

# Geschäumte Metalle als neue Leichtbauwerkstoffe

Dr. **J. Banhart**, Dipl.-Phys. **J. Baumeister** und Dipl.-Ing. **M. Weber**,  
Bremen

## Zusammenfassung

Aluminiumschäume werden nach einem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellt, wobei typischerweise Dichten von 0,3 bis 2 g/cm<sup>3</sup> erzielt werden. Das Verhalten der Aluminiumschäume unter mechanischer Beanspruchung wird untersucht. Dabei erweisen sich die Schäume als gute Energieabsorber mit einer hohen Effizienz. Die Festigkeit und der Elastizitätsmodul von Aluminiumschäumen variieren stark mit der Dichte. Die Dichteabhängigkeit wird diskutiert und mit theoretischen Modellen verglichen.

## 1 Einleitung

Geschäumte Werkstoffe werden seit langer Zeit verwendet und sind mittlerweile unverzichtbar geworden [1]. Eine besonders große Verbreitung haben hier die Polymere erhalten. Demgegenüber ist die Bedeutung der geschäumten Metalle, die seit den 50-er Jahren bekannt sind, bisher verhältnismäßig gering geblieben, obwohl sie zahlreiche attraktive Eigenschaften besitzen: ihre Dichte liegt bei einem Bruchteil derjenigen von massiven Metallen, während die Festigkeitswerte für viele Anwendungen immer noch ausreichen. Ähnlich wie geschäumte Kunststoffe wirken sie schallisierend und können Stoßenergie absorbieren, übertreffen die Kunststoffe jedoch in ihrer Feuer- und Hitzebeständigkeit bei weitem. Zudem sind sie sehr gut recycelbar. Ein Grund für den momentan geringen Bekanntheitsgrad der Metallschäume ist sicherlich in der Art der bislang zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren zu sehen [2], die durchweg schwierig zu kontrollieren sind und somit zu nur mäßig reproduzierbaren Ergebnissen führen. So wird beispielsweise versucht, Schaumaluminium durch Einrühren eines Treibmittels wie TiH<sub>2</sub>, ZrH<sub>2</sub> oder LiH<sub>2</sub> in das flüssige Metall zu erzeugen. Es erweist sich jedoch als äußerst schwierig, auf diese Weise eine gleichmäßige Porenverteilung sicherzustellen. In einem anderen Verfahren werden Hohlkugeln in das geschmolzene Metall eingerührt bzw. das Metall in die Zwischenräume einer

Schüttung von kleinen Kugeln infiltriert. Darüber hinaus sind in der Vergangenheit eine Reihe von Sintertechniken zum Einsatz gekommen. Am Ende dieser keinesfalls vollständigen Aufzählung von Methoden zur Herstellung metallischer Schäume steht das Sintern von Pulver- oder Faserschüttungen, bei dem Füllstoffe zugegeben werden, die sich während des Sinterns zersetzen oder verdampfen und somit eine Mindestporosität garantieren.

Die hier knapp umrissenen Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen haben entweder den Nachteil, schlecht kontrollierbar zu sein, aufwendige Ausgangsmaterialien zu benötigen (Hohlkugeln, Fasern) oder organische Füllstoffe zu verwenden, die im nachhinein entfernt werden müssen.

Das im IFAM entwickelte pulvertechnologische Verfahren /{3}/ ist frei von diesen Einschränkungen. Der pulverförmige metallische Ausgangswerkstoff wird hierbei 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 typischerweise durch axiales Heißpressen oder durch Extrusion. 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. Durch Abkühlung unter den Schmelzpunkt zum geeigneten Zeitpunkt kann die Schaumstruktur auch in der festen Phase stabilisiert werden. Am IFAM wurde das Verfahren bisher für Aluminium, diverse Aluminiumlegierungen, Zink, Zinn, Bronze und Messing mit Erfolg erprobt und die Prozeßparameter für spezielle Anwendungen optimiert, wobei Aluminium und seine Legierungen jedoch naturgemäß bisher im Vordergrund des Interesses stehen.

