

Dr. Dr. Anne Jung

Materialentwicklung nach dem »Zwergenprinzip« und der Devise »Weniger ist mehr«

Der vorliegende Beitrag wurde beim Deutschen Studienpreis 2013 mit einem 1. Preis in der Sektion Natur- und Technikwissenschaften ausgezeichnet. Er beruht auf der 2012 an der Universität des Saarlandes eingereichten Dissertation »Offenporige, nanobeschichtete Hybrid-Metallschäume – Herstellung und mechanische Eigenschaften« von Dr. Dr. Anne Jung.

Materialentwicklung nach dem »Zwergenprinzip« und der Devise »Weniger ist mehr«

Wettbewerbsbeitrag zur Teilnahme am Deutschen Studienpreis 2013

Dr. Dr. Anne Jung

Die ständig steigende Weltbevölkerung stellt die Menschheit zunehmend vor Probleme. Der Großteil der Bevölkerung konzentriert sich in Städten, was dazu führt, dass auf begrenztem Raum immer mehr Menschen untergebracht werden müssen. Dies führt sowohl zu sozialen Spannungen als auch zu Umwelt- und technischen Problemen. Gleichzeitig geht mit dem steigenden Wohlstand sowohl ein steigender Energie- als auch Materialbedarf, der zu einer Verknappung der Rohstoffe führt, einher. In technischer Hinsicht werden ständig steigende Anforderungen an Werkstoffe gestellt. Ganz nach der Devise »Immer höher, immer weiter« müssen heutige technische Konstruktionen und Bauwerke immer höhere Nutzlasten bei gleichzeitig reduziertem Eigengewicht tragen. Beispiel hierfür ist der Wettlauf um Superlative. Das mit über 800 m Höhe derzeit höchste Gebäude der Welt, das Burj Kalifa in Dubai, konnte nur durch die Entwicklung neuer Bauweisen so hoch in den Himmel getrieben werden. Ein weiteres Beispiel für diesen Größenwahn stellt das fast 2,5 km lange und ca. 350 m hohe Viadukt von Millau dar. Bis vor wenigen Jahren wären solche Bauvorhaben als Fantastereien schlichtweg zerrissen worden. Möglich wurden sie nur durch die fortschreitende Entwicklung in der Materialforschung, der eine immer größere Bedeutung mit der Entwicklung neuer, ressourceneffizienter und anwendungsoptimierter Materialien zukommt. Neue Materialien müssen sowohl Multifunktionalität als auch Gewichtersparnis miteinander vereinen. Weitere Aspekte der Materialforschung sind nicht nur Nachhaltigkeit, sondern auch Kostensparnis oder Wettbewerbsvorteile.

Der Bauplan der Natur – Weniger ist mehr

Um solche gigantischen Bauwerke, wie das Burj Kalifa und das Viadukt von Millau, die durchaus zu den neuen Weltwundern gezählt werden könnten, zu realisieren, werden Leichtbaukonzepte wie Tragwerks-

strukturen und die Skelettbauweise ausgenutzt. Zur Umsetzung dieser Konzepte werden allerdings massive, schwere Vollmaterialien wie Stahl und Beton verwendet. Die Natur ist in der Konstruktion ähnlicher lasttragender Bauwerke wesentlich schlauer und verwendet ganz nach dem Motto »Weniger ist mehr« sogenannte zelluläre Materialien. Zelluläre Materialien sind schwammartige Strukturen mit einem großen Volumenanteil an Luft, d.h., Tragwerksstrukturen werden nicht nur auf einer makroskopischen Bauteilskala, sondern v.a. auf einer mikroskopischen Materialskala umgesetzt. Beispiele sind Knochen, die so stabil, aber dennoch vergleichsweise leicht sind, dass sie selbst das tonnenschwere Gewicht der Dinosaurier getragen haben oder die riesigen, über 100 Meter hohen Mammutbäume, die mit bis zu 2400 Tonnen knapp sechsmal so schwer wie das Startgewicht eines Airbus A380, des derzeit größten Passagierflugzeugs der Welt, sind. Sie halten nicht nur dem eigenen Gewicht, sondern selbst starken Stürmen stand.

