

# **SCHAUMALUMINIUM - ENTWICKLUNGEN UND ANWENDUNGSMÖGLICH- KEITEN IM AUTOMOBILBAU**

**Dr. J. Banhart,  
J. Baumeister, M. Weber,  
IFAM Fraunhofer Institut Angewandte  
Materialforschung,  
Bremen**

## 1. Einleitung

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 [3-6].

Die Anwendungsmöglichkeiten für Metallschäume sind vielfältig [6]. Als besonders erfolgversprechend haben sich hier neben dem Leichtbau oder der akustischen und thermischen Dämmung Energieabsorptionsanwendungen herausgestellt, die die große Festigkeit geschäumter Metalle kombiniert mit ihrem, von der porösen Struktur verursachten, stark nichtlinearen Verformungsverhalten ausnutzen. Die Charakterisierung des Verformungsverhaltens geschäumter Metalle ist deshalb eine wichtige Aufgabe, um solche Anwendungsfelder evaluieren zu können.

## 2. Herstellung von Metallschaum

### 2.1 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 typischerweise durch axiales Heißpressen oder durch Extrusion. Das resultierende Material ist äußerlich nicht von konventionellem Metall zu unterscheiden, birgt aber das Treibmittel in seiner metal-

---

lichen 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 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.

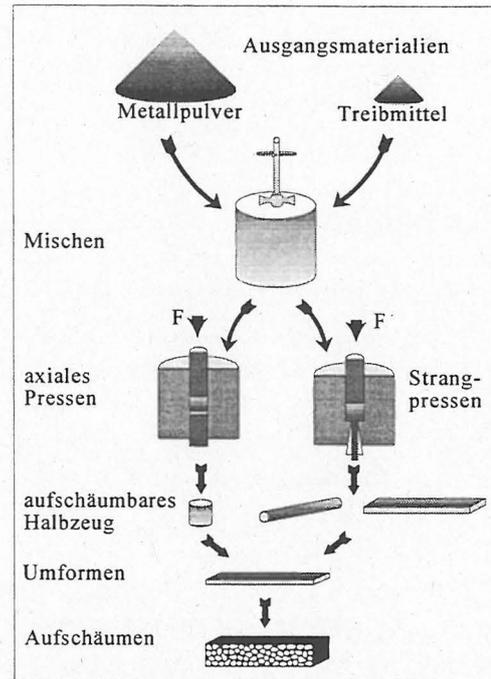


Abb. 1: Verfahren zur Herstellung von Metallschaum nach dem pulvermetallurgischen IFAM-Verfahren [3-6]

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  $0.5 \text{ g/cm}^3$ . Die Poren haben hier typischerweise Durchmesser von ca. 2-5 mm.

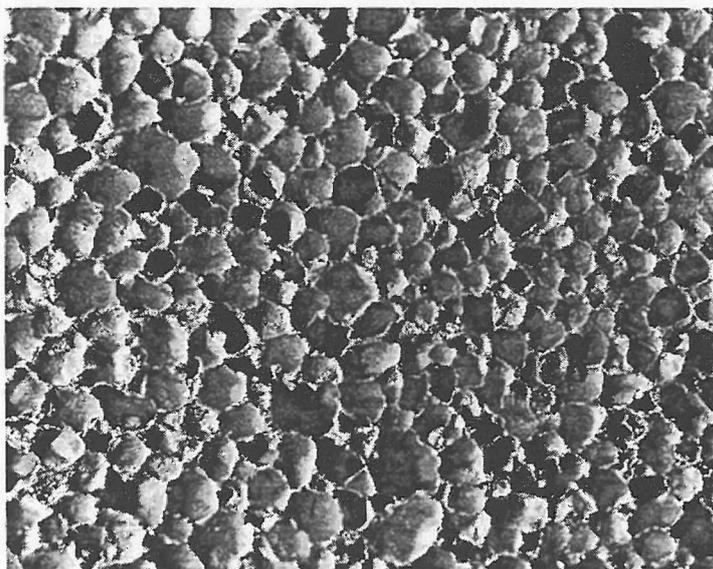


Abb. 2: Ansicht der Porenstruktur eines Aluminiumschaumes (Bildausschnitt ca. 60x50 mm)

