

Metallschäume

Produktion – Charakterisierung – Anwendungen

oder

Von der Mikrostruktur zu Anwendungen

J. Banhart, A. Haibel, Hahn-Meitner-Institut, Berlin

Einleitung:

Das Interesse an Metallschäumen als Struktur- und Leichtbauwerkstoff hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Das liegt zum einen an neuen Verfahrensentwicklungen, die eine wirtschaftlichere Herstellung und eine höhere Qualität des geschäumten Metalls versprechen, als auch an der ständig steigenden Nachfrage nach neuen, kostengünstigen Leichtbaukonzepten. Der vorliegende Beitrag beschreibt Herstellungsmethoden, Eigenschaften und Einsatzgebiete metallischer Schäume und diskutiert die Methoden der Strukturuntersuchungen an diesen Werkstoffen.

Herstellung:

Poröse Metalle lassen sich auf vielfältige Weise herstellen [1,2]. Eine Methode ist das Sintern metallischer Partikel (siehe Abbildung 1 oben). Die erreichbare Porosität liegt hier bei 20 bis 50%. Für das in Abbildung 1 (unten) dargestellte Material wurden zusammengepresste Partikel gesintert, die aus einem Polymerkern und einer Metallpulverhülle bestanden. Während des Sintervorgangs verflüchtigt sich der Polymerkern und das Metallpulver bildet die dargestellte poröse Struktur.

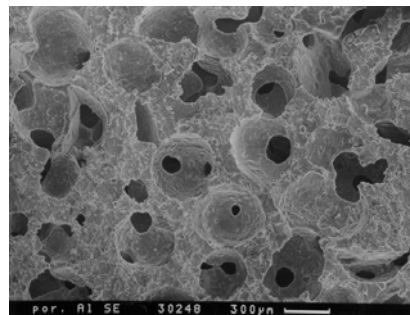
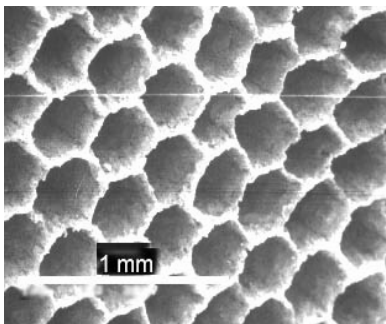
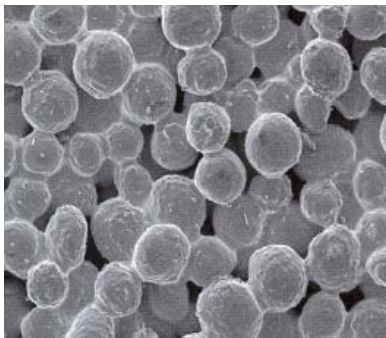


Abbildung 1: Zwei poröse Metallwerkstoffe, hergestellt durch Sinterung. Oben: Porös gesinterte Bronze, Partikelgröße 100 μm . Unten: Poröse Eisenprobe mit orientierten Zellen von hexagonalem Querschnitt. Porosität 86%. [1]

Abbildung 2: Poröser Metallwerkstoff, gegossen. Der Schmelze wurden Hohlkugelchen hinzugefügt [1].

Die poröse Struktur des offenporigen Aluminiummaterials in Abbildung 2 wurde durch Hinzugabe von Hohlkugeln in die Schmelze hergestellt. Das Füllmaterial wurde anschließend vollständig entfernt. Die Dichte dieses Werkstoffs beträgt weniger als 1.1 g/cm^3 . Ausgangsmaterial für den porösen Metallwerkstoff in Abbildung 3 ist ein Polymerschaum. Durch Aufdampfen von Metall auf diese Polymerstruktur entsteht der dargestellte Metallschwamm.

