

# Herstellung hochisolierender Keramik-Dämmstoffe

Schlussbericht Vorstudie

Ausgearbeitet durch

**M. Damani**

**EMPA Abt. Hochleistungskeramik**

.....

Im Auftrag des

**Bundesamtes für Energie**

Januar 2001

**Auftraggeber:**

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden  
Bundesamtes für Energie

**Auftragnehmer:**

EMPA Abt. Hochleistungskeramik

**Autorin:**

Dr. M. Damani

**Begleitgruppe:**

Dr. Th. Graule, EMPA, Leiter Abteilung Hochleistungskeramik  
Dr. U. Vogt, EMPA, Abt. Hochleistungskeramik  
M. Zimmermann, Programmleiter BFE  
M. Stettler, Bereichsleiter Gebäude BFE

März 2001

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

**Bundesamt für Energie BFE**

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

EMPA Bericht 201.989/II  
Vertrieb: Internet [www.empa.ch/ren](http://www.empa.ch/ren)

# Vorabklärung zur Herstellung hochisolierender Keramik-Dämmstoffe

## Inhalt

- Einleitung
- Zielsetzungen
- Durchgeführte Arbeiten und Resultate
- Nationale und internationale Zusammenarbeit
- Publikationen
- Literaturverzeichnis
- Anhang

## 1. Einleitung

Im vorliegenden Bericht werden die nach der Berichtslegung vom 20. Dezember 2000 durchgeführten Arbeiten und die Ergebnisse dazu zusammengefasst. Im Berichtszeitraum wurde eine internationale Konferenz zum Thema Hochleistungs-Wärmedämmstoffe an der EMPA Dübendorf veranstaltet. Im Anschluss an die Konferenz fand ein Workshop statt, bei dem eine internationale Zusammenarbeit zur Weiterentwicklung von hochisolierenden Wärmedämmstoffen (Annex 39) vorbereitet wurde. Im Rahmen dieses Workshop konnten die in diesem Projekt ausgearbeiteten Ideen in einem Kurzvortrag vorgestellt werden.

## 2. Zielsetzungen

Der Vollständigkeit halber werden hier nochmals alle Zielsetzungen angeführt, ein Grossteil konnte bereits im ersten Berichtszeitraum umgesetzt werden und wird daher hier nicht mehr behandelt.

- Stand der Technik evaluieren:  
Welche Methoden und Materialien zur Herstellung evakuierter, gasgefüllter und/ oder mikroporöser anorganischer Dämmstoffe existieren, Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Technik
- Definition der thermischen, mechanischen und geometrischen Eigenschaften des Wärmedämmstoffes
- Theorien der Einflussgrössen aus der Literatur ausarbeiten
- Mögliche Herstellprozesse evaluieren
- Kontaktaufnahme zu relevanten Industriepartnern – Abklärung wer an einer gemeinsamen Entwicklung interessiert wäre
- Weitere Vorgehensweise bzw. Entwicklungsprozess definieren
- Eventuell Vorversuche im Labormassstab durchführen
- Abschlussbericht erstellen und gegebenenfalls Entwicklungsprojekt definieren

Die Zielsetzungen für den zweiten Berichtszeitraum waren in erster Linie eine Literaturübersicht zum Thema Aerogele, im speziellen als Wärmedämmstoffe eingesetzt und eine Studie über Herstellungsmethoden für gasdichte hochisolierende Wärmedämmstoffe.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und Resultate

### 3.1 Literaturstudie

Im Berichtszeitraum wurde eine weitere Literatur- und Patentrecherche zum Thema Aerogele und auch mikroporöse Wärmedämmstoffe durchgeführt. Von den ausgewerteten Veröffentlichungen waren etwa die Hälfte Patente.

Gute Übersichtsartikel über Aerogele und deren Anwendungen gibt es wenige [1-9]. Sie sind aber gut geeignet um sich einen schnellen Überblick über die Herstellung der Aerogele, deren Eigenschaften und Anwendungen zu verschaffen. Eine Veröffentlichung beschäftigt sich mit der Frage der Kommerzialisierung dieser neuen Werkstoffklasse [9].

Aus einer grossen Fülle von Veröffentlichung über die Herstellung von Aerogelen selbst wurden nur wenige zum näheren Studium ausgewählt [10-12].

In [13- 29] ist eine recht umfangreiche Übersicht über die Wärmeleitfähigkeit und den dazugehörigen Mechanismen von Aerogelen bzw. nanoporösen Werkstoffen (auch über Wärmestrahlung und Gastransport) zu finden.

Veröffentlichungen und Patente, die Aerogel-Verbundwerkstoffe, welche als Wärmedämmstoffe verwendet werden können, beschreiben, waren von besonderem Interesse. Eine Übersicht über diese Werkstoffe ist in Tabelle 1 im Anhang A1 zusammengefasst (Literaturverweise sind in der Tabelle zu finden).

Daneben wurden auch Arbeiten bzw. Patente publiziert, die sich mit der Verbesserung bzw. Modifizierung der Aerogele selbst beschäftigen. In erster Linie steht dabei die Erhöhung der mechanischen Festigkeit und/oder der Temperaturbeständigkeit bei niedriger Wärmeleitfähigkeit im Vordergrund [48-62].

Zu guter Letzt ist im Berichtszeitraum auch der Abschlussbericht für das Projekt Hochleistungs-Wärmedämmung (Firma Dr. Eicher + Pauli) erschienen, in dem vor allem Vakuums-Isolations-paneele und deren Anwendung untersucht wurden [63].

### 3.2 Der ideale Wärmedämmstoff

Der ideale Wärmedämmstoff sollte folgende Eigenschaften erfüllen:

- Sehr geringe Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ), zumindest aber deutlich unter der Wärmeleitfähigkeit von Luft ( $\lambda = 0,025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ); im Annex 39 wird  $\lambda < 0,015 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  gefordert.
- Die mechanische Festigkeit des Werkstoffes muss hoch genug sein, so dass das Material problemlos auf der Baustelle von einem geschulten Handwerker ver- und bearbeitet werden kann, ohne dass das Material übermässig beschädigt wird und ohne dass die thermischen Eigenschaften negativ beeinflusst werden.
- Das Material sollte in Platten und in beliebig geformten Teilen herstellbar sein.
- Das Material sollte gasdicht und weitgehend unempfindlich gegenüber Wasser und anderen Flüssigkeiten sein. Es sollte auch keine Feuchtigkeit aufnehmen und, falls erforderlich, auch eine Dampfsperre darstellen.

Es stellt sich nun die Frage, wie dieser ideale Wärmedämmstoff aussehen und aus welchem Material er idealerweise bestehen könnte. Für eine gute Wärmedämmung bzw. schlechte Wärmeleitung ist Voraussetzung, dass alle Wärmeleitungsmechanismen auf ein Minimum reduziert werden. Die Wärmeleitung durch den Feststoff kann sowohl durch die Wahl des Materials (Glas besitzt die geringste Wärmeleitung aller anorganischen Feststoffe), als auch durch die Verminderung des Feststoffanteils (= Erhöhung der Porosität) verringert werden. Die Wärmeleitung über das Porengas kann durch die Art des Gases und den Gasdruck in den Poren beeinflusst werden (Konvektion findet in kleinen Poren ( $< 5 \text{ mm}$ ) nicht statt). Der Anteil an Wärmestrahlung, der bei Raumtemperatur und kleinen Poren keine grosse Rolle spielt, sollte zur Erreichung derart kleinen Wärmeleitfähigkeiten, wie sie hier gefordert sind, durch Zusatz von Infrarot-Absorbern (z.B.  $\text{TiO}_2$ ) gänzlich ausgeschaltet werden.

Das Grundprinzip aller zur Zeit verwendeten Hochleistungswärmedämmstoffe beruht auf dem Prinzip mikro- bzw. nano- und offenporöser Materialien. Die verwendeten Materialien (pyrogene Kieselsäure, Aerogele) haben gemeinsam, dass zwischen einzelnen Feststoffteilchen nur Punktkontakte bestehen und die Porosität sehr fein und in alle Richtungen offen ist. Die Punktkontakte sind für die sehr niedrige Feststoff-Wärmeleitung verantwortlich (auch wenn der Werkstoff selbst eine relativ hohe Wärmeleitung hat –  $\text{SiO}_2$  im Vergleich zu Kunststoffen). Zusätzlich wird die Gasleitung durch die sehr feine (offene) Porosität stark beeinträchtigt, was zu einer weiteren Verringerung der Gesamtwärmeleitung des Materials führt. Eine weitere Verringerung der Wärmeleitfähigkeit dieser Dämmstoffe ist durch die Ausschaltung der Wärmeleitung über das Gas zu erzielen, dies entspricht dem Prinzip der Vakuum-Isolationspaneelle.

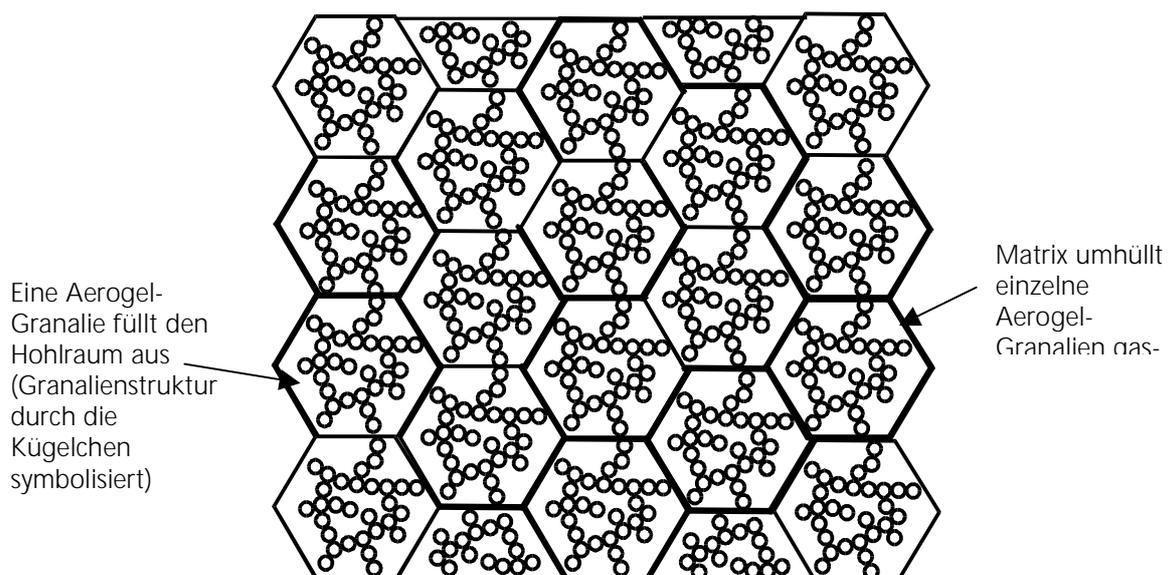
Wie bereits im Bericht I dargestellt, liegt der grosse Nachteil dieser Superisolations-Materialien darin, dass sie eine gasdichte Umhüllung brauchen und damit empfindlich gegenüber Beschädigungen sind, nicht bearbeitet (geschnitten oder durchbohrt) werden dürfen und deshalb nicht ohne weiteres für den Baubereich geeignet sind. Zudem stellt die Verpackung (meist Aluminiumfolie bzw. Alu-beschichtete Plastikfolie) an den Plattenkanten eine Wärmebrücke dar, die den in Plattenmitte sehr guten Wärmeleitungswert von etwa  $0,004 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  lokal deutlich erhöhen kann.