Beim Schäumen von Aluminium entsteht immer ein gewisser Anteil von Offenporigkeit, d.h. die Poren sind miteinander durch feine Risse, Öffnungen etc. verbunden. Man kann diesen Effekt durch geeignete Maßnahmen gezielt fördern und auf diese Weise einen gemischtporigen Aluminiumschaum (d.h. geschlossenporig mit einem Anteil an Offenporigkeit) herstellen. Die Gemischtporigkeit manifestiert sich durch eine gewisse Gas- oder Flüssigkeitsdurchlässigkeit.

## 2.2. 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  $0.8 \text{ g/cm}^3$  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 und 4 sind solche Verbunde gezeigt.

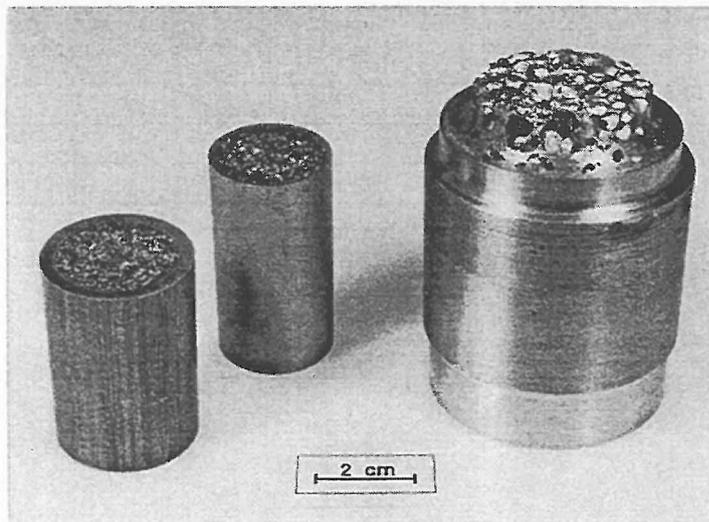


Abb. 3: Aluminiumprofil (AlMgSi0.5) mit Füllung aus Aluminiumschaum (AlSi6Cu4)

## 3. Eigenschaftsprofil von Metallschäumen

Poröse Materialien haben ein Eigenschaftsprofil, das von dem der massiven Grundwerkstoffe stark abweicht. Allgemeine Betrachtungen darüber sind in der Literatur nachzulesen [7]. Speziell zu Metallschäumen existiert eine Reihe von Arbeiten [8-10]. Für Automobilanwendungen sind v.a. mechanische Eigenschaften interessant, weshalb in dem vorliegenden Beitrag ausschließlich auf diese eingegangen wird.

