

# Das Verformungsverhalten geschäumter Metalle

J. Banhart\*, J. Baumeister\*

*Das Verformungsverhalten von Metallschäumen unter einachsiger Druckbelastung wurde an einer Reihe von Aluminium- und Zinkbasisschäumen verschiedener Dichten untersucht. Da das Verhalten aufgrund der teilweise geschlossenen Außenhaut und der Vorzugsrichtung beim Schäumen anisotrop sein kann, führte man zusätzliche Versuche in Abhängigkeit von der relativen Orientierung von Prüfrichtung und Orientierung der Außenhaut – bzw. Schäumrichtung – durch. Schließlich wurden auch Verbundstrukturen, bestehend aus Aluminiumrohren mit einer Füllung aus Aluminiumschaum, durch axiale Druckversuche charakterisiert. Die Ergebnisse der Versuche werden in Hinsicht auf mögliche Anwendungen von Metallschäumen als Energieabsorber diskutiert.*

## Deformation characteristics of foamed metals

*The deformation behaviour of a series of aluminium and zinc foams was investigated by uniaxial testing. Because the deformation behaviour of metal foams is expected to be anisotropic with respect to the foaming direction and due to the orientation of the closed outer skin, a series of measurements was carried out where the orientation of the outer skin and the foaming axis were varied. Finally, aluminium tubes filled with aluminium foam were tested. The results of the measurements are discussed in the context of possible applications of metal foams as energy absorbers.*

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 Material-

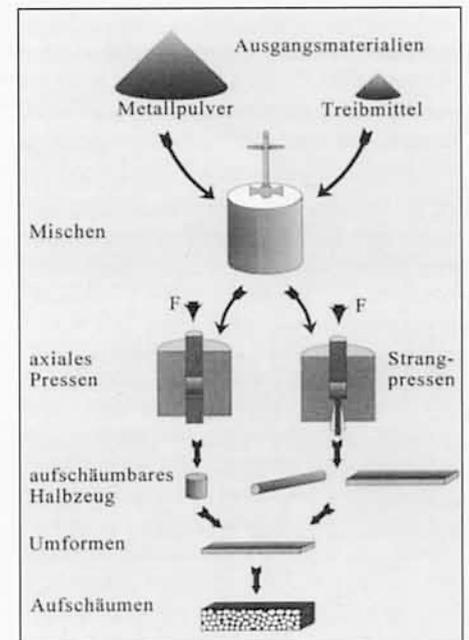
recycling gestellt, wo von Metallschäumen eine Verbesserung erwartet wird. Ein Grund für den momentan geringen Bekanntheitsgrad der Metallschäume ist sicherlich in der Art der in der Vergangenheit zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren zu sehen, die aufwendig und damit teuer waren, durchweg schwierig 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 pulvermetallurgisches Verfahren erlaubt eine 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. Ein Überblick über die allgemeinen mechanischen Eigenschaften von Schäumen ist bei Gibson und Ashby [7] zu finden.

## 1. Probenpräparation

Metallschaum wurde nach dem pulvermetallurgischen IFAM-Verfahren hergestellt, wie es in Abb. 1 schematisch dargestellt ist: Aluminium- oder Zinklegierungen wurden durch Vermischen von Metallpulvern in den jeweiligen Mengenverhältnissen hergestellt. Der Pulvermischung wurde dann ein Anteil von 0,3 bis 1 % des gasabsplattendes Treibmittels Titanhydrid

oder Zirkonhydrid zugemischt. Die so erhaltene Mischung wurde 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 wurde das Metall geschmolzen und die Gasfreisetzung des Treibmittels und somit der eigentliche Aufschäumvorgang ausgelöst. Die Schmelze expandierte und entwickelte eine halbflüssige, schaumige Konsistenz. Nachdem die Expansion bis zum gewünschten Grad erfolgt war, wurde der Schäumvorgang durch Abkühlung unter den Schmelzpunkt beendet und die Schaumstruktur so stabilisiert. Man erhält einen hochporösen metallischen Werkstoff mit gleichmäßiger Porenstruktur. Abb. 2 zeigt einen Schnitt durch einen so hergestellten Metallschaum.

