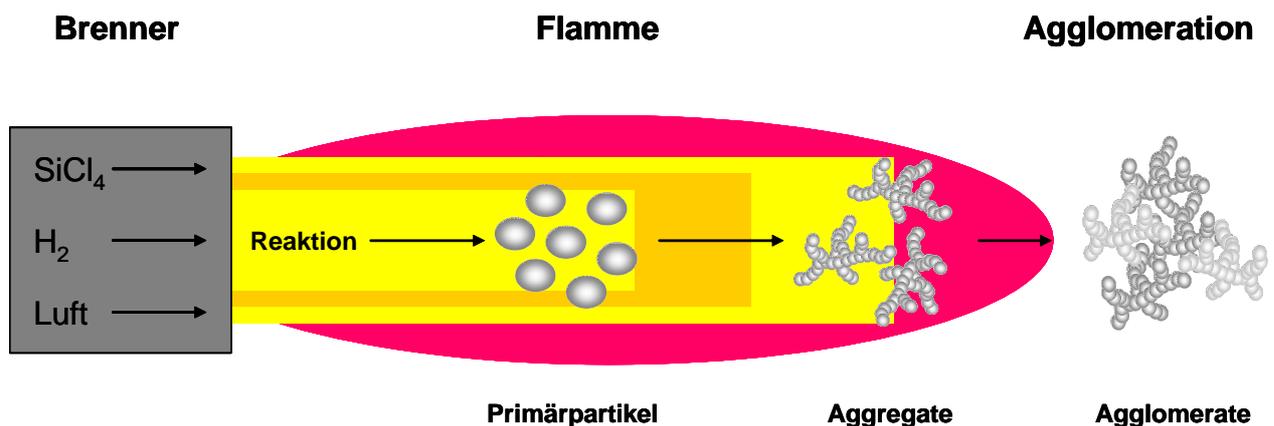


Abb. 2: Entstehungsprozess der pyrogenen Kieselsäure

Neben den verschiedenen Typen der pyrogenen Kieselsäure finden auch die aus dem nasschemischen Verfahren gewonnenen Fällungskieselsäuren Anwendung in der Herstellung von Wärmedämmprodukten. Allerdings zeigt ein Vergleich der wichtigsten Eigenschaften schon erhebliche Unterschiede.

Tabelle 1: Vergleich der wichtigsten Eigenschaften synthetischer Kieselsäuren

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. Agglomeratgröße	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	%	≤ 2,5	3 bis 7
Glühverlust	%	1 bis 3	3 bis 7
pH-Wert		3,6 bis 4,3	5 bis 9
Porendurchmesser	nm	nicht porös bis ca. 300 m ²	≥ 30
Struktur der Aggregate und Agglomerate		Kettenförmige Agglomerate	Mäßig aggregierte, nahezu sphärische Teilchen

Basierend auf den unterschiedlichen Strukturen der Aggregate und Agglomerate der pyrogenen Kieselsäure und der Fällungskieselsäure werden auch unterschiedlichste Verfahren benötigt, um aus dem pulverförmigen Rohmaterial eine handhabbare Wärmedämmplatte herzustellen.

Ist es bei den Fällungskieselsäuren nötig, aufgrund deren sphärischer Struktur das Material in vorformatierte Vliesbeutel einzufüllen und anschließend in speziell den Formaten angepassten Formen zu Plattenkörpern zu verpressen, so ist es bei den pyrogenen Kieselsäuren möglich, eine formatunabhängige Grundplatte zu pressen, aus welcher dann sofort nach dem Pressvorgang oder zu einem späteren Zeitpunkt die entsprechenden Formate des Kundenauftrages herausgesägt werden. Grund dafür ist die kettenförmige Struktur der Agglomerate, welche sich während des Pressprozesses in einander verhaken und so eine stabilisierende Wirkung auf die gesamte Platte ausüben.

Vor dem Pressvorgang werden üblicherweise drei Materialien in einem bestimmten Verhältnis zueinander vermischt, nämlich eine pyrogene Kieselsäure, eine Infrarotstrahlung absorbierende Komponente sowie Faser-Filamente. Die Filamente sind ebenfalls Struktur bildende und Stabilität gebende Elemente, welche zur Festigkeit und Handhabung der gepressten Platten wesentlich beitragen.



