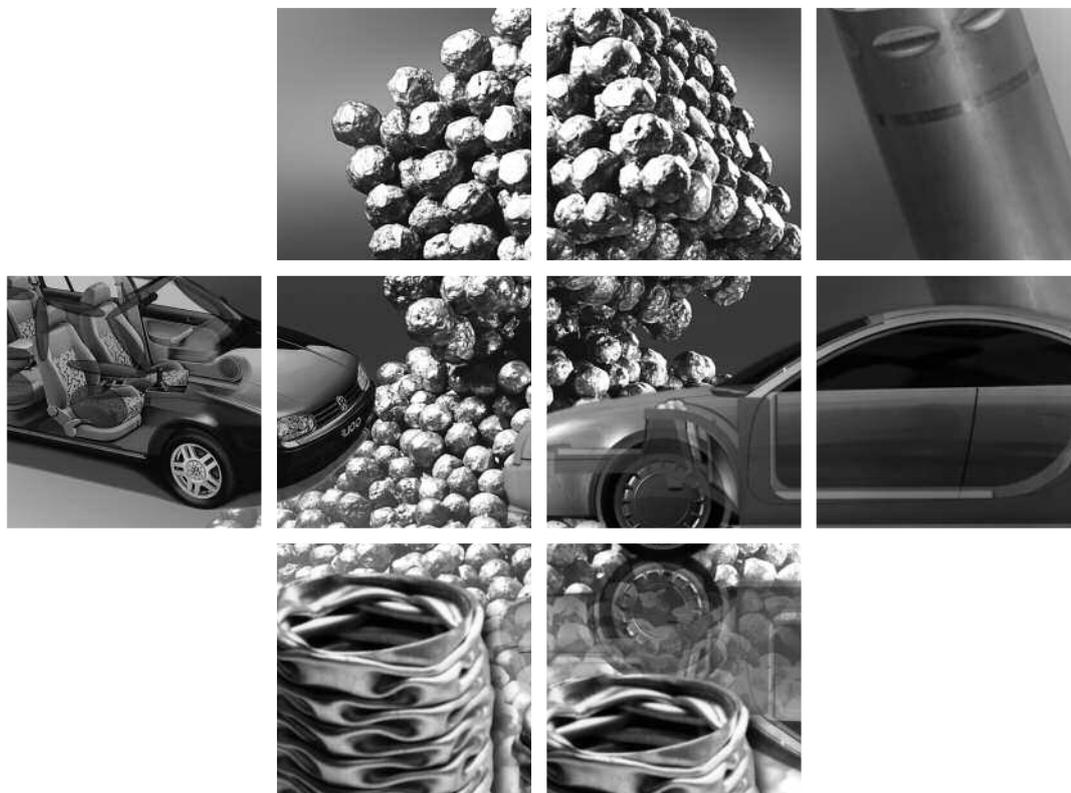


# Aluminiumschäume

»Herstellung, Anwendung, Recycling«





## Inhalt

1.	<b>Aluminiumschäume mit großem Konstruktionspotential (Einleitung)</b>	04		
2.	<b>Schaumherstellung – variabel und vielseitig</b>	05		
2.1	Schmelzmetallurgische Verfahren	05		
2.1.1	Aufschäumen von Schmelzen durch Einblasen von Gas	05		
2.1.1.1	Verfahrensprinzip	05		
2.1.1.2	Herstellung von Formteilen	06		
2.1.2	Aufschäumen von Schmelzen durch Treibmittel	06		
2.1.3	Aufschäumen durch Ausnutzen der temperatur- und druckabhängigen Gaslöslichkeit von Metallschmelzen	07		
2.1.4	Herstellung offenporiger Schäume aus Schmelzen durch Gießen	08		
2.1.5	Schaumherstellung durch Umgießen von Granalien – Syntaktische Schäume	09		
2.1.6	Spray Forming	10		
2.2	Abscheidetechniken	10		
2.3	Pulvermetallurgische Verfahren	10		
2.3.1	Begasung von Metallpulvern	10		
	- Metallpulverschlicker	10		
	- Einschluss von Gasen	11		
2.3.2	Treibmittelgebundene Verfahren	11		
2.3.2.1	Verfahrensschritte	12		
	- Verdichten	12		
	- Aufschäumvorgang	12		
	- Verwendung von Spänen	12		
2.3.2.2	Einflüsse auf das Schäumergebnis	13		
	- Einfluss der Rohstoffeigenschaften	13		
	- Einfluss des Mischens	13		
	- Einfluss des Kompaktierungsverfahrens	13		
	- Zwischenverarbeitungsschritte	14		
	- Schäumvorgang	14		
	- Untersuchung des Aufschäumverhaltens	14		
2.3.2.3	Herstellung von Formteilen	15		
	- Umformung von Halbzeugen	15		
	- Selektive Aufschäumung	15		
	- Aufschäumen in einer Form	15		
	- Schauminjektionsverfahren	16		
	- APM-Technologie	17		
2.3.2.4	Verbundplatten, Verbundelemente	17		
	- Kleben	17		
	- Plattieren	18		
	- APM-Sandwichverbunde	18		
	- Thermisches Spritzen	18		
	- Thermisches Spritzen: easyFoam-Prozess	19		
	- Tailored blanks	20		
3.	<b>Eigenschaften von Aluminiumschäumen</b>	20		
3.1	Eigenschaften und Struktur	20		
	- Prüfung der Struktur	20		
	- Simulationen	20		
3.2	Mechanische Eigenschaften	22		
3.2.1	Schäume ohne Deckblech	22		
	- Druckfestigkeit	22		
	- Einfluss der Außenhaut	22		
	- Einfluss der Schäumrichtung	23		
	- Einfluss der Dichte	23		
	- Einfluss des Legierungsgehaltes	24		
	- Einfluss von Wärmebehandlungen	24		
	- Schubfestigkeit	25		
	- Zugfestigkeit	25		
3.2.2	Aluminiumschaumverbunde mit Deckblechen	26		
	- Aluminiumschaum mit Stahldeckblechen	26		
	- Aluminiumschaum mit Aluminiumdeckblechen	27		
	- Schaumgefüllte Rohre	27		
3.3	Absorption von Verformungsenergie	27		
	- Charakterisierung durch Plateaulage	27		
	- Ausschäumen von Profilen	28		
3.4	Elastizitätsmodul	29		
	- Einfluss der Dichte	29		
	- Einfluss des Legierungsgehaltes	30		
	- Prüfverfahren	30		
3.5	Ermüdungsverhalten	30		
3.6	Physikalische und chemische Eigenschaften	31		
	- Leitfähigkeit	32		
	- Wärmeleitfähigkeit/-dämmung	32		
	- Schall- und Vibrationsdämmung	32		
	- Elektromagnetische Abschirmung	32		
	- Chemische Eigenschaften	33		
4.	<b>Verarbeitung von Aluminiumschaum</b>	33		
4.1	Schraub- und Nietverbindungen	33		
4.2	Löten	34		
4.3	Schweißen	34		
5.	<b>Anwendungen</b>	36		
5.1	Aluminiumschäume im Pkw- und Nutzfahrzeugbau	36		
	- Energieabsorption	36		
	- Leichtbau	37		
	- Dämmung	37		
	- AFS - Aluminium Foam Sandwich	38		
5.2	Aluminiumschäume im Bauwesen	39		
5.3	Aluminiumschäume in Klima-, Kälte- und Lufttechnik	39		
5.4	Möbel und Accessoires – Aluminiumschaum als Designobjekt	40		
	- Leuchten	40		
	- Möbel	41		
	- Accessoires	41		
5.5	Aluminiumschäume im Maschinenbau	41		
6.	<b>Recycling und Ökologie</b>	42		
	<b>Literatur</b>	43		

Für die inhaltliche Überarbeitung dieses Merkblattes danken wir Frau Dr.-Ing. Catrin Kammer, Goslar

## 1. Aluminiumschäume mit großem Konstruktionspotenzial

Im Zusammenhang mit der Realisierung innovativer Leichtbaukonzepte ist ein verstärktes Interesse an Metallschäumen, insbesondere aus Aluminium und Aluminiumlegierungen, zu verzeichnen. Obwohl diese Werkstoffgruppe seit ca. 50 Jahren bekannt ist, hat sie einen vergleichsweise geringen Bekanntheitsgrad. Dies liegt vor allem darin begründet, dass frühere schwer kontrollierbare Verfahrensvarianten es nicht gestatteten, Schaumaluminium mit reproduzierbaren Eigenschaften herzustellen.

Für weitere Forschungen sprachen jedoch die zu erwartenden Eigenschaften, die aus den Eigenschaften natürlicher hochporöser Materialien abgeleitet wurden. Beispielsweise liegt die Porosität von Holz oder Knochen oberhalb von 50 %, beide besitzen eine hohe Steifigkeit mit geringem spezifischen Gewicht und ein sehr gutes Energieabsorptionsvermögen. Könnte ein Metall mit ähnlichen Eigenschaften ausgestattet werden, würde dies den Metallen - und hier gerade Aluminium - vielfältige neue Anwendungsmöglichkeiten erschließen.

Erste Schaumaluminiumproben waren Erfolg versprechend. Es gelang, durch einen der Herstellung von Schaumstoffen ähnlichen Aufschäumprozess einen hochporösen metallischen Werkstoff herzustellen.

Das Ergebnis war ein stark expandiertes, spezifisch leichtes Material mit zellulärer Struktur. Die Poren konnten je nach Herstellprozess offen (sog. Zellulare Metalle) oder geschlossen (Metallschäume) sein und mehr als drei Viertel des Volumens ausmachen. Die Werkstoffe bestachen je nach Porosität durch gute Eigenschaften (z.B. Gasdurchlässigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit) in Verbindung mit einem sehr niedrigen spezifischen Gewicht. Die in früheren Jahren unternommenen Versuche zur Herstellung von Metallschäumen bargen jedoch erhebliche verfahrenstechnische Probleme hinsichtlich der Reproduzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit und konnten sich nicht durchsetzen.

In jüngerer Zeit entwickelte Verfahrensvarianten hingegen versprechen eine deutlich bessere Qualität des geschäumten Metalls, was das wieder erwachte Interesse an dieser Werkstoffgruppe zu einem Teil erklärt. Eine weitere Erklärung sind aber auch geänderte Rahmenbedingungen hinsichtlich der Anwendung des Werkstoffes, insbesondere die Suche der Automobilindustrie nach leichten, stoßabsorbierenden und dabei nicht brennbaren Werkstoffen. Nur mit derartigen Werkstoffen lassen sich sicherheitstechnische aber auch ökologische Anforderungen an ein modernes Fahrzeug realisieren. Andere denkbare Anwendungsgebiete gibt es im Maschinenbau, dem Bauwesen oder auch in der chemischen Industrie.

Erste einzelne Anwendungen der Metallschäume sowie interessante Prototypen und Konzeptstudien stimmen optimistisch. Sogar Designer entdeckten das ungeahnte künstlerische Potenzial des neuen Materials.

Für die auf technischer Seite noch geringe Verbreitung sind neben preislichen Gründen Vorbehalte auf Konstruktursseite verantwortlich, die sich aus zu geringem Wissen über diese interessante Werkstoffgruppe ergeben.

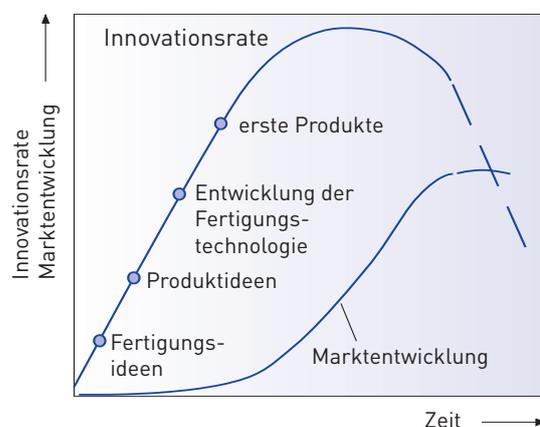
Unabhängig für einen breiten Einsatz von Metallschaum sind:

- reproduzierbare Metallschäume,
- allgemein gültig anwendbare Eigenschaften,
- grundlegende Bearbeitungsparameter,
- grundlegende Konstruktionsparameter sowie
- Aussagen zum Korrosionsverhalten.

Lösungsansätze gibt es aber auch schon hier: So können Computersimulationen helfen, zur schnelleren Akzeptanz des Werkstoffes in diesen Bauteilen und zudem zur Senkung der Entwicklungskosten beizutragen. Unter dieser Zielsetzung wurden bereits verschiedene Modelle entwickelt.

Wirken in diesem Sinne – wie dies in den letzten Jahren verstärkt der Fall ist – Schaumhersteller, Prüf- und Forschungsinstitute sowie potenzielle Anwender zusammen, ist mit Bauteilen aus oder mit Metallschäumen in relativ kurzer Zeit zu rechnen (Bild 1). Zu beachten ist aber immer: Chancen haben nur Anwendungen, bei denen mehrere Eigenschaften zum Tragen kommen, nicht nur die Leichtigkeit allein. Hierfür gibt es in der Regel schon kostengünstigere Alternativen.

**Prognostizierte Innovationsrate und Marktentwicklung von Metallschäumen (Fraunhofer-IFAM Bremen) (Bild 1)**



## 2. Schaumherstellung - variabel und vielseitig

Grundsätzlich sind bei der Herstellung von Schäumen die zwei wichtigen Hauptverfahrensgruppen

- der schmelzmetallurgischen Erzeugung und
- der pulvertechnologischen Herstellung

zu unterscheiden.

Entsprechend dieser Verfahrensgruppen sollen die wichtigsten Herstellverfahren nachfolgend erläutert werden.

Zu beachten ist aber: Da streng genommen auch bei der zweiten Verfahrensvariante eine schmelzflüssige Phase im Schäumprozess auftritt, ist auch eine Unterscheidung nach direktem und indirektem Aufschäumen üblich:

- Danach geht das direkte Verfahren von einer durch homogen verteilte nichtmetallische Partikel stabilisierten Schmelze aus, die durch ein von außen eingeblasenes Gas aufgeschäumt wird. Alternativ ist auch der Einsatz von Treibmitteln möglich, die in der Schmelze Gase freisetzen.
- Das indirekte Verfahren geht von einem festen Aluminiumvormaterial aus, das ein Treibmittel in feiner Verteilung enthält. Beim Erwärmen und Aufschmelzen wird das Treibmittel frei, das Metall schäumt auf. Der feste Vorkörper kann dabei sowohl pulvermetallurgisch als auch schmelzmetallurgisch hergestellt werden.

Daneben gibt es noch einige Sonderverfahren, so z.B. das Sputterverfahren, die elektrochemische Abscheidung und das Sintern loser Pulver, wobei letzteres zwar ein nichtkompaktes Material, aber streng genommen keinen Schaum im Sinne der jetzt üblichen Terminologie ergibt. Hinzu kommt, dass letztgenanntes Verfahren nicht für Aluminiumpulver anwendbar ist. Der Grund dafür liegt in der die Aluminiumpartikel umgebenden Oxidschicht, die ein spontanes Sintern verhindert.

### 2.1 Schmelzmetallurgische Verfahren

Die Erzeugung geschlossener Metallschäume durch direktes Aufschäumen von Schmelzen beginnt stets mit einem Erschmelzen des Aluminium-Matrixmetalls. Anschließend werden je nach Verfahrensvariante Natrium, Calcium, Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , oder Siliciumcarbid  $\text{SiC}$  zur Erhöhung der Viskosität der Schmelze eingerührt (Eindicken). Im weiteren Vorgehen bestehen dann je nach Verfahren Unterschiede, die im Wesentlichen darauf beruhen, dass

- in der ersten Variante Gas von außen in die Schmelze eingeblasen wird bzw.
- im zweiten Fall das Gas in der Schmelze („in-Situ“)

gebildet wird. Möglich wird dies durch vorherige Zugabe eines geeigneten Treibmittels.

Beide Verfahrensweisen haben sich mittlerweile etablieren können. Daneben gibt es einige Sonderverfahren, die z.B. die temperaturabhängige Gaslöslichkeit von Schmelzen ausnutzen, Polymerschäume zur Erzeugung einer Gießform verwenden oder gar Platzhalter verwenden.

#### 2.1.1 Aufschäumen von Schmelzen durch Einblasen von Gas

Dieses Verfahren wurde im Rahmen der Entwicklung von MMC (metal matrix composites) entdeckt. MMCs sind Verbundwerkstoffe, deren metallischer Matrix durch das Einbringen von zumeist keramischen Verstärkungspartikeln bestimmte Eigenschaften verliehen werden. Auf Aluminiumbasis hergestellte MMCs enthalten zumeist die Verstärkungskomponenten  $\text{SiC}$  oder  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Zu ihrer Herstellung wurden verschiedene Wege beschritten; erprobt wurden z.B. pulver- oder schmelzmetallurgische Verfahren. Quasi als Nebenprodukt der schmelzmetallurgischen MMC-Forschungen etablierte sich eine neue Variante der Schaumherstellung. Es wurde beobachtet, dass sich beim Vergießen von MMC-Schmelzen durch die eingewirbelte Luft an der Schmelzoberfläche ein Blasenhaufwerk von relativ hoher Stabilität bildete, d.h. die Blasen zerplatzen kaum. Die Ursache für die beobachtete hohe Stabilität lag dabei in den keramischen Verstärkungspartikeln.

##### 2.1.1.1 Verfahrensprinzip

Gezielte Forschungsarbeiten führten zur Entwicklung einer Schäumtechnologie, bei der - wie in den Bildern 2 und 3 ersichtlich - ein Gas (z.B. Luft, Stickstoff oder Argon) mit einem rotierenden Impeller oder vibrierenden Gasdüsen in eine MMC-Schmelze (mit 10 - 20 %  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder  $\text{MgO}$ , Teilchengröße ca. 5 bis 20  $\mu\text{m}$ ) geblasen wird. Der entstehende Schaum wird, z.B. mit Hilfe eines Förderbandes, als Platte abgeschöpft - eine kontinuierliche Fertigung ist damit möglich. Über die Gasmenge und die Impellerdrehzahl lässt sich die Porenstruktur beeinflussen. Wichtigste Aufgabe von Impeller- oder Düsensystem ist die Einstellung feiner, gleichmäßig verteilter Gasblasen. Die Porosität ist im Bereich von 80 % bis 98 % variierbar, dies entspricht einer Dichte von 0,069 bis 0,54  $\text{g/cm}^3$ . Die Wanddicken der Poren lassen sich im Bereich von 50 bis 85  $\mu\text{m}$  einstellen. Das Verfahren wird stetig weiterentwickelt, so z.B. hinsichtlich eines vertikalen Herausziehens des Schaums. Damit soll einer bei der horizontalen Fertigung möglichen Anisotropie der Eigenschaften entgegengewirkt werden.

Kommerzielle Anwendung findet dieses Verfahren u.a. bei der Firma Cymat zur Herstellung von Aluminiumschaum unter der Bezeichnung SAF (Stabilized Aluminium Foam). Eine bereits installierte Produktionslinie kann bis zu 1000 kg SAF/h herstellen. Die Plattendicken liegen

■ Aluminiumschäume – Herstellung, Anwendung, Recycling

im Bereich von 6 bis 100 mm bei einer Breite von bis zu 1,5 m. Die Länge kann 15 m erreichen.

Eine weitere Alternative ist die Verwendung von MMC-Recyclaten als Vormaterial. Diese von der Hütte Kleinreichenbach (Österreich) entwickelte Variante ist eine kostengünstige Möglichkeit sowohl der Schaumherstellung als auch des Recyclings von aluminiumbasierten MMC, deren Recycling sonst teuer und aufwendig ist.

**Verfahrensschritte beim Schäumen partikelverstärkter Schmelzen (Cymat) (Bild 2)**



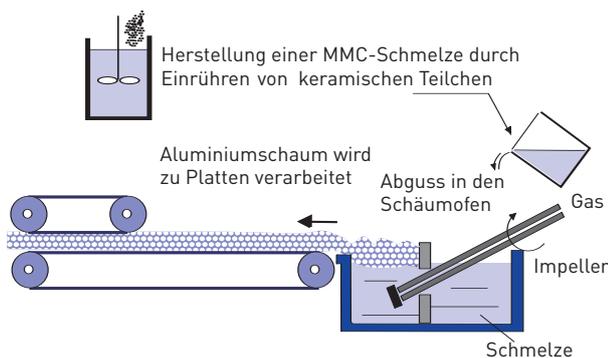
**2.1.1.2 Herstellung von Formteilen**

Ein gewisser Nachteil besteht darin, dass MMC-Werkstoffe prinzipiell schwer zu bearbeiten sind. Durch die eingelagerten Keramikpartikel werden Schneidwerkzeuge schnell stumpf, die Umformbarkeit ist erschwert.

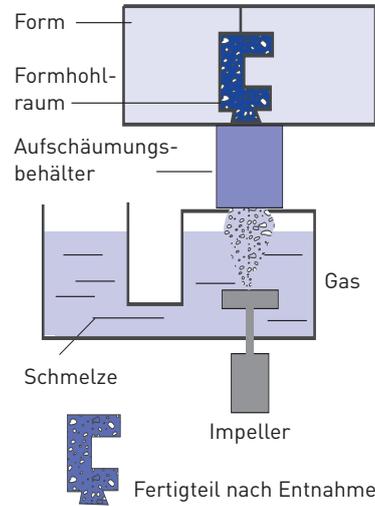
Der Nachbearbeitungsaufwand lässt sich jedoch verringern, wenn die Formgebung bereits in der flüssigen Phase erfolgt, wie es beispielsweise mit einem Niederdruckgießverfahren möglich ist (Bild 4). Ein anderer möglicher Weg zu Formteilen ist eine Formgebung des aus der Schmelze abgeschöpften Schaumes durch Walzen.

Die im Bild5 gezeigte Verfahrensentwicklung sieht ein Einblasen von Gas (wie N<sub>2</sub> oder O<sub>2</sub> oder einem Gemisch beider) in eine Schmelze vor. In dieser enthaltene kleine SiC- oder

**Prinzip des Schäumens partikelverstärkter Schmelzen (nach Cymat) (Bild 3)**



**Herstellung von Schaumformteilen durch Niederdruckguss (nach Cymat) (Bild 4)**



Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Teilchen stabilisieren die entstehenden Gasblasen bis zur Erstarrung. Das Verfahren erlaubt es, Schaumformteile mit geschlossener Außenhaut aus einer Aluminiumschmelze zu erzeugen und dabei gleichzeitig die Eigenschaften der Teile gezielt zu beeinflussen. Als besonders wichtig wird das Erzielen einer gleichmäßigen, inneren Porenstruktur gesehen, da sich dann auch gleichmäßigere Eigenschaften ergeben.

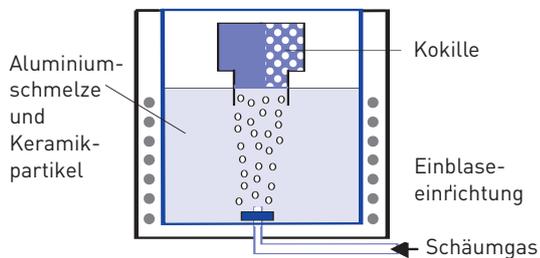
Die Gaseinblaseeinrichtung wird so gestaltet, dass Gasblasen einheitlicher Größe entstehen. Damit wird der Schaum nun nicht in undefinierter Form von der Schmelze abgezogen, sondern füllt eine Kokille. Sobald diese gefüllt ist, wird die Kühlung wirksam und die Zellstruktur erstarrt. Auf diese Weise entstehen die erwünschten Formteile mit geschlossener Außenhaut. Die Kokille kann mit dem erstarrenden Formteil von der Schmelze abgenommen und durch eine neue Kokille ersetzt werden.

**2.1.2 Aufschäumen von Schmelzen durch Treibmittel**

Beim sog. ALPORAS-Verfahren wird mit einem rotierenden Impeller ein Treibmittel, in der Regel TiH<sub>2</sub>, in die Schmelze gerührt (Bilder 6, 7). Die Aluminiumschmelze wurde zuvor bei 680 °C mit Calcium versetzt und einige Minuten gerührt. Dadurch steigt die Viskosität beachtlich, zurückzuführen auf die Bildung von stabilisierenden Phasen (CaO, CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Al<sub>4</sub>Ca, s. auch Bild 8).

Das Einrühren des Treibmittels muss unter der Zielstellung einer homogenen Porenverteilung besonders rasch erfolgen, denn die Zersetzungstemperatur der meisten Treibmittel liegt unterhalb der Schmelztemperatur des Aluminiums. Bei Erwärmung in einer geschlossenen Kokille zersetzt sich das Treibmittel und es kommt zur Expansion des Schaums. Nach Abkühlen der Kokille wird als Ergebnis ein Metallschaum mit einer Porosität von 89 - 93 %

Schematische Einrichtung für einen Prozess zur Formteilerzeugung aus partikelverstärktem Aluminiumschaum (METCOMB, Schemazeichnung nach LKR Ranshofen) (Bild 5)



erhalten, dessen Dichte zwischen  $0,2 \text{ g/cm}^3$  und  $0,3 \text{ g/cm}^3$  liegt. Die Blockgewichte betragen ca. 160 kg, eine typische Porengröße liegt im Bereich von 2 bis 10 mm. Platten (gebräuchlichste Dicke 10 mm) werden durch Sägen erzeugt. Nachteil: Mit diesem kokillengebundenen Verfahren ist keine Herstellung von Formteilen möglich.

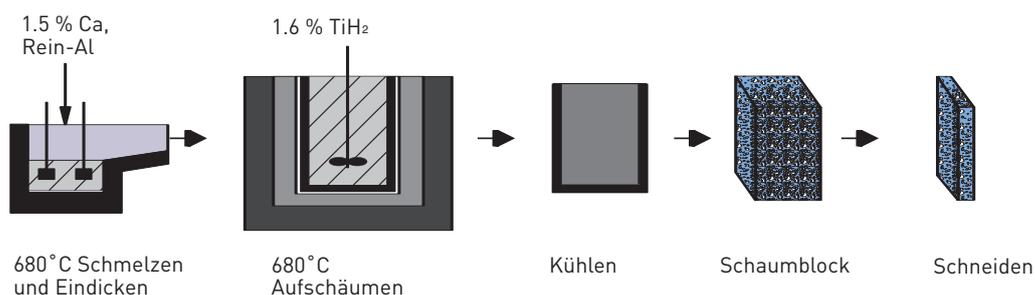
### 2.1.3 Aufschäumen durch Ausnutzen der temperatur- und druckabhängigen Gaslöslichkeit von Metallschmelzen

Einem anderen Prinzip folgt das Verfahren GASAR, bei dem die druck- und temperaturabhängige Löslichkeit von Wasserstoff in der Schmelze ausgenutzt wird. Dieser Effekt ist vor allem den Gießern unangenehm bekannt, führt er doch

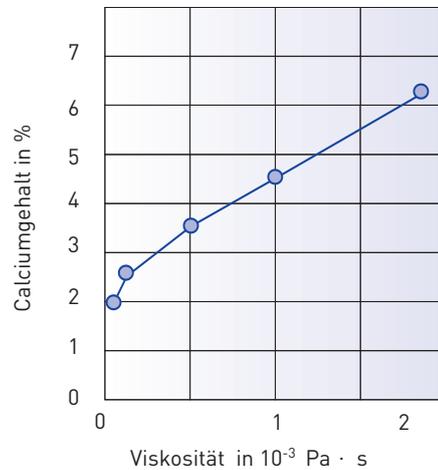
Schritte des ALPORAS-Verfahrens (nach Baumeister) (Bild 6)



Verfahrensprinzip des ALPORAS-Verfahrens - direktes Aufschäumen von Schmelzen mittels Treibmittel (nach Miyoshi) (Bild 7)

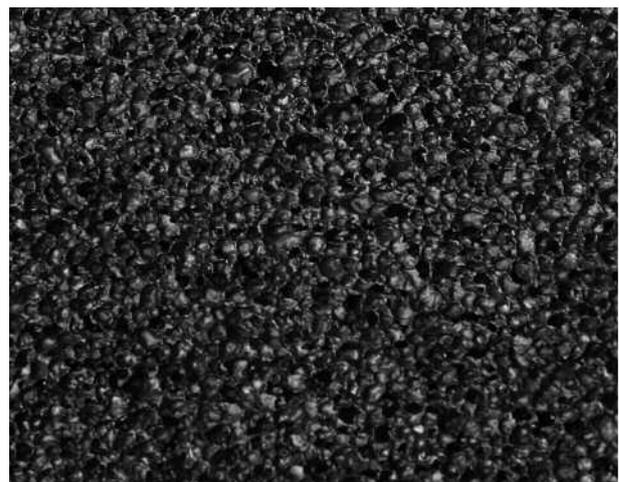
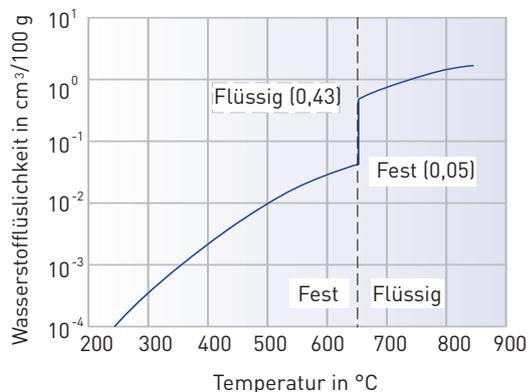


Einfluss des Calciumgehaltes auf die Viskosität einer Aluminiumschmelze nach einer Rührzeit von 10 min (nach Banhart) (Bild 8)



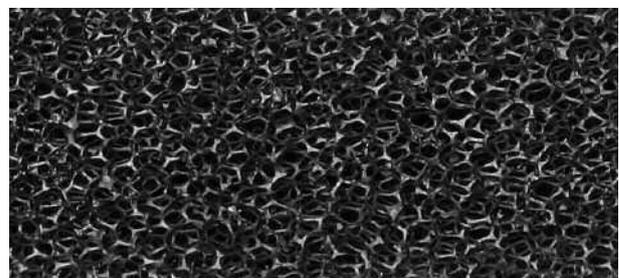
zur unerwünschten Porosität von Gussstücken. Ein gewisser Betrag von Wasserstoff ist nahezu immer in Aluminiumschmelzen atomar gelöst. Die Löslichkeit ist temperaturabhängig und durch einen großen Löslichkeitssprung bei der Erstarrungstemperatur gekennzeichnet. Bild 9 zeigt die Verhältnisse für Reinaluminium unter Gleichgewichtsbedingungen. Der mit sinkender Temperatur freierwerdende Wasserstoff führt zur Blasenbildung. Die Menge und Verteilung der Gasporen ist von verschiedenen Faktoren abhängig, z.B. von der gelösten Gasmenge, von den Abkühlungsbedingungen, von den Möglichkeiten für die Blasenkeimbildung (Reinheit der Schmelze) sowie den Möglichkeiten für das Entweichen des Gases. Die Wasserstofflöslichkeit wird unter Gleichgewichtsbedingungen von der Legierungszusammensetzung und der Temperatur bestimmt. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge eröffnet eine weitere Möglichkeit zur gezielten Einstellung von Blasen im Metall.

