

**Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis**

Band 18

# **Pulvermetallurgie – Fortschritte in Prozessen und Funktionalität**

Vorträge des Hagerer Symposiums am 28. und 29. November 2002 in Hagen

veranstaltet vom

## **Gemeinschaftsausschuß Pulvermetallurgie**

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

**Fachverband Pulvermetallurgie**

## Strukturelle und funktionelle Hohlkugelstrukturen

*Günter Stephani\*, Ulf Waag, Hartmut Göhler, Bernd Kieback  
Hans Schneiderei, Frank Bretschneider  
Helmut Venghaus*

### Einleitung

Aus der Natur sind viele Strukturen bekannt, bei denen nur dort Material eingesetzt wird, wo es unbedingt notwendig ist. Ein Beispiel sind Knochen, wobei eine maßgeschneiderte Festigkeit und ein niedriges Gewicht durch den Einbau von Poren realisiert wird. Die Übertragung solcher optimalen Eigenschaften auf metallische Konstruktionswerkstoffe steht seit langer Zeit im Mittelpunkt zahlreicher Untersuchungen.

Hauptziel der Entwicklungen ist die Reduzierung des Materialeinsatzes in Fahrzeugen, Maschinen, Anlagen und Geräten. Eine Verringerung insbesondere der bewegten Massen bedeutet Ressourcenschonung und damit Energie- und Kostensenkung. Hiermit kann auch ein wesentlicher ökologischer Beitrag geleistet werden. In den letzten Jahren hat es deshalb sowohl national als auch international starke Anstrengungen gegeben, um neue Leichtbauwerkstoffe zu entwickeln. Eine vielversprechende Klasse stellen zelluläre metallische Werkstoffe (ZMW) dar, wobei die Gewichtsreduzierung durch den Einbau von Poren geschieht.

Neben einer drastischen Gewichts- und damit Materialeinsparung können durch zelluläre Werkstoffe weitere anwendungsspezifische Eigenschaften, die insbesondere durch die Zellstruktur bestimmt werden, wie Schallabsorption, Wärmeisolation, Energieabsorption, mechanische Dämpfung, Stoff- und Energietransport oder katalytische Effekte, realisiert werden. Aus diesen Eigenschaften sind neben den o. g. Anwendungsgebieten weitere Einsatzfelder, wie die thermische, mechanische und chemische Prozesstechnik sowie die Bio- und Umweltverfahrenstechnik gegeben.

Zelluläre metallische Werkstoffe können aus der flüssigen, festen oder gasförmigen Phase hergestellt werden. Am weitesten entwickelt sind derzeit die schmelzmetallurgischen Verfahren. Hierbei wird Metallschmelze durch Einleiten von Gas, Aufschmelzen von Halbzeug mit Treibmittel oder durch Zugabe von Treibmittel zum Aufschäumen gebracht [1]. Weitere spezielle Gießmethoden, z. B. sogenannte Platzhalterverfahren oder gaseutektische gerichtete Erstarrung, werden genutzt, um gezielt ZMW herzustellen [2, 3]. Die bekannteren Verfahren, die ZMW aus der festen Phase ermöglichen, sind im wesentlichen pulvermetallurgische Methoden, wie das koaxiale Verdüsen von Slurries zu Hohlkugeln, die Herstellung von ZMW durch Platzhaltermethoden, Nutzung spezieller Sintereffekte (Kirkendall-Effekt), z. B. für hochporöse TiAl- bzw. FeAl-Strukturen, oder das Beschichten von organischen Substraten, z. B. Styroporkugeln mit einer Me-

tallpulversuspension. Ein weiteres interessantes Verfahren ist der „Low-Density Core“ (LDC) Prozess, wo die Zellstruktur durch Expansion einer Pulver-Argongas-Mischung während des Heiß-Isostatischen-Prozesses erzeugt wird. Eine zusammenfassende Darstellung der Verfahren zur Herstellung von ZMW aus der festen Phase ist in [4] zu finden.

ZMW aus der Gasphase werden durch CVD z. B. für die Herstellung von Nickelschäumen [5] oder von Inconel 625-Schäumen mittels Elektronenstrahlverdampfung [6] hergestellt.

