

In den letzten Jahren hat das Interesse an Metallschäumen, insbesondere aus Aluminium und Aluminiumlegierungen, deutlich zugenommen. Ein Grund sind neue Verfahrensentwicklungen, die eine höhere Qualität des geschäumten Metalls versprechen, andererseits auch die geänderten Rahmenbedingungen hin-

sichtlich der Anwendung von Werkstoffen. Erhöhte Forderungen werden inzwischen beispielsweise an die Passagiersicherheit in Personenkraftwagen oder an das Materialrecycling gestellt - von Metallschäumen wird hierfür eine Verbesserung erwartet.

Geschäumte Metalle verbinden das Eigenschaftsprofil metallischer Werkstoffe

- Festigkeit, Duktilität und elektrische Leitfähigkeit - mit dem besonderen Verhalten poröser Materialien, zum Beispiel dem stark nichtlinearen Verformungsverhalten und den guten Dämmeigenschaften. Daher sind sie für neue Anwendungen prädestiniert.

## Aluminiumschaum - Entwicklungen und Anwendungsmöglichkeiten

John Banhart, Joachim Baumeister, Markus Weber und Armin Melzer, Bremen

Ein Grund für den derzeit noch geringen Bekanntheitsgrad der Metallschäume sind die in der Vergangenheit zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren. Diese waren aufwendig und damit teuer. Außerdem waren sie schwer zu kontrollieren und führten somit zu nur mäßig reproduzierbaren Ergebnissen. Weiter- und Neuentwicklungen der Verfahren in den letzten zehn Jahren bewirkten, daß inzwischen schmelz- und pulvermetallurgische Methoden vorhanden sind, die diese Einschränkungen aufheben [1-6]. Ein am Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen entwickeltes und patentiertes pulvermetallurgisches Verfahren erlaubt eine verhältnismäßig einfache Herstellung geschäumter Metalle auf der Basis von Aluminium und Aluminiumlegierungen sowie einer Reihe weiterer gebräuchlicher Metalle [4-6].

### Herstellung von Metallschaum

#### Verfahrensprinzip

Das pulvermetallurgische Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen ist in **Bild 1** dargestellt. Der pulverförmige metallische Ausgangswerkstoff wird intensiv mit einem Treibmittel (zum Beispiel Titanhydrid) gemischt. Die so erhaltene Mischung wird unter kontrollierten Bedingungen zu einem Halbzeug verdichtet und gegebenenfalls durch Umformung weiterverarbeitet. Die Verdichtung findet häufig durch Strangpressen statt. Das resultierende Material ist äußerlich nicht von konventionellem Metall zu unterscheiden, birgt aber das Treibmittel in seiner metallischen Matrix: es ist „aufschäumbar“.

Durch Erwärmen des Halbzeugs

bis knapp über seinen Schmelzpunkt wird das Metall geschmolzen, das Gas des Treibmittels freigesetzt und somit der eigentliche Aufschäumvorgang ausgelöst. Richtige Prozeßparameter vorausgesetzt, expandiert die Schmelze und entwickelt eine halbflüssige, schaumige Konsistenz. Nach der Expansion bis zu einem gewünschten Grad beendet das Abkühlen unter den Schmelzpunkt den Schäumvorgang, die Schaumstruktur stabilisiert sich. Man erhält einen hochporösen Werkstoff mit gleichmäßiger Porenstruktur.

Am IFAM wurde das Verfahren bisher für Aluminium, verschiedene Aluminiumlegierungen, Zink, Zinn, Bronze, Messing und Blei mit Erfolg erprobt. Die Prozeßparameter wurden für spezielle Anwendungen optimiert. Aluminium und Al-Legierungen stehen aufgrund des breiteren Anwendungsspektrums bisher im Vordergrund des Interesses. Übliche Legierungen für das Schäumen sind Rein-Aluminium, 2XXX- und 6XXX-Legierungen. Auch Gußlegierungen wie AlSi 7 oder AlSi 12 werden häufig geschäumt, da sie

einen niedrigen Schmelzpunkt und günstige Schäumeigenschaften haben. Im Prinzip läßt sich jedoch nahezu jede Legierung schäumen, sofern die Kompaktier- und Schäumparameter bekannt sind.