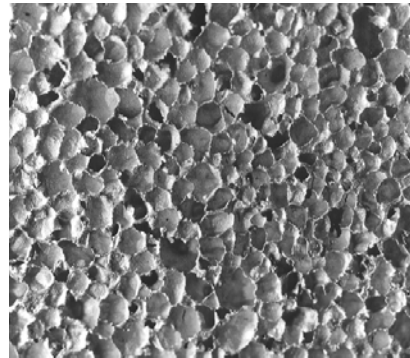
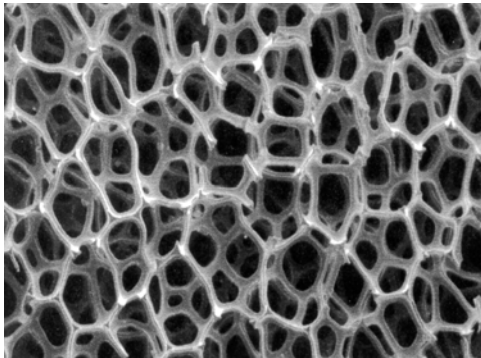


Abbildung 3: Poröser Metallschwamm, durch Beschichtung eines Polymerschaums hergestellt [1].

Abbildung 4: Poröser Metallwerkstoff, geschäumt [1].

Die Herstellung des in Abbildung 4 dargestellten Materials ist in Abbildung 5 skizziert. Als Ausgangswerkstoff werden handelsübliche Metallpulver oder Metallpulvermischungen mit einem Treibmittel (z.B. Titanhydrid) gemischt und anschließend zu einem aufschäumbaren Vormaterial verdichtet. Der Verdichtungsprozess erfolgt üblicherweise durch Strangpressen, wodurch große Mengen an Vormaterial industriell hergestellt werden können. Der Anteil an Treibmittel ist sehr gering und liegt in der Regel unter einem Prozent. Weitere Umform- und Bearbeitungsschritte können je nach Anwendung an die Verdichtung angeschlossen werden. Das auf diese Weise hergestellte, schäumbare Halbzeug wird nun dem eigentlichen formgebenden Schäumprozess unterzogen, der bei Temperaturen knapp über dem Schmelzpunkt der gewählten Metalllegierung stattfindet. Bei diesen Temperaturen kommt es zur Gasfreisetzung des Treibmittels und es entsteht die gewünschte Schaumstruktur. Nach Erreichen der gewünschten Expansion wird der Prozess durch Abkühlung beendet und die Schaumstruktur stabilisiert. Man erhält einen hochporösen Werkstoff mit geschlossenen Poren. In der Regel werden Aluminium sowie Zink und deren Legierungen geschäumt, wobei Dichten zwischen ca. 0.4 und $1,0 \text{ g/cm}^3$ eingestellt werden können.

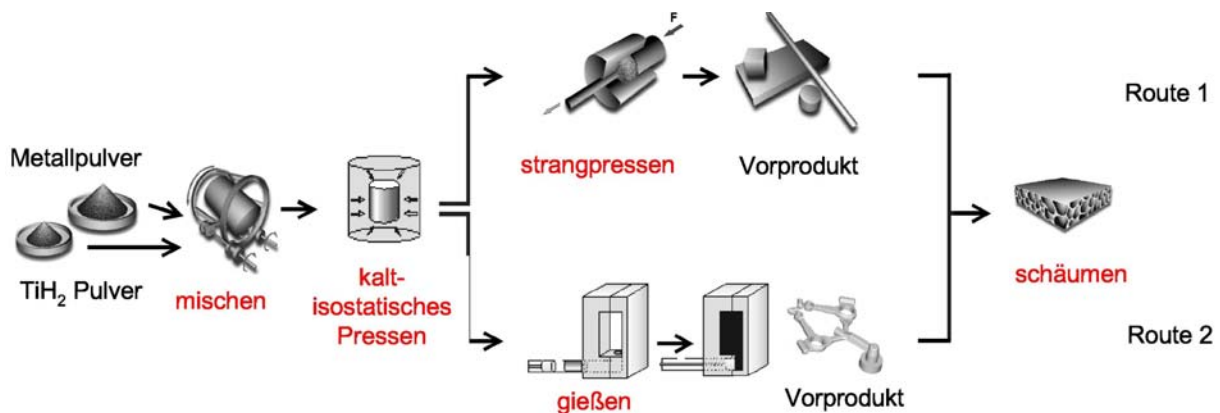


Abbildung 5: Skizzierter Ablauf des Herstellungsverfahrens von metallischen Schäumen nach dem pulvermetallurgischen Verfahren (IFAM-Verfahren) [3].