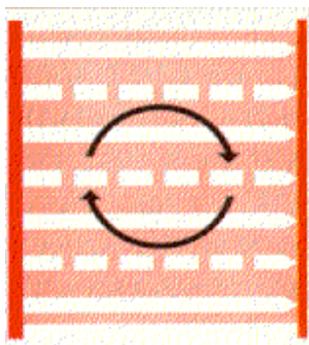
Bild 1: Komponenten einer Standardmischung für Wärmedämmplatten

Diese Wahl der Materialien hat natürlich etwas mit dem physikalischen Phänomen der Wärmeübertragung zu tun. Wärme wird durch Konvektion, Festkörperleitung und Strahlung transportiert. Nun besteht die pyrogene Kieselsäure aus winzig kleinen Kügelchen mit einem Durchmesser von 5 bis

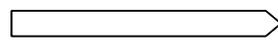
50 nm. Zwischen den einzelnen Kieselsäure Teilchen gibt es somit nur wenige punktförmige Berührungen, so dass dadurch die Wärmeübertragung durch die Festkörperleitfähigkeit minimal gehalten wird.

Beim Pressen der pyrogenen Kieselsäure wird ein mikrozelluläres Gefüge gebildet. Es entstehen winzige Porenstrukturen mit einem Durchmesser im Bereich der mittleren freien Weglänge von Gasen. Durch dieses quasi „Einsperren“ der Gasmoleküle wird die Übertragung der Wärme durch Konvektion minimiert.

Normalerweise steigt die Wärmeleitfähigkeit bei den meisten Wärmedämmstoffen mit höheren Temperaturen aufgrund der zunehmenden Wärmeübertragung durch Strahlung steil an. Aus diesem Grund wird in die Materialmischung eine Infrarotabsorbierende Komponente integriert, um die IR-Durchlässigkeit deutlich zu verringern und damit die Wärmeübertragung durch Strahlung zu minimieren.



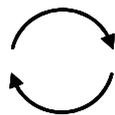
Ungehinderte Wärmeübertragung ohne Wärmedämmung



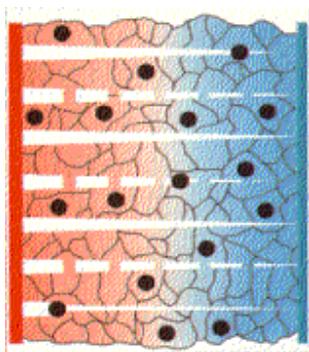
Festkörperleitung



Infrarot-Strahlung



Konvektion



Funktionsweise der Wärmedämmung



IR-Trübungsmittel



Struktur der pyrogenen Kieselsäure

Abb. 3: Wirkprinzip der Wärmedämmung auf Basis der Standard-Materialmischung

Nachdem nun der so genannte Stützkörper bereits mit einem Wärmeleitfähigkeitswert von 18 – 20 mW/(m×K) bei Raumtemperatur eine sehr gute Wärmedämmeigenschaft besitzt, kann diese durch den Prozess des Evakuierens noch um einen Faktor 4 – 5 verbessert werden. Dabei wird der Anteil der durch Konvektion verursachten Wärmeübertragung durch das „Absaugen“ der Gasmoleküle signifikant reduziert.

Im Vergleich mit herkömmlichen, in der Bauindustrie eingesetzten Wärmedämmmaterialien wie Mineralwolle oder extrudiertem Polystyrol stellt man fest, dass eine nicht evakuierte Platte mit pyrogener Kieselsäure zur Erreichung des selben U-Wertes in der Dicke um einen Faktor 1,8 bis 2,8 reduziert werden kann. Wird die Platte durch den Vorgang des Evakuierens zu einer Vakuum-Isolations-Paneele weiter veredelt, so kann die Plattenstärke sogar um einen Faktor 8 bis 12,5 vermindert werden. Diese

Minimierung in der Wärmedämmstärke erlaubt es, viele architektonische und energiespezifische Problemstellungen geschickt zu lösen.