Eine interessante Verfahrensvariante zur Herstellung ZMW stellen aus metallischen Hohlkugeln aufgebaute zelluläre Strukturen dar. Die Dichte der Hohlkugelstrukturen kann in weiten Grenzen variiert werden. Der Hohlkugeldurchmesser und die Hohlkugelschalendicke sind neben dem Werkstoff die bestimmenden Parameter einer Hohlkugelstruktur. Durch die Auswahl des Grundwerkstoffes kann eine weitgehende Anpassung an verschiedene Betriebsbeanspruchungen, wie z. B. Hochtemperatur- oder Korrosionsbeständigkeit erfolgen. Im Vergleich mit Metallschäumen zeigen metallische Hohlkugelstrukturen, genauso wie Bienenwabenstrukturen, eine homogene und somit berechenbare Zellstruktur und eine hohe Materialvielfalt.

#### Herstellung von metallischen Hohlkugeln und Hohlkugelstrukturen

Die Herstellung von Hohlkugeln über ein galvanisches Verfahren ist Stand der Technik [7]. Damit ist es möglich, metallische Hohlkugeln aus galvanisch abcheidbaren Materialien, wie Cu und Ni, im Bereich von 0,8 bis 8 mm herzustellen, indem ein geeignetes Trägermaterial beschichtet wird. Die Wandstärke dieser Kugeln liegt im Bereich von 10  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$ . Mit diesem Verfahren ist es schwierig, metallische Hohlkugeln und Hohlkugelstrukturen aus Legierungen, wie z. B. Stahl, herzustellen.

Wesentlich aussichtsreicher erscheint eine in [8] beschriebene Technologie zur Herstellung von metallischen Hohlkugeln. Nach Bild 1 wird hierbei ein geeignetes Trägermaterial, wie z. B. EPS (expandierbares Polystyrol), verwendet. Das EPS-Granulat ist kommerziell verfügbar und kann durch den Vorschäumprozess in spezifische Durchmesser eingestellt werden. Diese vorgeschäumten EPS-Kugeln werden in einer Wirbelbettbeschichtungsanlage zugeführt und durch einen Luftstrom in ständiger Bewegung gehalten. Über ein Düsen-system wird eine Metallpulver-Binder-Suspension versprüht und das Trägermaterial beschichtet. Durch eine Wärmebehandlung werden anschließend Binder und Trägermaterial entfernt und das Metallpulver zu einer dichten Kugelschale gesintert. Die Durchmesser der so herstellbaren metallischen Hohlkugeln liegen im Bereich von 0,5 bis 10 mm mit einem einstellbaren Wanddickenbereich von 20 bis 500  $\mu\text{m}$  [9].

Durch Auswahl der Teilchenform sowie gezielte Wahl der Prozessparameter, können sowohl dichte poröse als auch offen poröse Hohlkugelschalen hergestellt werden.

