

Transluzente Hochleistungsdämmung aus Silika-Aerogelen für Membranen

Translucent High-Performance Silica-Aerogel Insulation for Membrane Structures

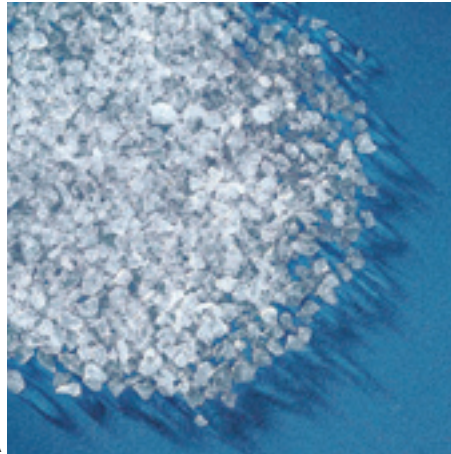
Jan Cremers, Felix Lausch

 DETAILplus: weitere Bilder:
www.detail.de/0051

Lichtdurchlässige Materialien üben eine besondere Anziehungskraft auf Architekten aus: Glas, Kunststoffe, perforiertes Blech und Metallgewebe, aber auch transluzente und transparente Membranmaterialien, die die gesamten Dachlasten abtragen können. Die meisten Anwendungen von Textilien im Baubereich dienen dem Zweck des Witterungsschutzes – also dazu, Sonne, Wind, Regen und Schnee abzuhalten und bieten den Vorteil großer Spannweiten sowie eine Vielzahl unterschiedlicher Formen. Durch die zunehmende Erforschung und Entwicklung geeigneter Solartechnologien wird sich in Zukunft das Anwendungsspektrum von Membrankonstruktionen über die Funktion des Witterungsschutzes hinaus erweitern. Passive Maßnahmen wie die verbesserte Kontrolle des solaren Eintrags (sommerlicher Wärmeschutz), Wärmedämmung (winterlicher Wärmeschutz), sowie die Optimierung von Akustik- und Tageslichteigenschaften sind die wesentlichen Arbeitsbereiche dieser Entwicklungen. Hochleistungsmembrane und Folienwerkstoffe auf der Basis von Fluorpolymeren, z.B. transluzente Membranmaterialien wie PTFE (Poly-Tetrafluorethylen), beschichtetes Glasfasergewebe oder transparente Folie aus einem Copolymer aus Ethylen und Tetrafluorethylen (ETFE) bilden Meilensteine auf der Suche nach hochleistungsfähigen Materialien für Gebäudehüllen. Eine unserer vielversprechendsten Entwicklungen im Bereich der Wärmedämmung für transluzente Folienkonstruktionen soll in diesem Artikel vorgestellt werden. Als Dämmmaterial wird in diesem Fall Silika-Aerogel in granularer Form verwendet. Aerogel hat nicht nur hervorragende wärmedämmende Eigenschaften, sondern ist im Gegensatz zu herkömmlichen Dämmmaterialien auch transluzent.

Silika-Aerogele in Membrankonstruktionen

Im Vergleich zu Glas haben pneumatisch gestützte und mechanisch gespannte Membrankonstruktionen den Vorteil ihres ca. um den Faktor 40 geringeren Gewichts. Folglich kann der Materialaufwand und damit das optische Erscheinungsbild der Tragkon-