Wärmeleitfähigkeit verschiedener Wärmedämmstoffe

(Anfangszustand)

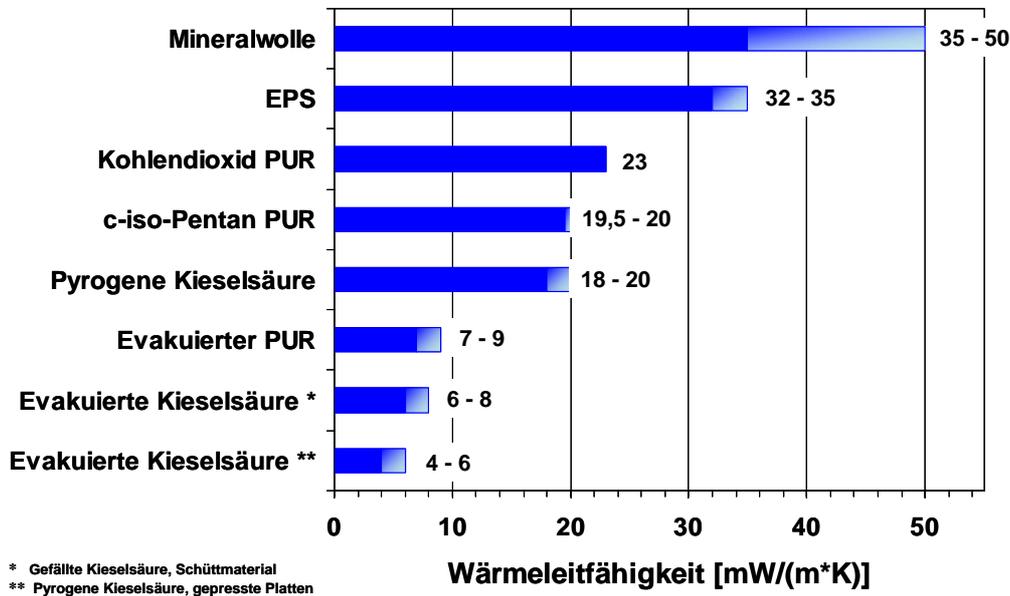


Diagramm 1: Vergleich der Wärmeleitfähigkeitswerte verschiedener Wärmedämmmaterialien im Anfangszustand

Grundsätzlich sind alle offenzelligen Materialien geeignet, evakuiert zu werden. Derzeit sind hauptsächlich Schäume, mikroporöse Materialien und Faserwerkstoffe in der Anwendung. Aufgrund der verschiedenen Porengrößen sind unterschiedliche Vakuumbereiche notwendig, um die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle so zu reduzieren, dass die Wärmeübertragung durch Konvektion minimiert ist.