Ein weiteres Verfahren zur Metallschaumherstellung ist das Schäumen durch Gasinjektion. In Abbildung 6 ist das Verfahren skizziert. In die Metallschmelze wird ein Gas injiziert, der durch Blasenbildung entstehende Metallschaum auf der Oberfläche wird abgeführt und abgekühlt. Um die nötige Stabilität der flüssigen Metallblasen zu erreichen, werden bei diesem Verfahren der Schmelze feste Partikel beigemischt. Diese erhöhen die Viskosität der Schmelze und verringern dadurch das Blasenplatzen.

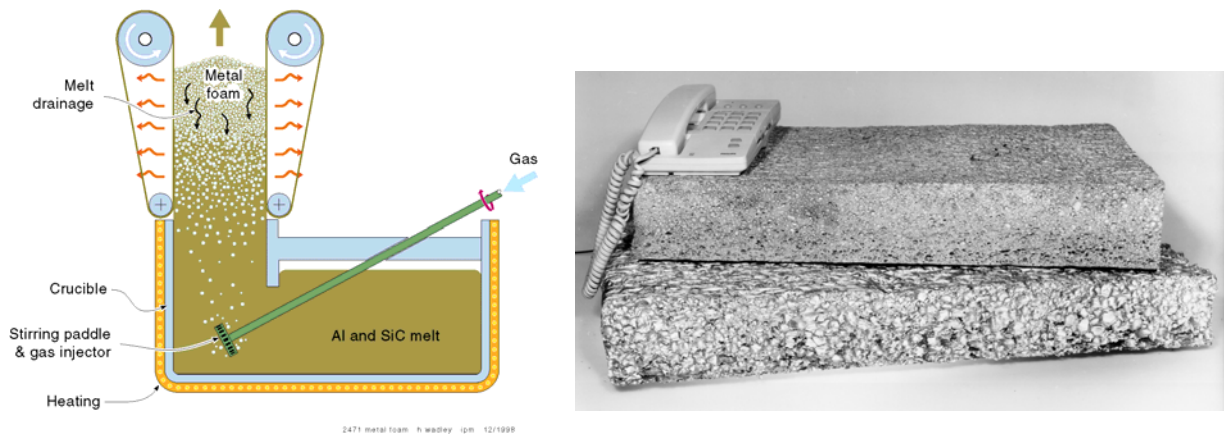


Abbildung 6: Links: Skizzierter Aufbau zum Schäumen durch Gasinjektion. Rechts: Metallschaum, der durch dieses Verfahren hergestellt wurde [1]. (Fa. Hydro Aluminium)

Eigenschaften:

Infolge der hochporösen Struktur weisen metallische Schäume eine hohe spezifische Steifigkeit auf. Sie besitzen außerdem erhöhte mechanische und akustische Dämmeigenschaften. Wie geschäumte Kunststoffe besitzen Metallschäume ausgezeichnete Energieabsorptionseigenschaften, jedoch auf einem deutlich höheren Festigkeitsniveau. Abbildung 7 zeigt den Vergleich des Stauchungsverhaltens eines Polyäthylen-Schaums (PE) mit dem eines Metallschaums ($AlCu_4$). Bei gleichem Kurvenverlauf und etwa gleicher Porosität beider Schäume zeigt der Aluminiumschaum eine ca. 30 mal größere Festigkeit.

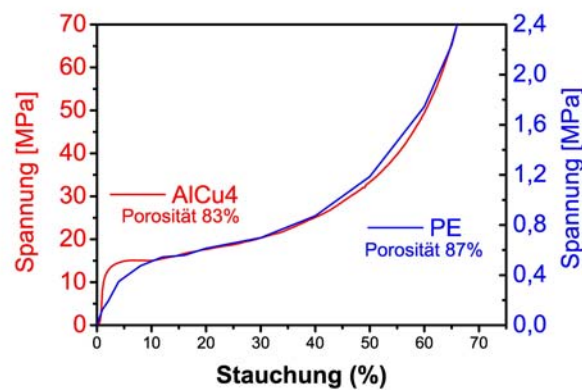


Abbildung 7: Spannungs-Stauchungsdiagramm eines Polyäthylen-Schaumes in Vergleich mit einem Metallschaum gleicher Porosität [1].