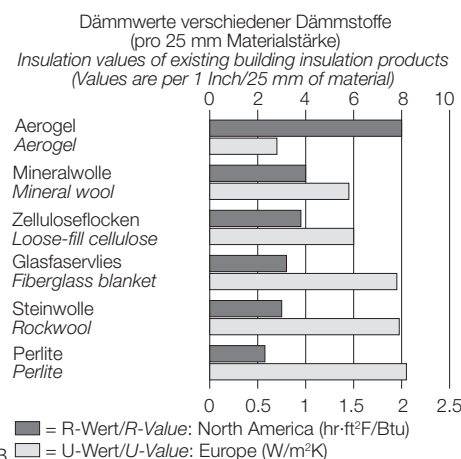


A

struktion sehr stark reduziert werden. Durch die geringen Materialdicken von zum Teil weniger als 0,2 mm können Membrankonstruktionen jedoch trotz der geringen Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen keine guten Wärmedämmeigenschaften mitbringen. Die Lösung liegt entweder in mehrlagigen Konstruktionen mit Luftzwischenräumen oder, wenn höhere Anforderungen gestellt werden, in der Verwendung von opaken Dämmmaterialien wie z.B. Mineralwolle oder einer transparenten bzw. transluzenten Wärmedämmung. Bei einer Folienkonstruktion sind opake Dämmmaterialien meist unerwünscht. Aus unserer Sicht ist daher eine der vielversprechendsten transluzenten Varianten die Verwendung von Silika-Aerogelen.

Eigenschaften und Prinzipien der Anwendung

Silika-Aerogele sind organische Siliziumverbindungen mit einer Granulatgröße von 0,5–4,0 mm, einer Porengröße von ca. 10–100 nm und einem Porenvolumenanteil von mehr als 80%. Der Lichttransmissionsgrad einer Aerogelschicht beträgt ca. 80% pro cm Einbaustärke, wobei die Dämmeigenschaften bezogen auf die Schichtstärke doppelt so gut sind wie die von Polystyrolschaum vergleichbarer Dicke. Zusätzlich ist das Material unbrennbar, umweltfreundlich, recycelbar, temperaturbeständig bis 600°C, UV-beständig, hydrophob und langzeitstabil, womit es sich besonders für die Anwen-



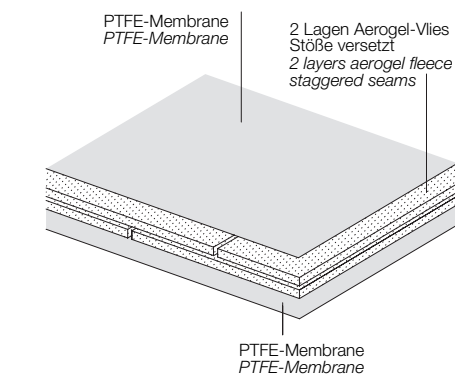
A Silika-Aerogel in granularer Form
B Wärmedurchgangskoeffizient verschiedener Dämmstoffe
C–E Aerogel-Vlies
E Eigenschaften transluzenter Aerogel-Vliesmatten, Fa. Cabot

A Granular silica aerogel
B Heat transmission coefficient of different insulation materials
C–E Fibrous formation aerogel
E Properties of translucent aerogel blankets, Cabot Corporation

ding im Baubereich eignet. Die Rohdichte liegt zwischen 90 und 100 kg/m³, die innere Oberfläche bei 600–800 m²/g, die Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,018 W/mK. Der ursprüngliche Herstellungsprozess war sehr aufwändig und teuer, da die so genannte »überkritische Trocknung« einen wichtigen Fertigungsschritt darstellte. Erst im letzten Jahrzehnt konnte das Verfahren so stark vereinfacht werden, dass einer weiteren Verbreitung dieser Materialgruppe fortan weniger im Wege zu stehen scheint. Aerogele sind nun in einem kontinuierlichen Fertigungsprozess herstellbar und – im Gegensatz zu den Varianten der ersten Generation – hydrophob und deutlich preisgünstiger. Silika-Aerogele sind als Pulver, Granulat und monolithische Blöcke verfügbar, wobei Pulver nur für opake, Granulate aber auch für den Einsatz als transluzente Wärmedämmung in pneumatisch gestützten Membrankonstruktionen in Frage kommen. Neben den energetischen Aspekten sind die gestalterischen Qualitäten von Belang. So sorgen die lichtstreuenden Eigenschaften des Aerogels nicht nur für eine homogene Untersicht, sondern auch für angenehme, blendfreie Lichtverhältnisse im Innenraum.

