

Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis

Band 9

Innovative und wirtschaftliche Bauteile durch Pulvermetallurgie

Vorträge

anlässlich des Symposiums am 25./26. November 1993 in Hagen

Veranstaltet vom

Gemeinschaftsausschuß für Pulvermetallurgie

des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh)
des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI)
der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM)
des Fachverbandes Pulvermetallurgie (FPM)
der Deutschen Keramischen Gesellschaft (DKG)

und dem

Gemeinschaftsausschuß für Hochleistungskeramik

VDI VERLAG

Möglichkeiten zur Herstellung von Bauteilen aus geschäumten Metallen

H. D. Kunze, J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber

Zusammenfassung:

Es wird ein neues, pulvermetallurgisches Verfahren zur Herstellung von hochporösen, geschäumten Metallen dargestellt. Dazu werden die jeweiligen Metallpulver mit geringen Mengen eines Treibmittels vermischt und anschließend kompaktiert. Auf diese Weise wird ein aufschäumbares Vormaterial erhalten, welches durch konventionelle Umformverfahren zu Blechen, Rohren oder Profilen weiterverarbeitet werden kann und erst anschließend durch Erwärmung auf Temperaturen im Bereich des Schmelzpunktes aufgeschäumt wird.

Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es auch möglich, relativ komplexe Bauteile durch Ausschäumen geeigneter Formen zu erzeugen. Dabei hat es sich gezeigt, daß dünnwandige Formen vorteilhaft sind, da diese eine gute Temperaturkontrolle des Schäumvorgangs erlauben.

Der Einfluß der Schaumdichte auf die mechanischen Eigenschaften wird am Beispiel des E-Moduls und der Druckfestigkeit aufgezeigt. Einige weitere Eigenschaften und die möglichen Anwendungsgebiete werden anhand von Beispielen verdeutlicht.

Einleitung

Es ist seit langem bekannt, daß hochporöse Materialien mit einer zellularen Struktur neben dem geringen spezifischen Gewicht auch eine hohe Steifigkeit aufweisen. Aus diesem Grund werden zelluläre Materialien auch von der Natur als Konstruktionswerkstoffe verwendet; als häufig zitierte Beispiele dienen hier Holz und Knochen [1]. Auch geschäumte Kunststoffe sind weit verbreitet und tragen zur Lösung technischer Probleme bei.

Weit weniger bekannt ist jedoch die Tatsache, daß auch Metalle und Legierungen mit zellulärer Struktur hergestellt werden können. Sofern diese Werkstoffe Porositäten von über 50% aufweisen, werden sie üblicherweise unter den Begriffen geschäumte Metalle oder Metallschäume zusammengefaßt.

In der Vergangenheit wurden Verfahren zur Herstellung von geschäumten Metallen aus schmelzflüssigen Vormaterialien beschrieben [2-6]. In fast allen Fällen handelte es sich dabei um Aluminiumbasis-Werkstoffe. Hierzu wurde zunächst die Viskosität der jeweiligen Metallschmelze durch geeignete Maßnahmen modifiziert und anschließend ein Treibmittel eingerührt oder Gase eingeleitet. Als Treibmittel wurden überwiegend pulverförmige Metallhydride, z.B. Titanhydrid (TiH_2), genannt. Diese Stoffe zersetzen sich bei Erwärmung unter Abspaltung von Wasserstoff, welcher als Treibgas zur Porenbildung führt. Die Zersetzungstemperatur der Metallhydride liegt in den meisten Fällen deutlich unter der Schmelztemperatur von Aluminium, bei Titanhydrid beträgt sie z.B. ca. 400°C. Dies hat zur Folge, daß während des Einrührens des Hydrids in die Aluminiumschmelze eine spontane Zersetzung des Treibmittels erfolgt, so daß für eine gleichmäßige und homogene Verteilung dieser Substanz entsprechend wenig Zeit zur Verfügung steht. Wegen dieser offensichtlichen Schwierigkeiten konnte sich diese Technologie nicht durchsetzen.

Herstellungsverfahren

Im Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen wurde ein neues, pulvermetallurgisches Verfahren zur Herstellung von geschäumten Metallen entwickelt [7-10]. Nach diesem Verfahren werden handelsübliche Pulver aus Aluminium oder Aluminiumlegierungen mit Hilfe konventioneller Methoden - beispielsweise in einem Taumelmischer - mit geringen Mengen des ebenfalls pulverförmigen Treibmittels vermischt. Auf diese Weise wird eine sehr homogene Verteilung des gasabspaltenden Pulvers in dem Metallpulver eingestellt. Anschließend wird diese Pulvermischung zu einem festen, wenig porösen Vormaterial verdichtet. Hierzu können je nach Anwendungsfall verschiedene Kompaktierungsverfahren eingesetzt werden. In der Regel bietet sich das direkte Pulverstrangpressen an, während für Versuchsreihen in Labormaßstab das uniaxiale

Heißpressen häufig angewendet wird. Andere Verfahren wie das Pulverwalzen oder heißisostatische Pressen haben sich in Stichversuchen als ebenfalls praktikabel erwiesen, sind jedoch aufwendiger und daher nur für spezielle Anwendungen sinnvoll.

