

VDI-GESELLSCHAFT
FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK

NEUE WERKSTOFFE IM AUTOMOBILBAU

EINSATZGEBIETE – PROZESSTECHNIK – POTENTIALE

NEW MATERIALS IN AUTOMOTIVE ENGINEERING

FIELDS OF APPLICATION – PROCESS TECHNOLOGY – POTENTIALS

Hocheffiziente Energieabsorber aus Aluminiumschaum

Highly efficient energy absorbers made of aluminium foam

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

0. Zusammenfassung

Aluminiumschäume eignen sich aufgrund ihres speziellen Verformungsverhaltens sehr gut für die Herstellung von hocheffizienten Bauteilen für Energieabsorptionaufgaben. Nach einer kurzen Darstellung des Herstellungsverfahrens für Metallschäume werden drei verschiedene Methoden zur Beurteilung und Auswahl von Aluminiumschaum als Energieabsorber beschrieben. Dabei handelt es sich insbesondere um die Effizienz der Energieabsorption, die Energieabsorptionskapazität und die Verwendung von Energieabsorptionsdiagrammen als Selektionskriterium bei der Konzeption von energieabsorbierenden Bauteilen.

Summary

Due to their specific deformation behaviour aluminium foams are an ideal material for designing energy absorbers of high efficiency. After a short description of the manufacturing process for metallic foams three different methods for characterisation and selection of foamed aluminium for energy absorption tasks are discussed. In particular these are the efficiency of energy absorption as well as the energy absorption capacity and the application of energy absorption diagrams as a selection criterion for the conception of energy absorbing devices.

1. Einleitung

Die wachsenden Anforderungen an die aktive und passive Fahrzeugsicherheit insbesondere im Automobilbereich führen in der Regel zu einer Zunahme des Fahrzeuggewichts. Dies steht jedoch im Widerspruch zu weiteren Forderungen, z.B. der nach einem möglichst geringen Treibstoffverbrauch.

Aus diesem Grund sind Materialien mit geringem spezifischen Gewicht und gleichzeitig hohem Energieabsorptionsvermögen von besonderem Interesse. Geschäumte Kunststoffe besitzen ein geringes spezifisches Gewicht, jedoch sind die in Verformungsenergie umwandelbaren Energiebeträge ebenfalls relativ niedrig, da die Festigkeit der polymeren Schaumstoffe gering ist. Dagegen bieten geschäumte Metalle - insbesondere auch geschäumtes Aluminium - das Potential, energieabsorbierende Bauteile mit einem entsprechend höheren Energieniveau zu realisieren.

2. Herstellung von Aluminiumschäumen

Geschäumte Metalle können auf elegante Weise durch ein pulvermetallurgisches Verfahren hergestellt werden [1-3]. Dazu 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 homogene Verteilung des gasabsplattendes Pulvers in dem Pulvergemisch 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 im Labormaßstab das uniaxiale Heißpressen häufig angewendet wird. Andere Verfahren wie das Pulverwalzen oder das 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 Verdichtungs Vorgangs ein aufschäumbares Vormaterial oder Halbzeug, welches durch eine abschließende Erwärmung auf Temperaturen oberhalb 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. Andernfalls könnte das Treibgas bei Beginn der Expansion durch die bestehenden offenen Porenkanäle entweichen und würde so nicht mehr zur Porenbildung und zum Porenwachstum zur Verfügung stehen.

Das aufschäumbare Halbzeug kann durch konventionelle Verfahren wie Walzen, Schmieden oder Strangpressen weiterverarbeitet werden, 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.

3. Energieabsorption von Aluminiumschäumen

Zum Teil finden bislang polymere Schäume oder Wabenstrukturen Verwendung in energieabsorbierenden Strukturen. Die Möglichkeit, das Spannungs-Stauchungs-Verhalten durch geeignete Wahl von Matrixmaterial, Zellgeometrie und relativer Dichte zu kontrollieren, macht Schäume zu einem idealen Werkstoff für derartige Anwendungen [4]. 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.