## 2 Eigenschaften von Aluminiumschäumen

### 2.1 Verhalten bei Stauchung

Im Druckversuch zeigen Aluminiumschäume ein Verhalten, das für Schäume im allgemeinen typisch ist. In Abb. 1 ist die Spannungs-Stauchungskurve für einen AlCu4-Schaum der Dichte  $0.65 \text{ g/cm}^3$  gezeigt. Zum Vergleich ist die entsprechende Kurve für einen Polyethylenschaum der Dichte  $0.12 \text{ g/cm}^3$  mit eingezeichnet, wobei die Spannungen für diesen Schaum mit dem Faktor 50 multipliziert wurden, um eine direkte Vergleichsmöglichkeit zu haben. Die Porosität der Schäume liegt in beiden Fällen bei etwa 75% bis 80%. Beide Schäume weisen bei niedrigen Stauchungen einen näherungsweise linearen Anstieg auf, der bei einigen Prozent Stauchung in eine Region nur flachen Spannungsanstiegs ("Plateau") übergeht. Die Stauchung endet schließlich mit einem steilen Spannungszuwachs wenn die Schaumstruktur wieder weitgehend zu einem Massivmaterial verdichtet wird. Beide Materialien weisen also ein universelles schaumtypisches Verhalten auf, mit dem Unterschied, daß das Festigkeitsniveau des Metallschaumes mehr als 50 mal so hoch ist wie das des Polymerschaumes.

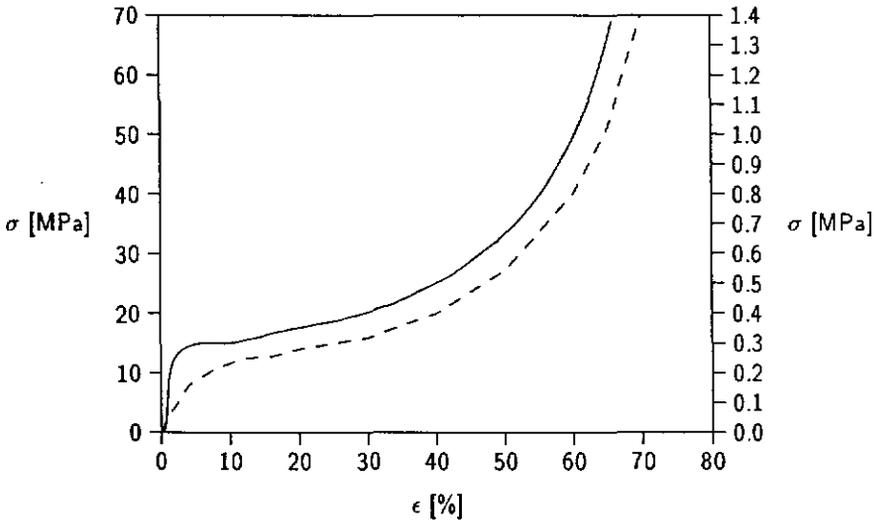


Abbildung 1: Spannungs-Stauchungskurve eines AlCu<sub>4</sub>-Schaumes der Dichte 0.65 g/cm<sup>3</sup> (durchgezogene Linie, linke Achsenbeschriftung) und eines Polyethylenschaumes der Dichte 0.12 g/cm<sup>3</sup> (gestrichelte Linie, rechte Achsenbeschriftung).

## 2.2 Energieabsorption

Durch die spezielle Form der Spannungs-Stauchungskurve sind Schäume gut dafür geeignet, viel Energie auf einem relativ niedrigen Spannungsniveau zu absorbieren. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 2 dargestellt. Die durch einen Schaum absorbierte Energie pro Volumen ist gleich der Fläche unter der Spannungs-Stauchungskurve (grob gerasterte Fläche) und damit:

$$E_V(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon') d\epsilon' \quad (1)$$

Für die in Abb. 1 dargestellten Kurven gilt beispielsweise für 30% Stauchung:

Al-Schaum:  $E_V = 4.78 \text{ MJ/m}^3$

Polyethylen:  $E_V = 0.07 \text{ MJ/m}^3$

Für eine vorgegebene Spannung wird die maximale Energie pro Volumen von einem Schaum absorbiert, der einen rechteckigen Spannungs-Stauchungsverlauf hat. Teilt man die von einem Schaum bei gegebener Spannung aufgenommene Energie pro Volumen durch die von diesem idealen Absorber aufgenommene, so erhält man eine Maßzahl  $\eta$ , die *Effizienz*, die die Güte des Schaumes in Hinsicht auf die Energieabsorptionseigenschaften charakterisiert. Die Aluminiumschäume haben aufgrund ihres steilen Spannungsanstieges bei kleinen Stauchungen und dem anschließenden Plateau eine sehr gute Effizienz der Energieabsorption, die bei Dichten unter 0.6 g/cm<sup>3</sup> und