Bei Berücksichtigung der richtigen Verfahrensparameter ist das Resultat des Verdichtungsvorgangs ein aufschäumbares Vormaterial oder Halbzeug, welches durch eine abschließende Erwärmung auf Temperaturen mindestens im Bereich des Schmelzpunktes der jeweiligen Legierung expandiert und dabei seine hochporöse, geschlossenzellige Porenstruktur entfaltet. Dies impliziert, daß im aufschäumbaren Vormaterial jedes Treibmittelteilchen in eine gasdichte metallische Matrix eingebettet sein muß. Anderenfalls könnte das Treibgas bei Beginn der Expansion durch noch bestehende offene Porenkanäle entweichen und würde so nicht mehr zur Porenbildung zur Verfügung stehen.

Eigenschaften des aufschäumbaren Halbzeugs

Die Eigenschaften des verdichteten, aufschäumbaren Vormaterials werden in Tabelle 1 verglichen mit den Mindestanforderungen, die an konventionelles Aluminium ähnlicher Reinheit gestellt werden [11]. Die angegebenen Daten beziehen sich in beiden Fällen auf Reinaluminium (Al99,5) im kaltgewalzten Zustand, wobei das aufschäumbare Vormaterial zusätzlich 0,4 Gew.% des Treibmittels (TiH₂) enthielt.

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften des aufschäumbaren Vormaterials und von konventionellem Aluminium

Eigenschaft	Al99,5+TiH ₂ (experimentelle Werte)	Al99,5 (Literaturwerte)
Zugfestigkeit	176-178 MPa	130 MPa
Streckgrenze	138-148 MPa	110 MPa
Bruchdehnung	6,8-11,2 %	4 %
Härte	48 ± 2 HV20	45 HV20
spezif. Gewicht	2,70 g/cm ³	2,70 g/cm ³

Es soll darauf hingewiesen werden, daß das aufschäumbare Halbzeug durch konventionelle Verfahren wie Walzen, Schmieden oder Strangpressen weiterverarbeitet werden kann, so daß auch Bleche, Stäbe, (Hohl-)Profile etc. darstellbar sind. Erst durch eine einfache Erwärmung dieses Materials auf Temperaturen im Bereich des Schmelzpunktes des Materials wird die Expansion eingeleitet, so daß es auch möglich ist, relativ komplexe Formteile zu erzeugen. Hierzu werden entsprechend gestaltete Hohlformen mit dem aufschäumbaren Material gefüllt und durch Erwärmung ausgeschäumt.

Durch geeignete Maßnahmen ist es auch möglich, das Halbzeug selektiv, d.h. nur partiell, zu schäumen. In diesen Fällen behalten bestimmte Teilbereiche des Vormaterials eine hohe Dichte bei, was hinsichtlich der Krafteinleitung in die geschäumten Bereiche vorteilhaft sein kann.

Struktur- oder Integralschäume - wie sie schon von den Kunststoffschäumen bekannt sind - können auch mit Aluminium realisiert werden. Diese Schaumkörper bestehen aus einem hochporösen Kern, der von einer äußeren Schicht höherer Dichte von bis zu mehreren Millimetern Dicke umgeben ist.

Sandwich-artige Strukturen können durch mehrere Verfahren hergestellt werden. Die einfachste Methode ist, Bleche aus konventionellen Materialien auf eine Kernlage aus geschäumtem Metall aufzukleben. In den Fällen, wo höhere Anforderungen an die thermische Belastbarkeit gestellt werden, ist eine metallische Bindung der Deckbleche zu bevorzugen. Dies kann beispielsweise durch einen speziellen Walzplattiervorgang erreicht werden.

Möglichkeiten zur Bauteilherstellung

Für die Herstellung von Bauteilen aus geschäumtem Aluminium bieten sich mehrere Möglichkeiten an, die von dem verfahrens-technischen Vorteil ausgehen, daß nach der Pulverkompaktierung zunächst ein aufschäumbares Vormaterial vorliegt. Die herstellbaren Bauteile sind prinzipiell nach Formteilen und Verbundbauteilen zu unterscheiden.

Formteile

Mit Hilfe des aufschäumbaren Vormaterials können endgeometrienaher Formteile elegant durch Ausschäumen entsprechender Hohlformen erzeugt werden. Dazu wird das Vormaterial in die Form eingelegt und anschließend in geeigneter Weise erwärmt. Nach Erreichen des Schmelzpunktes beginnt das Material zu expandieren und füllt dadurch die Form aus. Hinsichtlich der Wahl des Formmaterials ergibt sich hieraus unmittelbar die Forderung nach einer hohen Thermoschock-Beständigkeit im Temperaturbereich bis zu ca. 800°C. Obwohl quantitative Aussagen über den Expansionsdruck des Aluminiumschaums noch nicht vorliegen, ist davon auszugehen, daß die Anforderungen an die Festigkeit des Formmaterials gering sind, da die Expansion im schmelzflüssigen Zustand erfolgt.

Gute Erfahrungen wurden bisher mit Stahl und keramischen Werkstoffen gemacht. Dabei zeigte sich, daß dünnwandige Formen aus tiefgezogenen Stahlblechen vorteilhaft sind. Aufgrund der geringen thermischen Trägheit solcher Schäumformen wird eine gute Temperatursteuerung des Schäumvorgangs ermöglicht.