Aerogel-Füllung von Pneus

Für eine Anwendung im Bereich der pneumatischen ETFE-Kissenkonstruktionen, bei der die Ausnutzung des natürlichen Lichts eine Rolle spielt, wird daher in erster Linie transluzentes Aerogel gefragt sein. Bei einer Einbaustärke von lediglich 3 cm erreicht man einen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von 0,57 W/m²K bei einem Lichttransmissionsgrad der Schicht von 45% (vgl. Abb. F) Je nach gewünschtem Erscheinungsbild kann die Aerogelschicht in die Ober- oder Unterlage eines ETFE-Kissens eingefüllt werden. Hierfür wird die jeweilige Schicht »aufgedoppelt«, das heißt anstatt einer werden zwei Lagen ETFE-Folie vorgesehen, zwischen die das Aerogel eingebracht werden kann. Die Menge des benötigten Aerogels kann bei der Zuschnittsermittlung der ETFE-Lagen, die für die Herstellung einer 3-D-Form nötig ist, berechnet und



Eigenschaften im unkomprimierten Zustand

Properties in uncompressed state

Dicke / Thickness	3,5 mm und/and 8 mm
Rollenbreite / Width of roll	56 cm
Rollenlänge / Length of roll	bis 100 m up to 100 m
Wärmeleitfähigkeit	21,0 mW/mK bei einer Durchschnittstemp. von 12,5 °C
	23,5 mW/mK bei einer Durchschnittstemp. von 37,5 °C
	26,0 mW/mK bei einer Durchschnittstemp. von 62,5 °C
	<i>Thermal conductivity</i>
	21,0 mW/mK at an average temperature of 12,5 °C
	23,5 mW/mK at an average temperature of 37,5 °C
	26,0 mW/mK at an average temperature of 62,5 °C
	<i>Rohdichte</i>
Bulk density	ca. 75 kg/m ³ approx. 75 kg/m ³

so exakt bestimmt werden. Das eingebrachte Material wird beim Einbau der ETFE-Kissen gleichmäßig verteilt, sodass sich eine konstante Schichtdicke ergibt. Stabilisiert wird diese durch den im Kissen anliegenden Überdruck. Im Falle einer Kissenkonstruktion mit einer dritten (Mittel-) Lage wäre es ebenfalls denkbar, die mittlere Lage als dämmende Ebene auszubilden. ETFE-Folie ist relativ dampfdiffusionsoffen und lässt folglich geringe Mengen Wasserdampf in die dämmende Ebene eindringen. Das Wasser wird allerdings dank der hydrophoben Eigenschaften des Aerogels nicht am Granulat gebunden und kann wieder aus der dämmenden Ebene diffundieren. Aufgrund der guten Dämmeigenschaften des Aerogels wird die Innenseite der Konstruktion jedoch nicht so kalt, dass dort Tauwasser anfallen kann.

Aerogel-Vlies

Bei mechanisch gespannten Konstruktionen kommt aufgrund des fehlenden stabilisierenden Überdrucks eine weitere Variante der Aerogel-Dämmung zur Ausführung. Dabei handelt es sich um ein aus Zweikomponentenfasern bestehendes Vlies, welches mit Aerogel-Partikeln versetzt ist. Es entsteht eine flexible und druckfeste Matte, die sehr gute Dämmeigenschaften aufweist. (Abb. C–E). Denkbar ist die Verwendung dieses Vlieses sowohl in Verbindung mit transparenten ETFE-Folien als auch mit transluzenten Membranmaterialien wie PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe. Das transluzente Vlies wird dabei vorzugsweise direkt auf der unteren Membranlage eingebaut und reduziert die Lichttransmission nur unerheblich. Im Vergleich zur Verwendung von granularem Material entfällt die Schwierigkeit der gleichmäßigen Verteilung. Gegenüber der Anordnung von Granulat, mit dem eine sehr homogene Optik erreicht wird, können sich allerdings die Stoßkanten der einzelnen Bahnen der Rollenware optisch störend abzeichnen. Vor allem bei Folienkonstruktionen aus transparentem ETFE kann dieser Effekt unerwünscht sein. Für eine solche Anwendung sind gegebenenfalls

zwei oder mehrere Lagen des Vlieses mit versetzten Stößen zu empfehlen. Dies ist auch sinnvoll, um eine Schwächung in der Dämmschicht durch die linearen Wärmebrücken der stumpfen Stöße zu vermeiden. Der gewünschte U-Wert kann durch unterschiedlich verfügbare Vliesstärken und deren mögliche mehrlagige Kombination in feinen Schritten eingestellt werden.