Michael F. Ashby drückte die Diskrepanz zwischen unserer heute üblichen Bausweise und der in einem Jahrmillionen dauernden Evolutionsprozess optimierten Bauweise der Natur so aus: »When modern man builds large load-bearing structures, he uses dense solids, steel, concrete, glass. When nature builds large load-bearing structures, she generally uses cellular materials: wood, bone, coral. There must be a good reason for it.«

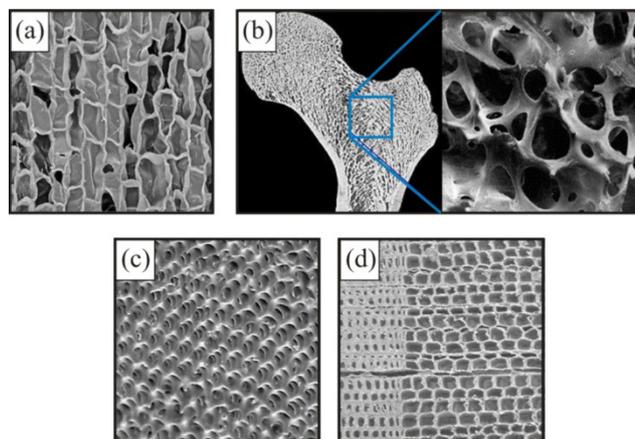


Abbildung 1: Natürlich zellular aufgebaute Materialien: (a) Kork, (b) Röhrenknochen, (c) Seestern, (d) Pinienholz.
(Quellen: (a) <http://visualsunlimited.photoshelter.com/image/I0000PgPwYgpfvYk>,
(b) <http://www.ilsb.tuwien.ac.at/~daxner/ictam-projekt/monatsprojekt.html> und
<http://www.gla.ac.uk/ibls/US/fab/tutorial/generic/bone2.html>,
(c) <http://web.eps.utk.edu/~faculty/sumrall/research4.html>
(d) <http://people.oregonstate.edu/~nairnj/WoodWebSite/>)

Natürliche Materialien wie Knochen bieten die gleichen Eigenschaften, wie man sie von modernen Werkstoffen erwartet. Aufgrund der zellulären Struktur besitzen sie hohe Steifigkeiten bei vergleichsweise geringem Gewicht.

Bionik – Abkupfern von der Natur

Dass es für diesen Bauplan der Natur somit tatsächlich einen »guten Grund« gibt, hat auch die Technik mittlerweile erkannt und die Strukturprinzipien in Form von Wabenstrukturen und Schaumwerkstoffen der Natur entlehnt. Auch sie kombinieren hohe Steifigkeiten bei geringem Gewicht, weshalb sie für den konstruktiven Leichtbau von Interesse sind und weiter in der Lage sind, kinetische Energien, wie sie beim Aufprall eines Körpers auf die zelluläre Struktur beispielsweise bei einem Autocrash entstehen, zu absorbieren. Durch ihren speziellen Deformationsmechanismus, bei dem sich die Stege verbiegen oder knicken, wird die Bewegungsenergie des auftreffenden Objekts durch diesen Deformationsmechanismus abgebaut bzw. so weit verringert, dass sich hinter der Wabenstruktur oder dem Schaum befindliche Körper geschützt werden.

Wabenstrukturen besitzen eine Vorzugsrichtung und damit ein richtungsabhängiges Materialverhalten. Schaumwerkstoffe weisen annähernd gleichmäßige Porenstrukturen auf und besitzen dadurch richtungsunabhängige mechanische Eigenschaften. Schaumwerkstoffe sind somit gegenüber Wabenstrukturen von Vorteil. Unter synthetisch hergestellten Schäumen wird zwischen Polymer-, Keramik- und Metallschäumen unterschieden. Polymerschäume sind leicht und flexibel, zeigen allerdings nur geringe Festigkeiten und mangelnde Hochtemperaturbeständigkeit. Keramikschaume haben hohe Steifigkeiten und zeigen hohe thermische Stabilität. Durch die hohe Sprödigkeit wird ihre Anwendung stark eingeschränkt. Metallschäume sind im Gegensatz zu Polymerschäumen hochtemperaturbeständig und weisen wesentlich höhere Steifigkeiten, Festigkeiten und Energieabsorptionsvermögen auf. Gegenüber Keramikschaumen sind sie ausreichend flexibel, sodass sich die einzelnen Stege wesentlich stärker verbiegen und mehr kinetische Energie abbauen können.

