

Kurzüberblick: *Geschäumte Metalle verbinden das Eigenschaftsprofil metallischer Werkstoffe - z.B. Festigkeit, Duktilität, elektrische Leitung - mit dem besonderen Verhalten poröser Materialien - z.B. stark nichtlineares Verformungsverhalten, gute Dämmeigenschaften - und sind deshalb für neue Anwendungen prädestiniert.*

Aluminiumschaum - Entwicklungen und Anwendungsmöglichkeiten

J. Banhart, J. Baumeister, M. Weber und A. Melzer, Bremen

In den letzten Jahren hat das Interesse an Metallschäumen insbesondere aus Aluminium und Aluminiumlegierungen deutlich zugenommen. Das liegt zum einen an neuen Verfahrensentwicklungen, die eine höhere Qualität des geschäumten Metalls versprechen als auch an geänderten Rahmenbedingungen hinsichtlich der Anwendung von Werkstoffen. Erhöhte Anforderungen werden heute beispielsweise an die Passagiersicherheit in Personenkraftwagen oder an das Materialrecycling gestellt, wo von Metallschäumen eine Verbesserung erwartet wird.

Ein Grund für den momentan geringen Bekanntheitsgrad der Metallschäume ist sicherlich in der Art der in der Vergangenheit zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren zu sehen, die aufwendig und damit teuer waren, durchweg schwierig zu kontrollieren sind und somit zu nur mäßig reproduzierbaren Ergebnissen führten. Durch Weiter- bzw. Neuentwicklung von Verfahren in den letzten 10 Jahren stehen heute schmelz- und pulvermetallurgische Methoden zur Verfügung, die diese Einschränkungen aufheben [1-6]. Insbesondere 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 **Abb. 1** verdeutlicht: der pulverförmige metallische Ausgangswerkstoff wird intensiv mit einem

Treibmittel (z.B. Titanhydrid) gemischt. Die so erhaltene Mischung wird unter kontrollierten Bedingungen zu einem Halbzeug verdichtet und gegebenenfalls durch eine Umformung weiterverarbeitet. Die Verdichtung geschieht meist durch Strangpressen. Das resultierende Material ist äußerlich nicht von konventionellem Metall zu unterscheiden, birgt aber das Treibmittel in seiner metallischen Matrix: es ist *aufschäumbar*. Durch Erwärmung des Halbzeugs bis knapp über seinen Schmelzpunkt wird das Metall geschmolzen und die Gasfreisetzung des Treibmittels und somit der eigentliche Aufschäumvorgang ausgelöst. Richtige Prozeßparameter vorausgesetzt expandiert die Schmelze und entwickelt eine halbflüssige, schaumige Konsistenz. Nachdem die Expansion bis zum gewünschten Grad erfolgt ist, wird der Schäumvorgang durch Abkühlung unter den Schmelzpunkt beendet und so die Schaumstruktur stabilisiert. Man erhält einen hochporösen Werkstoff mit gleichmäßiger Porenstruktur. Am IFAM wurde das Verfahren bisher für Aluminium, diverse Aluminiumlegierungen, Zink, Zinn, Bronze, Messing und Blei mit Erfolg erprobt und die Prozeßparameter für spezielle Anwendungen optimiert, wobei Aluminium und seine Legierungen jedoch aufgrund des breiteren Anwendungsspektrums bisher im Vordergrund des Interesses stehen. Übliche Legierungen für das Schäumen sind Reinaluminium, 2XXX- und 6XXX Legierungen. Auch Gußlegierungen wie AlSi7 oder AlSi12 werden häufig geschäumt, da sie einen niedrigen Schmelzpunkt und günstige Schäumeigenschaften aufweisen. Im Prinzip kann jedoch nahezu jede Legierung geschäumt werden, wenn einmal die Kompaktier- und Schäumparameter bestimmt worden sind.