Anwendungsbeispiel der Aerogel-Kissen

Für den Wettbewerbsbeitrag des Georgia Institute of Technology für den Solar Decathlon 2007 hat die SolarNext AG in Zusammenarbeit mit der Hightex GmbH ein Konzept für eine hochgedämmte, semitransparente Deckenkonstruktion entwickelt und umgesetzt, bei welcher die hervorragenden energetischen wie ästhetischen Eigenschaften von Aerogel zum Tragen kamen. Das U.S. Department of Energy – Office of Energy Efficiency and Renewable Energy hat 2007 zum dritten Mal (nach 2002 und 2005) diesen Wettbewerb für energieoptimiertes Bauen ausgeschrieben. Bewerber konnten sich erstmals nicht nur Universitäten aus den USA, sondern aus der ganzen Welt. Die Entwürfe sollten interdisziplinär an den Hochschulen erstellt werden. Ziel war es, eine möglichst energieeffiziente, solarbetriebene und architektonisch ansprechende Wohneinheit von ca. 70 m² Grundfläche zu planen und anschließend in Eigenarbeit mit den Studenten umzusetzen. Alle 20 zugelassenen Pavillons wurden für ihre Bewertung in Washington an der Mall aufgebaut (Abb. G). Bewertungskriterien waren unter anderem Architektur, Konstruktion, Technik, Beleuchtung und die Energiebilanz der Wohneinheiten. Hierbei wurde vor allem auf den intelligenten und innovativen Einsatz neuer Materialien sowie den sinnvollen Umgang mit bewährten Baustoffen geachtet.

Die einzelnen Elemente des von SolarNext/Hightex für den Wettbewerb entwickelten Dachs wurden im Werk soweit als möglich vorgefertigt, da es das Ziel war, den Studenten eine eigenständige Montage unter Anweisung eines geschulten Supervisors

zu ermöglichen. Um die konstruktiven Elemente des Dachs so einfach wie möglich gestalten zu können, wurde die Konstruktion in zwei nach Funktionen getrennte Ebenen geteilt. Die untere Ebene besteht aus hochdämmenden Paneelen, die zugleich den Raumabschluss bilden, während die obere Ebene lediglich dem Witterungsschutz dient. Die untere Ebene umfasst neun Deckenpaneele mit einer Größe von 4 x 1,5 m. (Abb. H, I) Diese Deckenpaneele bestehen aus einer im Querschnitt optimierten, thermisch getrennten Rahmenkonstruktion aus Holz, welche mit ETFE-Folie bespannt und anschließend mit Aerogel befüllt wurde. Es entsteht eine Lichtdecke mit einem über die gesamte Sichtfläche des Paneeles homogenen Erscheinungsbild bei einem Lichtdurchlassgrad von ca. 20 % und einem U-Wert von ca. 0,3 W/m²K. Für den Transport wurden die neun Paneele im Werk komplett vorgefertigt. Um dem engen Zeitplan Rechnung zu tragen, wurde die Unterkonstruktion der Elemente soweit vormontiert, dass die Paneele lediglich eingehoben und fixiert werden mussten. Die obere Ebene des Dachs ist eine mit ETFE bespannte Bogenkonstruktion. Da diese von der dämmenden Ebene unabhängig ist und eine geringe Spannweite von 1,5 m aufweist, konnte sie entsprechend einfach und mit reduzierten Querschnitten realisiert werden, was sowohl für den Transport zur Baustelle als auch für die Handhabung während des Einbaus von Vorteil war. Resultat ist eine verhältnismäßig leichte und hochdämmende Deckenkonstruktion, die aufgrund ihrer Transluzenz das zur Verfügung stehende Tageslichtangebot optimal ausnutzen kann. Prinzipiell ist bei transluzenten Wand- oder Dachelementen, die mit Aerogel gedämmt sind, eine Verschattung ratsam, da es sonst zu einem erhöhten Energieeintrag kommen kann. Im Fall der transluzenten Decke für den Pavillon des Georgia Institute of Technology wurde ein Großteil der Strahlung von den über der Decke installierten Photovoltaik-Elementen ausgeblendet und zusätzlich ein beweglicher Sonnenschutz installiert.