Die Anwendungen von Metallschäumen werden in drei Bereiche unterteilt. Aufgrund ihrer großen Steifigkeit bei geringem Gewicht werden Metallschäume für den konstruktiven Leichtbau eingesetzt. Hier werden sie lediglich elastisch, d.h. reversibel verformt. Bisher umgesetzte Bauteile sind Leichtbaubremskolben, Getriebezahnräder oder aber auch der Wartungstritt eines Hubschraubers und der Hubarmhalter eines mobilen Kranwagens.

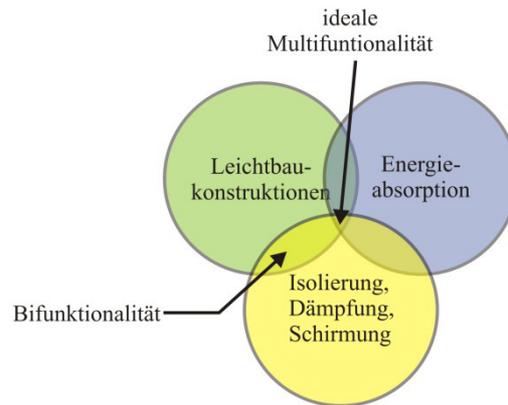


Abbildung 2: Anwendungsfelder und Multifunktionalitätsgedanke.

Der zweite Bereich umfasst die guten Energieabsorptionseigenschaften von Metallschäumen aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit, eines langen Deformationswegs und somit von Anwendungen, bei denen der Schaum irreversibel plastisch verformt wird. Beispiele hierfür sind ein Unterfahrschutz für LKW, Crashabsorber in Zügen und Energieabsorber in PKW. Basierend auf ihrer großen Oberfläche, werden Metallschäume auch als Wärmetauscher, zur strukturellen Dämpfung, als Schallabsorber, zur elektromagnetischen Abschirmung und als Katalysatorträger eingesetzt.

Bei den Einsatzfeldern ergeben sich zum Teil Überschneidungen, sodass bi- und im Idealfall multifunktionale Werkstoffe entstehen. Bisher sind dies allerdings nur Nischenanwendungen. Die Ursache liegt v.a. in der mangelnden Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften, der immer noch teuren Herstellung und der Konkurrenz zu bereits etablierten billigeren Materialien und Werkstoffkonzepten. Damit es zu einer verbreiteten kommerziellen Anwendung kommen kann muss eine Senkung der Herstellungskosten oder eine Verbesserung der Eigenschaften von Metallschäumen erzielt werden, sodass geringere Schaummengen benötigt werden. Für den Durchbruch müssen v.a. die Reproduzierbarkeit verbessert und das Multifunktionalitätskonzept ausgenutzt werden. Vorteilhaft wäre des Weiteren, wenn es durch den Einsatz von Metallschäumen zu einer Materialeinsparung kommt.

Kombination des »Bauplans der Natur« mit dem »Zwergenprinzip«

Ziel der Dissertation war, die Entwicklung eines verstärkten, leichten Metallschaums, der eine verbesserte Biegesteifigkeit und erhöhte Energieabsorptionen unter quasistatischen, d.h. langsamen Belastungsgeschwindigkeiten wie auch unter sehr schnellen Crashbelastungen besitzt. Weiterhin sollten die Schäume eine erhöhte Formstabilität und Biegesteifigkeit für den Einsatz im konstruktiven Leichtbau aufweisen.