Schaumglas würde einen idealer Werkstoff für die Wärmedämmung (anorganisch, d.h. nicht brennbar, gasdicht, gut bearbeitbar, umweltfreundlich, da aus Recycling-Material hergestellt und selbst wieder recycelbar, etc.) darstellen. Leider hat es den Nachteil einer vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeit, was darauf zurückzuführen ist, dass dichtes Glas im Vergleich zu dichten Kunststoffen eine etwa viermal so grosse Leitfähigkeit aufweist ( $1,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  gegenüber  $0,2 - 0,4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  für die meisten Kunststoffe (Referenz [71] aus Bericht I). Die Dichte kann nicht beliebig verringert werden ohne offene Porosität zu erhalten und mechanische Festigkeit zu verlieren. Es ist auf Grund des Herstellprozesses (Blähen einer Glaspulverschüttung oberhalb des Glas-Erweichungspunktes) nicht einfach möglich den Gasinhalt der Poren stark zu verändern. Durch die Wahl unterschiedlicher Blähmittel kann zwar die Art des Porengases in beschränktem Umfang bestimmt werden, der Druck in den Poren kann aber beim herkömmlichen Schaumglasherstellungsprozess nicht entscheidend beeinflusst werden. Die Menge des entstehenden Gases bestimmt zusammen mit der Viskosität des Glases die Porengröße, das Gas bleibt nach dem Abkühlen auf Grund der Gasdichtheit zu 100 % in den Poren; der Druck in den Poren wird dadurch festgelegt. Da bislang nur über den erwähnten Blähprozess ein kontrolliert geblähtes Schaumglas hergestellt werden kann, sind auf diesem Wege nur geringe Verbesserungen bezüglich der Wärmeleitfähigkeit wahrscheinlich. Da Interesse zur Optimierung von Schaumgläsern aus der Industrie vorliegt, wäre es aber dennoch angebracht diesbezüglich weitere grundlegende Untersuchungen anzustellen und eventuell auch alternative Herstellungsmethoden (Sol-Gel, etc.) in Betracht zu ziehen.

### 3.3 Suche nach neuen Wärmedämmstoffen

Aus obigen Gründen wurde nach neuen bzw. modifizierten Konzepten für einen gasdichten hochisolierenden Dämmstoff gesucht. Prinzipiell ist die Struktur des Schaumglases die am besten geeignete, um die gestellten Forderungen zu erfüllen. Die Idee ist, den Feststoffanteil extrem niedrig zu halten und die Hohlräume bzw. Poren mit einem hochisolierendem Medium zu füllen, das gleichzeitig zur mechanischen Stabilität beiträgt. Erreichen könnte man dies, wenn man z.B. Aerogel-Granulat mit einer sehr dünnen Glasschicht "einpacken" und zu Platten packen könnte. Ähnliche Konzepte wurden auch in der Literatur (meist Patente) gefunden, allerdings nicht mit gasdichten Matrixmaterialien, sondern eher mit Polymeren oder auch anorganischen Werkstoffen wie Gips oder Wasserglas [5-8; 30-47]. Aerogele wurden auch in Vakuums-Isolationspaneelen verwendet [47].

Wenn man nun Aerogel-Granulat dicht packen könnte mit sehr dünnen (Glas-)Zwischenwänden und es zusätzlich gelingen würde die Wärmeleitfähigkeit des Aerogels selbst durch eine Edelgasfüllung oder noch besser durch ein Vakuum zu reduzieren, könnte man damit einen idealen Wärmedämmstoff mit einer Schaumglas-Grundstruktur erhalten. Schematisch ist eine derartige Struktur in Bild 1 dargestellt. Der (Glas-)Matrixanteil müsste idealerweise sehr gering sein, jedenfalls aber unter 3% liegen.



**Bild 1:** Schematischer zweidimensionaler Schnitt durch die Struktur eines idealen Wärmedämmstoffes. Die Matrix könnte Glas sein (sehr geringer Volumenanteil), die Hohlräume sind einzelne Aerogel-Granalien, die mit Edelgas gefüllt oder evakuiert sind.

Es sind mehrere Möglichkeiten eine derartige Struktur herzustellen denkbar. Man könnte einzelne Granalien beschichten, was durch ein Beschichtungsverfahren (vielleicht sogar im Vakuum oder in Edelgas-Atmosphäre) oder durch einen Schlicker mit anschließendem Trocken erfolgen könnte. Diese Granalie könnte man dann entweder einzeln belassen und im Fall der Schlickerbeschichtung sintern oder aber Verpressen z.B. auch bei erhöhter Temperatur, um so eine Platte mit obiger Struktur zu erhalten. Interessant wäre auch eine Art Oberflächenversiegelung (eventuell auch im Vakuum oder in Edelgasatmosphäre) bei der die Oberfläche einer einzelnen Granalie gasdicht verschmolzen wird. Da Aerogel sehr schlecht leitend ist, müsste dies mit einer gezielten kurzzeitigen Wärmebehandlung (vielleicht mit einer Flamme) möglich sein. Dieses Granulat könnte anschliessend entweder so verwendet oder durch Heisspressen verdichtet werden.

Da bei letztgenannten Verfahren und auch bei der gasdichten Beschichtung von einzelnen Granalien bei der Verwendung von Glas als Matrixmaterial unter Umständen zu viele Wärmebrücken entstehen könnten, wäre es überlegenswert diese Granalien mit einer geringen Menge (z.B. 3 %) eines organischen Binders (z.B. Polyvinylbutyral) zu Platten zu verpressen.

Es wäre auch interessant ähnliche Strukturen mit pyrogener Kieselsäure zu untersuchen. Da Kieselsäure als Pulver vorliegt müsste man es zunächst einmal granulieren. Dabei kann man aber bereits Matrixvormaterial (z.B. ein niedrig schmelzendes Glas) mit einbringen und dieses beim Sprühtrocknen durch gezielte Prozessführung schon an die Oberfläche migrieren lassen. Diese Granalien könnten prinzipiell in gleicher Art und Weise wie für die Aerogele beschrieben wärmebehandelt, verpresst und gesintert werden, oder auch mit einer geringen Menge Kunststoff zu Platten verklebt werden.

### 3.4 Untersuchung des Probenmaterials

#### *Vakuum-Aufheizversuche an Schaumglasproben*

An Schaumglasproben der Firma Misapor wurden Aufheizversuche durchgeführt. Es sollte untersucht werden, ob beim Aufheizen von Schaumglas im Vakuum eine weitere Blähung stattfindet, d.h. ob es dabei zu einer weiteren Verringerung der Dichte kommen könnte. Insgesamt wurden sieben Proben bis zu unterschiedlichen Temperaturen im einen Dilatometer-Ofen (Fa. Bähr) ohne Längenmessung in einem Vakuum von 0,1 mbar aufgeheizt. In Tabelle 2 sind die einzelnen Versuche protokolliert. Die Aufheizrate betrug 5°C/min und die Haltzeit 60 Minuten (Ausnahme: 300 Minuten für Probe 3).

**Tabelle 2:** *Vakuum-Aufheizversuche von Misapor-Schaumglasproben*

Probe	Temperatur	Länge vorher [mm]	Länge nachher [mm]
1	500	12,99	12,99
2	800	12,38	12,18
3	900	12,30	kugelig
4	850	13,38	13,43
5	860	13,73	10,72
6	840	13,41	13,37
7	850	11,96	11,72

Es konnte in keinem Fall ein Nachblähen des Schaumglases festgestellt werden. Bis auf Probe 4, die geringfügig grösser wurde (ein Messfehler kann leider nicht ausgeschlossen werden), zeigten alle Proben eine geringe Schrumpfung.

#### *Röntgendiffraktometrische Untersuchungen*

Eine Schaumglas-Probe der Firma Misapor wurde im Röntgendiffraktometer bezüglich ihrer Zusammensetzung untersucht. Es sollte geklärt werden, ob Reste des Blähmittels (SiC) festgestellt werden können. Das Ergebnis ist im Anhang A2 in einem Diagramm dargestellt. Es konnte eindeutig SiC gefunden werden, zudem dürfte das Glas teilweise kristallin vorliegen.

#### 4. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Es wurde Kontakt mit mehreren Firmen, die Schaumglas in Platten oder als Granulat herstellen, aufgenommen. Herr Lottenbach von der Firma Misapor (Landquart, Schweiz), die stückiges Schaumglas herstellt, war Anfang Januar zu Besuch an der EMPA und hat ein prinzipielles Interesse der Firma an einer Zusammenarbeit zur Weiterentwicklung ihres Schaumglases bekundet. Das Interesse der Firma richtet sich in erster Linie Richtung Granulat und Schaumglasplatten, sie wollen vorrangig ein billiges Produkt für die Bauindustrie anbieten. Ebenso sind Rückmeldungen von den Firmen Deutsche Schaumglas GmbH (Herr Klingler; Schmiedefeld, Deutschland) und der Firma Dennert Poraver GmbH (Herr Runkel; Schlüsselfeld, Deutschland) eingetroffen, beide haben prinzipielles Interesse an einer Zusammenarbeit bekundet. Im Rahmen des Workshops an der EMPA hat auch die Schweizer Dämmstofffirma Schlager Interesse an einer Zusammenarbeit gezeigt. Diese Firma stellt zur Zeit in erster Linie Mineralwolle her, Herr Stauffert meinte, es wäre für die Firma sehr interessant an einer Werkstoff-Neuentwicklung direkt mitzuwirken.

