

Herstellung und Eigenschaften syntaktischer Metallschäume mit unterschiedlichen Matrix- und Füllmaterialien

Einfluss unterschiedlicher Matrix- und Füllmaterialien auf die mechanischen Eigenschaften des syntaktischen Schaums (Teil 2)

O. Huber, H. Klaus, R. Dallner, F. Bartl, K. Eigenfeld, B. Kovacs, M. Godehardt

Im Rahmen des Forschungsprojektes IMVAL (Innovative Mineral-schaum Verbund Applikationen für den Leichtbau) untersuchen und entwickeln das Kompetenzzentrum Leichtbau an der Fachhochschule Landshut, das Institut für angewandte Forschung an der FH Ingolstadt, das Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, ITWM, Kaiserslautern und das Gießerei-Institut an der TU Bergakademie Freiberg sowie acht international ausgezeichnete Industriepartnern neuartige syntaktische Schäume.

Im ersten Teil des Artikels wurden die Materialkomponenten und das Herstellungsverfahren sowie die grundlegenden Materialeigenschaften eines auf der Basis von Mineral-schaumgranulat und Aluminium-

matrix hergestellten zellularen Verbundwerkstoff vorgestellt.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss unterschiedlicher Matrix- und Füllmaterialien auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffes dargestellt. Dabei werden das Verformungsverhalten unter einaxialer Druckbeanspruchung, das Energieabsorptionsvermögen und der Elastizitätsmodul der Verbundmaterialien untersucht. (Verfasser: Prof. Eigenfeld und Dipl.-Ing. Kovacs)

Für die Entwicklung eines Finite Elemente Mesomodels [1] des zellularen Verbundwerkstoffes an der FH

Landshut musste Aufbau des Materials charakterisiert werden. Mittels konventioneller Verfahren kann nur die Außenstruktur des Materials vermessen werden. Auf Grund der Vielzahl der Messpunkte ist dieser Aufwand sehr groß. Die dreidimensionale Computertomographie hingegen ermöglicht eine komplexe, zerstörungsfreie Untersuchung des Werkstoffes bezüglich seiner Innenstruktur und liefert sichere Daten für Simulationsrechnungen.

Aus den durch Mikro-Computertomographie gewonnenen Volumenbildern werden Basis-Kennzahlen gewonnen, die die Mikrostruktur des Werkstoffes charakterisieren. Auf diese Charakteristika und die abgeleiteten Kenngrößen für die Granulat Körner und den Verbundwerkstoff wird im zweiten Teil dieses Artikels eingegangen. Es werden dann die projektspezifischen Herausforderungen an die Bildverarbeitung und die Ergebnisse am Beispiel eines Verbundwerkstoffes dargestellt. (Verfasser: Dipl.-Inform. Michael Godehardt)

»Das Energieabsorptionsvermögen kann im einaxialen Druckversuch bestimmt werden«

Summary

In the introductory section of the article constituents of the material and the method of manufacture, together with the basic properties of a composite cellular material, made primarily from mineral foam granulate and an aluminium matrix is disclosed.

In this study the influence of differing matrix materials and fill materials affecting the physical properties of the composite is depicted. In so doing, the characteristics of deformation of the composite when subjected to a unilateral axial stress load, plus the capacity of the material to absorb energy, to-

gether with the modulus of elasticity of the material are examined.

Using three-dimensional imaging, attained by microcomputer tomography, basic magnitudes are acquired, which characterise the microstructure of the material.

These characteristics, the derived magnitudes for the granulate, together with the composite material are also dealt with in detail in this contributing article. The challenges in processing the images specific to the project are then represented, and the results depicted by way of an example of a given composite material.

Prof. Dr. Otto Huber und Dipl.-Ing. (FH) Hubert Klaus, Kompetenzzentrum Leichtbau, Fachhochschule Landshut
Prof. Dr. Rudolf Dallner und M. Sc. Dipl.-Ing. (FH) Florian Bartl, Institut für angewandte Forschung, Fachhochschule Ingolstadt
Prof. Dr. Klaus Eigenfeld und Dipl.-Ing. Balazs Kovacs, TU Bergakademie Freiberg, Gießerei-Institut
Dipl.-Inform. Michael Godehardt, Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), Kaiserslautern

Verformungsverhalten mit unterschiedlichen Matrix- und Füllmaterialien

Für die Charakterisierung des Einflusses unterschiedlicher Materialkombinationen auf das Verformungsverhalten wurden einaxiale Druckversuche unter gleichen Bedingungen und mit annähernd gleicher Porengröße durchgeführt. Es wurden Probekörper mit einer Geometrie von $40 \times 40 \times 45 \text{ mm}^3$ verwendet und mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min belastet.

Typische Spannungs-Dehnungskurven sind in Bild 1 dargestellt. Diese Versuche wurden an der FH Landshut durchgeführt. Die Werte für Dichte und Druckfestigkeit sind in Tafel 1 zusammengefasst. Anhand der Ergebnisse sind folgende Einflüsse angesichts der verwendeten Füllmaterialien feststellbar:

