

Lorenz Ratke

Herstellung und Eigenschaften eines neuen Leichtbetons: Aerogelbeton

Die Dispergierung von superhydrophobem Aerogelgranulat in konventionelle Zement- oder Betonmischungen erzeugt einen Leichtbeton mit außergewöhnlichen Eigenschaften: gute Wärmedämmung, schallisierend, Brandschutz der Klasse F120 und besser, bewehrbar und leicht mechanisch zu bearbeiten. Der Aufsatz beschreibt die Herstellung und einige Eigenschaften dieses neuartigen Baustoffs.

Fabrication and Properties of a New Light Weight Concrete: Aerogel Concrete

The distribution of super hydrophobic aerogel in particulate form into conventional cement or concrete mixtures produces a light weight concrete with extraordinary properties: good heat and sound insulation, fire protection of the class F120 and better, armorable and easy workable. The paper describes the fabrication and some properties of this new construction material.

1 Einleitung

Leichtbetone werden seit Jahrzehnten hergestellt und immer weiter verbessert, sowohl im Hinblick auf statische und dynamische mechanische Eigenschaften, Verstärkung durch geeignete Gewebe oder Fasern als auch physikalische Eigenschaften wie Wärmeleitung, Durchlässigkeit für Feuchtigkeit, Schalldämmung u. v. a. m. [1]. Außer den weit verbreiteten und am Markt üblichen Gasbetonen gibt es noch zahlreiche andere Entwicklungen für hochfeste Leichtbetone [2] bis [6]. Hier wird über eine Entwicklung berichtet, die als Nebenprodukt anderer Forschungsarbeiten am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt erfolgte, nämlich die Entwicklung eines Verbunds aus Zement, Gips oder einer Zement-Sandmischung mit einem Aerogelgranulat. Dabei wurden mehrere Ziele verfolgt. Einerseits einen Baustoff mit geringem spezifischen Gewicht zu erzeugen, zum anderen spezielle Eigenschaften wie hohe Wärme- und Schalldämmung zu erzielen. Zur Herabsetzung der Dichte sollten leichte Zuschläge in einer Zementmischung dispergiert werden, damit sie ähnlich wie Gaspartikel wirken. Eine ausreichend hohe Menge der Zuschläge sollte es ermöglichen, die Eigenschaften entsprechend den Anforderungen nach Brandschutz und Schalldämmung einzustellen. Eine Realisation dieser Idee ist, Aerogele in Zementmischungen einzurühren

Aerogele sind ultraleichte, hochporöse Werkstoffe, die zum größten Teil aus Luft bestehen. Sie werden über

ein Sol-Gel Verfahren hergestellt. Zwei Komponenten reagieren in einer wässrigen Lösung chemisch miteinander. Aus den Reaktionsprodukten bilden sich Teilchen und es entsteht ein Sol. Ein Sol ist eine Dispersion, in der ein Bestandteil in Form von kolloidalen Teilchen in einer Flüssigkeit (Dispersionsmittel) fein verteilt ist. Kolloidale Teilchen haben typischerweise einen Durchmesser im Bereich zwischen etwa 1 bis 1000 nm. Sie liegen im Sol zunächst beliebig verteilt vor und können sich durch verschiedenste Prozesse zu einem offenporigen Netzwerk zusammenlagern, z. B. durch Brownsche Bewegung. Wenn die kolloidalen Teilchen ein Netzwerk gespannt haben, das die Gefäßwände berührt, hat sich ein so genanntes Gel ausgebildet. Die meisten gelartigen Substanzen schrumpfen beim Trocknen an Luft auf einige Prozent ihres Ausgangsvolumens. Trotzdem bestehen luftgetrocknete Gele noch zu 50% aus Hohlräumen, den Poren. Daher ist ihre Dichte auch nur etwa halb so groß wie die vergleichbarer nicht poröser Materialien.

Um Aerogele zu erhalten, muss den nassen Gelen die Flüssigkeit so entzogen werden, dass das feste Netzwerk der kolloidalen Teilchen möglichst unverändert erhalten bleibt. Ein Standardweg dies zu erreichen, ist die so genannte überkritische Trocknung [7]. Temperatur und Druck werden in einem Behälter, in dem sich das nasse Gel in einer Flüssigkeit befindet, über den kritischen Punkt der Flüssigkeit hinaus erhöht. Aus der Flüssigkeit und ihrem Dampf entsteht ein überkritisches Fluid, bei dem der Unterschied zwischen Flüssigkeit und Gas aufgehoben ist. Es gibt keine Grenzfläche mehr zwischen Flüssigkeit und Gas und damit auch keine Menisken und Oberflächenspannungen [7], [8]. Die Trocknung erfolgt dann über einfaches Ablassen des überkritischen Fluids aus dem Druckbehälter bei konstanter Temperatur. Eine andere Möglichkeit besteht darin, nasse Gele durch geeignete chemische Substanzen so an der Oberfläche zu modifizieren, dass sie die bei der Trocknung entstehenden Schrumpfspannungen elastisch aufnehmen können und nach der Trocknung wieder in die Ursprungsform relaxieren [7] bis [9]. Bild 1 zeigt schematisch den Herstellungsprozess eines anorganischen Aerogels in wenigen Schritten. Als Alkoxid wird zum Beispiel Tetraethylorthosilikat (TEOS) verwendet. Mischung von TEOS, Alkohol, Wasser und einem geeigneten Katalysator (Salpetersäure, Salzsäure) initiiert eine Polykondensation der Silane zu SiO₂-Netzwerken und Teilchen. Vernetzung der Teilchen er-