Im März 2001 ist ein Besuch der EMPA bei der Firma Pittsburgh Corning (Belgien), die Marktführer auf dem Gebiet des Schaumglases sind, geplant.

#### 5. Publikationen

M. Damani, U. Vogt, Th. Graule, Preliminary Study on High Performance Thermal Insulation Materials with Gas-tight Porosity, High Performance Thermal Insulation Systems – Vacuum Insulated Products (VIP); Conference and Workshop, EMPA Dübendorf, 22.-24.01.2001

#### 6. Literaturübersicht

1. Fricke J, Materials Research for the Optimization of Thermal Insulations, *High Temperatures-High Pressures*, 25, pp. 379-390, 1993
2. Fricke J, Emmerling E, Aerogels - Recent Progress in Production Techniques and Novel Applications, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 13, pp. 299-303, 1998
3. Herrmann GH, et al, Aerogels - The Leading Edge in Thermal Insulation, *H & V Engineer*, 68, pp. 8-11, 1995
4. Hrubesh LW, Aerogel Applications, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, pp. 335-342, 1998
5. Schmid M, Schwertfeger F, Applications for Silica Aerogel Products, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, pp. 364-368, 1998
6. Schmidt M, Schwertfeger F, Applications for Silica-Based Aerogel Products on an Industrial Scale, In *Mat. Res. Soc. Sym. Proc., Porous and Cellular Materials for Structural Applications*, Vol. 521, ed. 179-184, 1998
7. Reiss M, Aerogele - Wärmedämmstoffe der Zukunft, In *DKV-Tagungsbericht*, 23. Jg., Bd. 2/1, 215-224, 1997
8. Herrmann G, et al, On the Way to Commercial Production of Silica Aerogel, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 380-387, 1995
9. Carlson G, et al, Aerogel Commercialization: Technology, Markets und Costs, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 372-379, 1995
10. Heinrich T, Klett U, Fricke J, Aerogels - Nanoporous Materials, Part I: Sol-Gel Process and Drying of Gels, *Journal of Porous Materials*, 1, pp. 7-17, 1995
11. Smith DM, Maskara A, Boes U, Aerogel-based Thermal Insulation, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, pp. 254-259, 1998
12. Yoldas BE, Annen MJ, Bostaph J, Chemical Engineering of Aerogel Morphology Formed under Nonsupercritical Conditions for Thermal Insulation, *Chem. Mater.*, 12, pp. 2475-2484, 2000
13. Reiss H, Wärmeströme in thermischen Isolierungen, *Phys. Bl.*, 48, pp. 617-622, 1992
14. Caps R, Fricke J, Radiative Heat Transfer in Silica Aerogel, In *Aerogele, Springer Proceedings in Physics 6*, J Fricke, Springer Verlag, pp. 110-115, 1986
15. Büttner D, et al, Thermal Conductivity of SiO<sub>2</sub> - Aerogel Tiles, In *Aerogels, Springer Proceedings in Physics 6*,

- J Fricke, Springer Verlag, pp. 104-109, 1986
16. Büttner D, Hümmer E, Fricke J, Thermal Conductivity of Granular SiO<sub>2</sub> Aerogel, In *Aerogels, Springer Proceedings in Physics 6*, J Fricke, Springer Verlag, pp. 116-120, 1986
  17. Fricke J, Thermal Transport in Porous Superinsulations, In *Aerogels, Springer Proceedings in Physics 6*, J Fricke, Springer Verlag, pp. 94-103, 1986
  18. Stangl R, Platzer W, Wittwer V, IR Emission Spectroscopy of Silica Aerogel, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 256-263, 1995
  19. Nilsson O, Fransson A, Sandberg O, Thermal Properties of Silica Aerogel, In *Aerogels, Springer Proceedings in Physics 6*, J Fricke, Springer Verlag, pp. 121-126, 1986
  20. Lee D, Stevens PC, Zeng SQ, Hunt AJ, Thermal Characterisation of Carbon-Opacified Silica Aerogels, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 285-290, 1995
  21. Rettelbach T, Säuberlich J, Korder S, Fricke J, Thermal Conductivity of Silica Aerogel Powders at Temperatures from 10 to 275 K, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 278-284, 1995
  22. Hrubesh LW, Pekala RW, Thermal Properties of Organic and Inorganic Aerogels, *J. Mat. Res.*, 9, pp. 731-738, 1994
  23. Rettelbach T, Säuberlich J, Korder S, Fricke J, Thermal conductivity of IR-Opacified Silica Aerogel Powders between 10 K and 275 K, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 28, pp. 581-587, 1995
  24. Hümmer E, Lu X, Rettelbach T, Fricke J, Heat Transfer in Opacified Aerogel Powders, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 145, pp. 211-216, 1992
  25. Lu X, et al, Thermal Transport in Organic and Opacified Silica Monolithic Aerogels, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 145, pp. 207-210, 1992
  26. Bernasconi A, et al, Low-Temperature Specific Heat and Thermal Conductivity of Silica Aerogels, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 145, pp. 202-206, 1992
  27. Scheuerpflug P, Hauck M, Fricke J, Thermal Properties of Silica Aerogels between 1,4 and 330 K, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 145, pp. 196-201, 1992
  28. Klemens PG, Theory of Thermal Conduction in Low Density Materials, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 145, pp. 191-195, 1992
  29. Zheng SQ, Hunt A, Greif R, Transport Properties of Gas in Silica Aerogel, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 264-270, 1995
  30. Behme K-J, Zimmermann A, Jansen R-M, Foam Laminates, Process for Their Preparation and Their Use, Patent EP0667370, Hoechst AG, Germany, 1995
  31. Zimmermann A, et al, Aerogel and Adhesive-Containing Composites, Process for its Production and its Use, Patent US6143400; EP0850206, Hoechst Research & Technology, Germany, 2000
  32. Schwertfeger F, Dierk F, Schmidt M, Multilayer Composite Materials Comprising an Aerogel-Containing Layer and another Layer, Their Production and Use, Patent DE19702240; EP0963358, Hoechst AG, Germany, 1998
  33. Hohwiller F, Wolff B, Seybold G, Composite Foams of Low Thermal Conductivity, Patent US5124364; EP0489319, BASF AG, Germany, 1992
  34. Wolff B, Seybold G, Krückau FE, Insulating Material with a Density of 0,1 to 0,4 g/cm<sup>3</sup>, Patent EP0340707, BASF AG, Germany, 1989
  35. Mielke M, Dungen K-Hv, Moldings Containing Silica Aerogel Particles and their Preparation, Patent US5656195; EP0672635, BASF AG, Germany, 1997
  36. Schwertfeger F, Schmidt M, Use of Aerogels for Deadening Structure-Borne and/or Impact Sounds, Patent DE19702238; EP0966411; WO9832708, Hoechst AG, Germany, 1998
  37. Schwertfeger F, et al, Composite useful as Insulation in Electronics and Thermal Insulation, Patent DE19533565, Hoechst AG, Germany, 1997
  38. Dierk F, Stuhler H, Zimmermann A, Composite Material Containing Aerogel, Process for Manufacturing the Same and the Use Thereof, Patent US6080475; EP0793627; WO9615997, Hoechst AG, Germany, 2000
  39. Dierk F, Zimmermann A, Aerogel-, Binder- and Fibrous Material- Containing Composite Materials, and Their

- Manufacture and Use, Patent DE19533564; EP0850207; WO9710188, Hoechst AG, Germany, 1997
40. Müller H-K, et al, Composition Containing an Aerogel, Method of Producing Said Composition and the Use Thereof, Patent US5948314; EP0787112, Hoechst AG, Germany, 1999
  41. Dierk F, Stuhler H, Zimmermann A, Composite Material Containing Aerogel, Process for its Preparation and Its Use, Patent US6083619; EP0793626, Hoechst AG, Germany, 2000
  42. Breuning T, Gerlach U, Boden G, Preparation of Inorganic Insulating Material, Patent DE19735648, Fraunhofer Ges. f. Forschung, Germany, 1999
  43. McWilliams JA, Jackson JD, Morgan DE, Panels of Microporous Thermal Insulation, Patent, EP0246047, Micropore Int. Ltd., Great Britain, 1987
  44. McWilliams JA, Derek ME, Jackson JD, Method of Manufacturing a Microporous Thermally Insulating Roof, Patent US4925584, EP0194870, Micropore Int. Ltd., Great Britain, 1990
  45. Thönnessen F, Zimmermann A, Dierk F, Nonwoven Composites, its Manufacture and Use as Heat Sound Barrier and/or Absorbant, Patent DE19548128; EP0868556, Hoechst AG, Germany, 1997
  46. White S, Rasky D, Tough, Lightweight, Superinsulating Aerogel/Tile Composites have Potential Industrial Applications, *Journal of Materials Technology*, 14, pp. 13-16, 1999
  47. Fricke J, FCKW - freie Wärmedämmungen, *Physik in unserer Zeit*, 20, pp. 189-191, 1989
  48. Deng Z, et al, High Strength SiO<sub>2</sub> Aerogel Insulation, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, pp. 101-104, 1998
  49. Kuhn J, et al, Integration of Mineral Powders into SiO<sub>2</sub> Aerogels, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 291-295, 1995
  50. Wang J, Kuhn J, Lu X, Monolithic Silica Aerogel Insulation doped with TiO<sub>2</sub> Powder and Ceramic Fibers, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 296-300, 1995
  51. Rutiser C, Komarneni S, Roy R, Composite Aerogels of Silica and Minerals of Different Morphologies, *Materials Letters*, 19, pp. 221-24, 1994
  52. Cao W, Hunt AJ, Aerogel Composite and Method of Manufacture, Patent US 5855953, Univ. of California, USA, 1999
  53. Cao W, Hunt AJ, Method of Manufacturing of Aerogel Composites, Patent US5879744, Univ. of California, USA, 1999
  54. Gabriel R, Reisacher H, Shaped Thermally Insulating Article, Patent EP0829346, Porextherm Dämmstoffe GmbH, Germany, 1998
  55. Hrubesh LW, Pekala RW, Compression Molding of Aerogels Microspheres, Patent US5731360, Univ. of California, USA, 1998
  56. Kummermehr H, Sommer R, Thermal Insulation Flexible Ceramic Containing Flame Hydrolysis Produced Microporous Oxide Aerogel, Patent US4447345; EP0059860; DE3108816, Grünzweig Hartmann Glasfaser, Germany, 1984
  57. Okoroafor MO, Wang AE, Yoldas BE, Surfactants for Incorporating Silica Aerogels in Polyurethane Foams, Patent US6121336; EP0802944; WO9600750, BASF Corp., USA, 2000
  58. Poco JF, Coronado PR, Flexible Aerogel Composite for Mechanical Stability and Process of Fabrication, Patent US6087407; US5973015; WO9938610, Univ. of California, USA, 2000
  59. Ramamurthi S, Ramamurthi M, Aerogel Matrix Composites, Patent US5306555, Battelle Memorial Institute, USA, 1994
  60. Ryu J, Flexible Aerogel Superinsulation and its Manufacture, Patent WO9717308, Aspen Systems Inc., USA, 1997
  61. Ryu J, Flexible Aerogel Superinsulation and its Manufacture, Patent US6068882, Aspen Systems Inc., USA, 2000
  62. McWilliams JA, Anthony J, Thermal Insulation Material, Patent DE2806367; GB1580909, Micropore Int. Ltd., Great Britain, 1980
  63. Eicher H, Erb M, Binz A, Moosmann A, *Hochleistungs-Wärmedämmung, Schlussbericht*, Dr. Eicher + Pauli AG, Fachhochschule beider Basel, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Liestal, 2000