Die Idee, wie diese ehrgeizigen Ziele erreicht werden können, bestand in der Entwicklung eines mit einer dünnen, festen Metallschicht elektrochemisch beschichteten Aluminiumschaums. Ein solcher Hybrid-schaum, bestehend aus dem Strukturgerüst eines Substratschaums, bei dem jeder einzelne Steg rundum mit einer verstärkenden Beschichtung ummantelt wurde, verbindet drei bekannte Materialdesignstrategien in sich. Zum Ersten greift er das bionische Leichtbaukonzept von Metallschäumen in Form von Rahmentragwerken auf, und zum anderen findet durch die Beschichtung eine Veredelung des Substratschaums statt, indem durch die Beschichtung dem Komposit zusätzliche Eigenschaften gegeben werden, die von dem Substrat alleine nicht erzielt werden können. Die dritte Designstrategie betrifft die Festigkeitssteigerung eines Materials durch Verringerung seiner Korngröße, d.h. seiner kleinsten Gefügeeinheiten, bis in den »Zwergenbereich« nanokristalliner Materialien (nano = griechisch für Zwerg). Ein Nanometer ist der milliardste Teil eines Meters und damit 50 000-mal kleiner als die Dicke eines menschlichen Haars. Materialien, welche solch einen kristallinen Aufbau besitzen, verfügen über stark gesteigerte Festigkeiten gegenüber den gleichen Materialien, welche aus mikrometergroßen Körnern aufgebaut sind. Ursächlich dafür ist eine Behinderung der Versetzungsbewegung, welche für die Deformation metallischer Materialien verantwortlich ist. Durch Beschichtung mit nanokristallinen Materialien werden damit höhere Festigkeiten erzielt, wodurch nur geringe Schichtdicken und damit eine geringe Massenzunahme notwendig sind.

Bisherige Ansätze zur Beschichtung von Metallschäumen wurden fast durchweg mit dem Ziel einer Funktionalisierung der großen inneren Oberfläche der Schäume durch dünne Funktionsschichten verfolgt. Die Beschichtung zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Reproduzierbarkeit stand bisher im Hintergrund. Neben dem Hot-Dip-Coating wurde hierzu von zwei Forschergruppen die Elektrodeposition, die elektrochemische Metallabscheidung, verwendet. Es konnten allerdings selbst bei Schäumen geringer Dicke (unter 15 mm) nur sehr inhomogene Beschichtungsdicken mit 10 % im Innern gegenüber der Beschichtungsdicke am Rand erzielt werden. Die Gründe für die starke Inhomogenität liegen zum einen in einer starken Stofftransportlimitierung bei der elektrochemischen Metallabscheidung im Innern dreidimensionaler, poröser Körper, zum anderen im gleichzeitig auftretenden Faradayeffekt, der die Feldlinien des Stroms im Innern des Schaums stark abschwächt. Während positive Effekte der Beschichtung auf Steifigkeit, Festigkeit und Energieabsorption festgestellt wurden, spiegelte sich dies durch die Massenzunahme nicht in den spezifischen Eigenschaften wider.

Im Rahmen der Dissertation wurde zur Herstellung solcher Hybridschäume, d.h. Substratschäume versehen mit einer Beschichtung, zunächst ein Verfahren zur Beschichtung von Metallschäumen mittels eines elektrochemischen, galvanischen Beschichtungsverfahrens entwickelt. Die große Herausforderung dabei bestand sowohl in der homogenen Beschichtung der dreidimensionalen, porösen Schaumstruktur bis ins

Schauminnere als auch in der Herstellung einer nanokristallinen Beschichtung. Um eine Beschichtung im Innern des Schaums durchzuführen, müssen die Metallionen des Elektrolyten während der Beschichtung ständig aus dem ungestörten Elektrolyten außerhalb des Schaums nachgeliefert werden und bis ins Innere diffundieren. Gleichzeitig findet an jedem Steg des Schaums auch in der äußeren Schaumschicht aufgrund des angeschalteten Stroms eine elektrochemische Abscheidung statt. Dadurch gelangen nur sehr wenige Metallionen bis ins Schaumzentrum, um dort in Form einer metallischen Schicht abgeschieden zu werden. Eine wesentliche Verbesserung der Beschichtungshomogenität konnte in der Dissertation durch eine spezielle neuartige Käfiganode samt notwendiger Vorbehandlungsschritte und einer speziellen Prozessführung bewerkstelligt werden. Mit diesem Verfahren ist es möglich, selbst 50 mm dicke, offenporige Metallschäume mit einer Homogenität von ca. 80 % nanokristallin zu beschichten. Dies entspricht einer Verachtfachung der Beschichtungshomogenität gegenüber dem Stand der Technik trotz einer Vierfachung der Dicke des zu beschichtenden Schaums.