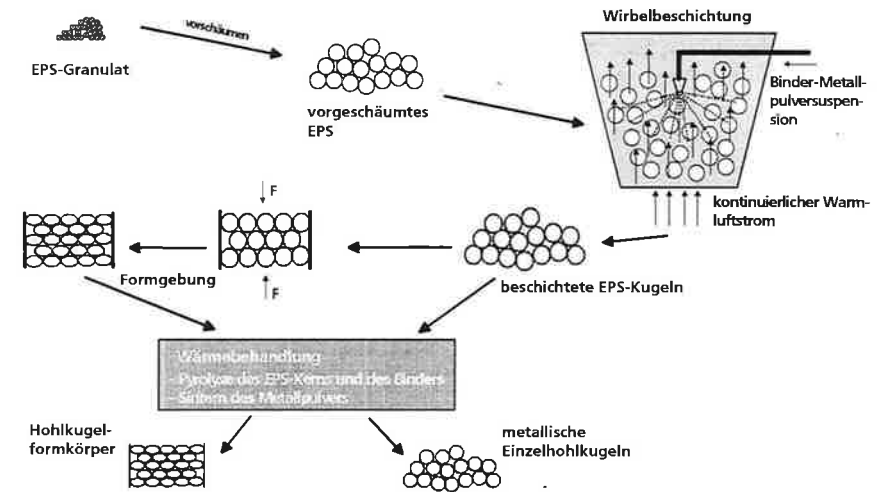


Bild 1: Technologie zur Herstellung von metallischen Hohlkugeln

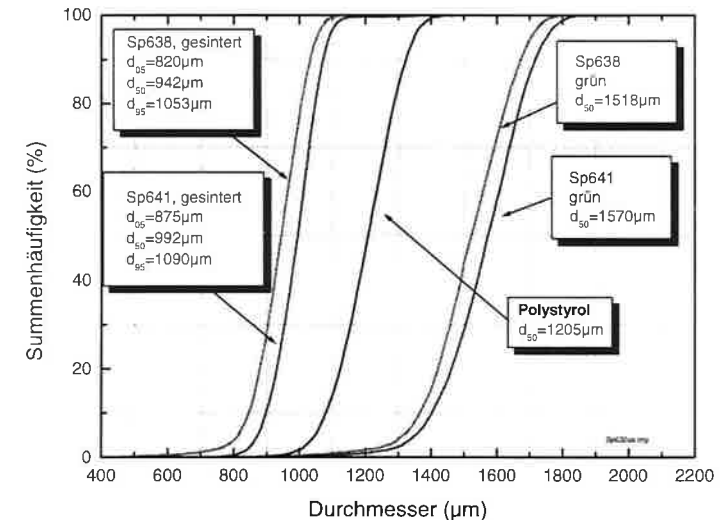


Bild 2: Durchmesser- und Summenhäufigkeitsverteilungen von beschichteten und gesinterten Stahlhohlkugeln

Grundsätzlich sind mit dem im IFAM Dresden entwickelten Verfahren zur Hohlkugelherstellung alle pulverförmigen und sinterbaren Werkstoffe zu Hohlkugeln verarbeitbar.

Mit der Beschichtungstechnologie für metallische Hohlkugeln ist es möglich, sehr enge Durchmesserverteilungen herzustellen (Bild 2), welche durch eine Klassierung der Styroporkugeln und optimierte Beschichtungsparameter ermöglicht wird.

Die Herstellung von Hohlkugelstrukturen aus metallischen Einzelkugeln kann sowohl durch Sintern, Löten oder Kleben realisiert werden, wobei sowohl zelluläre Strukturen mit offener als auch geschlossener Porosität darstellbar sind. Weiterhin können durch gezielte Auswahl der Einzelhohlkugeln ungeordnete, geordnete oder auch gradiert aufgebaute zelluläre Strukturen hergestellt werden (Bild 3).

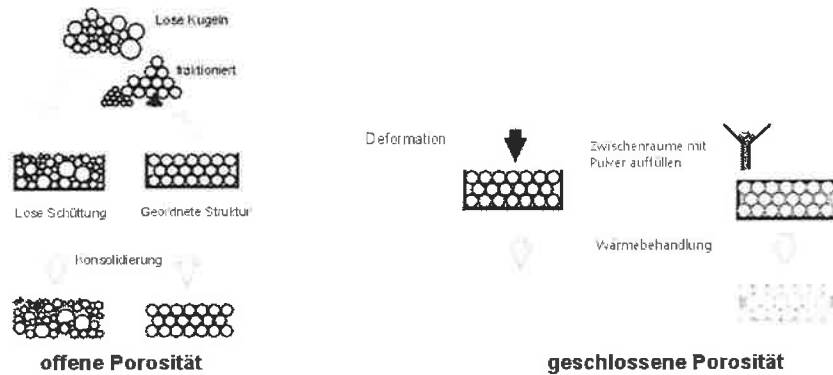


Bild 3: Herstellung von metallischen Hohlkugelstrukturen

Gesinterte Hohlkugelstrukturen werden durch einen Net-Shape-Prozess hergestellt, indem die beschichteten „Grünkugeln“ in ein spezielles Formgebungswerkzeug gefüllt und mehr oder weniger deformiert werden. In einem anschließenden Entbinderungs- und Sinterschritt entsteht die einsatzfähige zelluläre metallische Struktur.

### Eigenschaften metallischer Hohlkugeln und Hohlkugelstrukturen

Die Dichte von metallischen Hohlkugelstrukturen ist in einem weiten Bereich einstellbar und wird, wie im Bild 4 dargestellt, im wesentlichen vom Verhältnis der Kugelwanddicke zu Kugeldurchmesser und der Kugelordnung beeinflusst. Um z. B. Stahlhohlkugelstrukturen mit einer Dichte von ca. 0,3 g/cm<sup>3</sup> herzustellen, sind Hohlkugeln mit einem Durchmesser von ca. 4 mm und einer Wandstärke von etwa 40 µm notwendig.