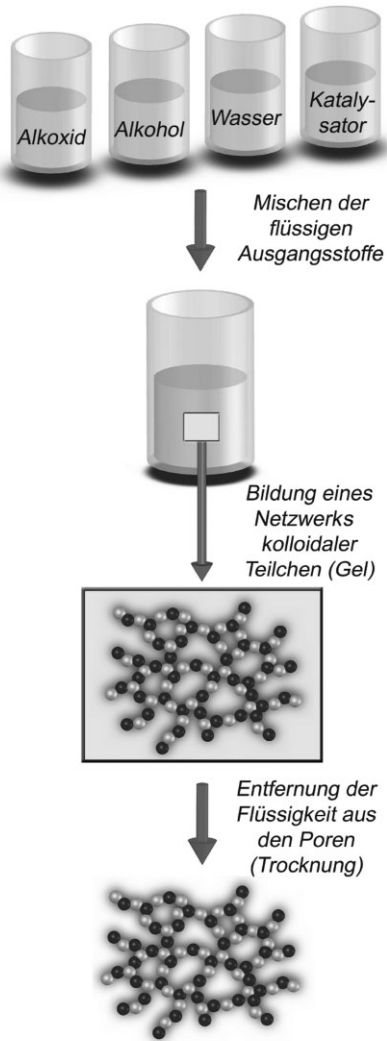


Bild 1. Der Herstellungsprozess eines Silika Aerogels
Fig. 1. The synthesis of a Silica aerogel

zeugt ein offenporiges Gelgerüst. Die Flüssigkeit im Gelnetzwerk muss in einem Schritt durch überkritische Trocknung entfernt werden und es entsteht das Aerogel. Aerogele können aus vielen Substanzen hergestellt werden [8]. Am besten untersucht sind Quarzglas- und Wasserglas-Aerogele [8], [9]. Die beiden Fotos in den Bildern 2a, b zeigen Aufnahmen von Silika-Aerogelen.

Die offene, schwammartige Nanostruktur der Aerogele lässt sich mit der Porengröße beschreiben, die i. A. 10–100 nm beträgt. Die Porosität liegt bei mehr als 80%, kann aber auch bis zu 99,8% betragen. Die Rohdichte liegt demzufolge in einer Größenordnung von etwa 2 bis 250 kg/m³. Die Wärmeleitfähigkeit in Luft bei 300 Kelvin ist mit 0,017 bis 0,021 W/(m · K) und einem typischen Wert von 0,02 W/(m · K) außerordentlich gering. Die spezifische Oberfläche liegt je nach Herstellungsparametern zwischen 200 und 2000 m²/g [7] bis [13].

Am Markt sind für die vorliegende Studie Wasserglas-Aerogele als Granulat in verschiedenen Korngrößenklassen und Formmodifikationen verfügbar (kugelig bis polyedrisch), die in Deutschland hergestellt werden (Bild 2b). Reines Silika-Aerogel kann in Form von Platten in Schweden bezogen werden (Bild 2a). Während das Granulat von

Cabot superhydrophob ist (Benetzungswinkel größer 160 Grad), sind die Silika-Aerogele von Airglass und die daraus durch Mahlen gewonnenen Granulate teilhydrophil, d. h. sie sind zwar langzeitstabil gegen Luftfeuchtigkeit, werden aber von Wasser benetzt und saugen sich bei Berührung mit Wasser langsam mit Flüssigkeit voll (Stunden). Der Benetzungswinkel zu Wasser ist kleiner als 90 Grad.

Um Leichtbetone herzustellen, kommen auch andere Materialien in Frage. Es wurden deshalb aus der Klasse der thermisch expandierten Schichtsilikate Danamol DA 30K verwendet, hydrophobes Superlite (Hyperdämm) und hydrophile Silika-Xerogele, die als Trocknungsmaterial oder auch als Katzenstreu eingesetzt werden. Diese Materialien könnten eventuell eine preiswerte Alternative zu den Aerogelen sein. Während das hydrophobe Aerogelgranulat ca. 2.000 €/cbm kostet, liegt der Preis für das hydrophile Silica-Xerogel bei ca. 1.000 €/cbm, das Superlite wie auch Vermiculit (expandierte Schichtsilikate) kostet etwa 300 €/cbm.

2 Experimente und Ergebnisse

2.1 Herstellung von Aerogelbetonsteinen

Die Herstellung eines Aerogelbetons erfolgt in wenigen Schritten, kann je nach Anwendungsbereich variiert werden und benötigt keinerlei spezielle Maschinen oder sonstige Vorrichtungen. Zunächst wird ein Zementbrei in einem Flügelmischer angerührt. Die Zementklassen können beliebig variiert werden. Für die Versuche wurden Portlandkalksteinzement 32,5R, Portlandzement 42,5R und 52,5R verwendet. Der Wasseranteil liegt je nach Mischung zwischen 15% und 20%. Hiernach kann Quarzsand hinzugeben werden und Aerosilpulver bis zu 10%. Abschließend werden das Aerogelgranulat und eventuell Glasfasern AR-Titan 2 zur Vermeidung von Rissen und Erhöhung der Biegefestigkeit hinzugefügt. Die abschließende Durchmischung der Zuschlagsstoffe erfordert die Zugabe eines Betonverflüssigers und einer speziell entwickelten Lösung, die ein Auftreiben der hydrophoben Partikel (Aerogel, Superlite) verhindert [14]. Die fließfähige Betonmischung kann in jede Form gebracht werden. Es wurden Steine verschiedener Größe hergestellt, z. B. 15 × 15 cm und 40 × 40 cm mit 8 cm Dicke, 40 × 40 cm mit 5 cm Dicke und große Steinmengen mit 50 × 24 cm mit 13 cm Dicke sowie Rundkörper mit 15 cm Durchmesser und 15 cm Höhe. Der Trocknungsfortschritt der Steine wurde über ihr Gewicht ermittelt. Im Allgemeinen betrug die Trocknungszeit bei Zimmertemperatur ca. ein bis zwei Wochen. Die Probesteine wurden frühestens nach vier Wochen weiteren Prüfungen unterzogen. Einzig die Mischungen mit hydrophilen Xerogelen benötigen mitunter Monate oder gar erhöhte Temperaturen (60 °C), um überhaupt trocken zu werden. Alle Prozentangaben dieser Arbeit sind Angaben in Volumenprozent, da bei den extrem leichten Aerogelen eine Angabe in Gewichtsprozent wenig Sinn macht.