Die erhöhte Steifigkeit eines Metallschaumes im Vergleich mit einem Blech gleichen Gewichts rührt von der bekannten Abhängigkeit des Flächenträgheitsmoments J von der Höhe h her: $J \propto h^3$.

So sind z.B. Aluminiumschäume in Plattenform mit Dichten von $\rho=0.6 \text{ g/cm}^3$ (E-Modul 3.5 GPa) ca. 4,5 mal steifer als ein Aluminiumblech und ca. 36 mal steifer als ein Stahlblech gleichen Gewichts. Diese Beziehung gilt natürlich nur für ebene Teile und den homogenen Schaum. Für kompliziertere Formen erhält man modifizierte Steifigkeitserhöhungen.

Anwendungen:

Interessante Anwendungsgebiete metallischer Schäume liegen aufgrund ihrer geringen Dichte sowie ihrer hohen Steifigkeit auf dem Gebiet des Leichtbaus [4,5]. Aufgrund der hohen Festigkeit finden sich weitere Anwendungsbereiche auf dem Gebiet der Energieabsorption. Außerdem führen die mechanischen und thermischen Eigenschaften zu Anwendungen im Bereich der Wärmedämmung, des Brandschutzes sowie der Schwingungsdämpfung. Durch eine Kombination dieser Eigenschaften eröffnen sich, wie in Abbildung 8 skizziert, bifunktionale, bzw. im Idealfall multifunktionale Einsatzgebiete.

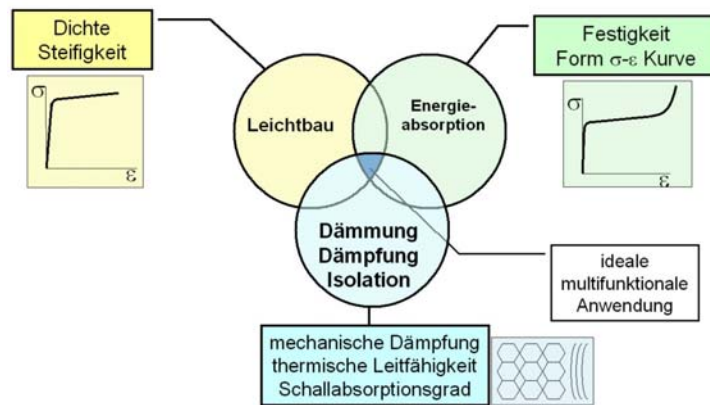


Abbildung 8: Anwendungsbereiche für Metallschäume. Im Idealfall lassen sich durch Kombination der Eigenschaften multifunktionale Anwendungen finden [1].

Flach ausgewalzte Bleche aus aufschäumbarem Halbzeug können z.B. zu Plattenmaterial aufgeschäumt werden (siehe Abbildung 8, links). Eine Formgebung des Ausgangsmaterials vor dem Schäumen führt dabei zu dreidimensional geformten Sandwichstrukturen. Dadurch werden, ebenso wie beim Ausschäumen von Hohlprofilen (Abbildung 8, rechts), hohe Steifigkeiten bei gleichzeitig geringem Gewicht und eine verbesserte Energieaufnahme erreicht.

