

Zellulare Metalle – Wege von der Entwicklung zum Produkt

Peter Quadbeck, Norman Reger, Hartmut Göhler, Matthias Reinfried,
Günter Stephani*

1. Einleitung

Metallische Hohlkugelstrukturen sind eine spezielle Form zellular strukturierter Materialien [1]. Mit der Erprobung dieses Werkstoffs in zahlreichen prototypischen Anwendungen konnte in den letzten Jahren dessen Einsetzbarkeit nachdrücklich gezeigt werden [2]. **Bild 1** zeigt eine derartige Struktur in einem prototypischen Schalldämpfer für den Einsatz im Automobil. Um den Schritt von einer Fertigung im Technikumsmaßstab in die industrielle Fertigung zu gehen, sind allerdings zahlreiche Herausforderungen zu überwinden. Trotz der zahlreichen Verfahren zur Herstellung von Zellularen Metallischen Werkstoffen (ZMW) ist dieser Schritt erst in wenigen Fällen gelungen. Eine erste Analyse solcher bereits erfolgreicher Serieneinsätze Zellularer Metallischer Werkstoffe soll daher zunächst die technologischen Grundüberlegungen motivieren.

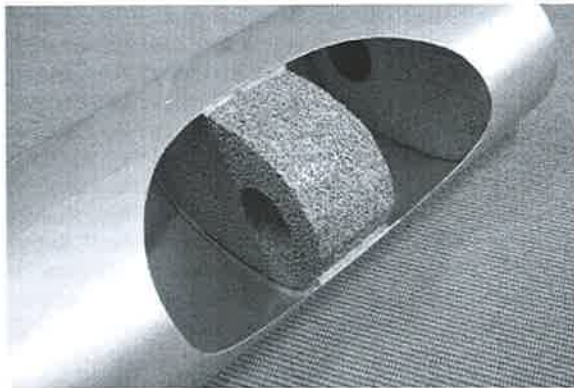


Bild 1: Hohlkugelstrukturen in einem prototypischen Fahrzeug-Schalldämpfer
[EMCON Technologies]

2. Serienanwendungen von Zellularen Metallischen Werkstoffen

Zellular strukturierte Materialien besitzen Eigenschaften, die sich im Allgemeinen erheblich von denen ihrer Grundwerkstoffe abheben. Insbesondere in Verbindung mit metallischen Werkstoffen werden Kombinationen von Eigenschaften generiert, die in dieser Form mit unstrukturierten Werkstoffen nicht erreichbar sind. Erste Arbeiten dazu datieren bereits aus den 40/50er Jahren [3,4]. In der Folgezeit, insbesondere seit Anfang der 90er Jahre, gab es zahlreiche Ansätze mit einer Vielzahl verschiedener Verfahren zur Erzeugung zellulärer metallischer Strukturen [5,6]. Diese Entwicklungen sind zum überwiegenden Teil universitär geprägt. Die Übernahme der Herstellungstechniken in eine industrielle Fertigung – Voraussetzung für die Anwendung eines neuen Werkstoffs – fand demgegenüber nur sehr vereinzelt statt. Infolgedessen sind die Anwendungen dieses viel versprechenden Werkstoffkonzepts bislang nur sehr vereinzelt anzutreffen. Dies gilt insbesondere für den Zugang zu Massenmarktartikeln, der nur in wenigen Ausnahmen gelang.

Ein besonderer Schwerpunkt der Metallschaumentwicklung lag von Anfang an bei der Entwicklung von Aluminiumschäumen. Der Hintergrund der Entwicklungen ist in den überwiegenden Fällen die Anwendung als leichtes Strukturelement. Hier produziert die japanische Firma *Shinko Wire* unter dem Markennamen *Alporas*[®] seit 1986 Aluminiumschäume, die vor allem im Bereich Design und Messebau, aber auch als Energieabsorber im Schienenfahrzeugbau Verwendung finden [7-9]. In Deutschland wird dieser Werkstoff von der Firma *Gleich GmbH* vertrieben. Die kanadische Firma *Cymat Technologies Ltd.* entwickelt gemeinsam mit *Georg Fisher Automotive* Konzepte zur Serienfertigung von Akustik- und Energieabsorberelementen im Automobil [10]. Eine Serienfertigung hat hierzu noch nicht begonnen. Der Werkstoff findet zurzeit hauptsächlich im Bereich des Designs Verwendung. Im europäischen Raum ist die erfolgreichste Umsetzung die Verwendung von Aluminiumschaumelementen für Gepäcknetzabdeckungen des *Audi Q7* [11]. Hergestellt wird das Bauteil von der österreichischen Firma *Alulight International* nach dem IFAM-P/M-Verfahren [12] in Verbindung mit einem Conform-Prozess [13].

Neben diesen Leichtbau-Anwendungen haben Schäume vor allem Einsatzfelder als funktionale Bauteile. Prinzipbedingte Vorteile zeigen diese Werkstoffe vor allem dort, wo die Kombination von Eigenschaften Vorteile bringt. Außerordentlich erfolgreich ist die Produktion und Anwendung von offenzelligen Nickelschäumen. Auf der Basis eines CVD-Prozesses werden von der Firma *VALE INCO* Nickelschäume als Meterware hergestellt [14]. Eingesetzt werden diese Materialien vor allem in Batterie-Elektroden in NiMH-Batterien [15]. In diesem Fall besteht die außerordentliche Eigenschaftskombination aus einer hohen spezifischen Oberfläche, die mit einer guten elektrischen Leitfähigkeit einhergeht.

Die Einsetzbarkeit von solchen funktionalen offenzelligen Metallschäumen in der Filtration liegt nahe, vor allem wenn temperatur- und korrosionsbeständige Werkstoffe benötigt werden. Speziell in der Mikrofiltration finden pulvermetallurgische Filterplatten oder -rohre breite Verwendung [16]. Wichtigster europäischer Produzent ist die Firma *GKN Sintermetals*, die vor allem Nasspulvergespritzte Bauteile herstellt und anbietet [17]. Mit der zusätzlichen Verwendung von Platzhaltern kann die Porosität von Formteilen von typischerweise etwa 50 Prozent bis auf 80 Prozent erhöht werden [18]. Dieses ursprünglich am *FZ Jülich* entwickelte Verfahren wird genutzt, um biomedizinische Implantate aus cp-Titan herzustellen. Die Firma *Synthes* vertreibt diesen Schaum unter dem Namen *PlivioPore* vor allem zum Knochenersatz in der Wirbelsäule. Dabei soll die zelluläre Struktur das Einwachsen von Knochenzellen und Blutgefäßen gewährleisten und damit unerwünschten Lockerungen des Implantats vorbeugen [19]. Denselben hochpreisigen Markt bedient auch die Firma *Zimmer Inc.* mit dem auf einer CVD-Beschichtung von karbonisierten PU-Schäumen beruhenden Tantal-Schaum (*Trabecular Metal*) [20,21]. Neben dem reinen Knochenersatz werden hier auch Schaum-beschichtete Endoimplantate wie z.B. Hüftpfannen vertrieben.

