

# INNOVATIVE WERKSTOFFKUNDE MIT DEM SPIELZEUG AUS DER KINDHEIT

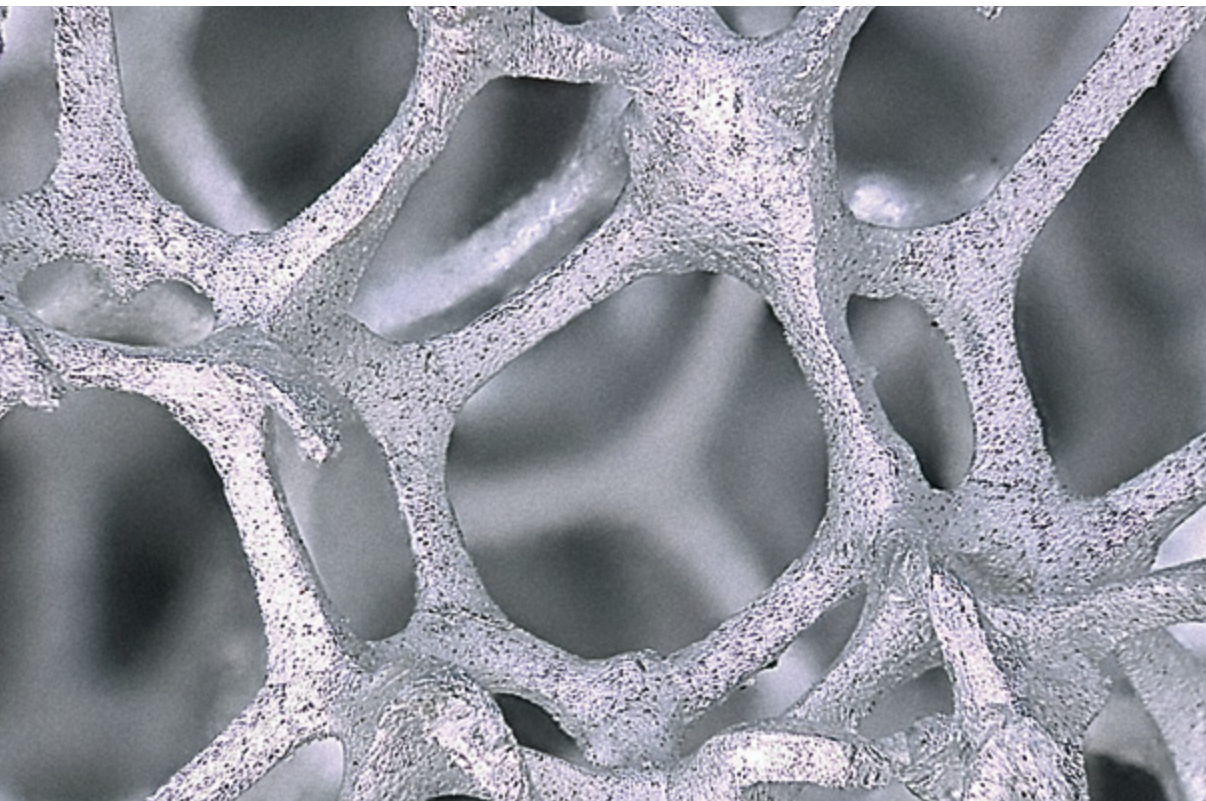
## Wie man von Seifenblasen über die Königsberger Brücken zu effizienten Heizungsanlagen gelangt

*>> von Alexander Martin Matz > Auf der Suche nach innovativen Lösungen treibt es den Ingenieur nicht selten in die Verkomplizierung bestehender Entwicklungen. Doch gerade in eher absurd anmutenden Ideen steckt das große Potential von Innovationen.*

Im Laufe der Evolution wurden biologische Materialien speziell auf deren jeweilige Anwendung von der Natur optimiert. In Flora und Fauna finden sich unzählige Beispiele, die sich exemplarisch durch Holz, Knochen, Zähne etc. ausdrücken lassen. Inspiriert von diesen Bauprinzipien können wichtige Erkenntnisse über Eigenschaften und Funktionen auf materialwissenschaftliche und – allgemein – auf ingenieurtechnische Fragestellungen projiziert werden.