Materialstärke Aerogelgranulat Material thickness Aerogel granulate	Eigenschaften Properties		
[cm/Inches] [cm/Inches]	Lichttransmission Light transmission	g-Wert g-value	U-Wert [W/m ² K] U-value [W/m ² K]
1,3 cm/0,5"	73 %	0,73	1,4
2,5 cm/1"	53 %	0,52	0,7
3,1 cm/1,25"	45 %	0,43	0,57
3,8 cm/1,5"	39 %	0,39	0,47
5 cm/2"	28 %	0,26	0,35
F 6,4 cm/2,5"	21 %	0,21	0,28



Architects are intrigued by materials permeable to light, above all by translucent and transparent membrane materials which can also withstand roof loads. Textiles used in construction are typically employed as weather protection due to their ability to span large distances and to take on any number of shapes. As a result of increased research and development of suitable solar technologies, the range of tensile-structure applications will increasingly extend beyond weather protection. These developments deal with passive measures such as improving control of solar gain, thermal insulation, as well as optimising acoustic and daylight characteristics. High-performance membranes and foils, e.g. translucent membrane materials such as PTFE-coated, glass-fibre fabric or transparent foil (ETFE) constitute milestones in the quest for high-performance materials for building envelopes. We present one of our most promising thermal-insulation developments for translucent foil structures. It involves using granular silica aerogel as insulation material. Not only does aerogel have excellent thermal-insulation properties, but it is translucent, as well.

Silica Aerogels in Membrane Structures
At approximately one fortieth the weight of comparable structures employing glass, inflated and mechanically tensioned membrane structures are inarguably lightweight. The amount of material required and the silhouette of the supporting structure are minimised. But due to the optimised thicknesses – some under 0.2 mm thick – and despite the low thermal conductivity of synthetic materials, membrane structures lack favourable thermal insulation properties. Rectifying this deficit necessitates either working with multi-layer assemblies and air spaces or, if higher values are specified, utilising opaque insulation materials, such as mineral wool or a transparent or translucent thermal insulation. Opaque insulation materials are typically undesirable for a foil structure; silica aerogel is one of the most promising translucent options.

Properties and Principles of Utilisation
Silica aerogels are organic silicon bonds with