Zur Herstellung solcher offenzelligen metallischen Werkstoffe gründete sich in den letzten Jahren eine Reihe von kleinen Unternehmen mit dem Ziel, Schäume auf eine breite Anwendungsbasis zu stellen. Beispiele hierfür sind die *m-Pore GmbH*, *RECEMAT international*, *Porvair Inc.* und die *ERG Materials and Aerospace Corp.*, die mit ihren Werkstoffen z.T. erfolgreich Nischenmärkte mit geringeren Stückzahlen bedienen [22-24]. Es stellt sich jedoch insgesamt die Frage, warum sich dieser viel versprechende Werkstoff Metallschaum nach 60jähriger Entwicklung nach wie vor nur vereinzelt in Anwendungen durchgesetzt hat. Eine Marktstudie von *Hipke et al.* zeigt, dass neben den in vielen Fällen bei erster Betrachtung entstehenden Kostennachteilen bei den Entwicklern vor allem Vorbehalte in Bezug auf Berechenbarkeit, fehlende Kennwerte und mangelnde Reproduzierbarkeit bestehen [25]. Dies ist insbesondere ein Hemmnis, wenn die Automobilindustrie erreicht werden soll. Hier stehen sowohl die Berechenbarkeit als auch eine geringe Fertigungstoleranz an oberster Stelle. Für die Zukunft ist daher zu erwarten, dass Massenanwendungen von zellulären metallischen Werkstoffen nur erreichbar sind, wenn die oben angesprochenen Aufgaben gelöst werden.

Neben den psychologischen Hemmnissen fehlender Referenzanwendungen [25] sind die meisten Schwierigkeiten eher technologischer Natur, und so kann erwartet werden, dass durch geschickte Auswahl der Herstellungstechnologien marktfähige Produkte erzeugt werden können. Die Analyse der bereits in Serienanwendungen eingesetzten zellulären metallischen Werkstoffe zeigt, dass insbesondere solche Produkte marktfähig sind, bei denen in der Herstellung auf etablierte Produktionsverfahren zurückgegriffen wurde. So setzt die Serienfertigung von *Alulight International* auf den etablierten Conform-Prozess. Die Herstellung

von Nickelschäumen beruht auf der breit eingesetzten galvanischen Beschichtung von Kunststoffen, und die Herstellung von Mikrofiltern und die Verwendung von Platzhalter-Techniken [16] beruhen auf klassischen pulvermetallurgischen Techniken. Das aus diesen Beispielen folgende Fertigungskonzept heißt demnach: Verwende Verfahren, die technologisch ausgereift sind und modifiziere sie soviel wie notwendig ist. Um einen breiten Markt auch mit metallischen Hohlkugelstrukturen zu erreichen, wurde diese These daher besonders für die Technologieentwicklung der HKS berücksichtigt und wird im Folgenden diskutiert.

3. Konzept für die Massenfertigung von metallischen Hohlkugelstrukturen

Das Herstellungsverfahren zur Fertigung von metallischen Hohlkugelstrukturen folgt einer templatgebundenen Prozessroute. Im Gegensatz zu Schäumverfahren, die die zelluläre Struktur mit der Hilfe von Treibmitteln erzeugen, dient hier ein Templat zur Strukturierung. Mit dieser Technik kann der in [25] genannte Hemmschuh der geringen Reproduzierbarkeit der Zellenweite vermieden werden. Als Templat dienen Kugeln aus expandierbarem Polystyrol (EPS), die nasspulvermetallurgisch beschichtet werden. Die so entstandenen Einzelkugeln werden in einem Formgebungsprozess zu Grünformen verarbeitet. Schließlich wird das strukturegebende Templat thermisch entfernt und die Grünform gesintert [26].

Prinzipiell beinhaltet dieses Fertigungskonzept vier einzelne Aspekte, die bezüglich ihrer Serientauglichkeit betrachtet werden müssen. Sowohl die verwendeten Rohstoffe als auch der Formgebungsprozess der einzelnen Kugeln sowie des Formteils und die abschließende Wärmebehandlung müssen den Ansprüchen einer industriellen Fertigung genügen (Bild 2). Die Hauptkriterien einer solchen Fertigung sind

- Komplexität
- Reproduzierbarkeit
- Kosten

Unter diesen Gesichtspunkten wird daher im Folgenden jeder einzelne Fertigungsaspekt genauer beleuchtet.



Bild 2: Jeder Herstellungsschritt der Fertigungskette von Hohlkugelstrukturen hat seinen Ursprung in Massenerstellungstechnologien. Dies ist die Grundlage für die Serientauglichkeit des Herstellungsverfahrens.

3.1 Ausgangsmaterialien

3.1.1 Metallpulver

Die Herstellung von Hohlkugelstrukturen basiert auf einer pulvermetallurgischen Route. Aus diesem Grund besteht prinzipiell bei der Auswahl der Grundmaterialien eine große Freiheit. Die Anwendungen mit dem größten Umsetzungspotenzial beruhen auf eisenbasierten Werkstoffen. Häufig werden ZMW dabei gemeinsam mit Anwendungen bei harschen Bedingungen, also hoher Temperatur und korrosiven Umgebungen, genannt. Daher sind vor allem hochlegierte Stähle als Basiswerkstoff im Fokus der Entwicklung. Für eher strukturelle Anwendungen eignen sich mit Einschränkungen auch unlegierte oder niedriglegierte Stähle.

Im Hinblick auf die Verfügbarkeit für Serienanwendungen ist bereits an dieser Stelle die Auswahl der richtigen Werkstoffe wichtig. Die verwendeten Stahlpulver müssen kommerziell auch in größeren Mengen gut verfügbar sein. Der Fertigungsprozess für Hohlkugeln fordert dabei die Verwendung von relativ kleinen Pulverteilchendurchmessern. Dies ist notwendig, da die einzelnen Kugelschalen oft Dicken von weniger als 100 μm besitzen. Um hier mit dem Sinterprozess noch eine dichte Schale erzeugen zu können, sollten die Pulverpartikel mindestens eine Größenordnung kleiner als die Schalendicke sein. Üblich sind daher Pulvergrößen von $d_{50} = 5\text{-}15 \mu\text{m}$.