Tabelle 1: Hochisolierende "neue" Wärmedämmstoffe

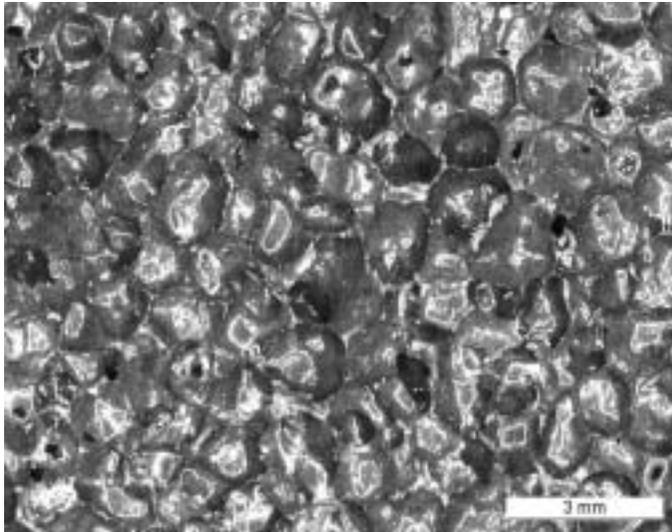
Was	Ref. Nr.	Wer, Wo, Wann	Zusammensetzung	Herstellung	Kommentar
Aerogel-Polymer Composites	5, 6	Hoechst AG, Deutschland, 1998	<ul style="list-style-type: none"> <li>50-95% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing</math> 0,5-2mm);</li> <li>Matrix A: 5-50% Polyvinylbutyral (PVB)</li> <li>Matrix B: 5-35% Vinylacetat/Ethen als wässrige Dispersion</li> </ul>	Matrix A: Pressen des Gemischs bei einer T die ca. der Schmelztemp-eratur des Polymers entspricht. Matrix B: Mischen, Pressen, Trocknen	Platten können als Unterbodenisolierung verwendet werden, auch gute Schalldämmung; $\lambda \leq 0,025$ W/(m·K) .
Aerogel-Kunststoffschaum Composite	30	Hoechst AG, Deutschland, 1995	<ul style="list-style-type: none"> <li>10-90% Aerogel-Granulat</li> <li>Matrix A: 90-10% Polyurethanschaum</li> <li>Matrix B: 90-10% Polyolefinschaum</li> </ul>	Aerogel-Granulat und Schaumstoff-Vor-material werden in einem Behälter gemischt; der Schaumstoff wird mit CO <sub>2</sub> geschäumt, sodass er die Areogel-Granalien vollständig umgibt.	Patent; Dichte der patentierten Schaumstoffe $\rho = 0,05$ bis $0,6$ g/cm <sup>3</sup> ; $0,015 \leq \lambda \leq 0,040$ W/(m·K) ; $\lambda$ der angeführten Bsp. liegt bei $0,020$ bis $0,022$ W/(m·K) .
Aerogel-Polymer Composites	31, 36, 37, 39, 7	Hoechst R & D DE. GmbH., Deutschland, 2000, 1998, 1997	<ul style="list-style-type: none"> <li>5-97% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing &lt; 0,5</math> mm)</li> <li>Matrix: 3-95% - ziemlich alle bekannten einphasigen, nicht-wässrigen organischen Binder können verwendet werden (z. B.: Melaminformaldehyd, Polyvinylalkohol, Polyethylen-Wachs, Polyvinylbutyral, etc.);</li> <li>Event. Füllstoffe (Holzpulver, Zellulose)</li> <li>Event. Fasern</li> </ul>	Mischen und pressen	Patente; Mind. 40% Aerogel mit $\varnothing < 0,2$ mm gibt beste Resultate; $\lambda$ je nach Zusammensetzung sehr unterschiedlich, kleinster in den Beispielen angegebener Wert $0,015$ W/(m·K) (Nr. 7 ist ein Tagungsbeitrag)
Aerogel-Polymer Multilayer-Composite	32	Hoechst AG, Deutschland, 1998	<ul style="list-style-type: none"> <li>5-97% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing</math> zw. <math>250\mu\text{m}</math> und <math>10</math> mm, besser <math>2</math> mm)</li> <li>Aerogel-Granulat-Schicht enthaelt organischen Binder (z.B. Polyvinylbutyral) und event. auch Fasern</li> <li>Polymer-Zwischenschicht</li> </ul>	Schichtweises Verpressen von reinem Polymer-Pulver und der Aerogel-hältigen Mischung.	Patent; Wärme- und Trittschalldämmung; $\lambda$ je nach Zusammensetzung sehr unterschiedlich, kleinster in den Beispielen angegebener Wert $0,021$ W/(m·K) .
Aerogel-Composite mit organischer oder anorganischer Matrix	40	Hoechst AG, Deutschland, 1999	<ul style="list-style-type: none"> <li>50-90% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing &lt; 0,5</math> mm)</li> <li>Wässriger Binder A) organischer Binder (z.B. Vinylacetat, Styrol-Acrylate, etc.) oder B) anorganische Binder (z.B. Wasserglas, Phyllosilikate, SiO<sub>2</sub>-Sol)</li> <li>Event. 0,1-30% Fasern</li> </ul>	Mischen, Formgebung und anschliessen-des Trocknen.	Patent; Beispiele nur mit organischen Bindemitteln, die damit erreichten $\lambda$ liegen zw. $0,032$ und $0,046$ W/(m·K) .

Aerogel-Composite mit anorganischem Binder	38, 41	Hoechst AG, Deutschland, 2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10-95% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing &lt; 0,5</math> mm)</li> <li>• anorganischer Binder (Zement, Gips, Kalk oder Silica Sol)</li> <li>• event. <math>&lt; 50\%</math> (bezogen auf Bindergehalt) natürliche oder künstliche Phyllo-Silikate (z.B. Kaolin, Magadiit)</li> <li>• event. 0,1-30% Fasern</li> </ul>	Mischen, Formgebung und anschliessen-des Trocknen, event. Kalzinieren ( $600^{\circ}\text{C}$ ); wird als Schicht hergestellt und event. mit einer Folie laminiert.	Patent; in den Beispielen angegebene Werte von $\lambda$ zwischen 0,015 bis 0,025 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; die kalzinierte Probe erreichte dabei den geringsten Wert.
Aerogel-Fasern Composite	45	Hoechst AG, Deutschland, 1997	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40-95% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing</math> zw. 30 <math>\mu\text{m}</math> und 20 mm)</li> <li>• Faservlies aus organischen Fasern (z.B. Polyolefinfasern, Polyesterfasern oder Polyamidfasern; Morphologie kann sehr unterschiedlich sein) auch Mischungen aus unterschiedlichen Fasern.</li> </ul>	Schichtaufbau des Materials: jeweils eine Lage Faservlies und eine Lage Aerogel-Granulat. Schichtverbund wird event. unter Druck bei geeigneter Temperatur (Fasern sollen anschmelzen) verfestigt. Beiderseitig Deckschicht nötig.	Patent; die Wärmeleitfähigkeit soll mind. unter 0,04 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , vorzugsweise jedoch unter 0,025 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ liegen.
Aerogel-Kunststoffschaum Composite	33	BASF AG, Deutschland, 1992	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20-80% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing</math> zw. 0,1 und 20 mm)</li> <li>• 80-20% Polystyrolschaum</li> </ul>	Mischen des Styrol-Polymers und des Aerogels; Schäumen mit Hilfe von heissem Wasserdampf oder Luft	Patent; im Beispiel angegebener Wert von $\lambda = 0,022$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .
Aerogel-Composite mit organischer oder anorganischer Matrix	34, 8	BASF AG, Deutschland, 1989	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mind. 50% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing</math> zw. 0,5 und 5 mm)</li> <li>• 5 bis 50% Bindemittel, welches A) organisch sein kann (z.B. Epoxidharzklebstoffe, Polyurethan-klebstoffe etc.) oder B) anorganisch sein kann (z.B. Zement, Gips, Kalk, Wasserglas)</li> </ul>	Bindemittel werden vorzugsweise in flüssiger Form verwendet; entweder herkömmliches Mischen der Komponenten oder Besprühen des Aerogel-Granulates mit dem Binder. Anschliessend Aushärten in der Form (je nach Art des Bindemittels durch Erwärmen und/oder Verdampfen des Lsgs.-mittels).	Patent und Publikation; Beispiele nur mit organischen Bindemitteln, die damit erreichten $\lambda$ liegen zw. 0,028 und 0,045 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .
Aerogel-Composite mit organischer oder anorganischer Matrix	35	BASF AG, Deutschland, 1997	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mind. 50% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing</math> zw. 0,001 und 8 mm)</li> <li>• 0,5-10% Schichtsilikate oder Tonminerale (bevorzugterweise Montmorillonit)</li> <li>• 3-30% Binder: A) organischer Binder (z.B. Epoxidharzklebstoffe, Polyurethan-klebstoffe etc.) oder B) anorganischer Binder (z.B. Zement, Gips, Kalk, Wasserglas, Aluminiumsilikat-Faser-Material)</li> </ul>	Herstellung durch Mischen bzw. Besprühen des Aerogel-Granulates mit dem Binder, der Schichtsilikate oder Tonminerale in flüssiger Suspension enthält. Anschliessend Verpressen und Trocknen.	Patent; Beispiele mit organischem Binder: $\lambda$ liegt zwischen 0,017 und 0,023 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; Beispiele mit anorganischen Binder (Faserhaltiger Binder): $\lambda$ von 0,019 bzw. 0,020 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ wurde erreicht.
Heissgepresstes Aerogel	8	BASF, Deutschland, 1995	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerogel-Granulat</li> </ul>	Aerogel-Granulat wurde bei Temperaturen von 500 bis $700^{\circ}\text{C}$ heissgepresst.	Platten mit einer Wärmeleitfähigkeit von weniger als 0,020 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ wurden hergestellt.