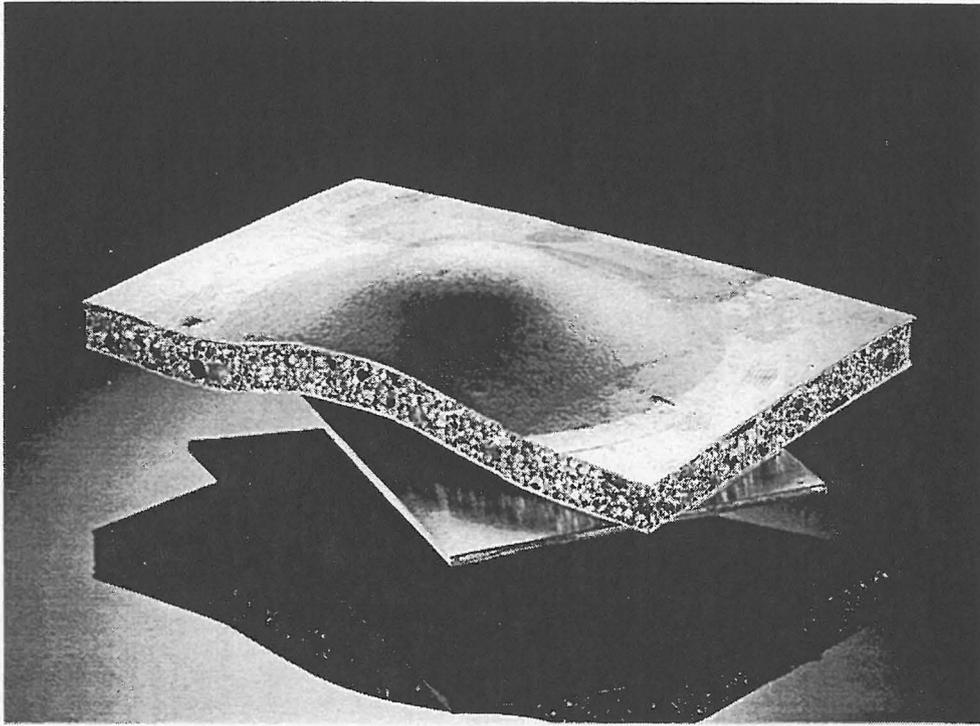


Abb. 4: Sandwichstruktur aus Aluminiumschaum und Stahldeckblechen

### 3.1 Allgemeines

Metallschäume zeigen unabhängig vom Basismaterial unter uniaxialer, quasistatischer Belastung ein universelles Deformationsverhalten [7], das in Abb. 5 in schematischer Form dargestellt ist: Für kleine Stauchungen beobachtet man einen annähernd linearen Spannungsanstieg. Eine genauere Analyse ergibt, daß der Anstieg nur teilweise reversibel ist, was auf Setzungserscheinungen während der ersten Belastung zurückzuführen ist. Der Elastizitätsmodul des Schaumes kann daher nicht aus der Steigung der Spannungs-Stauchungs-Kurve bestimmt werden, sondern muß beispielsweise durch Messungen der Biegeschwingsresonanzen bestimmt werden [8]. 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. Die Form der in Abb. 5 gezeigten Kurve variiert je nach Dichte und Zusammensetzung des Metallschaumes, zeigt jedoch stets dasselbe prinzipielle Verhalten.

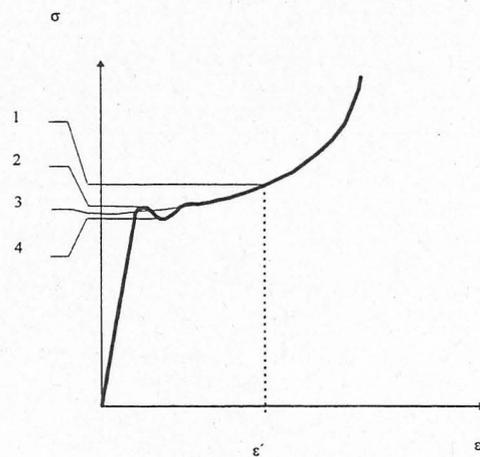


Abb 5: Schematisches Spannungs-Stauchungs-Diagramm eines Schaumes. Die Ziffern geben verschiedene Druckfestigkeiten an.

- 1: Spannung bei einer vorgegebenen Stauchung  $\sigma_{dB, \epsilon'}$
- 2: obere Streckgrenze  $\sigma_{\sigma}$
- 4: untere Streckgrenze  $\sigma_{\sigma'}$
- 3: aus dem Anstieg der Spannungs-Stauchungs-Kurve extrapolierte Druckfestigkeit  $\sigma_f$ .

Die Form der in Abb. 5 gezeigten Kurve variiert je nach Dichte und Zusammensetzung des Metallschaumes, zeigt jedoch stets dasselbe prinzipielle Verhalten.