Temperaturabhängigkeit der Wasserstofflöslichkeit von Reinaluminium (Bild 9)



Struktur eines geschlossenporigen Schaums (Foto: Metall) (Bild 11a)

Schritte des GASAR-Verfahrens (nach Baumeister) (Bild 10)



Struktur eines offenporigen Schaums (Foto: Metall) (Bild 11b)

Unter erhöhtem Druck kann eine Aluminiumschmelze sogar noch weitaus mehr Wasserstoff lösen, ein Effekt, der beim in der Ukraine entwickelten GASAR-Verfahren ausgenutzt wird (Bild 10). Das Erschmelzen erfolgt hierbei im Autoklaven. Nachfolgend wird  $H_2$ -Gas unter Überdruck in der Schmelze gelöst. Die so gesättigte Schmelze kann nun innerhalb des Autoklaven in eine Kokille gegossen werden. Bei einer anschließenden gerichteten Erstarrung unter reduziertem Wasserstoffdruck scheidet sich der Wasserstoff an der Erstarrungsfront aus. Auf diese Weise ergibt sich eine gerichtete Porenstruktur im Material. Je nach Erstarrungsrichtung sind neben axialen auch radiale Porenverteilungen einstellbar, was ggf. dem jeweiligen Einsatzfall angepasst werden könnte. Die erreichbare Porosität liegt bei 5 % bis 75 %, die Porendurchmesser liegen im Bereich von 10  $\mu m$  bis 10 mm. Aufgrund der gerichteten Erstarrung sind Porenlängen von 100 bis 300 mm möglich.

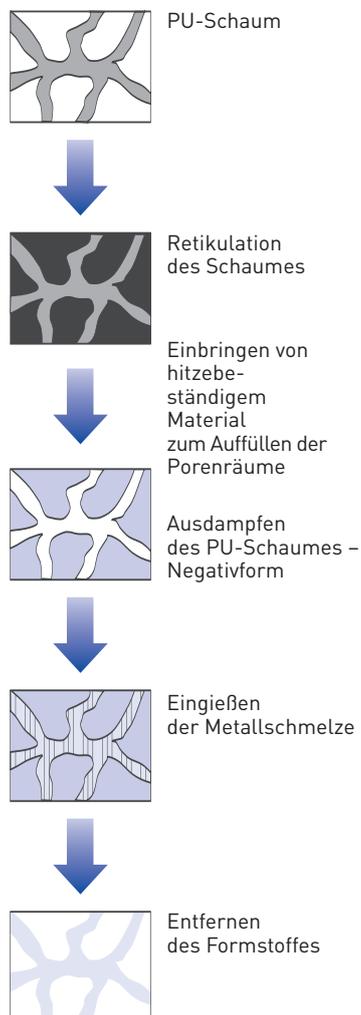
Speziell für Magnesium wurde das sog. „Vacuum Foaming“ entwickelt (LKR, Österreich), das als Vormaterial dünnwandige Druckguss-Magnesiumschrotte verwendet, die naturgemäß aufgrund des Gießprozesses Wasserstoff in gelöster Form bzw. in Hydriden enthalten. Zur Erhöhung der Viskosität der daraus entstandenen Schmelze können Späne zugesetzt werden. Außerdem erfolgt die Verarbeitung im halbflüssigen Zustand (semi-solid). Das Material wird schnell aufgeschmolzen, in eine Form gegossen und dann in einem Autoklaven evakuiert. Dabei dehnt sich die Schmelze aus. Gleichzeitig bilden sich Gasblasen.

2.1.4 Herstellung offenporiger Schäume aus Schmelzen durch Gießen

Bei allen bisher genannten Verfahren entstehen geschlossporige Schäume (Bild 11a). Daneben ist aber auch die Herstellung offenporiger Schäume möglich (Bild 11b). Diese zeigen im Gegensatz zu den geschlossporigen Varianten ein offenes, maschenartiges Porennetz, das – je nach Herstellungsprozess – große aber auch relativ filigrane Poren aufweisen kann.

Offenporige Schäume entstehen unter Nutzung von PU-Schaum. Wichtigstes Hilfsmittel ist hierbei ein offenporiger PU-Schaum (s. Bild 12), aus dem eine Gießform erzeugt wird. Die notwendige offenporige Struktur dieses Kunststoffschlams wird durch eine sogenannte Retikulation erzeugt. Dabei handelt es sich um eine thermophysikalische Schockbehandlung, die restliche Zellmembranen entfernt. Anschließend wird ein hitzebeständiges Material auf den retikulierten PU-Schaum gebracht, das ähnlich wie beim Feinguss die Porenräume auffüllt. Ein nachfolgendes Brennen dient der Konsolidierung vor dem Eingießen des Metalls. Durch eine Zersetzung oder Verdampfung wird der PU-Schaum anschließend entfernt und Metall in die so gewonnenen Hohlräume gegossen. Schließlich wird der Formstoff entfernt (z.B. durch Wasserstrahlen), das erstarrte Metall bildet nunmehr exakt die Porenstruktur des ursprünglichen PU-Schlams ab. Die Porosität liegt im Bereich von 80 % bis 90 %.

### Verfahrensschritte Feinguss-Verfahren (nach Baumeister) (Bild 12)



### 2.1.5 Schaumherstellung durch Umgießen von Granalien - Syntaktische Schäume

Eine weitere Möglichkeit der Herstellung poröser Werkstoffe besteht darin, Granalien geringer Dichte (anorganisch, auch organisch möglich) mit Metallschmelze zu umgießen (Bild 13).

Die Granalien dienen als Platzhalter. Sie können nach dem Abguss im metallischen Produkt verbleiben, sodass ein sogenannter syntaktischer Schaum mit einer geschlossenzelligen Schaumstruktur entsteht. Der aus dem Griechischen stammende Begriff „syntaktisch“ bedeutet „zusammengesetzt“.

Wenn der Anteil der Platzhalter so groß ist, dass alle Granalien miteinander verbunden sind, ist es möglich, die Kugeln durch Laugung in geeigneten Lösungen, Säuren oder durch eine Wärmebehandlung zu entfernen. Als

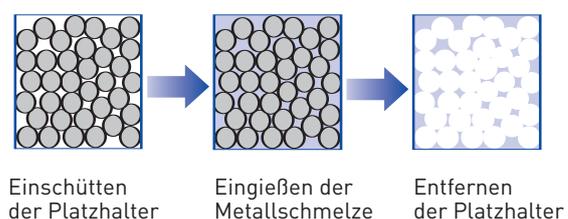
Platzhalter kommen die unterschiedlichsten Werkstoffe in Betracht, beispielsweise bei Magnesium keramische Hohlkugeln aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Mullit oder  $\text{TiO}_2$  (Bild 14). Für Aluminium können auch Kugeln aus üblichen Gießereisanden und einem geeigneten Binder verwendet werden. Sie werden unter leichten Vibrationen gleichmäßig in eine Sand- oder Dauerform gefüllt, dann im Schwerkraftguss mit Schmelze umgossen. Durch die Gießhitze zersetzen sich die Platzhalterkugeln. Ein rückstandloses Entfernen des nun losen Sandes ist durch die Durchstoßpunkte zwischen den Poren möglich, an denen sich die Platzhalter zuvor berührt haben. Zur Anwendung können hierbei Druckluft oder Vibrationen kommen. Von Vorteil ist, dass das Verfahren die Herstellung von Verbundstrukturen erlaubt.

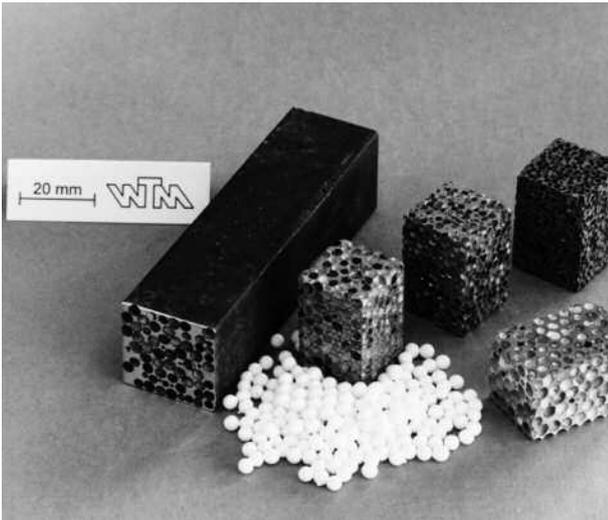
Diskutiert werden daneben auch lösliche Salze, Sandpellets, Schaumglaskugeln oder Aluminiumoxidhohlkugeln. Polymerkugeln können als organische Platzhalter verwendet werden, wenn die Erstarrung der Schmelze schnell erfolgt. Zudem ist es notwendig, unter hohem Druck zu infiltrieren, beispielsweise in einer Druckgussmaschine.

Über das Verfahren ist auch die Herstellung von Sandwichstrukturen möglich. Hierfür werden die Kugeln beispielsweise zu einem selbsttragenden Formkörper verklebt, der nachfolgend infiltriert wird. Die monolithische Außenhaut der Sandwichstruktur wird dabei während der Infiltration gegossen. Eine weitere Möglichkeit besteht im Ausgießen einer mit Hohlkugeln gefüllten Außenhautstruktur.

Die im Bild 14 gezeigten syntaktischen Schäume auf Magnesiumbasis enthalten Kugeln mit einem Kugeldurchmesser von 1 bis 5 mm bei einer Wandstärke von 50 bis 250  $\mu\text{m}$ . Die Schüttdichte der Kugeln wird mit 0,2 bis 0,9  $\text{g}/\text{cm}^3$  angegeben. Die eigentliche Schaumherstellung erfolgt im Infiltrationsgussverfahren nach Schmelzen des Metalls im Autoklaven unter Schutzgas. Nach dem Evakuieren des Autoklaven wird der Anguss in einer mit keramischen Hohlkugeln gefüllten Infiltrationskapsel in die Schmelze abgesenkt. Unter einem anschließend von außen aufgetragenen Argon-Druck wird die Schmelze nach oben in die Kapsel gedrückt.

### Herstellung poröser Werkstoffe durch Umgießen von Granalien (Bild 13)





Syntaktischer Magnesiumschaum (Foto: WTM Erlangen-Nürnberg) (Bild 14)

### 2.1.6 Spray Forming

Auch das unter dem Namen „Osprey-Prozess“ bekannt gewordenen „Spray Forming“ erlaubt die Fertigung von Schäumen. Prinzipiell sieht das Verfahren vor, eine metallische Schmelze zu verdüsen (atomisieren) und dann auf ein Substrat zu sprühen. Merkmale der dann entstehenden Probe sind ihr geringer Oxidgehalt, das feine Korn und der hohe Anteil metastabiler Gefügephasen. Wird beim Versprühen zusätzlich ein Pulver eingeblasen, das bei Kontakt mit der verdüsten Metallschmelze große Gas-mengen freisetzt, so können sich Poren im abgeschiedenen Metall entwickeln (Bild 15).

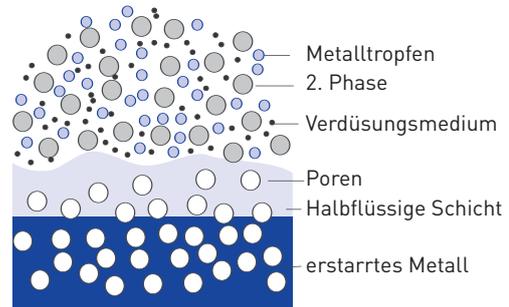
### 2.2 Abscheidetechniken

Ausgangspunkt der Herstellung offenporiger Schäume nach einer Abscheidetechnik ist wiederum ein retikulierter Kunststoffschäum (s. 2.1.4), auf den hier aber eine elektrisch leitende Schicht gebracht wird (z.B. durch PVD oder durch Tauchen in eine Graphitlösung). Auf dieser Schicht scheidet sich anschließend das zu schäumende Metall galvanisch ab. Der PU-Schaum wird durch Zersetzung oder Verdampfung entfernt. Die erreichbaren Porositäten liegen je nach Verfahren im Bereich von 88 % bis 98 % (Verfahrensvarianten CELLMET und RETIMET, Bild 16). Bisher haben diese Verfahren jedoch keine Bedeutung für die Herstellung von Aluminiumschäumen erlangt.

### 2.3 Pulvermetallurgische Verfahren

Für die pulvermetallurgische Schaumherstellung sind zwei prinzipielle Verfahrensvarianten zu unterscheiden, dargestellt im Bild 17. Sie arbeiten entweder mit Metallpulvern, die von außen begast werden (links im Bild 17) oder mit Metallpulvern, in die ein Treibmittel eingebracht wird (rechts im Bild 17).

#### Erzeugung einer porösen Struktur durch Spray-Forming (schematisch, nach Banhart) (Bild 15)



#### Verfahrensschritte Retimet-Verfahren (nach Baumeister) (Bild 16)



### 2.3.1 Begasung von Metallpulvern

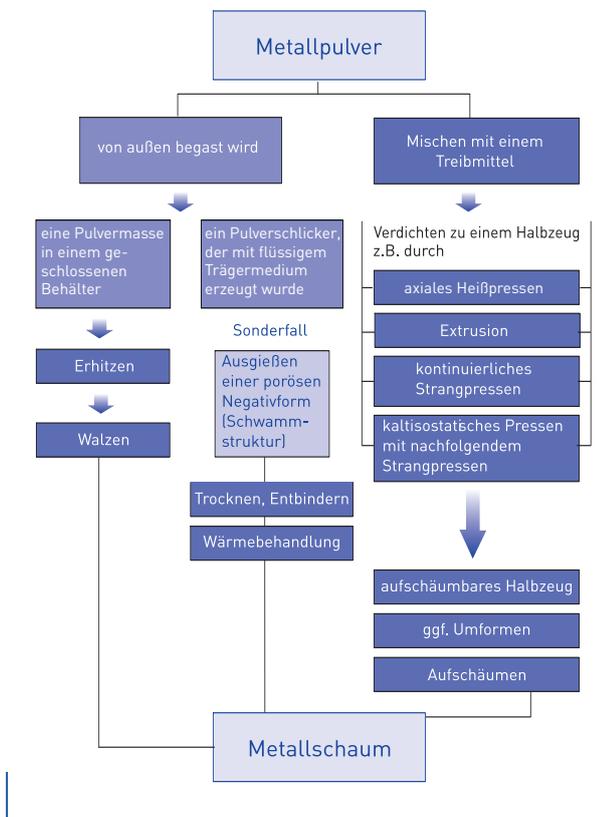
Bei den Begasungsverfahren, die auf der Verwendung von Metallpulvern basieren, sind zwei Verfahrensvarianten zu unterscheiden - je nachdem, ob ein flüssiger Schlacker oder eine Pulvermasse begast wird. Beide Verfahrensvarianten haben geringere Bedeutung.

#### Metallpulverschlicker

Nach den in der Mitte des Bildes 17 gezeigten Verfahrensvarianten wird mit einem geeigneten flüssigen Trägermittel ein Schlacker hergestellt, der anschließend begast wird. Das Einbringen von Gasen ist auch durch Rühren oder durch geeignete Treibmittel möglich. Der nach dem Trocknen entstandene Schaum ist von sehr geringer Festigkeit. Durch eine Wärmebehandlung bei ca. 100 °C lässt sich diese geringfügig erhöhen. Höhere Festigkeiten lassen sich nicht erzielen, da sich aufgrund der stabilen Oxidschichten der Aluminiumpartikel keine metallische Bindung zwischen den einzelnen Teilchen ausbilden kann. Der hohe elektrische Widerstand des Materials ist ebenfalls darauf zurückzuführen.

Einen Sonderfall der auf Metallpulverschlicker basierenden Verfahren stellt das ebenfalls im Bild 17 erfasste Ausgießen einer organischen Schwammstruktur dar, d.h. in diesem Fall entfällt die Begasung von außen. Nach vollständiger Füllung der Poren des Schwammes wird der Trägerwerkstoff durch thermische Zersetzung aufgelöst und das feingliedrige Porengerüst durch eine Wärmebehandlung verfestigt.

**Verfahrensvarianten zur pulvermetallurgischen Herstellung von Aluminiumschäumen (Bild 17)**



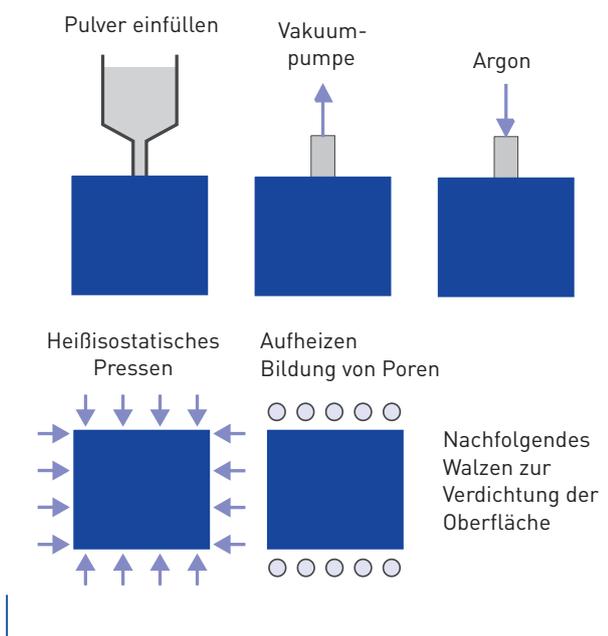
**Einschluss von Gasen**

Ebenfalls über Begasung arbeitet das Gas Entrapment, d.h. der Einschluss von Gasen. Hierbei wird ein hermetisch verschließbarer Container mit dem Metallpulver gefüllt. In die Pulvermasse wird anschließend ein Inertgas, beispielsweise Argon, eingepresst. Das Gas füllt die Räume zwischen den Pulverpartikeln aus. Beim Erhitzen verschmelzen die Pulverteilchen miteinander und schließen das Gas ein. Wird der so entstandene Metallblock anschließend erhitzt und gewalzt, erzeugt das dann expandierende Gas einen Metallschaum (Bild 18). Das Verfahren wurde beispielhaft für Titan erprobt.

**2.3.2 Treibmittelgebundene Verfahren**

Von weitaus größerer Bedeutung im Zusammenhang mit den Verfahren der modernen Aluminiumschaumherstellung sind die im rechten Teil von Bild 17 gezeigten Verfahrensvarianten, die die Verwendung eines Treibmittels vorsehen. Das Grundprinzip besteht darin, in Aluminiumpulver bzw. -späne feinverteilt ein Treibmittel einzumischen und daraus über geeignete Verfahrensschritte (Kompaktieren, ggf. Umformen) ein Halbzeug zu erhalten, das durch Erwärmung aufgeschäumt werden kann (s. Verfahrensschema). Unter der Wärmewirkung zerfällt das Treibmittel und setzt dabei Gase frei, die sich in dem dann gerade flüssigen Metall verteilen. Das Ergebnis ist ein Schaum mit einer überwiegend geschlossenen Porosität und einer dichten Außenhaut. Eine Vielzahl von Formen ist herstellbar.

**Gas Entrapment (schematisch nach Banhart) (Bild 18)**



**Hinweis:**

Das Auftreten einer flüssigen Metallphase im Moment des eigentlichen Aufschäumens macht die verfahrenstechnische Abgrenzung schwierig, denn unter Berücksichtigung dieser Tatsache ließe sich das Verfahren auch den schmelzflüssigen Verfahren zuordnen. Ebenso sinnvoll ist aber eine Abgrenzung danach, ob der Ausgangsstoff eine Schmelze oder ein Pulver war. Dementsprechend sollen diese Verfahren nachfolgend den pulvermetallurgischen (PM) Varianten zugeordnet werden.

**Verfahrensschema der treibmittelgebundenen Verfahren**

Material	Schritte
Metallpulver Treibmittel	Mischen von Aluminiumpulver und Treibmittel Kompaktieren der Pulvermischung
Aufschumbares Halbzeug	ggf. Umformen ggf. Schneiden Aufschäumen durch Erwärmung
Endprodukt: Metallschaum	weitere Ver- /Bearbeitung

**Legierungen**

Prinzipiell lässt sich jede Aluminiumlegierung nach diesen Verfahren schäumen, wenn die Kompaktier- und Schumparameter bekannt sind.

## ■ Aluminiumschäume – Herstellung, Anwendung, Recycling

Übliche Legierungen für das Schäumen sind Knetlegierungen der Reihen

- 1XXX (Reinaluminium),
- 2XXX- (Al-Cu) und
- 6XXX- (Al-Mg-Si).

Auch Gusslegierungen, wie beispielsweise AlSi7 oder AlSi12 werden häufig geschäumt. Die Vorteile liegen hierbei in einem niedrigen Schmelzpunkt und günstigen Schäumeigenschaften.

### 2.3.2.1 Verfahrensschritte

Alle auf Metallpulvern basierenden Schaumherstellungsverfahren beginnen mit einem Mischen des Metallpulvers (handelsübliche Pulver aus Aluminium oder Aluminiumlegierungen) mit einem Treibmittel (für Aluminium und Aluminiumlegierungen 0,4 bis 0,6 Gew.-%  $\text{TiH}_2$ ).

#### Verdichten

Diese Mischung wird anschließend unter definierten Bedingungen zu einem Halbzeug verdichtet.

Zur Auswahl stehen verschiedene Kompaktierungsverfahren, z.B. axiales Heißpressen bzw. Extrusion (Bild 19), kontinuierliches Strangpressen (z.B. MEPURA-Verfahren) oder kaltisostatisches Pressen mit nachfolgendem Strangpressen (Bild 20). Als aufwendiger und daher nur für spezielle Anwendungen geeignet haben sich das Pulverwalzen und das axiale Heißpressen erwiesen.

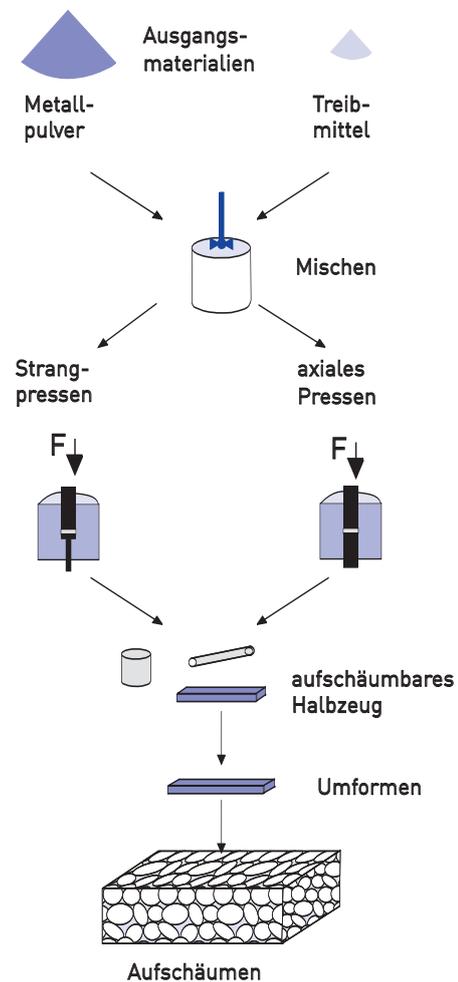
#### Aufschäumvorgang

Das erhaltene aufschäumbare Halbzeug-Material ist äußerlich nicht von konventionellem Metall zu unterscheiden und kann – wenn gewünscht – umgeformt werden. Wird es anschließend bis knapp über den Schmelzpunkt erwärmt, setzt das Treibmittel große Gasmengen (bei  $\text{TiH}_2$  Wasserstoff) frei und löst damit den Aufschäumvorgang aus. Es entsteht ein geschlossenporiger Metallschaum. Über die Aufschäumbedingungen können Schaumdichte und Porenform gesteuert werden (s. 2.3.2.2). Durch Abkühlung unter den Schmelzpunkt wird der Schäumprozess bei Erreichen der gewünschten Dichte abgebrochen und die Schaumstruktur stabilisiert. Die erreichbaren Porositäten liegen zwischen 60 % und 85 %. Eine kostengünstige Herstellung bieten kontinuierlich arbeitende Schäumkonzepte an, beispielsweise in einem Banddurchlaufofen.

#### Verwendung von Spänen

Thema eines aktuellen Forschungsprojekts, das vom IFAM, Bremen gemeinsam mit der IWE GmbH & Co. KG, Greifswald, durchgeführt wird, ist die Untersuchung von Verfahrensvarianten für die gießtechnische Herstellung aufschäumbaren Aluminiumhalbzeugs. In diesem Projekt werden verschiedene Verfahrensvarianten für Aluminiumschaum untersucht, ein Schwerpunkt liegt auf einer

### Pulvermetallurgische Herstellung von Metallschäumen (Fraunhofer-IFAM Bremen, FOAMINAL, nach Baumeister) (Bild 19)



Technologie, die dem PM-Verfahren sehr ähnlich ist. Es wird hierbei das Aluminiumpulver durch Späne ersetzt. Verwendung finden ungereinigte Späne, welche bei einem Plattenlieferanten in größerer Menge sortenrein anfallen. Die Späne werden mit Treibmittelpulver und eventuell anderen Zusätzen vermischt und anschließend auf Brikkettierpressen verdichtet. Die gepressten Bolzen werden erwärmt und im teilflüssigen Zustand auf einer Kaltkammer-Druckgießmaschine vergossen. Auf diese Weise konnte komplex geformtes aufschäumbares Halbzeug hergestellt werden (bisher mehrere hundert kg für die Untersuchungen).

Derzeitige Untersuchungen betreffen die optimierte Abstimmung der Zusätze auf die eingesetzte Legierung. Erste Ergebnisse zum Einsatz des Thixogießverfahrens zur Herstellung von Metallschaum aus  $\text{AlMg}_4,5\text{Mn}_0,7$ - (5083)-Sägespänen stimmen optimistisch (nach Haesche, IFAM).

### 2.3.2.2 Einflüsse auf das Schäumergebnis

Das Schäumergebnis wird, wie bereits angedeutet, von verschiedenen Parametern bestimmt. Hierzu gehören

- die Rohstoffeigenschaften (z.B. Teilcheneigenschaften des Pulvers, Zusammensetzung, Treibmittelanteil),
- die Halbzeugherstellung (z.B. Mischbedingungen, Kompaktierungsverfahren, Halbzeuggeometrie, Umformverfahren) und
- die Schäumbedingungen (z.B. Temperatur-Zeit-Profil, Atmosphäre, Abkühlbedingungen, Schäumform).

Bei der Kontrolle des Schäumprozesses mit dem Ziel der Einstellung gleichmäßiger Schaumstrukturen handelt es sich also um eine sehr komplexe Aufgabenstellung. Bild 20 gibt einen Überblick über die Einflussfaktoren, die von Bedeutung sein können.

#### Einfluss der Rohstoffeigenschaften

Die Pulverteilchengröße beeinflusst die erreichte Schaumstruktur nur wenig. Ein Vorteil aller PM-Verfahren besteht darin, dass es möglich ist, die Zusammensetzung von Aluminiumlegierungen in weiten Bereichen zu variieren - ein Effekt, der auch in der konventionellen Pulvermetallurgie zur gezielten Einstellung bestimmter Werkstoffeigenschaften ausgenutzt wird. Hier dient diese Möglichkeit zusätzlich dazu, den Schäumprozess hinsichtlich wichtiger Eigenschaften, wie z.B. der Viskosität oder der Oberflächenspannung zu optimieren. Somit kann die Schaummorphologie bereits über die Legierungszusammensetzung innerhalb gewisser Grenzen gesteuert werden.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Treibmittelgehalt. Untersuchungen ergaben beste Effekte mit einem Zusatz von 0,5 Gew.-%  $\text{TiH}_2$  (nach IFAM).

Einflussfaktoren auf das Schäumen von Metallen (nach Fraunhofer-IFAM Bremen) (Bild 20)



#### Einfluss des Mischens

Auch der Mischvorgang ist von wesentlicher Bedeutung für das Schäumergebnis. Ziel ist es, das Treibmittel möglichst homogen zu verteilen. Nur dann setzt die Wasserstoffabspaltung - im Idealfall - an allen Stellen gleichzeitig und gleichmäßig ein. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für eine einheitliche, gradientenfreie Porenstruktur.