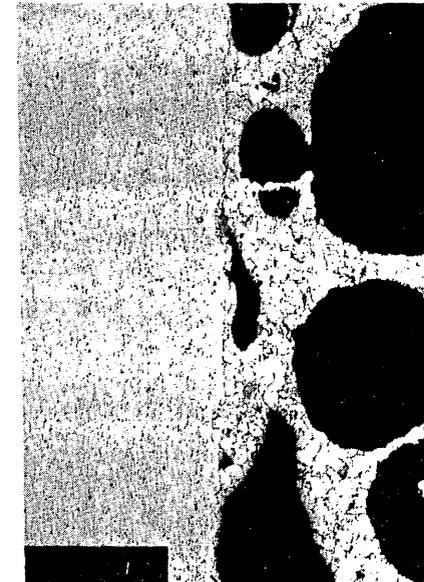
Dagegen bietet sich bei der Verwendung von keramischen Formen vorzugsweise eine induktive Erwärmung des aufschäumbaren Vormaterials an. Ein großer Vorteil keramischer Formmassen besteht weiterhin darin, daß Formteile durch Abformen geeigneter Modelle hergestellt werden können.

Neben dem oben beschriebenen Ausschäumen von Formen werden zukünftig auch die Möglichkeiten zur spanlosen Formgebung der Metallschäume untersucht werden. Insbesondere sind die werkstofftechnischen Grenzen hinsichtlich der Warm- bzw. Kaltformgebung durch Pressen zu ermitteln.

Abschließend sei auch auf die Möglichkeit hingewiesen, Formteile durch zerspanende Bearbeitung herzustellen. Hier müssen jedoch in der Regel Kompromisse gemacht werden, da durch die Zerspanung die äußere Schäumhaut abgetragen wird und die Poren im Inneren des Werkstoffs angeschnitten werden.

Verbundbauteile

Im Bereich der Verbundbauteile ist generell zu unterscheiden zwischen artgleichen und artfremden Verbundpartnern. So kann der Aluminiumschaum für sandwich-artige Verbunde zum einen mit Deckblechen aus konventionellem Aluminium, zum anderen jedoch auch mit Stahlblechen kombiniert werden. Wie bereits eingangs erwähnt wurde, sind solche Verbunde sowohl mit polymerer Bindung, als auch mit metallischer Bindung der Deckbleche zum Schaumkern realisierbar. Dies gilt analog auch für schaumgefüllte Profile, bei denen der Schaumkern entweder nachträglich eingeklebt werden kann, oder aber im Verlauf eines Ausschäumvorgangs direkt eine metallische Bindung mit dem Profilwerkstoff eingeht.



↔
100µm

Bild 1: Verbindungszone eines mit Aluminiumschaum ausgeschäumten Hohlprofils aus AlMgSi_{0,5}

Als Beispiel für den letztgenannten Fall ist in Bild 1 die Verbindungszone zwischen Aluminiumschaum und einem konventionellen Aluminiumwerkstoff wiedergegeben. Dieser Verbund wurde durch Ausschäumen eines Aluminium-Hohlprofils mit rechteckigem Querschnitt hergestellt und läßt eine gute metallische Bindung der Verbundpartner erkennen.

Zum Themenkreis der Verbundbauteile mit metallischer Bindung zum Schaumkern gehören im weitesten Sinne auch die Integralschäume, da hier die beiden Verbundpartner zwar in der Regel eine identische chemische Zusammensetzung, aber eine stark unterschiedliche Dichte aufweisen. Solche Struktur- oder Integralschäume können z.B. durch eine gezielte, inhomogene Temperaturführung des Schäumvorgangs hergestellt werden.

Eigenschaften der Aluminiumschäume

Die offensichtlichste Eigenschaft geschäumter Werkstoffe ist ihr geringes spezifisches Gewicht. Mit Hilfe des pulvermetallurgischen Verfahrens werden bei Aluminiumschäumen üblicherweise Dichtewerte im Bereich zwischen 0,4 und 1 g/cm³ erreicht, obwohl auch Werte bis hinab zu 0,2 g/cm³ erzielt wurden. Aufgrund ihrer geschlossenporigen Struktur schwimmen Aluminiumschäume in Wasser.

Die mechanischen Eigenschaften von geschäumten Werkstoffen werden in der Regel in Druckversuchen ermittelt. Um die überlegene Festigkeit der Metallschäume zu verdeutlichen, wird in Bild 2 ein Polyethylen-Schaum (PE, Dichte 0,12 g/cm³) mit einem Aluminiumschaum (AlCu4-Legierung, Dichte 0,45 g/cm³) verglichen. In beiden Fällen beträgt die Porosität demnach zwischen 83 und 87 %. Zur besseren Vergleichbarkeit mußte jedoch die Festigkeitsskala für den PE-Schaum um den Faktor 30 vergrößert werden.

Beide Kurven zeigen einen Verlauf, welcher typisch für hochporöse, zellulare Werkstoffe ist: an einen anfänglichen Bereich mit näherungsweise linearem Anstieg schließt sich eine Region mit nur geringem Spannungsanstieg (Plateau) an. Erst wenn bei hohen Stauchungswerten die Schaumstruktur wieder weitgehend verdichtet wird, erfolgt ein abschließender steiler Spannungszuwachs. Aufgrund dieser speziellen Form der Spannungs-Stauchungs-Kurve besitzen geschäumte Werkstoffe generell ein großes Energieabsorptionsvermögen.