Diese Vorgaben schränken die Auswahl der geeigneten Stähle stark ein. Dabei wird auf Pulver zurückgegriffen, die typischerweise für die MIM-Produktion

verwendet werden. Im Hochtemperaturbereich sind dies vor allem austenitische Stähle mit hohem Cr-Gehalt wie zum Beispiel 1.4404, 1.4841 oder ferritische Stähle wie 1.4006, 1.4016 oder 1.4767. Höhere Festigkeiten können mit Duplex-Stählen wie zum Beispiel mit 1.4460 erreicht werden. Zunehmend werden auch höherfeste martensitische Stähle beleuchtet. Infrage kommen dabei z.B. 1.4125 oder 1.4542. Dabei befindet sich die Entwicklung des martensitischen Härtens von Zellularen Metallischen Werkstoffen allerdings noch am Anfang der Entwicklung [27]. Insbesondere die Härtung bedingt reproduzierbare Kohlenstoffanteile im gesinterten Bauteil. Aufgrund der außerordentlich großen Binder- bzw. Templatanteile der Grünlinge erfolgt bei der Entbinderung von hochlegierten Stählen in der Regel eine Aufkohlung. Sollen daher Stähle verwendet werden, deren Eigenschaften in besonderer Weise vom Kohlenstoffanteil abhängen, muss der in Kapitel 3.4 beschriebenen Wärmebehandlung besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

In thermisch oder korrosiv weniger belasteten Anwendungen können auch unlegierte Stähle als Grundwerkstoff verwendet werden. Aufgrund der deutlich geringeren Preise und geeigneten Pulvergrößen bietet sich hier die Verwendung von Carbonyleisenpulver an. Zulegieren von geringen Mengen erfolgt dabei üblicherweise durch Zumischen von Fremdpulvern. Ein aufgrund der deutlich verbesserten Sintereigenschaften übliches Element ist dabei Phosphor. Dies wird in Form von Fe_3P zugegeben und führt im gesinterten Zustand zu einem erheblichen Festigkeitserfolg (Bild 3).

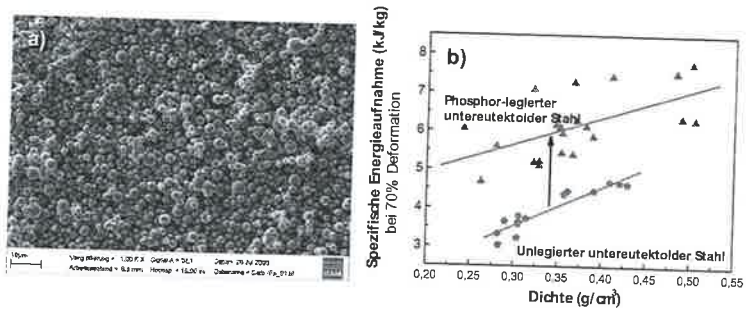


Bild 3: Zur Herstellung von Formteilen aus unlegiertem Stahl wird üblicherweise Carbonyleisenpulver mit sphärischer Struktur verwendet (Bild a). Durch Zulegieren geringer Mengen von Phosphor können die mechanischen Eigenschaften erheblich verbessert werden (Bild b).

Die genannten Stähle sind allesamt kommerziell bei mehreren Anbietern in reproduzierbarer Qualität gut verfügbar. Insbesondere durch die großen Ausschuss-

mengen, die beim Absieben der kleinen Pulverfraktionen entstehen, sind die Pulverkosten jedoch recht hoch und bislang das größte Hemmnis für die kommerzielle Einführung des neuen Werkstoffs. Aktuelle Kalkulationen zeigen, dass bei größeren Serienfertigungen die Pulverkosten den überwiegenden Anteil an den Stückkosten haben. Große Hoffnungen ruhen daher auf der Entwicklung neuer Pulverherstellungsverfahren, die die Herstellung von feinen Pulvern mit hohem Feinanteil zulassen und damit eine Senkung der Kosten ermöglichen.

3.1.2 Template

In der Vergangenheit wurden verschiedene templatgebundene Verfahren zur Herstellung von ZMW entwickelt. In vielen Fällen wird retikuliertes Polyurethan verwendet, das einen sehr hohen Grad an Offenporigkeit bietet [6]. Um den Vorteil der massentauglichen Formgebung zu nutzen (s. Abschnitt 3.3), wurde für die Herstellung von Hohlkugelstrukturen auf expandierbares Polystyrol (EPS) - besser bekannt unter dem BASF-Markennamen *Styropor*[®] - zurückgegriffen. EPS wird vorrangig von der Verpackungsindustrie eingesetzt. Allein die Hersteller verbrauchen hier etwa 20.000 Tonnen EPS pro Jahr [28]. Angewendet wird EPS vor allem für Formteile zum Transportschutz, aber auch als Schalkörper im Hochbau, zur Isolierung von Rohren oder Wänden sowie als energieabsorbierender Werkstoff für die Produktion von Helmen.

EPS ist als Granulat mit Partikeldurchmessern von 0,2 bis 3,0 mm erhältlich. Die Partikel bestehen aus Polystyrol, in dem bereits Pentan (C_5H_{12}) als Treibmittel in gelöster Form vorhanden ist. Der Schaum entsteht bei Erwärmung dieser Partikel oberhalb der Glastemperatur von 75 – 100°C. Bei höheren Temperaturen kommt es zur Expansion des gelösten Gases, wodurch das erweichte Polymer aufschäumt [29]. Dabei vergrößert sich der Partikeldurchmesser ungefähr um das Dreifache. Das eigentliche Aufschäumen des Polystyrols findet in drei Schritten statt: Vorschäumen, Zwischenlagerung und Ausschäumen. Beim Vorschäumen werden die Partikel mit Hilfe von Wasserdampf oder in selteneren Fällen mit heißer Luft oder heißem Wasser auf Temperaturen zwischen 80 und 125°C erwärmt (Bild 4).

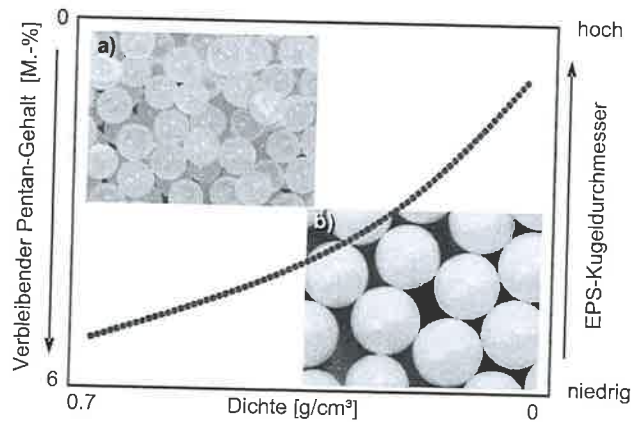


Bild 4: Für den Herstellungsprozess der HKS dient expandierbares Polystyrol (EPS). Das Material wird als Granulat (Bild a) geliefert und anschließend vorgeschäumt (Bild b). Dabei verringert sich die Dichte der Kugeln und der Kugelradius erhöht sich.