Der nach dem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellte Metallschaum ist in erster Näherung geschlossenporig. Die innere Porenstruktur wird erst dann offenkundig, wenn man ein Schaumteil trennt. **Abb. 2** zeigt einen durch Funkenerosion präparierten Schnitt durch einen Aluminiumschaum der Dichte 0.5 g/cm^3 . Die Poren haben hier typischerweise Durchmesser von ca. 2-5 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 leicht Formteile aus Metallschaum hergestellt werden. Die Außenhaut der Schaumteile ist in diesen Fällen geschlossen. Aufgrund der geringen Dichten, die bei Aluminiumschäumen

meist zwischen 0.3 und 0.8 g/cm³ liegen, schwimmen die Schaumkörper auf Wasser. Dünne Bleche aus aufschäumbarem Halbzeug können zu Flachmaterial aufgeschäumt werden. Werden diese mit konventionellen Aluminiumblechen beklebt, entstehen Sandwich-Verbundstrukturen. Nach einer Verfahrensmodifikationen können Verbundstrukturen aus Aluminiumschaum und massiven Metallprofilen oder -blechen auch ohne Klebstoffe mit einer rein metallischen Bindung hergestellt werden, was aufgrund der mangelnden Temperaturbeständigkeit geklebter Verbindungen und der höheren Steifigkeit metallischer Verbindungen von Vorteil ist. In **Abb. 3** ist ein solcher Verbund gezeigt.

Eigenschaftsprofil von Metallschäumen

Poröse Materialien haben ein Eigenschaftsprofil, das von dem der massiven Grundwerkstoffe stark abweicht. Allgemeine Betrachtungen darüber sind in der Literatur zu finden [7]. Speziell zu Metallschäumen existieren eine Reihe von Arbeiten [1,8]. Für viele Anwendungen sind die mechanischen Eigenschaften ausschlaggebend, weswegen im folgenden etwas ausführlicher auf diese eingegangen wird.

Mechanische Eigenschaften

Metallschäume zeigen wie alle Schäume unter uniaxialer, quasistatischer Belastung ein universelles Deformationsverhalten [7]. In **Abb. 4** sind beispielhaft einige Spannungs-Stauchungs-Kurven gezeigt. Für kleine Stauchungen beobachtet man einen annähernd linearen Spannungsanstieg. Eine genauere Analyse ergibt, daß der Anstieg nur teilweise reversibel ist, was auf Setzungerscheinungen nach der ersten Belastung zurückzuführen ist. Der anfängliche Anstieg geht dann in einen Bereich starker plastischer Deformation über, der durch das Abknicken der Kurve annähernd in die Horizontale charakterisiert ist. Zuweilen beobachtet man eine obere und untere Streckgrenze. Nach dem Abknicken wird ein mehr oder weniger horizontales „Plateau“ beobachtet, das in einen immer steileren Anstieg der Spannung übergeht, sobald die Verdichtung soweit fortgeschritten ist, daß die Zellwände sich berühren.

Der Elastizitätsmodul von Metallschäumen ist in erster Linie eine Funktion der Dichte. Man erwartet und beobachtet einen Zusammenhang der Form [7]:

$$E(\rho) \propto \rho^n, \quad \text{mit } n \approx 1.7-2.0$$

zwischen Elastizitätsmodul der Schaumes E und seiner Dichte ρ . Das bedeutet, daß man über die Wahl der Schaumdichte die elastischen Eigenschaften eines Schaumbauteils in einem weiten Bereich variieren kann.

Das Abklingen von Schwingungen durch innere Reibung in einem Werkstoff wird durch den Verlustfaktor η beschrieben. Der Verlustfaktor von Metallschäumen rangiert typischerweise im Bereich zwischen 0.002 und 0.008 und liegt damit eine Größenordnung über dem der entsprechenden massiven Metalle und Legierungen. Kunststoffe weisen allerdings teilweise erheblich höhere Dämpfungen auf.

Der Bereich plastischer Deformation kann durch verschiedene Kenngrößen beschrieben werden. Man kann beispielsweise durch Extrapolation der Kurve im Bereich des Plateaus gegen $\varepsilon=0$ eine Druckfestigkeit definieren. Man findet, daß diese Druckfestigkeit σ_f stark von der Dichte abhängt und wie der E-Modul einem Potenzgesetz mit etwa dem gleichen Exponenten folgt [7,8]. Außer von der Dichte hängt die Druckfestigkeit auch vom Matrixmaterial und ggf. von einer Wärmebehandlung des Metallschaumes ab [8].