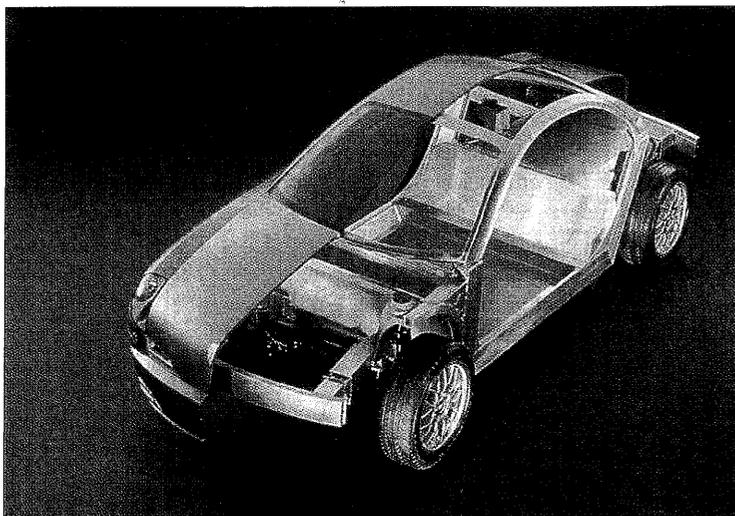
Der nach dem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellte Metallschaum ist in erster Näherung geschlossenporig. Die innere Porenstruktur wird allerdings erst nach dem Trennen eines Schaumteils offenkundig. **Bild 2** zeigt ei-

Dr. John Banhart, Jahrgang 1958, studierte Physik an der Universität München und promovierte im Bereich Physikalische Chemie nach einem Forschungsjahr an der TU Wien. Seit 1991 arbeitet er am Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen.

Dipl.-Phys. Joachim Baumeister, Jahrgang 1959, studierte Physik in Bonn und ist seit 1985 am IFAM beschäftigt.

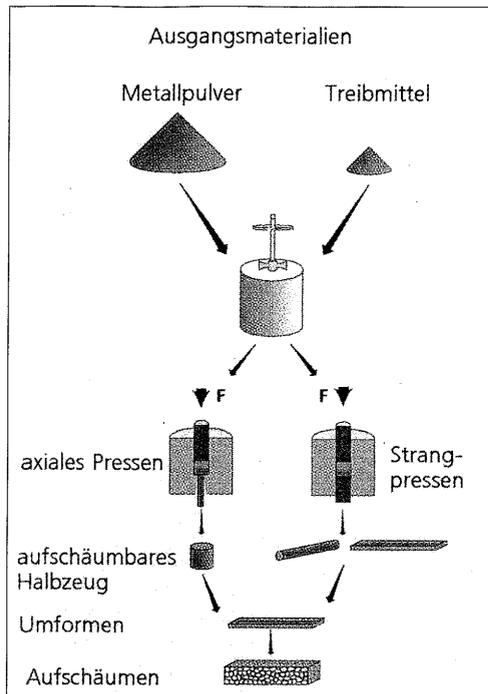
Dr. Markus Weber, Jahrgang 1966, studierte Metallurgie und Werkstofftechnik an der RWTH Aachen und am INSA in Lyon. Seit 1991 arbeitet er am IFAM in Bremen; Promotion 1995 an der TU Clausthal über das Thema „Metallschäume“.

Dr.-Ing. Armin Melzer, Jahrgang 1964, studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen. Von 1991 bis 1996 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der RWTH Aachen, Promotion auf dem Gebiet der Beschichtungs- und Verschleißschutztechnologie. Seit 1996 Tätigkeit am IFAM in Bremen.



Die Konzeptstudie AFB (Aluminium Foam Body) von Karmann, Osnabrück, sorgte auf der Motorshow Detroit Anfang 1998 bereits für Aufsehen. Die Strukturen der Fahrzeugkarosserie und die eingesetzten Aluminiumschaum-Sandwichteile werden an dem Prototypen gut hervorgehoben. Das für die Herstellung notwendige, mehrstufige Verfahren entwickelte Karmann gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen.

Bild: Karmann



**Bild 1** Verfahren zur Herstellung von Metallschaum nach dem pulvermetallurgischen Verfahren des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Materialforschung.

nen mit Funken-Erosion präparierten Schnitt durch einen Aluminiumschaum mit der Dichte  $0,5 \text{ g/cm}^3$ . Die Porendurchmesser betragen etwa 2 bis 5 mm.