Nach den jetzt üblichen Verfahren erfolgt das Mischen mit Hilfe konventioneller Methoden, beispielsweise in einem Taumelmischer. In jedem Mischertyp ist auch die Mischgeschwindigkeit von Bedeutung. Zudem muss berücksichtigt werden, dass manche Pulver zur Entmischung neigen.

Erst nach Optimierung aller Faktoren lässt sich eine zufriedenstellende homogene und feine Verteilung des Treibmittels erreichen.

#### Einfluss des Kompaktierungsverfahrens

Das Ziel der Kompaktierung besteht darin, ein Halbzeug mit möglichst geringer Restporosität und einem kleinen Dichtegradienten bei weitgehender Pressfehlerfreiheit zu erzeugen. Wichtige Einflussparameter wie

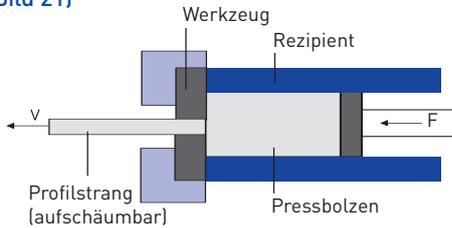
- Kompaktierungszeit,
- Kompaktierungsverfahren,
- Kompaktierungstemperatur (s. auch Abschnitt Untersuchung des Schäumverhaltens, unten),
- Kompaktierungsdruck sowie die
- Kompaktierungsatmosphäre

müssen dafür auf die Kompaktierungseigenschaften der Pulver abgestimmt werden. Zusätzlich ist zu beachten, dass Legierungspulver ein von Pulvermischungen abweichendes Kompaktierungsverhalten besitzen.

Das **kaltisostatische Pressen** verdichtet die lose Pulverschüttung mit einer Dichte von 25 % bis 35 % der theoretischen Dichte des Aluminiums auf 70 % bis 85 %. Bei diesem Verfahren wird die Pulvermischung in eine gummielastische, flüssigkeitsdichte Form gegeben, die verschlossen in einen Rezipienten gebracht wird. Unter allseitigem Druck von 1000 bis 2000 bar, ausgeübt durch Wasser als Druckmedium, wird der Bolzen gleichmäßig - abgestimmt auf die spätere Verwendung - verdichtet. Zu beachten ist, dass auch die Halbzeugform (Probengeometrie, -masse) das spätere Schäumverhalten beeinflussen kann.

Durch das **Strangpressen** (Bild 21) können die Bolzen weiter verdichtet werden. Hierbei werden die Pulverteilchen umgeformt. Die auf Aluminiumpulver immer gegenwärtigen Oxid- und Hydroxidteilchen werden aufgebrochen und die einzelnen Partikel miteinander verschweißt. Durch die Begrenzung des Prozesses auf Temperaturen, die unter der Zersetzungstemperatur des Treibmittels liegen, be-

**Kompaktierung von aufschäumbarem Material durch Strangpressen (Schunk, Gießen; Honsel, Meschede) (Bild 21)**



darf das Strangpressen einer exakten Prozessabstimmung hinsichtlich des Pressdruckes, der Pressgeschwindigkeit und der Temperatur.

**Zwischenverarbeitungsschritte**

Vor dem eigentlichen Aufschäumen können mit dem Ziel der Herstellung von Formteilen Umformungen erfolgen (s. auch 2.3.2.3). Auch diese beeinflussen je nach Umformgrad das Aufschäumverhalten, ebenso wie eventuelle Wärmebehandlungen.

**Schäumvorgang**

Bei diesem Vorgang wird die eigentliche Schaumstruktur eingestellt. Der Prozess beginnt wie andere Wachstumsprozesse mit einer Keimbildung, d.h. der Ausbildung erster wachstumsfähiger Poren. Anschließend wachsen die Poren, da immer mehr Treibmittel freigesetzt wird. Bei weit fortgeschrittener Aufschäumung brechen nun auch einzelne Poren auf und vereinigen sich mit anderen Poren. Ähnlich wie bei der Ostwald-Reifung werden kleinere Poren durch größere Poren aufgezehrt (Porenkoaleszenz). Die Folge: Es kommt zur Verringerung der inneren Oberfläche.

Problematisch beim Schäumen ist die sog. Drainage, ein Vorgang, der durch das Herauslaufen des Metalls zu einem immer dünneren Schaum führt. Ursache ist die bei höherer Temperatur niedrigere Viskosität der Schmelze. Die dann dünnflüssige Schmelze kann im Extremfall sogar am Formboden zusammenfließen. Über der Schmelze bleibt dann ein sich selbst stabilisierender Schaum aus Aluminiumoxid zurück.

Alle beim Schäumen zu beobachtenden bzw. möglichen Teilprozesse hängen sehr stark von der Temperaturführung ab, die sich ihrerseits aus der Schäumform, den Teilegeometrien, dem Formaufbau, dem Formwerkstoff, der Ofenatmosphäre und der Legierungszusammensetzung ableitet. Im Zusammenhang mit der Porenkoaleszenz und der Drainage sind vor allem die Oberflächenspannung und Viskosität der Schmelze von Bedeutung, die von der Legierungszusammensetzung und wiederum von der Temperatur abhängig sind. Geprüft wird z.B., die Drainage durch Beimengung von hochschmelzenden, gerüstbildenden Partikeln als Stabilisatoren zu unterdrücken. Unter Wirkung dieser Stabilisatoren könnte das Abfließen der Schmelze aus den Zellstegen vermieden

werden, wobei dieser Effekt stark von der jeweils verwendeten Zusatzphase abhängt. So zeigten Untersuchungen der Universität Nottingham, die den Zusatz von  $Al_2O_3$  und  $TiB_2$  zu aufschäumbarem Al-TiH<sub>2</sub>-Vormaterial prüften, keine Behinderung der Drainage. Das Benetzungsverhalten war in diesen Fällen schlecht, die keramischen Phasen befanden sich in den Zellwänden und ragten in die Zellen hinein. Bei Zusatz von SiC hingegen war die Benetzung gut, die keramische Phase ragte nicht in die Zellen hinein. Die Drainage wurde deutlich reduziert, was in einer besseren Schaumstabilität resultierte (s. Kennedy).

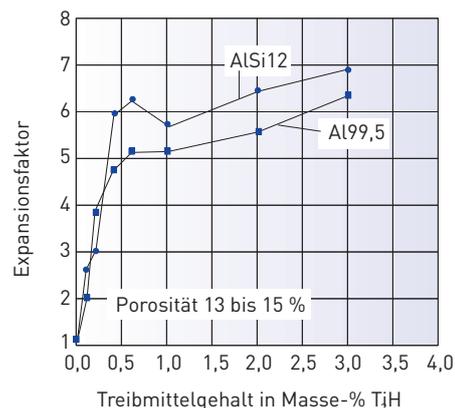
Als Wärmequellen beim Schäumen können verschiedene Ofensysteme eingesetzt werden. So sind es im Labormaßstab Kammer- oder Induktionsöfen. Für eine Serienfertigung sollten aus wirtschaftlichen Gründen größere Ofentypen verwendet werden, insbesondere Durchlauföfen wie Band- oder Hubbalkenöfen.

**Untersuchung des Aufschäumverhaltens**

Untersuchungen des Aufschäumverhaltens sind aufgrund ihrer komplexen Art nicht von herkömmlichen Untersuchungsverfahren ableitbar. Wie Untersuchungen des Schäumverhaltens mittels Synchrotron-Röntgenstrahlung ergaben, können Beobachtungen des Aufschäumens wässriger Schäume nicht unbedingt übertragen werden.

Eine vom IFAM Bremen entwickelte Methode zur Charakterisierung des Schäumverhaltens sieht die Bestimmung eines Expansionsfaktors vor, der u.a. in Abhängigkeit vom Treibmittelgehalt, Temperatur, Ausgangspulver, Kompaktierung usw. aufgenommen werden kann. Die Messung selbst erfolgt mit einem Dilatometer, indem das schäumende Metall einen Stempel nach oben drückt. Möglich ist auch die Verfolgung des Schäumprozesses mit Hilfe eines Lasersensors, mit dem die Expansion des Schaumes gemessen wird.

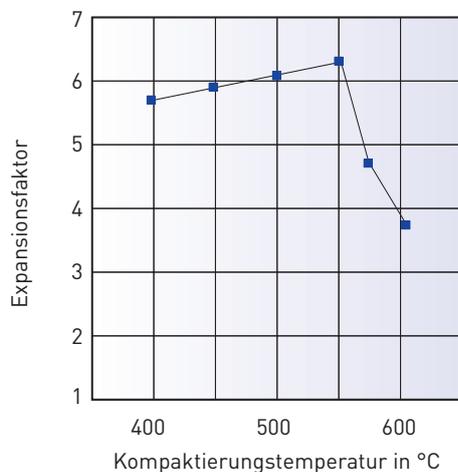
**Maximaler Expansionsfaktor von AlSi12 und Reinaluminium Al99,5 in Abhängigkeit vom Treibmittelanteil (Fraunhofer-IFAM Bremen, Banhart) (Bild 22)**



Auf diese Weise wurde der bereits genannte optimale Treibmittelgehalt von 0,5 %  $\text{TiH}_2$  bestimmt. Bild 22 zeigt den maximalen Expansionsfaktor zweier Aluminiumlegierungen in Abhängigkeit vom Treibmittelgehalt (dilatometrische Messung). Verblüffend ist zunächst, dass sogar in Proben ohne Treibmittel eine geringe Expansion verzeichnet wurde. Dies erklärt sich durch das Freiwerden von beim Kompaktieren eingeschlossenen Gasen - ein Effekt, der je nach Kompaktierungsverfahren und Pulverart mehr oder weniger stark ausgeprägt ist.

Bei  $\text{TiH}_2$ -Zugabe ist nun bei beiden Legierungen bis zu ungefähr 0,6 % ein starker Anstieg zu verzeichnen. Wird die Zugabe über diesen Wert hinaus erhöht, ergibt sich nur noch eine geringe Zunahme des Expansionsvermögens. Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass der dann in großen Mengen vorhandene Wasserstoff durch Diffusionsvorgänge verloren geht und somit nicht mehr zur Porenbildung beiträgt. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich bei Laseruntersuchungen des Schäumverhaltens von  $\text{AlSi7}$ : Ein optimaler Treibmittelgehalt wurde ebenfalls bei 0,5 %  $\text{TiH}_2$  ermittelt.

**Maximaler Expansionsfaktor von Reinaluminium Al99,7 mit 0,8 %  $\text{TiH}_2$  in Abhängigkeit von der Kompaktierungstemperatur beim Heißpressen (Fraunhofer-IFAM Bremen, Banhart) (Bild 23)**



Daneben bestimmen auch die Parameter des Kompaktierens den Aufschäumvorgang. Bild 23 zeigt dies am Beispiel der Kompaktierungstemperatur beim Heißpressen. Eine hohe Kompaktierungstemperatur ist prinzipiell von Vorteil, da sie dazu beiträgt, die Restporosität des Halbzeuges zu senken und Pressfehler wie Mikrorisse zu vermeiden. Dennoch sollte die Temperatur nicht zu sehr erhöht werden, da sich sonst das Treibmittel bereits während des Kompaktierens zersetzt. Dieses dann beim Aufschäumen nicht mehr zur Verfügung stehende Gas ist die Ursache für den in der Kurve zu beobachtenden Abfall des Expansionsfaktors bei Temperaturen oberhalb von 550 °C.

### 2.3.2.3 Herstellung von Formteilen

Für die technische Nutzung der Schaumwerkstoffe ist besonders interessant, dass aus Aluminiumschaum Formteile gefertigt werden können. Dabei sind mehrere Herstellungswege möglich, unter denen je nach Anwendungsfall gewählt werden kann.

#### Umformung von Halbzeugen

Bei dieser Verfahrensvariante wird das Halbzeug vor dem Aufschäumen wie ein treibmittelfreies Halbzeug umgeformt. Hierfür kommen alle konventionellen Methoden in Betracht, wie beispielsweise das Walzen, Schmieden oder Strangpressen. Auf diese Weise sind dann auch gebogene Bleche, (Hohl-) Profile, Stangen oder sogar recht komplexe Teile herstellbar. Eine Expansion ist bei diesen Verfahrensschritten nicht zu befürchten, wenn die Verarbeitungstemperatur unterhalb der Schmelztemperatur liegt. In diesen Grenzen sind also auch Warmumformprozesse möglich, die höhere Umformgrade erlauben. Umformungen lassen sich auch an schaumgefüllten Verbundplatten vornehmen (s. Kap. 2.3.2.4).

#### Selektive Aufschäumung

Die Herstellung eines Formteiles ist auch möglich, indem das Halbzeug nur selektiv aufgeschäumt wird. Ein solches Teil kann Vorteile haben, da die nicht aufgeschäumten Bereiche noch ihre hohe Dichte aufweisen und in einem Bauteil z.B. als Krafteinleitungsbereiche genutzt werden können.

#### Aufschäumen in einer Form

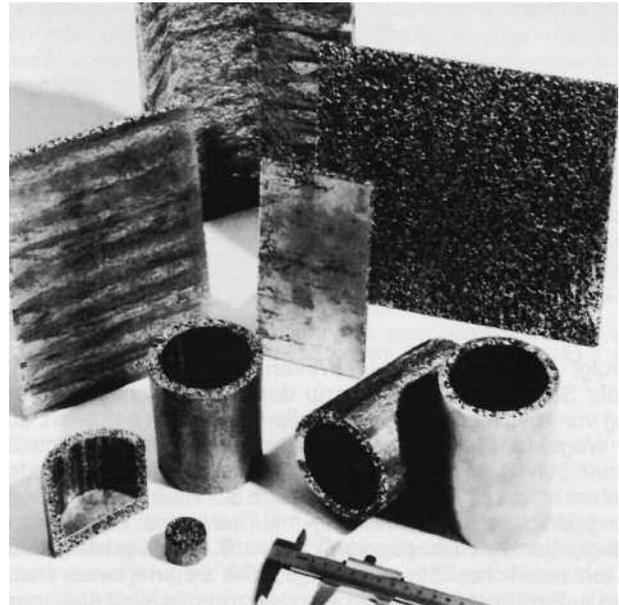
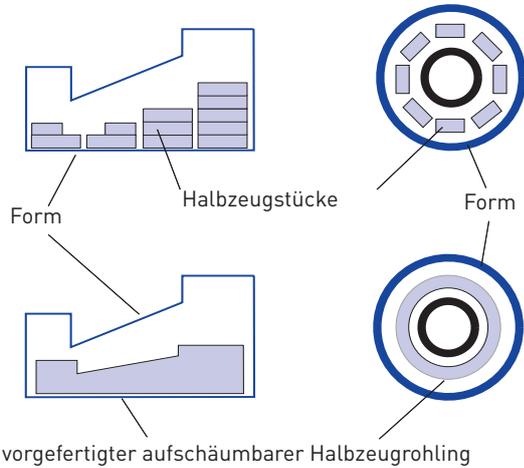
Eine zusätzliche Vielzahl von zum Teil recht komplizierten Formenvarianten lässt sich realisieren, wenn aufschäumbare Halbzeuge in einer Form aufgeschäumt werden. Auf diese Weise lassen sich Formteile oder Werkstoffverbunde herstellen, die mit Schäumen gefüllt sind.

Mehrere Wege sind möglich:

Im Bild 24 (oben) werden einzelne Halbzeugabschnitte in die Form gelegt und dort aufgeschäumt.

Es ist auch möglich, wie im Bild 24 (unten) gezeigt, einen Miniaturrohling in eine Form zu legen und dann aufzuschäumen. Im Idealfall expandiert der Rohling beim nachfolgenden Erwärmen über die Schmelztemperatur des Aluminiumlegierungspulvers in jede Raumrichtung gleichmäßig. Um ein Kleben in der Form zu verhindern, ist es zweckmäßig, wie beim Gießen üblich eine Schlichte aufzutragen. Die Abkühlung der Formen erfolgt an Luft. Bei der Formgestaltung ist ähnlich vorzugehen wie bei der Gestaltung von Gussteilen, d.h. starke Querschnittübergänge sind zu vermeiden. Auszugsschrägen sind von Vorteil. Die Schäumform muss unbedingt hitze- und thermoschockbeständig sein. Eine sehr hohe Festigkeit

**Ausschäumen von Formen mit aufschäumbaren Halbzeugen (Schunk, Gießen, Honsel, Meschede) (Bild 24)**



Teile aus Schaumaluminium („Alulight“, Foto: Mepura und Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen; Österreich) (Bild 25)

muss sie hingegen nicht aufweisen, da das schäumende Metall keinen großen Druck auf die Formwand ausübt. In der Regel werden Stahlbleche bzw. Stahlrohre zum Formenbau verwendet.

Beispiele für Formteile (Stangen, Platten und dreidimensionale Bauteile) zeigt Bild 25.

**Schauminjektionsverfahren**

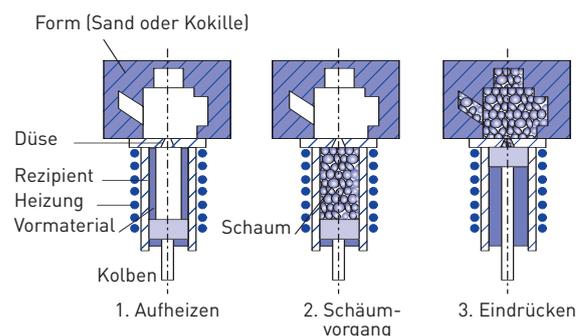
In einer an das Spritzgussverfahren angelehnten Technologie können komplex gestaltete Aluminiumschaum-Formteile mit Dichten im Bereich von 0,5 bis 1,0 g/cm<sup>3</sup> gefertigt werden (s. Bild 26). Ausgangsmaterial ist auch in diesem Fall ein aus Aluminiumpulver und Treibmittel hergestelltes aufschäumbares Halbzeug, das über kontinuierliches Strangpressen verdichtet wurde. Dieses wird in den im Bild 27 (Teilbild 1) gezeigten Rezipienten gebracht. Anschließend wird das Halbzeug auf die Schmelztemperatur der Legierung aufgeheizt, wodurch sich ein flüssiger Schaum ergibt (Teilbild 2). Dieser wird nach oben in die gewünschte Form – aus Sand oder Metall – eingepresst (Teilbild 3). Die so entstandenen Formkörper haben eine dichte Aluminiumhaut, die die mechanischen Eigenschaften des Schaumes verbessert (s. auch Kap. 3.2.1). In Abhängigkeit von der Gießtechnologie kann die Dicke dieser Außenhaut variiert werden.

Zusätzlich eröffnet das Verfahren eine Möglichkeit, in Gießereien Sandkerne einzusparen. Die bisher aus Gründen der Gewichtsersparnis gezielt in Gussstücke eingebrachten Hohlräume könnten durch Schäume ausgefüllt werden. Diese Schaumstrukturen verbleiben im Gussteil, so dass die Arbeits- und Energiekosten für die Entfernung der Sandkerne entfallen. Mit Aluminiumschaumkernen könnten somit geschlossene Leichtbaubereiche in Gussteilen erzeugt werden, die verschiedene Vorteile hätten,



Aluminiumschaumformteile, hergestellt über einen Gießprozess (Neumann Alu Foam, Marktl, Österreich) (Bild 26)

**Prinzipskizze des pulvermetallurgischen Verfahrens zur Herstellung von Formteilen aus Schaumaluminium (nach Neumann AluFoam, Marktl/Österr.) (Bild 27)**



insbesondere die Verbesserung der mechanischen (Festigkeit, Biegesteifigkeit) und akustischen Eigenschaften sowie des Vibrations- und Crashverhaltens. Genau mit einem solchen Zusatznutzen könnten Aluminiumschaumkerne die vergleichsweise höheren Materialkosten durch eine Steigerung der Performance ausgleichen. Das höhere Gewicht aluminiumschaumhaltiger Gussteile könnte durch die in vielen Fällen mögliche Reduzierung der Außenwanddicke kompensiert werden.

#### APM-Technologie

Mit der APM-Technologie stellte das Fraunhofer-IFAM in Bremen eine weitere Prozessvariante vor, die eine einfache, flexible und kostengünstige Bauteilfertigung erlaubt. Bei dieser Variante des IFAM-Verfahrens werden Metallschaumbauteile aus einer Vielzahl kleinvolumiger Metallschaumelemente zusammengefügt (Bilder 28 bis 30). Die Schaumelemente können je nach Bedarf in verschiedenen Formen/Geometrien hergestellt werden.

Die Verfahrensvariante wird als „Advanced Pore Morphology (APM)“-Technologie bezeichnet. APM Metallschaumbauteile bestehen aus einer Vielzahl kleinvolumiger Metallschaumelemente, die durch eine separate Fügeoperation (z.B. Kleben) miteinander verbunden werden. Dieses Vorgehen bietet verschiedene Vorteile. Beispielsweise lassen sich Porenstruktur/Eigenschaften unabhängig von Bauteilform und -volumen definiert einstellen.

Es sind homogene, mehrphasige und/oder lokal gradierte Porenstrukturen möglich. Mono-, bi- oder multimodale Mischungen von APM-Elementen mit variierenden Eigenschaften (Dichte, Geometrie, Material) können realisiert werden. Die Gesamtdichte ist zwischen  $0.3 \text{ g/cm}^3$  und  $1.0 \text{ g/cm}^3$  (bei Al-Legierungen) frei variierbar. Das eingesetzte Fügeverfahren und die Schaumelemente bestimmen die Oberflächenstruktur der APM-Schaumbauteile.

APM-Formbauteile können aufgrund des „Schüttgut“-Charakters der kleinen Schaumelemente voll automatisiert hergestellt werden. Der signifikant vereinfachte Metallschaumexpansionsprozess sowie die Einsparung temperaturbeständiger Schäumformen ermöglichen wettbewerbsfähige Herstellungskosten.

#### 2.3.2.4 Verbundplatten, Verbundelemente

Trotz vieler interessanter Eigenschaften der Schäume genügen ihre undefinierten und mechanisch unbeständigen Metallschaumoberflächen unter Umständen nicht den Anforderungen der Industrie – einer der Gründe dafür, warum die neue Werkstoffklasse „Metallschäume“ mit ihrem eigentlich hohen Einsatzpotenzial immer noch ein Nischenprodukt ist. Die Oberfläche eines geschlossenenporigen Metallschaums weist weder technisch nutzbare Verschleißschutz- noch Reibeigenschaften auf. Daneben besteht bei vielen geplanten und teilweise realisierten Beispielen die Notwendigkeit einer optischen Veredelung.



APM-Elemente (Mitte: Klebstoff beschichtet) und gefüllte Hohlstruktur (Foto: Fraunhofer-IFAM Bremen) (Bild 28)



Querschnitt eines einzelnen Schaumelementes (Foto: Fraunhofer-IFAM Bremen) (Bild 29)



Beispielkörper – Würfel aus APM (Foto: Fraunhofer-IFAM Bremen) (Bild 30)

Eine Alternative ist die Herstellung von Sandwichverbunden mit funktionellen Eigenschaften, die durch Kombination von Deckblechen oder -lagen mit Aluminiumschaumkernen hergestellt werden.

#### Kleben

Die einfachste Variante besteht darin, auf Schaumplatten oder Schaumkörper in einfacher Weise dünne Blechplatten aufzukleben. Sie bieten Schutz und gewährleisten eine optische Aufbereitung der Oberfläche.

### Plattieren

Wird eine höhere Haltbarkeit gefordert, können beide Partner auch über die metallische Bindung miteinander verbunden werden. Dies ist beispielsweise über das Walzplattieren mit Metallen zu erreichen, die einen höheren Schmelzpunkt als der Schaumwerkstoff haben. Zur Anwendung kommen z.B. konventionelle Aluminium-Knetlegierungen, mit denen die Aluminiumschaum-Kernlage, üblicherweise aus einer niedriger schmelzenden Gusslegierung, metallisch verbunden ist. Zudem lassen sich auch alle Aluminiumschäume mit Stahl plattieren. Aluminium hat als Beplankungsmaterial vor allem den Vorteil des unproblematischen Recyclings, während Stahl die Verwendung beliebiger Kernlagen erlaubt, da das Schmelzintervall für den Schäumprozess groß ist. Bei Verwendung von Aluminiumdeckblechen engt sich das Spektrum der verwendbaren Kernlagen auf Aluminiumlegierungen mit niedriger Schmelztemperatur, z.B. Gusslegierungen nahe der eutektischen Zusammensetzung (wie AlSi12) ein.

Zur Herstellung des Verbundes werden zunächst durch Strangpressen einer Pulvermischung aus Metall- und Treibmittelpulvern aufschäumbare Aluminiumhalbzeuge hergestellt. Anschließend werden konventionelle Feinbleche (nach vorheriger Reinigung durch Sandstrahlen oder Anätzen) in einem Walzplattierschritt mit der aufschäumbaren Aluminiumkernlage in einem symmetrischen Aufbau metallisch verbunden (s. Bild 31). Dabei kann der Walzvorgang zur endgültigen Kompaktierung der schäumbaren Schicht genutzt werden. In einem anschließenden Aufschäumprozess bei Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur des Aluminiumwerkstoffes werden die Kernlagen bis zu einer Porosität von 90 % aufgeschäumt, sodass Gesamtdichten zwischen  $0,7 \text{ g/cm}^3$  und  $2 \text{ g/cm}^3$  für den Sandwichverbund eingestellt werden können.

Eine Besonderheit stellen die Plattenbauteile dahin gehend dar, dass diese auch in räumlich strukturierter Form gestaltet werden können. Vor dem Aufschäumen können walzplattierte Halbzeuge tiefgezogen werden, wodurch sich die Vielfalt einstellbarer Formen beträchtlich vergrößert (Bild 32). Diese Form bleibt während des Schäumvorgangs und der nachfolgenden Abkühlung erhalten.

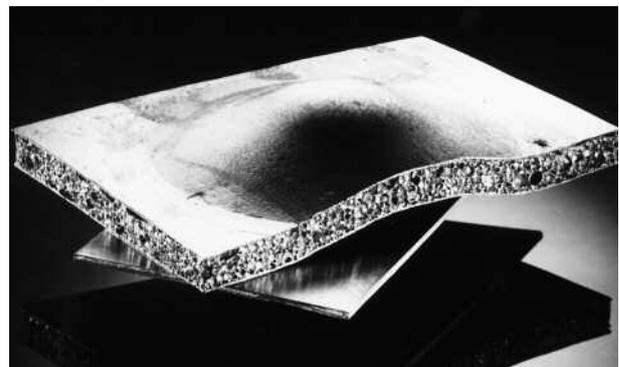
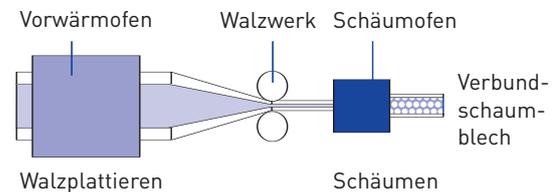
### APM-Sandwichverbunde

Auch APM-Elemente (s. Seite 17) können als Kernlage in einem Sandwichverbund eingesetzt werden (Bild 33). Dazu werden die klebstoffbeschichteten APM-Elemente zwischen die beiden Decklagen eingebracht und in einer Heißpresse zum Sandwich verbunden. Sowohl Decklagenmaterial als auch -dicke sind frei wählbar.

### Thermisches Spritzen

Eine weitere Methode zur Verbundherstellung ist die thermische Spritztechnik, mit der sich alle Werkstoffe

Walzplattieren von aufschäumbaren Halbzeugen (schematisch nach von Hagen, RWTH Aachen) (Bild 31)



Aluminiumschaum-Sandwichmaterial (Aluminium Foam Sandwich – AFS). Das Bild zeigt eine nach dem Tiefziehen aufgeschäumte Aluminiumplatte, darunter ist das noch nicht aufgeschäumte Halbzeug zu sehen (Foto: Fraunhofer-IFAM Bremen) (Bild 32)



APM-Sandwich (Foto: Fraunhofer-IFAM Bremen) (Bild 33)

mit kongruentem Schmelzpunkt zu Schichten von wenigen Zehntel bis zu einigen Millimeter verarbeiten lassen. Durch das Aufspritzen von Schichten können Metallschäume ohne große Beeinflussung an der Oberfläche repariert, versiegelt und optisch aufgewertet sowie mit Funktionsschichten gegen Verschleiß und Korrosion geschützt werden.

Jedoch ist die Prozessroute, in der schäumbares Aluminium-Halbzeug erst geschäumt und dann beschichtet wird, kostspielig: Sie verlangt teure Schäumformen und energieintensive Ofenzyklen. Zudem ist die Bauteilgröße beschränkt. Aufgrund der langen Schäumzeit lassen sich nur teilweise reproduzierbare Eigenschaften erreichen.

### Thermisches Spritzen: easyFoam-Prozess

Eine Weiterentwicklung, der easyFoam-Prozess, beschichtet mittels thermischer Spritztechnik demgegenüber bereits das aufschäumbare Vormaterial. Dies führt zu deutlich besseren Ergebnissen bezüglich Homogenität der Schaumstruktur, Oberflächengüte und der Möglichkeit der Oberflächenfunktionalisierung (Bilder 34 und 35). Die Prozesskette setzt sich aus vier grundlegenden Schritten zusammen:

- Herstellung des aufschäumbaren Vormaterials mittels der pulvermetallurgischen Route,
- Umformung des aufschäumbaren Halbzeugs zu endkonturnahen Bauteilen,
- Beschichtung der Oberfläche durch thermische Spritzverfahren,
- Aufschäumen (rotierend / statisch) durch Induktion.