Im Gegensatz zu vielen hochkomplexen technischen Entwicklungen, die sich aus einer großen Anzahl unterschiedlicher Grundstoffe zusammensetzen, ist es der Natur möglich, durch einen gezielt strukturierten Aufbau mit relativ wenigen Grundelementen auszukommen. Mitunter ist dies darauf zurück zu führen, dass biologische Materialien als dynamisch einzustufen sind, indem sie wachsen und sich stetig regenerieren. Von Menschen geschaffene Entwicklungen zeigen sich dagegen als eher statisch und müssen meist eine hohe Lebensdauer aufweisen.<sup>1</sup>

In den Ingenieurwissenschaften – insbesondere mit Fokus auf die außerordentlich wichtige Grundlagendisziplin der Werkstoffkunde – lässt sich eine solch dynamische Entwicklung zwar weitgehend (noch) nicht realisieren, aber für den entsprechenden Belastungsfall lohnt sich eine Orientierung an biologischen Materialien, die dem gleichen Belastungsfall unterliegen. So kann eine dynamisch generierte Struktur zur optimalen Erfüllung der gegebenen Randbedingungen auf eine Konstruktion aus statischen Werkstoffen übertragen werden, wodurch sich häufig ungeahnte Möglichkeiten eröffnen.



*Aufnahme der makroskopischen Struktur eines 20 ppi Aluminiumschaums (50-fach vergrößert)  
Foto: Egon Drotlef*

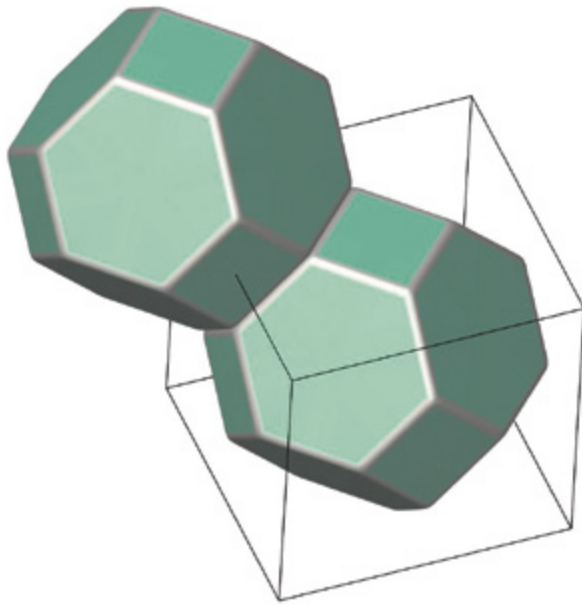


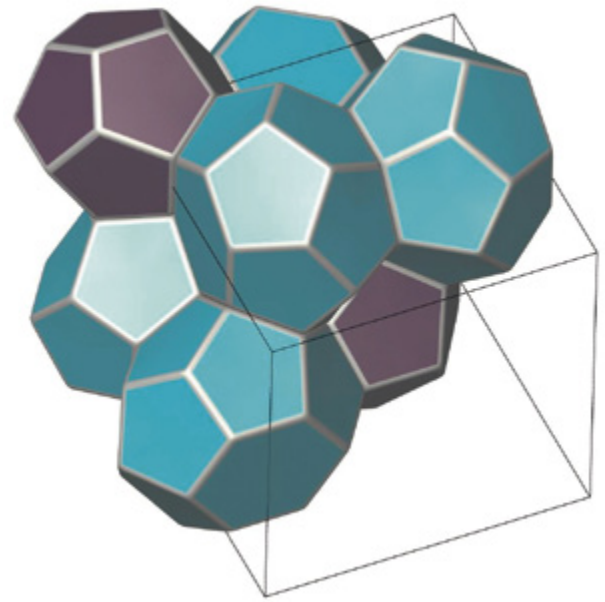
Abb. links:  
Vereinfachter Kelvin-Schaum in der  
Einheitszelle (erstellt mit Software „Gavrog 3dt“)  
Grafik: Alexander Martin Matz