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



\* Dr. John Banhart, Dipl.-Phys. Joachim Baumeister, Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung (IFAM), Lesumer Heerstraße 36, 28717 Bremen.

Zu diesem Thema gibt es ein Symposium Metallschäume am 6. und 7. 3. 97 in Bremen. Info über Fax: 04 21/6 38 31 90.



Abb. 2: Ansicht der Porenstruktur eines Metallschaumes (Bildausschnitt  $30 \times 20$  mm)



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

Für die Druckversuche an Aluminiumschäumen wurden Metallschaumquader der Abmessungen  $130 \times 100 \times 40$  mm<sup>3</sup> hergestellt, indem eine Kastenform aus Stahl mit den entsprechenden Innenabmessungen mit aufschäumbarem Aluminiumhalbzeug gefüllt und anschließend in einem Kammerofen auf Schäumtemperatur gebracht wurde. Das Metall expandierte in der oben beschriebenen Art und füllte die Form gleichmäßig mit Metallschaum. Der resultierende Schaumblock wies eine geschlossene Außenhaut und eine geschlossenporige innere Schaumstruktur auf. Die Rohdichte des Schaumblocks konnte durch Variation der Halbzeugeinwaage innerhalb weiter Grenzen variiert werden. Die Blöcke wurden in 6 Proben der Abmessungen  $40 \times 40 \times 40$  mm<sup>3</sup> zertrennt. Diese so hergestellten würfelförmigen Proben wiesen 2 geschlossene Außenflächen und 4 Flächen mit angeschnittenen Poren auf.

Die Druckproben aus Zinkschaum wurden in einer zylindrischen Stahlform von 40 mm Länge und einem Innendurchmesser von 30 mm hergestellt. Die resultierenden Druckproben hatten demnach zylindrische Gestalt und eine geschlossene Mantelfläche. Die Schäume aus AlSi6Cu4 wurden nach dem Schäumen wärmebehandelt, um eine maximale Festigkeit zu erzielen (siehe Abschnitt 2.3) während die Zinkschäume im Zustand nach dem Schäumen geprüft wurden.

Verbundstrukturen aus Aluminiumschaum und Aluminium-Rundprofilen wurden auf folgende Weise hergestellt: Rohre aus AlMgSi0.5 wurden über hohlgebohrte, aufschäumbare Bolzen der Legierungszusammensetzung AlSi6Cu4 geschoben und in einer hydrostatischen Strangpresse zu Verbundrohren verpreßt. Die Verbundrohre bestanden nach dem Pressen aus einer konventionellen äußeren Hülle, die innenwandig mit dem aufschäumbaren Material beschichtet war. Aufgrund der Umformung beim Strangpressen wurde ein metallischer Verbund erzielt. Der Verbund wurde dann

in einen Schäumofen plaziert und der Schäumvorgang so gesteuert, daß nur die aufschäumbare Beschichtung nach innen expandierte, das Außenrohr jedoch intakt blieb. Resultat des Schäumvorganges sind vollständig mit Aluminiumschaum gefüllte Aluminium-Rundprofile (Abb. 3). Für die Druckversuche wurden Verbunde mit einer Hülle der Abmessungen  $30 \times 2.5$  mm und Schaumdichten von 0.45 bis 0.6 g/cm<sup>3</sup> gewählt.