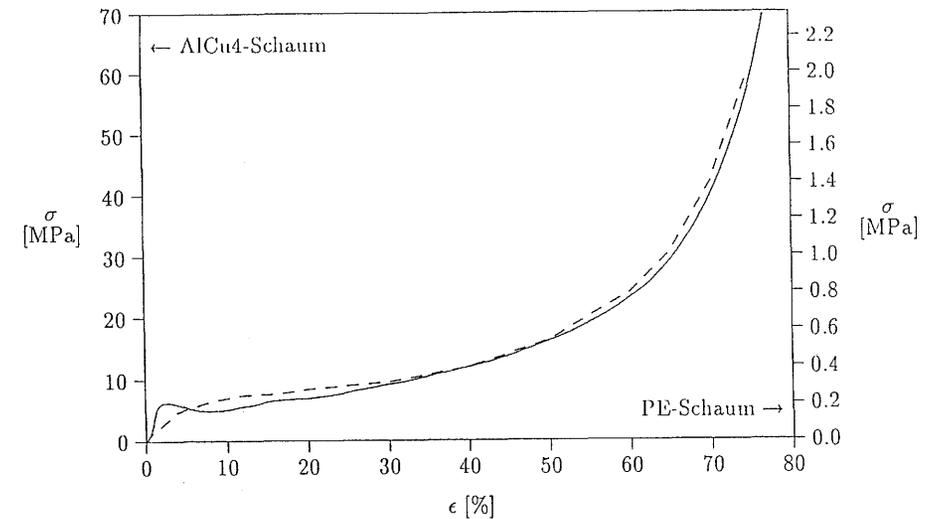


Bild 2: Spannungs-Stauchungs-Kurve eines AlCu4-Schaums (durchgezogene Linie, linke Skala) und eines PE-Schaums (gestrichelte Linie, rechte Skala)

Um das Energieabsorptionsverhalten von Schaumwerkstoffen näher zu charakterisieren, ist es aufschlußreich, den Effizienzwert η zu bestimmen. Bei einer gegebenen Stauchung ist dieser Wert definiert als das Verhältnis der tatsächlich absorbierten Energie zu dem Energiebetrag, den ein idealer Absorber erreichen könnte. Während ein idealer Absorber einen rechteckigen Verlauf der Spannungs-Stauchungs-Kurve aufweisen würde, kann dieses Verhalten von realen Materialien nur angenähert werden. Aus diesem Grund liegt der Effizienzwert stets unter 1, d.h. unter 100 %.

Es ist möglich, die Struktur der Aluminiumschäume so zu beeinflussen, daß sich ein besonders lang ausgeprägter Plateaubereich ergibt. Ein entsprechendes Spannungs-Stauchungs-Diagramm ist in Bild 3 dargestellt. Gegenüber Bild 2 ist

hier zu erkennen, daß sich das Plateau bis hin zu Stauchungen von 60% erstreckt. Bis zu diesem Wert bewegt sich auch die Effizienz mit über 80% auf hohem Niveau. Durch eine Reduktion der Peak-Höhe zu Beginn des Plateaus könnte sogar noch eine weitere Verbesserung erzielt werden.

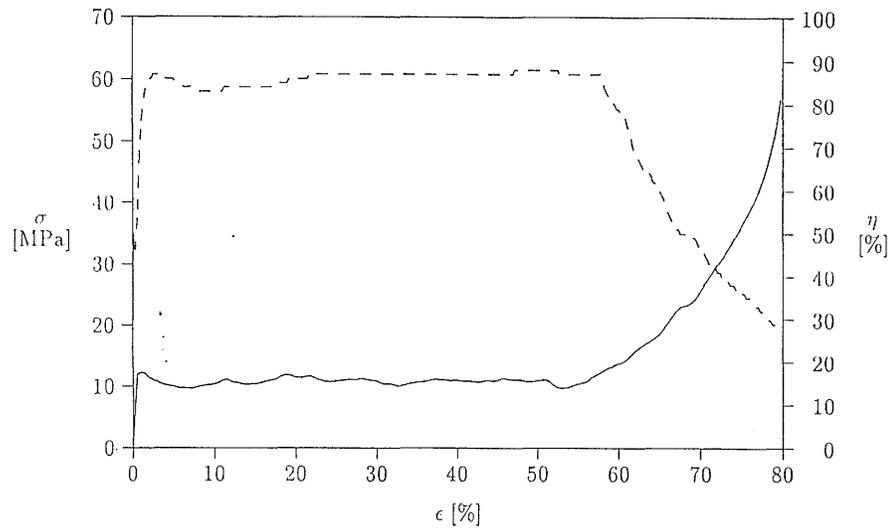


Bild 3: Spannungs-Stauchungs-Kurve eines Aluminiumschaums mit gutem Energieabsorptionsverhalten

Die Festigkeit von geschäumten Metallen wird vor allem von den folgenden Parametern beeinflusst:

- spezifisches Gewicht
- Legierungswahl
- Wärmebehandlungszustand
- Porenmorphologie