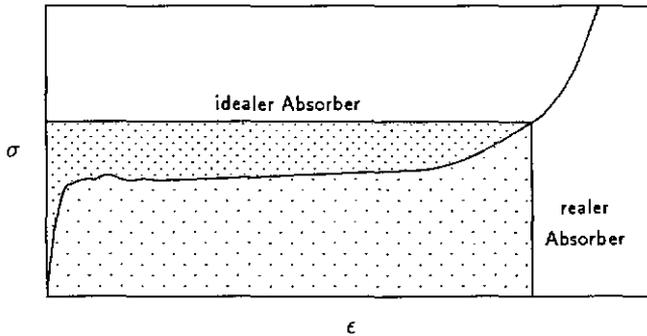


Abbildung 2: Die Effizienz  $\eta$  eines Energieabsorbers ist definiert als Verhältnis der Fläche unter der Spannungskurve zur Rechteckfläche des idealen Absorbers.

Stauchungen unter 50% meist über 90% liegt, sie kommen also in ihrem Energieabsorptionsverhalten dem Idealzustand recht nahe.

### 2.3 Festigkeit

Die Festigkeit von Metallschäumen ist sehr stark von der Dichte abhängig. Um den Zusammenhang zwischen Dichte und Festigkeit zu untersuchen, wurden eine Anzahl von Metallschäumen in einem Dichtebereich zwischen  $0,3$  und  $1,2 \text{ g/cm}^3$  aus reinem Aluminium und aus einer AlCu4-Legierung hergestellt und an ihnen Druckversuche durchgeführt. Eine Auswahl der resultierenden Spannungs-Stauchungskurven ist in Abb. 3 zu sehen. Die Schwierigkeit bei der Bestimmung der Festigkeit liegt darin, daß keine genau definierte Grenze von linear elastischem zu plastischem Verhalten vorliegt, sondern ein allmählicher Übergang. Im Falle gut ausgebildeter Plateaus läßt sich jedoch durch Tangentenbildung die Druckfestigkeit  $\sigma_f$  des Schaumes mit hinreichender Genauigkeit bestimmen. Die Festigkeit von Aluminiumschäumen kann wie die von massiven Legierungen durch Wärmebehandlungen beeinflusst werden. Da bei der Herstellung von Schäumen die Abkühlbedingungen variieren können, wurden alle Schaumproben einer nachträglichen Wärmebehandlung bei  $560^\circ\text{C}$  mit anschließender Luftabkühlung unterworfen, um einheitliche Bedingungen zu schaffen.

Die gemessenen Werte für die Festigkeit  $\sigma_f$  sind in Abb. 4 und 5 zu sehen. Für die Darstellung wurde ein doppelt logarithmischer Maßstab gewählt, um einen einfachen Vergleich mit theoretischen Modellvorstellungen zu ermöglichen. Man stellt fest, daß die Festigkeit in dieser Darstellung etwa linear mit der Dichte ansteigt. Dabei ist die Festigkeit von Schäumen aus reinem Aluminium geringer als die der AlCu4-Schäume, was verständlich ist, da sich die Festigkeiten der massiven Materialien ebenfalls unterscheiden.

Ein Modell eines Schaumes mit einer kubischen Einheitszelle mit einem Anteil  $\phi$  des Materials in den Stegen und einem Anteil  $(1-\phi)$  in den Zellwänden führt zu einem