## 2. Mechanische Prüfung der Metallschäume

### 2.1. Allgemeines

Eine Reihe von Metallschäumen der Zusammensetzungen AlSi6Cu4 und ZnCu4 wurde im quasistatischen, einachsigen Druckversuch geprüft. Alle Schäume zeigten unabhängig vom Basismaterial ein universelles Deformationsverhalten [7], das in Abb. 4 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. 4 gezeigten Kurve variiert je nach Dichte und Zusam-

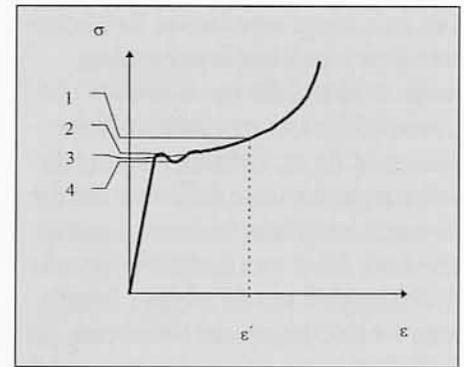


Abb 4: Schematisches Spannungs-Stauchungs-Diagramm eines Schaumes. Die Ziffern geben verschiedene Druckfestigkeiten an. 1: Spannung bei einer vorgegebenen Stauchung  $\sigma_{dB,\epsilon'}$ , 2: obere Streckgrenze  $\sigma_o$ , 4: untere Streckgrenze  $\sigma_u$ , 3: aus dem Anstieg der Spannungs-Stauchungs-Kurve extrapolierte Druckfestigkeit  $\sigma_f$

menetzung des Metallschaumes, zeigt jedoch stets dasselbe prinzipielle Verhalten. Für die Charakterisierung des Schaumes und die Beurteilung von Anwendungen sind die Druckfestigkeit und die Länge bzw. Steigung des „Plateaus“ von Bedeutung. Die Definition einer Druckfestigkeit ist jedoch nicht eindeutig. Verschiedene Möglichkeiten bieten sich an und sind in Abb. 4 durch Ziffern gekennzeichnet: Man kann die obere (2) oder untere (4) Streckgrenze ( $\sigma_o$ ,  $\sigma_u$ ) als Maß für die Druckfestigkeit verwenden [9–10] oder deren Mittelwert betrachten. Falls keine Streckgrenzen beobachtbar sind und der Anstieg der Spannungs-Stauchungs-Kurve einen hinreichend glatten Verlauf hat, kann man diese gegen  $\epsilon = 0$  extrapolieren und so eine Druckfestigkeit  $\sigma_f$  definieren (3). Schließlich kann man die Druckspannung bei einer vorgegebenen Stauchung wie z. B. 10 oder 20 % auswerten und diese Spannung  $\sigma_{dB,10}$  oder  $\sigma_{dB,20}$  als Maß für die Druckfestigkeit verwenden. Dieses Verfahren bietet sich allerdings nur für sehr glatte Spannungs-Stauchungs-Kurven an, da anderenfalls die Gefahr besteht, daß lokale Spannungsspitzen bei eben dieser Stauchung zu einem verfälschten Ergebnis führen. In der vorliegenden Arbeit wurde soweit wie möglich die Extrapolationsmethode verwendet, um die Druckfestigkeit zu bestimmen. In Fällen, in denen die Spannung nach einem ersten Maximum abfällt (wie z. B. bei Kurve 14 in Abb. 11), führt diese Methode jedoch zu unsinnigen Ergebnissen, so daß in einzelnen Fällen die Größe  $\sigma_o$  verwendet wurde.

### 2.2. Aluminiumschäume

In einer ersten Versuchsreihe wurden Schäume aus AlSi6Cu4 geprüft, die zwei vom Schäumprozeß herrührende ge-

geschlossene und vier angeschnittene Deckschichten aufwiesen. Die Legierung wurde aufgrund ihres niedrigen Schmelzpunktes ausgewählt, der das Ausschäumen von Aluminiumprofilen (siehe Abschnitt 3) erleichtert. In der Untersuchung wurde die Prüfrichtung einmal parallel und einmal senkrecht zu den metallischen Deckschichten gewählt, entsprechend der Ausrichtung a und b in Abb. 5. Variiert wurde die Dichte des Schaumes. In Abb. 6a und 6b sind Spannungs-Stauchungs-Kurven für eine Reihe von diesen Aluminiumschäumen gezeigt. Man sieht, daß die Ausrichtung der Schäumhaut ganz entscheidend die Verformungscharakteristik des Schaumes beeinflusst. Im Fall a werden wesentlich höhere Spannungen bis zum Abknicken der Kurven angenommen, außerdem wird im Bereich plastischer Verformung ein nahezu horizontales Plateau der Spannung erreicht. Bei Orientierung b ist dagegen außer für die Schäume niedriger Dichte kein Bereich nahezu konstanter Spannung zu erkennen.