- Durch Verwendung von Eisenhohlkugeln ist eine Verbesserung der Druckfestigkeit festzustellen.
- Der Übergang zwischen linear-elastischem und plastischem Materialverhalten erfolgt bei beiden Füllmaterialien unterschiedlich. Bei mit Eisenhohlkugeln erzeugten Probekörpern wird dieser Bereich von dem allmählichen Aufbau einer makroskopischen Nichtlinearität gekennzeichnet, was auf örtliche plastische Deformationen zurückzuführen ist. Probekörper mit KeraBims Granulat 1 bis 2 mm weisen eine annähernd lineare Deformation bis zu dem ersten Höchstwert der Druckspannung auf. Einem abrupten Spannungsabfall folgt der Bereich der plastischen Verformung.
- Anhand des Verlaufs der Spannungskurven während der plastischen Verformung ist ein deutlicher Unterschied zu bemerken. Während sich bei KeraBims Granulat immer (siehe auch Bilder 5 bis 7 im Teil1) ein relativ konstantes Plateau ausbildet, zeigt der Verlauf bei Eisenhohlkugeln regelmäßige Schwankungen. Dieser Effekt ist auf eine unterschiedliche Verformungsmechanik zurückzuführen. Bei Verbundwerkstoffen mit KeraBims Granulat findet neben einer Verfestigung des Matrixmaterials eine Entfestigung des Mineralschaumgranulats durch Schädigung statt. Beide Effekte

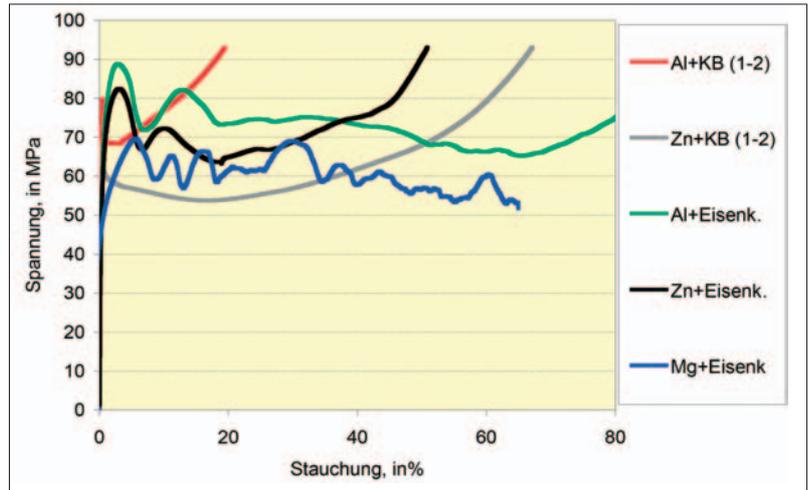


Bild 1. Übersicht Spannungs-Stauchung Diagramme mit unterschiedlichen Materialkombinationen

wirken gegensätzlich und ergeben ein im Allgemeinen gleiches Spannungsniveau. Dahingegen versagt das Material mit Eisenhohlkugeln bei einer fortschreitenden Stauchung schichtweise. Das Versagen der jeweiligen Schichten ist anhand des Spannungsverlaufes als Abfall nachvollziehbar.

Energieabsorptionsvermögen

Das Energieabsorptionsvermögen des Verbundwerkstoffes kann im einaxialen Druckversuch bestimmt werden. Die absorbierte Energiemenge entspricht dem Integral aus Kraft mal dem Verformungsweg bzw. dem Integral aus Druckspannung mal der Dehnung.

Um unterschiedliche Materialien

vergleichen zu können wurde die spezifische Energieabsorption dargestellt.

Bild 3 veranschaulicht die Abhängigkeit der volumenspezifischen Energieabsorption von dem verwendeten Granulatdurchmesser im Gusszustand. Das Diagramm zeigt den erwarteten Verlauf. Da sich bei dem einaxialen Druckversuch im plastischen Bereich ein nahezu waagerechtes „Plateau“ gebildet hat, verhält sich die absorbierte Energie über der Stauchung beinahe linear-proportional. Das unterschiedliche Spannungsniveau der einzelnen Fraktionen im Plateaubereich bewirkt unterschiedliche Anstiege der Kurvenabläufe. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, den Verbundwerkstoff den Anforderungen

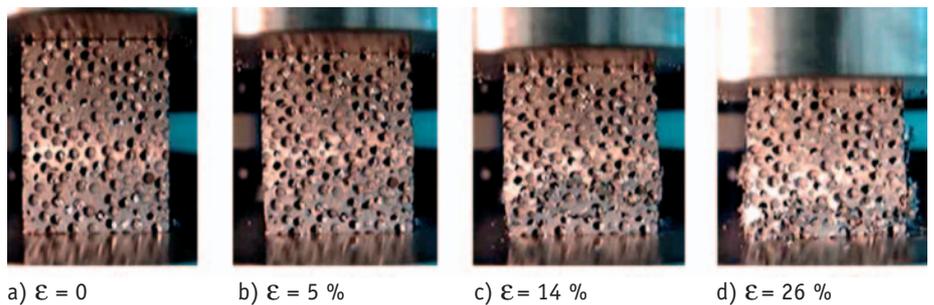


Bild 2. Stauchversuch AZ-91 – Eisenhohlkugeln

Tafel 1. Ergebnisse der Druckversuche mit unterschiedlichen Materialkombinationen

Matrixmaterial	AlSi7Mg(veredelt)		ZnAl4Cu1		AZ-91
Füllmaterial	KB (1-2)	Eisenk.	KB (1-2)	Eisenk.	Eisenk.
Rohdichte in g/cm^3	1,5	1,5	3,3	3,2	1,1
Druckfestigkeit in MPa	63	88	72	80	69
Spez. Druckfestigkeit in $\text{MPa}/(\text{g/cm}^3)$	42	58,6	21,8	25	62,7