#### Bauteile aus Aluminiumschaum

Wird das aufschäumbare Halbzeug in einer Hohlform aus Stahlblech aufgeschäumt, so füllt der expandierende Schaum den Hohlraum völlig aus. Auf diese Weise können mit geringem Aufwand Formteile aus Metallschaum hergestellt werden. Die Außenhaut der Schaumteile ist in diesen Fällen geschlossen. Aufgrund der geringen Dichten, bei Aluminiumschäumen in der Regel zwischen  $0,3$  und  $0,8 \text{ g/cm}^3$ , schwimmen die Schaumkörper auf Wasser.

Dünne Bleche aus aufschäumbarem Halbzeug lassen sich zu Flachmaterial aufschäumen. Beklebt mit konventionellen Aluminiumblechen entstehen Sandwich-Verbundstrukturen. Nach Verfahrensmodifikationen sind Verbundstrukturen aus Aluminiumschaum und massiven Metallprofilen oder -blechen auch ohne Klebstoffe mit rein metallischer Bindung herstellbar. Diese haben wegen der höheren Temperaturbeständigkeit sowie aufgrund der höheren Steifigkeit metallischer Verbunde Vorteile gegenüber den geklebten Verbindun-

gen. **Bild 3** zeigt einen metallischen Verbund.

#### Eigenschaftsprofil von Metallschäumen

Die Eigenschaften der porösen Materialien weichen von denen der massiven Grundwerkstoffe stark ab. Allgemeine Betrachtungen zu diesem Thema sind in der Literatur zu finden [7]. Metallschäume werden in [1; 8] behandelt. Für viele Anwendungen sind die mechanischen Eigenschaften ausschlaggebend.

Metallschäume zeigen – wie alle Schäume – unter uniaxialer, quasi-statischer Belastung ein universelles Deformationsverhalten [7]. Im **Bild 4** sind beispielhaft einige Spannungs-Stauchungs-Kurven dargestellt. Bei geringen Stauchungen zeigt sich ein annähernd linearer Spannungsanstieg. Durch eine genaue Analyse wird der nur zum Teil reversible Anstieg deutlich. Das ist auf Setzungserscheinungen nach der ersten Belastung zurückzuführen. Der Anstieg zu Beginn geht anschließend in einen Bereich hoher plastischer Deformation über, charakterisiert durch das Abknicken der Kurve in die horizontale Lage (waagrechtes „Plateau“). In einigen Fällen wird eine obere und untere Streckgrenze beobachtet. Die Kurve steigt wieder steil an, sobald die Verdichtung soweit fortgeschritten ist, daß die Zellwände sich berühren.

Der Elastizitätsmodul von Metallschäumen ist in erster Linie eine Funktion der Dichte. Über die Wahl der Schaumdichte lassen sich die elastischen Eigenschaften eines Schaumbauteils in einem weiten Bereich variieren.

Der Verlustfaktor  $\eta$  beschreibt das Abklingen von Schwingungen in einem Werkstoff infolge von innerer Reibung. Der Verlustfaktor von Metallschäumen rangiert typischerweise im Bereich zwischen  $0,002$  und  $0,008$ . Er liegt damit eine Größenordnung über dem der entsprechenden massiven Metalle und Legierungen. Kunststoffe zeichnen sich allerdings teilweise durch erheblich höhere Dämpfungen aus.

Der Bereich plastischer Defor-

mation läßt sich mit Hilfe verschiedener Kenngrößen beschreiben. Beispielsweise läßt sich durch Extrapolation der Kurve gegen  $\epsilon = 0$  im Bereich des Plateaus eine Druckfestigkeit definieren. Diese Druckfestigkeit  $\sigma_f$  hängt sehr von der Dichte ab und folgt wie der E-Modul einem Potenzgesetz mit etwa dem gleichen Exponenten [7; 8]. Die Druckfestigkeit ist außerdem abhängig vom Matrixmaterial und gegebenenfalls von einer Wärmebehandlung des Metallschaums [8].

Neben der Druckfestigkeit ist die Energieaufnahme bei einer vorgegebenen Spannung eine zu beachtende Kenngröße. Bezieht man die Energieaufnahme auf diejenige eines idealen Absorbers mit rechteckiger Spannungs-Stauchungskurve, so läßt sich die Effizienz des Schaums ableiten. Sie kann für Metallschäume Werte zwischen 80 und 90 % annehmen.