Generell kann gesagt werden, daß der Plateaubereich um so länger ist, je niedriger die Dichte ist. Allerdings sinkt für fallende Dichten auch die Höhe des Plateaus und damit die Druckfestigkeit. In Abb. 7 ist dieser Zusammenhang für eine Reihe von Aluminiumschaumproben verschiedener Dichten verdeutlicht. Es wurden bei diesen Messungen die Deckschichten senkrecht zur Kraft orientiert (Orientierung b) in Abb. 5. Deutlich ist der Zusammenhang von Dichte und Druckfestigkeit zu erkennen. Man erkennt auch eine relativ starke Streuung der Druckfestigkeit. Dies ist sicherlich eine Folge der recht kleinen Proben, die nur in der Größenordnung 15–20 Poren pro Kantenlänge enthalten, so daß man relativ hohe statistische Schwankungen in Kauf nehmen muß. Für größere Prüfkörper wird man keine so ausgeprägte Schwankungen mehr erwarten. In Abb. 7 sind die beiden Achsen logarithmisch skaliert. Der Grund für diese Auftragung ist, daß viele mechanische und physikalische Größen von Schäumen nach einem Potenzgesetz von der Dichte abhängen [7]. Allgemein gilt für eine Größe A:

$$A(\rho) = A_0 \cdot \rho^n$$

Hierbei ist n ein Exponent, der von der Meßgröße abhängt, und  $A_0$  ein materialabhängiger Vorfaktor. Für die Druckfestigkeit erwartet man für den Fall, daß die Festigkeit im wesentlichen von den Zellstegen bestimmt wird und der Einfluß der dünnen Membranen vernachlässigbar ist, einen Wert von  $n = 1,5$ , wenn man dem Schaum ein kubisches Modell zugrunde-

legt [7]. Die in der vorliegenden und anderen Arbeiten [8] gemessenen Exponenten liegen durchweg etwas höher im Bereich zwischen 1,5 und 2, unter bestimmten Umständen sogar bis 3.

Abb. 8 zeigt die Druckfestigkeiten für eine Orientierung der Deckschichten parallel zur angelegten Kraft (Orientierung a) in Abb. 5). Man erkennt, daß die Werte ebenfalls einem Potenzgesetz folgen, wobei der Exponent im gleichen Bereich liegt wie in Abb. 7. Zum Vergleich ist in Abb. 8 die Ausgleichsgerade von Abb. 7 mit eingetragen. Es bestätigt sich hier der schon aus Abb. 6 ersichtliche Sachverhalt, daß die Druckfestigkeit bei Probenorientierung a wesentlich höher ist.

In Abb. 8 ist ein senkrechter Balken eingezeichnet, der einen Faktor 2 in der Druckfestigkeit bedeutet. Man erkennt, daß die Druckfestigkeit der Proben mit Deckschichten parallel zur Krafrichtung im Mittel fast doppelt so hoch ist, wie die der Proben mit anders orientierter Deckschicht. Die Ursache für den beobachteten Spannungsverlauf ist im Stützeffekt der parallel zur Krafrichtung angeordneten, annähernd massiven Deckschichten zu sehen, die alleine für sich genommen ein typisches Knickverhalten – charakterisiert durch einen hohen Spannungsanstieg gefolgt von einem starken Abfall nach dem Knicken – aufweisen würden. In Kombination mit dem Schaum ergibt sich eine Überlagerung aus dieser Knickkurve und der Charakteristik des reinen Schaumes (wie er in Abb. 6b zu sehen ist).