Im rechten Teil von Bild 4 sind weitere Leichtbauwerkstoffe, wie z. B. Al-Schäume, Al-Honeycomb-Strukturen sowie galvanische Hohlkugelstrukturen, eingefügt, die den gleichen Dichtebereich wie Stahlhohlkugelstrukturen überdecken.

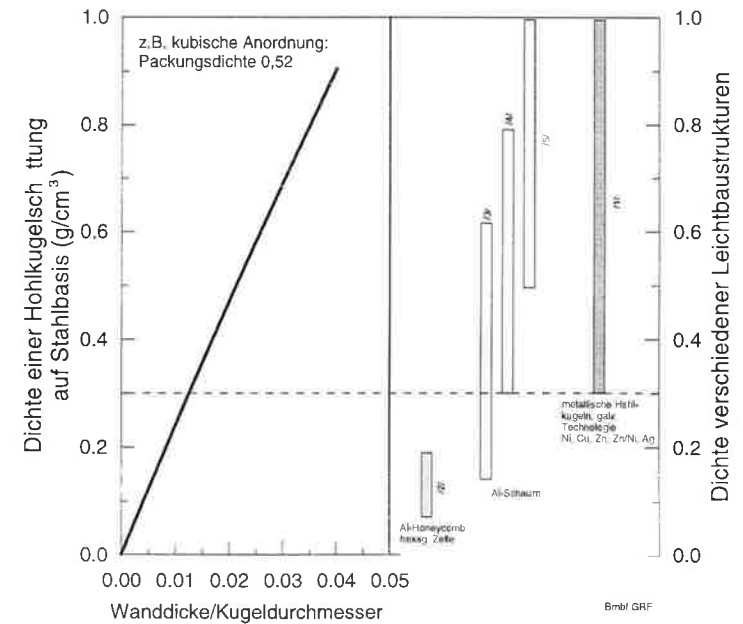


Bild 4: Einstellbare Dichten von Hohlkugelschüttungen auf Stahlbasis in Abhängigkeit vom Verhältnis Wandstärke zu Kugeldurchmesser

## Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von metallischen Hohlkugelstrukturen werden im wesentlichen von folgenden Einflussgrößen bestimmt:

- Material der Kugelschalen
- Verhältnis Wandstärke der Kugel zu Kugeldurchmesser
- Schalenporosität
- Packungsdichte, d. h. Art der Kontakte zwischen den Kugeln (Punkt oder Fläche)

Charakteristisch für ZMW ist deren außerordentlich großes Energiedissipationsvermögen. Im Bild 5 ist das Deformationsverhalten einer Hohlkugelstruktur aus Edelstahl dargestellt. Typisch ist ein langes Plateau der plastischen Deformation bis zu einer Dehnung von 60 – 70 %. Auf Grund der hohen Porosität von 95 % zeigen derartige Strukturen eine sehr geringe Restblocklänge nach der Verformung, was besonders interessant für crashrelevante Anwendungen im Fahrzeugbau ist.

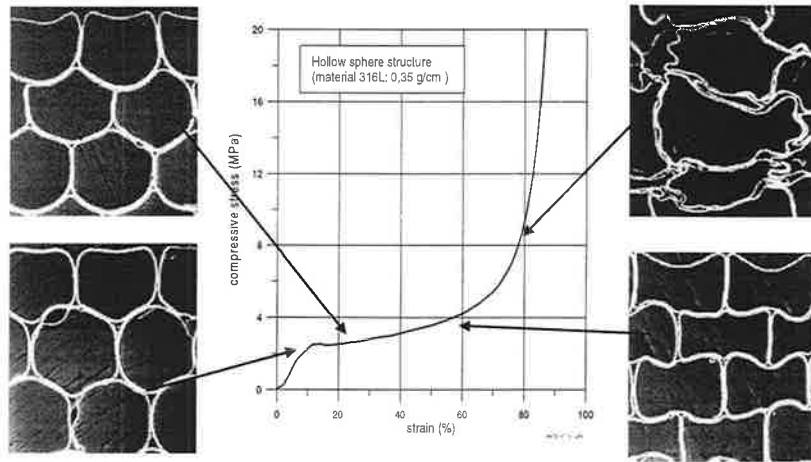


Bild 5: Verformungsverhalten von metallischen Hohlkugelstrukturen für Druckbelastung (Dichte 0.35 g/cm<sup>3</sup>, Edelstahl 316L)

Druckversuche an Stahlhohlkugelstrukturen in x-, y- und z-Richtung in Bild 6 belegen das isotrope Verformungsverhalten von metallischen Hohlkugelstrukturen.