Um den Zusammenhang zwischen der Festigkeit und der Dichte von geschäumten Metallen zu untersuchen, wurden Proben im Dichtebereich zwischen 0,3 und 1,2 g/cm³ hergestellt. Als Matrixlegierung wurde AlCu4 gewählt und alle Proben befanden sich im gleichen Wärmebehandlungszustand. Die Prüfung erfolgte mit Hilfe einer rechnergesteuerten Prüfmaschine bei einer konstanten Querschnittsgeschwindigkeit von 2 mm/min. Als Maß für die Festigkeit diente die obere Fließgrenze, σ_f , d.h. die Höhe des ersten Peaks in der Spannungs-Stauchungs-Kurve. In den Fällen, wo ein Anfangspeak nicht beobachtet werden konnte, wurde die Fließgrenze durch Tangentenbildung bestimmt.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in **Bild 4** zusammengefasst. Für die Darstellung wurde ein doppelt-logarithmischer Maßstab gewählt, da aufgrund theoretischer Modellvorstellungen eine Abhängigkeit in Form eines Potenzgesetzes zu erwarten ist. Die Steigung der im Diagramm dargestellten Geraden beträgt 2,2, wodurch eine annähernd quadratische Abhängigkeit der Fließspannung von der Werkstoffdichte angezeigt wird.

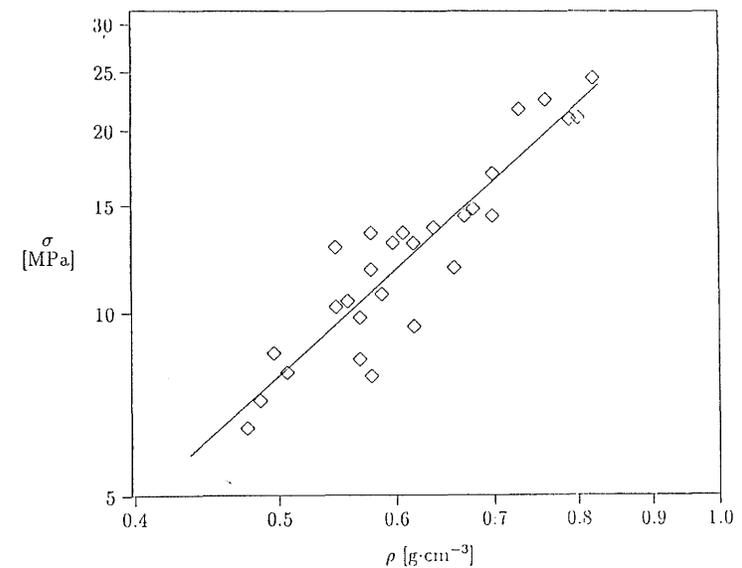


Bild 4: Festigkeit von AlCu4-Schäumen als Funktion der Dichte in doppelt-logarithmischer Auftragung

Die Berechnung eines einfachen Modells für einen Schaum mit einer kubischen Elementarzelle führt zu folgender Vorhersage für die Festigkeit eines Schaumwerkstoffs:

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

wobei σ_{ys} die Fließgrenze des Matrixmaterials ist. Durch den Parameter ϕ wird die Massenverteilung innerhalb der Zellen beschrieben, wobei ϕ den in den Zellstegen vorliegenden Massenanteil repräsentiert, während $(1-\phi)$ den Beitrag der Zellmembranen beschreibt [1]. Der Index f bezieht sich jeweils auf den Schaum, der Index s auf den massiven Werkstoff. Nach diesem Modell erwartet man in der doppelt-logarithmischen Darstellung für $\phi=1$ eine Gerade mit der Steigung 1,5, für $\phi < 1$ eine etwas flacher verlaufende Kurve. Tatsächlich zeigt die gemessene Kurve dagegen den angegebenen steileren Verlauf mit einer Steigung von 2,2. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu bedenken, daß das zugrundeliegende kubische Schaummodell eine starke Vereinfachung darstellt. So wird z.B. bei Aluminiumschäumen keine kubische, sondern vielmehr eine polygonale Schaumstruktur beobachtet. Darüber hinaus ist die Streuung der in Bild 4 dargestellten Meßwerte noch recht groß, so daß die Unsicherheit bei der Bestimmung der Steigung mit $\pm 10\%$ anzusetzen ist.

Weitere Druckversuche wurden durchgeführt, um die Anisotropie des geschäumten Materials zu untersuchen. Hierzu wurden mehrere Proben gleicher Dichte hergestellt und sowohl parallel, als auch senkrecht zur Expansionsrichtung getestet. Die bereits beschriebene Streuung der Meßwerte, sowie die Unmöglichkeit, an ein und derselben Probe die Festigkeit in verschiedenen Richtungen zu ermitteln, erschweren die Interpretation der Ergebnisse dieser Versuchsreihe. Es scheint sich jedoch eine etwas erhöhte Festigkeit des Materials bei Prüfung senkrecht zur Schäumrichtung anzudeuten.

Der Elastizitätsmodul der geschäumten Metalle wurde nach dem Biegeschwingungsverfahren bestimmt. Dazu werden stabförmige Proben mit rechteckigem Querschnitt (250x10x5 mm) zu Biegeschwingungen angeregt und aus der Resonanzfrequenz der Elastizitätsmodul berechnet. Da die Meßergebnisse sich

als frequenz-unabhängig erwiesen, können die so bestimmten Werte mit dem statischen E-Modul gleichgesetzt werden.