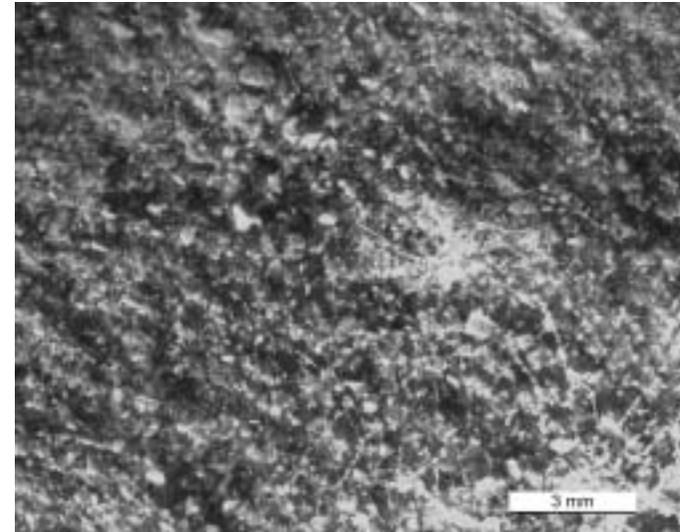
Aerogel-Composite mit organischer Matrix	42	Fraunhofer Gesellschaft, Deutschland, 1999	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30-90% Aerogel-Granulat (<math>\varnothing</math> zw. 0,5 und 5 mm)</li> <li>• Wässrige Polysiloxanemulsion (Mischungsverhältnis Aerogel-Emulsion: 1:0,1 bis 1:3)</li> <li>• Event. anorganische Füllstoffe (Aerosil, Fällungskieselsäure, Quarzmehl)</li> </ul>	Herstellung durch Mischen des Aerogel mit der Polysiloxan-emulsion. Aushärtung bei Raumtemperatur.	Patent, Keine Angaben über Wärmeleitfähigkeit.
Isolierplatten auf Substrat	43	Micropore Int., GB, 1987	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Substrat (z.B. Stahlplatte)</li> <li>• Polyvinylacetat-Emulsion</li> <li>• Aerogel oder Kieselsäure</li> </ul>	Die Stahlplatte wird mit der Polyvinylacetat-Emulsion ca. 0,5mm dick bestrichen. Aerogel bzw. Kieselsäure wird als Schicht daraufgepresst.	Patent; angeblich stabiler Verbund, für Anwendungen bis 400°C; keine Angaben über Wärmeleitfähigkeit.
Aerogel- bzw. Kieselsäure- Platten	44	Micropore Int., GB, 1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerogel(-granulat) oder Kieselsäure</li> <li>• 0,05-10% Ammoniumcarbonat (bzw. 1/3 Ammoniumcarbonat und 2/3 Ammoniumbicarbonat) oder Ammoniumacetat oder Urea</li> <li>• Event. Fasern</li> <li>• Event. Trübungsmittel</li> </ul>	Aerogel bzw. Kieselsäure wird mit Ammoniumcarbonat (oder den neben angeführten anderen Komponenten) gemischt und zu Platten verpresst. Durch Zersetzung der ammoniumhaltigen Komponenten (offen oder im Autoklaven) kommt es zu einer signifikanten Festigkeitssteigerung. Event. nachfolg. Wärmebehandlung.	Patent; keine Angaben über Wärmeleitfähigkeit.
Aerogel-impregnierte Faserplatten	46	NASA, USA, 1999	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Platten aus <math>Al_2O_3</math>- und <math>SiO_2</math> – Fasern</li> <li>• Aerogel</li> </ul>	Platten aus $Al_2O_3$ - und $SiO_2$ – Fasern werden mit Aerogel-Precursor infiltriert. Anschliessendes Überführen in den Gel-Zustand und Trocknung.	Für Space-Shuttle Tiles. Keine Angaben über Wärmeleitfähigkeit.
Eingeschäumte Vakuum-Isolationspaneelle mit Aerogelkern	47	Universität Würzburg, D, 1989	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerogel</li> <li>• Kunststoff-Folie</li> <li>• PU-Schaum</li> </ul>	Aerogel wird in Kunststoff-Folie eingepackt und evakuiert; diese Platte wird mit einer $CO_2$ -geblähten PU-Masse eingeschäumt.	Als Isolierung für Kühlgeräte entwickelt. Platte braucht nur halb so dick sein wie herkömmliche Isolierung.

**Tabelle 2: Übersicht konventionelle Wärmedämmstoffe**

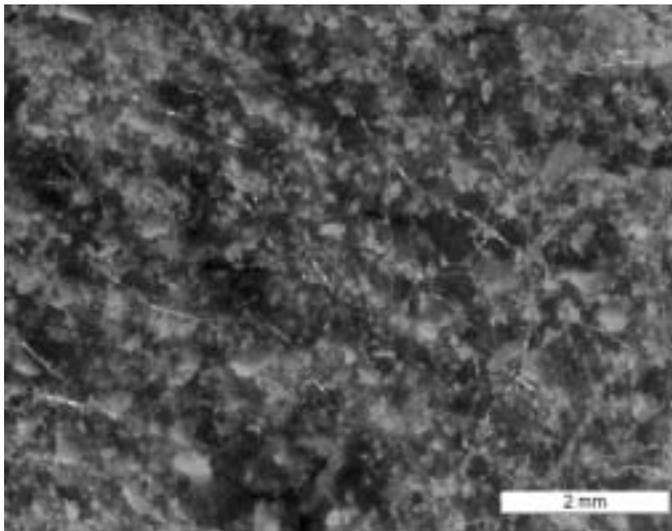
Dämmstoff	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Preis
Baumwolle	0,040	20-60	
Kork (Platten)	0,045	90-140	460 CHF/m <sup>3</sup>
Zellulosefaser Dämmstoffe oder -platten	0,040-0,045	45-100	200-300 CHF/m <sup>3</sup> (10-13 DM/m <sup>2</sup> / d=10 cm)
Holzfaser Dämmplatten	0,035-0,050	150-210	535-650 CHF/m <sup>3</sup> (39-45 DM/m <sup>2</sup> / d=10 cm)
Mineralfaser-Dämmstoffe, Steinwolle (Platten)	0,030-0,040 0,035-0,040 (0,034°)	40-120 24-165	(18 DM/m <sup>2</sup> / d=10 cm) 300-400 CHF/m <sup>3</sup>
Glaswolle	0,035-0,040 (0,031°)	12-140	
Polystyrol Partikelschaum EPS	0,035-0,040 (0,033°)	15-40	100-300 CHF/m <sup>3</sup>
Polystyrol Extruderschaum XPS	0,030 (0,029°)	25-45	200-400 CHF/m <sup>3</sup>
Polyurethan Hartschaum PUR	0,020-0,030 (0,022°)	30-90	200-400 CHF/m <sup>3</sup>
Schaumglas Foamglass	0,040-0,050	120-165	400-800 CHF/m <sup>3</sup>
Schaumglas Coriglas	0,040-0,045	130	
Schaumglasgranulat	0,060-0,070	150-260 (Schüttung)	
Schaumglas Reapor	0,078	300-500	
Perlite	0,050	70-130 (Schüttung)	100-200 CHF/m <sup>3</sup>
Phenolharz-Hartschaum	0,022	40-45	
Wacker WDS	0,020	140-220	3500-4000 DM/m <sup>3</sup> **
Wacker Vakuum Isolationspaneele	0,004 <sup>+</sup> , 0,005 <sup>++</sup>		70-90 DM/m <sup>2</sup> ** (bei d=20 mm) = 3500-4500 DM/m <sup>3</sup>
Aerogel	0,012-0,015		



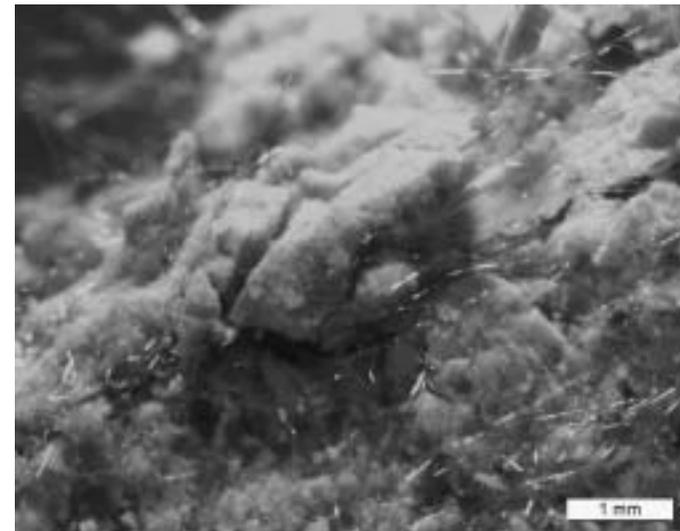
**Bild 1:** Foamglas (Pittsburg Corning) LIM1