In Abb. 1 ist das Verformungsverhalten eines Aluminiumschaums mit dem von massiven Aluminium im Druckversuch vergleichend dargestellt. Die durch den Werkstoff absorbierte Energie pro Volumen ergibt sich direkt aus der Fläche unter der jeweiligen Spannungs-Stauchungs-Kurve. Der Vergleich zeigt, daß der Schaum bei gleicher Höchstspannung stets ein Vielfaches an Verformungsenergie aufnehmen kann. Ein weiterer Vorteil ist, daß die absorbierte Energie zum größten Teil in plastische Verformungsenergie umgewandelt wird. Der dichte Matrixwerkstoff verformt sich dagegen im Bereich ähnlicher Spannungen linear-elastisch und gibt den größten Teil der gespeicherten Energie nach Entlastung wieder ab. Dieses elastische Verhalten ist besonders bei Anwendungsfällen störend, bei denen eine kontrollierte Stoßenergieabsorption ohne Rückprall erwünscht ist, wie beispielsweise im Bereich von Automobil-Knautschzonen.

Da Aluminiumschäume in einem relativ breiten Dichte- bzw. Eigenschaftsspektrum erzeugt werden können [3], stellt sich die Frage, welcher Schaum für eine vorgegebene Energieabsorptionsaufgabe am besten geeignet ist. Für diese Auswahl der geeigneten energieabsorbierenden Materialien können analytische Methoden eingesetzt werden, welche die Anforderungen und entscheidende Schaumparameter miteinander kombinieren. Die im folgenden dargestellten, analytischen Techniken beschreiben den Zusammenhang zwischen Schaumeigenschaften und Energieabsorptionscharakteristika von Aluminiumschäumen. Dazu werden Daten zugrundegelegt, die in quasistatischen Druckversuchen an Schäumen einer AlSi12-Legierung ermittelt wurden. Eine nähere Beschreibung der typischen Versuchsparameter und des Versuchsaufbaus für die Meßdatenerfassung findet sich z.B. in [5].

3.1 Effizienz der Energieabsorption

Die Effizienz der Energieabsorption vergleicht die von einem realen Werkstoff oder einem Bauteil absorbierte Verformungsenergie mit derjenigen eines "idealen" Energieabsorbers. Ein "idealer" Absorber weist dabei einen rechteckigen Verlauf der Kraft-Weg-Kurve auf, d.h. er erreicht direkt die maximal zulässige Verformungskraft und hält diese über den gesamten

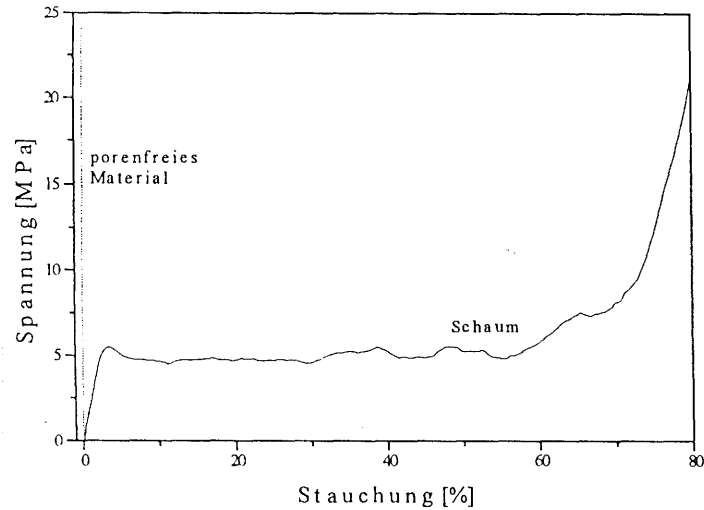


Abb. 1: Vergleich des Verformungsverhaltens eines Aluminiumschaums ($\rho = 0,36 \text{ g/cm}^3$) mit dem eines massiven Aluminiummaterials

Fig. 1: Comparison of the deformation behaviour of foamed aluminium ($\rho = 0,36 \text{ g/cm}^3$) with a solid aluminium material