### 3.2. Elastisches Verhalten

Der Elastizitätsmodul von Metallschäumen ist in erster Linie eine Funktion der Dichte. Man beobachtet einen Zusammenhang der Form [8]:

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

zwischen Elastizitätsmodul der Schaumes  $E$  und seiner Dichte  $\rho$ . Das bedeutet, daß man über die Wahl der Schaumdichte die elastischen Eigenschaften eines Schaumbauteils über einen weiten Bereich variieren kann.

### 3.3. Dämpfung

Das Abklingen von Schwingungen durch innere Reibung in einem Werkstoff wird durch den Verlustfaktor  $\eta$  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 [11]. Kunststoffe weisen allerdings teilweise erheblich höhere Dämpfungen auf

### 3.4. Plastisches Verhalten

Das tatsächlich an Metallschäumen gemessene Deformationsverhalten entspricht dem in Abb. 5 gezeigten schematischen Verlauf. Bei der Auswertung von Druckversuchen stellt man fest, daß bei gleicher makroskopischer Dichte das Verformungsverhalten von der Orientierung der Probe relativ zur Krafrichtung abhängen kann. Es sind zwei Arten der Orientierungsabhängigkeit nachgewiesen worden [9]:

1. Verschiedene Druckfestigkeiten bei der Prüfung von Schäumen parallel und senkrecht zur Richtung des Schäumens. Dieser Effekt ist auf eine leichte Restanisotropie zurückzuführen, die auf Texturen im Halbzeug und evtl. auch gravitationsbedingte Drainageeffekte während des Schäumens zurückzuführen ist.
2. Verschiedenes Verformungsverhalten bei Prüfung senkrecht und parallel zu den Außenhäuten der Schäume (Abb. 6). Die Außenhäute entstehen grundsätzlich beim Schäumen und bewirken einen Stützeffekt, da sie im Vergleich zum Schaum eine erhöhte Dichte und damit Festigkeit aufweisen.

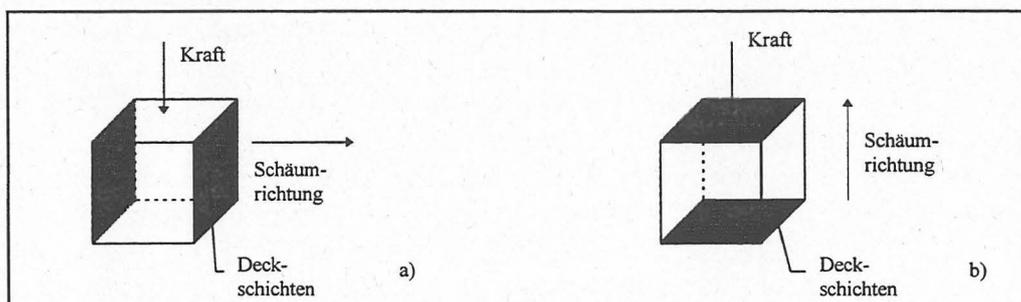


Abb. 6: Mögliche Anordnung der Metallschäume unter Druckbelastung

In Abb. 7 sind Ergebnisse von Druckversuchen an Schäumen gezeigt, bei denen die Außenhaut parallel zur Krafrichtung ausgerichtet war. Man erkennt eine Verformungscharakteristik, die von einem langen, nahezu horizontalen Plateau gekennzeichnet ist. Schäume mit anderer Deckschichtorientierung zeigen demhingegen ein davon abweichendes Plateauverhalten, das durch einen Spannungsanstieg auch in der „Plateauphase“ gekennzeichnet ist [9].