Dieses Vorgehen bietet zahlreiche Vorteile, beispielsweise eine sehr einfache Bauteilvorbereitung: Die Problematik der Reinigung und Oberflächenaktivierung der Schäume entfällt, da das Schaumhalbzeug standardmäßig mit Korund gestrahlt werden kann. Erreicht werden eine deutlich höhere Oberflächengüte und damit geringere Nachbearbeitungskosten: Die Rauheit und Oberflächenwelligkeit beschichteter Halbzeuge ist wesentlich geringer als die beschichteter Schäume, da das Halbzeug bereits eine sehr hohe Oberflächengüte aufweist. Zwischenbehandlungsschritte (wie Verfüllen, Verspachteln, usw.) entfallen. Durch das Aufschäumen nach dem Beschichten wird bei geeigneter Wahl der Schichtwerkstoffe eine vollständige Benetzung der Schicht und damit eine metallurgische Bindung (Lötgüte) erreicht. Die Haftfestigkeit dieser Schichten ist damit sehr hoch.

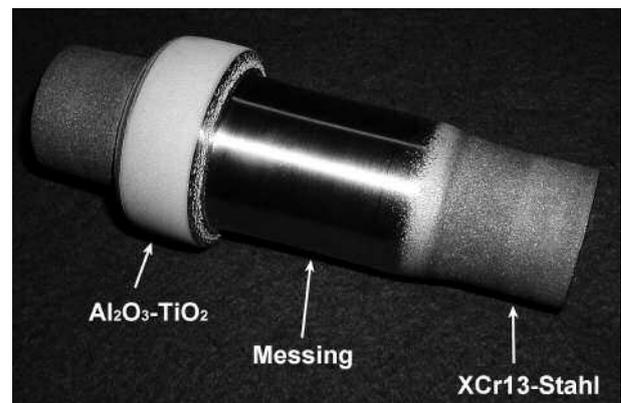
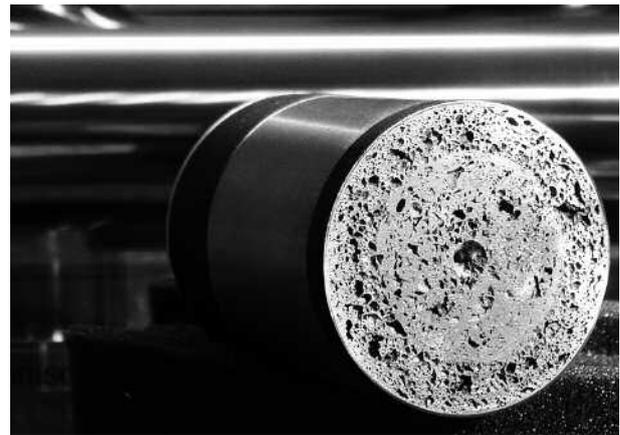
Doch auch für die thermisch gespritzte Schicht ergeben sich Vorteile. Sie beinhalten normalerweise herstellungsbedingt eine Vielzahl von Mikrorissen und -defekten. Während des Schäumprozesses heilen diese Mikrodefekte weitestgehend aus und die mechanischen Eigenschaften der Schichten und Verbunde werden signifikant verbessert. Durch die Schicht ist die Geometrie des Bauteils bereits vor dem Schäumen in ein bis zwei Dimensionen definiert. Das Schäumen steigert lediglich die Bauteilsteifigkeit. Somit können einfachere Schäumformen verwendet werden oder ganz entfallen.

Die Beschichtung erfolgt wie die eines standardmäßigen Aluminiumbauteils. Daher ist eine einfache Umsetzung auf industriellem Niveau möglich. Das Aufschäumen von Rohrstrangpressprofilen, die auf der Mantelfläche beschichtet sind, kann induktiv erfolgen, was die Prozesskosten deutlich senkt. Da die Schäumform entfällt, ist der Prozess wesentlich schneller und auch für eine Serienproduktion vollautomatisierbar.

Die sehr kurze Schäumungsphase, d.h. schnelle Aufheizraten, machen die Porenstruktur des Schaums deutlich

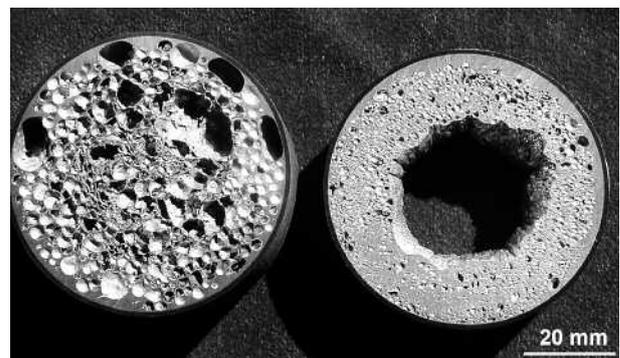
homogener, der Schaum wird qualitativ hochwertiger. Außerdem kann durch ein rotierendes Aufschäumen eine gradierte Porenstruktur eingestellt werden, was bei herkömmlichen Metallschaumherstellungsverfahren nicht möglich ist.

Durch eine gezielte Auswahl von Schichtwerkstoffen ist es möglich, unterschiedliche Eigenschaften des fertigen Werkstoffverbundes zu erzielen. Die Verwendung von z.B.



Leichtbauwalzen, hergestellt mit dem easyFoam-Prozess des IOT an der RWTH Aachen. (Foto: IOT, RWTH Aachen) (Bild 34)  
a) Querschnitt

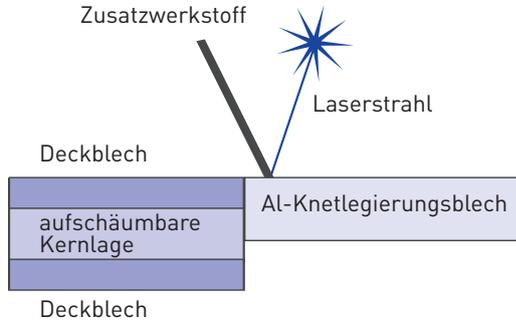
b) Modellwalze mit verschiedenen Funktionsschichten



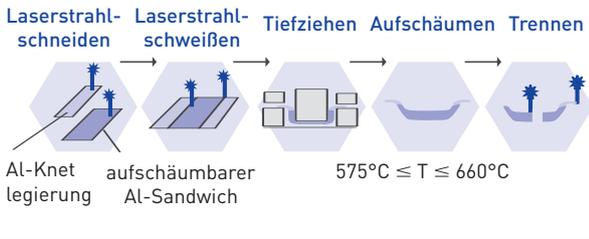
Rotierendes Aufschäumen ergibt feine Poren und eine gradierte Struktur (rechts im Bild), links ohne Rotation. (Foto: IOT, RWTH Aachen) (Bild 35)

Fertigung von Tailored blanks (nach Braune, Otto, Universität Erlangen/Nürnberg) (Bild 36)

a) Laserschweißen



b) Prozesskette



ferromagnetischem Beschichtungsmaterial erlaubt eine hervorragende induktive Einkopplung und damit schnelleres Aufschäumen. Außerdem kann durch die Wärmebehandlung des Aufschäumprozesses die Schicht in ihrer Struktur und Phasenzusammensetzung geändert werden, umso beispielsweise verbesserte mechanische oder Verschleißeigenschaften zu erhalten.

**Tailored blanks**

Eine weitere Möglichkeit ist die Fertigung von Tailored blanks, d.h. speziell für einen Anwendungsfall maßgeschneiderte Bleche, die Schaum- und kompakte Partien miteinander kombinieren. Die benötigten Blechpartien können z.B. mittels Laserstrahlschneiden ausgeschnitten werden (Vorteil: Verzugsfrei). Es schließen sich das Laserstrahlschweißen (Bild 36a; Prozess siehe S. 34) und ggf. ein Tiefziehprozess an. Dann erfolgt das Aufschäumen (Bild 36b). Damit während des Aufschäumens die Schweißnaht nicht aufgebrochen wird, sind Schutzmaßnahmen sinnvoll, wie beispielsweise eine mechanische Halterung oder eine exakt abgestimmte Temperaturführung.

**3. Eigenschaften von Aluminiumschäumen**

Aluminiumschäume als isotrope, hochporöse Werkstoffe vereinigen eine Vielzahl von herausragenden Eigenschaften in sich, die sie für bestimmte Einsatzfälle geradezu prädestinieren. Aufgrund der geringen Dichten,

die je nach Porosität im Bereich von 0,3 g/cm<sup>3</sup> bis 0,8 g/cm<sup>3</sup> (Dichte 0,3 g/cm<sup>3</sup> Porosität von 90 %) liegen, schwimmen die Schaumkörper auf Wasser. Sie weisen eine reduzierte Leitfähigkeit auf, sowohl für Wärme als auch für den elektrischen Strom. Die Festigkeit ist geringer als bei konventionellem Metall, sie fällt zudem mit abnehmender Dichte (s. 3.2). Schäume zeigen eine gute Dämpfung (s. 3.6). Das Material besitzt eine hohe Formstabilität bis zum Schmelzpunkt. Es ist unbrennbar und nicht giftig. Durch die hohe thermische Formstabilität, Feuer- und Hitzebeständigkeit ist es den Kunststoffen in bestimmten Anwendungsfällen überlegen.

**3.1 Eigenschaften und Struktur**

Bei pulvermetallurgisch mit Treibmitteln hergestellten Metallschäumen lassen sich die spezifischen Schaumeigenschaften auf Grund der breiten Variationsmöglichkeiten bei der Herstellung bzgl. Legierungsauswahl und Aufschäumparameter bei PM-Verfahren (Schäumdauer, Treibmittelart, Treibmittelgehalt, eventuelle Stabilisatoren) über einen sehr weiten Bereich einstellen. Tafel 1 enthält dafür einige Beispiele. Ausführlichere Angaben zu physikalischen Schaumeigenschaften enthält Kapitel 3.6.

Aber auch bei schmelzmetallurgischen Verfahren lassen sich die Eigenschaften über die eingestellte Dichte variieren (s. Tafel 2).

**Prüfung der Struktur**

Schäume sind nicht als Material, sondern als Werkstoffstrukturen zu betrachten. Somit sind Prüfergebnisse jeder einzelnen Probe abhängig von der Probengeometrie und von der Herstellung. Jedoch ist eine metallographische Untersuchungen nicht so einfach möglich wie bei kompakten Proben. Zudem liefert sie nur Aussagen für die gerade angeschnittene Ebene. Diese Schwierigkeiten lassen sich umgehen, wenn die Struktur von Aluminiumschäumen mit Hilfe der aus der Medizin bekannten Computertomografie klassifiziert wird (s. Bild 37).

**Simulationen**

Daneben bildet die Computersimulation des Schaumverhaltens einen wichtigen Forschungsschwerpunkt, wie z.B. die Modellierung mechanischer Eigenschaften von Aluminiumschäumen. Zum Entwickeln geeigneter Modelle wurde das Verformungsverhalten realer Schäume in verschiedenen Stadien beobachtet und beispielsweise mit einer Videokamera verfolgt. Aus diesen und anderen Ergebnissen konnten Simulationsmodelle für offen- und geschlossenporige Schäume entwickelt werden. Hierüber kann eine Modellierung der linearelastischen Eigenschaften, der Festigkeit und von Spannungs-Stauchungskurven erfolgen, deren Ergebnisse gut mit dem realen Verhalten übereinstimmen. Die Untersuchungen wiesen auf die Notwendigkeit der Herstellung möglichst homogener Schäume hin. Gelingt dies, so ist über die Mo-

**Tafel 1:** Physikalische Eigenschaften von pulvermetallurgisch mit dem Treibmittel TiH<sub>2</sub> hergestellten Aluminiumschäumen, Al 99,5 massiv zum Vergleich (kompakt, kein Schaum) (Zusammenstellung nach Fraunhofer-IFAM und MEPURA)

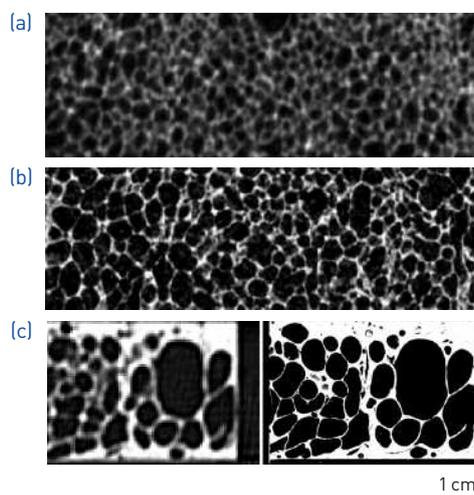
Legierung	Al 99,5 massiv	Al 99,5	AlCu4	AlMg1SiCu 6061	AlMg1SiCu 6061	AlSi7	AlSi7	AlSi12	AlSi12	
Wärmebehandlung des Schaumes	-	keine	ausgeh.	ausgeh.	keine	ausgeh.	keine	keine	keine	
Dichte g/cm <sup>3</sup>	2,7	0,4	0,7	0,6	0,6	0,55	0,63	0,6	0,54	0,84
mittlerer Porendurchmesser mm	-	4	3	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.
Druckfestigkeit MPa	-	3	21	20,4	12,7	7,1 ± 0,2	8,8 ± 0,2	7,9	7	15
Energieabsorption bei 30 % Stauchung MJ/m <sup>3</sup>	-	0,72	5,2	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	2	4
Elastizitätsmodul GPa	67	2,4	7	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	5	14
elektrische Leitfähigkeit m/(Ω·mm <sup>2</sup> )	34	2,1	3,5	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.
spezifischer elektrischer Widerstand μΩcm	2,9	48	29	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.	o.A.
thermische Leitfähigkeit W/(m·K)	235	12	-	18,5(RT)	18,5(RT)	6,1 (50 °C) 6,9 (100 °C) 7,7 (200 °C)	7,8 (50 °C) 8,8 (100 °C) 9,8 (200 °C)	16,7		24
thermischer Ausdehnungskoeffizient 10 <sup>-6</sup> 1/K	23,6	23	4	23,1	23,1	o.A.	o.A.	19,9-20,6	o.A.	o.A.

**Tafel 2:** Eigenschaften von schmelzmetallurgisch hergestellten Aluminiumschäumen (geschlossene Poren, nach Åsholt und GLEICH GmbH)

Verfahren	Norsk-Hydro, später Cymat-Verfahren			Alporas
Zusammensetzung	Al-Legierung mit SiC-Zusatz			-97 % Al, -1,5 % Ca, -1,5 % Ti
Dichte g/cm <sup>3</sup>	0,15	0,25	0,3	0,23 (± 0,02)
thermischer Ausdehnungskoeffizient 10 <sup>-6</sup> 1/K	20	20	20	21-23
Spezifische Wärmekapazität J/kg · K	o.A.	o.A.	o.A.	830-870
Wärmeausdehnungskoeffizient W/m W K	o.A.	o.A.	o.A.	
elektrische Leitfähigkeit m/(Ω·mm <sup>2</sup> )	0,27	0,36	0,50	3,5-4,5
Spezifischer elektrischer Widerstand [ 10 <sup>-3</sup> Ω]				210-250
Elastizitätsmodul MPa	340	970	1400	1,1 (± 0,1) GPa
Schubmodul MPa	14	35	48	

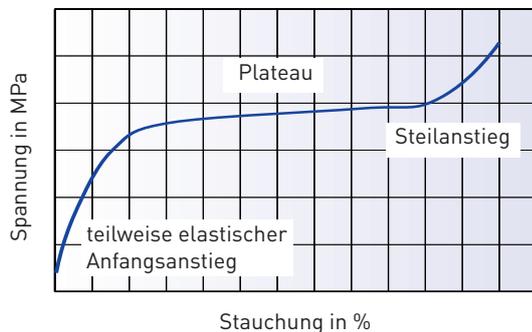
o. A. = ohne Angabe

### Zusammenstellung ausgewählter Aufnahmen von Al-Schaumproben aufgenommen mit verschiedenen Tomografen. (Bild 37)



- (a): Schicht aus einem Datensatz einer mit dem 3D-CT (BAM).  
 (b): Schichtaufnahme mit dem 2D-Tomografen (450kV) (EMPA).  
 (c): links eine Aufnahme mit einem Humantomografen (AKH), rechts der metallographische Schliff desselben Querschnittes (Fotos: B. Kriszt, Institut für Werkstoffkunde und Materialprüfung, TU-Wien (A), Eidgenössische Material- und Prüfanzalt (EMPA), BAM-Berlin, Abteilung für Osteologie der Universitätsklinik für Radiodiagnostik am AKH-Wien)

Typische Spannungs-Stauchungs-Kurve von Metallschäumen (schematisch) (Bild 38)



dellierung mit geringem Untersuchungsaufwand eine Aussage über das Werkstoffverhalten möglich. In einem Modell von Ashby wird daher auch die Defektstruktur von Schäumen einbezogen. Ideale Schäume mit einheitlicher Porenstruktur (Honigwaben) wird es nicht geben. Abweichungen vom Idealzustand, wie z.B. nicht-isotrope und/oder nicht gleichförmige Poren sowie Defekte, wie z.B. teilweise aufgebrochene Zellwände sind zu berücksichtigen. Zudem ist es wichtig, die Modelle nach geschlossen- oder offenporigem Schaum zu unterscheiden.

### 3.2 Mechanische Eigenschaften

Aufgrund ihrer zellularen Struktur zeigen Aluminiumschäume in mechanischen Prüfungen ein von monolithischen Metallen abweichendes Verhalten. Dementsprechend können auch die herkömmlichen Prüfverfahren nicht in gewohntem Umfang angewendet werden. Die größte Aussagekraft für Schäume hat bisher der Druckversuch. Hier ergeben sich aber Unterschiede, je nachdem, ob ein reiner Metallschaum mit Gushaut, ein Schaum mit abgetrennter Gushaut oder ein Schaum mit Deckblechen (Verbund) geprüft wird.

Allgemein ergibt sich eine für Schäume typische Dreiteilung der Spannungs-Stauchungs-Kurve (s. Bild 38). Je nach Dichte, Zusammensetzung, Prüfung mit oder ohne Gushaut bzw. Deckblech ist eine gewisse Variation der Kurve möglich. Das prinzipielle Verhalten ist jedoch immer dasselbe - mit

- einer Geraden im Anfangsbereich, die hier nicht unbedingt „elastisch“ genannt werden kann, da bereits bei der ersten Belastung gewisse Setzerscheinungen im Schaum möglich sind. Daher ist der im Diagramm zu verzeichnende Anstieg nur teilweise reversibel.
- einem Plateau nahezu konstanter Spannung mit zunehmender Dehnung. Dies ist ein Bereich mit starker plastischer Verformung.
- einem nachfolgenden steilen Anstieg infolge der einsetzenden Verdichtung der Zellen. Hier berühren sich nun schon die einzelnen Zellwände.

Durch diesen speziellen Verlauf der Spannungs-Stauchungs-Kurve – insbesondere durch das lange Plateau – sind Metallschäume prädestiniert dafür, viel Energie auf einem im Vergleich zu monolithischen Metallen niedrigeren Spannungsniveau zu absorbieren (s. Kap. 3.3).

#### 3.2.1 Schäume ohne Deckblech

##### Druckfestigkeit

Die meisten Ergebnisse liegen aus den bereits genannten Gründen für Untersuchungen von Schäumen im Druckversuch vor. Hierbei zeigte sich, dass die jeweils gemessenen Werte von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig sind, die nachfolgend aufgezeigt werden.

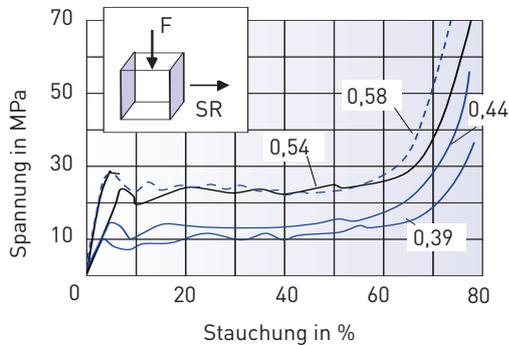
##### ■ Einfluss der Außenhaut

Im unbearbeiteten Zustand ist Aluminiumschaum von einer oft als „Gushaut“ bezeichneten dichten (d.h. nahezu porenfreien) Außenhaut umgeben, die dem Bauteil ähnlich einer Sandwichkonstruktion Stabilität gibt. Dieser Sandwicheffekt verleiht dem Schaum eine vielfach höhere Steifigkeit als dies bei einer offenporigen Struktur der Fall wäre. Daher sind die gemessenen Werte auch davon abhängig, ob die Außenhaut (entsprechend einer Gushaut) von der Probe entfernt wurde. An Proben ohne Haut wird keine untere und obere Verformungsspannung beobachtet.

In den nachfolgenden Ausführungen werden – soweit nicht anders gekennzeichnet – Untersuchungen an Proben mit Haut diskutiert. Dies ist auch sinnvoll, denn in der Regel ist die Entfernung der Außenhaut bei Bauteilen aufgrund der dann notwendigen zusätzlichen Arbeitsschritte nicht vorgesehen. Außerdem bewirkt die Gushaut eine durchaus erwünschte Versteifung.

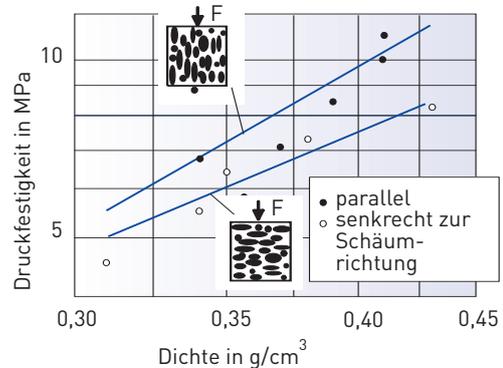
Diesen Effekt verdeutlichen die Abbildungen 39 und 40. Hierfür wurden würfelförmige Proben aufgeschäumt, die eine geschlossene Außenhaut („Gushaut“) aufwiesen. In den Versuchen wurde die Haut an vier Seiten der Probe entfernt. Die beiden verbliebenen „Deckschichten“ wurden im Versuch wie im jeweils oben stehenden Teilbild zur Kraft orientiert. In den Versuchen zeigte sich ein deutlicher Einfluss: Je nach Orientierung wird eine mehr oder weniger ausgeprägte Plateaulage erreicht. So knicken die Kurven im Bild 39 (Deckschichten parallel zur Kraft) erst bei höheren Spannungen als im Bild 40 ab. Außerdem wird im Bild 39 bei jeder Schaumdichte ein nahezu horizontales Plateau im Bereich plastischer Verformung erreicht; im Bild 40 (Deckschichten senkrecht zur Kraft) hingegen nur bei niedrigen Dichten. Ein völliges Entfernen der Deckschichten wirkt ähnlich wie die Probenorientierung im Bild 40 im Sinne einer verringerten Festigkeit. Ähnliche Ergebnisse wurden auch an schmelzmetallurgisch hergestellten Schäumen erzielt (Benouali, Hydro-Schaum).

### Spannungs-Stauchungs-Diagramm für AlSi6Cu4-Schaumproben (Gusslegierung EN AC-45000, IFAM-Verfahren) (Bild 39)



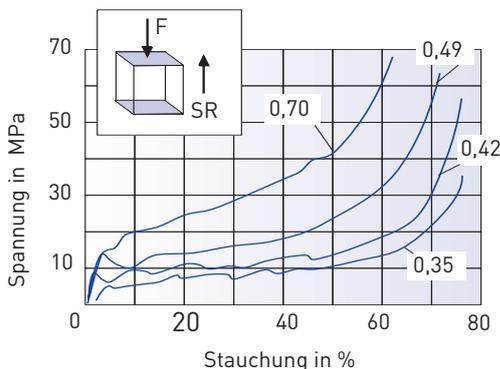
Untersuchung von verschiedenen Schaumdichten (Angabe in  $\text{g/cm}^3$  an den Kurven), Orientierung der Prüfkraft (F) senkrecht zur Schäumrichtung (SR), d.h. parallel zur Deckschicht (Gusshaut, blau gekennzeichnet) (nach Banhart und Baumeister)

### Druckfestigkeit von AlSi6Cu4-Schaumproben (Gusslegierung (EN AC-45000), IFAM-Verfahren), ohne Deckschicht (Gusshaut) (Bild 41)



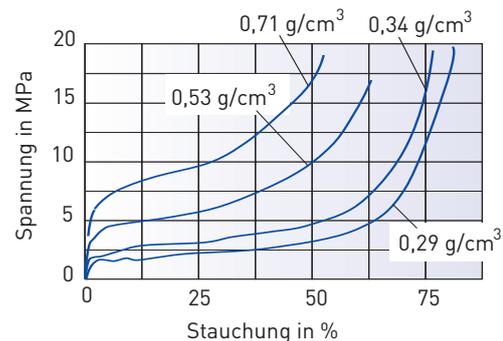
Die Prüfung erfolgte senkrecht und parallel zur Schäumrichtung (Hinweis: Die Ausgleichsgeraden dienen lediglich der Orientierung, nach Banhart und Baumeister)

### Spannungs-Stauchungs-Diagramm für AlSi6Cu4-Schaumproben (Gusslegierung EN AC 45000, IFAM-Verfahren) (Bild 40)



Untersuchung von verschiedenen Schaumdichten (Angabe in  $\text{g/cm}^3$  an den Kurven), Orientierung der Prüfkraft (F-Stauchungs-Diagramm) senkrecht zur Deckschicht (Gusshaut, blau gekennzeichnet), d.h. parallel zur Schäumrichtung (SR), (nach Banhart und Baumeister)

### Druckversuche an Reinaluminium-Schaumproben verschiedener mittlerer Dichte (Bild 42)



Die Dichte ist an den Kurven angegeben (MEPURA schematisch, nach Degischer et al., TU Wien)

hängigkeit von den Deckschichten verzeichnete. Die Schäume können daher als nahezu isotrop betrachtet werden.

#### ■ Einfluss der Schäumrichtung

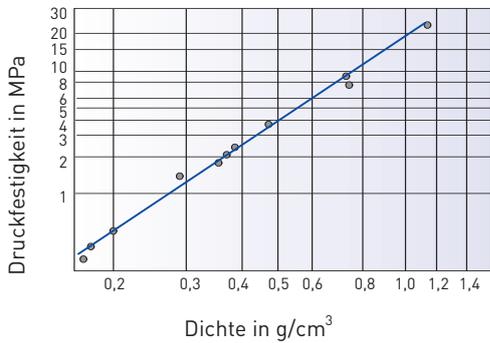
In den oben bereits genannten Untersuchungen (Bilder 39 und 40) wurden die beobachteten Effekte allein auf die Wirkung der Deckschichten zurückgeführt. In vergleichenden Untersuchungen wurden Proben, bei denen alle Deckschichten entfernt wurden, in verschiedenen Lagen zur Schäumrichtung geprüft. Diese Prüfung erschien sinnvoll, da die Poren nicht immer kreisrund sind, sondern in der Schäumrichtung gestreckt sein können. Bild 41 zeigt, dass die Proben mit Ausrichtung der Kraft parallel zur Schäumrichtung geringfügig höhere Werte aufwiesen. Der Unterschied ist jedoch wesentlich kleiner als der o.g., in Ab-

#### ■ Einfluss der Dichte

Bereits die Bilder 39 bis 41 weisen einen eindeutigen Einfluss der Dichte aus: Der Plateaubereich ist um so länger, je niedriger die Dichte ist. Allerdings nehmen bei fallender Dichte auch die Höhe des Plateaus und damit die Druckfestigkeit ab. Nimmt die Dichte hingegen zu, werden höhere Spannungswerte erreicht - die Druckfestigkeit steigt.

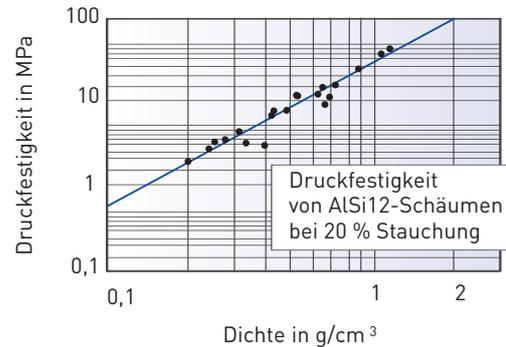
Diese Gesetzmäßigkeiten wurden auch an Schäumen anderer Zusammensetzung bzw. anderer Herstellverfahren beobachtet, wie die Bilder 42 und 43 für Reinaluminiumschäume sowie Bild 44 und 45 für Al-Legierungsproben verschiedener Dichte zeigen.