Verbesserung durch Sichtbarmachung des Problems

Zur Optimierung der Prozessparameter und zum besseren Verständnis des Beschichtungsverfahrens wurde ein qualitatives Stofftransportmodell abgeleitet, mit dem es möglich ist, das Stofftransportproblem, das zur inhomogenen Schichtdickenverteilung führt, zu untersuchen und Methoden zur Steigerung der Beschichtungshomogenität abzuleiten. Dazu musste zuerst ein Verfahren zur Messung und Visualisierung der Beschichtungsinhomogenitäten entwickelt werden. Es wurde eine Methode aus der Supraleiterforschung adaptiert, mit der es möglich ist, die Inhomogenitäten der Beschichtungsdicke magnetischer Beschichtungsmetalle durch Messungen der magnetischen Flussdichte semizerstörungsfrei an den beschichteten Hybridschäumen zu visualisieren. Die Hybridschäume wurden in Scheiben geschnitten, und an jeder Scheibe wurde eine abrasternde Flussdichtemessung vorgenommen. So war es möglich, die relativen Beschichtungsdicken gegenüber der Schaumoberfläche in unterschiedlichen Schaumtiefen nicht nur zu visualisieren, sondern auch zu quantifizieren. Auf der Basis dieser Messungen wurde das theoretische Stofftransportmodell, mit dem es möglich ist, die für die Inhomogenitäten verantwortliche Stofftransportlimitierung qualitativ in Abhängigkeit der Prozessparameter zu beschreiben, entwickelt. Das Modell basiert im Wesentlichen auf einer Superposition der bei planaren Elektroden vorhandenen Diffusionsschichten, die sich analog dazu vor jeder Porenlage im Schaum ausbilden.

Was kann der Schaum?

Der tatsächliche Einsatz eines neuen, innovativen Materials wie der Hybridschäume bedingt weiterhin nicht nur die Materialentwicklung, sondern auch grundlegende Kenntnisse seines physikalischen und mechanischen Verhaltens. Aus diesem Grund wurde ein umfangreiches Programm an experimentellen Versuchen zur werkstoffwissenschaftlichen Materialcharakterisierung durchgeführt. Dies umfasste so-

wohl routinemäßige langsame Druckversuche, bei denen sich die Probe im mechanischen Gleichgewicht befand, als auch die Durchführung biaxialer Schub-Druck-Versuche zur Untersuchung des neuen Schaummaterials unter mehraxialen Belastungszuständen, wie sie hauptsächlich bei einer Anwendung auftreten. Zur weiter gehenden Charakterisierung für den speziellen Anwendungsfall unter schnellen, dynamischen Belastungen wurden dynamische Druckversuche nach der Split-Hopkinson-Bar-Methode und ballistische Versuche an den Hybridschäumen durchgeführt. In der Dissertation konnte nachgewiesen werden, dass es durch die Beschichtung zu einer erheblichen Steigerung sowohl in der Steifigkeit und Festigkeit als auch im Energieabsorptionsvermögen der Schäume kommt. Im Gegensatz zum Stand der Technik spiegelt sich dieser positive Effekt der Beschichtung auch in den spezifischen Eigenschaften wider, sodass es bei einer dichtespezifisch optimierten Beschichtungsdicke zu mehr als einer Verdopplung des Energieabsorptionsvermögens kommt. Dies ist im Anwendungsfall mit einer Halbierung der benötigten Schaummenge oder einer Verdopplung der absorbierbaren Energiemenge verbunden. Ein Vergleich mit theoretisch berechneten Werten für hypothetische, reine Aluminiumschäume gleicher Dichte bzw. Stegdicke konnte die Überlegenheit der neuen Hybridschäume gegenüber herkömmlichen Schäumen bestätigen. Gleichzeitig konnte durch die hohe Reproduzierbarkeit der Beschichtung die Reproduzierbarkeit der Eigenschaften der Hybridschäume erheblich gegenüber denen von Aluminiumschäumen verbessert werden. Je nach Beschichtungsmetall oder Verfahrensführung erfolgte das Zusammenbrechen einer Porenlage und damit die Lokalisation der Schädigung in unterschiedlichen Bereichen der Schaumproben und kann so auf die Belastung abgestimmt werden. Die besten Ergebnisse wurden mit Ni/Al-Hybridschäumen, d.h. mit Nickel beschichteten Aluminiumsubstratschäumen, erzielt. Es konnte nachgewiesen werden, dass aufgrund unterschiedlicher Porengrößen ein Maßstabeffekt auftritt. Ein Maßstabeffekt bezeichnet das unterschiedliche Materialverhalten bei Änderung der Probengröße. Maßstabeffekte entstehen, wenn die makroskopischen Dimensionen einer Probe in der Größenordnung der Mikroskala, d.h. der Porengröße, liegen. Die Kenntnis über diesen Effekt ist wichtig für die Konstruktion von Bauteilen, da manche Bauteile Dimensionen von wenigen Porengrößen aufweisen. Bei gleichem Verhältnis von Probengröße zu Porengröße fällt der Effekt aber gering aus.