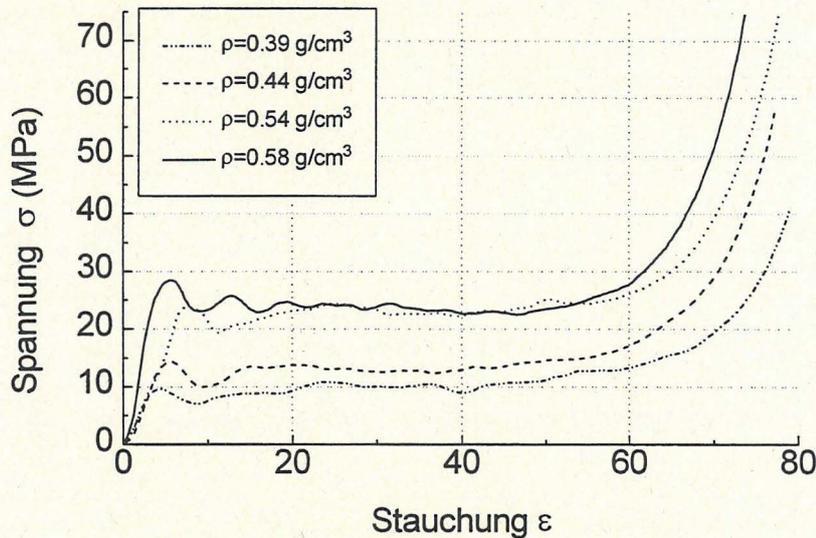


Abb. 7: Spannungs-Stauchungs-Diagramme für AlSi6Cu4-Schäume.

Die Druckfestigkeit von Metallschäumen ist in erster Linie von der Dichte abhängig. Man findet empirisch, daß ein Zusammenhang zwischen Dichte und Druckfestigkeit der Form

$$\sigma(\rho) \propto \rho^n, \quad \text{mit } n=1.5-2.0$$

existiert, was mit Modellrechnungen [7] übereinstimmt. Außer von der Dichte hängt die Druckfestigkeit auch vom Matrixmaterial und ggf. von einer Wärmebehandlung des Metallschaumes ab [9].

### 3.4. Verhalten von Verbunden

Für technologische Anwendungen in Energieabsorbern ist ein Verlauf der Spannungs-Stauchungskurve von Vorteil, wie er an Proben mit Außenhaut parallel zur Krafrichtung beobachtet wird (Abb. 7). Sicherlich ist der Verlauf der Spannungs-Stauchungs-Kurve und die Druckfestigkeit außer von der Dichte des Schaumes auch von der Dicke der Außenhaut abhängig. Die Dicke der Haut läßt sich beim Schäumen von Metall aber nur innerhalb gewisser Grenzen variieren. Es wurde deshalb der Versuch unternommen, den Effekt der Außenhaut zu verstärken, indem ein Aluminiumrohr mit Aluminiumschaum gefüllt und analog zu den reinen Schaumproben axial geprüft wurde. Mittels der im Abschnitt 2.2 beschriebenen Methode können solche Verbunde aus Al-Rohr und Aluminiumschaum hergestellt werden (siehe Abb. 3). Von solchen Verbundrohren wurden Abschnitte von 50 mm Länge abgeschnitten und axial auf analoge Weise gestaucht, wie

die reinen Schaumproben. Die Dichte der Schaumfüllung konnte zwischen  $0.45$  und  $0.65 \text{ g/cm}^3$  variiert werden.