Bis hierhin sind die Prozesse großindustriell bekannt und können ohne Änderungen übernommen werden. Für die EPS-Formteilherstellung ist allerdings beim Ausschäumen eine hohe Neigung zum Verschweißen der Partikel erwünscht. Zur Verstärkung werden die Granulate zusätzlich üblicherweise beschichtet, sodass eine erhöhte Verschweißneigung erreicht wird. Dieser Effekt ist für die Hohlkugelherstellung eher hinderlich. Die Auswahl der EPS-Granulate ist in erster Näherung allerdings kein kritischer Erfolgsfaktor, weswegen zurzeit vorerst auf industrielle Standardprodukte zurückgegriffen wird. Darüber hinaus wird aufgrund der besseren Berechenbarkeit für die metallischen Hohlkugelstrukturen eine einheitliche Kugelgröße erwünscht. Die vorgeschäumten Granulate müssen daher im nächsten Schritt zunächst vorklassiert werden. Dies kann durch Sieben geschehen. Bild 5 zeigt die typischerweise erreichbaren Größenverteilungen. In einem Verteilungsbereich von 1 – 99 Prozent werden so maximale Größenunterschiede von etwa 400 μm realisiert. Im Vergleich liegt dieser Wert bei unklassierten EPS-Kugeln bei 1220 μm . Ob der zusätzliche Schritt der Vorklassierung durchgeführt werden muss, muss für jede Anwendung überprüft werden.

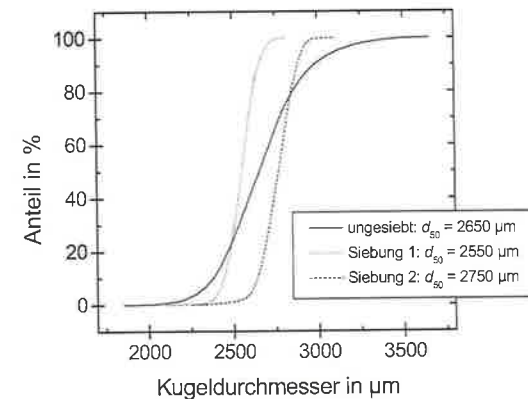


Bild 5: Kugelgrößenverteilung vorklassierter EPS-Template. Durch eine geeignete Vorklassifizierung kann die Kugelgrößenverteilung reproduzierbar auf eine Verteilungsbreite von etwa 0,4 mm eingestellt werden.

3.2 Beschichtung

Die einzelnen Zellen der späteren zellularen Struktur werden durch die Beschichtung von EPS-Kugeln durch Auftragen einer Binder/Metallpulver-Suspension erzeugt. Diese Vorgehensweise bietet im Vergleich zu Beschichtungen aus der Gasphase oder durch elektrochemische Abscheidungsverfahren eine höhere Flexibilität insbesondere hinsichtlich der Materialauswahl und der erzielbaren Schichtdicken.

Für die Schlickerbeschichtung ist das Wirbelschichtverfahren etabliert. Die zugrundeliegende Anlagentechnik der Wirbelschicht, insbesondere die Schaufelrotor- und kontinuierlich arbeitende Procell-Technologie, wurde in den sechziger Jahren von der Firma *Glatt Systemtechnik GmbH* entwickelt, ursprünglich für die pharmazeutische Industrie zum Agglomerieren, Granulieren, Pelletieren und Beschichten. In diesem Bereich wurde das Verfahren bis in den großtechnischen Produktionsmaßstab weiterentwickelt und optimiert. Als führender Anbieter für Pharmaanlagen liefert Glatt vor allem Wirbelschichtanlagen an Pharma-Hersteller. Durch die gesteigerte Effizienz konnten diese Verfahren auch in andere Industriebereiche, z.B. Lebensmittel und Feinchemie, übertragen werden, in denen die Margen weniger attraktiv sind als in der Pharmazie. In einem weiteren Schritt wurde die mittlerweile weit ausgereifte Technologie auf die Beschichtung von EPS-Kugeln mit Metall- und Keramischlickern übertragen.

Damit kann bei diesem Verfahrensschritt bei der Herstellung von Hohlkugeln bzw. Hohlkugelstrukturen auf eine bekannte und bewährte Technologie zugegriffen werden.

Beim dem Verfahren (**Bild 6**) werden die Template durch eine Wirbelschicht in der Schwebe gehalten, gleichzeitig wird der Schlicker vernebelt und in die Wirbelschicht eingesprüht. Dadurch wird eine **gleichmäßige Beschichtung aller EPS-Kugeln** erzielt. Der Luftstrom, der die Wirbelschicht erzeugt, trocknet gleichzeitig den Schlicker auf den EPS-Kugeln. Dies führt zu einer festen, gut anhaftenden Schicht und verhindert ein Verschmieren des Schlickers in der Anlage sowie ein Verkleben der Kugeln untereinander. Durch die **gleichzeitig induzierte Rotationsbewegung** werden die Produktpartikel verrundet und verdichtet, was die Beschichtungsqualität der Grünkugeln erheblich verbessert. Während der Beschichtung können wesentliche Parameter der Struktur gezielt eingestellt werden, z.B. Schichtdicke, Porosität der Schicht und Dichte. Die minimale Schichtdicke für eine homogene Schicht auf dem EPS-Templat beträgt etwa das Fünffache des Korndurchmessers des verwendeten Metallpulvers. Auch dicke Schichten von mehr als einem Millimeter können ökonomisch erzielt werden. Durch gezieltes Einbringen oder Weglassen von zusätzlichem Bindermaterial kann die Porosität eingestellt werden. Dadurch können Kugeln hergestellt werden, die entweder gasdicht oder permeabel sind. Die Grünfestigkeit der Einzelkugeln ist hoch, so dass sie für die nächsten Verfahrensschritte sehr gut handhabbar sind. Insbesondere für die Reproduzierbarkeit der Strukturen (Zellengröße, Dichte) bietet die einfache Kontrollierbarkeit der beschichteten Kugeln im Grünzustand einen guten Ansatz für die Qualitätskontrolle.

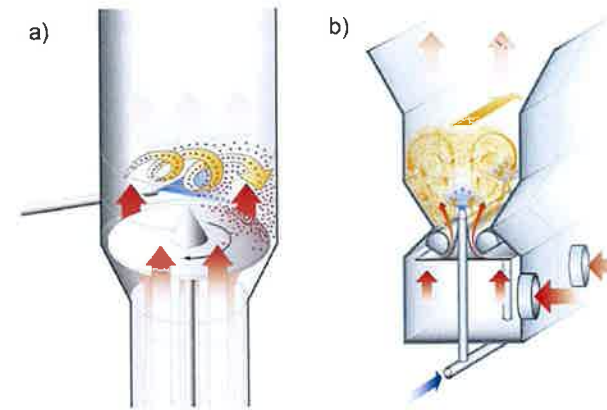


Bild 6: Funktionsschema eines kontinuierlich arbeitenden Schaufelrotors (Bild a). Das Produkt (gelb) wird in durch eine konditionierte Luftströmung (rot) in der Wirbelschicht gehalten, mit Schlicker oder Lösung (blau) besprüht. In einer kontinuierlich arbeitenden GF-Wirbelschichtenanlage wird das Produkt (gelb) in durch eine konditionierte Luftströmung (rot) in der Wirbelschicht gehalten, mit Schlicker oder Lösung (blau) besprüht und dabei kontinuierlich weitertransportiert.