Neben der Druckfestigkeit ist die Energieaufnahme bei einer vorgegebenen Spannung eine interessante Kenngröße. Bezieht man die Energieaufnahme auf diejenige eines idealen Absorbers mit rechteckiger Spannungs-Stauchungskurve, so erhält man die Effizienz des Schaumes, die für Metallschäume Werte zwischen 80 und 90% annehmen kann.

Nach dem Pulververfahren hergestellte Schaumkörper weisen immer eine überwiegend geschlossene äußere Schäumhaut auf. Diese Schäumhaut beeinflusst das Verformungsverhalten nachhaltig. Besonders günstig ist eine Orientierung der Schäumhaut parallel zur Kraftrichtung, da dadurch die Festigkeit des Bauteils erhöht wird und die Verformungscharakteristik der eines idealen Rechteckabsorbers näher kommt [8].

Eine noch höhere Festigkeit und ein gut ausgeprägtes Plateau erhält man, wenn man Aluminiumschaumteile im Verbund mit massivem Aluminium verwendet. Schaumgefüllte Rundprofile weisen bei axialer Belastung Druckfestigkeiten bis 80 MPa und einen Plateaubereich bis 55% Stauchung auf [8].

Anwendungsmöglichkeiten

Automobilbau

Eine Eigenschaft von Aluminiumschaum ist das günstige Verhältnis von Masse zu Steifigkeit. Dies legt einen Einsatz großflächiger Schaumbauteile nahe, bei denen die Anforderungen an die Steifigkeit hoch sind. Beispiele dafür sind die Bodengruppe im Kraftfahrzeug, Motorhauben, Kofferraumdeckel und Schiebedächer. Diese Teile sollen sich unter dem Einfluß etwa des Fahrtwindes nicht elastisch verformen oder gar anfangen zu schwingen. Letzteres wird durch die günstigen Dämpfungseigenschaften der Aluminiumschäume noch zusätzlich verhindert. Im Nutzfahrzeugbereich sind aus dieser Gruppe der Anwendungen noch Aufbauten für Lastkraftwagen zu nennen, wobei bei Kühlfahrzeugen auch die reduzierte Wärmeleitfähigkeit des Aluminiumschaums von Vorteil ist. Fa. Karmann GmbH (Osnabrück) befindet sich momentan in der Vorbereitungsphase für den Einsatz dreidimensional geformter Aluminium/Aluminiumschaum-Sandwiche zur Versteifung von Space-Frame-Strukturen in Kraftfahrzeugen [9].

Eine interessante Eigenschaft von Aluminiumschaum ist, das Knick- und Stauchverhalten von Metallhohlprofilen oder -teilen nachhaltig zu beeinflussen, wenn diese mit einem Kern aus diesem Schaum gefüllt werden. Das bietet einen Einsatz zur Versteifung von Stoßstangen, Unterfahrschutzelementen von Lastwagen, KFZ-Konstruktionselementen wie der A- und B-Säule oder anderen knick- oder stauchgefährdeten Hohlteilen an.

Die guten Energieabsorptionseigenschaften von Aluminiumschaum könnten beim Einsatz als Front- oder Seitenaufprallschutz ausgenutzt werden. Beim Seitenaufprall besteht die Notwendigkeit, Energie effizient in ein leichtes, möglichst in die Tür oder den Türschweller integrierbares Bauteil einzuleiten. Das ist auf zweierlei Art möglich: Die vorteilhafte Spannungs-Stauchungs-Kurve von Aluminium gestattet eine gute

Energieaufnahme durch irreversible plastische Verformung des Schaums, die oben erwähnte Ausschäumung von Hohlprofilen gestattet eine Verbesserung konventioneller energie- und stoßabsorbierender Bauteile.