2.2 Gefüge der Aerogelbetone

Die Bilder 3 und 4 zeigen Schiffe von Aerogel-Zement-Sandmischungen. Die Silika-aerogelpartikel liegen im ausgehärteten Zement gleichmäßig dispergiert vor. Die

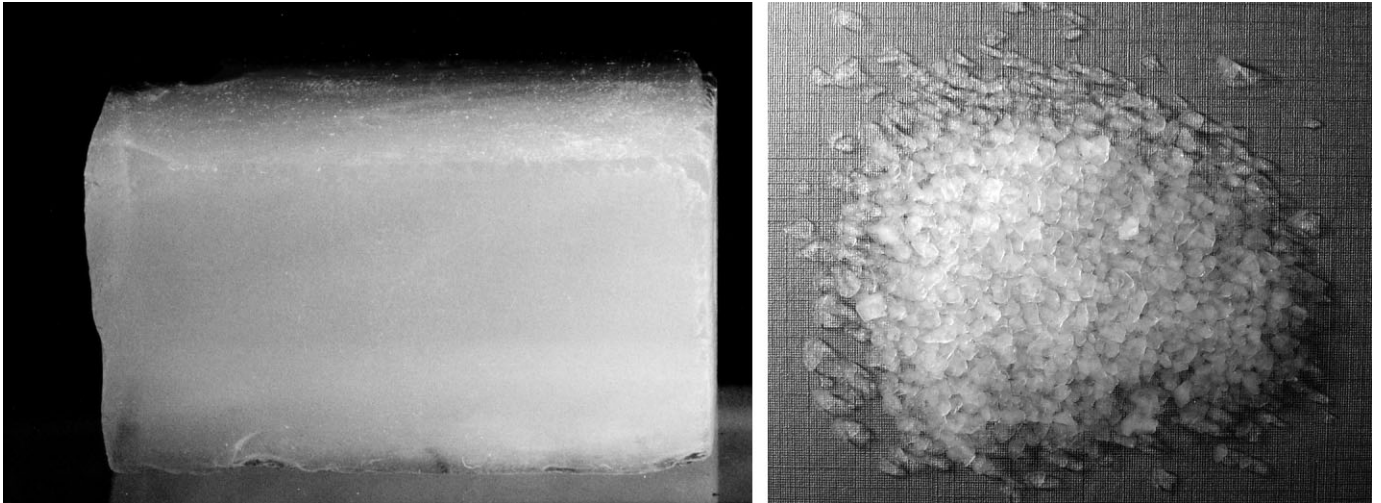
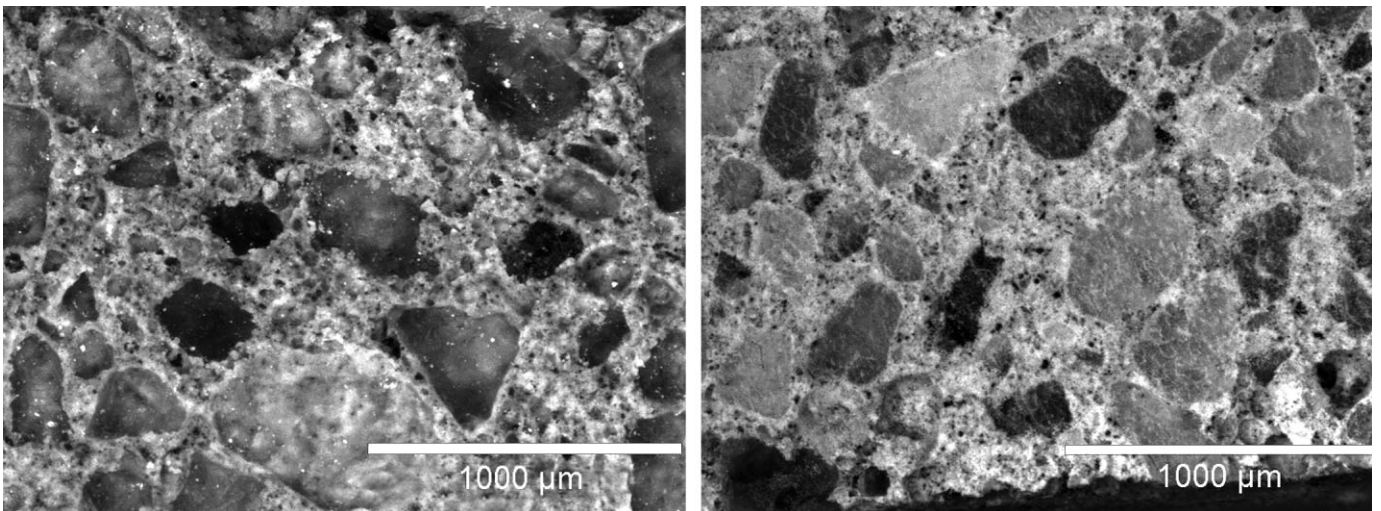


Bild 2a. (links) zeigt einen Aerogelblock aus teilhydrophilem Material. Typisch ist die Transparenz und die starke Lichtstreuung des blauen Lichts an den Nanoteilchen des Materials (Rayleigh-Streuung). Bild 2b (rechts) zeigt ein superhydrophobes Aerogelgranulat, wie es für die Untersuchungen in dieser Arbeit verwendet wurde.

Fig. 2a. (left) shows a block of a partly hydrophilic aerogel made from TMOS. Typical for silica aerogels is their transparency and the strong scattering of blue light at the nano particles of the material (Rayleigh scattering). Figure 2b (right) shows the aerogel granulate used for the investigations reported in this paper.



Bilder 3 und 4. Die Aerogelpartikel liegen im Beton gleichmäßig verteilt vor und sind allseitig fest umhüllt. Zusammensetzung: 70% Aerogel, 20% Portlandkalksteinzement, 10% Aerosil und Dispergiermittel.

Figs. 3 and 4. The aerogel particles are evenly distributed in the concrete and covered at all sides nicely by the cement mixture. The composition is: 70 % aerogel, 20 % Portland limestone cement, 10 % Aerosil and a special dispersing agent.

Schliffphotos zeigen die polyedrischen Aerogelteilchen, die in einer Zement-Sandmatrix eingebettet sind. Die Teilchen ließen sich aus den Zementmischungen nicht einfach herauslösen, sondern waren fest verbunden.

2.1.2 Dichte

Die oben genannten verschiedenen Zementsorten wurden mit unterschiedlichen Anteilen an hydrophobem Aerogel, Superlite, Vermiculite (Danamol), hydrophilem Xerogel (Multicrystal) vermischt, ausgehärtet und anschließend wurden die Dichten ermittelt. Die Bilder 5 und 6 zeigen die Ergebnisse.