Das Wirbelschichtverfahren bietet für die Herstellung von Hohlkugelstrukturen insbesondere durch die bereits bewährte Aufskalierbarkeit des Verfahrens besondere wirtschaftlich Vorteile: Derzeit werden aufgrund der niedrigeren benötigten Mengen maximal 350 l im Batchverfahren erzeugt. Dabei dauert ein Beschichtungszyklus etwa 4 h. Werden für große Serien größere Mengen benötigt, kann die Produktion in kontinuierliche Anlagen stattfinden. Diese Anlagen erlauben einen Durchsatz von bis zu 1600 kg/h (bezogen auf den getrockneten Zustand).

3.3 Formteilherstellung

Dem Formteilherstellungsprozess kommt bei der HKS-Herstellung eine zentrale Bedeutung zu. In früheren Arbeiten mussten Formteile aus angefeuchteten einzelnen Hohlkugeln durch Pressen im Labormaßstab gefertigt werden. Die Ansprüche an Komplexität, Reproduzierbarkeit und an die Stückkosten können mit dieser einfachen Route jedoch nicht erfüllt werden. Daher wurde ein Formteilautomat entwickelt, mit dem die HKS-Fertigung mit einem hohen Automatisierungsgrad ermöglicht wird (**Bild 7**). Insbesondere ist es damit möglich, Formteile mit komplexer Geometrie herzustellen, sodass eine endkonturnahe Fertigung dar-

stellbar ist. Derartige Formteilautomaten sind in der EPS-Verpackungsindustrie etabliert und müssen für die Adaption zur HKS-Herstellung an einigen Punkten modifiziert werden.

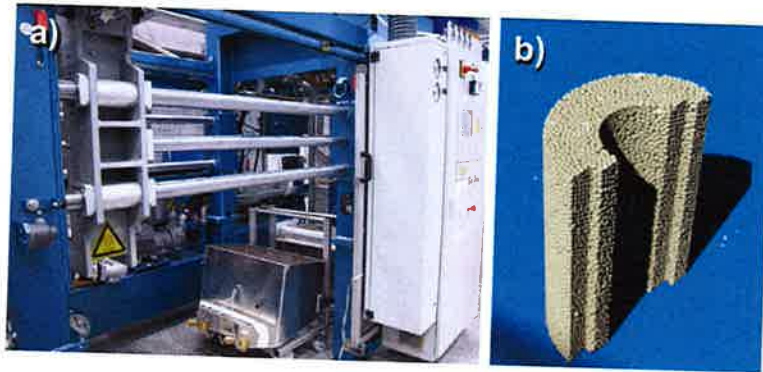


Bild 7: Formteilautomat zur Herstellung von Hohlkugel-Grünstrukturen (Bild a). Mit dieser Anlage können Formteile aus metallischen Hohlkugeln auch in komplexe Geometrien reproduzierbar gefertigt werden (Bild b).

Die grundsätzliche Arbeitsweise eines Formteilautomats ändert sich indes nicht: Zunächst wird durch Druckluftinjektoren das vorgeschäumte Material in eine Kavität geblasen. Diese Werkzeuge können aus einzelnen Formen oder Formnestern bestehen. Mittels Sattdampf wird nun bei Temperaturen von etwa 120°C das EPS über seine Erweichungstemperatur gebracht. Die vorgeschäumten Partikel dehnen sich unter Einfluss der Wärme weiter aus, sodass sie den noch vorhandenen Hohlraum ausfüllen und miteinander verschweißen. Nach einer Abkühlung ist das Zellgerüst stabilisiert und das Formteil wird ausgeworfen. Im Gegensatz zur Fertigung von EPS-Formkörpern basiert das Fügen von Formkörpern aus metallischen Hohlkugeln nicht auf einem Schweiß-, sondern auf einem Klebevorgang. Dafür muss die binderhaltige Oberfläche der getrockneten metallischen Kugeln angefeuchtet werden. Dadurch wird der Binder der beschichteten Kugeln erneut aktiviert. Da eine ausreichende Grünfestigkeit erst im getrockneten Zustand erreicht wird, ist nun der Trocknungsvorgang bestimmend für die Taktzeit und damit für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Wie bei Verpackungen üblich, können auch EPS-Formkörper mit metallischer Beschichtung nachgeschäumt werden. **Bild 8** zeigt Formkörper mit verschiedenen Nachschäumgraden. Insbesondere bei sehr starkem Nachschäumen können auf diese Weise gasdichte Formkörper mit geschlossenen Poren dargestellt werden. Diese Formkörper besitzen dann eine wabenförmige Gestalt [30]. Diese

Struktur ist neben der Dichte ein wichtiger Einflussfaktor auf die Festigkeit der gesinterten Hohlkugelstrukturen bei

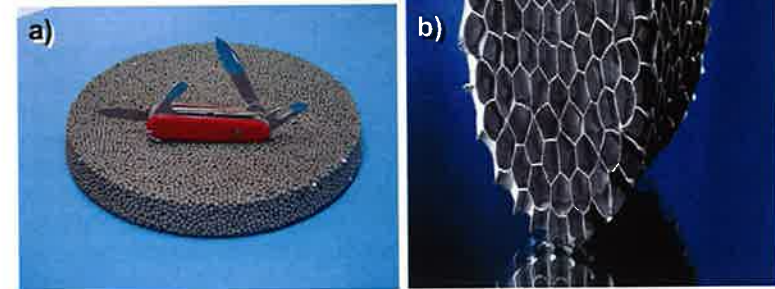


Bild 8: Bei geringer Verpressung und geringem Nachschäumgrad behalten die Kugeln weitgehend ihre ursprüngliche Form (Bild a). Insbesondere ein höherer Nachschäumgrad führt demgegenüber zu Abplattung der Einzelkugeln. Im Extremfall kann auf diese Weise eine dreidimensionale wabenartige Struktur erreicht werden (Bild b).

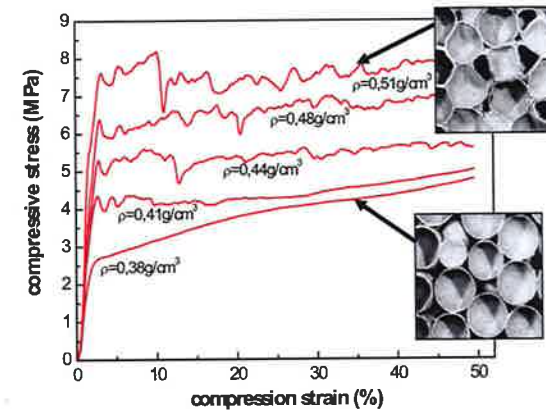


Bild 9: Einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Festigkeit von Hohlkugelstrukturen ist neben der Dichte die Gestalt der Zellen. Geschlossene Porosität kann durch Nachexpansion des EPS-Templats erreicht werden.