Bei der Entwicklung optimierter Energieabsorber sind die generellen Ziele:

- bessere Energieabsorptionscharakteristik
- höhere Energieabsorptionskapazität pro Masse, Länge oder Volumen
- weitere Vorteile wie z.B. gute Wirksamkeit bei Offset-Stößen

Ausgehend vom homogenen Aluminiumschaum kann eine Verbesserung der Energieabsorptionsfähigkeit durch Ausnutzung des Außenhauteffektes oder durch das Ausschäumen von Profilen erzielt werden. Weitere Möglichkeiten sind die Verwendung anderer Materialkombinationen wie z.B. 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 für den Maschinenbau. Erwähnt werden soll auch, daß Metallschaum als Material für Designer eingesetzt werden kann: Aluminiumschaum für Möbel, Lampen und Kunstgegenstände, Gold- und Silberschäume für Schmuckanwendungen.

Eine Erweiterung der Schäumtechnologie auf Schäume mit offener Porosität sowie auf Schäume aus höherschmelzenden Metallen wie etwa Stahl [10] und Titan wird eine zusätzliche Palette von Anwendungen eröffnen. Offenporige Metallschäume könnten als Dieselrußpartikelfilter, Wärmetauscher, Luftfilter oder Schalldämpfer dienen, falls es gelingt, die offene Porosität entsprechend einzustellen. Schäume aus Stahl kämen für Hochtemperaturanwendungen in Frage, bei denen der Schmelzpunkt von Aluminium zu niedrig liegt. Titanschäume kämen aufgrund ihrer Biokompatibilität und ihrer vergleichsweise hohen Festigkeit als Werkstoff beispielsweise für Dentalimplantate in Frage. Hier muß jedoch die Entwicklung dieser neuen Werkstoffvarianten weiter vorangetrieben werden, um einen solchen Einsatz besser evaluieren zu können.

Literatur

- [1] Banhart, J. (Hrsg.): *Metallschäume*, Tagungsband zum Symposium Metallschäume, Bremen, 5.-6. 3.1997, MIT-Verlag Bremen* , (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 I, 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**, 209, (1994)
- [7] Gibson L., Ashby M.: *Cellular Solids*, Cambridge University Press, Cambridge, (1997)
- [8] Banhart J., Baumeister J.: *Das Verformungsverhalten geschäumter Metalle*, Metall **51**, 19, (1997)
- [9] Seeliger H. W.: *Complex shaped aluminium foam sandwich panels for automotive applications*, Proc. Symp. Metal Foams, Hrsg: J. Banhart und H. Eifert, Stanton, 7.-8.10.1997, MIT-Verlag Bremen*, (1998)
- [10] Weber M., Knüwer M.: *Evaluierung verschiedener Herstellungs- und Anwendungsmöglichkeiten für hochporöse Stahlwerkstoffe*, in [1]

* die Tagungsbände sind erhältlich beim MIT-Verlag, Euckenstraße 12, 28201 Bremen, FAX: 0421-550295

Autorenbiographien

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 in Bremen über die Themen poröse Metalle, Sprühkompaktieren und Transporteigenschaften magnetischer Materialien.

Dipl.-Phys. Joachim Baumeister, Jahrgang 1959, studierte Physik in Bonn. Seit 1985 ist er am Fraunhofer-Institut beschäftigt. Seine Arbeitsgebiete umfassen Themen wie Superplastizität, Metallschäume und Thixocasting.

Dr. Markus Weber, Jahrgang 1966, studierte Metallurgie und Werkstofftechnik an der RWTH Aachen und am INSA in Lyon. Seit 1991 arbeitet er am Fraunhofer-Institut in Bremen zum Thema Metallschäume und Pulvertechnologie. Er promovierte 1995 an der TU Clausthal über das Thema „Metallschäume“.