Bild 5 zeigt, dass die Dichte mit dem Aerogelanteil sinkt, aber die absolute Dichte eingestellt werden kann, in dem z. B. ein Teil des Zements durch Quarzsand ersetzt wird. Die Zugabe von unterschiedlichen Mengen an Glasfasern und Aerosilpulver hat keinen Einfluss auf die Dichte. Es wurden Dichten von 580 kg/m^3 erzeugt. Gasbetonsteine liegen in denselben Gewichtsklassen. Die geringste Dichte wird von den Aerogelbetonen mit einem Aerogelanteil von 70% und 75% erzielt. Noch geringere Dichten ließen sich nur durch Verwendung anderer Matrixwerkstoffe wie Perlgips oder Gipsputze (Rotband, Goldband) erzielen. In diesem Falle waren Dichten bis zu 250 kg/m^3 erzielbar.

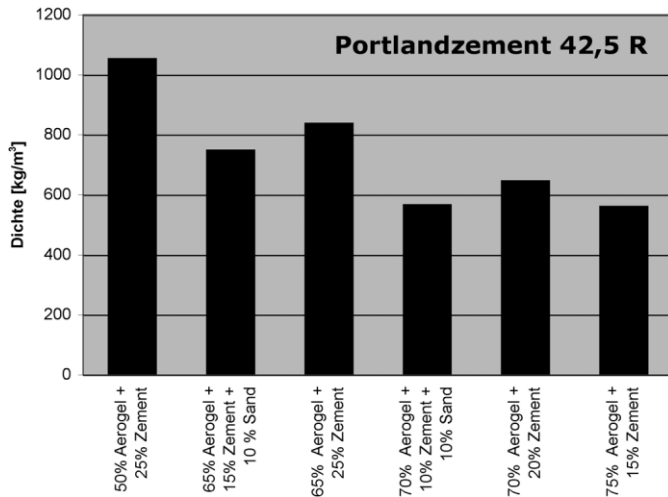


Bild 5. Dichte der Aerogelbetone bei verschiedenen Aerogelanteilen
Fig. 5. Density of aerogel concretes with different aerogel fractions

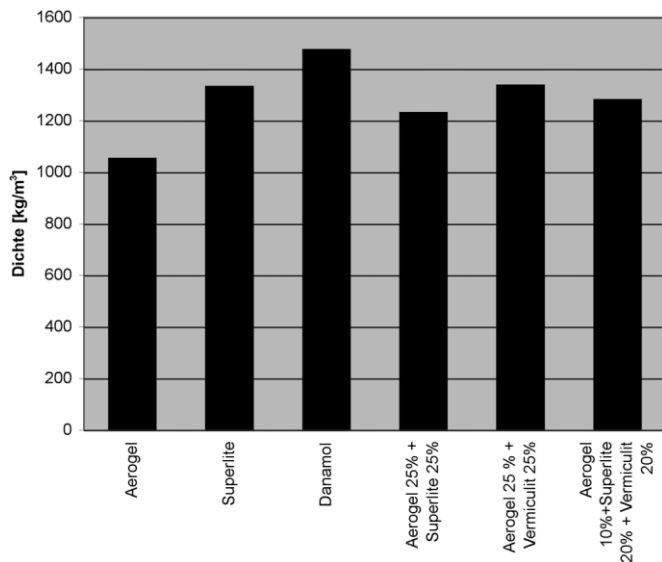


Bild 6. Dichte der Leichtbetone bei konstantem Zuschlag (50 %) an leichten Füllstoffen, aber unterschiedlicher Füllstoffart. Der Stein mit anorganischem Danamol als Füllstoff zeigt die höchste Dichte von mehr als 1.400 kg/m³ im Verhältnis zum Stein mit eingesetztem Aerogel mit einer Dichte von knapp über 1.000 kg/m³.
Fig. 6. The density of the light weight concretes with constant amount of filler material (50 %) of different provenience and type. The stones with the inorganic Danamol as a filler material has the highest density of more than 1400 kg/m³ in comparison with the stone of aerogel having a density of slightly more than 1000 kg/m³.

Bei konstantem Anteil an leichtem Füllstoff (Bild 6) werden mit dem hydrophoben Aerogelgranulat die geringsten Dichten erzielt. Der Aerogelanteil kann auf Werte bis zu 80% erhöht werden. Allerdings sind solche Werkstoffe kaum noch fest zu nennen. Es wurde deshalb der Aerogelanteil i. A. auf einen Wert von 70% beschränkt.

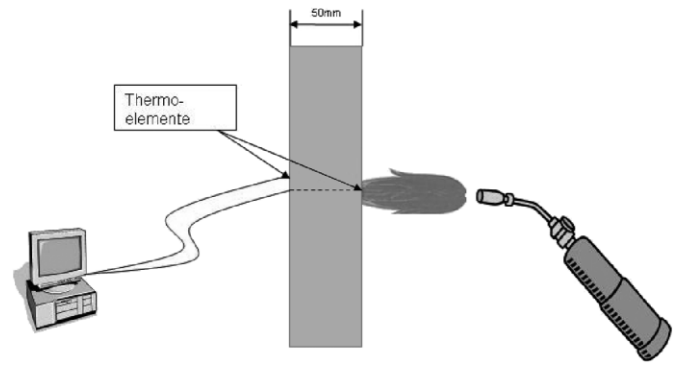


Bild 7. Schematische Darstellung der vereinfachten Brandtestversuche. Thermoelemente nehmen auf der Vor- und Rückseite einer Aerogelbetonplatte die Temperaturwerte kontinuierlich auf und leiten sie weiter an einen PC.

Fig. 7. Schematic of the simple experimental set-up to test the fire protection of the aerogel concrete. Thermocouples record the temperature at the front and backside of the stone.

2.3 Brandschutz

Da Aerogele extrem schlechte Wärmeleiter sind, wurde davon ausgegangen, dass der Zusatz von Aerogelgranulat zu Zement-Sandmischungen die Wärmeleitfähigkeit des Aerogelbetons herabsetzt und Aerogelbetone für den Brandschutz besonders geeignet sind. Es wurden zwei Arten von Versuchen durchgeführt: kleine Laborversuche an einzelnen Steinen und wenige Versuche an großen Platten und Wandelementen, die aus einzelnen Steinen aufgebaut wurden.

Für die Überprüfung der Brandfestigkeit einzelner Steine aus Aerogelbeton wurden 50 mm dicke und 400 × 400 mm breite Aerogelbetonplatten hergestellt. Diese wurden in der Mitte der Platte mit einer Bohrung für ein Thermoelement versehen. Dieses wurde so durch die Bohrung geführt, dass es auf der Vorderseite etwa 1 mm herausragte. Ein zweites Thermoelement befand sich auf ähnlicher Höhe auf der Rückseite der Platte. Die Vorderseite der Platte wurde zwei Stunden mit einem Schweißbrenner (Acetylen-Sauerstoff) befeuert und die Temperaturen mittels Messrechner aufgezeichnet. Bild 7 zeigt schematisch den Versuchsaufbau und die Bilder 8 und 9 die realen Bilder des Versuchs.