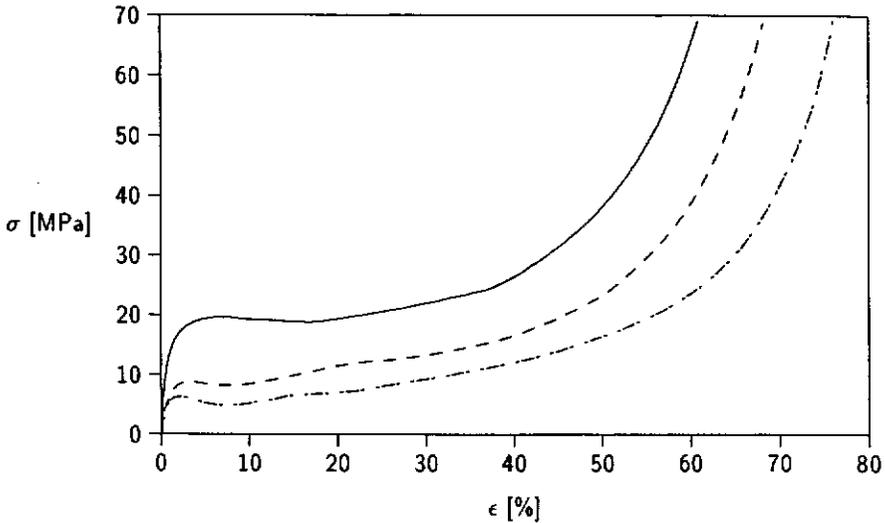


Abbildung 3: Spannungs-Stauchungskurven von AlCu<sub>4</sub>-Schäumen. Durchgezogene Linie:  $\rho_f = 0.67$ , gestrichelte Linie:  $\rho_f = 0.57$ , strichpunktierte Linie:  $\rho_f = 0.45 \text{ g/cm}^3$ . Die Stauchungsrate  $\dot{\epsilon}$  betrug  $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

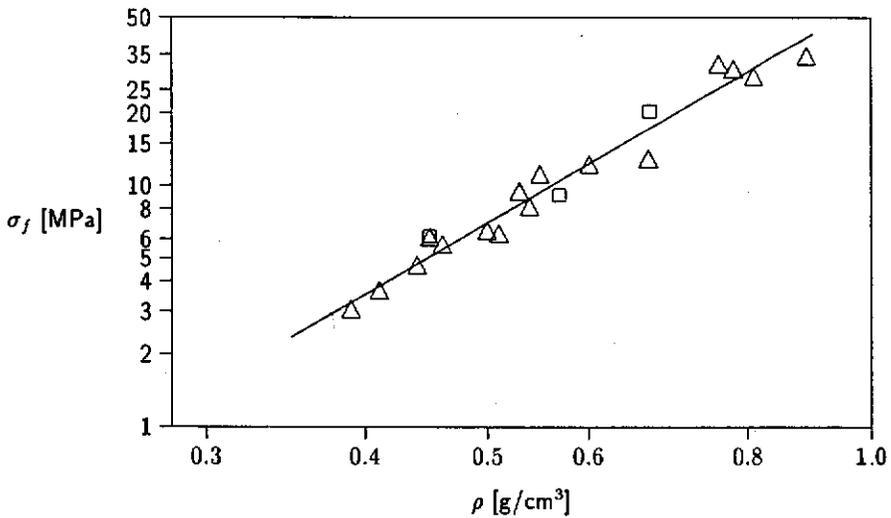


Abbildung 4: Festigkeit von AlCu<sub>4</sub>-Schäumen aufgetragen über die Dichte. Die Werte, die den Kurven in Abb. 3 entsprechen, sind an der Kennzeichnung durch Quadrate zu erkennen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt 3.07.