Spannungs-Stauchungs-Kurven dieser Verbunde sind in Abb. 8 zu sehen. Zum Vergleich ist auch je ein Versuch an einem nicht aufgeschäumten Verbund aus Rohr und Halbzeug sowie an einem Rohr gezeigt, aus dem der Schaum nach dem Aufschäumen herausgebohrt wurde. Was auffällt ist ein Plateauverhalten bis ca. 50 bis 55% Stauchung sowie eine sehr hohe Plateauspannung der schaumgefüllten Rohre im Bereich von 80-90 MPa (Kurven 2,7 und 11). Im Vergleich zu den ausgeschäumten Rohren zeigt der nicht ausgeschäumte Verbund sowie das schaumfreie Profil eine viel niedrigere Festigkeit und auch keinen ausgeprägten Plateaubereich [Kurve 14 und 15]. Der Verbund Rohr/Al-Schaum weist also mechanische Festigkeiten auf, die über die Summe der einzelnen Komponenten hinausgehen. Eine Erklärung dafür ist sicherlich darin zu sehen, daß der Al-Schaum die Stabilität des Außenrohrs vergrößert, indem ein frühes Einfallen nach innen verhindert wird. Kommt es dann zur Faltenbildung, so wird der Al-Schaum in den einzelnen Falten verdichtet und wirkt so ebenfalls einer weiteren Stauchung entgegen.

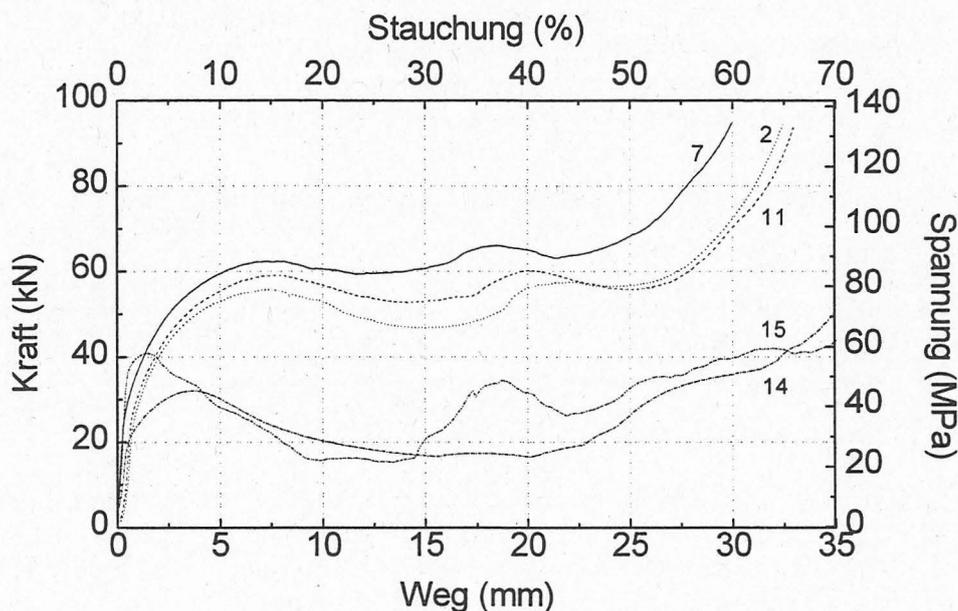


Abb. 8: Spannungs-Stauchungs-Verläufe von axialen Druckversuchen an schaumgefüllten Aluminiumrohren. Die Probennummern bedeuten: 2= $0.53 \text{ g/cm}^3$ , 7= $0.57 \text{ g/cm}^3$ , 11= $0.49 \text{ g/cm}^3$ . Probe 14 ist eine Probe, bei der der Schaum entfernt wurde, Probe 15 ein nicht ausgeschäumter Halbzeugverbund.

#### 4. Anwendungsmöglichkeiten im Automobilbau

Eine Eigenschaft von Aluminiumschaum ist das günstige Verhältnis von Masse zu Steifigkeit. Diese Eigenschaft legt einen Einsatz großflächiger Schaumbauteile nahe, bei denen die Anforderungen an die Steifigkeit hoch sind. Beispiele dafür sind die Bodenplatte 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 eines dreidimensional geformten Aluminium/Aluminiumschaum-Sandwiches, das zur Versteifung von Cabriolets eingesetzt werden soll [12].