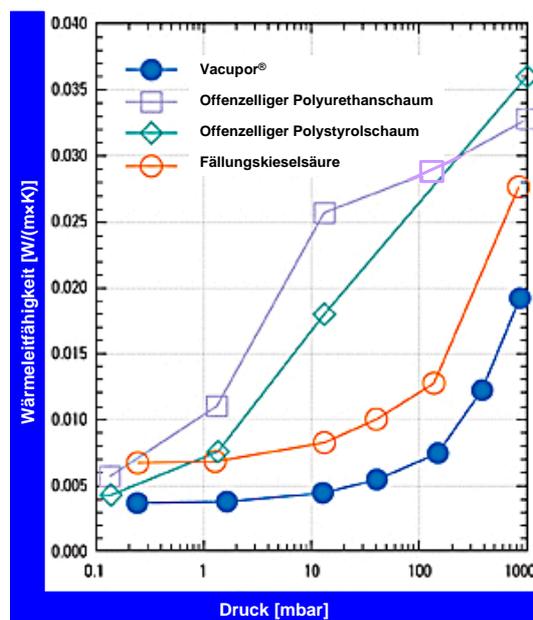


Diagramm 2: Wärmeleitfähigkeit vs. Druck für verschiedene Materialien

Aufgrund der Tatsache, dass die hocheffizienten Barrierefolien der Vakuum-Isolations-Paneele immer noch eine gewisse Restpermeation von Wasserdampf und Sauerstoff durch die Folie selbst sowie durch die Siegelnähte besitzen, werden bei Schäumen und Fasermaterialien so genannte Getter eingesetzt. Diese Getter sind dazu da, eindiffundierende Gase zu „fangen“ und so den Druck in den evakuierten Paneelen möglichst konstant zu halten. Kieselsäuren dagegen haben die Fähigkeit, Wasserdampf zu absorbieren und so den Einfluss auf einen möglichen Druckanstieg zu unterbinden. Allerdings hat die dann aufgenommene Feuchtigkeit einen gewissen negativen Effekt hinsichtlich der Festkörperleitfähigkeit des mikroporösen Kernmaterials.

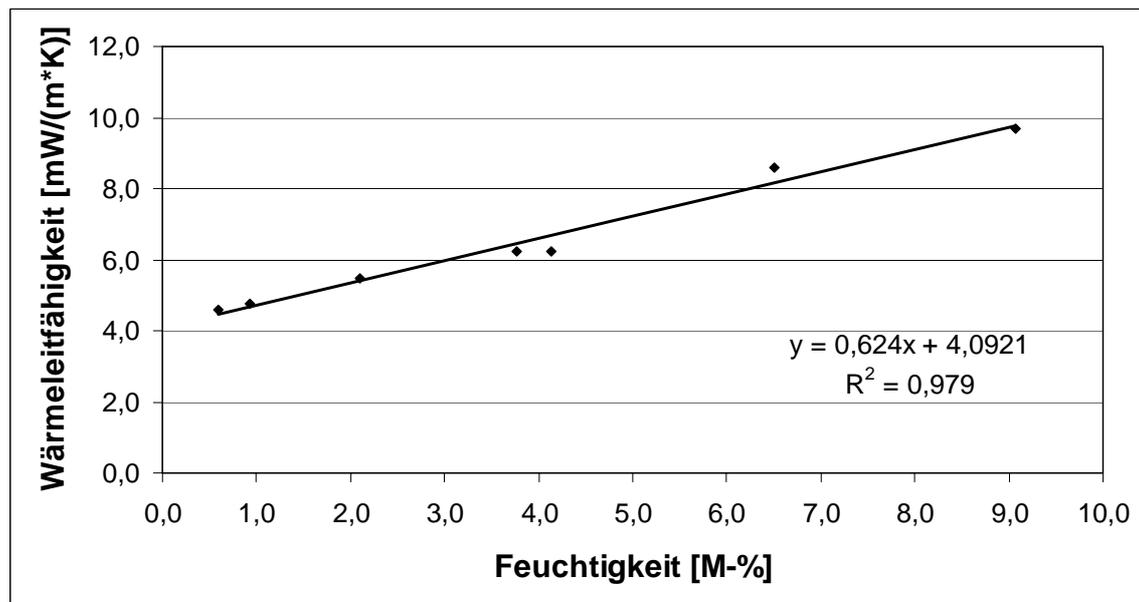


Diagramm 3: Einfluss der absorbierten Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit einer pyrogenen Kieselsäure

Aus dem in Diagramm 3 gezeigten Verhalten der Kieselsäure kann es bei entsprechender Fertigung oder Lagerung gepresster Stützkörperplatten notwendig sein, dass diese vor dem Prozess des Evakuierens in einem Durchlaufofen getrocknet werden, um den Feuchtgehalt und damit die Wärmeleitfähigkeit des Stützkörpers zu reduzieren.

2 Herstellung einer Vakuum-Isolations-Paneele auf Basis mikroporöser Materialien

Schon zu Beginn der Fertigung eines VIPs auf Basis mikroporöser Materialien steht ein enorm wichtiger Prozessschritt, nämlich das Mischen der Komponenten. Es ist dabei darauf zu achten, dass sich die verschiedenen Bestandteile vollständig durchmischen und so eine homogene Gesamtmischung als Resultat entsteht. Meist werden zur Herstellung der Mischung nicht nur „jungfräuliche“ Komponenten, d.h. frisch angelieferte Materialien, sondern auch wiederaufbereitete und vermahlene Mischungen ehemaliger Stützkörper verwendet. Einer der größten Vorteile eines Stützkörpers auf Basis einer Kieselsäure ist, dass er nach seinem Gebrauch als Wärmedämmung zu 100 % recyclingfähig ist und so dem Rohstoffkreislauf wieder bedenkenlos zugeführt werden kann.