Nach dem Pulververfahren hergestellte Schaumkörper haben in der Regel eine überwiegend geschlossene äußere Schäumhaut. Sie beeinflusst das Verformungsverhalten nachhaltig. Besonders günstig ist eine Orientierung der Schäumhaut parallel zur Krafrichtung. Hierdurch wird die Festigkeit des Bauteils erhöht, und die Verformungscharakteristik kommt der eines idealen Rechteckabsorbers näher [8].

Eine noch höhere Festigkeit und ein gut ausgeprägtes Plateau haben Aluminiumschaumteile im Verbund mit massivem Aluminium. Schaumgefüllte Rundprofile zeigen bei axialer Belastung Druckfestigkeiten bis 80 MPa und einen Plateaubereich bis zu 55 % Stauchung [8].

#### Anwendungsmöglichkeiten

##### Automobilbau

Eine Eigenschaft des Aluminiumschaums ist das günstige Verhältnis von Masse zu Steifigkeit. Das legt einen Einsatz großflächiger Schaumbauteile nahe, bei denen hohe Forderungen an die Steifigkeit gestellt werden. Beispiele sind die Bodengruppe im Kraftfahrzeug, Motorhauben, Kofferraum-

deckel und Schiebedächer. Diese Teile sollen sich unter äußeren Einflüssen, beispielsweise des Fahrtwinds, nicht elastisch verformen oder sogar anfangen zu schwingen. Letzteres verhindern nicht zuletzt die günstigen Dämpfungseigenschaften der Aluminiumschäume. Im Nutzfahrzeugbereich sind Aufbauten für Lastkraftwagen zu nennen. Bei Kühlfahrzeugen bietet die reduzierte Wärmeleitfähigkeit des Aluminiumschaums zusätzliche Vorteile. Bei Karmann GmbH, Osnabrück, werden derzeit dreidimensional geformte Aluminium/Aluminiumschaum-Sandwichteile zur Versteifung von Space-Frame-Strukturen in Kraftfahrzeugen vorbereitet [9].

Interessant erscheint die Eigenschaft des Aluminiumschaums, das Knick- und Stauchverhalten von Metallhohlprofilen oder -teilen nachhaltig zu beeinflussen, wenn diese mit einem Kern aus Schaum gefüllt werden. Denkbar ist beispielsweise die Versteifung von Stoßstangen, Unterfahrschutzelementen bei Lastwagen, Kfz-Konstruktionselementen wie der A- und B-Säule oder anderen knick- oder stauchgefährdeten Hohlteilen.

Die guten Energieabsorptionseigenschaften des Aluminiumschaums könnten beim Einsatz als Front- oder Seitenaufprallschutz genutzt werden. Beim Seitenaufprall besteht die Notwendigkeit, Energie effizient in ein leichtes, möglichst in die Tür oder den Türschweller integrierbares Bauteil einzuleiten. Dies ist auf zwei Arten möglich: Die vorteilhafte Spannungs-Stauchungs-Kurve des Aluminiums erlaubt eine gute Energieaufnahme durch irreversible plastische Verformung des Schaums. Die zuvor genannte Ausschäumung von Hohlprofilen gestattet das Verbessern konventioneller energie- und stoßabsorbierender Bauteile.

Bei der Entwicklung optimierter Energieabsorber sind die generellen Ziele:

- eine bessere Energieabsorptionscharakteristik,
- eine höhere Energieabsorptionskapazität pro Masse, Länge oder Volumen,

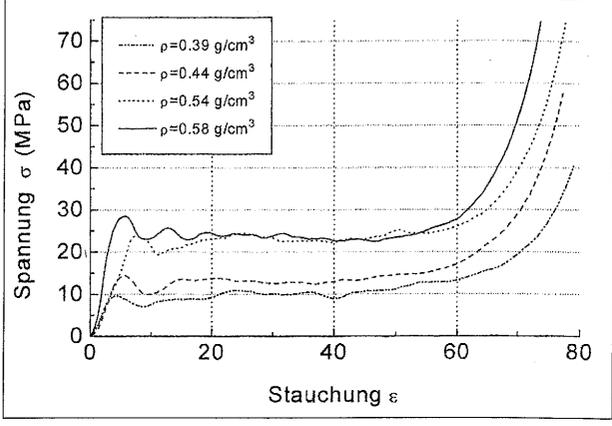
- weitere Vorteile, zum Beispiel die gute Wirksamkeit bei Offset-Stößen.