Verformungsweg konstant. Die Effizienz η wird als Quotient aus der tatsächlich absorbierten Energie nach einem Stauchweg s (Fläche unter der Kurve in Abb. 2) und der Energieaufnahme des idealen Absorbers (rechteckige Fläche in Abb. 2) definiert:

$$\eta = \frac{\int_0^s F(s') ds'}{F_{\max}(s)s} \quad (1)$$

mit $F_{\max}(l) =$ Maximalkraft über den Verformungsweg l

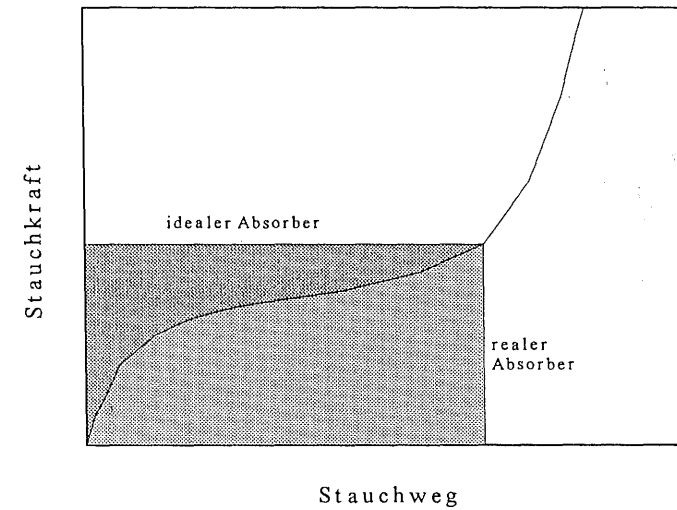


Abb. 2: Definition der Effizienz der Energieabsorption: Verhältnis der Energieaufnahme des realen Energieabsorbers zu der eines idealen Absorbers

Fig. 2: Definition of the energy absorption efficiency

Bei allen realen Werkstoffen verändert sich die Druckspannung während der Stauchung, so daß sich die berechnete Effizienz ebenfalls über den Verformungsweg ändert und stark mit dem jeweiligen Verlauf der Kraft-Weg-Kurve variiert. Die Aluminiumschäume erreichen je nach Dichte und Legierung im Anfangsbereich der Verformung Effizienzwerte von bis zu 90 %. Die Länge des Plateaus im Kraftverlauf wird entscheidend von der relativen Dichte, der genauen Zellmorphologie, der Schaumhomogenität sowie von Dichtegradienten beeinflusst. Im Bereich der Wiederverdichtung des Schaumes sinkt mit ansteigender Spannung die Effizienz stark ab. Es kann daher schon jetzt gesagt werden, daß Schäume optimal nur bis zum Ende des Plateaubereiches in der Spannungs-Stauchungs-Kurve belastet werden können. Abb. 3 zeigt die Spannungs-Stauchungs-Kurve eines AlSi12 Schaumes mit dem numerisch ermittelten Verlauf der Effizienz (rechte Skala im Diagramm).

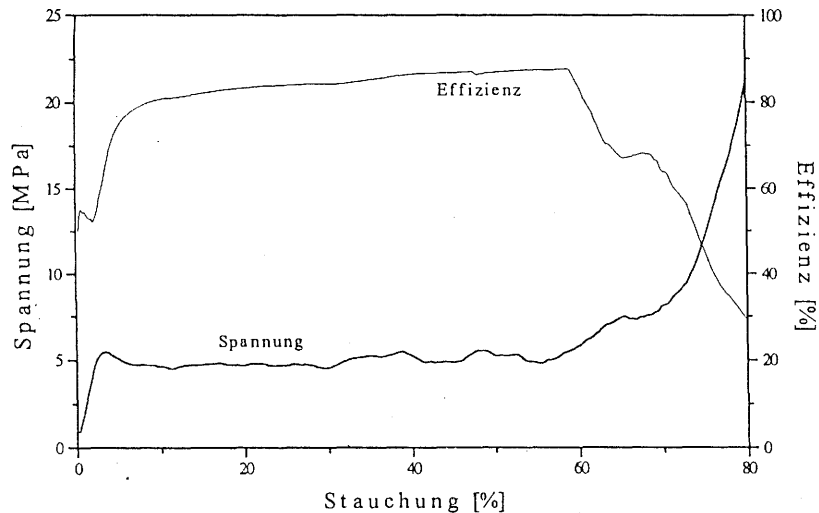


Abb. 3: Verlauf der Spannung und der numerisch ermittelten Effizienz der Energieabsorption für einen AISi12-Schaumes der Dichte $0,36 \text{ g/cm}^3$

Fig. 3: Compression stress and efficiency of an AISi12 foam of density $0,36 \text{ g/cm}^3$

Die Bestimmung der Effizienz der Energieabsorption eignet sich als recht detaillierte Darstellung für die direkte Bewertung eines bestimmten Probekörpers bezüglich seiner Energieabsorptionseigenschaften und läßt schnelle Rückschlüsse von Schaummorphologie auf das Deformationsverhalten zu. Für die Auswahl eines geeigneten Werkstoffes zu einem gegebenen Energieabsorptionsfall ist die Effizienz allein jedoch nur ein weniger geeignetes Hilfsmittel.