**Druckfestigkeit von Reinaluminium-Schäumen in Abhängigkeit von der Dichte (Bild 43)**



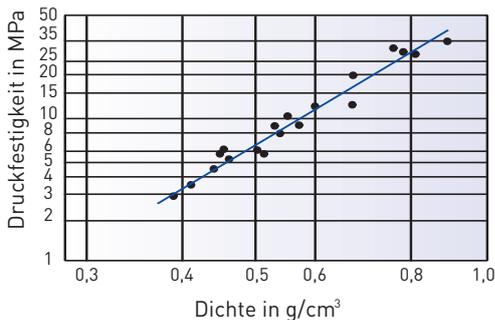
(Zusammenstellung der Werte Banhart et.al., Fraunhofer-IFAM Bremen)

**Druckfestigkeit von AlSi12-Schäumen in Abhängigkeit von der Dichte (Bild 45)**



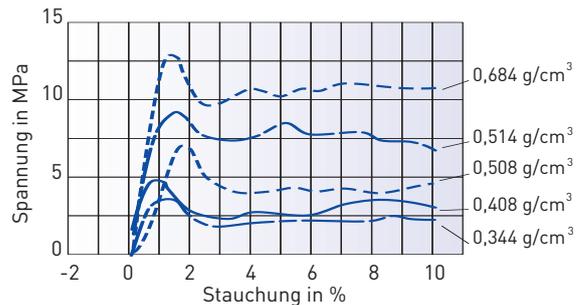
(Schaumtyp FOMAINAL, Fraunhofer-IFAM Bremen)

**Druckfestigkeit von AlCu4-Schäumen in Abhängigkeit von der Dichte (Bild 44)**



(Zusammenstellung der Werte Banhart et.al., Fraunhofer- IFAM Bremen)

**Stauchkurven von AlSi12-Aluminiumschaumproben (EN AC-45000, Mepura-Verfahren) verschiedener Dichten mit Gusshaut (Bild 46)**



Deutlich zu erkennen sind obere und untere Verformungsgrenze (schematisch, nach Degischer et.al., TU Wien)

In den Bildern 43 und 44 ist zu erkennen, dass die Festigkeit in der gewählten doppelt logarithmischen Darstellung etwa linear mit der Dichte ansteigt.

■ **Einfluss des Legierungsgehaltes**

Neben der Dichte beeinflusst der Legierungsgehalt die Plateauspannung, wie schon in den Bildern 43 bis 45 ersichtlich. Die Reinaluminiumschäume weisen dabei aufgrund des geringeren Legierungsgehaltes erwartungsgemäß geringere Festigkeiten auf.

Wird das Verhalten von Guss- und Knetlegierungen verglichen, wird nur bei Gusslegierungen mit Haut eine untere und obere Verformungsspannung beobachtet (s. Bild 46 sowie Bilder 39 und 40). Dieser Effekt wurde an Knetlegierungsproben sowie an Proben ohne Haut nicht verzeichnet.

■ **Einfluss von Wärmebehandlungen**

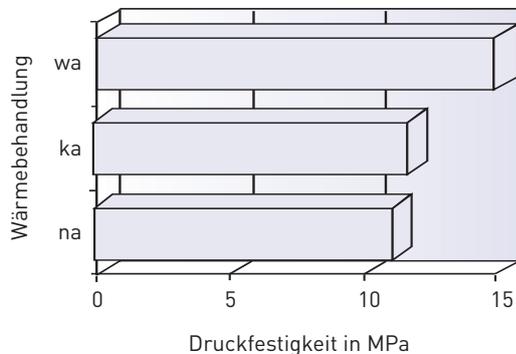
Auch Aluminiumschäume können Wärmebehandlungen unterzogen werden, mit denen je nach Materialzusammensetzung und Wärmebehandlungsregime Änderungen der Festigkeit zu erwarten sind. Allerdings

ist die Wärmebehandlung im Gegensatz zu massiven Metallen erschwert. Der Grund dafür liegt in der geringen Wärmeleitfähigkeit des Materials. Somit werden Abschreckbehandlungen nach etwaigen Lösungsglühungen problematisch, da die Abschreckgeschwindigkeit kleiner als in massiven Metallen und zudem nicht überall im Schaum gleich groß ist. Hinzu kommt, dass Wasser nicht als Abschreckmedium verwendet werden kann, da es zu einer partiellen Zerstörung der Porenstruktur führen könnte. Abschreckungen sind daher nur mit Pressluft möglich. Dies bedeutet aber auch, dass die erreichbaren Abschreckgeschwindigkeiten kleiner als die mit Wasser möglichen sind. Demgemäß ergeben Wärmebehandlungen von Schäumen in der Regel keine so hohen Festigkeitssteigerungen wie bei massiven Metallen.

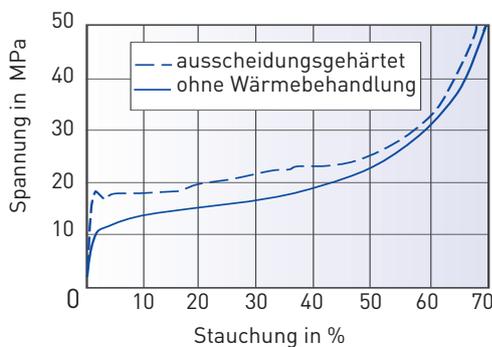
Bild 47 zeigt, dass eine Kaltauslagerung zu keinem messbaren Festigkeitsanstieg (innerhalb der statistischen Fehlergrenzen) führte. Die Warmauslagerung hingegen bewirkte eine Erhöhung der Festigkeit um ca. 34 %.

**Einfluss einer Wärmebehandlung auf die Druckfestigkeit pulvermetallurgisch hergestellter Aluminiumschäume (IFAM-Verfahren) (Bild 47)**

a)



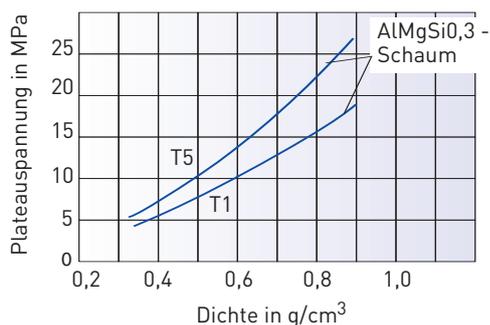
b)



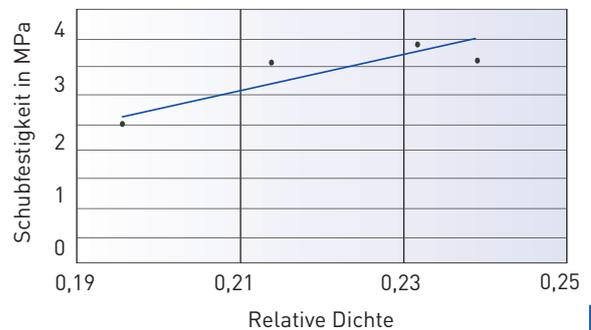
a) AlCuSiMn-Schaum (AA 2014, IFAM-Verfahren), Lösungsglühung bei 500 °C über 2h, anschließend nicht ausgelagert (na), kalt ausgelagert über 5 d (ka bzw. T1), warm ausgelagert bei 160 °C über 18 h (wa bzw. T5) (Baumeister)

b) AlMg1SiCu-Schaum, Dichte 0,6 g/cm<sup>3</sup>, ausscheidungsgehärtet ( $\sigma_s = 18,5$  MPa) und nur geschäumt, ohne Wärmebehandlung ( $\sigma_s = 18,5$  MPa), (nach Lehnhus et.al)

**Abhängigkeit der Plateauspannung eines AlMgSi<sub>0,3</sub>-Aluminiumschäumens (Mepura-Verfahren) von der mittleren Dichte und vom Aushärtungszustand (schematisch, nach Degischer et.al., TU Wien) (Bild 48)**



**Schubfestigkeit von AlSi12-Schaum in Abhängigkeit von der Dichte (FOAMINAL, nach Fraunhofer-IFAM) (Bild 49)**



Ungefähr in der gleichen Größenordnung liegen die im Bild 48 gezeigten Ergebnisse für die Knetlegierung AlMgSi<sub>0,3</sub>. Durch die Behandlung T5 (Warmauslagerung) lassen sich im Verhältnis zum Zustand T1 (Kaltauslagerung) ungefähr 20 bis 30 % höhere Plateauspannungen erzielen.

#### Schubfestigkeit

Die Schubfestigkeit in Abhängigkeit von der Dichte zeigt Bild 49 am Beispiel des AlSi12-Schaumes. Weitere Angaben zur Ermittlung der Schubfestigkeit sowie Werte für AlCu4-Proben finden sich im Kap. 3.2.2 (s. Bild 51).

#### (Tafel 3)

Zugfestigkeitskennwerte von Aluminiumschäumen (FOAMINAL, nach Fraunhofer-IFAM)

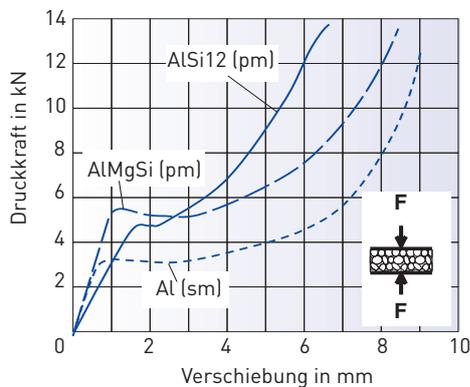
Werkstoff	AlMgSi1Cu (6061)	AlMgSi1Cu (6061)
Dichte des Schaumes in g/cm <sup>3</sup>	0,31	0,46
$\rho_{max}$ in MPa	2,79	6,06
$\rho_{bruch}$ in MPa	2,76	5,99
$\rho_{elastisch}$ in MPa	1,11	3,31
$\epsilon_{max}$ in %	0,84	0,89
$\epsilon_{bruch}$ in %	0,90	0,92

#### Zugfestigkeit

Im Allgemeinen zeigen metallische Schäume unter Zugbelastung ein sprödes Verhalten, denn die einzelnen Poren der Schaumstruktur wirken als Kerben, die Ausgangspunkte für Risse bilden können. Daher sollten bei der Konstruktion mit Metallschäumen Zug- und Biegebelastungen minimiert werden.

Die Zugfestigkeit entspricht in etwa der Plateauspannung beim Druckversuch. Dies legt nahe, als Kennwert für die Bewertung mechanischer Eigenschaften von Metallschäumen die Plateauspannung zu ermitteln. Tafel 3 zeigt einige Beispielwerte für pulvermetallurgisch hergestellte Schäume.

**Druckversuche an Sandwich-Verbunden aus Aluminiumschaum und Stahldeckblechen (Bild 50)**



Der schmelzmetallurgisch hergestellte Schaum wurde ohne Deckbleche geprüft (nach von Hagen, RWTH Aachen)

**3.2.2 Aluminiumschaumverbunde mit Deckblechen**

Wie bereits genannt, verleiht die im unbearbeiteten Zustand vorhandene Gushaut den Schaumteilen eine zusätzliche Steifigkeit. Diese Stabilität kann bei Plattenkonstruktionen durch gewalzte Deckbleche aus verschiedenen Metallen in beliebigen Wandstärken verstärkt werden (Sandwich). Bei massiven Formteilen und Rohren wird die erhöhte Biege- und Knicksteifigkeit durch das Ausschäumen von Hohlteilen erreicht (s. 2.3.2.4).

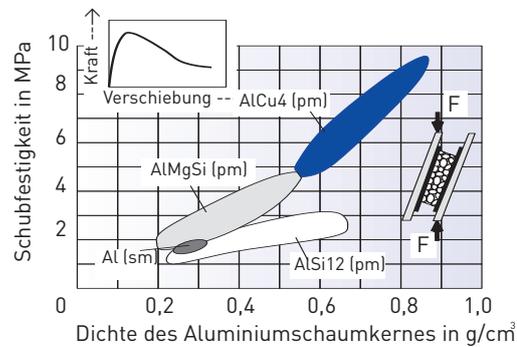
**Aluminiumschaum mit Stahldeckblechen**

Daher wurden gezielt Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften beplankter Schäume vorgenommen, wie beispielhaft im Bild 50 in Untersuchungen von Sandwich-Verbunden aus Aluminiumschaum und Stahldeckblechen (Herstellung s. Bild 31) verdeutlicht. Genutzt wurden hierbei genormte Prüfverfahren. Im Idealfall sollte bei diesen Versuchen nicht nur bei unbeplanktem Material, sondern auch bei Sandwichproben nur die Schaumkernlage beansprucht werden.

Auch die an beplanktem Material in Druckversuchen ermittelten Kurven für Material vergleichbarer Dicken und Kerndichten von 0,3 g/cm<sup>3</sup> zeigen die typische Dreiteilung. Zum Vergleich wurde neben den beiden pulvermetallurgisch (PM) erzeugten Legierungen AlSi12 und AlMgSi ein schmelzmetallurgisch (SM) produzierter Aluminiumschaum ohne Deckbleche mitgeprüft.

Deutlich sind Unterschiede in Festigkeit (und Energieabsorptionsvermögen s. 3.3) zu erkennen. Die Legierung AlMgSi hat die höchste Druckfestigkeit und weist im Kurvenverlauf ein ausgeprägtes Plateau auf (das eine gute Energieaufnahme verrät). Die Druckfestigkeit der weniger duktilen Gusslegierung AlSi12 ist etwas geringer, es fehlt jedoch das ausgeprägte Plateau, d.h. die Verdichtung beginnt hier fast direkt hinter dem annähernd linearelastischen Bereich.

**Ermittlung der Schubfestigkeit und Vergleich der Schubfestigkeiten für verschiedene Aluminiumschaumlegierungen mit Stahldeckblechen nach pulvermetallurgischer (pm) bzw. schmelzmetallurgischer Herstellung (sm) (Bild 51)**



Die Krafteinleitung auf den Schaum erfolgte durch aufgeklebte Krafteinleitungsplatten (nach von Hagen et.al, RWTH Aachen)

Der unlegierte, schmelzmetallurgische Schaum weist aufgrund seiner hohen Duktilität das längste Plateau auf. Druckfestigkeit (und absolute Energieabsorption) sind jedoch deutlich geringer.

Beispiele für Eigenschaftswerte gibt Tafel 4. Grundsätzlich können unterschiedlichste Abmessungen eingestellt werden.

Bei einem kombinierten Belastungsfall müssen die Schaumanteile eines Schaumbauteils die Schubanteile aufnehmen. Die Ergebnisse von unter dieser Zielstellung vorgenommenen Untersuchungen zur Schubfestigkeit sind in Bild 51 enthalten. Wie in der rechtsstehenden Skizze gezeigt, wurde die Probe hierbei diagonal auf Schub belastet. Unter konstantem Vorschub wurde die relative Verschiebung der Probenflächen gemessen. Dabei wurde das im linken Teilbild gezeigte schematische Kraft-Verschiebungs-Diagramm gemessen. Der Punkt maximaler Kraft steht für das Versagen der Probe. Hierbei ist ein durch den gesamten Schaumkern laufender Riss zu beobachten und es kommt zu einem schnellen Abfall der Kraft, leicht verzögert durch ein Verhaken von Zellstegen in der Bruchfläche. Das in der Mitte stehende Diagramm zeigt die danach ermittelten Schubfestigkeiten in Abhängigkeit von der Dichte des Aluminiumschaumes.

Zu Vergleichszwecken sind Ergebnisse von Untersuchungen an nicht plattierten Schaumproben aus der ausgehärteten, höherfesten Legierung AlCu4 sowie schmelzmetallurgisch erzeugtem, unlegiertem Aluminiumschaum mit aufgetragen. Die Schubfestigkeit von AlSi12 liegt unter der von AlMgSi - eine Erscheinung, die aufgrund der Festigkeitsverhältnisse der kompakten Materialien zu erwarten war. Die Proben aus AlSi12 weisen ein schmaleres Gesamtstreuband auf, die Schaumstruktur hat einen deutlich geringeren Einfluss auf die

**(Tafel 4)** Eigenschaften von Standard-Aluminiumschaum-Sandwichmaterial (AFS, IFAM, Sandwichdicke 11 mm, Dicke der Decklagen 1 mm, Dichte der Kernlage ca. 0,3 g/cm<sup>3</sup>, Dichte des Verbundes ca. 0,8 g/cm<sup>3</sup>, Flächengewicht 9,23 kg/m<sup>2</sup>)

Prüfrichtung	In Dickenrichtung	Parallel zur Oberfläche
Elastizitätsmodul [GPa]	2,5	15
$\sigma_{\text{zug, max}}$ [MPa]	4	90
$\sigma_{\text{Druck, max}}$ [MPa]	8	o.A.
$\tau_{\text{max}}$ [MPa]	4	o.A.

Streuung als bei AlMgSi. Das unlegierte, schmelzmetallurgisch hergestellte Material liegt in einem schmalen Dichtebereich bei mittleren Schubfestigkeiten. Die Werte für die warmaushärtbare Knetlegierung AlCu4 (Zugfestigkeit des kompakten Materials ca. 380 MPa) verdeutlichen, dass die obere Grenze der Schaumfestigkeit durch die Legierungswahl noch erhöht werden kann. Weitere Werte enthält Tafel 4.

Über Biege- und Schälversuche kann das Verbundverhalten unter realitätsnäheren Belastungen weiter geprüft werden. Hierbei zeigte sich, dass die Verbindung beider Partner von größter Bedeutung ist. Sonst kann das Ablösen der Deckbleche bereits vorzeitig zum Versagen des Bauteiles führen.

#### Aluminiumschaum mit Aluminiumdeckblechen

Aluminiumschaum-Sandwichmaterial (Aluminium Foam Sandwich, Bild 32, S. 18) zeichnet sich durch eine hervorragende Biegesteifigkeit aus. Diese Eigenschaft ist zurückzuführen auf den Sandwichaufbau und das damit einhergehende Zusammenwirken von Deckblechen und Aluminiumschaum-Kernlage.

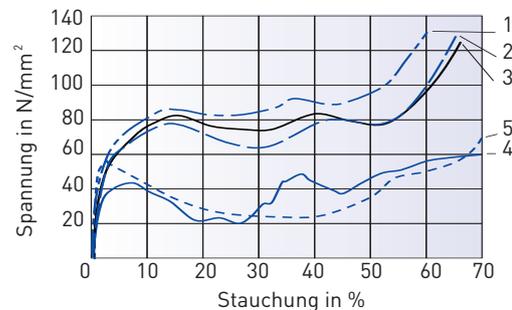
Vor dem Schäumen weist das Material die Steifigkeit eines herkömmlichen Aluminiumbleches gleicher Dicke auf, nach dem Schäumen ergibt sich der klassische Sandwicheffekt, indem sich durch die Expansion deutlich erhöhte Flächenträgheitsmomente ergeben und der Schaumkern im Wesentlichen Schubbelastungen aufnimmt. Die Biege- und Torsionssteifigkeit erhöht sich gegenüber dem herkömmlichen Aluminiumblech um ein Mehrfaches.

Zu beachten ist, dass die Eigenschaften von Aluminiumschaum-Sandwichmaterial wesentlich von den Dickenverhältnissen zwischen Kernlage und Deckschichten abhängen.

#### Schaumgefüllte Rohre

Im Falle schaumgefüllter Rohre wird der Versuch unternommen, den versteifenden Effekt der Außenhaut eines Schaumes künstlich zu verstärken. Dass dies erfolgreich ist, belegen die Ergebnisse der im Bild 52 dargestellten Versuche. Hierbei zeigen die schaumgefüllten Rohre eine sehr hohe Plateauspannung im Bereich von 80 bis 90 MPa. Das Plateau ist sehr lang; es erstreckt sich bis zu 50 %

#### Spannungs-Stauchungs-Diagramme von axialen Druckversuchen an aluminiumschaumgefüllten Aluminiumrohren (IFAM-Verfahren, nach Banhart und Baumeister) (Bild 52)



- 1 – Rohr ausgeschäumt, Schaumdichte 0,57 g/cm<sup>3</sup>
- 2 – Rohr ausgeschäumt, Schaumdichte 0,53 g/cm<sup>3</sup>
- 3 – Rohr ausgeschäumt, Schaumdichte 0,49 g/cm<sup>3</sup>
- 4 – nicht aufgeschäumter Halbzeugverbund (besteht aus aufschäumbarem Halbzeug und Rohr, jedoch ohne Aufschäumung)
- 5 – zuvor ausgeschäumte Probe, Schaum jedoch wieder entfernt

bis 55 % Stauchung. Die Wellen in der Kurve zeigen die Faltenbildung des Rohres.

Die nicht ausgeschäumten Profile 4 und 5 zeigen eine viel niedrigere Festigkeit und kein ausgeprägtes Plateau. Dies bedeutet, dass der Schaum-Rohr-Verbund Eigenschaften aufweist, die über die mechanischen Eigenschaften seiner Komponenten hinausgehen. Als Erklärung lässt sich anführen, dass der Aluminiumschaum die Stabilität des Außenrohres deutlich vergrößert. Ein frühes Einfallen des Rohres bei geringer Belastung wird durch die Schaumfüllung verhindert. Wenn es dann doch zur Faltung kommt, wird auch der Aluminiumschaum verdichtet. Dies wirkt ebenfalls einer weiteren Stauchung entgegen.

#### 3.3 Absorption von Verformungsenergie

Wie die in 3.2.2 geschilderten Untersuchungen zeigen, weisen ausgeschäumte Rohre ein deutlich längeres Plateau bei höheren Festigkeitswerten auf. Dies bedeutet, dass Volumenkörper aus Aluminiumschäumen, schaumgefüllte Hohlprofile oder Verbundplattenbauteile geeignet sind, Energien zu absorbieren. Damit eröffnen sich den Schäumen als Werkstoffgruppe vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, insbesondere im Bereich der Insassensicherheit von Fahrzeugen.

#### Charakterisierung durch Plateaulage

Das Absorptionsverhalten lässt sich ebenfalls über den Stauchversuch quantifizieren, denn der Bereich der nahezu konstanten Plateauspannung entspricht der Energieabsorption. Dies bedeutet also, je höher und länger der Plateau-Bereich ist, desto mehr Energie wird absorbiert. Die durch einen Schaum absorbierte Energie pro Volumen ist gleich der Fläche unter der Stauchungs-Spannungs-

Kurve. Für eine Energieabsorption vorgesehene Werkstoffe sollten daher ein langes Plateau mit möglichst hoher Plateauspannung aufweisen. Im Idealfall wäre die Fläche unter der Kurve dann ein Rechteck.

Wie die bisher gezeigten Diagramme in den Bildern 39, 42 und 46 belegen, zeigen Aluminiumschäume ausgeprägte Plateaulagen, deren Höhe und Länge von der Schaumdichte abhängt. Da sich, wie im Bild 41 gezeigt, das Material relativ isotrop verhält, erfolgt die Absorption der Aufprallenergie unabhängig von der Stoßrichtung.

**Ausschäumen von Profilen**

Werden nun die Prüfergebnisse ungefüllter und gefüllter Profile im Bild 52 verglichen, zeigt sich, dass die Kurven der ausgeschäumten Profile bei langer Plateaulage und den bei diesen Beispielen höchsten Plateauspannungen verlaufen. Durch das Ausschäumen wurde eine deutliche Verbesserung der Energieabsorptionswerte erreicht. Die Spannung bleibt bis zu 50 % der Verformung nahezu konstant. Diese Ergebnisse werden von den im Bild 50 (S. 26) gezeigten Beispielen bestätigt.

Dies verdeutlicht, dass die Dichte des Aluminiumschaumes ein für das Absorptionsverhalten wichtiger Parameter ist. Vergleiche in den Bildern 53a und b zwischen Material verschiedener Dichten und Wärmebehandlungszustände ergaben, dass der Aluminiumschaum in Abhängigkeit von der jeweiligen Dichte deutlich mehr Energie absorbieren kann als ein PU-Schaum. Die genaue Lage des Plateaus kann durch die Schaumdichte beeinflusst werden (Bild 54). Tafel 5 enthält beispielhaft Werte der Energieabsorption für unterschiedliche Matrixlegierungen und Schaumdichten.

Im Automobilbau werden in vielen Fällen Metallhohlprofile als wichtige Konstruktionselemente verwendet, denen häufig die Energiedissipation bei dynamischer Belastung (Crash, s. 6.1) obliegen soll. Den dabei auftretenden Belastungsfall des plastischen Beulens verdeutlicht Bild 55. Wie Bild 56 zeigt, wird durch das Füllen mit Aluminiumschaum (Aufschäumung direkt im Hohlprofil) das Energieabsorptionsvermögen deutlich gesteigert, d.h. das Kollapsverhalten wird deutlich verbessert. Als am sinnvollsten erwiesen sich bei diesem Belastungsfall Schaumdichten von 0,6 bis 0,7 g/cm<sup>3</sup>. Dies kann aber nicht als Richtwert

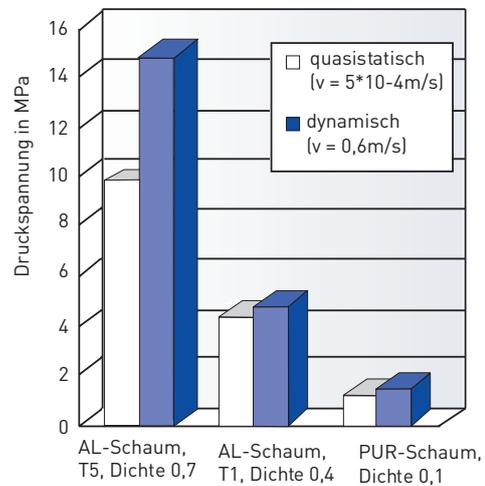
**(Tafel 5)**

Energieabsorptionsdaten von Aluminiumschaum (Foaminal, IFAM)

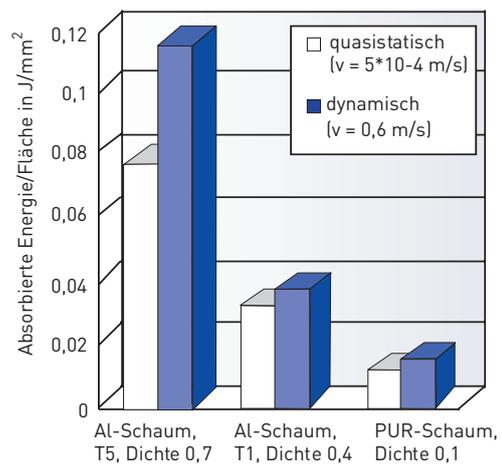
Legierung	AlMg1SiCu (6061)	AlMg1SiCu (6061)	AlSi7	AlSi7	AlSi12
Wärmebehandlung	Ausgeh.	ohne	ohne	ohne	ohne
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	0,6	0,6	0,55	0,63	0,6
Energieabsorption (50 % Stauchung)					
-Pro Volumen [kJ/dm <sup>3</sup> ]	7,9	7,1	4,4	5,3	3,2
-Pro Masse [kJ/kg]	13,2	11,9	8,0	8,4	5,3

**Vergleich Aluminiumschaum und PUR-Schaum (Bild 53)**

a)



b)



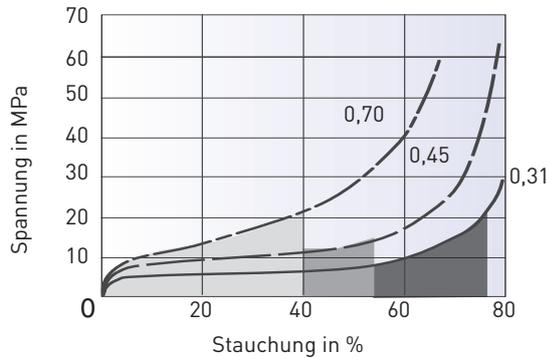
T1 und T5 = Wärmebehandlungszustände, Angabe der Dichte jeweils in g/cm<sup>3</sup> (nach Kalke, BMW)

a) Druckspannung bei 40 % Stauchung

b) Absorbierte Energie bei 40 % Stauchung

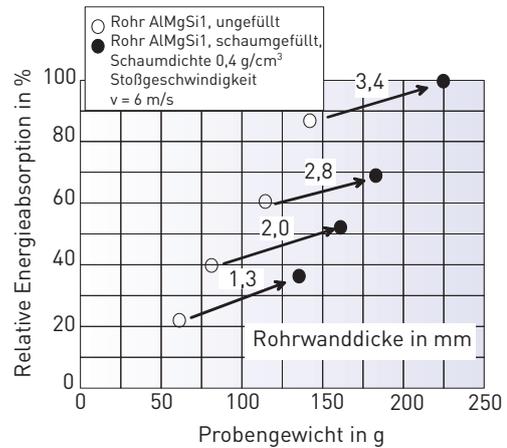
gelten, die Auswahl der jeweils geeigneten Schaumdichte muss sich vielmehr nach dem konkreten Belastungsfall richten, d.h. der maximalen Kraft, dem maximalen Deformationsweg und der zu absorbierenden Energiemenge.

Energieabsorption von Metallschäumen unterschiedlicher Dichte, Angabe in  $\text{g/cm}^3$  (FOAMINAL, Fraunhofer-IFAM, Bremen) (Bild 54)



Crashrohr aus Aluminium – Verdeutlichung des Verformungsverhaltens „Faltenbeulen“ (Bild: VW) (Bild 55)

Dynamischer Druckversuch an AlMgSi1-Rohren mit und ohne Aluminiumschaumfüllung (Bild 56)



Gekennzeichnet ist jeweils die Erhöhung der relativen Energieabsorption (nach Kalke, BMW)

E-Modul (Bild 57)



E-Modul von schmelzmetallurgisch erzeugtem Aluminiumschaum in Abhängigkeit von der Dichte (Norsk-Hydro, nach Åsholt)

### 3.4 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul ist im Zusammenhang mit der Geometrie eines Bauteiles ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Steifigkeit eines Bauteils. Er weist bei Aluminiumschäumen deutlich geringere Werte auf als bei Vollaluminium. Beispielsweise wurde für einen Al99,5-Schaum (Dichte  $0,4 \text{ g/cm}^3$ ) mit  $2,4 \text{ GPa}$  ein deutlich geringerer Wert gemessen als für massive Al99,5-Proben ( $67 \text{ GPa}$ ).