Abb. links:  
Weaire-Phelan-Schaum in der Einheitszelle  
(erstellt mit Software „Gavrog 3dt“)  
Grafik: Alexander Martin Matz

All diese biologischen Materialien stützen sich auf einen zellulären Aufbau. Dieser offenbart z.B. bei Holz und Knochen hervorragende Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Biegesteifigkeit bei geringem Gewicht.<sup>2</sup> Ein weiteres Beispiel sind Honigbienenwaben, die aufgrund ihrer regelmäßigen Anordnung und Geometrie zu einer hohen Anzahl an separierten Zellen führen, die auf einer Oberfläche den Raum in optimaler Weise ausnutzen.

Die physikalischen Zusammenhänge eines zellulären Aufbaus können sehr gut an Seifenblasen veranschaulicht werden, und wohl die meisten Menschen wurden dadurch im Laufe ihrer Kindheit zu einer dynamischen Generierung angeregt. Die hierzu benötigten Hilfsmittel sind ein Blasring, Wasser, Seife und etwas Puste. Das resultierende Produkt sind Seifenblasen. Eine Aneinanderreihung mehrerer einzelner Seifenblasen führt zu einem Seifenblasenschaum, wobei die dynamische Generierung der optimalen Struktur mit bloßem Auge beobachtet werden kann. Zurückzuführen ist dies auf die Oberflächenspannung des Seifenfilms, die ein Minimum anstrebt, und einen möglichst guten Druckausgleich der Luft im Seifenblaseninneren gegenüber der Umgebung.

Die beiden beachtenswerten Hauptmerkmale eines solchen Seifenblasenschaums sind zum einen die verhältnismäßig hohe Festigkeiten bei sehr geringer Masse und die sehr geringe Oberfläche des Seifenblasenfilms in Bezug auf die Seifenblasenvolumina. Daraus lassen sich bisher weitgehend unbeachtete Eigenschaften zur Optimierung unterschiedlichster Anwendungen von Schaumstrukturen ableiten.



### Die Geschichte des Schaums

Die Schaumforschung ist vorrangig geprägt worden durch Wissenschaftler aus dem Fachgebiet der Mathematik. Erst im Laufe des vergangenen Jahrzehntes wurden allmählich Physiker und Ingenieure darauf aufmerksam. Bisher ist es allerdings immer noch ein weitgehend unbearbeitetes Forschungsfeld.

Die Anfänge der Schaumforschung gehen zurück auf das Jahr 1873, als der belgisch-wallonische Physiker J. A. F. Plateau seine ersten Arbeiten zu diesem Thema veröffentlichte.<sup>3</sup> Er setzte den Grundstein für die Wissenschaft des Schaums, indem er die Grundlagen in zwei umfangreichen Buchbänden beschreibt. Inspiriert davon, nahm sich Sir W. Thomson (später Lord Kelvin) in den folgenden Jahren des Themas an und versuchte eine Schaumstruktur zu finden, bei der die Blasen ein Optimum hinsichtlich der Packungsdichte erreichen. Die Packungsdichte beschrieb er durch den Quotienten aus der Oberfläche des Flüssigkeitsfilms zum Luftvolumen des Schaums und präsentierte seine Ergebnisse im Jahre 1887. Das Tetrakaidekaeder mit gekrümmten Kanten kürte er als das Optimum.<sup>4</sup> Lange Zeit wurde dies als die optimale Struktur angesehen, und so beschäftigten sich viele hochrangige Wissenschaftler der Mathematik, Chemie und Biologie mit dieser Thematik und zeigten die zahlreichen Zusammenhänge zwischen Schäumen und Gitteranordnungen von Atomen sowie den Zellanordnungen in biologischem Gewebe auf. Angelehnt an diese Korrelationen orientierte man sich nun an natürlichen Strukturen, wodurch es den beiden Physikern D. Weaire und R. Phelan im Jahre 1994, also erst 107 Jahre nach Kelvin's These, gelang, eine noch optimaler gepackte Schaumstruktur zu beschreiben.<sup>5</sup> Die faszinierende architektonische Umsetzung dieser Struktur ist an der Olympia-Schwimmhalle in Peking zu bewundern.