3.2 Die Energieabsorptionskapazität

Insbesondere im Bereich des Fahrzeugbaus ist der Raum- und der Gewichtsbedarf von zusätzlich unterzubringenden Baugruppen von großer Bedeutung. Die auf das Ausgangsvolumen des Energieabsorbers bezogene absorbierte Stoßenergie ist daher von besonderem Interesse und in Abb. 4 gegenüber der relativen Dichte verschiedener Schäume aufgetragen. Die drei Kurven stellen die bei Stauchungsgraden von 20 %, 40 %

und 60 % jeweils umgewandelten Verformungsenergien dar und sind aus den Daten der Druckversuche berechnet [6].

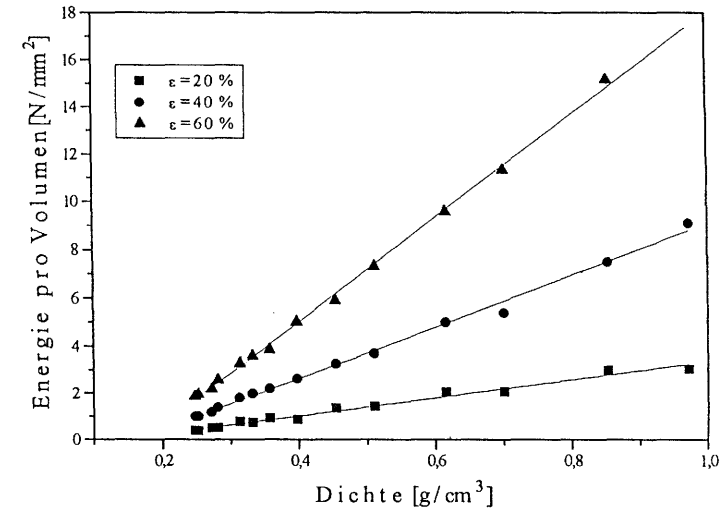


Abb. 4: Darstellung der volumenspezifischen Energieaufnahme von Schäumen verschiedener Dichten nach einer Stauchung ϵ von jeweils 20 %, 40 % und 60 %

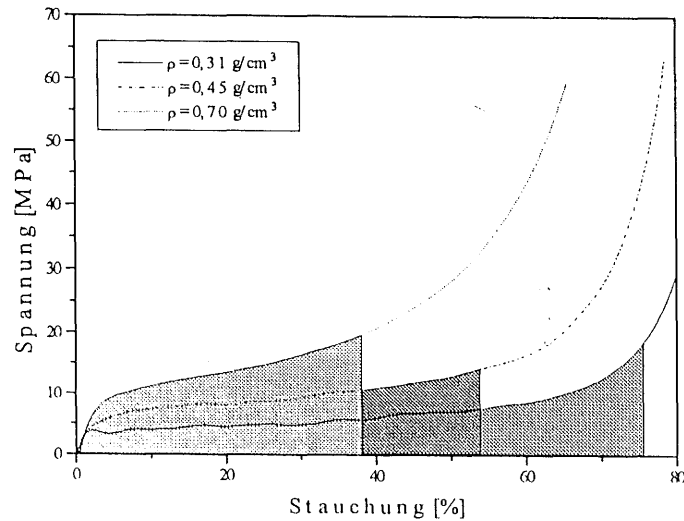
Fig. 4: Energy per unit volume of various foams after compression strains ϵ of 20 %, 40% and 60%

Es zeigt sich die erwartete starke Zunahme der auf das Ausgangsvolumen bezogenen Stoßenergie mit ansteigender Dichte. Entscheidend für die Verwendung eines Energieabsorbers ist jedoch vor allem auch die maximale Spannung, die bis zur Dissipation der Energie erreicht wird. Im folgenden werden daher die verschiedenen Informationen in einer Darstellung zusammengeführt.