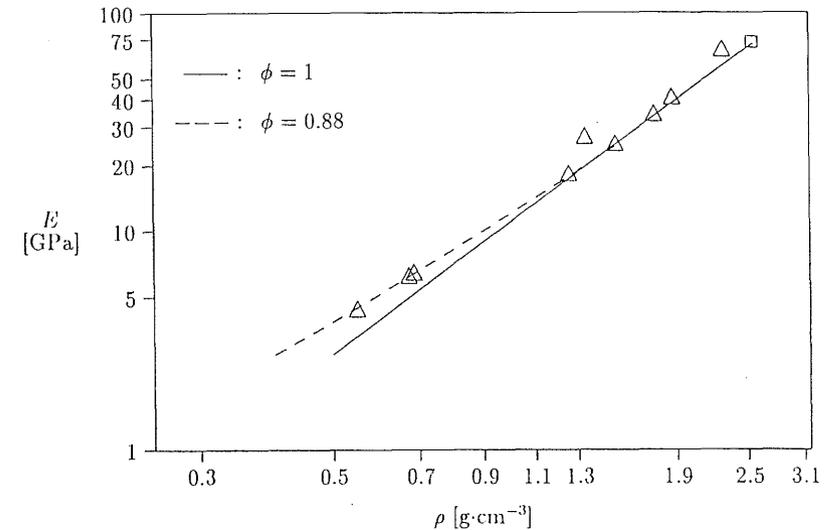


Bild 5: Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Dichte in doppelt-logarithmischer Auftragung

Angesichts der starken Vereinfachungen, die dem Schaummodell mit einer kubischen Elementarzelle zugrundeliegen, ist es überraschend, daß dieses Modell die Dichteabhängigkeit des Elastizitätsmoduls recht gut beschreibt. Die Modellrechnung ergibt nämlich für den E-Modul die Gleichung

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

so daß bei einer Auftragung der Meßwerte in einem doppelt-logarithmischen Maßstab eine Gerade mit der Steigung 2 zu erwarten ist. Dieses Verhalten wird tatsächlich beobachtet, Bild 5. Die durchgezogene Linie entspricht dem rein quadratischen Verhalten, d.h. einem Wert von $\phi=1$. Eine noch bessere Übereinstimmung wird erhalten, wenn für ϕ ein Wert von 0,88 angenommen wird (gestrichelte Linie in Bild 5). Dieser Massenverteilungswert von 0,88 bedeutet, daß in den untersuchten Aluminiumschäumen der überwiegende Teil des Materials in den Zellstegen, weniger in den Zellmembranen konzentriert ist.

Obwohl der erste Teil der Spannungs-Stauchungs-Kurve gewöhnlich als linear-elastischer Bereich bezeichnet wird, ist davon abzuraten, den Elastizitätsmodul geschäumter Metalle in der sonst üblichen Weise als Tangente im Anfangsbereich der Kurve zu bestimmen. Es stellte sich heraus, daß selbst in dieser frühen Phase des Belastungsvorgangs bereits kleinere plastische Verformungsbeiträge auftreten. Als Ursache hierfür kommen Probensetzungen, Heterogenitäten der Porenstruktur sowie andere Probendefekte in Betracht. Aus diesem Grund sind rein elastische Prüfverfahren, wie das oben beschriebene Biegeschwingungsverfahren oder Ultraschallmethoden, vorzuziehen.

Um die hohe Steifigkeit geschäumter Werkstoffe zu veranschaulichen, ist es nützlich, die Durchbiegung eines beidseitig unterstützten Trägers mit quadratischem Querschnitt zu betrachten. Die Aufgabe besteht darin, das Gewicht dieses Balkens bei vorgegebener Länge l , Belastungskraft F und maximaler Durchbiegung f durch geeignete Materialauswahl zu minimieren. Einfache Rechnungen ergeben für die Masse des Biegebalkens die Beziehung:

$$m = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{FlF}{f}} \cdot \frac{\rho}{\sqrt{E}} \quad (3)$$

wobei ρ die Dichte und E den Elastizitätsmodul des jeweiligen Materials darstellen. Der erste Term auf der rechten Seite der Gleichung enthält die vorgegebenen Randbedingungen, während der zweite Term die werkstoffabhängigen Daten enthält. Die Masse des Trägers kann demnach minimiert werden, indem das Material mit dem geringsten Verhältnis ρ/\sqrt{E} ausgewählt wird. In der folgenden Tabelle 2 sind die entsprechenden Werkstoffdaten für eine Reihe von Materialien zusam-

mengestellt. Es ist zu erkennen, daß neben unidirektional verstärkten CFK-Werkstoffen die Aluminiumschäume sehr gut abschneiden.