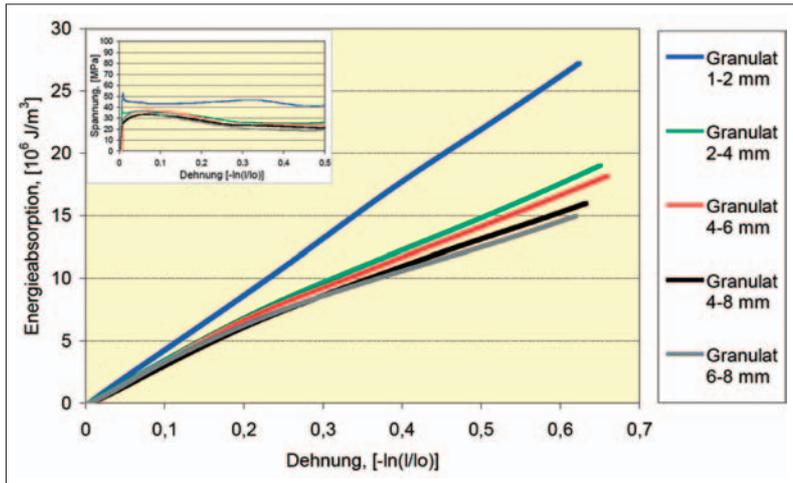


Bild 3. Energieabsorptionsvermögen von AlSi7Mg-KeraBims-Granulat (Probegeometrie $\varnothing 77\text{mm} \times 77\text{mm}$, Aluminiummatrix im Gusszustand)

anzupassen. Dementsprechend ist z. B. eine Energieabsorption von 10 GJ/m^3 entweder mit einer Granulatfraktion 1 bis 2 mm und 23 % Stauchung mit einer Maximalspannung von 54 MPa erreichbar oder mit einer Granulatfraktion 6 bis 8 mm und 37 % Stauchung, wobei die Druckbelastung während der Verformung den Wert von 33 MPa nicht übersteigt.

Bild 4 stellt die Abhängigkeit der volumenspezifischen Energieabsorption von dem Gefügestand des Matrixmaterials dar. Entsprechend dem Ergebnis der einaxialen Druckversuche weist der Kurvenverlauf der wärmebehandelten und veredelten Proben die größte Steigung auf. Der Wert der Spannungsspitze am Ende des elastischen Bereiches der wärmebehandelten und

veredelten Probe (80 MPa) wird nach etwa 15 % Dehnung überschritten. Bis dahin wird eine Energieabsorption von 12 GJ/m^3 erreicht. Die wärmebehandelten Proben, bei denen die Schmelze nicht veredelt wurde, verformen sich hingegen bis zu 35 % Stauchung, wobei die Druckbelastung den Wert des ersten Maximums (63 MPa) wieder erreicht.

Der Werkstoff absorbiert ca. 20 GJ/m^3 . Die Energieabsorption zeigt einen nahezu optimalen Verlauf für die im Gusszustand geprüften Proben. Während der Verformung des Gusszustandes wird der Wert des Spannungspeaks nicht wieder erreicht und somit bei 54 MPa Höchstspannung über 25 GJ/m^3 absorbiert. Die Proben weisen dabei eine Verformung von über 60 % auf.

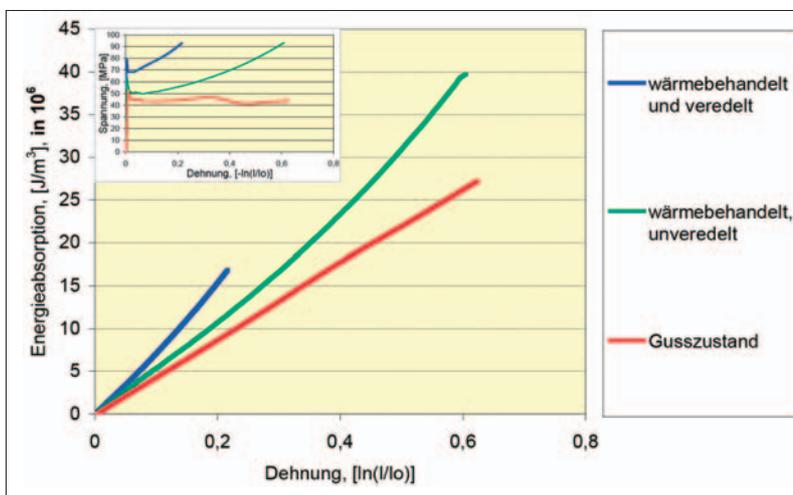


Bild 4. Einfluss der Wärmebehandlung und der Veredelung auf die Energieabsorptionsvermögen bei AlSi7Mg-KeraBims-Granulat 1–2mm (Probegeometrie $40 \times 40 \times 45\text{ mm}^3$, Aluminiummatrix wärmebehandelt, teils veredelt)

Da die Verformungsgeschwindigkeit auf den Spannungs-Dehnungs-Verlauf im einaxialen Druckversuch keinen signifikanten Einfluss gezeigt hat, wird deren Auswirkung auf die Energieabsorption nicht dargestellt.

E-Modul bei unterschiedlichen Matrix- und Füllmaterialien

Die Steifigkeit eines Materials kann mittels seines Elastizitätsmoduls beschrieben werden. Dieser Materialkennwert charakterisiert den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung während der linear-elastischen Verformung eines Materials. Wie bereits im ersten Teil des Artikels erwähnt worden ist, wurde neben dem konventionellen Messverfahren des Elastizitätsmoduls (Messung des Anstieges des linear elastischen Bereiches der Spannungs-Dehnungs-Kurve im Druckversuch an der FH Landshut), auch durch die Bestimmung der Resonanzfrequenz des Materials die dynamischen E-Modul-Werte ermittelt.