3.3 Das Energieabsorptionsdiagramm

Maiti et al. [4] haben die bisherigen Methoden weiterentwickelt und Energieabsorptionsdiagramme für die Bestimmung eines optimalen Energieabsorbers vorgeschlagen. Dabei wird davon ausgegangen, daß ein optimaler Schaum eine vorgegebene

Energie bei einer minimalen Höchstspannung absorbiert. Anhand der [Abb. 5](#), die das Stauchverhalten von drei Schäumen unterschiedlicher Dichte zeigt, wird dieser Sachverhalt näher erläutert.

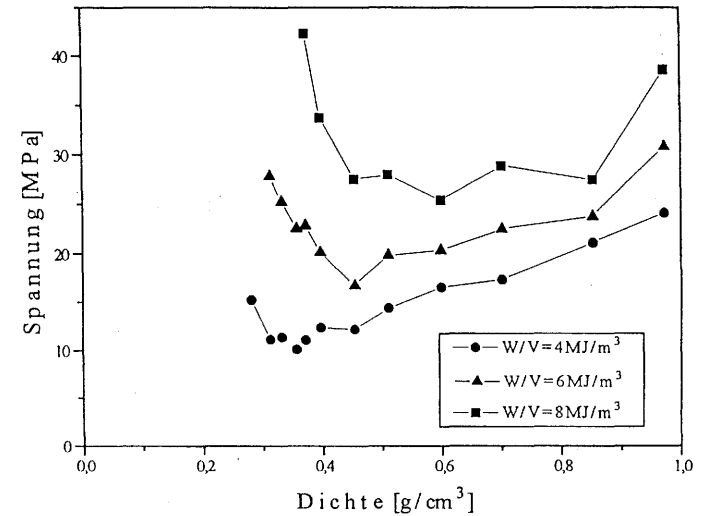


[Abb. 5:](#) Stauchungsverhalten von drei Schäumen unterschiedlicher Dichte, die eingezeichneten Flächen entsprechen jeweils der Aufnahme der gleichen Verformungsenergie W^*

[Fig. 5:](#) Compression behaviour of three foams of various densities, shaded areas correspond to same absorbed energy W^*

Die markierten Bereiche in den drei Kurven bezeichnen die notwendige Stauchung, um die gleiche Verformungsenergie W^* zu absorbieren. Der Schaum mit geringster Dichte befindet sich nach Umwandlung der Energie W^* bereits schon im Wiederanstieg der Spannung und weist somit eine hohe Maximalspannung auf. Der Schaum mit der höchsten Dichte zeigt bei der Stauchung kaum noch einen richtigen Plateaubereich mit konstanter Spannung und weist ebenfalls bis zur absorbierten Energie W^* eine höhere Maximalspannung als der Schaum mittlerer Dichte auf. Für die gegebene Stoßenergie W^* wird der Schaum mit der mittleren Dichte genau bis zum Ende des Plateaubereiches belastet und weist somit bis zur gewünschten Energieabsorption die geringste Höchstspannung auf. Für jede gegebene

Stoßenergie läßt sich auf diese Weise ein Schaum mit einer bestimmten Dichte bestimmen, der bei der Verformung eine geringst mögliche Maximalspannung aufweist. In [Abb. 6](#) ist jeweils die Maximalspannung von Schäumen unterschiedlicher Dichte bis zur Absorption einer gegebenen Verformungsenergie W/V angegeben [6].



[Abb. 6:](#) Maximalspannung von Schäumen unterschiedlicher Dichte bis zur Absorption einer vorgegebenen Verformungsenergie

[Fig. 6:](#) Maximum stress of foams of various densities during absorption of a given deformation energy

Mit abfallender geforderter Energieabsorption verschiebt sich das Minimum der Kurvenscharen in [Abb. 6](#) zu geringeren Schaumdichten. Jede der dargestellten Schaumdichten verhält sich somit für eine bestimmte Verformungsenergie optimal.