Im Rahmen der Dissertation wurde nicht nur die Energieabsorption bei einer großflächigen Belastung, sondern auch beim Auftreffen kleiner Splitter, wie sie beispielsweise bei der spanenden Metallbearbeitung anfallen, untersucht. In den dafür durchgeführten ballistischen Versuchen trat ein Maßstabeffekt nur bei den Hybridschäumen auf. Dadurch konnte durch die Verwendung von Hybridschäumen bei reduzierter Porengröße eine erhebliche Verbesserung der ballistischen Schutzwirkung erreicht werden. Bei reinen Aluminiumschäumen ist dieser Effekt vernachlässigbar.

Ein weiterer wichtiger Effekt, der aufgezeigt werden konnte, ist, dass es durch die Beschichtung scheinbar zu einem Übergang von einem biegedominierten zu einem dehnungsdominierten Deformationsmechanismus kommt und dadurch eine weitere Festigkeitssteigerung erzielt wird. Unter schneller, schlagartiger, sogenannter Stoßbelastung konnte für die Hybridschäume im Gegensatz zu Aluminiumschäumen eine Verzerrungsratenabhängigkeit im Materialverhalten nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass sich das Materialverhalten je nach Belastungsgeschwindigkeit verändert. Die Kenntnis darüber ist für eine spätere Anwendung unter hohen Belastungsgeschwindigkeiten, wie sie bei einem Crash auftreten, von enormer Wichtigkeit. Ursächlich für die Verzerrungsratenabhängigkeit ist zum einen die Verzerrungsratenabhängigkeit von dem Beschichtungsmaterial Nickel, zum anderen auftretende Mikroträgheitseffekte.

Durch eine umfangreiche strukturelle Charakterisierung, unter Ausnutzung mehrerer Methoden der Werkstoffwissenschaften, wie Lichtmikroskopie, Elektronenmikroskopie, Röntgenbeugung, Röntgencomputertomographie, Nanoindentierung und Electron Backscatter Diffraction, konnten die Struktureigenschaftenbeziehungen der neuen, innovativen Hybridschäume aufgeklärt werden, die zu einem positiven Effekt einer Beschichtung auf die globalen Materialeigenschaften eines Hybridschaums führen. Danach muss für eine Stärkung der beim Biegen und Knicken am stärksten belasteten Randbereiche der Schaumstege eine harte, aber dennoch duktile Beschichtung gewählt werden, damit es nicht zur Ausbildung von Sollbruchstellen aufgrund von Sprödbruch kommt. Die verbesserten Eigenschaften der Hybridschäume im Vergleich zu den Aluminiumsubstratschäumen ähneln dabei dem Prinzip eines Bambusstabs. Dieser hat eine harte äußere Schale und innen Luft. Anstelle von Luft befindet sich in den Hybridschäumen der wesentlich schwächere Aluminiumschaum, der die geometrische Struktur vorgibt. Die mechanischen Eigenschaften stammen fast vollständig von der dünnen nanokristallinen Nickelhülle um die Stege. Durch die auf dem »Zwergenprinzip« der Nanotechnologie basierende Festigkeitssteigerung reichen Schichtdicken von ca. 150 µm aus, um nicht nur eine Verzehnfachung der absoluten, sondern auch mehr als eine Verdopplung der dichtespezifischen Energieabsorption zu erzielen. Dies konnte durch bisherige Beschichtungsverfahren nicht erreicht werden, im Gegenteil, die spezifische Energieabsorption verschlechterte sich bisher.