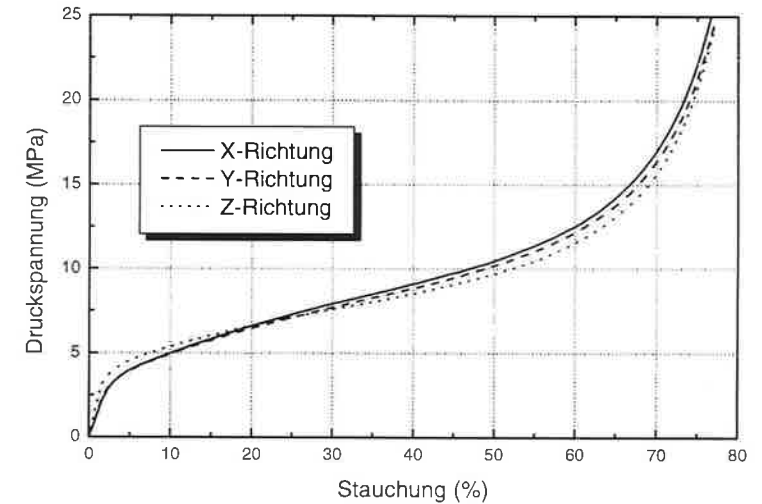


Bild 6: Isotropes Deformationsverhalten von gesinterten Stahlhohlkugeln in x-, y- und z-Richtung, Strukturichte 0,8 g/cm<sup>3</sup>, Kugeldurchmesser 2,7 mm, Prüfgeschwindigkeit 10mm/min

Das Druckspannungsplateau kann durch Variation der Dichte der Hohlkugelstruktur in weiten Grenzen eingestellt werden, wie aus Bild 7 zu entnehmen ist. Eine Verdopplung der Hohlkugel-Strukturichte für Stahl realisiert eine Erhöhung der Plateauspannung bei vergleichbarer Dehnung um den Faktor 3-4. Bedingt durch die erreichbaren gleichmäßigen Porengrößen ist eine hohe Reproduzierbarkeit der mechanischen Kennwerte möglich, was eine hohe statistische Sicherheit gewährleistet. Erforderliche Mindestfestigkeiten können somit sicher eingehalten werden, ein wesentlicher Vorteil dieser Strukturen im Vergleich zu metallischen Schäumen, bei denen die Maximalfehlergröße nicht vorher bestimmbar ist.

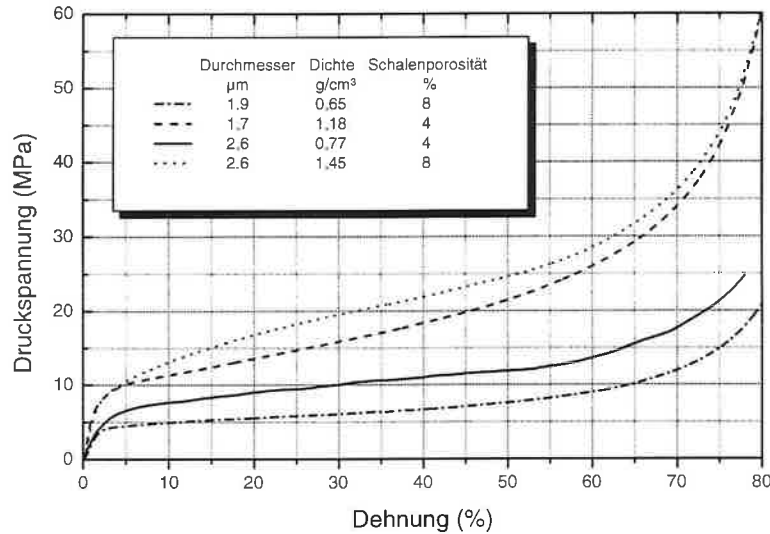


Bild 7: Druckspannung-Dehnungsverhalten von gesinterten Stahlhohlkugelstrukturen für verschiedene Strukturdichten

### Akustische Eigenschaften

Pulvermetallurgisch hergestellte poröse Werkstoffe sind seit langem bekannte Materialien zur Schallabsorption, jedoch ist deren Effizienz durch die verwendeten Pulver, die maximal herstellbaren Porengrößen (bis 0,5 mm) und die Gesamtporosität (bis 60 %) begrenzt. Mit metallischen Hohlkugeln können die Bereiche sowohl der Porengröße (0,5 – 10 mm) als auch die der Gesamtporosität (bis 97 %) wesentlich erweitert werden.