#### Einfluss der Dichte

Der E-Modul von Schäumen steigt mit zunehmender Dichte an, wie in den Bildern 57 und 58 für Reinaluminium- bzw. AlSi12-Schaum ersichtlich. Dies gilt sowohl für pulvermetallurgisch hergestellte als auch schmelzmetallurgisch

erzeugte Metallschäume. Von Vorteil ist, dass durch Änderung der Dichte der E-Modul an einen bestimmten Anwendungsfall angepasst werden kann.

**Einfluss des Legierungsgehaltes**

Untersuchungen des E-Moduls (oben im Bild) und G-Moduls (unten im Bild) verschiedener Aluminiumschäume in Abhängigkeit von der Schaumdichte zeigt Bild 59. Neben dem Dichteeinfluss ist auch deutlich der Einfluss des Legierungsgehaltes auf die ermittelten Werte ablesbar.

**Prüfverfahren**

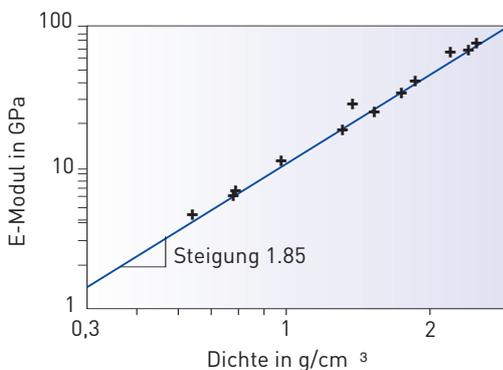
Die Prüfung des E-Moduls kann im Falle von Schäumen nicht über die sonst übliche Bestimmung des Tangentenmoduls (Anstieg der elastischen Geraden) erfolgen. Im Druckversuch wird bereits bei kleinen Stauchungen – also im bei massiven Werkstoffen elastischen Bereich - ein linearer Spannungsanstieg ermittelt, der nur teilweise reversibel ist. Zurückzuführen ist dieser Effekt auf Setzungserscheinungen der dreidimensionalen Schaumstruktur während der ersten Belastung.

Sinnvoll ist es daher, bei Untersuchungen kein herkömmliches Spannungs-Dehnungsdiagramm aufzunehmen, sondern bei konventionellen Verformungsversuchen Be- und Entlastungsschleifen einzubeziehen (schematisch im Bild 60 a), und den E-Modul aus dem Anstieg der Wiederbelastung zu errechnen.

Eine andere, in den Bildern 58 und 60 b angewandte Methode, besteht darin, stabförmige Proben mit rechteckigem Querschnitt zu Biege- oder Längsschwingungen anzuregen und aus der Resonanzfrequenz den Speichermodul zu bestimmen. Dieser kann, da die Messergebnisse nahezu frequenzunabhängig waren, dem statischen Elastizitätsmodul gleichgesetzt werden.

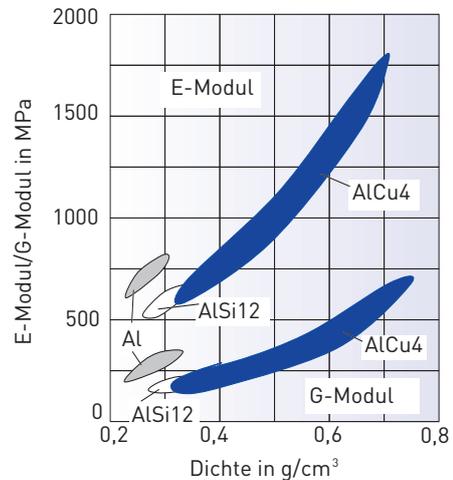
**3.5 Ermüdungsverhalten**

**Ermittlung durch Elastizitätsmodul von pulvermetallurgisch hergestellten AlSi12-Schäumen (Bild 58)**



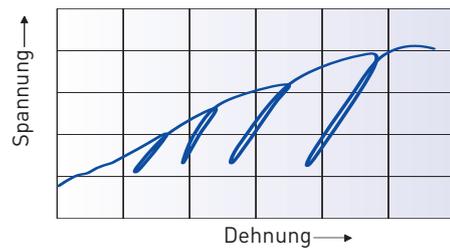
Ermittlung durch Anregung zu Biegeschwingung (nach Banhart et. al., Fraunhofer-IFAM Bremen)

**Elastizitäts- und Schubmodule von Aluminiumschäumen (Bild 59)**

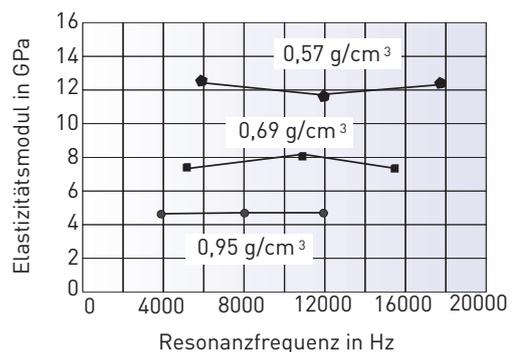


oben: E-Modul, unten: G-Modul (nach v. Hagen et. al., RWTH Aachen)

**Bestimmung des E-Moduls eines Aluminiumschäumens (Bild 60)**



a: Belastungsschleifen bei konventionellen Verformungsversuchen (schematisch, nach Degischer, TU Wien)



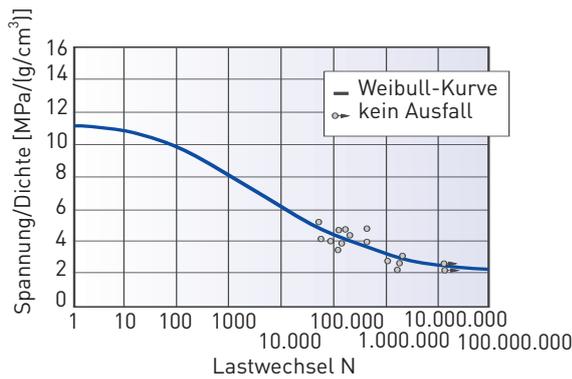
b: Elastizitätsmodul von Alulight als Funktion der Resonanzfrequenz (Mepura, Ranshofen, Österreich)

Sollen Aluminiumschäume im Fahrzeugbau oder anderen mechanisch hochbelasteten Strukturen eingesetzt werden, ist zu beachten, dass sie dabei nicht nur statischen, sondern auch zyklischen Belastungen ausgesetzt sind. Dementsprechend erfolgen umfangreiche experimentelle und auch Simulationsuntersuchungen des Ermüdungsverhaltens, um Auslegungsvorschriften und Material-

gesetze auch für den zyklischen Einsatz zu besitzen. Nur so lassen sich die Werkstoffgeometrie, Mikrostruktur und Zusammensetzung für die jeweilige Anwendung optimieren.

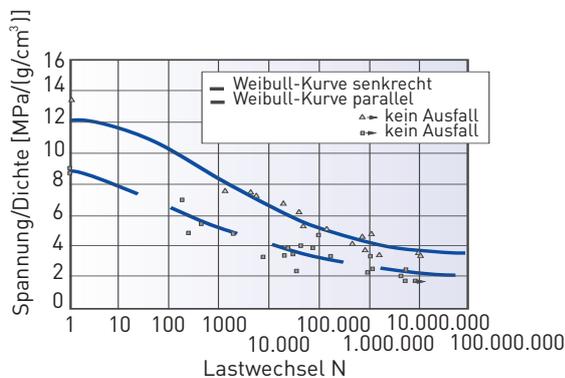
Bild 61 zeigt beispielhaft eine S-N-Kurve für einen pulvermetallurgisch hergestellten Schaum, Bild 62 für einen schmelzmetallurgisch hergestellten Schaum. In beiden Fällen wurde die reine Schaumstruktur mit einer Zug-Druck-Wechselbelastung mit einem Lastverhältnis von -1 geprüft. In den Bildern 61 und 62 sind dichtebezogene Spannungsniveaus über den zugehörigen Lastwechselzahlen aufgetragen. Die beim schmelzmetallurgischen Schaum zu erkennende Abhängigkeit von Prüf- und Schäumrichtung lässt sich auf Schwerkrafteffekte während der Herstellung zurückführen, die eine gewisse anisotrope Zellform bedingen.

**Zug-Druck-Wechselbelastungsversuche an AlMg1SiCu-Schaum (Bild 61)**



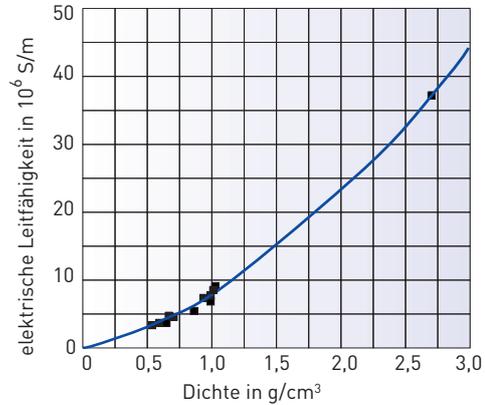
EN AW-6061, IFAM-Schaum, pulvermetallurgisch hergestellt (nach Schultz)

**Zug-Druck-Wechselbelastungsversuche an AlSi7Mg-Schaum mit 15 % SiC<sub>p</sub> (Teilchen – Particles) (Bild 62)**

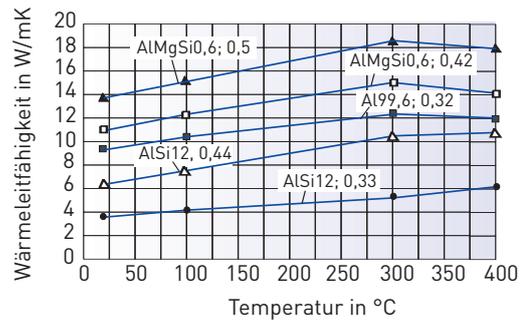


Hydro-Schaum, schmelzmetallurgisch hergestellt, Prüfung parallel zur Schäumrichtung - Quadrate, Prüfung senkrecht zur Schäumrichtung - Dreiecke (nach Schultz)

**Leitfähigkeit eines pulvermetallurgisch hergestellten Schaums (Alulight nach Mepura, Ranshofen, Österreich) (Bild 63)**



a: Elektrische Leitfähigkeit als Funktion der Dichte (z. Vgl. die elektrische Leitfähigkeit von massivem Aluminium beträgt  $37 \cdot 10^6$  S/m)



b: Wärmeleitfähigkeit von Aluminiumschaum als Funktion der Prüftemperatur (Wärmeleitfähigkeiten der massiven Basislegierungen: Al99,6 = 230 W/mK; AlMgSi0,6 = 200 W/mK; AlSi12 = 120 W/mK)

Durch eine Wärmebehandlung lässt sich das Ermüdungsverhalten weiter beeinflussen. Deutliche Effekte zeigt beispielsweise eine Aushärtung, die dem Schaum eine deutlich höhere statische Druckfestigkeit verleiht (Bild 47b, S. 25). Dieser positive Effekt kann sich jedoch ins Gegenteil verkehren, wenn zyklische Belastungen herrschen. Hintergrund ist der durch die Aushärtung bedingte Wechsel des Schadenmechanismus vom zähen zum spröden Verhalten hin. So kann die Bruchzähigkeit sinken, Rissbildung und Rissausbreitung können die Folge sein. Beide Effekte begünstigen ein früheres Versagen bei Wechselbelastung.

**3.6 Physikalische und chemische Eigenschaften**

Schäume zeigen gegenüber kompakten Aluminiumproben einige wichtige Abweichungen im physikalischen Verhalten, die bei bestimmten Anwendungen entscheidende Vorteile bringen können. Eine Werteübersicht über verschiedene Schäume und Dichten enthalten die Tafeln 1 und 2.

[Tafel 6] Vergleich der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Werkstoffe (nach Sedlacek und Paschen, RWTH Aachen)

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit in W/mK
Normalbeton	2,1
Aluminium	200
Aluminiumschaum	12
Glas	0,8
Stahl	80

### Leitfähigkeit

Nur ein kleiner Volumenanteil eines Aluminiumschaumes entfällt auf die metallischen Porenwände, der weitaus größere Rest auf gasgefüllte Poren, die zudem mit einer nicht leitfähigen Oxidhaut überzogen sind. Aus diesen Gründen wird die Leitfähigkeit sowohl für Strom als auch für Wärme (s. unten) im Vergleich zu massiven Materialien drastisch reduziert, wie die Werte in den Tafeln 1 und 2 (S. 21) belegen. Der spezifische elektrische Widerstand nimmt um ein Vielfaches zu. Bild 63a zeigt, dass die elektrische Leitfähigkeit von Aluminiumschäumen erwartungsgemäß mit ansteigender Dichte zunimmt.

### Wärmeleitfähigkeit/-dämmung

Schaumaluminium ist gut wärmedämmend, da es eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit als Vollaluminium hat (s. Tafel 6). Die Wärmeleitfähigkeit beträgt nur etwa 1/10 der Wärmeleitfähigkeit der entsprechenden massiven Aluminiumlegierungen (Alulight, Mepura). Sie hängt von der Wärmeleitfähigkeit der Basislegierung ab. Die Wärmeleitfähigkeit eines Schaumes steigt mit zunehmender Dichte an. Durch eine zusätzliche oxidierende Behandlung kann die Wärmeleitfähigkeit weiter reduziert werden. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit steigender Temperatur leicht zu (Bild 63b). Der Ausdehnungskoeffizient bleibt im Verhältnis zu massiven Metallen nahezu konstant (s. Tafel 3, S. 25).

### Schall- und Vibrationsdämmung

Eine wichtige Eigenschaft des Werkstoffes ist – wie in 3.3 gezeigt – das Vermögen, bei Stoßbeanspruchung Energie zu absorbieren; Aluminiumschaum ist zudem sehr gut schallabsorbierend und vibrationsdämmend. Der Verlustfaktor von Aluminiumschaum ist wesentlich höher als der von massivem Aluminium. Dabei hängt die Dämpfung nur geringfügig von der Frequenz ab. Die Schallwelle dringt hierbei in die Schaumstruktur ein. Innerhalb des Schaumes wird sie durch die unregelmäßigen Porenoberflächen reflektiert. Die Schwingungsenergie wird hauptsächlich durch minimale Verformungen der Zellwände abgeleitet und dabei in Wärme umgewandelt. Dies bedeutet, die Intensität des reflektierten Schalls wird gesenkt. Tafel 7 gibt einen Anhaltspunkt für den Absorptionsgrad eines offenporigen Aluminiumschaumes im Vergleich zu anderen Werkstoffen. Der Wert liegt mit 0,25 relativ günstig. In Versuchen an pulvermetallurgischen Aluminium-

schäumen (Alulight, Mepura, Ranshofen, Österr.) erwies sich die Schallabsorption als umso höher, je feiner die Porosität war und je mehr Poren miteinander verbunden waren. Für bestimmte Frequenzen konnte die maximale Schallabsorption durch die Größe des Luftspaltes zwischen dem Schaumkörper und einer dahinterliegenden Wand optimiert werden. Die Vergrößerung des Luftspaltes bewirkte eine Verschiebung des Maximums der Schallabsorption zu niedrigeren Frequenzen. Die Verwendung von zwei Aluminiumschaum-Platten mit verschiedenen Porengrößen erlaubte zudem die Verbreiterung des Frequenzbereiches der maximalen Schallabsorption (weitere Angaben zur Schalldämmung in 5.1, S. 37).

Die akustischen Eigenschaften der Schäume legen ihre Anwendung als schalldämmende Abgrenzung des Motorenraumes eines Kraftfahrzeugs nahe. In diesem Fall muss die Lärmabstrahlung sowohl ins Fahrzeuginnere als auch in die Umgebung reduziert werden. Unter den grundsätzlichen Möglichkeiten der Wechselwirkung von Schallwellen mit einem Medium (Reflexion, Transmission mit Beugung und Absorption) ist für die Schalldämmung vor allem die Absorption, bei der ein Teil der Wellenenergie in Wärme umgewandelt wird, von Interesse. Hierbei konnten Schäume bisher noch nicht vollständig überzeugen. Verbesserungen sind aber zu erwarten, wenn es gelänge, eine Kombination von offenporigem und geschlossenem Schaum herzustellen. Bei einer solchen Struktur ist es denkbar, dass einzelne Zellen als Resonator wirken – ein Effekt, der eventuell gezielt zu nutzen wäre.

Dennoch weist Aluminium als Schaum bisher nicht die Schalldämpfung von Grauguss auf. Damit diese erreicht wird, sind Beschichtungen notwendig, die letztlich aber auch wieder Gewicht und Preis erhöhen.

### Elektromagnetische Abschirmung

Die elektromagnetische Abschirmung eines Materials ist dann von Bedeutung, wenn es zum Schutz von elektronischen Geräten oder von Lebewesen vor elektromagnetischer Strahlung eingesetzt werden soll. Hierfür soll das Material die elektromagnetische Strahlung reflektieren, eine Fähigkeit, die durch die Abschirmeffizienz definiert wird. Diese hängt von der Frequenz der elektromagnetischen Welle und von den elektromagnetischen Eigen-

[Tafel 7] Vergleich des Schallabsorptionsgrades verschiedener Werkstoffe (nach Sedlacek und Paschen, RWTH Aachen)

Werkstoff	Absorptionsgrad
Mauerwerk	0,02
Tapete auf Kalkgipsputz	0,05
Gasbeton	0,18
20 mm Mineralfaserplatte	0,85
50 mm Mineralfaserplatte	1,00
Aluminiumschaum (offenporig)	0,25

schaften des Abschirmmaterials ab. Untersuchungen an pulvermetallurgisch hergestellten Schäumen (Alulight, Mepura, Ranshofen) ergaben eine sehr gute Magnetfeld-Abschirmeffizienz, die bei Frequenzen bis zu 10 MHz der von Si-Stählen entspricht. Bei gleichem Gewicht gemessen wiesen beide Werkstoffe eine Abschirmeffizienz von ca. 110 dB bei 10 MHz auf. Bei höheren Frequenzen war der Schaum sogar erheblich besser, z.B. bei 100 MHz ca. 120 dB (Schaum) gegenüber 80 dB (Si-Stahl).

#### Chemische Eigenschaften

Aluminiumschäume sind aufgrund ihrer dichten Oxidhaut unbrennbar. Sie sind auch bei hohen Temperaturen noch formstabil und setzen keine giftigen Gase frei. Bezüglich seines Korrosionsverhaltens kann das Schaummaterial aus demselben Grund als stabil betrachtet werden. Es ist auch bei Einwirkung von Luftströmungen oder Vibrationen nicht erosiv und kann in den meisten Anwendungen ohne Abdeckplatten verwendet werden. Aluminiumschäume sind wie auch Aluminium hygienisch unbedenklich. Sie locken keine Insekten oder andere Schädlinge an.

## 4. Verarbeitung von Aluminiumschaum

Die Verarbeitung von reinen Aluminiumschäumen zu fertigen Produkten ist in der Regel einfach: Die Schaumkörper lassen sich schneiden, bohren, sägen. Nur bei Schäumen, die keramische Partikel enthalten, kann – wie im Kapitel 2.1 bereits angedeutet – die Verarbeitbarkeit erschwert sein.

Um Aluminiumschäume oder mit Schaum gefüllte Hohlprofile in den verschiedensten Anwendungsfällen einsetzen zu können, sind geeignete Fügeverfahren eine unabdingbare Voraussetzung. Angesichts der zellularen Struktur können für Aluminium etablierte Verfahren nicht unbedingt 1:1 übertragen werden.

### 4.1 Schraub- und Nietverbindungen

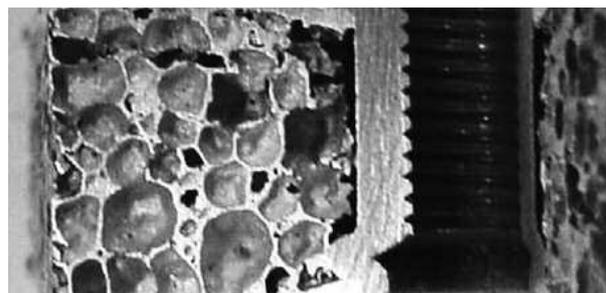
Das Verbinden mit anderen Teilen kann im einfachsten Fall über das Verschrauben der Aluminiumschaumplatten mit Holzschrauben erfolgen, z.B. für Anwendungen in der Möbelindustrie. Die Haltbarkeit kann über die Verwendung von Buchsen oder Blindnietmuttern noch erhöht werden, die gegebenenfalls sogar eingeschäumt werden können.

Die Bilder 64 a und b zeigen die Anwendung von Blindnietmuttern in einem Aluminiumsandwichbauteil. Beim Anbringen von Befestigungspunkten an Schaumbauteilen erweist es sich im Hinblick auf hohe Verbindungsfestigkeiten als vorteilhaft, möglichst beide Decklagen in den Kraftfluss einzubinden. Dies ist u.a. möglich, indem eine über Form- und Kraftschluss wirkende Blindnietmutter in eine zuvor in das Sandwich eingebrachte Durchgangsbohrung gesetzt wird. Bei den Standardblindnietmuttern

a)

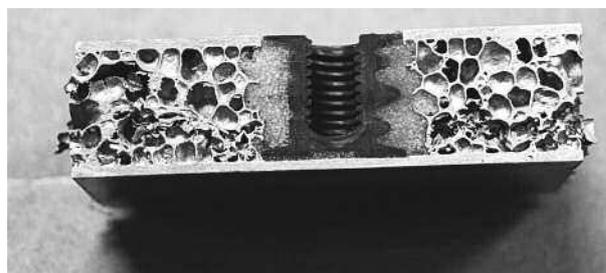


b)

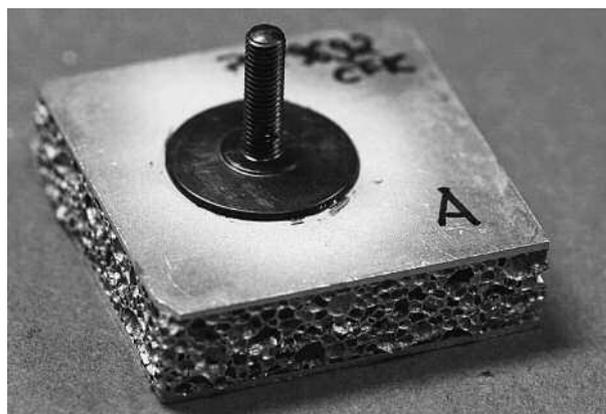


a) Blindnietmuttern als Verbindungselement in Aluminiumschäumen (Böllhoff GmbH)

b) Befestigen einer Böllhoff RIVKLE® Sonderblindnietmutter im Aluminiumschaum (Bild 64)



Einbinden eines ICO-Tec® Inserts mittels Kleben. (Bild 65a)



Befestigen eines ICO-Tec® Klebebolzens (Böllhoff GmbH) (Bild 65b)

Direktfügen mit RIVSET® Stanzniete (Böllhoff GmbH). (Bild 66)



jedoch wird nur eine Lage des Sandwiches in den Kraftfluss eingebunden, wenngleich bei Scherzugbelastung eine festigkeitssteigernde Abstützungswirkung der Niet-hülse im Schaum gegeben ist. Die gezeigte, speziell für diesen Anwendungsfall entwickelte Sonderblindnietmutter jedoch bindet über einen Bund auch die Gegenlage mit in den Kraftfluss ein und setzt den Bauteilwerkstoff während des Setzens unter Spannungen, wodurch die Verbindungsfestigkeit und -steifigkeit signifikant gesteigert wird (Bild 64b).

Soll hingegen aus optischen oder funktionstechnischen Gründen eine Durchgangsbohrung vermieden werden, bieten sich die Inserttechniken an. In entsprechend vorbereitete Sacklöcher werden Inserts eingeklebt, welche dann stoffschlüssig wirkende Anbindungspunkte für spätere Fügeoperationen darstellen (Bild 65a). Soll aufgrund von werkstoff- oder funktionstechnischen Gründen keine Decklage mit einer Bohrung versehen werden, kann ein Klebebolzen eingesetzt werden, welcher über eine Kontaktfläche mittels Kleben stoffschlüssig angebunden wird (Bild 65b).

Bild 66 zeigt die Verwendung eines Stanzniet.

#### 4.2 Löten

Das Löten ist möglich, jedoch ist vor dem eigentlichen Verbinden eine mechanische Entfernung der Oxidhaut erforderlich. Herkömmliche Flussmittel können unter Umständen in die Porenstruktur hineinlaufen und gegebenenfalls Korrosionsprobleme verursachen.

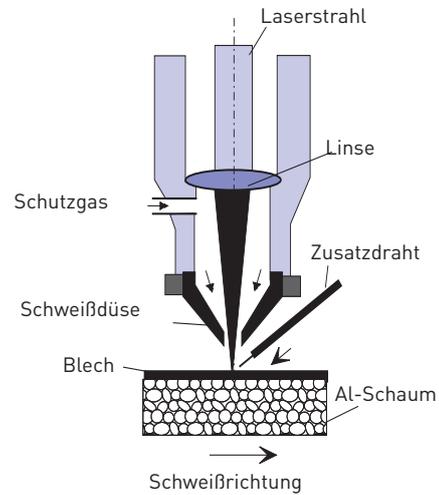
#### 4.3 Schweißen

Insbesondere das Laserstrahlschweißen stellt aufgrund seiner lokal begrenzten, konzentrierten Energiezufuhr ein vielversprechendes Verfahren zum Fügen von Aluminiumschäumen dar. Von Vorteil ist der geringe und konzentrierte Wärmeeintrag und der damit verbundene geringe Verzug.

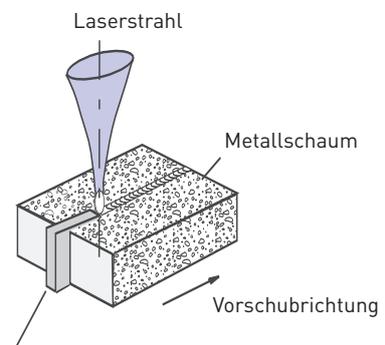
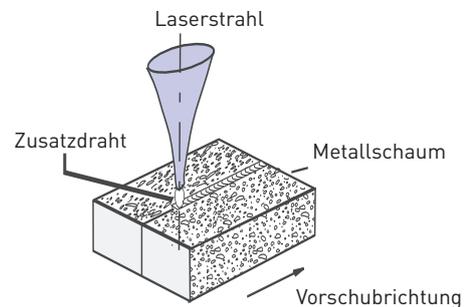
Beim diesem Verfahren wird - wie im Bild 67a und b ersichtlich - der Laserstrahl über ein Linsensystem durch die Schweißdüse auf die Werkstückoberfläche fokussiert. Gleichzeitig tritt durch die Düse koaxial mit dem Strahl das Arbeits- bzw. Schutzgas aus. Optional kann seitlich ein Zusatzwerkstoff in Drahtform zugeführt werden. Trifft der Laserstrahl auf die Werkstückoberfläche, wird die Laserstrahlung teilweise reflektiert bzw. absorbiert. Der absorbierte Anteil wird in Wärme umgewandelt und bewirkt das Aufschmelzen des Werkstoffs.

Das Laserschweißen kann als Wärmeleitungs- oder Tiefschweißen erfolgen (Bild 68). Das Wärmeleitungs-schweißen ist durch eine sehr breite und flache Schweißnaht gekennzeichnet. Ab einer bestimmten, vom Werkstoff abhängigen Leistungsdichte (bei Aluminium ca.

Laserstrahlschweißen von Aluminiumschäumen, Verfahrensprinzip (Bayerisches Laserzentrum Erlangen) (Bild 67a)



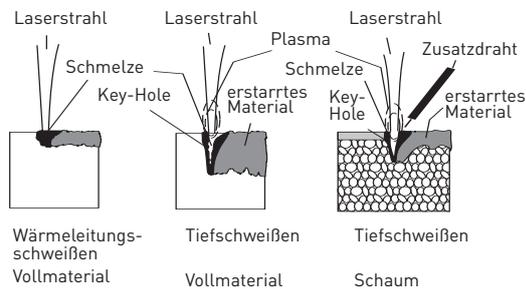
Verschiedene Techniken der Zufuhr des Zusatzwerkstoffes (nach LZH Laserzentrum Hannover) (Bild 67b)



Zusatzprofil im Fugespalt (Blechprofil oder aufschäumbares Profil)

$10^6 \text{ W/cm}^2$ ) verdampft das Metall. Dadurch entsteht ein Dampfkanal (Key-Hole), was zu sehr engen und tiefen Schweißnähten führt (Tiefschweißen).

### Wärmeleitungs- u. Tiefschweißen (Bayerisches Laserzentrum, Erlangen) (Bild 68)

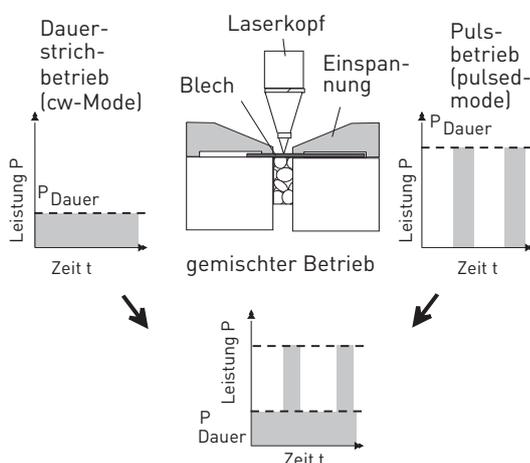


Das Fügen der porösen Struktur ist nur unter Verwendung von Zusatzwerkstoff möglich, denn durch die Verwendung von Zusatzdraht kann ein Zusammenfall der zellularen Struktur beim Phasenübergang fest-flüssig vermieden werden. Bei geringen Laserleistungen führt die partielle Abschirmung durch den Draht zur Minderung der Einschweißtiefe bzw. Vorschubgeschwindigkeit. Bei entsprechend höheren Leistungen ist jedoch auch hier ein Tiefschweißen realisierbar.