Das heutige Bestreben liegt vorrangig darin, wie es bereits Weaire und Phelan zeigten, sich in der Natur vorkommende Strukturen mit besonderen Eigenschaften herauszugreifen und die Geometrie auf die für den Menschen nützlichen Anwendungen zu projizieren. Genau hier setzt auch das Bemühen der relativ neuen kleinen Forschungsgruppe zu dieser Thematik im Bereich Werkstoffentwicklung und -prüfung an der Hochschule Pforzheim an. >

## Schäume für technische Anwendungen

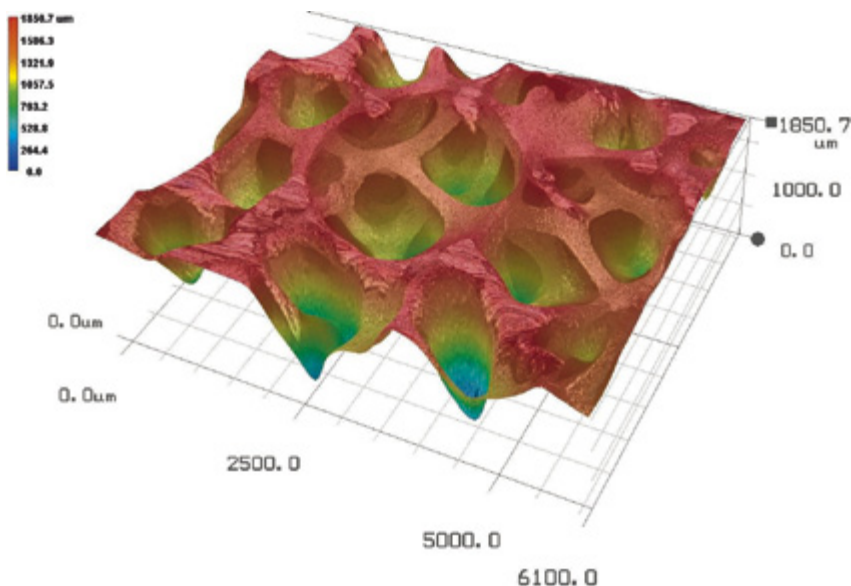
Seit den neunziger Jahren besteht auch in den Ingenieurwissenschaften ein reges Interesse an metallischen Schäumen. Allerdings handelt es sich bisher vorrangig um sogenannte geschlossenporige Metallschäume. Diese Gattung ist ein geschäumtes Metall, das man als Festkörper mit einer hohen Anzahl an gewollten Lunkern bzw. Poren in Form von nicht miteinander in Verbindung stehenden Gasblasen beschreiben kann. Bei diesen Werkstoffen liegt der Fokus auf tragenden Leichtbaustrukturen zur Aufnahme von kinetischer Energie, zur Dämpfung von mechanischen und akustischen Schwingungen oder zur Temperaturisolierung.<sup>6</sup>

Eine weitere Art von metallischen Schäumen, die erstaunliche Eigenschaften haben und Forschungsschwerpunkt an der Hochschule Pforzheim sind, sind die sogenannten offenporigen Metallschäume. Bei diesen Schäumen beträgt der Gasblasenanteil im Material > 75%,<sup>7</sup> wodurch sich die Blasen nicht in Form von Kugeln, sondern in Form von Polyedern (vgl. die Abbildungen zu Kelvin- und Weaire-Phelan-Schaum) ausbilden. So kommt es dazu, dass sich die Flächen der benachbarten Polyeder berühren und miteinander verbundene Poren zu einer offenporigen Struktur führen.