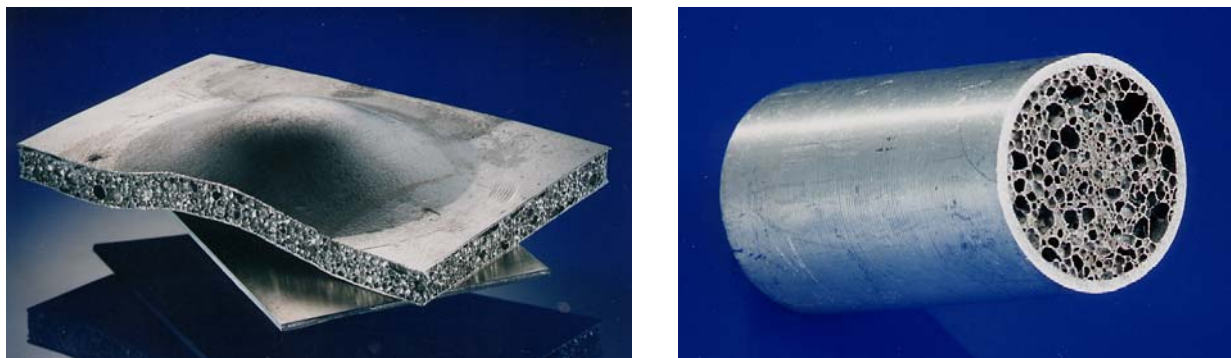


Abbildung 9: Anwendungsbeispiele für Metallschäume, hergestellt nach dem pulvermetallurgischen Verfahren [1]. Links: Sandwichstruktur als Alternative zur massiven, deutlich schwereren Metallplatte. Rechts: Ein Hohlzylinder wurde zur Erhöhung der Festigkeit mit Metall ausgeschäumt. (Fraunhofer Studiengesellschaft Stahlanwendungen)

Relativ komplexe, endformnahe Bauteile können z.B. hergestellt werden, indem entsprechend gestaltete Hohlformen ausgeschäumt werden. Der expandierende Schaum füllt den Hohlraum hierbei völlig aus. Die Außenhaut der Schaumteile ist in diesen Fällen geschlossen.

Einsatzgebiete für bi- bzw. multifunktionale Anwendungen, basierend auf den guten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Metallschäume sowie der erheblichen Gewichtsreduzierung, wären somit z.B. das Ersetzen eines Stahlblechs durch ein Aluminiumschaum-Sandwich (siehe Abbildung 10), die Steifigkeitsoptimierung im EUROK (Abbildung 11) oder die Konstruktion eines Hubarmhalters für einen Kranwagen, dargestellt in Abbildung 12.

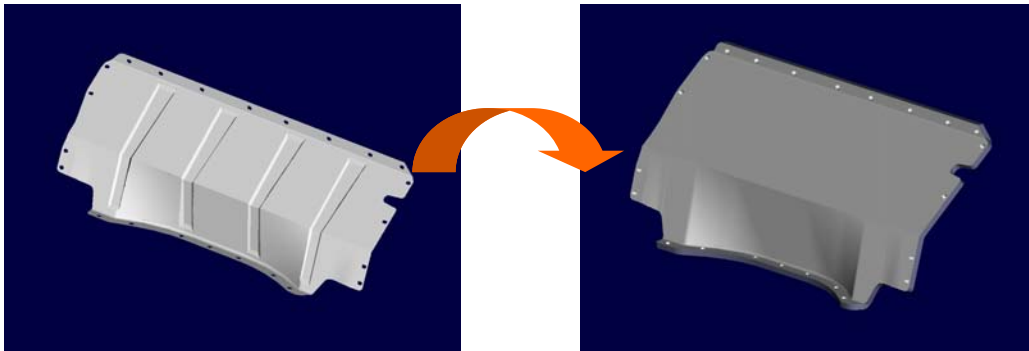


Abbildung 10: Ersetzen eines Stahlblechteils durch Aluminiumschaum-Sandwiches (AFS). Bei einer Gesamtdicke von 8-12 mm und einer Deckschichtdicke von ca. 1 mm erhöht sich dadurch die Steifigkeit um 700% während sich das Gewicht um 25% verringert [6].