Auch im Fall des Laserstrahlschweißens von Blech-Schaum-Verbindungen ist die Zuführung eines Zusatzwerkstoffes notwendig, um das Verlaufen von schmelzflüssigem Blechmaterial in der Porenstruktur auszugleichen und so einen Nahtefall zu verhindern.

Verschiedene Techniken der Zusatzwerkstoffzufuhr kommen in Frage. Beispielsweise lassen sich gesteigerte Schweißgeschwindigkeiten und der energetisch günstigere Tiefschweißeffekt erreichen, wenn Profile aus konven-

### Grundsätzliche Betriebsarten des Lasers - Dauerstrichbetrieb und gepulst (schematisch nach Burzer, Bayerisches Laserzentrum Erlangen) (Bild 69)



a)

b)

Beispiele für erfolgreiche Schweißungen (Bayerisches Laserzentrum, Erlangen) (Bild 70)

tionellem Aluminiumblech oder aufschäumbarem Halbzeug im Fügespalt vordeponiert werden. Diese Zusatzwerkstoffe führen aufgrund der massiven Materialzugabe zu einer deutlich gesteigerten Dichte in der Fügezone. Als weitere Techniken der Zusatzwerkstoffzufuhr können aktiv porenbildende pulver- und pastenförmige Materialien sowie die Einleitung von technischen Gasen in das laserinduzierte Schmelzbad zum Einsatz kommen. Derartige Methoden sind für ein eingeschränktes Grundwerkstoffspektrum mit einer Dichte ab  $1,0 \text{ g/cm}^3$  anwendbar. Vorteilhaft ist jedoch die dem Grundwerkstoffkennwert ähnliche Dichte in der Fügezone.

Die äußere Nahtbewertung verdeutlicht, dass die Schweißzone mit Ausnahme der Anwendung von Zusatzdraht eine geschlossene Oberfläche aufweist (LZH Hannover). Computertomographische Untersuchungen dokumentieren, dass die innere Nahtstruktur wesentlich durch den applizierten Zusatzwerkstoff determiniert wird. Die Festigkeit der Fügeverbindung liegt mindestens auf dem Niveau des Grundwerkstoffes. Eine gesteigerte Dichte in der Fügezone sowie die feinkörnige Kristallstruktur in der Übergangszone führen zu vergleichsweise hohen Kennwerten. Die Ergebnisse der Arbeit weisen die Eignung des Laserstrahlschweißens für zelluläre Aluminiumwerkstoffe mit Materialstärken bis 15 mm nach.

Schweißversuche mit einem Nd:YAG-Laser (mittlere Leistung 2 kW, Bayerisches Laserzentrum Erlangen) zeigten beim Verschweißen von 1 mm dicken Aluminiumblechen (EN AW-6016) und Schäumen aus einer AlSi-Legierung (Zusatzwerkstoff AlSi- und AlMg-Legierungen), dass die bisherige Arbeitsweise des Lasers modifiziert werden muss.

Der Laser ist grundsätzlich im Dauerstrichbetrieb und gepulst betreibbar (s. Bild 69). Beste Ergebnisse an Schäumen erzielte eine Mischform beider Betriebsarten. Sie führt zu einer Kombination aus stoffschlüssiger und formschlüssiger Verbindung, da das aufgeschmolzene Material (Blech und Zusatzwerkstoff) auch teilweise in die Schaumporen hineinläuft. Da nur eine geringe, aber sehr konzentrierte Wärmeeinbringung erfolgt, ist im Gegensatz zu konventionellen Schweißverfahren nahezu kein Verzug zu befürchten.

■ Aluminiumschäume – Herstellung, Anwendung, Recycling

Die Bilder 70a und b zeigen Beispiele für erfolgreiche Schweißungen. Abziehversuche zeigten, dass der Tiefschweißeffekt ein entscheidender Parameter für die Festigkeit der Verbindung ist. Wird ein nicht so großer Tiefschweißeffekt erzielt, ist die Festigkeit der Verbindung geringer.

5. Anwendungen

Aluminiumschaum ist, wie bereits angedeutet, ein interessanter Werkstoff für den Fahrzeugbau, die Luft- und Raumfahrttechnik, aber auch für den Maschinen- und Behälterbau, die Transporttechnik und das Bauwesen. Der Werkstoff vereint aufgrund seiner Struktur multifunktionale Eigenschaften: Er kann sehr gut Energie absorbieren, ermöglicht Konstruktionen nach dem Leichtbauprinzip und kann wärmetechnische Anforderungen umsetzen.

Durch den Einsatz von Metallschaum unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten können Forderungen verschiedenster Industriezweige nach Massereduzierung (Leichtbauweise) gelöst werden. Darüber hinaus ist das Material wegen seiner ästhetisch schönen Oberflächenstruktur auch für die Innenarchitektur und den Fassadenbau ein begehrter Werkstoff.

Für den Einsatz des Materials sprechen je nach Anwendungsfall mehrere Eigenschaften wie vor allem die im Vergleich zu massiven Metallen geringe Dichte, die für viele Anwendungen ausreichende Festigkeit sowie die guten physikalischen Eigenschaften (hohes Energieaufnahmevermögen, Schallabsorption). Auch gegenüber Kunststoffen haben Aluminiumschäume je nach Anwendungsfall viele Vorteile (s. Tafel 8) Für die Praxis eröffnen sich damit Perspektiven für völlig neuartige Bauteil- und Komponentenkonstruktionen, wie beispielsweise der in 2.3.2.3 (S. 15) erwähnte Einsatz von Aluminiumschaumkernen in Gussteilen zeigt. Im Falle offenporiger Schäume könnten sogar andere Materialien in den Schaum eingebettet werden.

Ein großes Potenzial also: Dennoch ist zu beachten, dass Aluminiumschaum ein relativ teurer Werkstoff ist. Es ist daher immer genau zu überlegen, wo die Verwendung wirklich sinnvoll ist. Leichtigkeit allein reicht in der Regel nicht aus, es sollte ein weiterer Zusatznutzen zum Tragen kommen. Die Schaumeigenschaften selbst eröffnen in ihrer Summe ein großes Konstruktionspotenzial, das aber nur sinnvoll einzusetzen ist, wenn mehrere Eigenschaften gleichzeitig positiv wirken können.

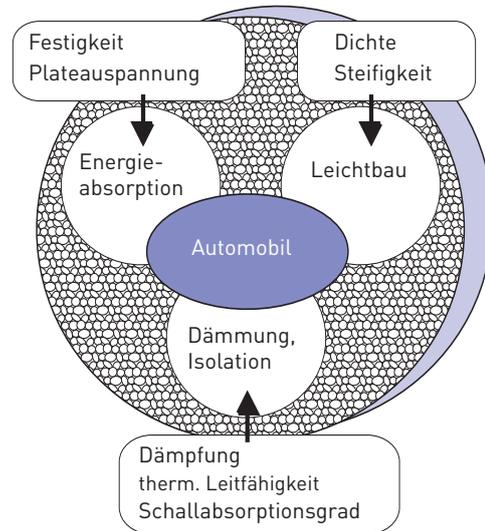
5.1 Aluminiumschäume im Pkw- und Nutzfahrzeugbau

Aus den genannten Eigenschaften des Aluminiumschaums, insbesondere dem geringen Gewicht und dem guten Energieabsorptionsvermögen, ergeben sich poten-

(Tafel 8) Vergleich einiger Eigenschaften von Aluminiumschäumen und Kunststoffen

Kunststoffe	Metallschäume
	leicht (geringe Dichte)
	wärme- und schallisierend
	Absorption von Stoßenergie
brennbar	schlecht oder nicht brennbar
geringe Hitzebeständigkeit	gute Hitzebeständigkeit
Recycling problematisch	Recycling unproblematisch

Mögliche Anwendungsgebiete im Fahrzeugbau mit Angabe der dabei relevanten Schaumeigenschaften. Im Idealfall kommt eine Eigenschaftskombination zum Tragen (nach Fraunhofer-IFAM, Bremen) (Bild 71)



zielle Anwendungsmöglichkeiten im Automobilbau bezüglich Partnerschutz, Insassenschutz, Fahrzeugschutz und auch Umweltschutz (= Lärmschutz, Gewichts- und damit Kraftstoffeinsparung). Damit lassen sich drei Anwendungsfelder unterscheiden (s. Bild 71):

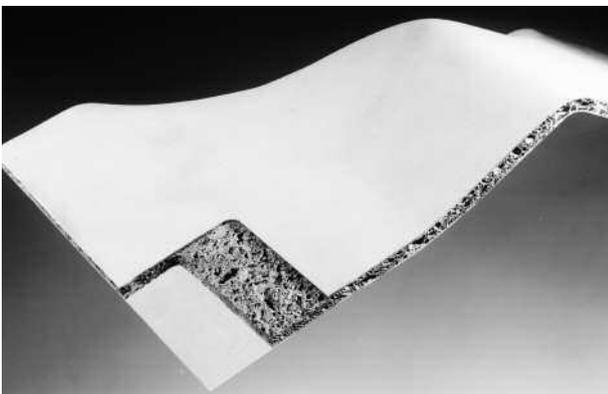
- Energieabsorption,
- Leichtbau und
- Dämmung.

Energieabsorption

Unter diesem Aspekt sind vor allem Anwendungen zu sehen, die zu einer Verbesserung der Sicherheit des Fahrzeuges im Crashfall führen, d.h. Fälle, in denen der Schaum plastisch und irreversibel verformt wird. Die guten Energieabsorptionseigenschaften könnten als Front- oder Seitenaufprallschutz ausgenutzt werden. Denkbar sind z.B. eine Aluminium-Ausschäumung der Stoßfängerbereiche



Die gekennzeichneten Polsterbereiche federn bei einem Seitencrash die Energie des Aufpralls ab. Ziel ist es, unterschiedliche Materialien exakt dort einzusetzen, wo sie mit ihren Eigenschaften eine optimale Wirkung erzielen – eine Chance für Aluminiumschaum (Foto: Volkswagen) (Bild 72)



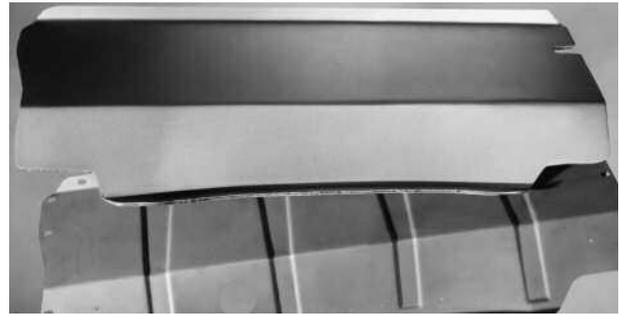
Querschnitt durch ein Aluminiumschaum-Sandwich (Foto: Karmann) (Bild 73a)

vorn und hinten, der Längsträger und der Seitenstruktur (A-, B-, C-Säule und Schweller, s. Bild 72). Das Knick- und Stauchverhalten von Hohlprofilen kann durch eine Ausschäumung nachhaltig beeinflusst werden. An Lastkraftwagen könnten Unterfahrschutzelemente versteift werden.

### Leichtbau

Das günstige Verhältnis von Masse zu Steifigkeit spricht dafür, großflächige Schaumbauteile in Bereichen des Kraftfahrzeugs einzusetzen, in denen hohe Anforderungen an die Stabilität gestellt werden. Zu nennen wären hier Motorhauben, Kofferraumdeckel, Trennwände und Schiebedächer. Alle diese Bauteile sollen unter der Wirkung äußerer Bedingungen (Fahrtwind) keine elastischen Verformungen erleiden oder gar anfangen zu schwingen – ein Effekt, der durch die guten Dämpfungseigenschaften des neuen Materials nahezu verhindert wird.

Auch beim Bau von Cabrios erscheint der Einsatz von Aluminiumschäumen als vielversprechend - gestattet er doch eine gewichtssparende Versteifung einer Cabriokarosserie, die im Verhältnis zu Vollkarosserien immer eine geringere Steifigkeit aufweist.



Typisches Karosserieteil aus AFS, im Hintergrund zum Vergleich das entsprechende Stahlteil mit Sicken (Foto: Karmann) (Bild 73b)

Ebenso könnten Aufbauten von Lastkraftwagen versteift werden, eine Anwendung, die insbesondere bei Kühlwagen aufgrund der reduzierten Wärmeleitfähigkeit des Aluminiumschaumes Vorteile bietet.

### Dämmung

Zu dieser Gruppe gehören Anwendungen, die das Dämpfungsverhalten von Aluminiumschäumen ausnutzen, z.B. zur Lärmdämmung oder Wärmeisolation. Hier bieten sich Kombinationen an, beispielsweise wärme- und schalldämpfende Paneele. Diese können, das ist ein weiterer Vorteil, auch gleichzeitig Leichtbau- oder Energieabsorptionsfunktionen übernehmen.

Bisher konnten sich Schäume im Automobilbereich noch nicht als Serienbauteile durchsetzen, da sie der Automobilindustrie (noch) zu teuer sind. Dessen ungeachtet ist eines der erklärten Ziele die Herstellung von Prototypenbauteilen, in denen möglichst viele der posi-



Konzeptstudie AFB – Fahrzeugkarosserie mit eingesetzten Teilen aus Aluminiumschaum (Foto: Karmann) (Bild 74)

ven Materialeigenschaften zum Tragen gebracht werden. Nur auf diesem Weg ist eine Akzeptanz des gegenüber anderen Werkstoffen höheren Preises zu erwarten. Ein in diesem Zusammenhang herausragendes Konzept stellt die AFS/AFB-Studie dar (Bilder 73, 74).

### AFS - Aluminum Foam Sandwich

Das vor einigen Jahren präsentierte Konzept AFS - Aluminum Foam Sandwich – der Wilhelm Karmann GmbH zeigt für die Automobilindustrie völlig neue Perspektiven. Bei AFS handelt es sich um schaumgefüllte Aluminiumplatten, deren Herstellung auf dem IFAM-Verfahren basiert. Aufschäumbares Halbzeug wird danach zwischen zwei Aluminiumdeckschichten eingebracht, anschließend in Platten gewalzt und kann daraufhin in die jeweils gewünschte Form gepresst werden. Das geformte Teil wird im Ofen erhitzt, wobei das Treibmittel aktiviert wird und das Aluminiumpulver aufschäumt. Klebezusätze sind zur Verbindung von Schaum und Außenschicht nicht erforderlich.

Das Material AFS (s. Bild 73a) ist bis zu 50 % leichter und bis zu zehnmal steifer als ein vergleichbares Stahlblech. Positiv bemerkbar machen sich außerdem die gute Schallabsorption bei höheren Frequenzen (ab circa 800 Hz) sowie die hervorragende Wärmedämmung, die gegenüber einem massiven Aluminiumblech um etwa 95 % besser ausfällt. Das Aluminiumschaum-Sandwich ist darüber hinaus temperaturstabil, unbrennbar, schadenstolerant und voll recyclingfähig. Die ideale Kombination unterschiedlicher Eigenschaften, wie zum Beispiel eine hohe Steifigkeit bei niedrigem Gewicht, gute Schallabsorption und eine gute Verarbeitbarkeit machen AFS zu einem einzigartigen Werkstoff für den Karosseriebau, der aufgrund seines geringen Gewichts und der hohen Stabilität besonders für den Einsatz bei Strukturteilen prädestiniert ist (Bild 73b). Dies gilt für tragende Teile der Karosserie und in Crash-Zonen an Front und Heck. Durch die besondere Torsionssteifigkeit können außerdem verschiedene Elemente im Karosseriebau zusammengefasst und die Anzahl der Teile damit um rund ein Drittel reduziert werden.

Das im Bild 73a gezeigte Aluminiumsandwich ist zwischen 8 mm und 12 mm dick, wobei auf die Außenhäute jeweils ca. 1 mm entfällt. Es ist 25 % leichter als das ebenfalls gezeigte Stahlblechbauteil. Die Steifigkeit wurde in einer Finite-Elemente-Simulation berechnet, in der Stahl- und Aluminiumsandwichbauteile einer simulierten Torsionsbelastung ausgesetzt und die resultierende Verformung und Spannungsverteilung ermittelt wurden. Das Ergebnis war eine um den Faktor 8 niedrigere Torsionsverformung beim Schaumsandwich bei gleichzeitig reduzierter Spannung.

Die Umsetzung dieser gerade in ihrer Summe einzigartigen Materialeigenschaften zeigt die Fahrzeug-Konzeptstudie "Aluminum Foam Body" (AFB, Bild 74). In Ver-

bindung mit einem Space-Frame versteifen hier großflächige AFS-Teile die Karosserie. Stirn- und Querwand der AFB-Karosserie bestehen aus Aluminiumschaum-Sandwichteilen, wodurch sich die Stabilität dieses Space-Frame um 30 % erhöht.

Diese Konzeptstudie kann noch aus anderen Gründen als richtungsweisend für die Automobilentwicklung gelten. Üblicherweise muss für jede Modellvariante eines Fahrzeugs eine neue oder zumindest stark modifizierte Karosseriestruktur entwickelt werden. Aus der AFB-Karosseriestruktur sind jedoch mehrere Fahrzeugvarianten - wie ein Coupé oder ein Cabriolet - ableitbar, die eine nahezu identische Basiskarosserie haben. Auf diese Weise könnte flexibel auf Marktveränderungen reagiert werden. Es lassen sich Nischenmodelle oder Kleinserien mit hoher Qualität bei geringem Entwicklungs- und Kostenaufwand produzieren.

Die Produktionskosten von AFS-Teilen liegen um etwa 20 % höher als bei Stahl. Durch den Einsatz des neuen Werkstoffs einschließlich der möglichen Teilereduktion fallen jedoch nach Analyse der Firma die Investitionen und Produktkosten, bezogen auf das Gesamtfahrzeugprojekt, geringer aus.

Nach optimistischen Schätzungen der Firma können etwa 20 % der typischen Karosseriestrukturen von Automobilen - das sind der Boden inklusive Heckboden, die Stirnwand und die Querwände - durch AFS ersetzt werden. Der Gewichtsvorteil von Aluminiumschaum brächte auch Einsparungen beim Benzinverbrauch: Durch den Einsatz des neuen Materials würde zum Beispiel eine Mittelklasse-Limousine durchschnittlich um 60 kg leichter, wodurch sie auf 100 km etwa 0,3 l weniger Benzin verbrauchen würde.

Daneben wurden bereits zahlreiche weitere Prototypenbauteile gefertigt, wie

- unterschiedliche Crashabsorber als schaumgefüllte Rohre oder Profile (Bild 75),
- Fahrzeugpanzerungen,
- Stoßstangen, auch für Straßenbahnen,
- Bremszylinder und
- die Arbeitsbühne eines Nutzfahrzeugs.



Motorträger mit einem Kern aus metcomb® (Foto: Hütte Kleinreichenbach) (Bild 75)

### Wesentliche Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie (nach Sedlacek und Paschen, RWTH Aachen) (Bild 76)

#### Tragfähigkeit

mechanische Festigkeit  
Standsicherheit  
Brandschutz  
Gewicht

#### Gebrauchstauglichkeit

Hygiene  
Gesundheitsschutz  
Umweltschutz  
Nutzungssicherheit  
Schallschutz  
Energieeinsparung  
Wärmeschutz  
Dekoration  
Recycling

## 5.2 Aluminiumschäume im Bauwesen

Auch im Bauwesen können sich durch den verstärkt geforderten Leichtbau interessante Einsatzgebiete für Metallschäume eröffnen. Derartige Bauteile sind beispielsweise für leichte Tragwerke im Fassadenbereich oder im mobilen Brückenbau notwendig. Die im Baubereich notwendigen Anforderungen (s. Bild 76) werden von Schaumteilen optimal erfüllt.

Interessante Ideen für den Einsatz des neuen Materials im Baubereich gibt es viele:

Beispielsweise könnten Schaumteile zur Substitution der Fahrbahnplatte einer Brücke dienen. Dies wäre insbesondere bei mobilen Brücken von Vorteil.

Diskutiert wurde auch die Möglichkeit des Einsatzes bei Fahrbahnübergängen zwischen Brücken und Straßen, wo Metallschäume den Schallschutz übernehmen könnten. Derzeit obliegt diese Aufgabe Mineralfaserplatten mit dem Nachteil einer schlechten mechanischen Beständigkeit.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit bestünde im Bau von Fahrstuhldämpfern. In diesem Fall werden die stoßabsorbierenden Eigenschaften des Schaumes ausgenutzt.

Denkbar wäre ebenso eine selbsttragende Superleichtbauweise (Träger bzw. Plattenkonstruktionen). Es lassen sich Holzkonstruktionen bzw. Verbunde ersetzen (Vorteil: Recyclierbarkeit).

Aluminiumschaumgefüllte Platten können weiterhin als Schalldämpfer in schallabsorbierenden Verkleidungen dienen. Von Nutzen sind derartige Verkleidungen z.B. in brandsicheren Räumen (Flugzeuge, Hotels, Gaststätten, Industriebauten...), in sterilen Umgebungen (antiseptisch, staubfrei) oder auch unter schwierigen Betriebsbedingungen (hohe Temperaturen, Staub, Feuchtigkeit, Gasströme...). Erste Anwendungen dieser Art wurden z.B. in Japan realisiert.

Akustische Untersuchungen haben gezeigt, dass offenporiger Metallschaum selbst keine schallabsorbierenden

Eigenschaften besitzt. Aber der Metallschaum beeinflusst die Schallausbreitung im Raum, was z.B. für ein positives Klangempfinden genutzt werden kann.

Als Füllmaterial für hohle Bauteile können Aluminiumschäume schädliche Vibrationen von Bauteilen verhindern. Mit Aluminiumschaum könnten gegebenenfalls sogar Stahlanker im Boden befestigt werden. Dazu müssten sich die Stahlanker in einer Hülse aus aufschäumbarem Aluminium befinden, die in das Bohrloch gebracht wird. Wird dort aufgeschäumt, ergäbe sich eine optimale Ausfüllung des Bohrloches.

Brandschutztechnisch sind Schaumteile ebenfalls sinnvoll einsetzbar, da sie im Falle eines Brandes für ca. 30 min ihre Tragfähigkeit bewahren.

Bei der Konstruktion von Bauelementen müssen jedoch in jedem Fall die anderen Eigenschaften des Schaumes berücksichtigt werden. Wie Bild 51 (S. 26) verdeutlicht, liegt der Schubmodul von AlCu4-Schäumen bei ca. 500 MPa bis 750 MPa. Dies entspricht ca. 1 % des Schubmoduls von Stahl. Diese „Schubweichheit“ ist bei der Auslegung einer Konstruktion unbedingt zu beachten. Das bedeutet, im Belastungsfalle eines Balkens sollte die Momentbeanspruchung den Stahlblechen zugewiesen werden und die Querkraftbeanspruchung dem Aluminiumschaum. Ebenso ist die Auswahl der richtigen Legierung wichtig. Höherfeste Legierungen wie AlCu4 erfüllen Anforderungen an die Tragfähigkeit besser als beispielsweise AlMgSi-Schäume. Im Moment jedoch ist es noch schwierig, diesen Aspekt genau zu quantifizieren, da noch immer eine große Streuung der Werkstoffkennwerte aufgrund von Inhomogenitäten zu verzeichnen ist. Der Baubereich fordert daher eine möglichst homogene Schaumstruktur – eine Forderung, an deren Verwirklichung derzeit intensiv gearbeitet wird.

Prinzipiell bieten Aluminiumschäume für den Baubereich verschiedene Vorteile, vor allem deshalb, weil in den meisten Anwendungen gemeinsam mehrere positive Schaumeigenschaften (Isolationsverhalten, Gewicht, Dämpfung, Recyclingfreundlichkeit...) genutzt werden können.

## 5.3 Aluminiumschäume in Klima-, Kälte- und Lufttechnik

Komponenten von Klima- und Kälteanlagen können mit offenporigen Metallschäumen höhere Leistungsdichten erreichen und kompakter gebaut werden. Gasförmige und flüssige Medien können eine offenporige Schaumstruktur durchströmen. Sie werden dabei verwirbelt. Gleichzeitig erlauben die große innere Oberfläche und die gute Wärmeleitfähigkeit des Metallschaums die Übertragung großer Wärmemengen. Zudem erweitert der neue Werkstoff die Möglichkeiten bei der Formgebung und Konstruktion von Wärmetauschern erheblich. Damit bietet es sich an, den Werkstoff auch in der Klima-, Kälte- und Lufttechnik einzusetzen.

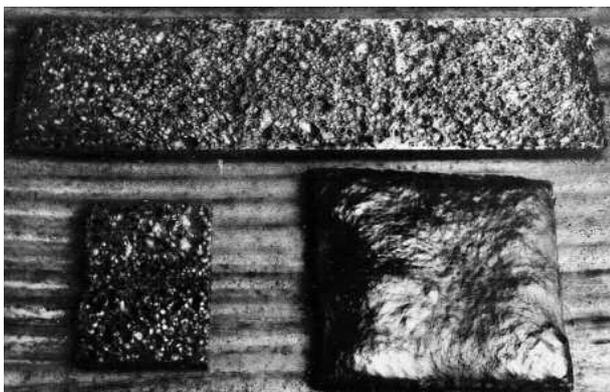
Erste Designkriterien lieferten theoretisch-experimentelle Untersuchungen des Instituts für Luft- und Kältetechnik in Dresden (BINE). Insbesondere Wärmeübertrager in Latentwärmespeichern und Kollektoren, Rekuperatoren und Kühlelemente für flüssige Fluide konnten erfolgreich getestet werden.

Jedoch wird die Metallschaumstruktur eine fein berippte, luftdurchströmte Struktur an Wärmeübertragern nicht ersetzen können. Zwar verbessern sich die wärmetechnischen Eigenschaften, wenn die heute bekannten Designkriterien umgesetzt werden, aber dieser Vorteil hebt sich durch eine praxisuntaugliche Erhöhung des Druckverlustes wieder auf.

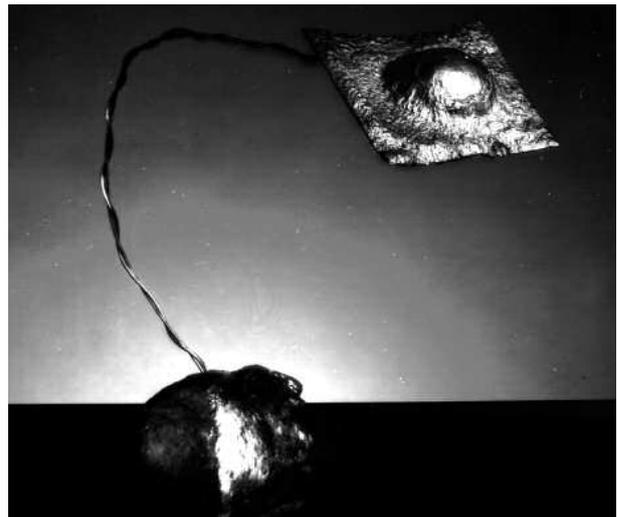
Gute Ergebnisse zeigten Strömungsvergleichmäßiger in kurzen Kanälen. In kurzen und nicht kreisrunden Strömungskanälen sorgen üblicherweise Gleichrichter und Siebe für gleichmäßige Strömungsverhältnisse über den Querschnitt. Während die Gleichrichter die Querkomponenten einer Strömung abbauen, helfen Siebe, die Strömung über den Querschnitt zu verteilen. Aufgrund seiner Struktur kann der Metallschaum mit seinem einfacheren und robusteren Aufbau beide Eigenschaften in sich vereinigen.

Das Labormuster eines kompakten Metallschaumkühlers für die Kühlung von Wasser zeigte, dass die erreichbare Kühlleistung neben der Baulänge des Kühlers auch von der Porendichte abhängt.

Auch zur PC-Kühlung könnten Metallschäume Einsatz finden. Üblicherweise dienen Wärmerohre der Prozessorkühlung in einem PC, indem ein im Röhrchen zirkulierendes Kältemittel die Wärme über die gesamte Rohrlänge verteilt. In Vergleichsuntersuchungen erbrachte eine Metallschaumvariante eine verbesserte Kühlleistung. Eine weitere Verbesserung verspricht die Vergrößerung der äußeren Metallschaumoberfläche. Praktisch lässt sich das durch Einfräsen von Ringspalten über den Umfang erreichen. Insgesamt aber reicht das Kühlniveau noch nicht für moderne leistungsstarke Prozessoren.



Unregelmäßige Schaumstrukturen – Herausforderung für Designer (Foto: mob-design gmbh, Leverkusen) (Bild 77)



Leuchte „belle de jour“ (Foto: mob-design gmbh, Leverkusen) (Bild 78)

### 5.4 Möbel und Accessoires – Aluminiumschaum als Designobjekt

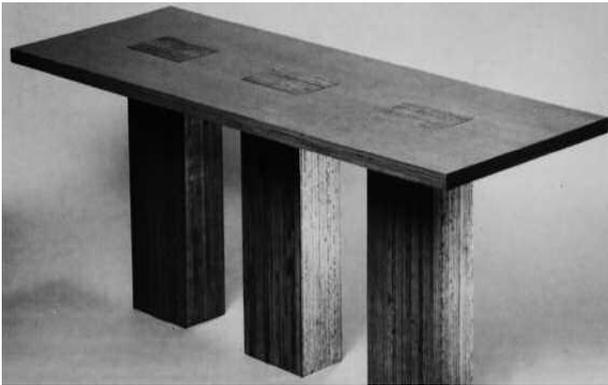
Wie bisher gezeigt, wurde Aluminiumschaum eigentlich als Werkstoff für die Automobil- und Luftfahrtindustrie erschaffen. Doch nach Designermeinung schlummern ungeahnte Möglichkeiten für den Wohnbereich in dem neuen Material: Sein extrem geringes Gewicht lässt schwer erscheinende Objekte gleichsam schweben, die Textur wirkt durch verschiedene Maserungen farbig. Beim Schäumen bilden sich freie Formen, Wellen und Zeichnungen. Regelmäßige und unregelmäßige Strukturen entstehen, die dem Metall eine völlig neue Ausstrahlung verleihen. Metallschaum-Komponenten können spezielle Lichteffekte erzielen und Räume architektonisch akzentuieren.