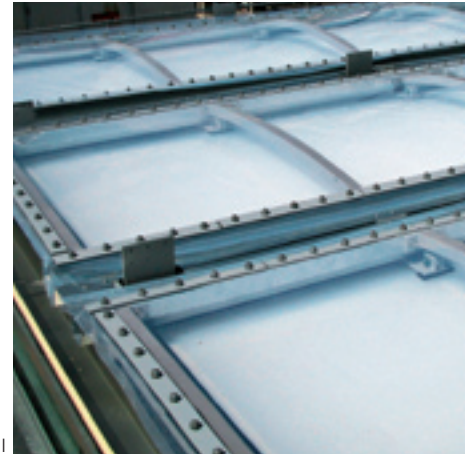
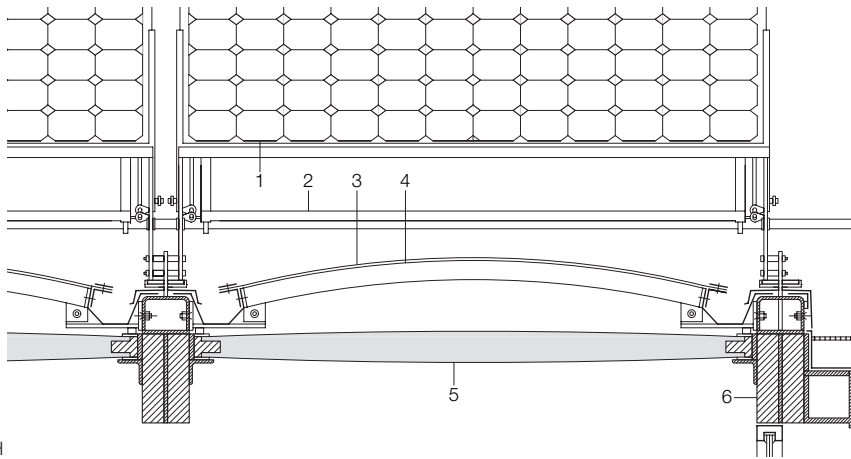
a granule size of 0.5–4.0 mm, with pore diameters of 10–100 nm and a pore volume fraction of more than 80%. The light transmission of an aerogel layer is approximately 80% per cm installed, whereby the insulating properties, in correlation to the thickness of the layer, are twice as good as those of polystyrene foam. In addition, this material is incombustible, sustainable, recyclable, heat resistant to 600°C, UV resistant, hydrophobic and exhibits long-term stability, making it particularly well-suited to use in construction. The original manufacturing process was elaborate because it involved “supercritical drying”. In the last decade the process was simplified, enabling a wider distribution of this group of materials. Silica-aerogels are available as fine particles, granulate and monolithic blocks. Aerogel’s light-scattering properties not only provide for a uniform underside, but also for comfortable, glare-free indoor light conditions.

Aerogel Filling in Pneumatic Structures
For utilisation in pneumatic ETFE cushions – where exploiting natural light plays an important role – translucent aerogel is a suitable selection. A thickness of only 3 cm has a thermal transmission coefficient (U-value) of 0.57 W/m²K, and the light transmission factor is 45% (compare ill. 6). The aerogel stratum can be installed in the top or bottom layer of the ETFE cushion. To this end, the respective layer is “doubled-up”: instead of a single layer, two layers of ETFE foil are specified, between which the aerogel is introduced. The precise amount of aerogel required is determined by consulting the cut plan for the ETFE layers. The material introduced in the ETFE cushion is evenly distributed; a constant layer thickness results. This will be stabilized by the pressure in the cushion. If the cushion has a third (middle) layer, it would also be possible to introduce insulation here. ETFE foil is relatively open to moisture diffusion and, as a result, allows small amounts of water vapour to penetrate the insulating level. But thanks to aerogel’s hydrophobic properties, the water is not absorbed by the granules and can subsequently escape from the panel.

Aerogel Fleece

Due to the absence of a stabilizing pressurization in mechanically tensioned structures, another type of aerogel insulation is employed. This version is a fleece made of two-component fibres which is sprinkled with aerogel particles. This produces a flexible and pressure-resistant mat which has highly favourable insulating properties. This fleece can be used both in combination with transparent ETFE foils and with translucent membrane materials such as PTFE-coated, glass-fibre fabric. The translucent fleece is ideally installed directly on the lower membrane layer and only negligibly reduces light transmission. In contrast to granules with which a uniform appearance is achieved, here the seams of the individual batts can detract from the appearance. Particularly for foil structures of transparent ETFE, this effect may be undesirable. For this type of application, where appropriate, two or more layers of fleece with staggered seams are recommended. This is advisable to avoid compromising the strength of the insulation layer through linear thermal bridges at the butt seams.