Abbildung 11: Steifigkeitsoptimierung im EUROK [6]. Technische Daten: Fahrgestell: 115 kg, Torsionssteifigkeit: 50 KN/° (Fa. Karmann)



Abbildung 12: Hubarmhalter eines Kranwagens. Anwendungsidee basierend auf den Festigkeitseigenschaften und der Steifigkeit metallischer Schäume in Kombination mit einer erheblichen Gewichtsreduzierung [6]. (Fa. Teupen, Fa. ALM)

Strukturuntersuchungen:

Struktur und Eigenschaften metallischer Schäume können mit verschiedenen Methoden charakterisiert werden. Zum einen werden mikroskopische Untersuchungen am Material zur Erfassung physikalischer Daten durchgeführt. So wird z.B. der Einfluss der Ausgangsstoffe sowie der Schäumparameter (d.h. Schäumtemperatur, Pressdruck, Vorbehandlung des Treibmittels u.s.w.) auf die spätere Schaumstruktur erforscht. Zum anderen werden makroskopische Untersuchungen, z.B. Härte-, Energieabsorptions- oder Festigkeitsmessungen, an ganzen Bauteilen vorgenommen.

Zu den angewandten ex-situ Messmethoden an erstarrten, statischen Metallschäumen zählen dabei die Metallographie, die Röntgen-Computertomographie sowie die Neutronen-Kleinwinkelstreuung. In-situ werden Volumenmessungen, Röntgenradioskopiemessungen, Thermoanalysen und Ultraschallcharakterisierungen an flüssigen, sich verändernden Metallschäumen durchgeführt.

Abbildung 13 zeigt das typische Expansionsverhalten eines Metallschaums. Die Proben werden in einer Form aufgeschäumt, ein auf die Probe gerichteter Laserstrahl misst während der Expansion des Schaums die Distanz. Mit dieser makroskopischen Messmethode werden Aussagen über die Schaumstabilität und das maximale Expansionsvermögen ermittelt, welche sich durch die Wahl der Legierung, der Aufheiz- bzw. Abkühlrate, des Treibmittels bzw. dessen Vorbehandlung, der Kompaktierungsparameter sowie des Umgebungsdrucks während des Schäumvorgangs beeinflussen lassen.

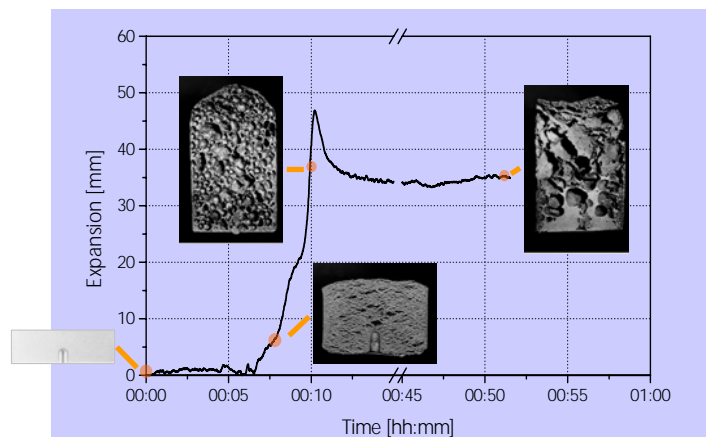


Abbildung 13: Expansionskinetik und Mesostruktur von Aluminiumschaum AA 6061 mit 0.6 Gew.% TiH₂.

Der Einfluss der Abkühlrate auf die Schaumstruktur ist in Abbildung 14 verdeutlicht. Während die Luftabschreckung des Schaums zu einem größeren Dichtegradient zwischen dem Inneren und dem Probenrand führt, kühlt die durch Wasser abgeschreckte Probe schneller, und damit homogener ab, was zu einer gleichmäßigeren Dichteverteilung im Bauteil führt. Außerdem entstehen durch Wasserabschreckung weniger Defekte in den Zellwänden.