Die Messergebnisse sind in Tafel 2 zusammengefasst. Die Messung des E-Moduls aus dem Druckversuch stimmt mit den Werten aus der dynamischen Messung überein. Auffällig ist, dass die Steifigkeit der Probekörper sowohl von dem Durchmesser des Füllmaterials als auch von der Rohdichte des syntaktischen Schaummaterials eine Abhängigkeit zeigt. Der Elastizitätsmodul nimmt mit feinerer Kornfraktion und mit steigender Rohdichte zu.

Messung von Kennzahlen in Volumenbildern syntaktischer Schäume

Für das IMVAL-Projekt wurden Volumenbilder mittels Mikro-Computertomographie auf Röntgenbasis aufgenommen, um daraus Kennzahlen für die Computersimulation zu bestimmen. Es wurden sowohl einzelne Granulatkörner als auch der zelluläre Verbundwerkstoff als Vertreter der syntaktischen Schäume (Granulatkörner in einer Matrix) aufgenommen und die resultierenden dreidimensionalen Bilder analysiert. Die gewonnenen Kennzahlen charakterisieren die Mikrostruktur des Verbundwerkstoffes und dienen als Grundlage zur Simulation des mechanischen Verhaltens.

Tafel 2. Elastizitätsmodul des Verbundwerkstoffs mit unterschiedlichen Materialkombinationen

	Granulatfraktion	Dichte in g/cm ³	E-Modul in GPa dynamisch	E-Modul in GPa Druckversuch
Alu - KeraBims	1-2 mm	1,5	23,6	23,6
	2-4 mm	1,45	20,1	-
	4-6 mm	1,6	-	22,3
Zink - KeraBims	1-2 mm	3,2	27,1	26,3
	2-4 mm	3,0	24,0	23,2
	4-6 mm	3,5	-	25,4
	6-8 mm	3,4	-	24,5
Zink - Eisenhohlkugel		3,15	-	26,7
Alu - Eisenhohlkugel		1,5	-	22,8
Magnesium - Eisenhohlkugel		1,1	-	19,4

Im ersten Abschnitt wird zunächst die Mikro-Computertomographie (μ CT) als bildgebendes Verfahren für Volumenbilder eingeführt. Anschließend werden dann die Minkowski-Funktionale als grundlegende Kennzahlen vorgestellt, die die Mikrostruktur einer Materialprobe geometrisch charakterisieren und aus denen eine Reihe weiterer Kennzahlen ableitbar ist. Im letzten Abschnitt werden die im Rahmen des IMVAL-Projektes relevanten Kennzahlen vorgestellt und die projektspezifischen Anforderungen an die Bildverarbeitung kurz skizziert.

Von der Mikro-Computertomographie zu Basis-Kennzahlen

Volumenbilder

Ein räumliches Bild (Volumenbild) besteht aus einem dreidimensionalen kuboidalen Gitter, dessen Gitterpunkten (Pixel oder auch Voxel) Grauwerte zugeordnet sind. Volumenbilder haben im Gegensatz zu lichtmikroskopischen Aufnahmen ebener Anschliffe oder Bruchflächen den Vorteil, dass die volle dreidimensionale Information über die Mikrostruktur verfügbar ist. Diese ist aus zweidimensionalen Bildern nicht oder nur sehr eingeschränkt rekonstruierbar.

Gängige Abbildungsverfahren für die Aufnahme von Volumenbildern von Mikrostrukturen sind z. B. Computertomographie auf Basis von Röntgen- oder Synchrotronstrahlung und konfokale Laserscanning-Mikroskopie. Diese Abbildungsverfahren arbeiten zerstörungsfrei. Damit können auch der herkömmlichen quanti-

tativen Gefügeanalyse nicht zugängliche Materialien (z. B. spröde, hochporöse oder sehr weiche Materialien) aufgenommen werden. Auf Basis der gewonnenen Volumendaten ist die Simulation makroskopischer Materialeigenschaften möglich, was in Verbindung mit geeigneten Geometriemodellen die Optimierung von Materialien durch Simulationsrechnungen erlaubt [2]. Zudem können zerstörungsfrei aufgenommene Materialproben weiteren physikalischen Experimenten unterzogen werden.

Mikro-Computertomographie (μ CT)

Im Gegensatz zur aus der Medizin bekannten Computertomographie arbeitet man bei der Mikro-Tomographie mit Auflösungen im Mikrometerbereich: Man kann heute mit modernen Mikrofocus-Röntgenröhren eine Auflösung von bis zu 1 μ m Kantenlänge je Bildpunkt erreichen.

Die Computertomographie beruht auf dem Prinzip, dass Strahlung durch einen Probekörper unterschiedlich stark abgeschwächt wird. Mit einem Detektor wird der „Schattenwurf“, also die Projektion des Probekörpers, aufgefangen.

Um dreidimensionale Informationen zu erhalten, müssen Projektionen aus verschiedenen Blickwinkeln bestimmt werden. Dazu wird bei der μ CT der sich zwischen Strahlungsquelle und Detektor befindende Probekörper rotiert.

Aus dieser Folge von Projektionen wird ein Volumenbild des Probekörpers rekonstruiert [5]. Der Grauwert an einem Bildpunkt in solch einem Volumenbild korreliert mit dem Absorptionsgrad und somit der physi-

kalischen Dichte des Materials an dieser Stelle im Probekörper.

Bildverarbeitung und -analyse

Aus den Volumenbildern werden anschließend Kenngrößen der Mikrostruktur bestimmt. Dies können Kenngrößen der Materialphase(n) und von Einzelobjekten sein.