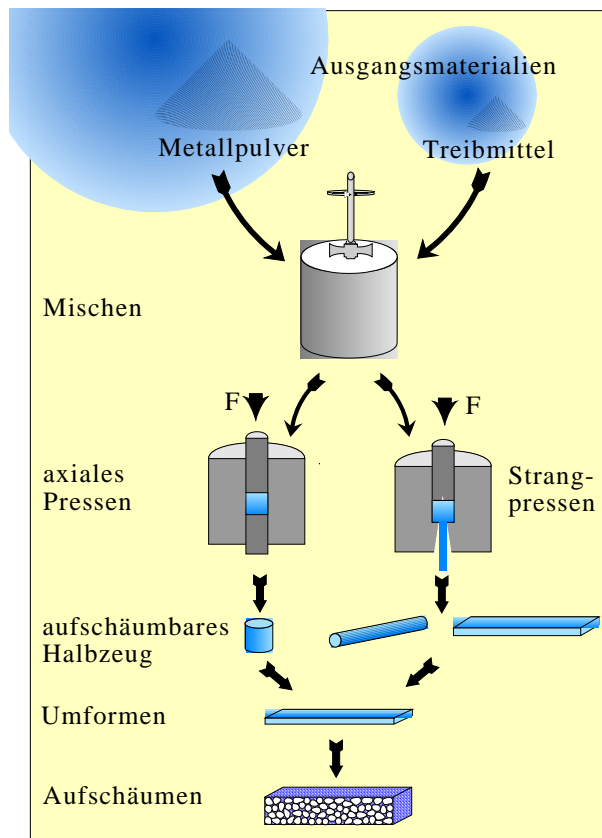


Abb. 1: Verfahren zur Herstellung von Metallschaum nach dem pulvermetallurgischen IFAM-Verfahren [4-6]

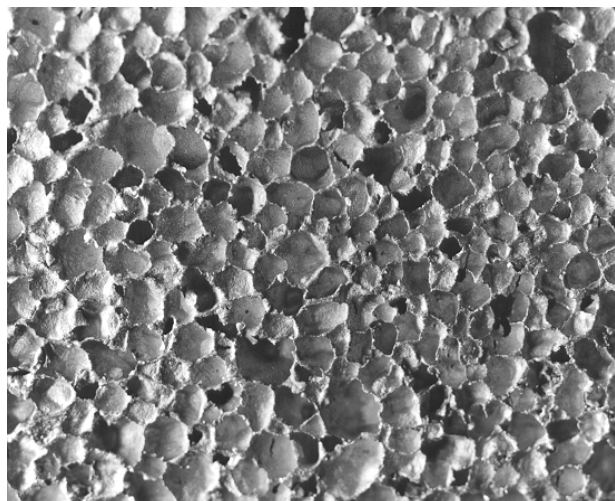


Abb. 2: Ansicht der Porenstruktur eines Aluminiumschaumes (Bildausschnitt ca. 60x50 mm)

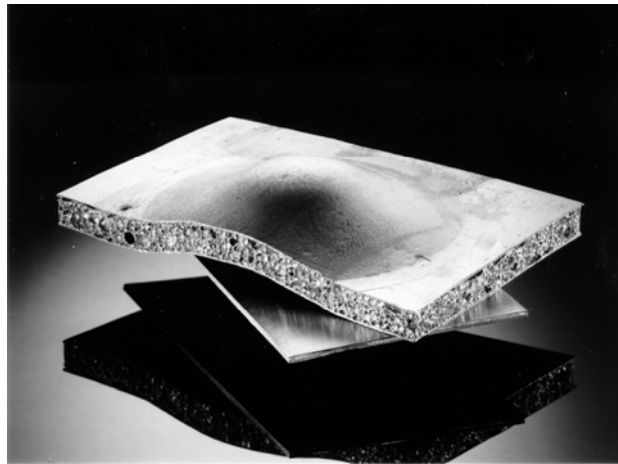


Abb. 3: Sandwichstruktur aus Aluminiumschaum und Stahldeckblechen
(hergestellt mit Förderung der Studiengesellschaft Stahlanwendungen)

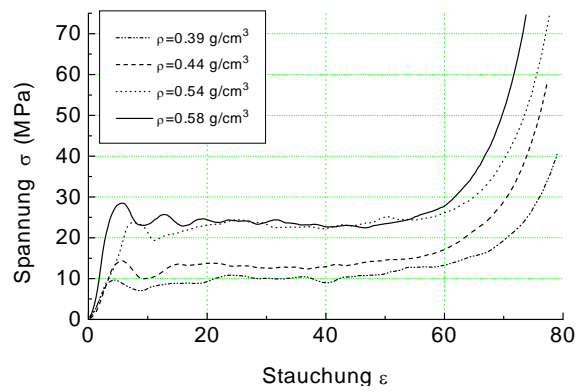


Abb. 4: Spannungs-Stauchungs-Diagramme für AlSi6Cu4-Schäume verschiedener Dichten.