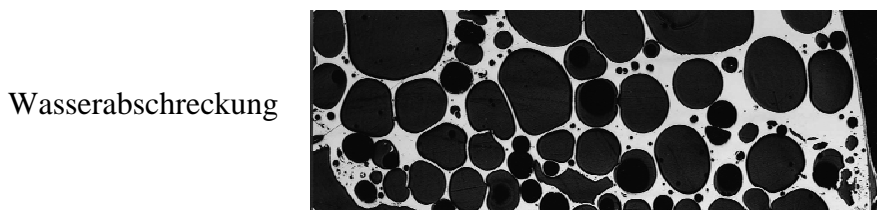
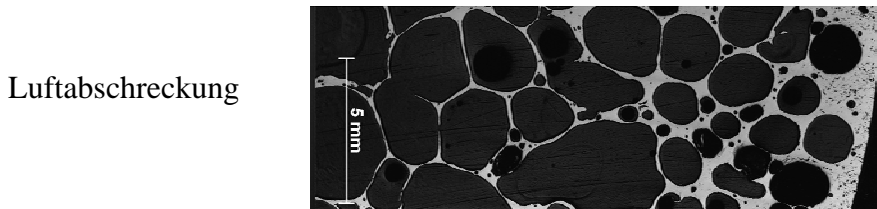


Abbildung 14: Ergebnisse der verschiedenen Abschreckmethoden nach dem Schäumen (F-Quenching) [7].

Ein Schwerpunkt der Grundlagenforschung an Metallschäumen ist die Untersuchung des Materials mittels Computer-Tomographie. Im Gegensatz zu metallographischen Verfahren (Polieren, Schleifen u.s.w.) arbeitet die Tomographie zerstörungsfrei. Sie ermöglicht die dreidimensionale Abbildung der Massenverteilung innerhalb eines Probenkörpers.

Abbildung 15 zeigt die skizzierte Anordnung des Messaufbaus. Die Proben werden in einem drehbar gelagerten Halter durchstrahlt, der Detektor fängt die geschwächte Strahlung als Röntgenbild auf. Nach jeder Einzelmessung rotiert die Probe im Strahl einen kleinen Winkelschritt weiter. Man erzeugt dadurch viele einzelne Radiogramme unter verschiedenen Betrachtungswinkeln. Aus der Vielzahl der so entstandenen Röntgenbilder können mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus, der gefilterten Rückprojektion, die horizontalen Schnittebenen durch das Objekt rekonstruiert werden [8].

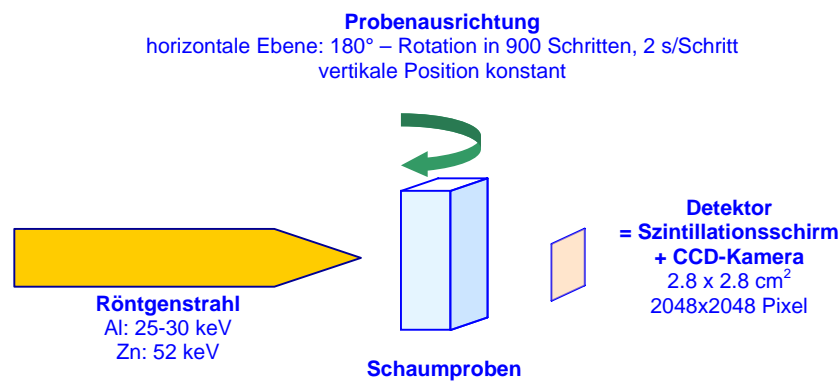


Abbildung 15: Skizze des Messprinzips der Tomographie. Die monochromatische Röntgenstrahlung durchdringt die Probe und wird dabei teilweise absorbiert. Der transmittierte Anteil der Strahlung wird mit Hilfe eines Fluoreszenzschirms in sichtbares Licht umgewandelt und auf eine CCD-Kamera gelenkt.

Die 3D-Rekonstruktion eines Zinkschaums sowie eine ausgewählte Schnittebene des Tomogramms sind in Abbildung 16 dargestellt. Mittels solcher tomographischer Aufnahmen kann die Struktur eines Schaums mit den darin enthaltenen Defekten dreidimensional qualitativ und quantitativ untersucht werden.