Im Bild 8 wurde das Schallabsorptionsvermögen an gesinterten Hohlkugelstrukturen aus 316L in Abhängigkeit der Porengröße untersucht. Im Vergleich zum Referenzmaterial Basalan (Mineralwolle) zeigen alle Hohlkugelstrukturen eine höhere Absorptionsrate bei niedrigeren Frequenzen. Insbesondere Porengrößen von 2,5 und 7 mm weisen ein ausgeprägtes Maximum zwischen 600 – 700 Hz auf.

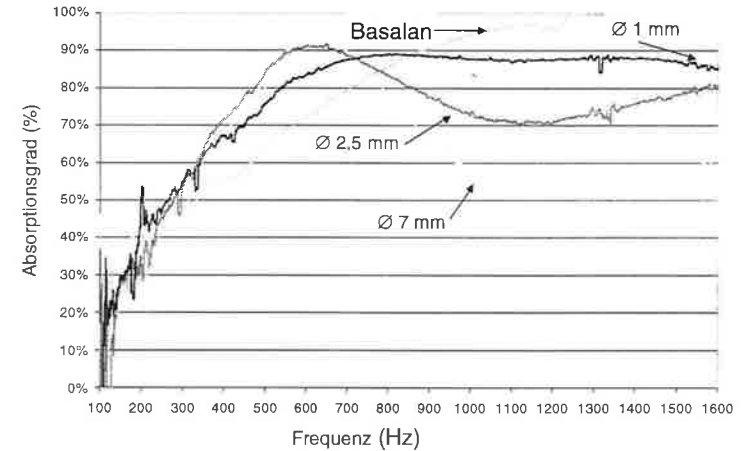


Bild 8: Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit der Frequenz für Hohlkugelstrukturen mit einer Porengröße von 1; 2,5 und 7mm, Material 316L, Dichte 0,4-0,6 g/cm³

Versuche mit einem Test-Schalldämpfer aus metallischen Hohlkugeln (Bild 9) als Realbauteil für Anwendungen im Fahrzeugbau wurden sowohl im kalten Luftmassenstrom als auch am Kraftfahrzeugmotor durchgeführt.

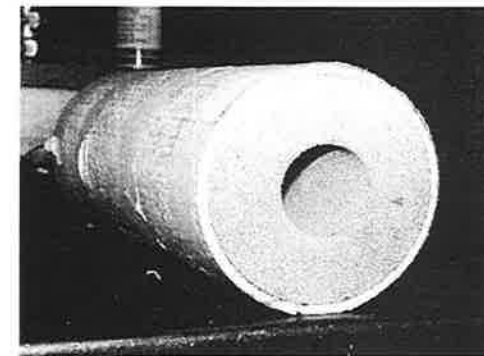


Bild 9: Test-Schalldämpfer aus einer metallischen Hohlkugelstruktur, Außendurchmesser: 150mm, Innendurchmesser: 50mm, Länge:350mm, Material 316L

Im Bild 10 sind die Ergebnisse der Schallpegelmessungen, die mittels kaltem Luftmassenstrom gemessen worden sind, dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass für alle untersuchten Hohlkugelstrukturen eine deutliche Reduzierung des Schallpegels gegenüber dem Vergleichsmaterial Advantex (Glaswolle), insbesondere bis zu Frequenzen von 1000 Hz, festgestellt wurde. Der scheinbare Verlust im Frequenzbereich zwischen 2000 und 2500 Hz ist auf das perforierte Trägerrohr im Vergleichsschalldämpfer zurückzuführen, wo in diesem Frequenzbereich die Helmholtzresonanz vorliegt. Die deutliche Reduzierung des Schallpegels bei 1 mm-Porengröße, z. T. bis 15 dB!, ist auf die vorliegende große freie Oberfläche, die für eine effiziente Schallenergieabsorption zur Verfügung steht, zurückzuführen. Weiterhin könnten sich die Porenform und die gute Homogenität positiv auf die Reduzierung des Schallpegels auswirken.