Diese Struktur ähnelt natürlichem Knochengewebe und weist bei sehr geringer Masse bemerkenswerte mechanische Festigkeiten auf. Darüber hinaus kann der Metallschaum durch seine Offenporigkeit von gasförmigen oder flüssigen Medien durchströmt werden, die durch das Metallgeflecht verwirbelt werden und so für viele strömungstechnische Anwendungen sehr interessant sind. Weiterhin erlaubt die große Oberfläche in Verbindung mit der guten Wärmeleitfähigkeit eines entsprechend ausgewählten Metalls oder einer Metalllegierung eine sehr gute Übertragung großer Wärmemengen und eignet sich dadurch ideal für kälte-, klima- und lufttechnische Anwendungen. Zu weiteren potentiellen Anwendungen zählen z.B. Crashabsorber, Dämpfungselemente, Katalysatorträger, Filter, Elektrodenmaterialien, Implantate etc., wodurch das ungeheuer große Potential dieser Werkstoffgruppe deutlich wird.

3D-Topographie-Analyse eines 40 ppi Aluminiumschaums

Foto: Egon Drotleff



## Die optimale Schaumstruktur im Ingenieurwesen

Bei allen bisher durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen, die sich mit den einzelnen oben genannten Anwendungen beschäftigen, ist das prinzipielle Vorgehen, dass ein vorliegender offenporiger Metallschaum als ein vorgegebenes Bauteil zum Einsatz kommt und dessen Struktur als unveränderbar betrachtet wird. Das Bestreben liegt darin, eine möglichst optimale Umgebung für den Metallschaum zu konzipieren, um die Anwendung möglichst gut zu erfüllen.

Eine andere – fast als entgegengerichtet einzustufende – Vorgehensweise, die die Forschergruppe der Hochschule Pforzheim beschreitet, ist die, potentiell geeignete Anwendungen zu eruieren und dafür den optimalen Metallschaum zu erzeugen. Dies ist im Prinzip vergleichbar mit der traditionellen Schmuckherstellung; es handelt sich um ein modifiziertes Feingussverfahren auf dem Prinzip der verlorenen Form. Das Ausgangsmaterial bildet ein offenporiger Kunststoffschaum, wie er z.B. in der Aquaristik als Teichfilter verwendet wird. Der Kunststoff wird mit einer feuerfesten Masse umgossen und nach Trocknung in einem Muffelofen ausgebrannt. Die so hergestellte Form wird mit flüssigem Metall ausgegossen. Nach Erstarrung des Metalls wird der Formstoff entfernt und der Metallschaum liegt in seiner endgültigen Form vor.

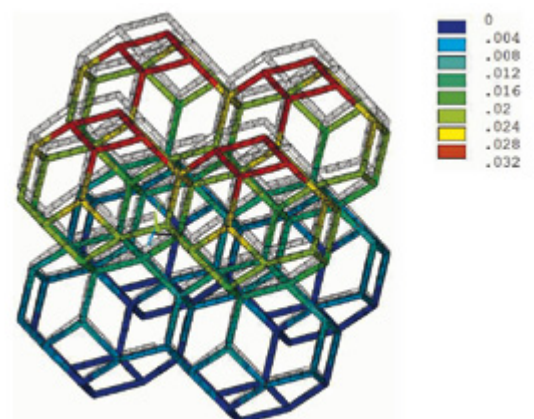
Dieses Herstellungsverfahren ermöglicht es prinzipiell, metallische Schäume in unterschiedlichster Porosität, Porengröße und Metallstegdicke zu erzeugen. So kann bedarfsgerecht das für die Anwendung gewünschte Bauteil hergestellt werden. Allerdings sind die physikalischen Eigenschaften solcher zellulären Strukturen bis dato nur im Ansatz erforscht. Dies und das Bestreben, Anwendungen mit optimalen Eigenschaften hinsichtlich der Funktionalität zu konstruieren, gibt der Forschergruppe der Hochschule Pforzheim den Anreiz, die geometrischen und physikalischen Eigenschaften von offenporigen zellulären Strukturen im Einzelnen zu ergründen und Korrelationen aufzuzeigen.