Der Schaum bietet - wie Bild 77 erkennen lässt - sowohl glatte als auch poröse oder wellige Oberflächenstrukturen. Durch das Teilen von Blöcken werden immer wieder neue Porenstrukturen sichtbar, die in Form und Struktur bei jedem Herstellungsvorgang individuell neu entfaltet werden. Kein Teil gleicht dem anderen. Auch bei serienmäßiger Produktion erhalten die Objekte einen individuellen Charakter und sind Einzelstücke.

Die Firma mob-design gmbh, Leverkusen, besitzt die Exklusivrechte für Leuchten, Möbel und Accessoires aus Aluminiumschaum. Sie entwickelte die ersten Modelle und Prototypen unter Mitwirkung u.a. der Firma MEPURA aus Österreich und des IFAM Bremen.

#### Leuchten

In bereits realisierten Objekten wurden jedoch nicht nur die gestalterischen Besonderheiten des Schaumes genutzt. Ebenso wichtig waren die spezifischen Materialeigenschaften, wie das extrem geringe Gewicht oder die hohe Wärmedämm- und Absorptionsfähigkeit. Gerade Leuchten sind hierfür ein herausragendes Beispiel. So ist der Schirm der im Bild 78 gezeigten



Großer Esstisch aus Aluminiumschaum und Buchenholz (Foto: mob-design gmbh, Leverkusen) (Bild 79)

Leuchte nicht nur unempfindlich gegen die vom Halogenleuchtmittel abgegebene Wärme, er kann auch nach längeren Einschaltzeiten ohne Gefahr des Fingerverbrennens berührt werden. Der Fuß der Lampe besteht ebenfalls aus frei geschäumtem Aluminium. Das geringe Gewicht des Materials ermöglicht auch die Gestaltung von großen Leuchten, da sogar größere Teile problemlos an der Decke angebracht werden können. Die variablen Oberflächenbeschaffenheiten reflektieren das Licht auf immer wieder neue Art. Vorschläge umfassen nach oben gebogene Schaumplatten als Deckenfluter, halbrunde Wandlampen aus Aluminiumschaum mit Glaseinsätzen oder auch rohrförmige, teilweise unterbrochene Schaumkonstruktionen. Kombinationen mit anderen Metallen, wie z.B. Messing, verleihen den Objekten zusätzlichen Reiz. Gefertigt wurde eine Vielzahl von Kerzenständern, z.B. aus einem oder mehreren aufgeschichteten Aluminiumschaumkissen bzw. als Aluminium-



„Pim und Pom“, Salz- und Pfefferstreuer aus Aluminiumschaumkieseln (Foto: mob-design gmbh, Leverkusen) (Bild 80)

schaumkissen, in dem sich mehrere Kerzen befinden. Faszinierende Licht- und Schatteneffekte lassen sich zudem bei der Verwendung offenerporiger Schäume im Leuchtenbau erzielen.

### Möbel

Auch der Gestaltung von Möbeln eröffnet Aluminiumschaum völlig neue Perspektiven, angefangen bei Laden- oder Messebaukonzeptionen über Büro- und Kücheneinrichtungen bis hin zum Wohnbereich. Holztische, wie im Bild 79, können durch die Kombination mit Aluminiumschaumplatten eine gegen Hitze vollkommen unempfindliche Oberfläche mit interessantem Design erhalten. So

kann die Buchenholzplatte eines Schreibtisches von Aluminiumschaumteilen getragen werden, während die Aluminiumschaumplatte eines Stehpultes von Buchenholzbeinen gehalten wird. Kombinationen mit Glas oder nur in Aluminiumschaum gefertigte Möbel sind ebenfalls denkbar. Weitere Designvorschläge betreffen den offenerporigen Schaum, beispielsweise zur Gestaltung eines Paravents.

### Accessoires

Metallische Schäume eignen sich nicht nur für den Möbel- und Leuchtenbereich, sondern erlauben auch die Herstellung phantasievoller und dennoch praktischer Accessoires. Die Oberflächen werden hier entweder sandgestrahlt oder geschlossen belassen. So ist ein schlichtes, aus einer gleichmäßig geschäumten Aluminiumplatte gefertigtes Tablett unempfindlich gegen Hitze und extrem leicht. Die Salz- und Pfefferstreuer „Pim und Pom“ (Bild 80) bestehen aus Aluminiumschaumkieseln sowie einem Fuß aus einem Aluminiumzylinder. Die Designer denken bereits weiter in Richtung von Griffen, Knöpfen und Modeschmuck.

### 5.5 Aluminiumschäume im Maschinenbau

Aluminiumschäume können mit ihrer geringen Dichte gerade im Maschinenbau mit großer Akzeptanz rechnen: So können schaumgefüllte Säulen, Balken oder Paneele herkömmliche dichte Materialien ersetzen, beispielweise in schnell rotierenden Druckwalzen oder bei sich schnell bewegenden Maschinenbalken oder Maschinenteilen. Überall wo Massen bewegt werden, kann durch den dann geringeren Antriebsaufwand Energie eingespart werden. Erste Anwendungen aus dem Textilmaschinenbereich ergaben zudem eine deutliche Vibrations- und damit Geräuschdämpfung.

Des Weiteren beeinflussen Metallschaumkonstruktionen Magnetfelder. Dieser Effekt kann genutzt werden, um Anforderungen der elektromagnetischen Verträglichkeit von Bauelementen zu erfüllen.

Für offenerporige Schäume ist die große Oberfläche für den Ablauf chemischer Reaktionen gestaltbar, denkbar z.B. als Katalysator und Batterieelement. Beispiele für Bauelemente zeigt Bild 81.



Beispiele für Bauteilformen aus offenerporigem Aluminiumschaum (Foto: Banhart) (Bild 81)

## 6. Recycling/Ökologie

Aluminiumschäume sind voll recycelbar und damit ökologisch problemlos. Sie können, sofern sie keine Fremdstoffe enthalten, z.B. keramische Kugeln, Fasern oder eingeschäumte (Stahl-)Teile, problemlos in den normalen Recyclingkreislauf von Aluminium eingebunden werden.

Je nach Menge und Größe der Schrotte sowie dem zur Anwendung kommenden Einschmelzverfahren kann ein Pressen vor dem Einschmelzen sinnvoll sein, um ein Verbrennen des Materials zu verhindern.

Da neben Knetlegierungen auch Gusslegierungen geschäumt werden, wäre eine Kennzeichnung der Schäume sinnvoll. Ist dies nicht der Fall, kann dem erhöhten Legierungsgehalt von Gusslegierungsschäumen, wie auch bei massiven Proben üblich, durch Verdünnen mit Hüttenaluminium entgegengewirkt werden. Dies ist aber nur dann notwendig, wenn Knetlegierungen hergestellt werden sollen.

Schmelzmetallurgisch hergestellte Aluminiumschäume, die keramische Komponenten enthalten, können durch einfaches Beimengen in die schäumbare Schmelze direkt wieder im Erzeugungsprozess verwendet werden. Dies stellt einen enormen ökologischen und ökonomischen Vorteil gegenüber Schäumverfahren dar, bei denen das Schaumkreislaufmaterial lediglich zu einer Sekundärlegierung rezykliert werden kann.

Ökologisch sind Aluminiumschäume als sinnvoll zu betrachten. Derzeit liegen noch keine Studien oder Ökobilanzen vor; dennoch ist davon auszugehen, dass Schäume deutliche Vorteile bringen:

- Dem erhöhten Herstellungsaufwand stehen je nach Einsatzfall beträchtliche Energieeinsparungen gegenüber – sowohl bei der Montage (z.B. Baubereich – Fassaden) oder im Betrieb (z.B. Automobil – Kraftstoffeinsparung, Maschinenbau – Massereduzierung bewegter Teile).
- Beim Aufschäumen werden keine giftigen Substanzen frei, die Arbeitstemperaturen sind relativ niedrig.
- Es fallen keine ökologisch problematischen Reststoffe an (Halden). Bei der Verarbeitung sind keine Schutzgase notwendig, die – wie bei dem ebenfalls leichten Konkurrenten Magnesium – entweder giftig sind (bei Mg:  $\text{SO}_2$ ) oder den Treibhauseffekt fördern (bei Mg:  $\text{SF}_6$ ).
- Auch im Betrieb werden keine giftigen Stoffe frei, wie z.B. bei Kunststoffen im Brandfall durchaus möglich.
- Die Lebensdauer von Schaumaluminiumteilen entspricht in der Regel der von Vollaluminiumteilen.

## Literatur

- Advanced Pore Morphology (APM) Metallschäume. Informationsblatt des Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Formgebung und Funktionswerkstoffe. Unter: [http://www.ifam.fhg.de/2801/fachinfo/infoblaetter/Produktblatt-2801-DE-Leichtbau-APM\\_Metallschaume.pdf](http://www.ifam.fhg.de/2801/fachinfo/infoblaetter/Produktblatt-2801-DE-Leichtbau-APM_Metallschaume.pdf) LS 06/05
- „Alulight“, Prospekt der Firmen MEPURA und Illichmann, Österreich, 1996
- Alulight – PM Aluminiumschaum, Beitrag der Eckart-Werke Fürth, Hagener Symposium Pulvermetallurgie Nov. 1995, Tagungsband DGM, Oberursel 1995, S. 323
- Aluminium-Taschenbuch, Bände 1 – 3, Aluminium-Verlag Düsseldorf, 15. bzw. 16. Auflage, 1999 bis 2003
- Alumobbing. Highlight 1/2 (1998) S. 28/31
- Ashby, M.F.; Seymour, C.J.; Cebon, D.: A Database of Metal Foams and Honeycombs. in Metallschäume, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 199/216
- Åsholt, P: Manufacturing of aluminium foams from PMMC melts - material characteristics and typical properties, in Metallschäume, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 27/38
- Banhart, J.: Industrialisation of aluminium foam technology. Proc. Of the 9th Intl. Conf. On Aluminium alloys, Inst. Of Materials Engineering Australasia Ltd., S. 764/770
- Banhart, J., Baumeister, J., Melzer, A., Seeliger, W., Weber, M. : Aluminiumschaum-Leichtbaustrukturen für den Fahrzeugbau. Sonderausgabe MTZ 1998
- Banhart, J., Baumeister, J.: Das Verformungsverhalten geschäumter Metalle. Metalle 51(1997)1/2, S. 19/24
- Banhart, J.: Aluminiumschaum – Entwicklungen und Anwendungsmöglichkeiten. Ingenieur-Werkstoffe 7(1998)1, S. 43/45
- Banhart, J.; Baumeister, J., Weber, M.: Geschäumte Metalle als neue Leichtbauwerkstoffe. Bericht 1993
- Banhart, J., Stanzick, H.: Metal foam evolution studied by synchrotron radiography. Applied Physics Letters, Vol. 78, No. 8, 19. Feb. 2001, S. 1152/1154
- Banhart, J.; Baumeister, J., Irretier, O., Jöbstl, J.: Wirtschaftliche Fertigungstechniken für die Herstellung von Aluminiumschäumen. ALUMINIUM. Manuskript Januar 2000
- Banhart, J., Weire, D.: On the road again: Metal foams find favor. Physics today, American Inst. Of Physics, July 2002, S. 37/42
- Banhart, J.: Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, 46(2001), S. 559/632
- Baumeister, J., Weber, M.; W. Bleck, H. v. Hagen: Stahlblechverbundwerkstoffe mit geschäumtem Aluminium. Vortrag Werkstoffwoche München, Oktober 1998
- Baumeister, J.; Weber, M: Metallschaum - ein Werkstoff mit Perspektiven. Aluminium 70(1994)3/4, S. 209/214
- Baumeister, J.: Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen, in Metallschäume, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 3/14
- Baumgärter, F., et.al.: The production of aluminium foam by PM and examples for application in Metal Matrix Composites and metallic foams, Euromat, Vol. 5, Wiley-VCH, 2000, S. 22/27
- Baumgärter, F., Gers, H.: Industrialization of P/M foaming process. In Metal foams and porous metal structures, Verlag MIT, Bremen, 1999, S. 73/78
- Benouali, A.H.; Froyen, I.: On the mechanical and microstructural characterization of aluminium foams. in Cellular Metals and Metal Foaming Technology, Verlag MIT Bremen, 2001, S. 269/273
- BINE-Informationsdienst: Metallschäume in der Wärmetechnik, Projektinfo 12/05, [www.bine.info](http://www.bine.info)
- Bobzin, K.: Thermisches Spritzen eröffnet sensationelle Möglichkeiten, Pressemitteilung des IOT (Institut Oberflächentechnik, ehemals Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften der RWTH Aachen), [www.iot.rwth-aachen.de](http://www.iot.rwth-aachen.de), Sept. 2004
- Böllinghaus, T., von Hagen, H.; Bleck, W.: Ermüdung von Sandwichverbunden aus Aluminiumschaum mit Stahldeckblechen. In Metallschäume, Hrsg. H.P. Degischer, Wiley-VCH, Weinheim, 2000, S. 488/492
- Botts, M.: Innovativer Leichtbau: Laserstrahlschweißen von Metallschaum. Informationsdienst

## Literaturverzeichnis - Aluminiumschäume

Wissenschaft - idw - Pressemitteilung, LZH Laser Zentrum Hannover e.V., 26.11.2002

Braune, R.; Otto, A.: Tailored Blanks mit Kernverbunden aus aufschäumbarem Aluminiumhalbzeug. In Metallschäume, Hrsg. H.P. Degischer, Wiley-VCH, Weinheim, 2000, S. 562/565

Braune, R.; Otto, A.: Basic Research on Tailored Blanks with Foamable Aluminium Sandwich Material. Metfoam. 2001

Burzer J., Bergmann, H.W.: Laserstrahlschweißen von Aluminium-Blech-Schaum-Verbindungen. Aluminium-Praxis 5/1998, S. 15

Burzer, I.; Bergmann, H.W.: Laserstrahlschweißen von Aluminium-Blech-Schaum-Verbindungen. In Metallschäume, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 163/170

Centeno Sanchez, R.I., et. Al. : Study of liquid-gas interactions during foaming of compacted Al-TiH<sub>2</sub>-powders. in Cellular Metals and Metal Foaming Technology, Verlag MIT Bremen, 2001, S. 69/77

Cohrt, H., Baumgärtner, F., Brungs, D., Gers, H.; Wiessler, U.; Baumeister, J.: Pulvermetallurgische Herstellung von Bauteilen aus Aluminium-Schäumen. Vortrag Werkstoffwoche München, Oktober 1998

Cohrt, H., Baumgärtner, F.; Brungs, D., Gers, H.: Grundzüge der Herstellung von Aluminiumschaum auf PM-Basis. in Metallschäume, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 15/26

Degischer, H.P.; Galovsky, U.; Gradinger, R.; Kretz, R.; Simancik, F.: Über mechanische Eigenschaften von Aluminiumschäumen. in Metallschäume, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 79/90

Degischer, H.P.; Simancik, F.: Recyclable foamed Aluminium an alternative to composites. Vortrag auf der DGM-Tagung: Werkstoffforschung unter Umweltaspekten, 24.-26.03.1994 Dresden, ersch. in "Environmental Aspects in Materials research", Hrsg. Warlimont, H.; DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel 1994, S. 137/140

Duarte, I.; Banhart, J.: Influence of process parameters on the expansion behaviour of aluminium foams. In Metal Matrix Composites and metallic foams, Euromat, Vol. 5, Wiley-VCH, 2000, S. 15/21

Degischer, H.P.; Simancik, F.: Schaumaluminium ALULIGHT - ein Werkstoff mit vielen Einsatzmöglichkeiten. Informationsmaterial des Leichtmetall-Kompetenzzentrums Ranshofen im Auftrag der MEPURA Metallpulvergesellschaft m.b.H. Ranshofen.

Easterling, K., Zschech, E.: Werkstoffe im Trend. Verlag Technik Berlin. 1997

Endler, F.; Lahner, S.; Hoffmann, M.: Aluminiumschaum aus der Sicht potentieller Anwender. in Metallschäume, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 117/124

Energieabsorbierende Materialien. Firmenprospekt Volkswagen AG, Wolfsburg, 1998

Fantastic foam. Licht + Architektur 12(1995)

Feith, G.: Schaumteile als Dauerkerne in Gussteilen. In Metallschäume, Hrsg. H.P. Degischer, Wiley-VCH, Weinheim, 2000, S. 4107/408

Foaminal – Eigenschaftsübersicht und Konstruktionsrichtlinien. Version 1.4, Fraunhofer-IFAM Bremen, Informationsschrift, 2006, s. auch [http://www.metal-foam.com/2801/leichtbauwerkstoffe/metallschaume/design/design\\_guidelines\\_german\\_V14.pdf](http://www.metal-foam.com/2801/leichtbauwerkstoffe/metallschaume/design/design_guidelines_german_V14.pdf)

Foaminal. Product data sheet. Fraunhofer-IFAM Bremen 01/01

Formteile aus Schaumaluminium. Firmenprospekt der Firma Neumann Aluminium Foam, Marktl, Österreich 1998

Friedrich, H.: Einsatz innovativer Werkstoffe – Sicherheit für das Auto der Zukunft. Pressekonferenz VW, Hannover Messe, April 1998

GLEICH GmbH Metallplatten-Service Firmenprospekte

Grote, F.; Busse, P.: Gießtechnische Herstellung offenerporiger Metallschwämme mittels mineralischer Platzhalter. In Metallschäume, Hrsg. H.P. Degischer, Wiley-VCH, Weinheim, 2000, S. 415/419

Gergely, V., Curran, D.C., Clyne, T. W. Drainage of metallic foams – modeling and experimental observations. in Cellular Metals and Metal Foaming Technology, Verlag MIT Bremen, 2001, S. 105/110

Götzinger, B., Kretz, R.: Deformationselemente aus Aluminiumschaum für den Insassenschutz im Personenwagen. Tagungsband, 1. Ranshofener Leichtmetalltage, 2000, S. 185/195

- Hagen, H. von, W. Bleck: Mechanische Eigenschaften von Aluminiumschaum ohne und mit Stahldeckblechen. Vortrag Werkstoffwoche München, Oktober 1998
- Hagen, H. von; Nicklas, D.; Bleck, W.: Charakterisierung von Sandwich-Verbunden aus Aluminiumschaum und Stahldeckblechen. in *Metallschäume*, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 125/136
- Hipke, T., Hohlfeld, J., Thümmeler, R.: Metallschaum - Konstruktionswerkstoff für den Werkzeugmaschinenbau, *Metall* 57 (2003) 9; S. 557/562
- Harders, H.: Ermüdung von Aluminiumschaum. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Der Andere Verlag. 2005.
- Haesche, M.; Heuser, M., Lange, D.; Meyer, N., Baumeister, J.; Weise, J.: Einsatz des Thixogießverfahrens zur Herstellung von Metallschaum aus AlMg4,5Mn0,7-Sägespänen. *Metall* 60(2996)9, S. 542/547
- Huschka, S.; Hicken, S.; Ahrens, F.-J.: Modellierung der Spannungs-Stauchungskurven von Berücksichtigung der Porengrößenverteilung. in *Metallschäume*, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 189/198
- Industrielle Nutzung von Stahlblechverbundwerkstoffen mit geschäumtem Aluminium. *Berichte aus der Anwendungsforschung*, Studiengesellschaft für Stahlanwendung, 1(1997), S. 1/2
- J. Jerz [Hrsg.]: International Conference "Advanced Metallic Materials"; 5.-7. November 2003; Smolenice Castle, Slowakei; Verlag
- Kalke, S.: Aluminiumschaum im Wettbewerb zu anderen energieabsorbierenden Systemen im Automobil. in *Metallschäume*, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 103/116
- Kammer, C.: Aluminiumschäume – Konstruktionswerkstoffe mit großem Potential. *Aluminium* 73(1997)5, S. 336/339
- Kammer, C.: Designobjekt Aluminiumschaum: Träumen vom Schäumen. *Aluminium-Praxis* 4 (1998), S. 19
- Kaufmann, H., Kretz, R.: Fabrication of squeeze castings with permanent aluminium foam cores, In *Metal Matrix Composites and metallic foams*, Euromat, Vol. 5, Wiley-VCH, 2000, S. 62/67
- Kennedy, A.R.; Asavavisithchai, S.: Effect of ceramic particle additions on foam expansion and stability in compacted Al-TiH<sub>2</sub> powder precursors. *Advanced Engineering Materials*, 6(2004)6, S. 400/402
- Körner, C., Singer, R., F.: Processing of metal foams – Challenges and opportunities. In *Metal Matrix Composites and metallic foams*, Euromat, Vol. 5, Wiley-VCH, 2000, S. 3/14
- Kretz, R.; Wolfgruber, E.: Bedingungen für das Eingießen von Al-Schaumkernen in Leichtmetallgussteile. Tagungsband, 2. Ranshofener Leichtmetalltage, 2002, S. 172/184
- Kriszt, B.; Kottar, A.; Degischer, H.P.: Strukturanalyse von geschäumtem Aluminium mittels Computertomographie. Vortrag Werkstoffwoche München, Oktober 1998
- Kriszt, B. et.al.: Foamability of the Al-Si-System. in *Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, Verlag MIT Bremen, 2001, S. 77/82
- Kriszt, B. et. Al. : Zellulare Metalle – von der Herstellung bis zur Anwendung. Tagungsband, 2. Ranshofener Leichtmetalltage, 2002, S. 160/170
- Laser verbindet Schaum. *Aluminium-Praxis*, 1/2-2003, S. 9
- Lehmhus, D., Marschner, C.; Banhart, J.: Influence of heat treatment on compression fatigue of aluminium foams, *Journal of Materials Science* 37 (2002) 3447/3451
- Lehmhus, D., Busse, M.: Potential new matrix alloys for production of PM Al foams. *Advanced Engineering Materials*, 6(2004)6, S. 391/395
- Leitmeier, D. et.al: Metallurgische Voraussetzungen für die Herstellung von Al-Schaumformteilen aus der Schmelze. Tagungsband, 2. Ranshofener Leichtmetalltage, 2002, S. 185/199
- Leitmeier, D., Flankl, H.: Vergleich der Herstellverfahren von Al-Schaum unter dem Aspekt zukünftiger industrieller Anwendungsmöglichkeiten. Tagungsband, 1. Ranshofener Leichtmetalltage, 2000, S. 155/167
- Leitmeier, D., Flankl, H., Schuledenzucker, P.: Zum Recycling von Kreislaufmaterial aus METCOMB-Aluminiumschaum. Tagungsband, 3. Ranshofener Leichtmetalltage, 2004, S. 285/297
- Maurer, M., Lugscheider, E.: Erhöhung und Charakterisierung von Metallschäumen für lasttragende

## Literaturverzeichnis - Aluminiumschäume

Anwendungen durch thermisch gespritzte Verbundstrukturen. In *Metallschäume*, Hrsg. H.P. Degischer, Wiley-VCH, Weinheim, 2000, S. 523/528

Miyoshi, T.; Itoh, M.: Aluminium foam "ALPORAS" – the production process, properties and applications. In *Metal foams and porous metal structures*, Verlag MIT, Bremen, 1999, S. 125/132

Miyoshi, T.; Itoh, M., Akiyama, S.; Kitahara, A.: Aluminium foam "ALPORAS". In *Porous and cellular materials for structural application*, MRS Vol. 521, 1998

Mosler, U., Heinzl, G., Martin, U., Oettel, H.: Mikrostruktur und Verformungsverhalten von Aluminium-Schäumen. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 31, 519/522 (2000)

m.pore: Filling holes with ideas. Informationsblatt, s. auch [www.m-pore.de](http://www.m-pore.de)

Neugebauer, R., Hipke, T., Stoll, A., Wagner, U.: Leichtbau mit Metallschaum. Vortrag Werkstoffwoche München, Oktober 1998

Neugebauer, R., Hipke, T., Hohlfeld, J., Thümmler, R.: Highly damped machine tools with metal foam; S. 214/218

Neugebauer, R., Hipke, T., Hohlfeld, J., Thümmler, R.: Ein Weg zu leichten Bauteilen, *Der Konstrukteur* (2004); S. 16-18

Presseinformationen und Firmenprospekte der Firma Böllhoff GmbH, Bielefeld 1998 - 2006

San Marchi, C., et. AL.: Fabrication and compressive response of open-cell Aluminium foams with sub-millimeter pores. In *Metal Matrix Composites and metallic foams*, Euromat, Vol. 5, Wiley-VCH, 2000, S. 35/39

Sandwichkonstruktionen aus Aluminiumschaum. *Aluminium-Praxis* 4/1998, S. 19

Schaum in Form gebracht. *Aluminium-Praxis*, 1/2-2003, S. 9

Schörghuber, F.; Simancik, F.: Complex-shaped foamed aluminium parts as permanent cores in aluminium castings. Kurzfassung Vortrag 1998 MRS Spring Meeting "Porous and Cellular Materials for structural Application", San Francisco, April 1998  
Schöberl, T.; Otto, A.: Tailored blanking with aluminium

foam sandwiches in *Cellular Metals and Metal Foaming Technology*, Verlag MIT Bremen, 2001, S. 55/60

Schultz, O., et al.: Fatigue behaviour, strength and failure of aluminium foams in „Metal Foams and Porous Metal Structures“ MIT 1999. S. 379/387

Schwartz, D.S. et. al. (Ed.): "Porous and Cellular Materials for structural Application", Vol. 521 from the MRS proceedings Series (1998 MRS Spring Meeting, San Francisco, CA), MRS Warrendale, PA, 1998

Sedlacek, G.; Paschen, M.: Aluschaum und Aluminiumschaum-Stahlblech Verbund im Leichtbau. In *Metallschäume*, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 147/163

Sedliaková, N; Simancik, F.; Kovácik, J.; Minár, P.: Joining of aluminium foams. In *Metallschäume*, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 177/188

Seeliger, H.W.: Aluminium foam sandwich ready for market introduction. *Advanced Engineering Materials*, 6(2004)6, S. 450/452

Seitzberger, M.; Rammerstorfer, F.G., Degischer H.P., Gradinger, R.: Kollapsverhalten axial gedrückter, mit Aluminiumschaum gefüllter Stahlprofile. In *Metallschäume*, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 137/146

Shapalov, V., Boyko, L.: Gasar – a new class of porous metals. *Advanced Engineering Materials*, 6(2004)6, S. 407/410

Simancik, F.; Kovácik, J.; Schörghuber, F.: Porosity in complex 3D-parts prepared from aluminium foam. In *Metallschäume*, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 171/176

Stanzick, H.; Duarte, I.; Banhart, J.: Der Schäumprozess von Aluminium. In *Metallschäume*, Hrsg. H.P. Degischer, Wiley-VCH, Weinheim, 2000, S. 409/411

Tagarielli, V.L., Fleck, A., Desphande, V.S.: The collapse response of sandwich beams with Al face sheets and a metal foam core. *Advanced Engineering Materials*, 6(2004)6, S. 440/443

Technik, Kurzberichte: Aufgeschäumtes Aluminium. *Aluminium* 66(1990)5, S. 442

Thümmler, E.; Oberacker, R.: Ausgewählte neuere Entwicklungen in der Pulvermetallurgie. *Hagener Symposium Pulvermetallurgie* Nov. 1995, Tagungsband DGM, Oberursel 1995, S. 3/40

Weigand, P.; Banhart, J.: Untersuchungen des Schäumens von Metallen. in Metallschäume, Verlag MIT Bremen, 1997, S. 91/102

Weire, D.: Foam physics. in Cellular Metals and Metal Foaming Technology, Verlag MIT Bremen, 2001, S. 63/69

Zettl, B.; Stanzl-Tschegg, S.: Ermüdungsschäden in Aluminiumschäumen. In Metallschäume, Hrsg. H.P. Degischer, Wiley-VCH, Weinheim, 2000, S. 484/488

#### Weitere aktuelle Hinweise im Internet

[www.foaminal.de](http://www.foaminal.de)

[www.metall-web.de](http://www.metall-web.de)

[www.ifam.fhg.de](http://www.ifam.fhg.de)

[www.metal-foam.com](http://www.metal-foam.com)

[www.metalfoam.net](http://www.metalfoam.net)

[www.spp-metallschaeume.uni-erlangen.de](http://www.spp-metallschaeume.uni-erlangen.de)

#### Herausgeber

GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.  
Am Bonnhof 5  
40474 Düsseldorf  
Germany

#### Gestaltung

Sektor GmbH, Düsseldorf



GESAMTVERBAND DER  
ALUMINIUMINDUSTRIE e.V.

Am Bonnhof 5  
40474 Düsseldorf  
Postfach 10 54 63  
40045 Düsseldorf

Tel.: 0211 - 47 96 - 279/285  
Fax: 0211 - 47 96 - 410

information @ aluinfo.de  
www.aluinfo.de