Nach dem Prozess des Mischens erfolgt die Herstellung des Stützkörpers, wobei es hier zwei verschiedene Varianten gibt. Möglichkeit eins ist, die Mischung in eine Form „fließen“ zu lassen und in dieser eine Platte mit vorgegebener Höhe zu pressen. Vorteil hierbei ist, dass sich dieses Verfahren als

sehr flexibel darstellt, denn aus der gepressten Grundplatte lassen sich danach verschiedenartigste Plattenformate konfektionieren. Genau diese Tatsache stellt den Schwachpunkt des Verfahrens zwei dar, bei welchem das mikroporöse Schüttmaterial in einen so genannten „Bag“ gefüllt und in diesem in einer bereits dem Endformat der Platte entsprechenden Werkzeugform gepresst wird. Dies bedeutet letztendlich, dass für jede Plattengröße eine separate Pressform benötigt wird. Flexibilität in punkto Formate bleibt dabei mit Sicherheit auf der Strecke sofern man nicht gewillt ist, durch einen immensen Einsatz von Geldmitteln für eine Vielzahl von Pressformen zu sorgen.

Sobald die Endformate vorliegen, kann es aufgrund der bereits beschriebenen Fähigkeit der Kieselsäure Feuchtigkeit aufzunehmen notwendig sein, einen zusätzlichen Prozessschritt, nämlich den des Trocknens der Platte, einzuschleichen. Hierbei befinden sich die Stützkörper bei ca. 130°C für eine Dauer in der Größenordnung von 80 bis 120 Minuten in einem Durchlaufofen. Dabei wird die Feuchtigkeit auf einen Gehalt von kleiner 0,5 % reduziert.

Befindet sich die Kieselsäure nach dem Herstellungsverfahren zwei bereits in einem Vlies-Bag, so muss die gepresste Platte aus Verfahren eins zur besseren Handhabung noch vor dem Evakuierprozess in eine Polyethylenfolie eingeschumpft werden. Beide Verpackungsarten sind perforiert und stellen deshalb während der Evakuierung kein Hindernis für die aus dem Stützkörper abzusaugenden Gasmoleküle dar.

Die nun so vorliegenden Stützkörper werden üblicherweise in vorgefertigte Dreirand-Siegelbeutel, welche aus speziellen Barrierefolien mit Aluminium- oder metallisierten Kunststoffschichten gefertigt sind, geschoben und anschließend in speziellen Kammern evakuiert. Dort wird auch die bis zuletzt offene Seite des Beutels vakuumdicht versiegelt.

Dies war der letzte Fertigungsschritt für ein Vakuum-Isolations-Paneel. Nach obligatorischer Lagerung, Endprüfung und transportsicherer Verpackung werden dann diese hocheffizienten Wärmedämmplatten den entsprechenden Kunden zugestellt.