Einen wichtigen Beitrag hierzu leistet der Forschungsschwerpunkt CCMSE (Center of Computational Materials Science and Engineering). Im Rahmen dieser Tätigkeiten werden 2D-Gefügebildungen in definierten sehr geringen Tiefenabständen von offenporigen Metallschäumen unterschiedlicher Strukturen erstellt. Die einzelnen so genannten Tiefenschnitte

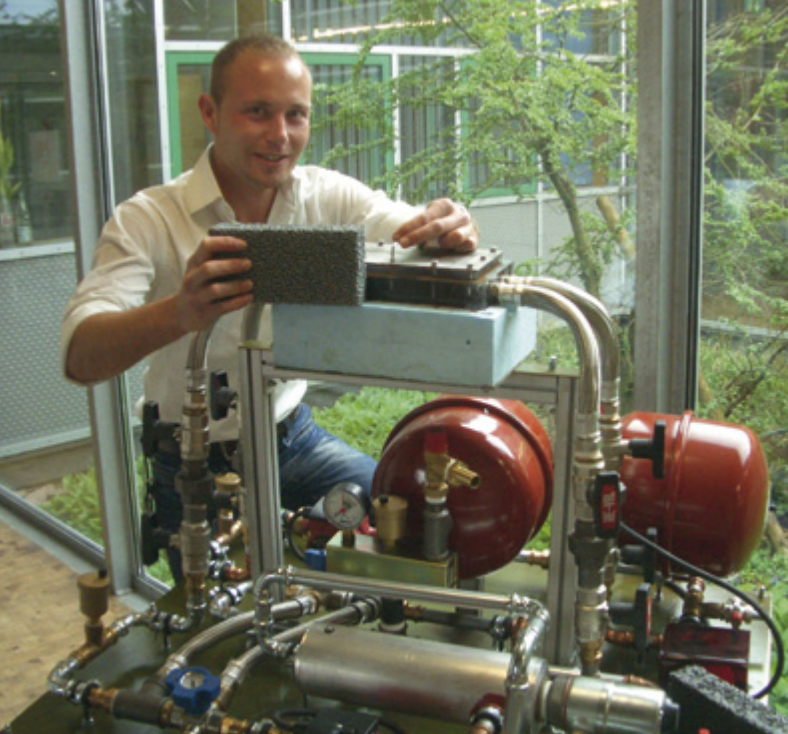
FEM-Analyse eines vereinfachten

Kelvin-Schaums (erstellt mit Software „ANSYS“)

Grafik: Thomas Hiller







Alexander M. Matz bei der Vorbereitung eines Experiments mit einem Metallschaum am Wärmeübertragungsprüfstand.  
Foto: Daniel Müller

durch den Metallschaum dienen als eine Grundlage zur statistischen Auswertung des makroskopischen Gefüges und bilden ein ideales Gerüst zur Generierung von 3D-Simulationsmodellen.

Des Weiteren läuft seit Juli dieses Jahres ein durch die Landesstiftung Baden-Württemberg finanziertes Forschungsprojekt, bei dem der Fokus auf der theoretischen und experimentellen Ermittlung der Zusammenhänge zwischen geometrischen und davon abhängenden thermischen Eigenschaften liegt. In enger Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern werden offenporige Metallschäume mit unterschiedlichen makroskopischen Strukturen erstellt, die in verschiedenen Prüfstands-Einrichtungen auf ihre thermischen Eigenschaften untersucht werden. Als Grundlage zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften und der unterschiedlichen morphologischen Kenngrößen werden diese offenporigen Metallschäume mittels 3D-Mikroskopie und Computertomographie grafisch erfasst. Die geometrische Charakterisierung erfolgt Software-unterstützt. Die hierbei angewandten Methoden basieren auf der Graphentheorie und der kombinatorischen Topologie, die sich auf die Arbeiten von L. Euler aus dem 18. Jahrhundert zum Königsberger Brückenproblem stützen. Die Aufgabe bestand seinerzeit darin, die sieben Pregelbrücken nacheinander zu überschreiten, ohne eine von ihnen zweimal zu passieren. Fundamental für alle Tätigkeiten sind auch seine daran anknüpfenden Erkenntnisse zu diesem Themengebiet, wie z.B. dem Euler'schen Polyedersatz<sup>8</sup>.