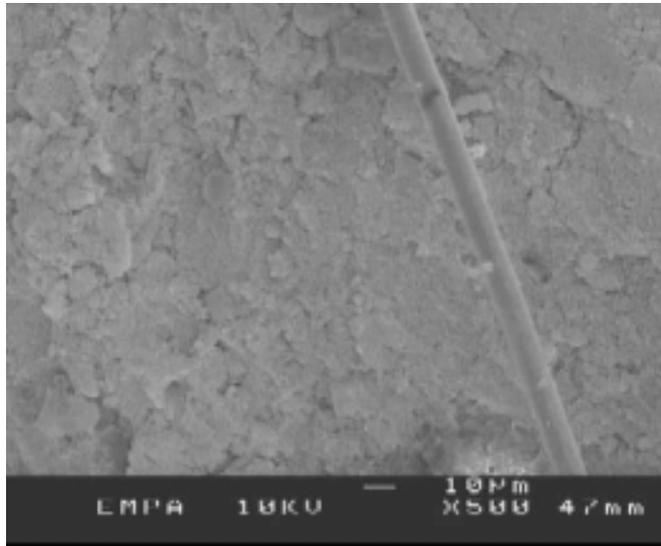
**Bild 2:** Wacker Vakuum Isolationspaneele LIM1



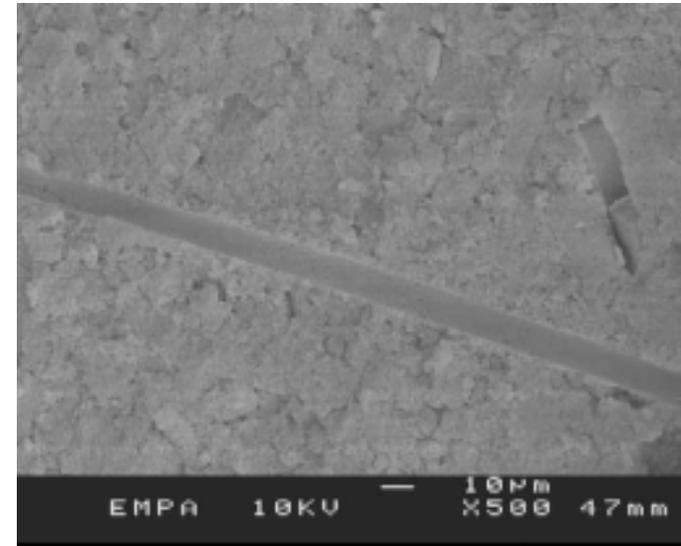
**Bild 3:** Wacker Vakuum Isolationspaneele LIM1



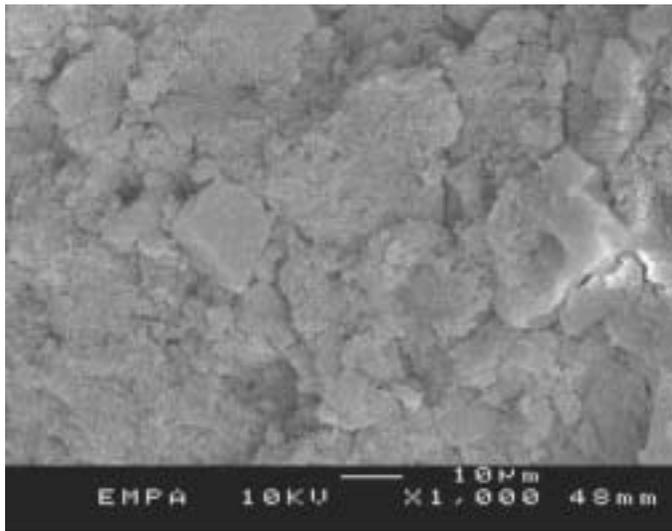
**Bild 4:** Wacker Vakuum Isolationspaneele LIM1



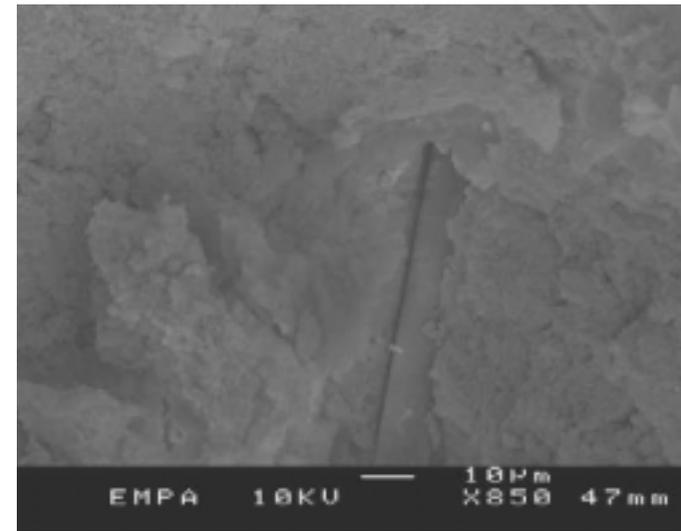
**Bild 5:** Mikropräser Wärmedämmstoff Wacker "Slimline"



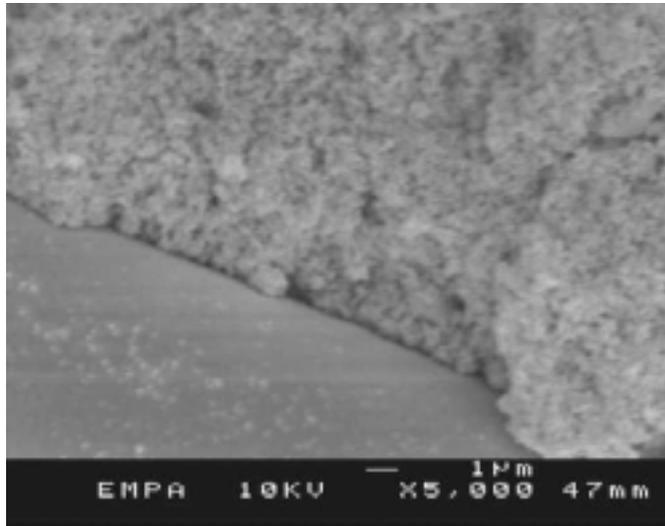
**Bild 6:** Mikropräser Wärmedämmstoff Wacker "Slimline"



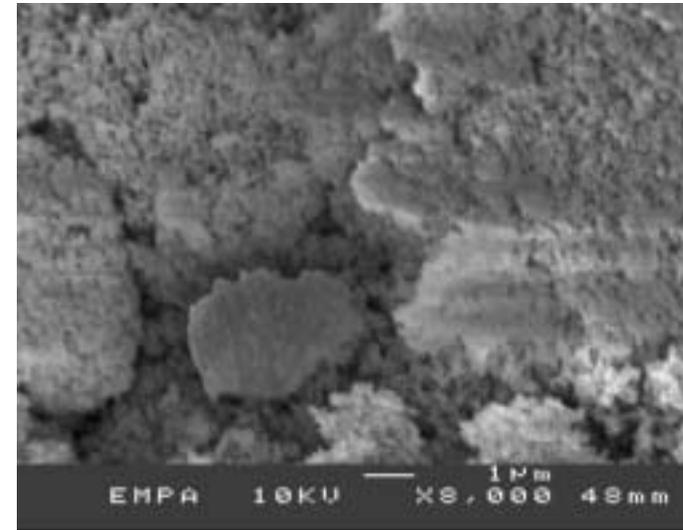
**Bild 7:** Mikropräser Wärmedämmstoff Wacker "Slimline"



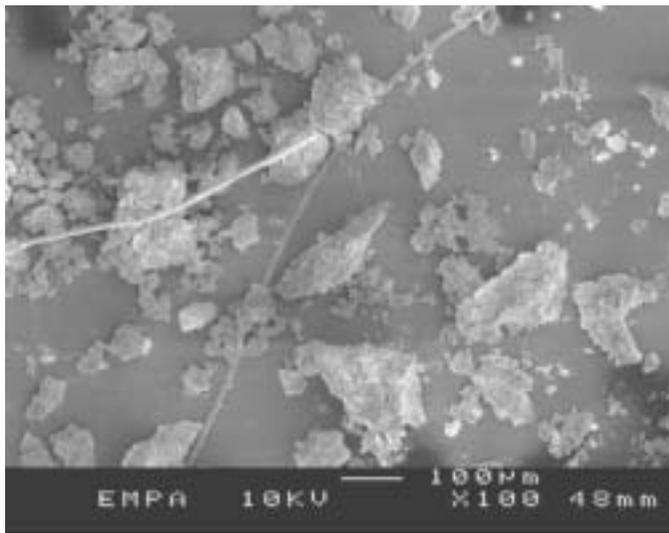
**Bild 8:** Mikropräser Wärmedämmstoff Wacker "Slimline"



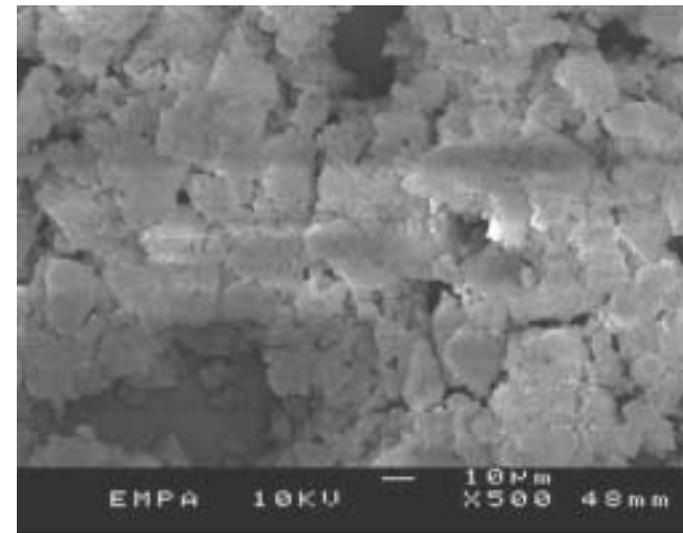
**Bild 9:** Mikropräser Wärmedämmstoff Wacker "Slimline"