Bild 10 zeigt exemplarisch eine Messkurve eines solchen Laborversuchs mit einem Stein aus 70% hydrophobem Aerogelgranulat, 10% Sand und 10% Zement (42,5 R), der eine Dicke von 50 mm hatte. Während auf der Flammseite kurz nach Beginn des Versuchs ca. 960 °C erreicht wurden, wird auf der Rückseite nach zwei Stunden eine maximale Temperatur von 63 °C gemessen. Wäre diese Messung auf große Flächen übertragbar, würde dieser Aerogelbeton ohne Weiteres die Anforderungen der Brandschutzklasse F120 erfüllen.

Bild 11 gibt einen Überblick über alle durchgeführten Laborbrandtests an Werkstoffen mit unterschiedlichen Füllstoffen. Diese Übersicht macht deutlich, dass Aerogele extrem schlechte Wärmeleiter sind und deshalb Betone mit Aerogelfüllung den besten Brandschutz realisieren.



Bilder 8 und 9. Versuchsaufbau zur Überprüfung der Feuerfestigkeit eines Aerogelbetons
 Figs. 8 and 9. Real experimental set-up for the laboratory fire protections test

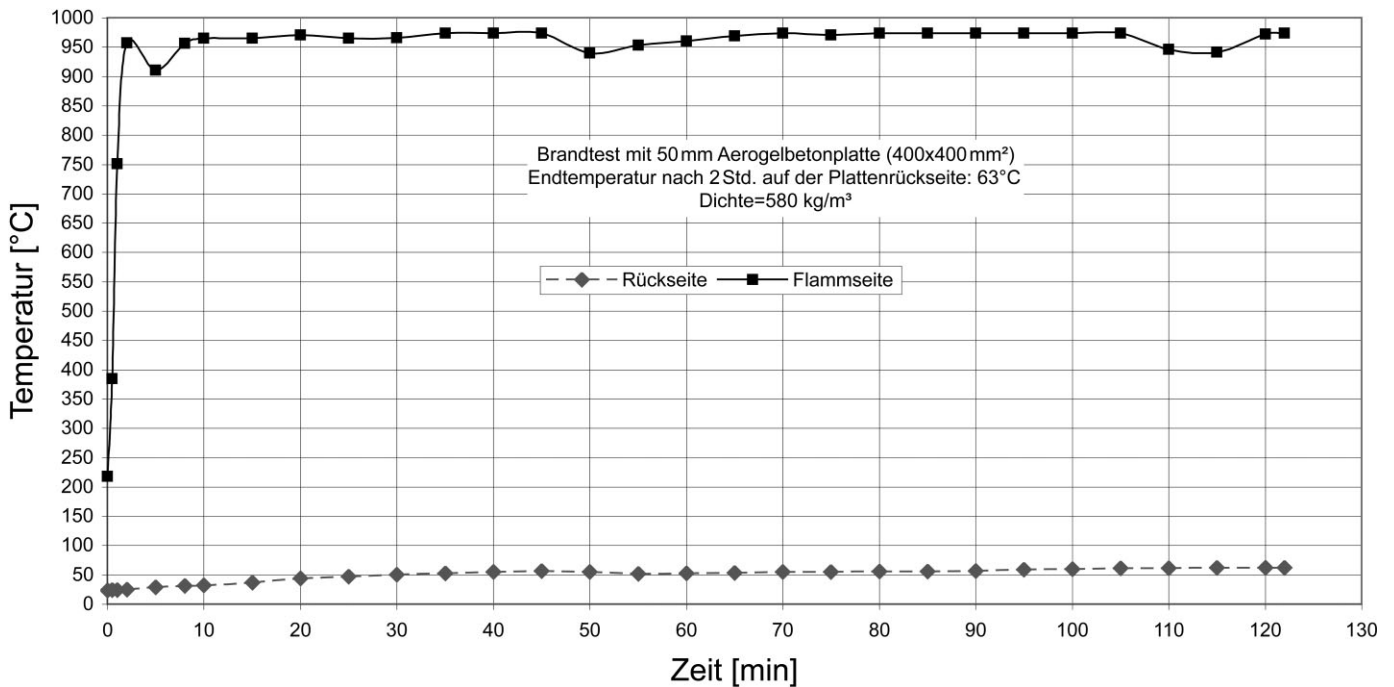


Bild 10. Ergebnisse eines Brandtests. Die Temperatur beträgt flammenseitig knapp 1.000 °C. Auf der Rückseite der Aerogelplatte werden auch nach 120 Minuten nur etwa 60 °C erreicht.

Fig. 10. Result of a fire protection test. The temperature is at the flame side around 1000 °C. At the back side of the aerogel plate the temperature reaches even after 120 minutes just 60 °C.

Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden weitere Kleinbrandversuche in Anlehnung an DIN 4102-2, 1977-09 durchgeführt. Aus Steinen mit der Größe 50 × 24 × 13 cm wurde ein Wandelement von 1 × 1 m hergestellt. In die Mitte wurde ein Thermoelement gesetzt und ebenso auf den Mitten der Diagonalen von diesem zentralen Thermoelement zu den Ecken. Die Temperaturwerte dieser fünf Stellen wurden ebenso mit einem Messrechner erfasst wie die Temperatur im Brandraum. Die verwendeten Steine hatten eine Dichte von 953 kg/m³ mit einem Anteil von 60% Aerogel, 10% Aerosil, 15% Sand, 15% Portlandzement 42,5R.

In Bild 12 ist die Temperaturerhöhung an den fünf Messstellen aufgetragen. Auf der Vorderseite wurde die

Temperatur auf 1.000 °C entsprechend der DIN-Norm eingestellt, d. h. innerhalb von fünf Minuten wurden 550 °C erreicht und dann die Temperatur mit ca. 5 °/min bis auf 1.050 °C Endtemperatur erhöht.