Vor Bestimmung der Kennzahlen müssen die Volumenbilder zunächst aufbereitet werden. Rauschen muss entfernt und die wesentlichen Bildstrukturen müssen hervorgehoben werden.

Dann muss die zu untersuchende Phase als Vordergrund des Bildes vom Bildhintergrund und eventuell der Bildvordergrund als Objektphase in einzelne Objekte getrennt werden. Dieser Schritt wird als Segmentieren bezeichnet. Die Bildverarbeitungsschritte zur Aufbereitung und Segmentierung von Volumenbildern sind abhängig von den in der Probe enthaltenen Materialien, Aufnahmeart und -qualität sowie den Analysezielen und müssen entsprechend angepasst werden. Die Verarbeitungskette kann dabei sehr aufwendig werden, für Details und spezifische Anwendungsszenarien siehe [4 und 9].

Das Ergebnis der Segmentierung ist ein Volumenbild, das in Vordergrund und Hintergrund geteilt ist, bzw. ein Volumenbild von Objekten, wobei der Grauwert eines Bildpunktes der Objektnummer entspricht. Auf diesen Volumenbildern können der Vordergrund bzw. die einzelnen Objekte vermessen werden.

Zur geometrischen Charakterisierung einzelner Objekte werden zunächst Basiskennzahlen (Minkowski-Funktionale oder auch innere Volumina [8]) bestimmt, die effizient berechnet werden können [6,7] und aus denen viele weitere Charakteristika abgeleitet werden können. Für die Granulatkörner waren dies u. a. die Durchmesser- und Formfaktorverteilungen der Kornzellen.

Ist man hingegen an der Charakterisierung ganzer Phasen interessiert, bezieht man die gemessenen Kenngrößen auf das Volumen der abgebildeten Probe. So bestimmt man anstatt des Volumens den Volumenanteil bzw. die Porosität statt der Oberfläche die spezifische Oberfläche. Im Fall des zellularen Verbundwerkstoffes war das z. B. die Volumendichte der Matrix.



Bild 5. Beispiele für Kenngrößen verschiedener Materialien. Die Kenngrößen basieren auf den Minkowski-Funktionalen.

Legt man Modellannahmen über die Mikrostruktur zugrunde, sind weitere, modellbasierte Kenngrößen ableitbar.

So kann man z. B. bei offenzelligen Schäumen den PPI-Wert, die mittlere Größe der Zell-Seitenflächen oder auch das mittlere Zellvolumen erhalten [11].

In Bild 5 sind beispielhaft für einige Materialien so bestimmte Kenngrößen angegeben [3].

Gemessene Kenngrößen

An den Granulatkörnern wurden neben Volumina des Kornes, des Kornmaterials sowie Volumendichte auch Anzahl, Durchmesser- und Formfaktorverteilungen der Kornzellen bestimmt. Im Fall des Verbundwerkstoffes wurden entsprechende Kenngrößen und Verteilungen der Granulatkörner in der Matrix bestimmt. Zusätzlich wurden noch die Verteilungen der Zellwanddicken der Matrix bestimmt. Auf die Formfaktoren und die Zellwandstärken wird im Folgenden genauer eingegangen.

Formfaktoren

Formfaktoren beschreiben die Form von Objekten. In der Regel haben diese einen Wert zwischen 0 und 1: Ist der Wert (nahe bei) 1, so hat das Objekt diese Formeigenschaft, je nach Stärke der Abweichung von dieser Formeigenschaft liegt der Wert näher an 0.

Der Formfaktor Sphärizität ist ein so genannter isoperimetrischer Formfaktor. Er stellt das Volumen ins Verhältnis zur Oberfläche und wird dabei gerade so normiert, dass sich für die Kugel der Wert 1 ergibt. Je näher der Formfaktor an 0 liegt, desto „unkugeliger“ (deformierter, mit Einstülpungen, aber auch Einschlüssen) ist das Objekt.

Der Formfaktor Konvexität ergibt sich aus dem Verhältnis des Volumens eines Objektes zu dem Volumen der konvexen Hülle des Objektes. Bei einem konvexen Objekt liegt dieser Formfaktor bei 1. Bei Objekten mit Einstülpungen (und Einschlüssen) liegt der Wert näher an 0. Die Verhältnisse der kleinsten d_{max} bzw. mittleren d_{avg} zum größten

Durchmesser d_{max} kann man als anisotrope Formfaktoren auffassen. Sie beschreiben, ob ein Objekt gestreckt bzw. gestaucht ist.

In Tafel 3 sind für einige Grundkörper diese Formfaktoren dargestellt.

Verteilung der Zellwandstärken des syntaktischen Schaumes

Eine weitere für das IMVAL-Projekt entscheidende Charakteristik ist die Verteilung der Zellwandstärken des syntaktischen Schaumes. Die Matrix des Verbundwerkstoffes wird dabei als geschlossenzelliger Schaum aufgefasst. Die eingebetteten Granulatkörner sind Platzhalter für die Zellen. Eine Zellwand ist nun das Stück der Matrix, welches zwei Granulatkörner voneinander trennt.

Es ist eine sehr komplexe Aufgabe, die einzelnen Zellwände im Volumenbild der Matrix zu segmentieren, d. h. als einzelne Objekte vom Granulat sowie von Zellstegen und -knoten zu trennen. Es wurde daher eine andere Methode zur Bestimmung der Zellwandstärken gewählt.