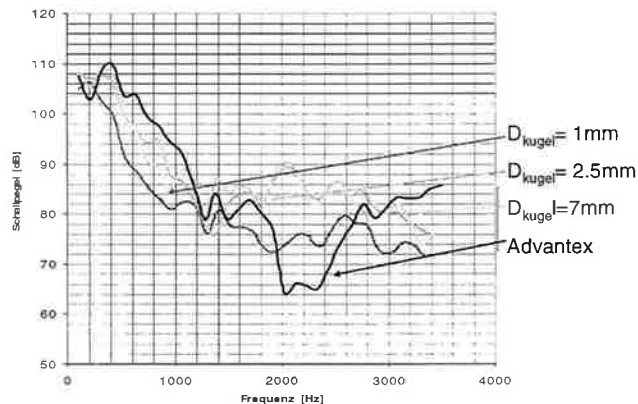


Bild 10: Schallpegel in Abhängigkeit von der Frequenz für Hohlkugelstrukturen unterschiedlicher Porengröße im Vergleich zu Advantex-Glaswolle. Messungen im kalten Luftmassenstrom, Material 316L

Reale Schallpegelmessungen am Kraftfahrzeug wurden für unterschiedliche Motorbelastungen und Drehzahlbereiche (bis 6000 U/min) durchgeführt. Exemplarisch ist im Bild 11 der Differenzschallpegel für einen Motordrehzahlbereich im Vergleich zum Referenzmaterial Advantex-Glaswolle für verschiedene Hohlkugelstrukturen wiedergegeben. Er zeigt für alle untersuchten Frequenzen eine deutliche Reduzierung des Schallpegels. Auch hier wurde festgestellt, dass insbesondere die Frequenzen unter 500 Hz signifikant im Schallpegel abgesenkt werden können.

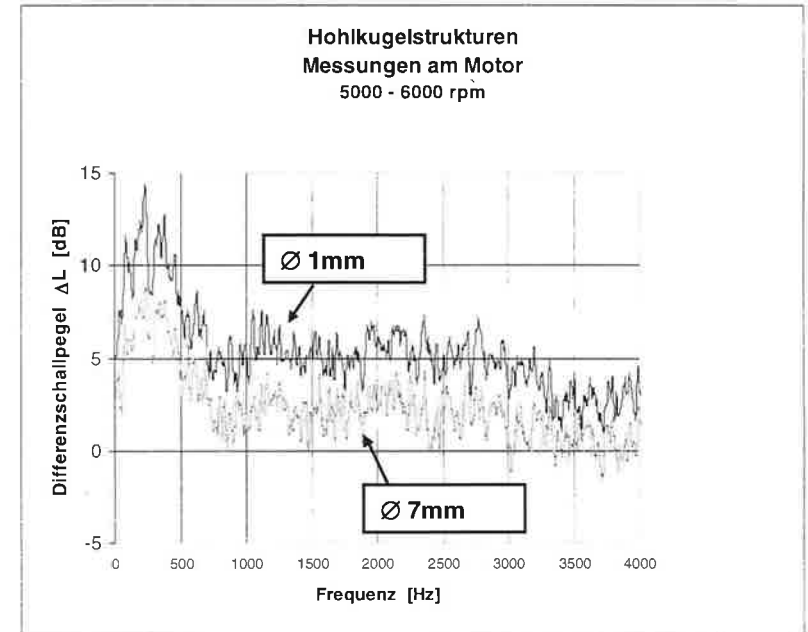


Bild 11: Differenzschallpegel als Funktion der Frequenz für verschiedene Porengrößen von Hohlkugelstrukturen, Messungen am Kraftfahrzeugmotor, Material: 316L

### Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Mit dem vorliegenden Verfahren zur Herstellung von Hohlkugelstrukturen können neue metallische Leichtbauwerkstoffe hergestellt werden mit Dichten auf Eisenbasis bis herab auf ca. 0,2 g/cm<sup>3</sup>. Das IFAM-Hohlkugelverfahren erlaubt die Herstellung von Hohlkugeln in einem weiten Geometriebereich, d. h. im Durchmesser zwischen ca. 1 mm und 10 mm. Durch das einstellbare Wanddicken/Durchmesser-Verhältnis lässt sich die Dichte der Hohlkugelstrukturen definiert den Erfordernissen anpassen. Hohlkugelstrukturen können durch Versintern, Verlöten und Verkleben zu Formkörpern bzw. Bauteilen hergestellt werden. Wesentliche Charakteristika der Hohlkugeltechnologie sind die hohe Reproduzierbarkeit und Flexibilität in der Werkstoffauswahl. Aus den vorliegenden Ergebnissen zu den mechanischen Eigenschaften zeigen metallische Hohlkugelstrukturen ein ausgezeichnetes Energieabsorptionsvermögen, welches anwendungsorientiert eingestellt werden kann.