Ein weiterer Beitrag für den Unterschied der Kurven in Abb. 6a und 6b könnte in der unterschiedlichen Orientierung der Schäumrichtung relativ zur Krafrichtung vermutet werden. Aufgrund der Vorzugsrichtung beim Verpressen der Metallpulver zu aufschäumbarem Vormaterial bilden sich beim Beginn des Schäumvorganges Poren, die stark abgeplattet sind. Im Verlauf der Expansion des Schaumes wachsen die Poren und nehmen schließlich eine annähernd sphärische Form an. Es ist jedoch möglich, daß eine leichte Anisotropie der Porenform auch nach Beendigung des Schäumvorganges im Metallschaum verbleibt und so eine Anisotropie der mechanischen Eigenschaften bewirkt.

Um diesen Beitrag abzuschätzen, wurde in einer weiteren Versuchsreihe deshalb überprüft, ob die relative Orientierung von Schäum- und Prüfrichtung einen Einfluß auf die Druckfestigkeit von Metallschäumen hat. Dazu wurden Schaumproben ohne Deckschichten hergestellt, indem alle Flächen der Prüfkörper beschnitten wurden. Ein Teil der Proben wurde parallel zur Schäumrichtung, ein Teil senkrecht

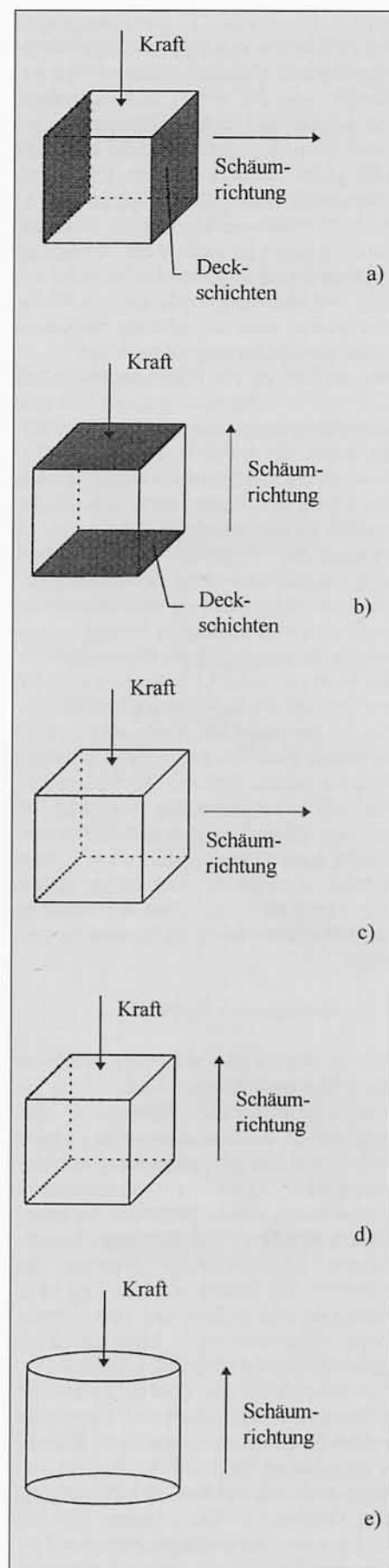


Abb. 5: Anordnung der Metallschaumproben im Druckversuch

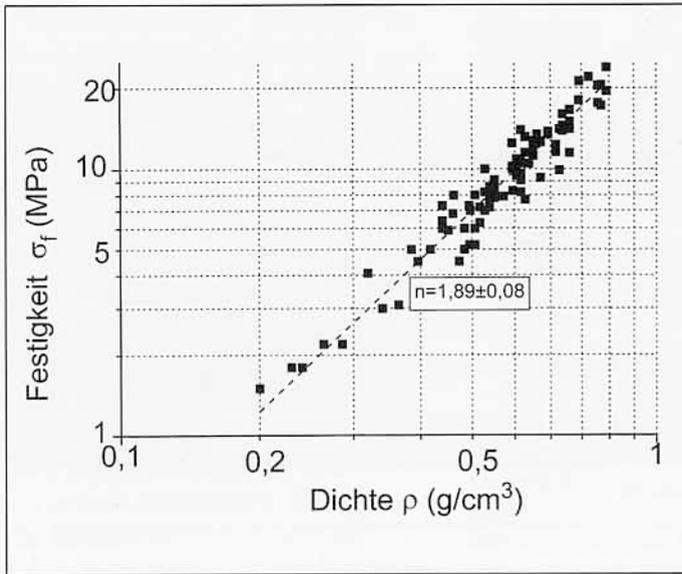


Abb. 7: Druckfestigkeit von Aluminiumschäumen mit senkrecht zur Prüfrichtung orientierter Außenhaut. Die gestrichelte Linie ist eine Ausgleichsgerade der Steigung 1.89

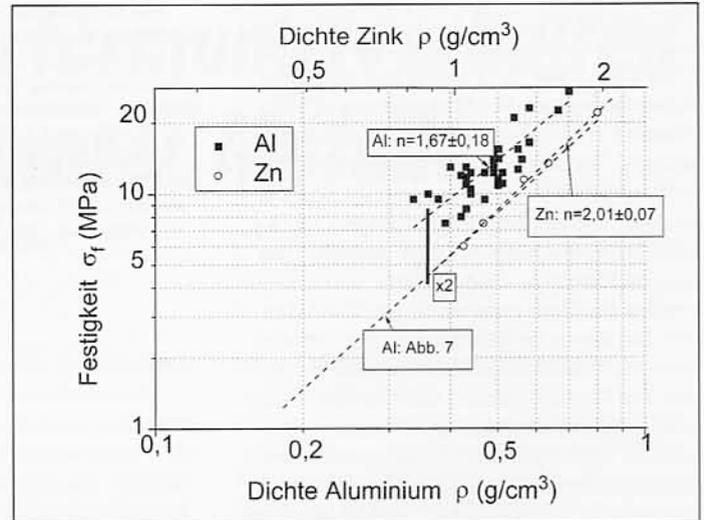


Abb. 8: Druckfestigkeit von Aluminiumschäumen mit parallel zur Prüfrichtung orientierter Außenhaut. Die gestrichelte Linie ist eine Ausgleichsgerade der Steigung 1.67. Zum Vergleich ist die Ausgleichsgerade von Abb. 7 mit eingezeichnet. Die Druckfestigkeit von ZnCu4-Schäumen ist mit eingezeichnet, wobei für deren Dichte die obere x-Achse gilt. Der vertikale Balken bezeichnet einen Faktor 2 in der Druckfestigkeit

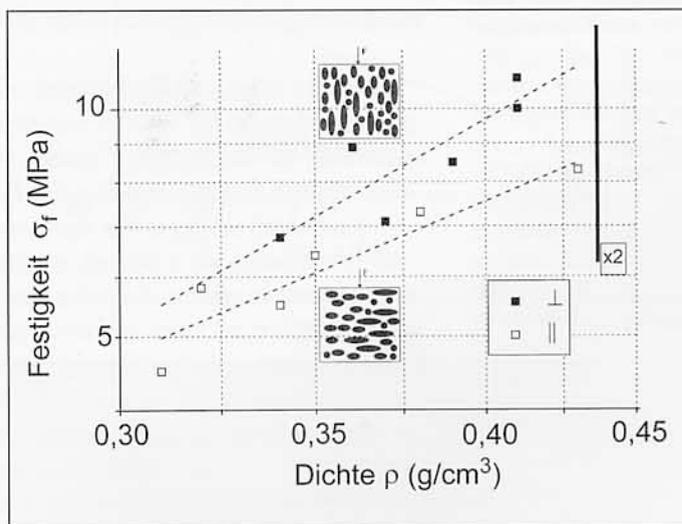


Abb. 9: Druckfestigkeit von Aluminiumschäumen mit parallel und senkrecht zur Prüfrichtung ausgerichteter Schäumrichtung. Die gestrichelten Linien sind Ausgleichsgeraden. Der vertikale Balken bezeichnet einen Faktor 2 in der Druckfestigkeit