Ein Formteilautomat zur Herstellung von Hohlkugelstrukturen wurde gemeinsam mit dem Anlagenhersteller *Kurtz GmbH Kreuzwertheim* entwickelt und in Betrieb genommen. Die mit dieser Anlage mögliche Formteilgröße beträgt $680 \times 460 \times 300 \text{ mm}^3$, wobei die Konstruktion ein Upscaling auf die doppelte Fläche sowie die Verwendung von Formnestern möglich macht. Mit dieser Anlage können zurzeit im Versuchsbetrieb Taktzeiten in der Größenordnung von Minuten erreicht werden. Diese Zykluszeit schließt die Befüllung, Entnahme und Reinigung ein. Die Zykluszeiten und Befüllungsgrößen sind wichtige Kostenfaktoren, die die Wirtschaftlichkeit des gesamten Prozesses beeinflussen. Der Formteilautomat kann erst ab einer bestimmten Absatzmenge wirtschaftlich arbeiten. Um die notwendigen Stückzahlen fertigen zu können, eignet sich das Verfahren vor allem für die Fertigung einer Pilotanwendung mit größeren Stückzahlen.

Viele Anwendungen des Werkstoffs nutzen die multifunktionellen Eigenschaften der Hohlkugelstrukturen und werden daher in komplexen Geometrien benötigt. Für die Herstellung dieser Bauteile existieren verschiedene Strategien:

- Mechanische Bearbeitung gesinterter Formteile durch Sägen, Erodieren, Wasserstrahlschneiden oder Laserschneiden. Mit dieser Strategie können die geringsten Fertigungstoleranzen erreicht werden. Die Bearbeitungskosten sind aufgrund aufwändiger Verfahren eher hoch.
- Mechanische Bearbeitung grüner Formteile. Mit dieser Verfahrensweise können Schwierigkeiten, die beim Trennen metallischer, gesinterter Formteile entstehen (Ausbrechen, Verformen der Kugelschalenwände), umgangen werden und Werkzeugkosten durch niedrigen Verschleiß gering gehalten werden. Nachteilig ist der auftretende Sinterschwund, der zu Verzug führen kann und eventuell Nachbearbeitung notwendig macht.
- Herstellung komplexer Near-Netshape-Formteile durch entsprechend geteiltes Formwerkzeug. Aufgrund des Sinterschwunds kann auch hier eine Nachbearbeitung notwendig werden. Die Toleranzen sind mit dieser Vorgehensweise größer.

Aufgrund der hohen Materialeffizienz besitzt das letztere Verfahren einen besonderen Charme, insbesondere da die Pulverkosten einen nicht unerheblichen Anteil an den Stückkosten haben. Bei der Entwicklung neuer Bauteile bedarf dieser Punkt allerdings einer hohen Aufmerksamkeit. Zurzeit sind der Schrumpfung und der Verzug der Formteile beim Sintern noch nicht befriedigend berechenbar. Um ein teures rein empirisch iteratives Herantasten an die „richtige“ Formwerkzeuggeometrie zu umgehen, sind daher insbesondere auf dem Gebiet der Simulation noch einige Anstrengungen zu unternehmen.

3.4 Wärmebehandlung

Für die Wärmebehandlung der metallischen Hohlkugelstrukturen wird in erster Linie auf eine im Metallpulverspritzguss (MIM) etablierte Ofentechnologie zurückgegriffen. Wie auch beim MIM sind die wesentlichen Schritte die thermische Entbinderung sowie das abschließende Sintern. Dabei liegen die Entbinderungstemperaturen zwischen $450 - 650^\circ\text{C}$, die Sinteremperaturen liegen je nach verwendetem Werkstoff bei $1100 - 1300^\circ\text{C}$. Für geringere Stückzahlen erfolgt die Wärmebehandlung in Batch-Öfen. Dabei kommen Entbinderungsöfen und Sinteröfen, wie sie für die MIM-Produktion verwendet werden, zum Einsatz. Diese Verfahrensweise ist in Bezug auf Atmosphären und Temperaturen sehr flexibel. Derartige Öfen lassen den Betrieb mit Partialdruck zu. Bei dieser Betriebsart werden zum einen deutlich geringere Tendenzen zu turbulenter Strömung erreicht. Zum anderen sind die Gasgeschwindigkeiten gegenüber dem Normaldruckbetrieb erhöht. Auf diese Weise wird eine besonders gute Entkohlung der Formteile erreicht [31].

Bei größeren Stückzahlen ist der Einsatz von kontinuierlichen Öfen wirtschaftlich sinnvoller. Diese bieten neben kürzeren Taktzeiten den Vorteil des geringeren Energieaufwandes aufgrund des fehlenden Hochheizens. Bei stabilen Temperaturfeldern kann darüber hinaus eine reproduzierbarere Schrumpfrate erreicht werden. Typischerweise werden in solchen Öfen **gepresste Sintermetallteile** gefertigt. Bei der Fertigung solcher Bauteile müssen im ersten Schritt Presshilfsmittel und evtl. geringe Bindermengen entfernt werden. Demgegenüber ist die beim Zersetzen der Template und Binder in Hohlkugelstrukturen anfallende Gasmenge deutlich größer. Die Zellularen Metallischen Werkstoffe nehmen daher, bezogen auf ihre Größe und die Menge der zu entgasenden organischen Substanzen, eine Zwischenposition zwischen den etablierten Verfahren der klassischen gepressten PM-Bauteile und dem Metal Injection Moulding ein. Für die kontinuierliche Fertigung von Hohlkugelstrukturen müssen die Ofensysteme daher deutlich modifiziert werden. Dies betrifft zum einen die modifizierte Entbinderungszone, aber auch den Einlauf des Ofens. Eine derartige Anlage wurde in Zusammenarbeit der Firma *Sarnes Ingenieure OHG* entwickelt (**Bild 10**). Dieser Förderbandofen ermöglicht die kontinuierliche Wärmebehandlung von unlegierten und niedriglegierten Hohlkugelstrukturen unter Endogas und ist damit ein Grundstein für die wirtschaftliche Produktion dieses neuen Werkstoffs.