Die in diesem Versuch getesteten dicken und relativ schweren Steine zeigen eine Temperaturerhöhung von 40 °C (bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C), so dass sie nach Versuchsende eine Temperatur von 60 °C hatten. Auch bei diesen Kleinbrandversuchen setzt sich die Tendenz der an einzelnen Steinen gewonnenen Ergebnisse fort und zeigt, dass die einfachen Laborversuche hinreichend aussagekräftig sind. Dementsprechend sind Aerogelbetone ganz herausragende Brandschutzwerkstoffe, die leicht die Brandschutzklasse F120 erfüllen.

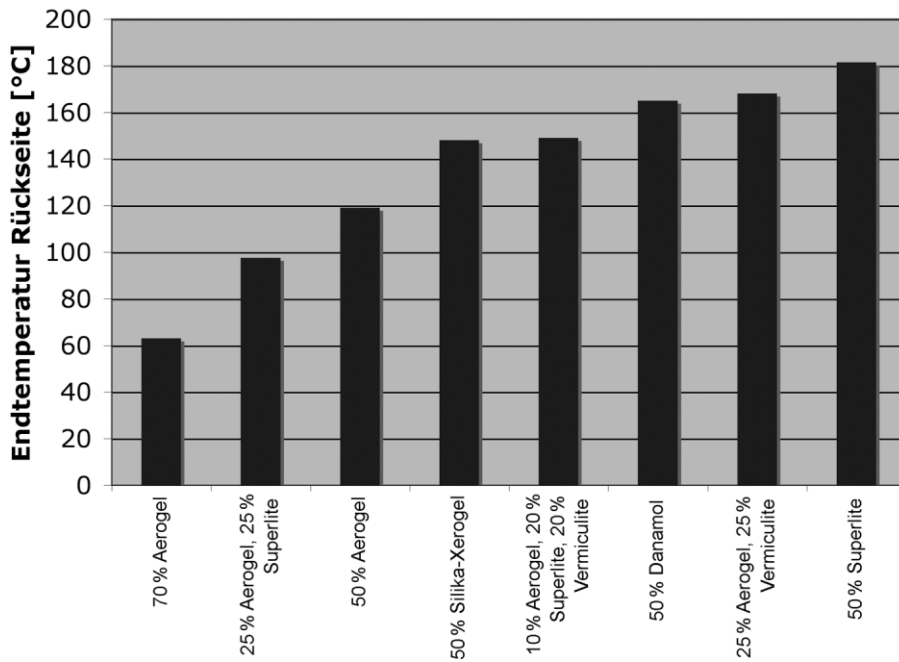


Bild 11. Übersicht über die Ergebnisse der einfachen Brandtests. Beim Aerogelbeton mit dem höchsten Anteil an Aerogel (70%) werden nur Temperaturen von 60 °C auf der Rückseite gemessen. Bei einem Aerogelanteil von 50% knapp 120 °C. Im Vergleich werden bei einer Zementmischung mit 50% Superliten Temperaturen von 180 °C gemessen.

Fig. 11. Overview of all laboratory fire protection tests showing the backside temperature after two hours. The aerogel concrete with 70% aerogel gives temperatures of 60 °C. With an aerogel fraction of 50% a back side temperature of 120 °C is measured. A cement mixture with 50% Superlite as a filler material leads to a back side temperature of around 180 °C.

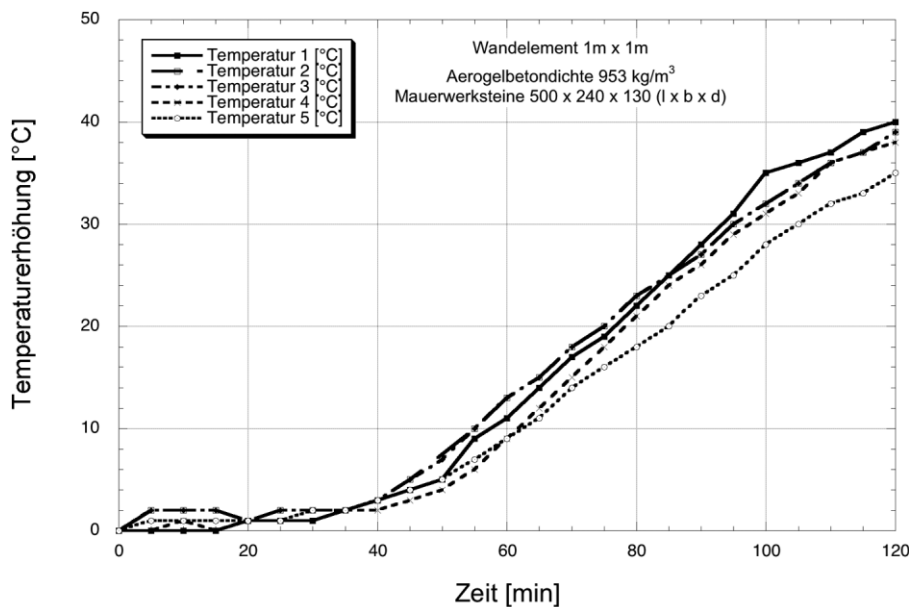


Bild 12. Temperaturerhöhung nach DIN 4102-2 bei Aerogelbetonplatten
Fig. 12. Temperature rise in a fire protection test according to DIN 4102-2 with aerogel concrete

2.4 Festigkeiten

Da in Aerogelbetonen die Dichte durch den Zusatz extrem leichter Füllstoffe erreicht wird, ist anzunehmen, dass die Materialien eine geringe Druckfestigkeit haben werden. Im Allgemeinen wird die Festigkeit mit der Porosität und damit der Dichte sinken. Die eingebrachten Füllstoffteilchen wirken ähnlich wie Poren. Es wurden deshalb einfache Druckversuche durchgeführt (an Rundproben 15 cm Durchmesser bzw. an Würfeln mit 5 oder 8 cm Kantenlänge).