Simulation statt realer Zerstörung

Da es aus Kostengründen oder mangels Proben meist auch die Forderung nach einem Materialmodell zur Vorhersage des mechanischen Verhaltens für größere Bauteilgeometrien und unterschiedliche Lastsituationen mittels computergestützter Simulation gibt, wurde mit dieser Arbeit bereits eine Vorarbeit dazu geleistet. Auf Grundlage der mechanischen Charakterisierung wurde in der Dissertation ein qualitatives, phänomenologisches Materialmodell, das die Schädigung der Schaumstruktur während eines Druckver-

suchs beschreibt und ein besseres Verständnis des Materialverhaltens der Schäume liefern soll, entwickelt. Das Modell beschreibt das Verhalten der Schäume rein auf Grundlage der in den Versuchen erhaltenen Ergebnisse. Das Deformationsverhalten von Metallschäumen wird durch ihr sogenanntes Spannungs-Verzerrungs-Diagramm wiedergegeben. Darin wird der Verlauf der im Material auftretenden Spannungen als Funktion des Ausmaßes der Belastung aufgezeichnet. Das Spannungs-Verzerrungs-Diagramm von Metallschäumen lässt sich in drei Bereiche, in denen unterschiedliche Deformationsmechanismen vorliegen, unterteilen. Einem kurzen linearelastischen, d.h. reversiblen, Bereich folgt ein Plateau mit nahezu konstanter Spannung über einem sehr großen Verformungsbereich. Das Spannungs-Verzerrungs-Diagramm endet mit einem Verdichtungsbereich, in dem die Spannung stark ansteigt. Durch eine Materialdegradation kann der Schaum mittels des entwickelten Materialmodells in allen drei Bereichen des Spannungs-Verzerrungs-Diagramms abgebildet werden. Im idealelastischen Bereich wird der Schaum wie ein nicht poröses Metall beschrieben, mit Gleichheit von Zug- und Druckfestigkeit, im Verdichtungsbereich wie ein nicht poröses Metall, allerdings ohne Zugfestigkeit. Im idealplastischen Bereich, d.h. dem Bereich des Spannungsplateaus, erfolgt eine Schädigung der Porenstruktur, die ein irreversibles, sukzessives Entfernen des Porenvolumens mit sich bringt und sowohl zunehmende Drucksteifigkeiten als auch den Verlust der Zugfestigkeit bedingt. Durch diese Kopplung von Zug- und Drucklastfall berücksichtigt das Modell die Schädigungsgeschichte des Schaums. Das Modell wurde in ein rheologisches Modell, bestehend aus einer Reihenschaltung mehrerer Federelemente, übertragen, wobei jede Feder für eine Porenlage steht. Beim Auftreten eines Porenkollapses, d.h. der Wegnahme des Porenvolumens, bricht ein Federelement schlagartig auf seine Maximalverzerrung zusammen, wodurch die übrigen Federn entlastet werden. Die Verdichtung wird in dem Modell dadurch abgebildet, dass die gebrochenen Federn keine Spannungen mehr aufnehmen, sondern nur noch übertragen können.

Durch eine auf diesem Modell basierende Simulation können zur Bauteilentwicklung Untersuchungen an virtuellen Hybridschaumbauteilen kostengünstig und materialsparend durchgeführt werden, ohne bereits reale Bauteile zu zerstören. Reale Tests müssen erst anhand der in Simulationen optimierten Bauteile durchgeführt werden.

Materialevolution durch Interdisziplinarität

Durch Zusammensetzung aller bisher interdisziplinär gesammelten Puzzleteile besteht eine umfassende Materialkenntnis, wodurch es möglich war, bereits bestimmte Werkstoffverbundkonzepte für neue Anwendungsbereiche wie Splitterschutzkonzepte in der spanenden Metallbearbeitung zu entwickeln.

Die Dissertation umfasst die gesamte Kette der Entwicklung eines neuen Materials von der Herstellung des Hybridschaums über die methodische und experimentelle Charakterisierung bis hin zur Materialmo-

dellentwicklung zur Modellierung. Um diese drei komplexen Thematiken in einer Dissertation miteinander zu verknüpfen, wurde stark interdisziplinär an der Weiterentwicklung der Metallschäume gearbeitet. Dabei wurden Aspekte der Chemie, der Verfahrenstechnik, der Werkstoffwissenschaften und der Mechanik aufgegriffen. Es wurde sowohl fakultätsübergreifend mit anderen Lehrstühlen der Universität des Saarlandes als auch mit dem Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren zusammengearbeitet. Wichtige Ergebnisse v.a. in Bezug auf das dynamische Werkstoffverhalten wurden durch mehrmonatige Forschungsaufenthalte am Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (ISL) in Frankreich erzielt.