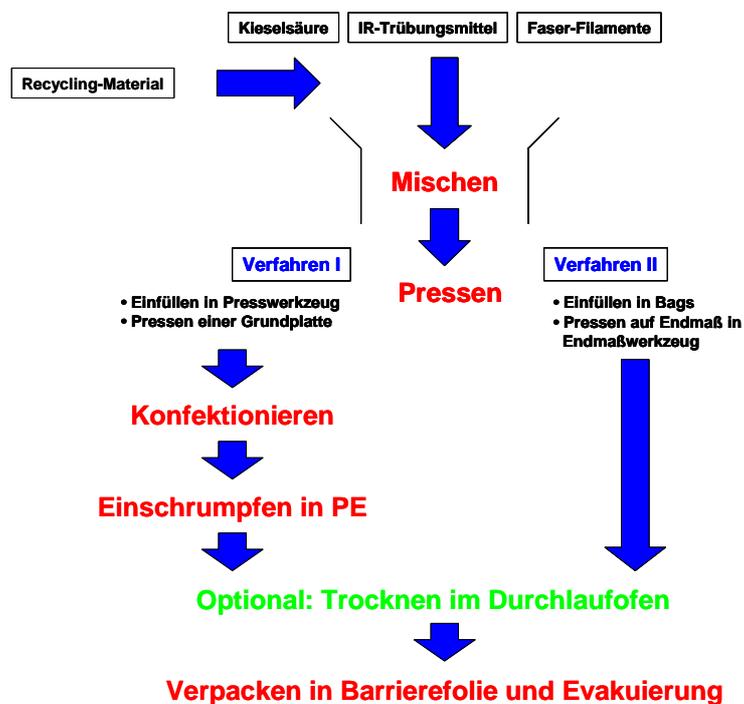


Abb. 4: Schematischer Herstellungsablauf einer Vakuum-Isolations-Paneele auf Basis mikroporöser Materialien

3 Verfahren der Qualitätssicherung

Neben den üblichen Verfahren der Überprüfung der Maßhaltigkeit der Vakuum-Isolations-Paneele ist es erforderlich, auch die thermische Eigenschaft zu prüfen. Hierbei gibt es die Möglichkeit, den Wärmeleitfähigkeitswert direkt zu bestimmen oder mittels einer Kalibrierkurve durch Bestimmung des Innendruckes des VIPs auf diesen Wert zu schließen.

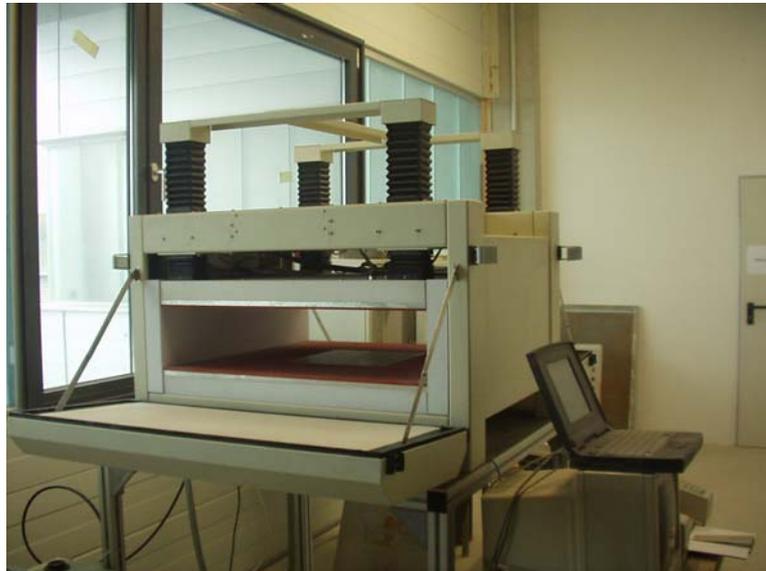


Bild 2: Wärmeleitfähigkeitsmessgerät FOX 800 (Lasercomp) der Firma Porextherm

Der Innendruck einer Vakuum-Isolations-Paneele kann z. B. mittels einer Laser-Distanzmessung in einer Vakuumkammer erfolgen. Dabei wird ausgenutzt, dass im Falle, dass der Innendruck p_{innen} der Vakuum-Isolations-Paneele größer ist als der Umgebungsdruck $p_{\text{außen}}$ des VIPs, sich die Hüllfolie vom Stützkörper des VIPs abhebt bzw. aufbläht. Exakt dieser „Aufbläh“-Zeitpunkt ist entscheidend für die Messung, denn dadurch ändert sich der Abstand der Folie zum Messequipment, welcher durch den Lasermessstrahl detektiert wird. Somit kann doch sehr genau der kritische Druck abgelesen werden.