Hohlkugelstrukturen weisen ein hohes Potential zur Schallabsorption auf. Durch die freie Wahl der Porengröße und der Wandstärke sowie der Hohlkugelanordnung ist eine signifikante Schallpegelreduzierung bzw. eine gezielte Reduzierung des Schallpegels für bestimmte Frequenzbereiche möglich. Andererseits sollte hierdurch ein „Schall-Design“ ermöglicht werden.

Bedingt durch die Geometrie- und Werkstoffflexibilität, können mit metallischen Hohlkugeln bzw. Hohlkugelstrukturen verschiedene Anwendungsbereiche erschlossen werden, wie im Bild 12 dargestellt.

Besonders interessant sind Einsatzgebiete, wo Leichtbau kombiniert mit anderen Eigenschaften, wie z. B. Energieabsorption, Wärmeisolation, Schallabsorption u. a., sinnvoll sind. Das entwickelte Verfahren zur Herstellung von metallischen Hohlkugeln ist industriell umsetzbar. Es ist davon auszugehen, dass erste praktische Anwendungen in den nächsten 2 – 3 Jahren einsatzfähig sind.

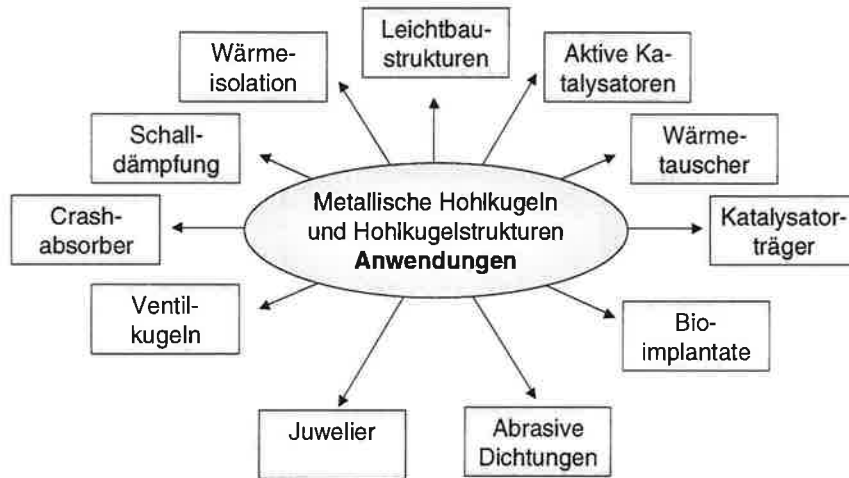


Bild 12: Anwendungsgebiete für metallische Hohlkugeln und Hohlkugelstrukturen

### Literaturhinweise

- [1] Banhart, J.: „Manufacturing Routes for Metallic Foams“, Journal of Metals, 52, 2000, 22 – 27
- [2] Banhart, J.: „Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams“ Progress in Materials Science, 46, 2001, No. 6, 559 - 632
- [3] Bram, M., Stiller, C.: „High-Porosity Titanium, Stainless Steel and Superalloy Parts“ Advanced Engineering Materials, 2, 2000, No. 4, 196 - 199
- [4] Andersen, O., Stephani, G.: „Solid-State and Deposition Methods“ Handbook of Cellular Metals, Viley-VCH, 2002, 56 - 70
- [5] NN: „Inco Special Products“ INCO, Canada, Informationsbroschüre, 2001
- [6] Queheillalt, D. T.: „Cellular Structures of Inconel 625 prepared by Electron beam directed Vapour Deposition Process“ J. Mater. Res. 16, 2001, 1028 – 1034
- [7] Deutsches Patent DE 3210 770, 1982
- [8] Deutsches Patent DE 3724 156, 1986
- [9] Waag, U., Schneider, L., Löhman, P., Stephani, G.: „Metallic hollow spheres – materials for the future“ Metal Powder Report 55, 2000, No. 1, 29 - 33