Ausgehend vom homogenen Aluminiumschaum kann eine Verbesserung der Energieabsorptionseigenschaft durch Ausnutzen des Außenhauteffekts oder durch das Ausschäumen von Profilen erzielt werden. Weitere Möglichkeiten sind die Verwendung anderer Materialkombinationen wie Stahl- oder CFK/GFK-Profile, die mit Al-Schaum gefüllt werden.

**Weitere Anwendungen**

Aus dem Eigenschaftsprofil der Metallschäume ergeben sich weitere Anwendungen, beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt, der Bauindustrie und im Maschinenbau. Erwähnt werden soll auch, daß Metallschaum als Material für Designer eingesetzt werden kann.

Die Erweiterung der Schaumtechnologie auf Schäume mit offener Porosität sowie auf Schäume aus höherschmelzenden Metallen, beispielsweise Stahl [10] und Titan, öffnet den Weg zu weiteren Anwendungen. Offenporige Metallschäume könnten als Dieselrußpartikelfilter, Wärmetauscher, Luft-



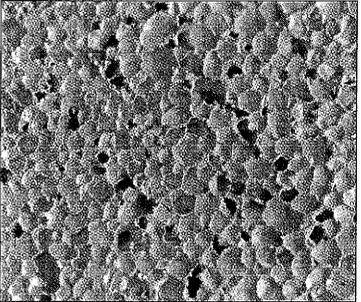
**Bild 4 | Spannungs-Stauchungs-Diagramme für AlSi6Cu4-Schäume mit unterschiedlichen Dichten.**

filter oder Schalldämpfer dienen, falls es gelingt, die offene Porosität geeignet einzustellen. Schäume aus Stahl kämen für Hochtemperaturanwendungen in Frage, bei denen der Aluminium-Schmelzpunkt zu niedrig liegt. Titanschäume kämen aufgrund ihrer Biokompatibilität und ihrer vergleichsweise hohen Festigkeit als Werkstoff beispielsweise für Dentalimplantate in Frage. Allerdings muß die Entwicklung dieser neuen Werkstoffvarianten weiter vorangetrieben werden, um einen derartigen Einsatz besser beurteilen zu können.

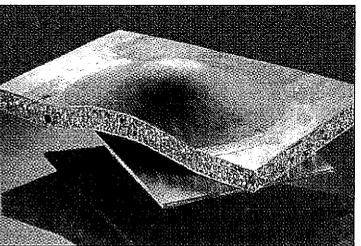
**Literatur**

[1] Banhart, J. (Hrsg.): Metallschäume. Tagungsband zum Symposium Metallschäume (Hrsg.: Banhart, J.), Bremen, 5./6.3.1997. Bremen: MIT-Verlag, 1997.  
 [2] Ruch W.W., Kirkevåg B.: A process of manufacturing particle reinforced foam and product thereof. Patent PCT/WO 91/01387 (1991).  
 [3] Jin L., Kenny L.D., Sang H.: Method of producing lightweight foamed metal. Patent US 4 973 358 (1990).  
 [4] Baumeister J. et al.: Verfahren zur Herstellung poröser Metallkörper. Patent DE 40 18 360 (1991).  
 [5] Baumeister J., Banhart J., Weber M.: Poröser metallischer Werkstoff mit anisotropen Eigenschaften. Patent DE 43 25 538 (1996).  
 [6] Banhart J., Baumeister J., Weber M.: Metallschaum. Aluminium 70 (1994), Nr. 3/4, S. 209.  
 [7] Gibson L., Ashby M.: Cellular Solids. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.  
 [8] Banhart J., Baumeister J.: Das Verformungsverhalten geschäumter Metalle. Metall 51 (1997), Nr. 1/2, S. 19.  
 [9] Seeliger H. W.: Complex shaped aluminium foam sandwich panels for automotive applications. Proc. Symp. Metal Foams (Hrsg.: Banhart, J., Eifert, H.), Bremen, 7./8.10.1997. Bremen: MIT-Verlag, 1998.  
 [10] Weber M., Knüwer M.: Evaluierung verschiedener Herstellungs- und Anwendungsmöglichkeiten für hochporöse Stahlwerkstoffe. In [1].

Die Untersuchungen wurden mit Mitteln der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, gefördert.



**Bild 2 | Ansicht der Porenstruktur eines Aluminiumschaums (Bildausschnitt etwa 60 mm x 50 mm).**



**Bild 3 | Sandwichstruktur aus Aluminiumschaum und Stahldeckblechen.**