Bild 13 zeigt einen Überblick über die Druckversuche. Die Druckfestigkeit liegt mit einer Ausnahme zwischen 0,6 und 1,5 MPa. Im Vergleich dazu haben Gasbetonsteine mit einer Dichte von 600 kg/m³ Druckfestigkeiten von 3–4 MPa und Steine aus 25% Zement 52,5R, 10% Sand und 50% Superlite eine Festigkeit von 6,5 MPa bei einer Dichte von 1.400 kg/m³. Die erreichte Druckfestig-

keit liegt im Bereich der theoretischen Erwartung. Nach Gibson und Ashby [15] gilt folgende Relation für die Bruchfestigkeit spröder poröser Körper:

$$\sigma_{cr} \approx 0.2 \sigma_{cr}^0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{3/2} \quad (1)$$

wobei σ_{cr} die Bruchfestigkeit des porösen Körpers ist, σ_{cr}^0 ist die des massiven, porenfreien Materials (hier Zement mit der angegebenen Normfestigkeit), ρ die Dichte des Aerogelbetons und ρ_0 die Dichte des massiven Materials (hier Zement mit ca. 3.100 kg/m³). Eine Auswertung entsprechend Gl. (1) ist in Bild 14 gezeigt. Der Vergleich zeigt, dass die Aerogelbetonsteine fester sind, als nach der Beziehung zu erwarten wäre (mit Ausnahme eines Ausreißers). Legt man eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte, sieht man, dass die Festigkeit nicht mit der relati-

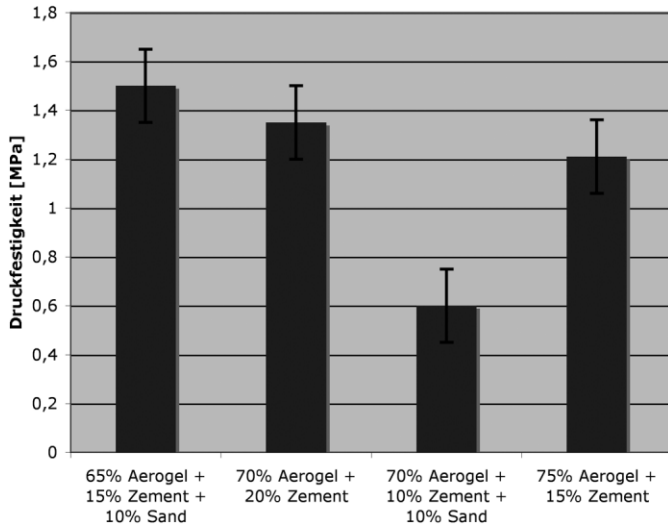


Bild 13. Überblick über die Versuchsergebnisse der Druckprüfung in Abhängigkeit von der Dichte und unterschiedlichen Füllstoffen, bzw. Füllstoffanteilen. Als Zement diente ein Portlandzement 42,5 R.

Fig. 13. Experimental results of some compression tests with materials of different composition. The cement used was a Portland cement 42,5 R.

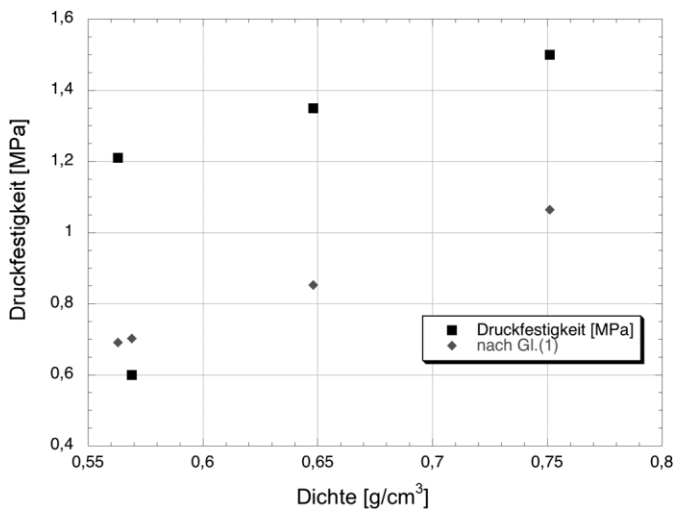


Bild 14. Druckfestigkeit als Funktion der Aerogelbetonsteindichte im Vergleich zu Berechnungen nach Gl. (1)

Fig. 14. Compression strength as a function of the density of the aerogel concrete in comparison with calculation according to Eq. (1)

ven Dichte hoch $3/2$ ansteigt, sondern nur wie 0,75. Diese Tendenz müsste durch deutlich mehr Messungen unterschiedlicher Steine überprüft werden.

2.5 Elastizitätsmodul

Die Auswertung der Druckkurven erlaubte es, den E-Modul aus dem linear-elastischen Teil zu bestimmen. Tabelle 1 gibt einen Überblick einiger typischer Werte, die i. A. eine Streuung von ca. 10% aufweisen. Der von uns ermittelte E-Modul hat keinen klar erkennbaren Zusammenhang mit dem Aerogelgehalt.

Tabelle 1. E-Moduli einiger Aerogelbetonsorten
Table 1. Young's modulus of a few aerogel concrete stones

Dichte [kg/m ³]	Aerogelanteil [Vol. %]	E-Modul [MPa]	Zementnormfestigkeit
444	70	105	32,5
555	70	87	32,5
583	70	72	32,5 Glasfaser
555	70	52	42,5
563	75	104	42,5
611	70	95	42,5
611	70	108	42,5 Glasfaser
611	70	110	42,5 10% Quarzsand
667	65	126	42,5 10% Quarzsand

Tabelle 2. Schallabsorption an einer Aerogelbetonplatte der Zusammensetzung 75% Aerogel, 15% Portlandzement 42,5 R, 10% Aerosil und Dispergiertmittel. Dichte der Platte 563 kg/m³.

Table 2. Sound absorption of an aerogel concrete with the composition 75 % aerogel, 15 % Portland cement 42,5 R, 10 % Aerosil and the special dispersing agent. Density of the plate was 563 kg/m³.

Aerogelbetonplatte roh, 50 mm Dicke	41 dB
Aerogelbetonplatte 50 mm, einseitig Spachtelputz mit Gewebe, andere Seite Wandfliesen 10 mm	43,5 dB
Aerogelbetonplatte, 50 mm, einseitig Spachtelputz mit Gewebe, andere Seite eine Lage Fliesenkleber	41,4 dB

2.6 Schalldämmung

Der besondere Gefügebau der Aerogelbetone in Verbindung mit der extrem niedrigen Schallgeschwindigkeit in Aerogelen lässt vermuten, dass sie für die Absorption von Schall gut geeignet sind. Deshalb wurde das Schallabsorptionsvermögen einiger Aerogelbetonplatten in Anlehnung an ISO 140-3 gemessen. Die Schallprüfung wurde in einer Wandöffnung mit den normgerechten Maßen 1.230×1.480 mm durchgeführt. Dazu wurden Aerogelbetonplatten aus Einzelsteinen mit einer Abstufung (Bild 9) zusammengeklebt. Es wurde Schall (rosa Rauschen) in einem Frequenzbereich von 50 bis 5.000 Hz erzeugt und die Absorption gemessen. Für die gemittelte Absorption wurden Werte ermittelt wie beispielsweise in Tabelle 2 gezeigt. An einem Wandelement mit einer Prüffläche von $2,1 \text{ m}^2$ wurden frequenzabhängig Absorptionsmessungen in Anlehnung an ISO 140-3 durchgeführt. Hier bestand der Aerogelbetonstein der Abmessungen $50 \times 24 \times 13 \text{ cm}^3$ aus 50% Aerogel und der Rest aus Zement und Sand. Die frequenzabhängige Dämpfung zeigt Bild 15.