Um für den jeweils vorliegenden Belastungsfall die günstigste Schaumdichte zu bestimmen, bietet sich auch die in [Abb. 7](#) gewählte Auftragung an [6]. Es wird dort ausgehend von einer Schar von Spannungs-Dehnungs-Kurven die aktuell absorbierte Energie durch Integration von Spannung und Stauchung (entsprechend der Fläche unter den jeweiligen Kurven) bestimmt. Die von den verschiedenen Schäumen pro Volumeneinheit des

Ausgangsvolumens absorbierte Energie ist dann in **Abb. 7** gegenüber der bisherigen maximalen Spannung aufgetragen. Mit der Einhüllenden der verschiedenen Kurven bestimmt man die jeweils günstigsten Schaumdichten für die vorliegenden Belastungsfälle: Bei einer maximal tolerierbaren Spannung von beispielsweise 17 MPa erhält man für die dargestellte AISi12-Legierung eine optimale Schaumdichte ρ_s von $0,45 \text{ g/cm}^3$. Mit diesem Schaum kann bis zu diesem Spannungsniveau eine Stoßenergie von 6 kJ/m^3 absorbiert werden. Das dargestellte Diagramm gestattet somit die Auswahl eines optimalen Energieabsorbers für gegebene Energieabsorptionsaufgaben.

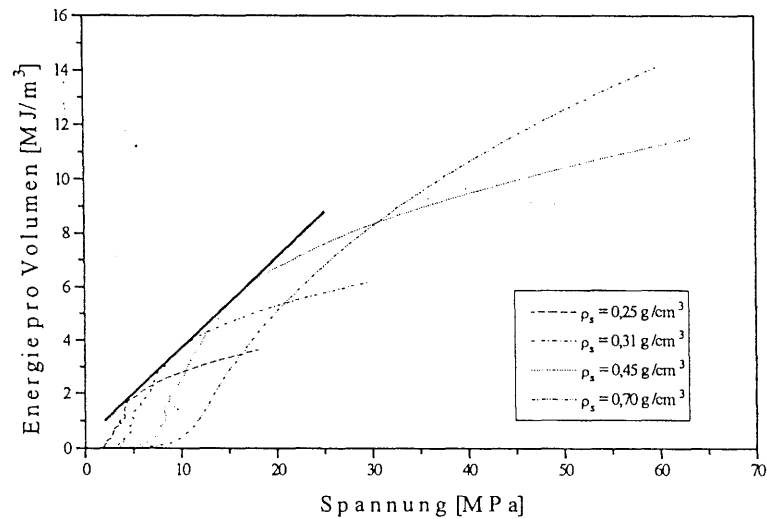


Abb. 7: Diagramm zur Auswahl des optimalen Energieabsorbers

Fig. 7: Diagram for selection of optimum energy absorbers

4. Ausblick

Wie oben geschildert, stehen verschiedene Methoden zur Auswahl und Beurteilung von Energieabsorbern aus Aluminiumschaum zur Verfügung. Es ist jedoch zu betonen, daß eine einfache Schaumstruktur nicht notwendigerweise schon ein optimales Energieabsorptionselement darstellt. Vielmehr 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. Zum Beispiel ist es möglich, Integralschäume oder Verbunde aus Aluminiumschaum mit konventionellen Werkstoffen einzusetzen und so das an sich gute Energieabsorptionsvermögen des Aluminiumschaums weiter zu verbessern. Dies trifft nicht nur für den Frontalaufprall, sondern auch für den Seitenaufprallschutz zu. Durch die Legierungswahl und ggf. auch den Wärmebehandlungszustand wird es möglich sein, neben der Versagensart (spröde/duktile) auch das Kraftniveau zu beeinflussen. Für die Entwicklung von hocheffizienten Energieabsorbern stellen die Aluminiumschäume deshalb einen idealen Ausgangspunkt dar.

5. Literatur

- [1] J. Baumeister: Verfahren zur Herstellung poröser Metallkörper, DE 40 18 360 (1990)
- [2] J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber: Geschäumte Metalle als neue Leichtbauwerkstoffe, VDI-Berichte 1021 (1993), 277-284
- [3] J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber: Effiziente Herstellungsmöglichkeiten für Bauteile aus geschäumten Metallen, VDI-Berichte 1151 (1995), 223-230
- [4] S. K. Maiti, L. J. Gibson, M. F. Ashby: Deformation and Energy Absorption Diagrams for Cellular Solids, Acta Met. 32, No. 11 (1984) 1963-1975
- [5] H.-D. Kunze, J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber: Möglichkeiten zur Herstellung von Bauteilen aus geschäumten Metallen, in: "Innovative und wirtschaftliche Bauteile durch Pulvermetallurgie", VDI-Verlag, Düsseldorf (Proceedings des P/M-Symposiums '93, Hagen, 25./26.11.1993)
- [6] M. Weber: Dissertation, TU Clausthal (demnächst)