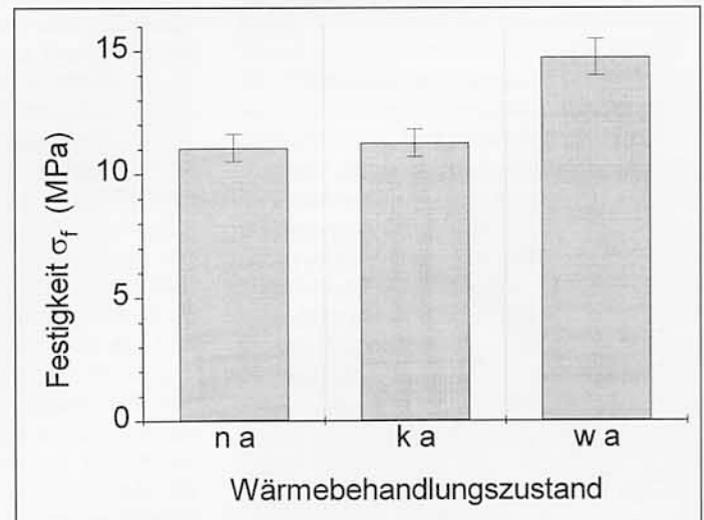


Abb. 10: Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Druckfestigkeit einer AlCuSiMn-Legierung (AA 1414). na: Prüfung im Zustand nach dem Lösungsglühen (nicht ausgelagert), ka/wa: Prüfung nach Auslagerung (kalt ausgelagert, warm ausgelagert)

#### 2.4. Zinkschäume

Die geschäumten zylinderförmigen ZnCu4 Proben wurden wie die Aluminiumschäume im einachsigen Druckversuch geprüft. Abb. 6c zeigt die entsprechenden Spannungs-Stauchungs-Kurven für fünf verschiedene Dichten. Die Kurven ähneln denen, die an Aluminiumschaumproben mit in Krafrichtung ausgerichteter Außenhaut gemessen wurden (Abb. 6a). Da die Zylinder aus Zinkschaum ebenfalls eine geschlossene, vom Schäumprozeß herrührende Mantelfläche aufwiesen, ist dieses Verhalten verständlich. Die korrespondierenden Druckfestigkeiten sind mit denen der Aluminiumschäume mit Außenhaut in Krafrichtung in Abb. 8 ver-

glichen. Hierbei sind die Dichtemaßstäbe für Al und Zn so skaliert worden, daß sich gleiche relative Dichten der Al und Zn-Schäume gegenüberstehen. Man sieht, daß die Festigkeit der Zinkschäume wie die der Al-Schäume einem Potenzgesetz mit einem Exponenten von  $n \approx 2$  folgt. Zufälligerweise sind die Festigkeiten der Zinkschäume fast gleich denen der Aluminiumschäume gleicher relativer Dichte.

#### 3. Prüfung von Verbunden aus Aluminiumrohren und Aluminiumschaum

Für technologische Anwendungen in Energieabsorbieren ist ein Verlauf der Spannungs-Stauchungskurve von Vorteil, wie

er an Proben mit Außenhaut parallel zur Krafrichtung beobachtet wird (Abb. 6a). 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 1 beschriebenen Methode konnten solche Verbunde aus Al-Rohr und Aluminiumschaum hergestellt