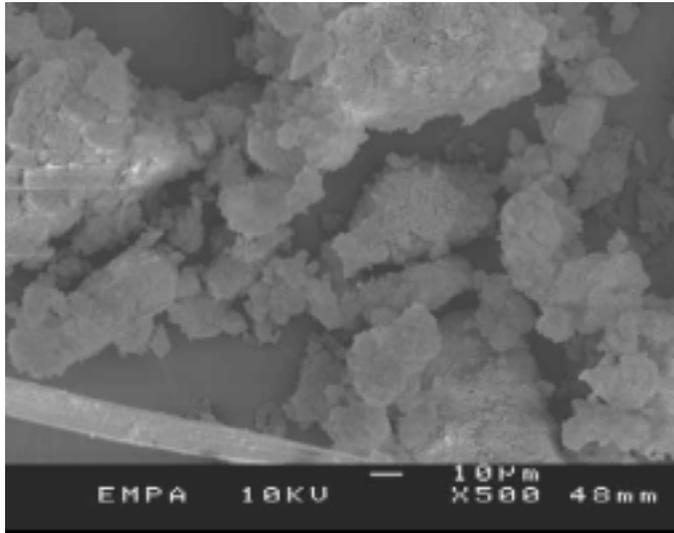
**Bild 10:** Mikropräser Wärmedämmstoff Wacker "Slimline"



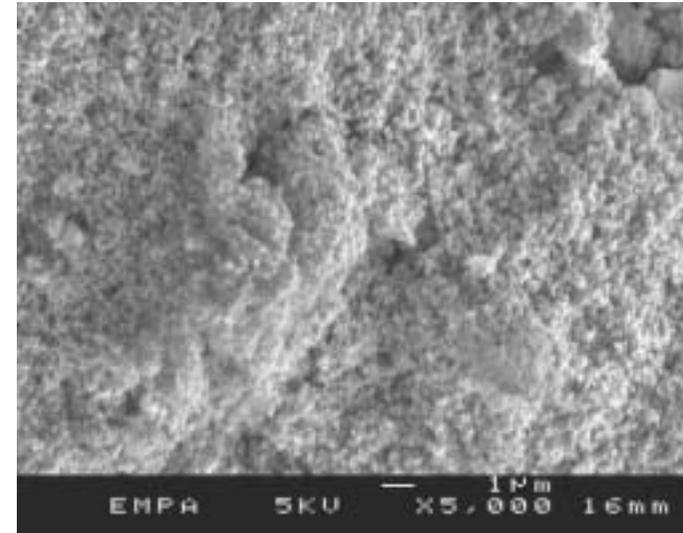
**Bild 11:** Wacker Vakuum Isolationspaneele



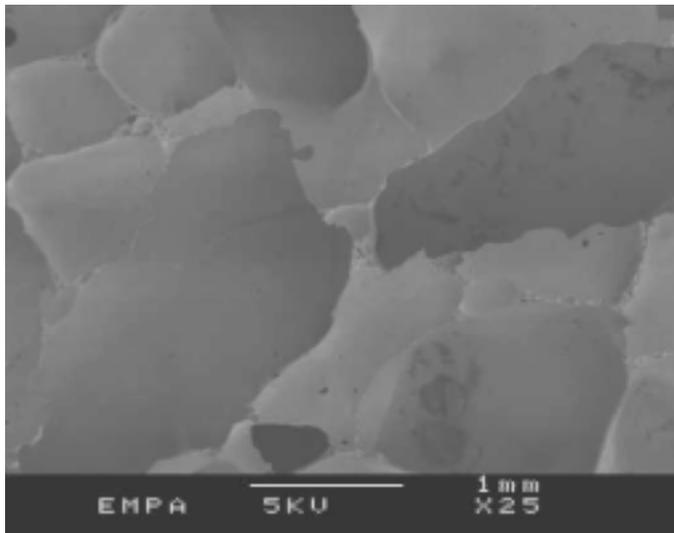
**Bild 12:** Wacker Vakuum Isolationspaneele



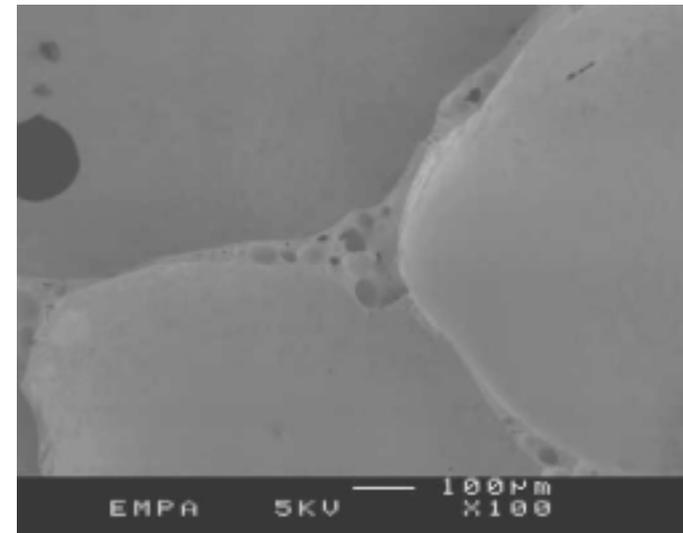
**Bild 13:** Wacker Vakuum Isolationspaneele



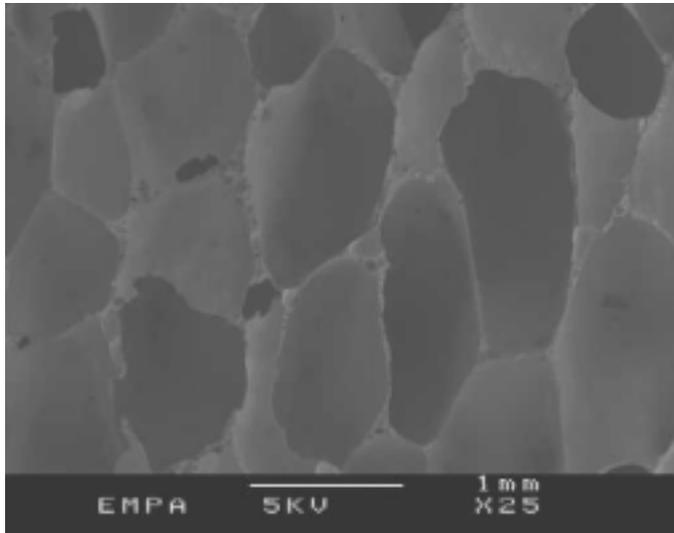
**Bild 14:** Wacker Vakuum Isolationspaneele



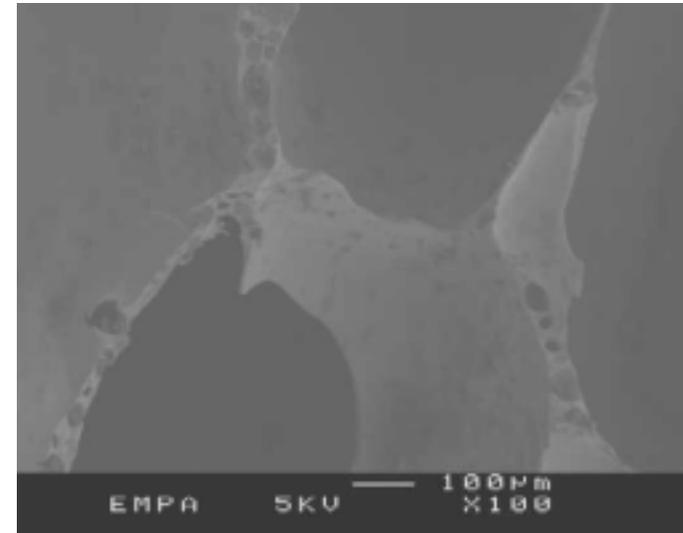
**Bild 15:** Foamglas (Pittsburg Corning); Bruchfläche



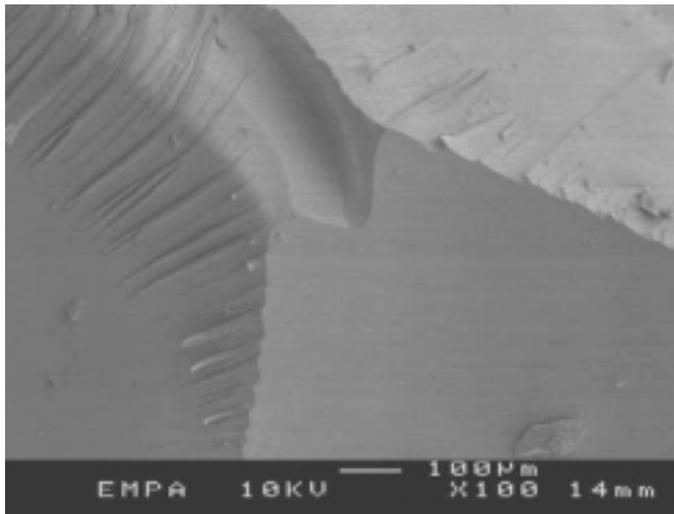
**Bild 16:** Foamglas (Pittsburg Corning); Bruchfläche



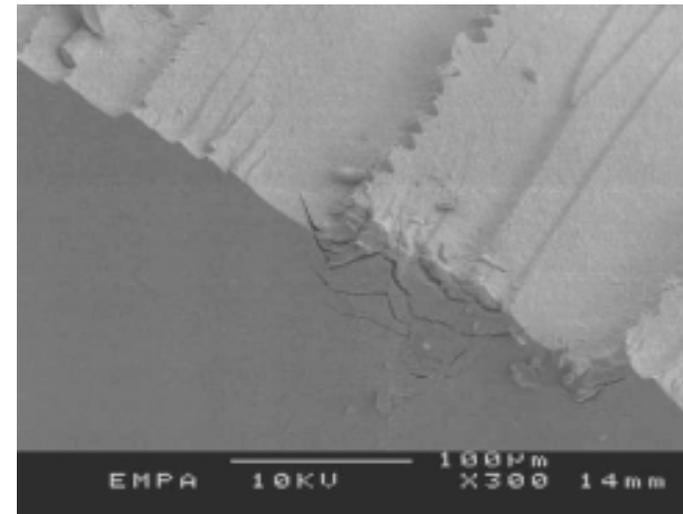
**Bild 17:** Foamglas (Pittsburg Corning); Bruchfläche