Employing Aerogel Cushions – A Case Study
Georgia Institute of Technology’s entry to the competition Solar Decathlon 2007, developed and realized by SolarNext AG in cooperation with Hightex GmbH, implements a concept for a highly insulated, semi-transparent roof and showcases aerogel. In 2007, the U.S. Department of Energy sponsored a competition for energy-optimised construction. The designs were to be developed by interdisciplinary teams at universities. The goal was to design and realise an optimised, energy-efficient, solar-powered and architecturally appealing residential unit. Among the evaluation criteria were architecture, structure, technology, lighting and the energy balance. Emphasis was placed on intelligent and innovative utilisation of new materials as well as on sensible usage of established building materials. The individual roof elements, developed by SolarNext/Hightex expressly for the competition, were prefabricated to as great a degree as possible in the factory, because the aim was



that the students assemble it on their own. The structure was divided in two levels, separated by function. The lower level consists of highly insulated panels which also serve as the underside of the ceiling, while the upper level functions solely as weather protection. The lower level is comprised of nine ceiling panels measuring 4 x 1.5 m. These ceiling panels are made of a thermally separated framework with optimized cross-section which is tensioned with an ETFE foil and then filled with aerogel. The result is an illuminated ceiling with a uniform appearance over the panel's entire visible surface, with a light transmission factor of about 20% and a U-value of approximately 0.3 W/m²K. The upper level of

the roof is an ETFE-tensioned arch: because it is independent of the insulating level and only spans 1.5 m, it enables a correspondingly simple realisation and minimised cross sections. It is generally advisable to provide shading devices for translucent wall or roof elements which are insulated with aerogel because otherwise there will be increased energy input. The translucent ceiling for the GIT pavilion did this by shielding a large portion of the radiation with photovoltaic elements mounted on the roof. In addition, adjustable sun protection was installed. The result is a lightweight, highly insulated roof which, due to its translucence, optimally exploits the available daylight.

Dr.-Ing. Jan Cremers ist Director Envelope Technology, und Vorstand (CEO) der SolarNext AG/Hightex Group, Rimsting.
Dipl.-Ing. Felix Lausch ist Architekt, Projektleiter Envelope Division der SolarNext AG/Hightex Group, Rimsting.

Jan Cremers, Dr.-Ing., is director of envelope technology and CEO of SolarNext AG/Hightex Group, Rimsting.
Felix Lausch, Dipl.-Ing., is architect and project manager in the envelope division at SolarNext AG/Hightex Group, Rimsting.

Georgia Institute of Technology, College of Architecture,
Projektleiter/ Project leaders: Ruchi Choudhary, Russell Gentry, Chris Jarrett, Franca Trubiano
Dach-Team/Roof team: Jason Brown, Vishwadeep Deo, Bradley Dolphyn, Matthew Erwin, Alstan Jakubiec, Jamie O'Kelley, Arseni Zaitsev



- F Eigenschaften von transluzentem Aerogelgranulat, Fa. Cabot
G-K Solar Decathlon Pavillon 2007 des Georgia Institute of Technology
H Schnitt Dachkonstruktion Maßstab 1:20
1 Solarpaneel
2 Sonnenschutz
3 Witterungsschutz ETFE-Folie 0,25 mm
4 Stahlrohr verzinkt □ 50 x 50 mm
5 Aerogelpaneel 4,00 x 1,50 m
ETFE-Folie 0,25 mm
Silika-Aerogel 70 mm
ETFE-Folie 0,25 mm
Holzrahmen Fichte 60 x 60 mm
6 Tragkonstruktion Holzbalken 60/240 mm
I Dachansicht der eingebauten Aerogelpaneele mit darüberliegender ETFE-Folienschicht
K Schlafräum mit Aerogel-Deckenpaneelen

- F Properties of translucent aerogel granulate, Cabot Corporation
G-K Georgia Institute of Technology's Solar Decathlon Pavilion 2007 Georgia Tech
H roof section scale 1:20
1 solar panel
2 sun protection
3 weather protection: 0.25 mm ETFE foil
4 50/50 mm steel SHS, galvanized
5 4.00/1.50 m aerogel panel
0.25 mm ETFE foil
70 mm silica aerogel
0.25 mm ETFE foil
60/60 mm softwood frame
60/240 mm timber beam
I The aerogel panels with ETFE foil above
K Bedroom with aerogel ceiling panels