Tabelle 2: Werkstoffdaten zur Auswahl eines geeigneten Materials für einen Biegebalken

Material	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	ρ/\sqrt{E}
Stahl	7800	200	17,4
Aluminium	2700	69	10,3
Beton	2500	47	11,5
Glas	2500	69	9,5
GFK (ud)	2000	40	10
CFK (ud)	1500	270	2,9
Al-Schaum	500	5	7,1
PU-Schaum	100	0,06	12,9

Transporteigenschaften

Geschäumte Metalle können als zweiphasige Metall-Gas-Verbundwerkstoffe angesehen werden. Aus diesem Grund ist zu erwarten, daß die thermischen und elektrischen Leitfähigkeiten im Vergleich zu massiven Materialien deutlich reduziert sind. Um dies zu überprüfen, wurde eine Probe aus geschäumtem Reinaluminium (Al99,5) mit einem spezifischen Gewicht von 0,4 g/cm³ hergestellt und die Wärmeleitfähigkeit gemessen. Die Meßwerte lagen im Bereich zwischen 11 und 12,5 W/(mK). Verglichen mit den Werten von 210 bis 220 W/(mK) für konventionelles Aluminium ähnlicher Reinheit ist die Leitfähigkeit demnach auf ein Zwanzigstel abgesunken.

Die elektrische Leitfähigkeit von Aluminiumschäumen wurde in einem weiten Dichtebereich vermessen. Zum Einsatz kamen sowohl Reinaluminium, als auch eine Aluminiumlegierung mit 12% Si und 1% Mg. Letztere Legierung wurde gewählt, da sie bereits als konventioneller, nichtporöser Werkstoff eine relativ geringe Leitfähigkeit aufweist [12]. Darüberhinaus wurden einige Proben aus geschäumtem Reinaluminium hergestellt, welche zusätzlich 10 Gew.% Al₂O₃-

Partikel enthielten, um so den Einfluß von nicht-leitenden Zusätzen zu ermitteln. Hierzu wurde feines Aluminiumoxid-Pulver zu der Aluminium/Treibmittel-Pulvermischung hinzugefügt und in der üblichen Weise kompaktiert und geschäumt. Alle Proben wurden im selben Wärmebehandlungszustand bei Raumtemperatur vermessen.

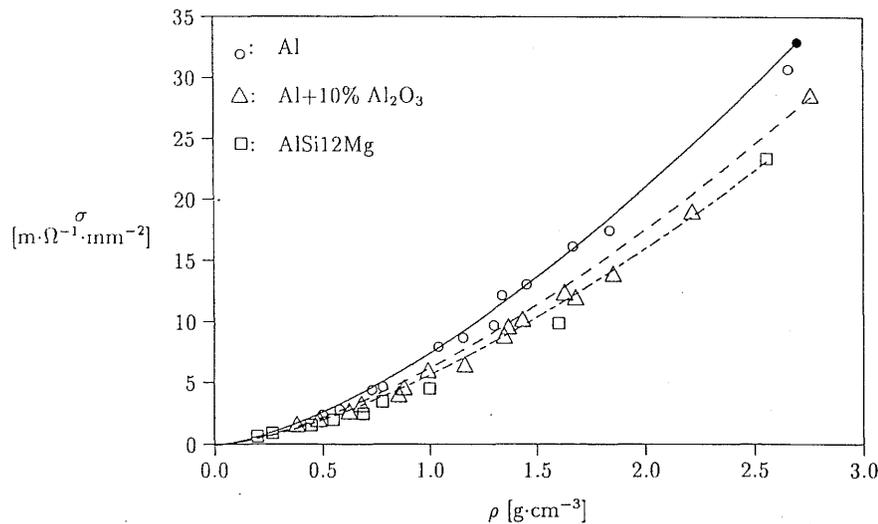


Bild 6: Elektrische Leitfähigkeit verschiedener Aluminiumschaum-Werkstoffe als Funktion der Dichte

Die Ergebnisse der Meßreihen sind in **Bild 6** dargestellt. Wie erwartet steigt die Leitfähigkeit zu höheren Dichtewerten hin an. Die im Diagramm gezeigten Kurven stellen die obere Grenzwertgleichung 3. Ordnung für die Feldeigenschaften poröser Werkstoffe [13] dar. Diese Theorie besagt, daß die Meßwerte alle auf oder unterhalb der eingezeichneten Kurven liegen sollten. In der Tat liegen nur einige wenige Datenpunkte der Reinaluminium-Proben oberhalb der vorher-

gesagten Grenzkurven. Aus diesem Grund erscheint das Konzept der oberen Grenzwert-Gleichungen geeignet, um bei vorgegebener Dichte eine erste Abschätzung der Obergrenzen für die elektrische und thermische Leitfähigkeit geschäumter Metalle vorzunehmen.

Anwendungen von Metallschäumen

Aus den oben beschriebenen Eigenschaften und verfahrenstechnischen Möglichkeiten können eine Reihe von Anwendungen abgeleitet werden.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet liegt offensichtlich im Bereich der Energieabsorption [14,15]. Durch den Einsatz von energieverzehrenden Elementen aus Aluminiumschaum ist es möglich, z.B. das Verformungsverhalten von Knautschzonen in Automobilen in Richtung auf eine maximale Energieumwandlung zu optimieren. Dasselbe gilt in analoger Weise auch für den Seitenaufprallschutz. So weisen mit Aluminiumschaum ausgefüllte Hohlprofile ein deutlich besseres Deformationsverhalten auf. Darüber hinaus ist es möglich, Karosserie- oder Fahrwerksteile mit Aluminiumschaum zu verstärken und so neben einer besseren Energieaufnahme auch eine höhere Steifigkeit der Komponenten zu erreichen.