Die Messdaten zeigen, dass dickere Mauerelemente aus Aerogelbetonplatten mit einem Gehalt von 50% Aerogel im Frequenzbereich oberhalb 100 Hz eine Dämpfung von mehr als 35 dB zeigen, bei Frequenzen oberhalb 500 Hz eine von 40 dB und oberhalb 1.000 Hz mehr als 50 dB. Damit sind diese Werkstoffe gut zur Schalldäm-

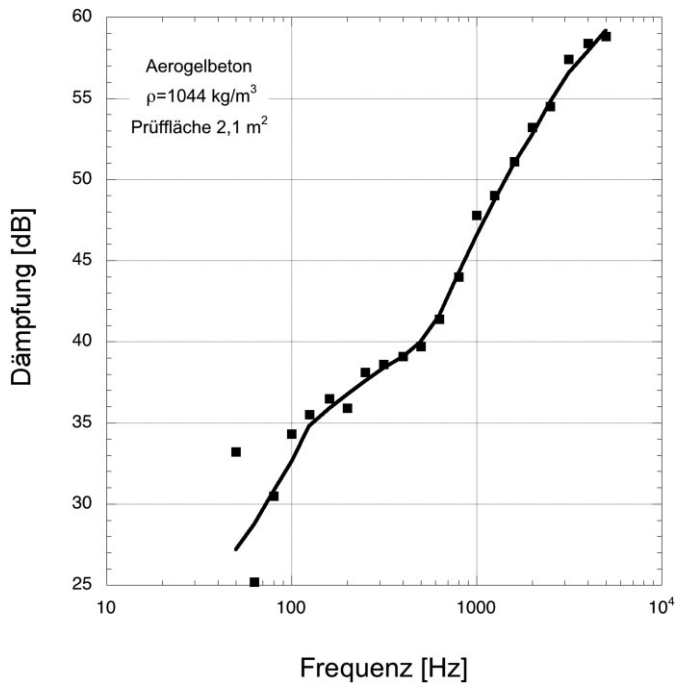


Bild 15. Frequenzabhängige Dämpfung einer Aerogelbetonplatte

Fig. 15. Frequency depending sound attenuation of an aerogel stone

mung im Straßenverkehr geeignet. Insbesondere, wenn noch eine geeignete Oberflächenprofilierung vorgenommen wird, so dass der auf den Verkehrsweg zurückgeworfene Schall ebenfalls vermindert würde.

2.7 Schwinden

Schwinden wurde nicht extra gemessen. Auffälliges Schwinden konnte jedoch nicht beobachtet werden. Die Steine ließen sich immer leicht aus der Form lösen, ohne dass sich sichtbare Spalten gebildet hatten.

3 Ausblick

Die vorgestellten Aerogelbetonsteine vereinen faszinierende Eigenschaften: geringe Dichte, hohe Schalldämmung und exzellente Wärmedämmung. Des Weiteren sei angemerkt, dass Stahlbewehrungen einzulegen ohne Probleme möglich ist, die nicht bewehrten Materialien mit allen für die Bearbeitung von Gasbetonsteinen üblichen Werkzeugen bearbeitbar sind und Befestigungselemente einfach angebracht werden können. Die eingebrachten hydrophoben Aerogelpartikel verhindern nicht das Aufbringen von Grundierungen, Anstrichen, Spachtel, Kleber.

Danksagung

Der Autor dankt ganz besonders Frau Dr. S. Brück und den Herrn S. Hohmann, M. Kanngießner und Dipl.-Ing. U. Pohl für die Durchführung der Versuche, zahlreiche spannende Diskussionen, ihr hohes Engagement und die vielen experimentellen Ideen, die sie zur Realisierung dieser neuen Werkstoffe eingebracht haben.

Literatur

- [1] Taschenbuch Zement, VDZ Düsseldorf 2002.
- [2] S. Decker: Einfluss der Eigenschaften hydraulischer Bindemittel auf die Eigenschaften hydrothermal gehärteter Leichtbetone, Dissertation, Universität Siegen, 2000.
- [3] S. Weber and H. W. Reinhardt: Advn Chem Bas Mat 6 (1997) 59–68.
- [4] O. Kayali, M. N. Haque and B. Zhu: Cement and Concrete Research 29 (1999) 1835–1840.
- [5] B. Chena and J. Liu: Cement and Concrete Research 34 (2004) 1259–1263.
- [6] T. Keller, E. Schaumann and T. Vallée: Composites: Part A 38 (2007) 879–889.
- [7] N. Hüsing and U. Schubert: Angew. Chem. Int. Ed. 37 (1998) 22–45.
- [8] C. J. Brinker and G. W. Scherer: Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, Academic Press, New York, 1990.
- [9] R. K. Iler: The chemistry of silica, John Wiley & Sons Toronto, 1979.
- [10] J. Fricke: Aerogele. Physik in unserer Zeit 17 (1986) 101–106.
- [11] Proc. 5th Int. Symposium on Aerogels, J. Non-Cryst.Solids 225 (1998).
- [12] Proc. 6th Int. Symposium on Aerogels, J. Non-Cryst.Solids 285 (2001).
- [13] Proc.7th Int. Symposium on Aerogels, J. Non-Cryst.Solids 350 (2004).
- [14] Deutsche und europäische Patentanmeldung zum Aerogelbeton DPA 102004046495.2-45 und PCT/EP2005/054674.
- [15] L. J. Gibson and M. F. Ashby: Cellular solids, Cambridge University Press. 2nd. Edition, Cambridge, UK 1997, p. 213.



Prof. Dr.-Ing. Lorenz Ratke
Institut für Materialphysik im Weltraum,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Linder Höhe
51170 Köln
lorenz.ratke@dlr.de