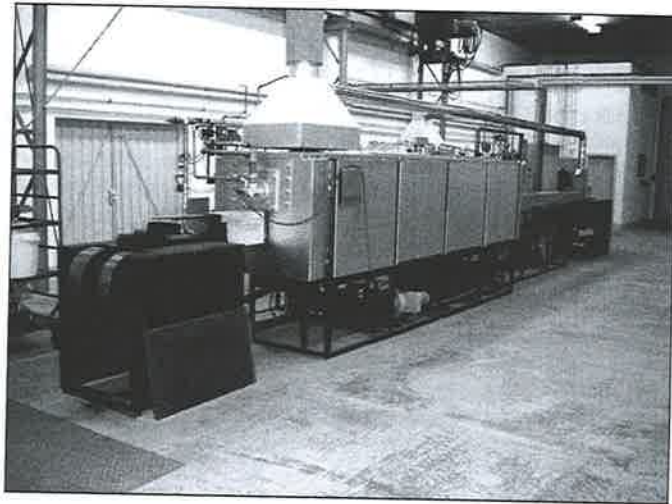


Bild 10: Kontinuierlicher Förderbandofen für die Herstellung von metallischen Hohlkugelstrukturen. Gegenüber klassischen Anlagen für die Wärmebehandlung von Sintermetallen wurden vor allem ein modifizierter flammfreier Einlauf sowie eine modifizierte Entbinderungszone entwickelt.

4. Vermarktung

Eine Marktstudie von *Hipke et al.* [25] zeigt, dass potenzielle Anwender Zellulärer Metallischer Werkstoffe vor allem an genau definierten und reproduzierbaren Eigenschaften interessiert sind. Mit der oben beschriebenen Verwendung etablierter Produktionstechnologien wurde dieser Weg konsequent beschritten. Ein zweites in [25] beschriebenes Hemmnis ist die fehlende Referenzanwendung. Um diesen entscheidenden Schritt zu gehen, wurde 2005 das vom BMBF geförderte Netzwerk *inno.zellmet* geschaffen. Ziel dieses Netzwerks ist es, Zelluläre Metallische Werkstoffe mit zielgerichtet bestimmten Eigenschaften, Herstellungs-, Be- und Verarbeitungsrichtlinien als Funktionsmuster für Einsatzfälle zu entwickeln, die es zulassen, diese Werkstoffe erstmals auf der Grundlage gesicherter technologischer Verfahren und Veredlungsschritte massenhaft in neuen Generationen von Maschinen, Apparaturen und Anlagen einzusetzen. In dem Verbund entwickeln 6 Institute und 17 Industriepartner aus der Region Dresden auf der Basis von Hohlkugelstrukturen und Faserstrukturen Lösungen für Schall- und Explosionsschutz, Leichtbau, Energietechnik sowie Medizin- und Biotechnologie. Die geplanten Einsatzfälle stellen konkrete, aus Marktbedürfnissen abgeleitete Anwendungen für diese Werkstoffe dar, mit deren Hilfe die Einsatz-

möglichkeiten für die neuartigen Werkstoffe anschaulich, praxiswirksam und marktorientiert demonstriert werden. Das strategische Entwicklungsziel dieses Wachstumskerns liegt damit auch in der Überwindung bisheriger abgegrenzter Teillösungen durch die Schaffung einer gemeinsamen wissenschaftlichen, technischen und technologischen Basis mit den folgenden Kernkompetenzen:

- Technologische Plattform: Zelluläre Metallische Werkstoffe (ZMW) in Form metallischer Faser- und Hohlkugelstrukturen
- Anwenderspezifisches Design von ZMW hinsichtlich geringer Dichte und multifunktionaler Eigenschaften
- Bearbeiten, Fügen und Veredeln von ZMW

Die Herstellung und Vermarktung der Hohlkugelstrukturen erfolgt durch die hierzu neu gegründete Firma *hollomet® GmbH*. Diese Neugründung geht aus der Firma *Glatt Systemtechnik GmbH* hervor und wird zunächst die bereits bestehenden Pilotanlagen nutzen. Vertrieben wird der Werkstoff unter dem Namen *globomet*. Mit diesem Konzept steht die Einführung des neuen zellulären Werkstoffs auf drei Säulen (**Bild 11**): Die Technologieentwicklung wird auch weiterhin vor allem durch die Forschungsinstitute (*Fraunhofer IFAM-DD, TU Dresden*) getragen. Die Umsetzung der Technologie erfolgt durch die *hollomet GmbH*, die auf ein breites Netzwerk von Anwendern und Spezialisten zurückgreifen kann.

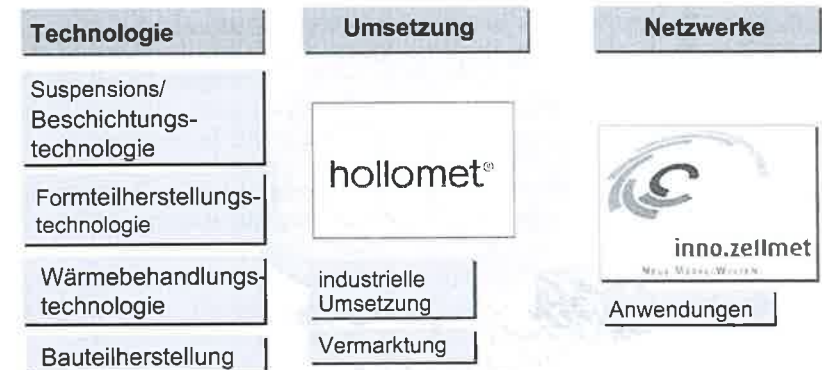


Bild 11: Die Umsetzung der Hohlkugelstrukturen steht mit der Technologieentwicklung an den Forschungsinstituten, der Umsetzung mit der *hollomet GmbH* und dem Netzwerk *inno.zellmet* auf drei Säulen.

5. Zusammenfassung

Zelluläre Metallische Werkstoffe werden seit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt. Trotz des Booms zu diesem Thema vor allem in der Forschung seit Anfang der 90er Jahre sind bislang erst wenige Serienanwendungen dieses Werkstoffs umgesetzt worden. Erfolg versprechend erscheint vor allem die Strategie, etablierte Fertigungstechnologien zu nutzen, die nach Möglichkeit nur gering modifiziert werden müssen. Damit soll neben der Reproduzierbarkeit auch die Wirtschaftlichkeit der Fertigung sichergestellt werden. Dieses Konzept wurde daher bei der Entwicklung von Hohlkugelstrukturen verfolgt. Hohlkugelstrukturen wurden bereits in mehreren prototypischen Anwendungen erfolgreich getestet. Das Fertigungskonzept für die Fertigung von metallischen Hohlkugelstrukturen beruht auf vier Einzelaspekten:

- Materialauswahl: Verwendet werden Materialien, die als Massenmarkttitel gut und reproduzierbar zugänglich sind.
- Beschichtung: Zur Erzeugung der zellulären Struktur werden organische Template nasspulvermetallurgisch im Wirbelbettverfahren beschichtet. Dieses Verfahren ist in der pharmazeutischen Fertigung etabliert und erlaubt eine reproduzierbare Herstellung im industriellen Maßstab.
- Formgebung: Formteile werden mittels eines Formteilautomats hergestellt. Diese Technologie wird v.a. in der Verpackungsindustrie verwendet, um wirtschaftlich Formteile aus EPS herzustellen. EPS wiederum wird als Templat für die Hohlkugelherstellung genutzt.
- Wärmebehandlung: Das Verfahren thermischer Entbinderung und Sinterung ist in der PM-Bauteilherstellung und in der Fertigung mittels Metal Injection Moulding (MIM) etabliert.