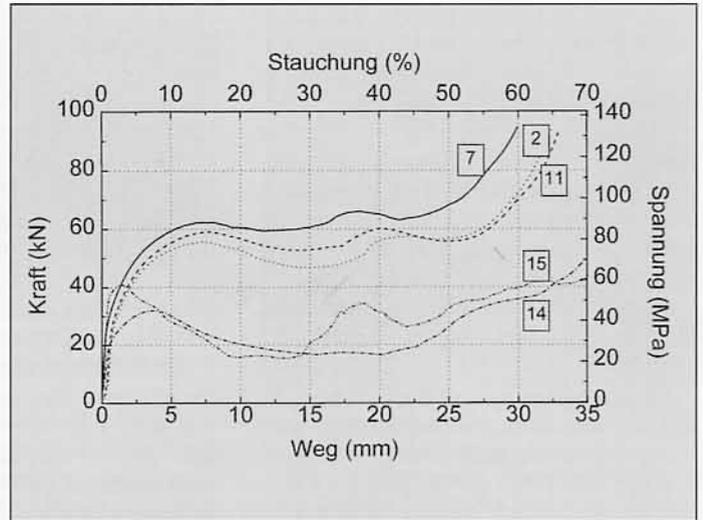
werden. Von solchen Verbundrohren wurden Abschnitte von 50 mm Länge abgeschnitten und axial auf analoge Weise gestaucht, wie die reinen Schaumproben. Die Dichte der Schaumfüllung konnte dabei allerdings nur zwischen 0,45 und 0,65 g/cm<sup>3</sup> variiert werden. Die resultierenden Spannungs-Stauchungs-Kurven dieser Verbunde sind in Abb. 11 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. Man kann in den Druckversuchen die Faltenbildung des Außenrohres anhand der leichten Wellenbewegung der Kurven erkennen. Im Vergleich zu den ausgeschäumten Rohren zeigt der nicht ausgeschäumte Verbund sowie das schaumfreie Profil eine viel niedrigere Festigkeit und auch keinen ausgeprägten Plateaubereich. Der Verbund Rohr/Al-Schaum weist also mechanische Festigkeiten auf, die über die Summe der einzelnen Komponenten hinausgehen. Eine Erklärung dafür ist sicher darin zu sehen, daß der Al-Schaum die Stabilität des Außenrohres 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.

#### 4. Technologischer Ausblick

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 Ver-

Abb. 11: Spannungs-Stauchungs-Verläufe von axialen Druckversuchen an schaumgefüllten Aluminiumrohren. Die Probennummern bedeuten: 2 = 0,53 g/cm<sup>3</sup>, 7 = 0,57 g/cm<sup>3</sup>, 11 = 0,49 g/cm<sup>3</sup>. Probe 14 ist eine Probe, bei der der Schaum entfernt wurde, Probe 15 ein nicht ausgeschäumter Halbzeugverbund



fügung 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.

#### 5. Zusammenfassung

Die Prüfung von Metallschäumen unter einachsiger Druckbelastung zeigt, daß das Spannungs-Stauchungs-Diagramm von der Dichte des Schaumes sowie der relativen Orientierung von Prüfrichtung und Außenhaut sowie von Prüfrichtung und Schäumrichtung abhängt. Höhere Dichten führen generell zu höheren Spannungen im Druckversuch aber auch zu einer Verkürzung des technologisch wichtigen Plateaus der plastischen Verformung. Eine Ausrichtung der beim Schäumen entstehenden äußeren Deckschichten parallel zur Prüfrichtung führt zu einer weiteren Erhöhung der Spannung sowie einer Verlängerung des Plateaubereichs im Vergleich zur Ausrichtung senkrecht zu den Deckschichten oder zur Verwendung von Schäumen ohne Deckschichten.

Demhingegen ist die Ausrichtung der Schäumrichtung von sekundärer Bedeutung: der Schaum kann als nahezu isotrop betrachtet werden. Aluminium- und Zink-basissschäume zeigen dieses Verhalten in gleicher Weise. Der beobachtete Stützeffekt der Außenhaut der Metallschäume ist auch für das beobachtete Stauchungsverhalten metallschaumgefüllter Aluminiumprofile verantwortlich, die sehr hohe Plateauspannungen und einen beachtlichen Plateaubereich aufweisen. Die Optimierung solcher Strukturen hinsichtlich der Wandstärken der verwendeten Profile und der Dichten der Schaumfüllung wird Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein.

#### 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, 209-213, (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] Thornton P.H., Magee C.L.: The Deformation of Aluminium Foams, Metallurgical Transactions 6A, 1253-1263, (1975)
- [10] Thornton P.H., Magee C.L.: Deformation Characteristics of Zinc Foams, Metallurgical Transactions 6A, 1801-1807, (1975)
- [11] P. Degischer, persönliche Mitteilung