Die minimale Zellwanddicke zwischen zwei Granulatkörnern entspricht dem minimalen euklidischen Abstand der Körner zueinander. In die Verteilung der Zellwandstärken der Matrix dürfen jedoch nur die Abstände benachbarter Granulatkörner einfließen. Es muss also zunächst die Nachbarschaftsbeziehung aller Granulate zueinander extrahiert werden. Diese kann aus den sogenannten Einflusszonen der segmentierten Granulatkörner bestimmt werden. Zur Einflusszone eines Objektes gehören alle Pixel, die näher zu diesem Objekt als zu allen anderen Objekten im Bild liegen. Man kann alle Einflusszonen bestimmen, indem man im segmentierten Volumenbild der Granulatkörner diese stetig „wachsen“ lässt bis sich alle Zonen um die Granulatkörner berühren. Zwei Granulatkörner werden als benachbart markiert, wenn sich deren so gefundene Einflusszonen berühren.

Nun können die Abstände zwischen den Granulatkörnern bestimmt werden. Dazu wird von einem Korn ein Distanzbild bestimmt. Jedem Pixel wird in einem Volumenbild der euklidische Abstand zum Korn als Wert zugeordnet. Nun kann für jedes Nachbarkorn der Abstand

Tafel 3. Formfaktoren für einige ausgewählte Grundkörper (vgl. [10])

	Sphärizität	Konvexität	d_{min} / d_{max}	d_{avg} / d_{max}
Kugel	1,00	1,00	1,00	1,00
Gestreckter Sphäroid Hauptachse/Nebenachse = 2	0,90	1,00	0,50	0,88
Abgeplatteter Sphäroid Hauptachse/Nebenachse = 2	0,87	1,00	0,50	0,86
Zylinder mit Höhe/Radius = 1	0,75	1,00	0,72	0,93
Zylinder mit Höhe/Radius = 2	0,82	1,00	0,71	0,91
Würfel	0,72	1,00	0,58	0,87

zum ersten bestimmt werden, indem der kleinste Wert im Distanzbild gesucht wird, dessen Pixelposition das Nachbarkorn berührt. Dies wird wiederholt, bis die Abstände aller Paare von Nachbarkörnern bestimmt worden sind. Die Abstandswerte entsprechen dann den minimalen Dicken der Zellwände der Matrix zwischen diesen Granulatkörnern.

Charakterisierung der Granulatkörner und des Verbundwerkstoffes

Im Rahmen des IMVAL-Projektes wurden unterschiedliche Granulate und Verbundwerkstoffe mit unterschiedlichen Füllmaterialien tomographiert und untersucht. Bild 6 zeigt die dreidimensionale Visualisierung eines Volumenbildes eines Granulatkorner des Typ KeraBims 8 bis 19 mm, Bild 7 die Visualisierung eines Verbundbauteils mit Polyamidmatrix und Granulatkörnern des Typ KeraPlus 4 bis 6 mm.

Die Porengrößen und -formen der Granulatkörner schwanken weit stärker als erwartet. Zudem liegen in den Zellwänden nochmals Poren. Darüber hinaus sind bei einigen Poren die Zellwände durchbrochen. Dadurch gestaltete sich die Segmentierung besonders schwierig. Zellwände mussten geschlossen werden, große Poren durften nicht zerteilt und gleichzeitig kleine nicht zerstört werden.

Bild 8 zeigt Schnitte durch das Originalvolumenbild und das Bild der segmentierten Poren eines Granulatkorner. Links der Schnitt aus dem Originalbild, rechts aus dem segmentierten Volumenbild. Die Farben dienen zur Unterscheidung unterschiedlicher Zellen. Beim syntaktischen Schaum ergab sich zusätzlich das Problem, dass durch eine nicht gänzlich geschlossene Außenhaut Matrixmaterial in das Granulatinne eintreten konnte. Dies erschwert die Segmentierung des Granulats im Verbundwerkstoff erheblich, da im Volumenbild solche Stellen nicht mehr der Granulatphase, sondern der Matrix zugeordnet werden.

Bild 9 zeigt Visualisierungen von Schnitten aus einem Originalvolumenbild bzw. Segmentierungsbild eines Verbundwerkstoffes. Links der Schnitt aus dem Originalbild, rechts aus dem segmentierten Volumen-

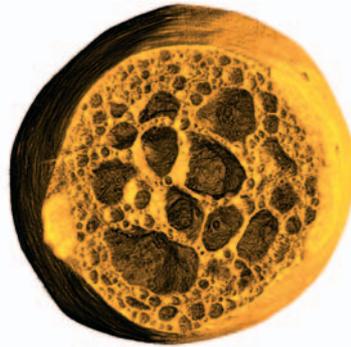


Bild 6. Visualisierung eines Granulatkorner (angeschnittene Ansicht)

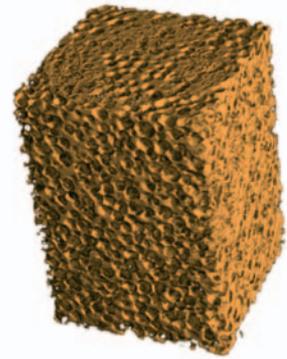


Bild 7. Visualisierung der Matrix eines syntaktischen Schaums

bild. Die Farben dienen zur Unterscheidung unterschiedlicher Granulatkörner.

Auf Grund der oben genannten Schwierigkeiten mussten komplexe Bildverarbeitungswerkzeuge wie adaptive morphologische Filter, Distanztransformationen und Wasserscheidentransformation [9] einge-

setzt werden, um die Poren in den Granulatkörnern sowie die Zellen im Verbundwerkstoff geeignet segmentieren zu können.