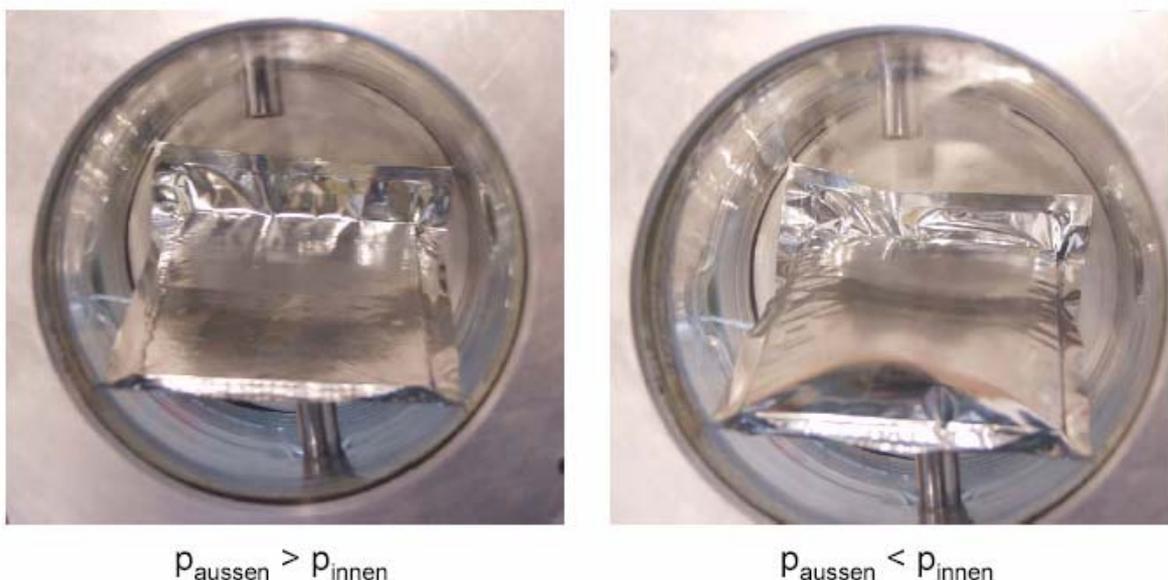


Bild 3: Verhalten der Folie bei einer Innendruckprüfung in einer Vakuum-Kammer

Verfahren zur berührungslosen Innendruckmessung sind derzeit in der Entwicklung und werden aller Voraussicht nach in Bälde für Feldversuche zur Verfügung stehen. Diese Messmöglichkeit wäre eine Revolution in Fragen der Qualitätssicherung von Vakuum-Isolations-Paneele, denn dann wäre es erstmals möglich, bereits verbaute VIPs ohne spezielle Vorhaltungen für Messfühler oder –köpfe langfristig im „Einsatz“ zu prüfen, Erfahrungen zu sammeln und Vertrauen in diese hocheffiziente Wärmedämmung, welche der Bauindustrie erhebliche wärmedämmtechnische Möglichkeiten eröffnet, zu generieren.

Literatur

Degussa, Aerosil & Silanes, Schriftenreihe Fine Particles, Nummer 11: *Grundlagen von AEROSIL®* Printed 03 / 2003, Seite 6 - 11

H. Ferch, *Chem. Ing. Techn.* 48, 922 (1976)

Wacker HDK® Pyrogene Kieselsäure, *Verdicken und Thixotropieren – Verstärken – Rieseln*, November 2001, Seite 4 – 5

Wacker WDS®, *WDS lässt Hitze kalt*, Dezember 1990, Seite 4

EMPA, Dr. Hans Simmler, Dr. K. Ghazi Wakili, *Vakuumdämmung im Baubereich – Aufbau, Physik und Anforderungen*, Präsentation Workshop 10.09.2002

Hans-Frieder Eberhardt

Porextherm Dämmstoffe GmbH

Heisinger Straße 8

D-87437 Kempten

Tel.: +49 (0) 831 / 57 53 61 26

PC-Fax: +49 (0) 831 / 57 53 61 76

Fax: +49 (0) 831 / 57 53 63

Handy: +49 (0) 174 / 3 27 21 54

E-Mail: Hans-Frieder.Eberhardt@Porextherm.com

www.Porextherm.com