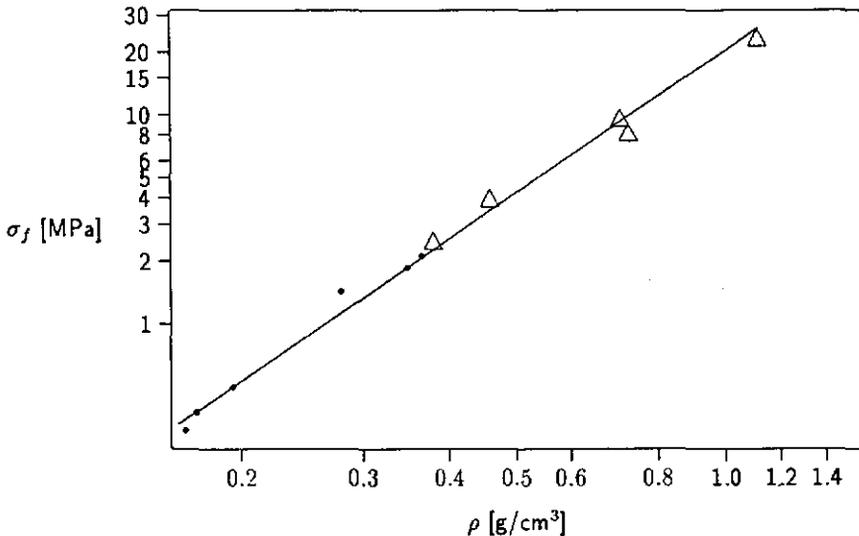


Abbildung 5: Festigkeit von Al99-Schäumen aufgetragen über die Dichte.  $\Delta$ : eigene Messungen,  $\bullet$ : Messungen von [4]. Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt 2.25.

Ausdruck für die Festigkeit [1]:

$$\sigma_f = \sigma_{ys} \left[ 0.3 \cdot \left( \phi \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{3/2} + (1 - \phi) \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \right] \quad \text{für } \rho_f < 0.3\rho_s \quad (2)$$

$\sigma_{ys}$  ist dabei die Streckgrenze des konstituierenden Materials. Der Index  $f$  bezieht sich jeweils auf den Schaum, der Index  $s$  auf den massiven Körper. Für höhere Dichten als  $0.3\rho_s$  steigt  $\sigma_f$  stärker mit  $\rho_s$  an als in Gl. 2 angegeben und geht für  $\rho_f \rightarrow \rho_s$  gegen  $\sigma_{ys}$ . Nach diesem Modell erwartet man in der doppelt logarithmischen Darstellung für  $\phi = 1$  eine Gerade mit der Steigung  $3/2$ , für  $\phi < 1$  eine etwas flacher verlaufende Kurve. Tatsächlich zeigen die gemessenen Festigkeits- zu Dichtekurven einen steileren Verlauf. Die Ausgleichsgerade in Abb. 4 hat eine Steigung von etwa 3, die in Abb. 5 von etwa 2.2. Gestützt werden diese Erkenntnisse auch durch die Messungen von Thornton und Magee [4], die Al, AlMg7 und 7075Al-Schäume untersucht haben. In Abb. 5 sind die an Reinaluminium gemessenen Werte von [4] mit aufgenommen. Man sieht, daß die Übereinstimmung mit den Messungen der vorliegenden Arbeit in der Tat befriedigend ist und daß der vom theoretischen Modell geforderte Exponent von  $3/2$  zu klein ist.

Die Streuung der Meßergebnisse für die Festigkeit ist generell recht groß, so daß man von einem Festigkeitsbereich für einen Schaum gegebener Dichte reden sollte. Der Grund dafür ist, daß die Porengrößenverteilung und die räumlichen Dichtefluktuationen in einem Metallschaum immer eine zufällige Komponente haben, die die beobachteten Schwankungen in der Festigkeit bewirkt. Hier sollten weitere Verbesserungen durch verfahrenstechnische Optimierungen möglich sein.

## 2.4 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul von Metallschäumen wurde an einer Reihe von Schäumen auf Basis der Legierung AlSi12 untersucht. Es wurden stabförmige Proben mit rechteckigem Querschnitt ( $250 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ ) zu Biegeschwingungen angeregt und aus der Resonanzfrequenz der Elastizitätsmodul (genauer: der Speichermodul) bestimmt. Die Meßergebnisse erwiesen sich als frequenzunabhängig, so daß der so bestimmte Wert mit dem statischen Elastizitätsmodul gleichgesetzt werden kann. Der gemessene Elastizitätsmodul ist in Abb. 6 in Abhängigkeit von der Dichte gezeigt.