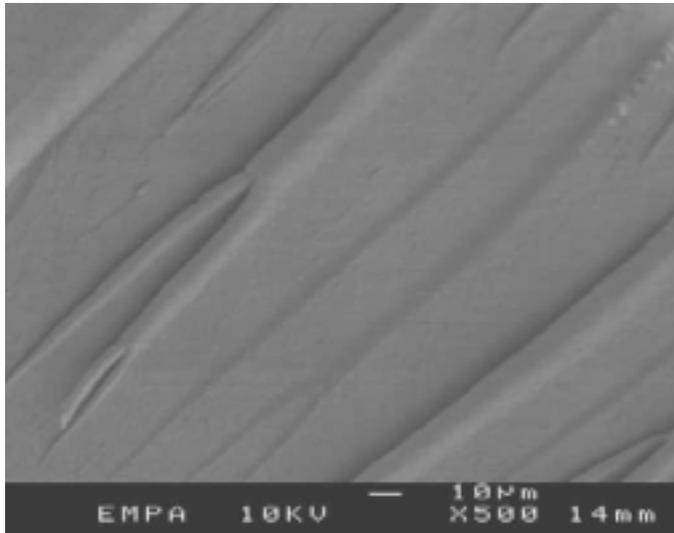
**Bild 18:** Foamglas (Pittsburg Corning); Bruchfläche



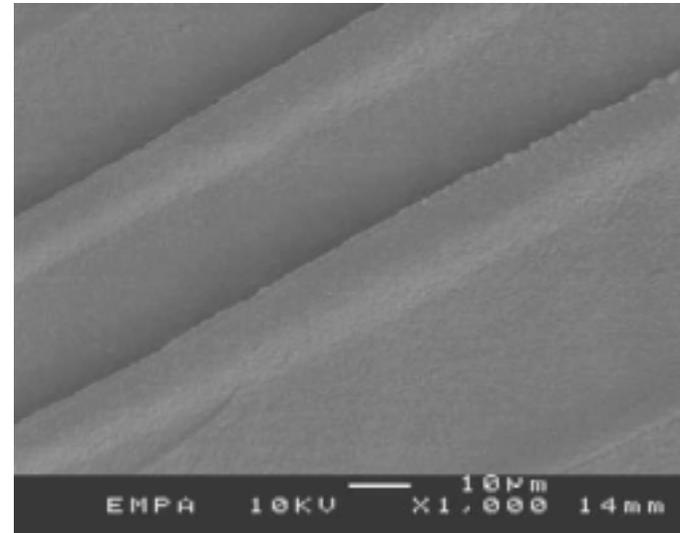
**Bild 19:** Aerogel; Bruchfläche



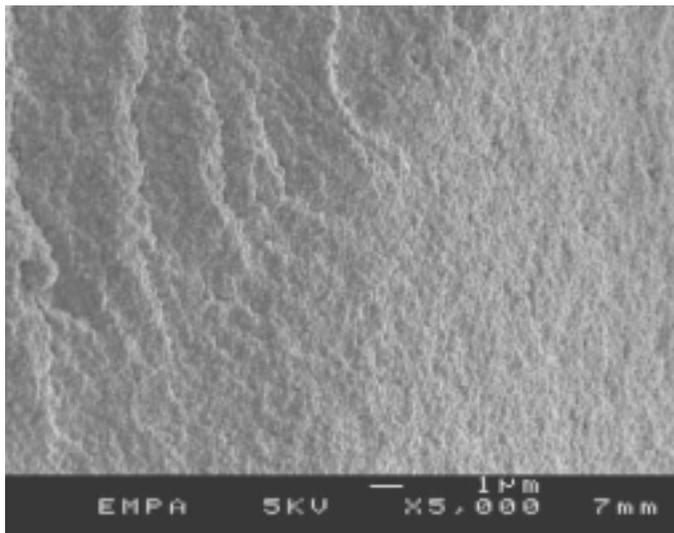
**Bild 20:** Aerogel; Bruchfläche



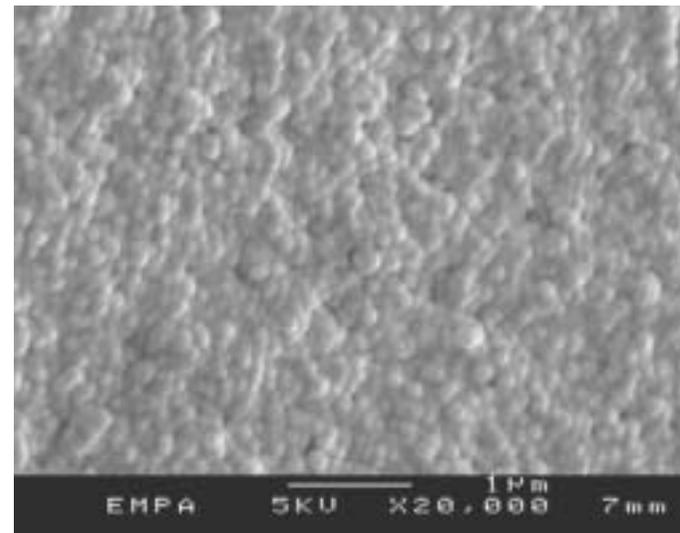
**Bild 21:** Aerogel; Bruchfläche



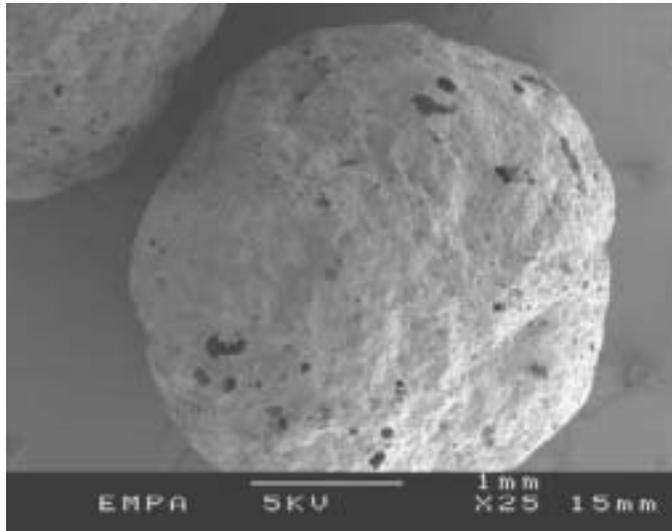
**Bild 22:** Aerogel; Bruchfläche



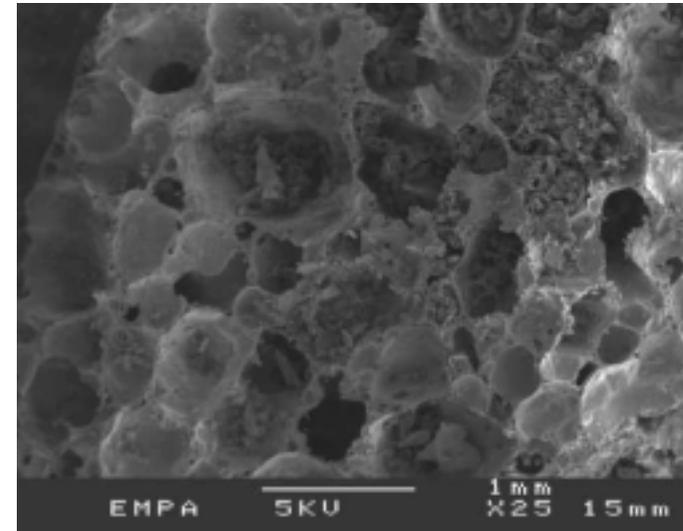
**Bild 23:** Aerogel; Bruchfläche



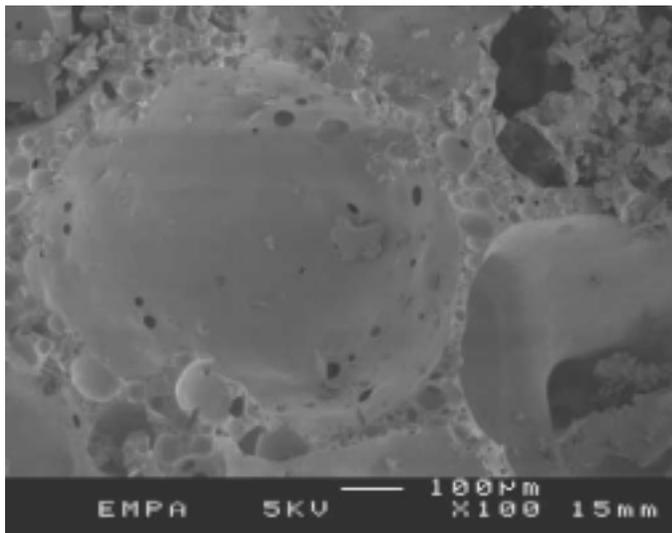
**Bild 24:** Aerogel; Bruchfläche



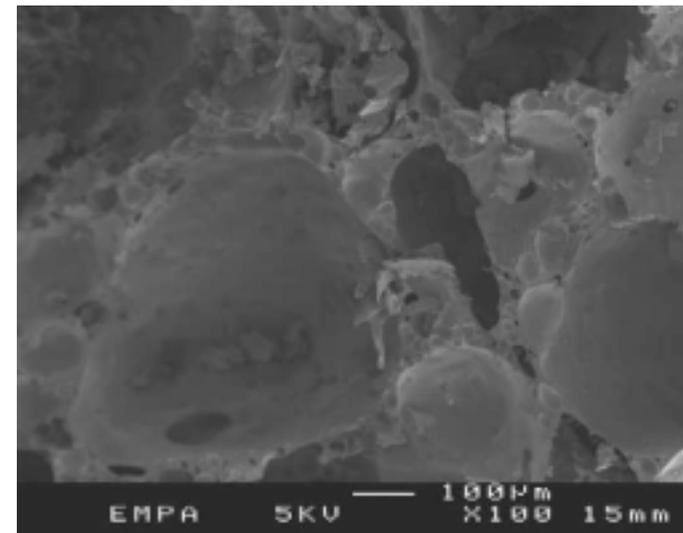
**Bild 25:** Blähglasgranulat (Poraver)



**Bild 26:** Blähglasgranulat (Poraver) Bruchfläche einer grösseren Granule (d=8-15 mm)



**Bild 27:** Blähglasgranulat (Poraver)



**Bild 28:** Blähglasgranulat (Poraver)