Die durch diese stark interdisziplinäre Zusammenarbeit erzielten Ergebnisse fruchteten in 14 Publikationen, 15 nationalen wie auch internationalen Konferenzvorträgen sowie einem Auftritt auf der Hannovermesse und stellen die Relevanz der Arbeit heraus. Aufgrund des erheblichen Anwendungspotenzials dieses neuen, multifunktionalen Kompositmaterials wurden sowohl ein europäisches als auch ein internationales Patent beantragt.

Materialeinsparung und neue Konstruktionsmöglichkeiten

Die neu entwickelten Hybridschäume vereinen gekonnt die drei Designstrategien des zellulären Leichtbaus, der Nanotechnologie und von Kompositen. Durch die geschickte Kopplung dieser Strategien und die Ausnutzung von Synergieeffekten stellen die Hybridschäume ein innovatives Material dar, wie es für zukünftige Anwendungen sowohl im Leichtbau als auch im Bereich der Absorption kinetischer Energien gebraucht wird. Durch die Möglichkeit zur Füllung der Porenstruktur und die Wahl der Beschichtungsparameter können die Eigenschaften gezielt auf den Anwendungsfall maßgeschneidert werden.

Die tatsächlichen Anwendungsfelder sind aufgrund der Stärkung des Multifunktionalitätsgedanken von Metallschäumen durch die Beschichtung vielfältig und reichen vom Leichtbau in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, Crashenergieabsorbern im Automobil- und Luftfahrtsektor über Panzerungen für Fahrzeuge, Fassadenschutzkonzepte gegen terroristische Angriffe, Schallabsorber und Dämpfungselemente bis hin zu reinen Designanwendungen, wie Deckenvertäfelungen, die beispielsweise zusätzlich die Akustik in Räumen durch die Absorption des Schalls verbessern sollen.

Nicht nur durch die experimentelle, verfahrenstechnische Optimierung des Beschichtungsprozesses, sondern vor allem auch durch die Aufklärung der zugrunde liegenden Theorie war es möglich, den Beschichtungsprozess in Kooperation mit einer deutschen Galvanikfirma erfolgreich vom Labor in den industriellen Maßstab zu überführen, sodass die konkrete Umsetzung in Produkten ermöglicht wird.

Die gesellschaftliche Relevanz zeigt sich ebenfalls durch zahlreiche Anfragen aus Industrie und Forschung. Nicht zuletzt durch die gestiegene terroristische Gefahr und die immer noch auftretenden Bombenfunde aus dem Zweiten Weltkrieg gab es bereits großes Interesse von Sicherheitsinstitutionen wie der Polizei und des Kampfmittelräumdienstes an Schutzkonzepten aus den Ni/Al-Hybridschäumen gegen umherfliegende Splitter, zum Fassadenschutz gegen Anspengungen sowie als Wirkungsdämpfer bei der Explosion von Blindgängern wie erst vor einem Jahr in der Münchner Innenstadt. Konzepte aus Hybridmetallschäumen könnten zu einer Reduktion des Gefahrenbereichs führen, wodurch wesentlich weniger Menschen aus Krankenhäusern, Altenheimen und Privatwohnungen evakuiert werden müssten. Allein in diesem Zusammenhang kann durch Hybridmetallschäume in Zukunft ein riesiges Einsparpotenzial bei gleichzeitigem Sicherheitsgewinn erzielt werden. Des Weiteren gab es Anfragen aus dem Automobilbereich zum Craschutz wie auch von Architekten für funktionale Deckenvertäfelungen.

Neben all den Vorteilen wie der Ressourceneinsparung, der Gewichtsreduktion und der verbesserten Energieabsorption müssen als bisheriger Nachteil die derzeit noch vergleichsweise hohen Herstellungskosten genannt werden, die jedoch nicht auf dem in der Dissertation entwickelten Verfahren, sondern hauptsächlich auf der Schaumherstellung selbst beruhen. Sobald Metallschäumen der kommerzielle Einzug in die Technik gelingt und somit große Mengen benötigt werden, kann durch Massenproduktion der Preis erheblich gesenkt werden. Durch die erzielten Vorteile und die sich aus der Konstruktion von Bauteilen mit Hybridmetallschäumen ergebenden neuen Möglichkeiten wurde ein Schritt in diese Richtung getan.