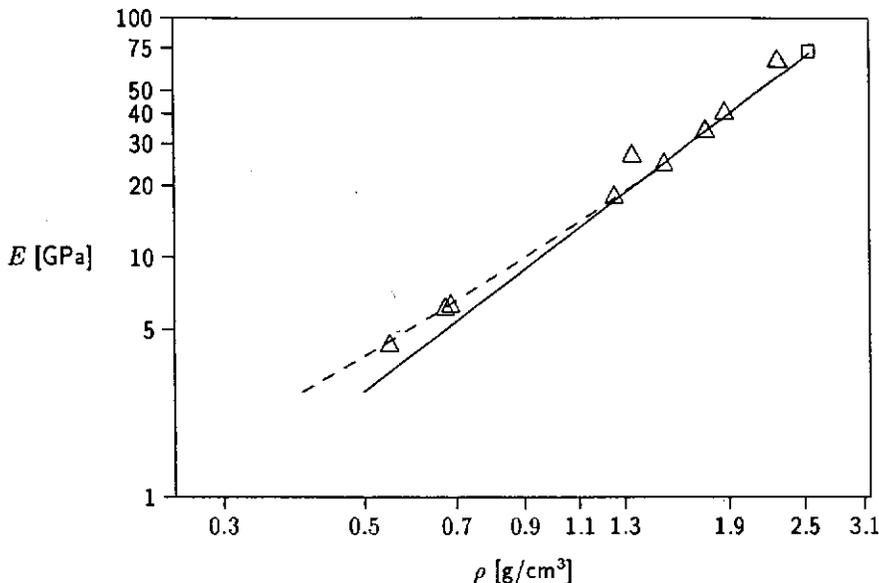


Abbildung 6: Elastizitätsmodul von AlSi12-Schäumen aufgetragen über die Dichte. Steigung der Ausgleichsgeraden: 2.0. Die gestrichelte Linie entspricht dem in Gl.3 angegebenen Verlauf mit  $\phi = 0.88$ .

Wie bei den Festigkeitsmessungen wurde ein doppelt logarithmischer Maßstab gewählt, um ein Potenzgesetz bei der Dichteabhängigkeit erkennen zu können. Tatsächlich folgt der Elastizitätsmodul einer Geraden der Steigung 2 recht gut. Das steht in Übereinstimmung mit theoretischen Überlegungen auf Grundlage eines Modells mit einer kubischen Einheitszelle. Es gilt  $[1]/$ :

$$E_f = E_s \left[ \left( \phi \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \phi) \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \right] \quad (3)$$

Das reine quadratische Verhalten entspricht einem  $\phi$  von 1. Setzt man einen Wert  $\phi = 0.88$  an (d.h. 88% des Materials ist in den Zellstegen konzentriert), so erhält man eine noch bessere Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment, wie in Abb. 6 zu erkennen ist.

### 3 Anwendungen von Metallschäumen

Aus den beschriebenen Eigenschaften von Aluminiumschäumen ergeben sich eine Reihe von Anwendungen:

- Eine naheliegende Anwendung ist die als Energieabsorber. Im Automobil können beispielsweise die Front- und Seitenteile mit Aluminiumschaum-Elementen verkleidet werden um die Spannung im Crashfall auf ein erträgliches Maß zu begrenzen. Über die Dichte des Schaumes läßt sich dabei das Spannungsniveau über einen weiten Bereich hinweg einstellen.
- Die generell niedrige Dichte von Aluminiumschäumen gepaart mit ihren guten Festigkeitseigenschaften bietet ihren Einsatz im Leichtbau an. Schaumplatten könnten als selbsttragende Bauelemente fungieren, wobei ihre Nichtbrennbarkeit ein wichtiger Punkt ist. In Luft- und Raumfahrtanwendungen bieten sich leichte Platten aus Aluminiumschaum als Ersatz für Honigwabenstrukturen z.B. in Boden- oder Wandkonstruktionen an. Zum Vorteil der im Gegensatz zu Wabenstrukturen isotropen Festigkeit von Aluminiumschäumen kommt wahrscheinlich auch noch der Vorteil niedrigerer Kosten.
- Mit dem über die Dichte in einem weiten Bereich einstellbaren Elastizitätsmodul lassen sich Elemente mit bestimmten Resonanzfrequenzen realisieren. So können unerwünschte Schwingungen vermieden werden.
- Aluminiumschäume verfügen über eine stark reduzierte Wärmeleitfähigkeit und aufgrund der irregulären Struktur über gute Schall- und Schwingungsabsorptionseigenschaften. Die Konstruktion von Wärme- und Schalldämmelementen bietet sich daher an.

### Literatur

- [1] L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Cellular Solids*, Pergamon Press, (1988)
- [2] G.J. Davies, S. Zhen, *J. Mat. Sci* 18, 1899, (1983)
- [3] J. Baumeister, Deutsches Patent DE 40 18 360 C1, (1990)
- [4] P.H. Thornton, C.L. Magee, *Met. Trans.* 6A, 1253, (1973)