Das Ziel des Forschungsprojektes ist es, optimierte Wärmetauscher aus den gewonnenen Erkenntnissen für unterschiedliche Heizungsanlagen durch den Einsatz angepasster offenporiger Metallschäume zu erreichen.

## Ausblick

Weitere Untersuchungen sind zu den mechanischen und verfahrenstechnischen Eigenschaften von offenporigen Metallschäumen geplant, wozu experimentelle und theoretische Ansätze in Verbindung mit Simulationen verwendet werden. Ein detaillierter Vergleich zwischen realen Metallschaum-Gefügen und idealisierten Modellen soll Wege aufzeigen, um einen noch größeren Einfluss auf die Strukturparameter bei der Herstellung nehmen zu können. Neben diesen Tätigkeiten soll das Herstellungsverfahren selbst in enger Kooperation mit dem Industriepartner m-pore GmbH Dresden weiter optimiert werden.

Aktuell wird vom Werkstoffteam der Hochschule Pforzheim ein höchst interessantes Anwendungsgebiet für die offenporigen Metallschäume im Bereich der Medizintechnik verfolgt. In ersten Voruntersuchungen wurden bereits die geeigneten medizinischen Teilbereiche eruiert.

Zukünftig soll es möglich sein, nach Vorgabe gewisser Funktionalitätseigenschaften einer Anwendung durch den Kunden angepasste Metallschaumstrukturen zu schaffen, wodurch die gegebenen Anforderungen in optimaler Weise erfüllt werden.

Dazu soll sukzessive eine umfangreiche Datenbank entstehen. Optimale Schaumstrukturen für definierte Eigenschaften können dann als Datensatz ausgegeben werden, so dass der Hersteller die Wünsche des Kunden nach dem optimalen Schaumbauteil erfüllen kann.

### Dipl.-Ing. (FH) Alexander Martin Matz

forscht als wissenschaftlicher Mitarbeiter auf dem Gebiet der offenporigen zellulären Werkstoffe am Institut für Angewandte Forschung.

## Literatur:

- <sup>1</sup> Fratzl, P.  
**Von Knochen, Holz und Zähnen.**  
In: Physik Journal 1 (2002), Nr. 1, [S. 49–55].
- <sup>2</sup> Gibson, L. J. / Ashby, M. F.  
**Cellular Solids : Structure & Properties.**  
Oxford 1988.
- <sup>3</sup> Plateau, J. A. F.  
**Statique Expérimentale et Théorique des Liquides soumis aux seules Forces Moléculaires.**  
Paris 1873.
- <sup>4</sup> Thomson, W.  
**On the division of space with minimum partial area.**  
In: Philosophical Magazine 24 (1887), Nr. 5, [S. 50].
- <sup>5</sup> Weaire, D. / Phelan, R.  
**A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces.**  
In: Philosophical Magazine Letters 69 (1994), Nr. 2, [S. 107–110].
- <sup>6</sup> Hipke, Th. / Lange, G. / Poss, R.  
**Taschenbuch für Aluminiumschäume.**  
Düsseldorf 2007.
- <sup>7</sup> Wilson, A. J. (Hrsg.)  
**Foams: Physics, Chemistry, and Structure.**  
London 1989.
- <sup>8</sup> Brief von Euler, L. an Goldbach, Ch.  
Berlin, 14. Nov. 1750. Moskau: Central'nyj Gosudarstvennyj Arxiv drevnix aktov [f. 181, Nr. 1413, č IV, l. 142–143]