Ergebnisse für einen syntaktischen Schaum

Im Folgenden sind beispielhaft einige Ergebnisse der Analyse des in den Bildern 7 und 9 visualisierten Volumenbildes eines syntaktischen Schaums mit Polyamidmatrix und Granulat des Typ KeraPlus 4 bis 6 mm dargestellt. Unter Verwendung solcher Analyseergebnisse wurden an der Fachhochschule Landshut für die zellularen Verbundwerkstoffe FEM-Mesomodelle entwickelt, mit denen das grundlegende mechanische Verhalten der Verbundwerk-

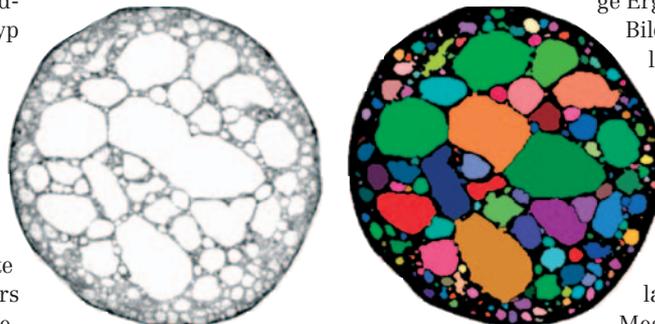


Bild 8. Visualisierung eines Schnittes eines Granulatkorner. Die Farben dienen zur Unterscheidung unterschiedlicher Zellen.

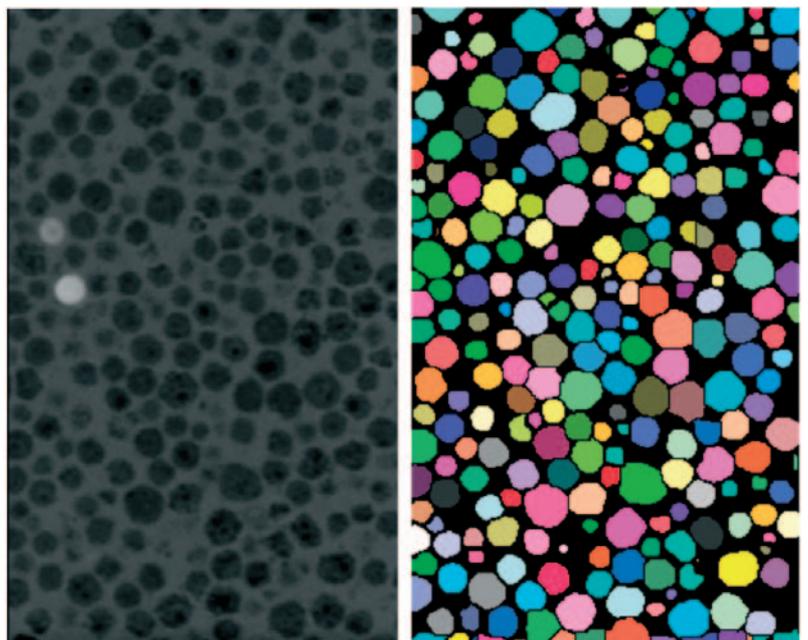


Bild 9. Visualisierung eines Schnittes des syntaktischen Schaums. Die Farben dienen zur Unterscheidung unterschiedlicher Granulatkörner.

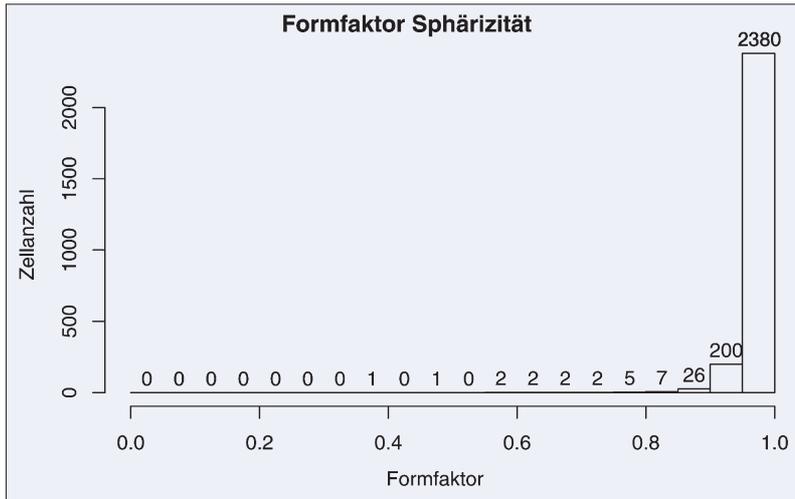


Bild 10. Verteilung des Formfaktors Sphärizität der Granulatkörner.

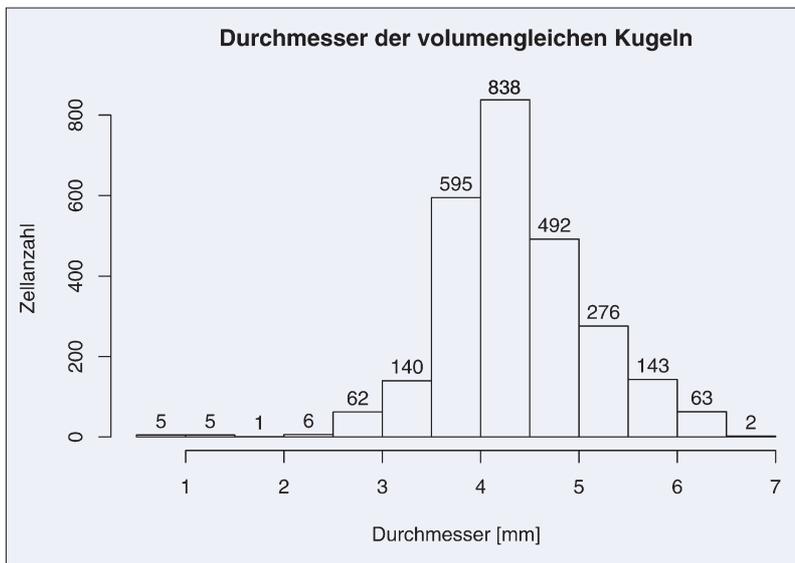


Bild 11. Verteilung der Durchmesser volumengleicher Kugeln der Granulatkörner.