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 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 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:

- weniger Gewicht der Konstruktion
- bessere Energieabsorptionscharakteristik, d.h. Annäherung an den rechteckigen Spannungs-Stauchungs-Verlauf
- höhere Energieabsorptionskapazität pro Masse oder Volumen
- weitere Vorteile wie z.B. gute Wirksamkeit bei Offset-Stößen

Ausgehend vom homogenen Aluminiumschaum kann eine Verbesserung der Energieabsorptionsfähigkeit wie in Abschnitt 3 dargestellt 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 [12,13].

In Abb. 9 und 10 sind anhand der Kraft-Weg-Kurven die Eigenschaften herkömmlicher Energieabsorptionssysteme gezeigt. Man sieht, daß die Energieabsorptionscharakteristik

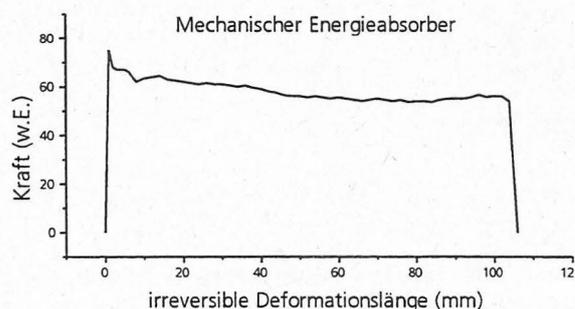


Abb. 9: Kraft-Weg-Kurve eines konventionellen Energieabsorbers im Automobil

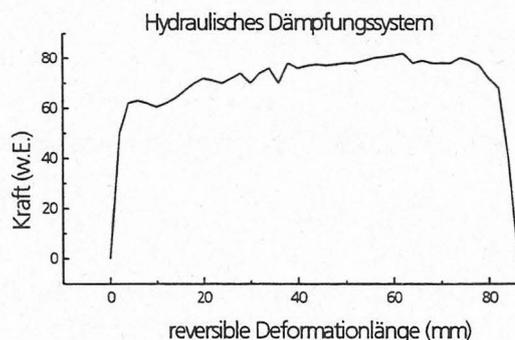


Abb. 10: Kraft-Weg-Kurve eines hydraulischen Dämpfungssystems

schon recht gut ist. Eine Aluminiumschaumlösung muß diese Eigenschaften reproduzieren oder verbessern und dazu noch Vorteile hinsichtlich des Gewichtes bieten. Die Isotropie der Eigenschaften von Aluminiumschäumen ist hier sicherlich ein wichtiger Vorteil.

Eine Erweiterung der Schäumtechnologie auf Schäume mit offener Porosität sowie auf Schäume aus höherschmelzenden Metallen (etwa Stahl [14,15]) wird eine zusätzliche Palette von Anwendungen im Automobilbereich eröffnen. Offenporige Metallschäume könnten als Dieselrußpartikelfilter, Wärmetauscher oder Luftfilter dienen, falls es gelingt, die offene Porosität entsprechend einzustellen. Schäume aus Stahl kämen für Hochtemperaturanwendungen wie für die Isolation des Auspuffkrümmers oder als Katalysatorträger in Frage, bei denen der Schmelzpunkt von Aluminium zu niedrig liegt.

## 5. Zusammenfassung

Bislang finden nur polymere Schäume oder Wabenstrukturen Verwendung in energieabsorbierenden Strukturen. Die Möglichkeit, das Spannungs-Stauchungs-Verhalten durch geeignete Wahl von Matrixmaterial, Dichte und Orientierung zu kontrollieren, macht Schäume zu einem idealen Werkstoff für derartige Anwendungen. Metallschäume könnten das Spektrum der Schäume durch ihre hohe Festigkeit und andere, auf den metallischen Charakter des Matrixmaterials zurückzuführende Größen, erweitern. Entscheidend für die Qualität eines Verpackungsschutzes oder eines Energieabsorbers ist dabei die Eigenschaft, Energie zu absorbieren, ohne daß die Höchstspannung, bzw. die höchste Beschleunigung eine Obergrenze überschreitet, bei der Schäden oder Verletzungen eintreten. Metallische Schäume können Kunststoffschäumen insbesondere dort überlegen sein, wo aufgrund eines geringen zur Verfügung stehenden Bauraumes höhere Verformungsspannungen bei gleicher oder verbesserter Energieaufnahme erwünscht sind.