Mit dieser Strategie können metallische Hohlkugelstrukturen wirtschaftlich gefertigt werden. Für deren Herstellung und Vermarktung ist bereits ein Unternehmen gegründet worden, das den neuen Werkstoff in den nächsten zwei Jahren auf den Markt bringen wird.

6. Literatur

- [1] Stephani, G., Waag, U., Hartmut, G., Kieback, B., Bretschneider, F.: Funktionelle Hohlkugelstrukturen, in: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 18, Kolaska, H. (Hrsg.), ISL-Verlag Hagen, 2002, 211-223
- [2] Waag, U., Stephani, G., Andersen O., Kieback, B., Kretschmar R., Venghaus H., Färber, J.: Eigenschaften und Anwendungen von metallischen Hohlkugelstrukturen, in: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 23, Kolaska, H. (Hrsg.), ISL-Verlag Hagen, 2004
- [3] Sosnik, A.: US-Patent 2,434,775; 1948
- [4] Elliott, J.C.: US-Patent 2,751,289; 1956
- [5] Davies, G.J., Zhen, S.: Metallic foams: their production, properties and applications, J. Mat. Sci 13, 1983, 1899-1911
- [6] Banhart, J.: Manufacture, characterisation and applications of cellular metals and metal foams, Progress in Materials Science 46, 2001, 559-632
- [7] Alporas[®], Gleich, Aluminiumschaum Produktdatenblatt, <http://www.gleich.de/produkte/pdf/alporas.pdf>
- [8] Seeliger, H.-W.: Fertigungs- und Anwendungsstrategien für Aluminiumschaum-Sandwich Bauteile, Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 16, Kolaska, H. (Hrsg.), VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, Düsseldorf, 2000, 69-84
- [9] Banhart, J., Seeliger, H.-W.: Aluminium Foam Sandwich Panels: Metallurgy, Manufacture and Applications, in: Porous Metals and Metallic Foams, Lefebvre, L.P., Banhart, J., Dunand, D.C. (Hrsg.), DEStech Publications, Inc, PA, 2008, 3-6
- [10] Klan, S., Kniewallner, L., Philipp, S., Weis, D.: Aluminiumschaum zur Verbesserung der Akustik und des Crashverhaltens, Motortechnische Zeitschrift, Band 68, 2007, 848-852
- [11] Hanko, G., Mitterer, H., Schäffler, P.: Serienfertigung von Al-Schaumbauteilen durch innovative Herstellungsverfahren, Aluminiumjournal, Vol. 83/09, 2007
- [12] Baumeister, J.: Deutsches Patent 4,018,360, 1990
- [13] Kretz, R., Wolfsgruber, E.: Potential des Alulight Verfahrens zur Herstellung von dreidimensionalen Net Shape Schaumaluminiumbauteilen, Materialwiss. und Werkstofftechn. 31, 2000, 400-402
- [14] Paserin, V., Marcuson, S., Shu, J., Wilkinson, D.S.: The chemical vapor deposition technique for Inco nickel foam production—manufacturing benefits and potential applications, in: Cellular Metals and Metal Foaming Technology, Banhart, J., Fleck, N.A. (Hrsg.), MIT-Verlag, 2003, 31-38
- [15] Arrance, F.C.: Battery Separator, US Patent 3625771, 1966

- [16] *Bram, M., Buchkremer, H.P., Stöver, D.*: Pulvermetallurgie von porösen Formkörpern – Herstellung, Eigenschaften und Anwendungen, in: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 16, Kolaska, H. (Hrsg.), VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, Düsseldorf, 2000, 47-67
- [17] *Fübi, M., Buchkremer, H.P., Stöver, D.*: Wet Powder Spraying (WPS) – A New PM-Route for Processing Fiber-reinforced MMC's. Proc. of PM94, Paris, 1994, 483-485
- [18] *Bram, M., Stiller, C., Buchkremer, H.P., Stöver, D., Baur, H.*: Preparation and Characterization of High-Porosity Titanium, Stainless Steel and Superalloy Parts. Adv. Eng. Mat., 2, 2000, 196-199
- [19] *Imwinkelried, T.*: Mechanical properties of open-por titanium foam, J. Biomedical Mat. Res. A, 2007, 964-970
- [20] *Cohen, R.*: A porous tantalum trabecular metal: basic science. Am J Ortop. 31(4), 2002, 216-217
- [21] *Krygier, J.J., Bobyn, J.D., Poggie, R.A., et. al.*: Mechanical characterization of a new porous tantalum biomaterial for orthopaedic reconstruction. Proc SIROT. Sydney, Australia, 1999.
- [22] *Girlich, D., Hackeschmidt, K., Kühn, C.*: Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs offenerporiger Metallschäume. Konstruktion 1/2 2005, 2005, 54-58
- [23] *Haack, D.P., Butcher, K.R., Kim, T., Lu, T.J.*: Novel Lightweight Metal Foam Heat Exchanger, Proc. ASME Intl. Mech. Eng. Congr. Expo, New York NY, 2001, 1-7
- [24] *Leijenhörst, J., Verdunyn, H.A.*: Metal foam takes off and flies with Gulfstream G650 business jet to unequaled heights, Cellmet News 1/2008, <http://www.cellmet.de/CELLMET-NEWS-2008-I-web.pdf>
- [25] *Hipke, T., Wunderlich, T.*: Chancen und Hemmnisse für den Metallschaumeinsatz, Materialwiss. und Werkstofftechnik 31, 2000, 396-399
- [26] *Andersen, O., Waag, U., Schneider, L., Stephani, G., Kieback, B.*: Novel Metallic Hollow Sphere Structures, Adv. Eng. Mat. 2, 2000, 192-195
- [27] *Jehring, U., Quadbeck, P., Böhm, H.D., Stephani, G.*: High-Strength Steel Hollow Spheres. in: Porous Metals and Metallic Foams, Lefebvre, L.P., Banhart, J., Dunand, D. (Hrsg.), Proc. MetFoam 2007, DEStech Publications Inc., Lancaster, PA, 2008, 165-168
- [28] *Altenau, G.*: Neue Wege des Kunststoff-Recycling, Werkstoffe 04/2002, 2002
- [29] *Doroudiani, S., Kortschot, M.T.*: Polystyrene Foams. I. Processing-Structure Relationships. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 90, 2003, 1412-1420
- [30] *Reinfried, M., Waag, U., Stephani, G., Kieback, B.*: Regular metal foams produced by expandable polystyrene technology. Proceedings PM2004 Powder Metallurgy World Congress, Vol. 4, Wien, 2004, 137-142
- [31] *Joens, C.*: Laminar gas flows ensure 'clean sweep' in sintering. Metal Powder Report Vol. 60, 2005, 52-55