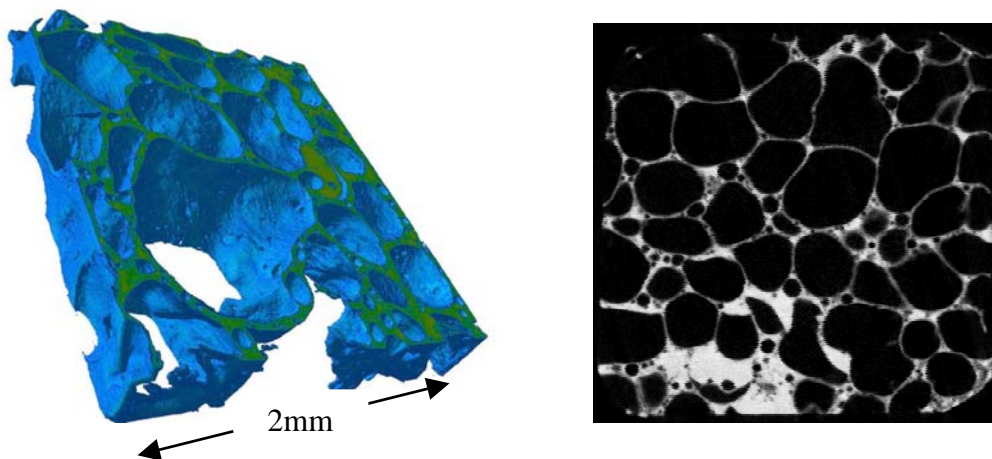


Abbildung 16: 3D-Visualisierung sowie Schnittebene durch das Tomogramm eines Zinkschaums. Die Aufnahmen entstanden am Berliner Synchrotronspeicherring BESSY.

So lässt sich mittels Tomographie z.B. die Porengrößenverteilung sowie die dreidimensionale Lamellendickenverteilung metallischer Schäume messen und berechnen. Auch die Isotropie der Porenform in Abhängigkeit von den Pressparametern kann untersucht werden. Weiterhin erhält man Aussagen über die Korrelation zwischen Größe und Lage der Treibmittelpartikel bezüglich der Porengröße bzw. der Lage der Poren. Außerdem kann z.B. die Anordnung schaumstabilisierender Partikel auf den Porenoberflächen verfolgt werden.

Zusammenfassung:

Die beschriebenen Schäumverfahren sind mittlerweile soweit ausgereift, dass eine industrielle Umsetzung näherückt. Der Großteil der Anwendungsideen für Metallschaum lässt sich dabei in 3 Anwendungsfelder unterteilen: Leichtbau-, Energieabsorptions- und Dämmungsanwendungen. Wir beschäftigen uns mit der mikrostrukturellen Untersuchung des Schäumprozesses und der Verbesserung der makroskopischen Eigenschaften von Metallschäumen auf der Suche nach Wegen, bestehende Herstellungsverfahren zu optimieren.

Literatur:

- [1] J. Banhart, *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*, Progress in Material Science 46, S. 559-632 (2001)
- [2] M. F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, *Metal Foams – A design guide*, Butterworth-Heinemann (2000)
- [3] H. Stanzick, M. Wichmann, J. Weise, L. Helfen, T. Baumbach, J. Banhart, *Process Control in Aluminium Foam Production Using Real-Time X-Ray Radioscopy*, Advanced Engineering Materials 4, p. 814-823 (2002)
- [4] J. Banhart, J. Baumeister, A. Melzer, W. Seeliger, M. Weber, *Aluminiumschaum-Leichtbaustrukturen für den Fahrzeugbau*, Sonderausgabe ``Werkstoffe im Automobilbau`` der ATZ/MTZ 98/99
- [5] J. Banhart, J. Baumeister, O. Irretier, J. Jöbstl, *Wirtschaftliche Fertigungstechniken für die Herstellung von Aluminiumschäumen*, Aluminium, Januar (2000)
- [6] W. Seeliger, in *Cellular Metals and Metal Foaming Technology II*, Eds: J. Banhart, N.A. Fleck, A. Mortensen, MIT-Verlag Berlin, p. 5 (2003)
- [7] D. Lehmhus, C. Marschner, J. Banhart, H. Bomas, *Influence of heat treatment on compression fatigue of aluminium foams*, Journal of Materials Science 37, p. 3447-3451 (2002)
- [8] W. A. Kalender, *Computed Tomography*, Publicis MCD Verlag, S. 22 (2000)