Aufgrund des geringen spezifischen Gewichts sind Aluminiumschäume generell für Anwendungen im Bereich des Leichtbaus geeignet. Zum Beispiel würde eine Substitution von Honigwaben-Strukturen durch Platten aus Aluminiumschaum zu besseren Isotropie-Eigenschaften führen. Daneben ist speziell bei Luftfahrtanwendungen die Nichtbrennbarkeit der Metallschäume von besonderer Bedeutung.

Da der Elastizitätsmodul der geschäumten Werkstoffe über die Wahl der Dichte in weiten Bereichen variiert werden kann, ergibt sich so die Möglichkeit, die Resonanzfrequenz von Bauteilen zu beeinflussen. Auf diese Weise lassen sich unerwünschte Schwingungen vermeiden.

Für die Kapselung heißer oder schallemittierender Komponenten bieten sich Formteile aus Schaumaluminium an. In diesen Fällen kommt vor allem die im Vergleich zu Kunststoffschäumen höhere Temperaturbelastbarkeit zum Tragen.

Aufgrund der Nichtbrennbarkeit bieten Metallschäume auch ein Potential im Brandschutz. Wegen der Eigenschaft, unter Wärmeeinwirkung zu expandieren könnte in diesem Bereich auch das aufschäumbare Vormaterial Anwendungen finden.

Geschlossenporige Schäume sind generell als Schwimmermaterial besonders gut geeignet, da sie eine hohe Schadenstoleranz aufweisen, d.h. sie behalten ihre Auftriebskraft auch nach lokaler Zerstörung bei. Hier erweisen sich die Aluminiumschäume insbesondere bei höherer Druck- oder Temperaturbeanspruchung als vorteilhaft.

Einige Anwendungen ergeben sich auch aus den physikalischen Eigenschaften der Metallschäume. Für Abschirmungen gegen elektromagnetische Strahlungen ist z.B. die elektrische Leitfähigkeit eine Voraussetzung, während bei Impedanzwandlern für die Ultraschall-Meßtechnik die akustische Impedanz der Aluminiumschäume eine wichtige Rolle spielt.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß bei der Herstellung der Aluminiumschäume neben sehr geringen Mengen des Treibmittels Titanhydrid (typisch sind z.B. 0,4 Gew.% TiH_2) keinerlei artfremde Zuschlagstoffe verwendet werden müssen, so daß die Schaumprodukte wiederverwertet werden können. Darüber hinaus treten bei der Herstellung keine umweltbelastenden Stoffe, wie z.B. FCKW, auf.

Neben der anwendungsorientierten Weiterentwicklung der Schäumtechnologie soll im Rahmen der weiteren Arbeiten das Schäumverfahren auch auf andere Metalle ausgedehnt werden. So wurde inzwischen nachgewiesen, daß auch Zinn- und Zinkbasis-Werkstoffe ohne gravierende Änderungen des Verfahrensablaufs geschäumt werden können. Dagegen werden für die Herstellung von Stahlschäumen sicherlich andere Treibmittel erprobt werden müssen. Darüber hinaus muß zur Vermeidung von Oxidation der Schäumvorgang unter Vakuum oder Schutzgasatmosphäre stattfinden.

Literatur

- [1] L.J. Gibson, M.F. Ashby:
Cellular solids
Pergamon Press (1988)

- [2] W.S. Fiedler, R.P. Annen:
Method of melting and casting foam metal
US-PS 3 481 389 (1969)

- [3] C.B. Berry:
Foamed metal
US-PS 3 669 654 (1972)

- [4] S.Akiyama, H. Ueno et al.:
Foamed metal and method of producing same
EP 0 210 803 A1 (1987)

- [5] I.Jin, L.D. Kenny, H. Sang:
Stabilized metal foam body
US-PS 4 973 358 (1990)

- [6] W. Ruch, B. Kirkevåg:
A process of manufacturing particle reinforced metal foam and product thereof
PCT WO 91/01387 (1991)

- [7] J. Baumeister:
Verfahren zur Herstellung poröser Metallkörper
DE 40 18 360 (1990)

- [8] J. Baumeister, H. Schrader:
Verfahren zur Herstellung aufschäumbarer Metallkörper
und Verwendung derselben
DE 41 01 630 (1991)

- [9] J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber:
Geschäumte Metalle als neue Leichtbauwerkstoffe
VDI-Berichte 1021 (1993), 277-284
- [10] H.-D. Kunze, J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber:
P/M Technology for the production of metal foams
pmi 25 No. 4 (1993), 182-185
- [11] W. Hufnagel:
Aluminiumschlüssel (4. Auflage)
Aluminium-Verlag (1991), 213
- [12] H.E. Boyer, T.L. Gall (ed.):
Metals Handbook
American Society for Metals, Ohio, USA (1984)
- [13] P. Nikolopoulos, G. Ondracek:
Zur Porositätsabhängigkeit der Feldeigenschaften von Sintermetallen
Z. Metallkde. 74 (1983), 48-52
- [14] P.H. Thornton, C.L. Magee:
The deformation of aluminum foams
Met. Trans. 6A (1975), 1253-1263
- [15] G.J. Davies, Shu Zhen:
Metallic foams: their production, properties and applications
J. Mat. Sci. 18 (1983), 1899-1911