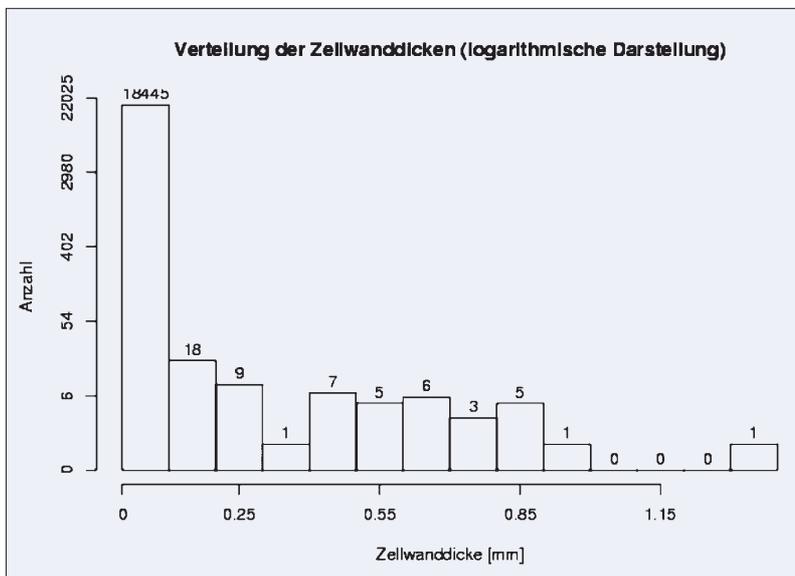


Bild 12. Verteilung der Zellwanddicken der Matrix (logarithmische Darstellung).

Tafel 4. Einige Charakteristika der Matrix

Anzahl der Körner []	3633
Anzahl der randschneidenden Körner []	1005
Volumen aller Körner [cm³]	157,78
Volumen der Matrix [cm³]	119,40

stoffe numerisch simuliert werden kann [2]. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im dritten Teil der Artikelreihe vorgestellt.

In Tafel 4 sind einige Merkmale der Matrix beschrieben.

Bild 10 zeigt die Verteilung des Formfaktors Sphärizität, Bild 11 die Verteilung der Durchmesser volumengleicher Kugeln der Granulatkörner. Randschneidende Granulatkörner wurden aus beiden Statistiken ausgeklammert, da deren Form und Größe unbekannt ist.

Die Sphärizität des Großteils der Granulatkörner liegt über 0,95; daraus kann man schließen, dass diese sehr gut Kugeln entsprechen.

In Bild 12 ist die Verteilung der Zellwanddicken der Matrix zu sehen. Man kann ablesen, dass die Granulatkörner in der Matrix dicht liegen. ◀

Schrifttum

- [1] Klaus, H.; Huber, O.: FEM-Modellierung für den Verbundwerkstoff „Mineralschaumkugeln in Polyamidmatrix“ im elastischen Bereich, Huber, O.; Bickes, M. [Eds.] 1. Landshuter Leichtbaukolloquium – Innovationen und Erfahrungen im Leichtbau – Kompetenznetzwerk, LC – Verlag Landshut, 2003.
- [2] Klaus, H.; Huber, O.; Kuhn, G.: Lightweight Potential of Novel Cellular Spherical Composites, *Advanced Engineering Materials*, Vol.7, 2005, p. 1117 – 1124.
- [3] Godehardt, M.; Schladitz, K.; Sych, T.: *Analysis of Volume Images – A Tool for Understanding the Microstructure of Foams*. In: Singer, R. F.; Körner, C.; Altstädt, V.; Münstedt, H. (Ed.): *Cellular Metals and Polymers* (Proceedings). Trans Tech Publications, Zürich (2005). p. 159 – 162.
- [4] Jähne, B.: *Digital Image Processing*. Springer-Verlag (1997).
- [5] Kak, A. C.; Slaney, M.: *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press (1988).
- [6] Lang, C.; Ohser, J.; Hilfer, R.: *On the analysis of spatial binary images*. *Journal of Microscopy* 203 (2001), p. 303 – 313.
- [7] Ohser, J.; Nagel, W.; Schladitz, K.: *The Euler number of discretised sets - surprising results in three dimensions*. *Image Anal. Stereol.*, 22: p. 11 – 19 (2003).
- [8] Ohser, J.; Mücklich, F.: *Statistical Analysis of Materials Structures*. J. Wiley & Sons, Chichester, New York (2000).
- [9] Soille, P.: *Morphological Image Analysis*. Springer-Verlag (1999).
- [10] Stoyan, D.; Kendall, W. S.; Mecke, J.: *Stochastic Geometry and its Applications*. 2nd edition. Chichester: Wiley (1995).
- [11] Sych, T.: *Estimation of Geometric Characteristics of Foam Structures*. Diploma thesis. Technische Universität Kaiserslautern, ITWM Kaiserslautern (2004)