Ergebnis der Untersuchungen ist, daß eine einfache Schaumstruktur nicht notwendigerweise schon ein optimales Energieabsorptionselement darstellt. Vielmehr haben Schäume mit massiver Außenhaut (Integralschäume) und Verbundstrukturen aus konventionellen Profilen und Metallschäumen ein Verformungsverhalten, das sie für solche Anwendungen geeignet erscheinen läßt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, solche Elemente durch Einbindung in die gesamte Karosseriestruktur soweit maßzuschneidern, daß das Deformationsverhalten der Gesamtstruktur eine möglichst gute Energiedissipation erlaubt. Hierzu bietet die Metallschaumtechnologie ein erhebliches Potential, z.B. für den Frontal- oder Seitenaufprallschutz zu.

Ein weiteres Anwendungsfeld für Metallschaumstrukturen erschließt sich durch die Möglichkeit, hochsteife Verbundstrukturen aus Schaum und Deckblechen herzustellen, die zudem noch dreidimensional geformt werden können.

## Literatur

- [1] Ruch W.W., Kirkevag B.: *A process of manufacturing particle reinforced foam and product thereof*, Patent PCT/WO 91/01387 (1991)
- [2] Jin I, Kenny L.D., Sang H.: *Method of producing lightweight foamed metal*, Patent US 4 973 358, (1990)

- [3] Baumeister J.: *Verfahren zur Herstellung poröser Metallkörper*, Patent DE 40 18 360, (1991)
- [4] Baumeister J., Schrader, H.: *Verfahren zur Herstellung aufschäumbarer Metallkörper und Verwendung derselben*, Patent DE 41 01 630, (1992)
- [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*, Pergamon Press, Oxford, (1988)
- [8] Banhart J., Baumeister J., Weber M.: *Geschäumte Metalle als neue Leichtbauwerkstoffe*, VDI-Berichte **1021**, 277-284, (1993)
- [9] Banhart J., Baumeister J.: *Das Verformungsverhalten geschäumter Metalle*, Metall **51**, 19, (1997)
- [10] Banhart, J. (Hrsg): *Metallschäume*, Tagungsband zum Symposium Metallschäume, Bremen, 5.-6. 3.1997, Verlag MIT\*
- [11] Banhart J., Baumeister J., Weber M.: *Damping properties of foamed aluminium*, Mat. Sci. Eng. **A205**, 221, (1996)
- [12] Seeliger H.W.: *Simulation von Crashabsorbern aus Aluminiumschaum*, in „Metallschäume“ [10]
- [13] Banhart J., Baumeister J., Weber M.: *Aluminium Foams for Automotive Applications*, Proceedings des 29th International Symposium on Automotive Technology and Automation (1996), Florenz, 3.-6.6.1996, Hrsg. D. Roller, S. 611
- [14] Pannkoke, K. et al.: *Crash Behaviour of lightweight structure materials - deep drawing sheet materials and simple metallic foam - FRP-design structures at dynamic loading conditions*, ibid. S. 645
- [15] Kriszt B., Falahati A., Degischer H.P.: *Machbarkeitsstudie zur Herstellung von Eisenbasischaum*, in „Metallschäume“ [10]
- [16] Weber M., Knüwer M.: *Evaluierung verschiedener Herstellungs- und Anwendungsmöglichkeiten für hochporöse Stahlwerkstoffe*, in „Metallschäume“ [10]

---

\* Verlag MIT (Metall - Innovation - Technologie), Euckenstraße 12, 28201 Bremen