

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Schaumaluminium*

J. Baumeister, M. Weber, J. Banhart, F. Petzoldt**

Einleitung

Der Ausgangspunkt des vorliegenden Forschungsvorhabens ist ein pulvermetallurgisches Verfahren zur Herstellung von geschäumten Metallen, welches im IFAM, Bremen, entwickelt wurde. Nach diesem Verfahren werden Aluminiumpulver, Aluminiumlegierungspulver oder Mischungen aus Aluminiumpulvern und anderen Metallpulvern mit einer geringen Menge (typischerweise 0,4 Gew.%) eines Treibmittels vermischt. Das zum Aufschäumen von Aluminiumbasis-Werkstoffen am häufigsten verwendete Treibmittel ist TiH_2 , das sich unter Abgabe von Wasserstoff bei Temperaturen oberhalb von ca. $400^\circ C$ zersetzt. Die Mischung aus Metallpulver und Treibmittelpulver wird in einem nachfolgenden Schritt bei erhöhter Temperatur kompaktiert, wobei als Kompaktierungsverfahren das axiale Heißpressen, verschiedene Strangpreßverfahren oder das heißisostatische Pressen eingesetzt werden können. Das Resultat der Kompaktierung ist ein massives metallisches Halbzeug, in welchem die Treibmittelteilchen gasdicht in der metallischen Matrix eingelagert sind. Das so erhaltene aufschäumbare Material kann - soweit notwendig - mittels konventioneller Umformverfahren zu Blechen, Profilen oder auch zu komplizierten Teilen umgeformt werden. Erst in einem anschließenden Verfahrensschritt erfolgt der Aufschäumvorgang, indem das Halbzeug auf eine Temperatur oberhalb des Schmelzpunktes des jeweiligen Matrixmetalls erwärmt wird. Durch das sich zersetzende Treibmittel wird Wasserstoff freigesetzt, welcher in der schmelzenden Matrix zahlreiche Poren bildet und so zu einer beträchtlichen Volumenvergrößerung (Faktor 5 bis 10) führt.

Für eine Herstellung von Schaumaluminium in industrierelevanten Abmessungen ergeben sich aus der obigen Verfahrensbeschreibung eine Reihe von grundlegenden Fragestellungen, welche von unmittelbarer Bedeutung für eine praktische Umsetzung des Verfahrens in einen industriellen Produktionsprozeß sind. Die im folgenden berichteten Ergebnisse betreffen vor allem die Entwicklung und Verbesserung des Strangpreßverfahrens, sowie die Zusammenhänge zwischen den Kompaktierungsparametern und den Eigenschaften des aufschäumbaren Vormaterials. Weiterhin wird über den Einfluß einer nachträglichen Wärmebehandlung auf die Festigkeit der geschäumten Werkstoffe berichtet.

Erzeugung von aufschäumbarem Halbzeug durch Strangpressen

Das Ziel der Untersuchungen zu diesem Thema bestand darin, das Strangpressen von vorkompaktierten Pulverpreßlingen, sowie das direkte Pulverstrangpressen zu erproben.

Die Untersuchungen wurden begonnen mit Strangpreßversuchen an Pulverpreßlingen, welche durch uniaxiales Heißpressen im IFAM hergestellt wurden. Diese Vorgehensweise besaß die größte Erfolgswahrscheinlichkeit, da die heißkompaktierten Preßlinge auch ohne den Strangpreßvorgang bereits schäumbar sind. Im Prinzip handelt es sich hierbei also um eine Umformung von aufschäumbarem Material.

Für die Herstellung der heißgepreßten Scheiben wurden 10 kg Reinaluminium-Pulver (Al99,5) mit 40 g des Treibmittels TiH_2 in einem Taumelmischer vermischt. Aus dieser Pulvermischung wurden 7 Scheiben von ca. 110 mm Durchmesser und 50 mm Dicke bei einer Temperatur von $450^\circ C$ und mit einer Preßkraft von 200 Tonnen verpreßt. Dies entspricht einem Kompaktierungsdruck von ca. 210 MPa, die Dichte der resultierenden Scheiben betrug $2,6 \text{ g/cm}^3$.

Die so hergestellten heißkompaktierten Scheiben wurden in einer industriell eingesetzten 16 MN - Strangpresse (Produktionsmaschine, Rezipientendurchmesser 178 mm) zu einem Strang von 40×10 mm Querschnitt verpreßt. Dazu wurden die Scheiben in einem Vorwärmofen auf eine Temperatur von $450^\circ C$ angewärmt. Auch der beheizbare Rezipient der Strangpresse wurde auf $450^\circ C$ vorgewärmt. Nach erfolgter Durchwärmung wurden die 7 Scheiben in den Rezipienten eingebracht und mit einer mittleren Preßkraft von ca. 10,6 MN ausgepreßt. Bedingt durch die Umformarbeit betrug die Temperatur des austretenden Strangs dabei ca. $470-480^\circ C$.

* mit finanzieller Förderung durch das BMBF (Förderkennzeichen 03M3064)

**Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung (IFAM), Lesumer Heerstr. 36, 28717 Bremen

An dem so erhaltenen Flachstab-Material mit einem Querschnitt von 40x10 mm wurden Schäumversuche und metallographische Untersuchungen durchgeführt. In Abb. 1 ist in einer Übersichtsaufnahme der Profilquerschnitt im Schlibbild dargestellt. Es ist sehr gut zu sehen, daß die einzelnen Scheiben nicht etwa nacheinander, sondern zum Teil gleichzeitig durch die Matrizenöffnung fließen und so zu den erkennbaren konzentrischen ovalen Strukturen führen. Dabei wird jeweils eine vorangehende Scheibe so verformt, daß sie sich wie eine Hülle um das Material der nachfolgenden Scheibe legt. In diesem Sinne besteht im dargestellten Schlibbild die äußerste Schicht des Rechteckprofils aus dem Material der Scheibe 1, während der Kern des Profils aus dem Material der Scheibe 5 gebildet wurde. Eine Restporosität der Aluminium-Matrix ist nicht zu verzeichnen.

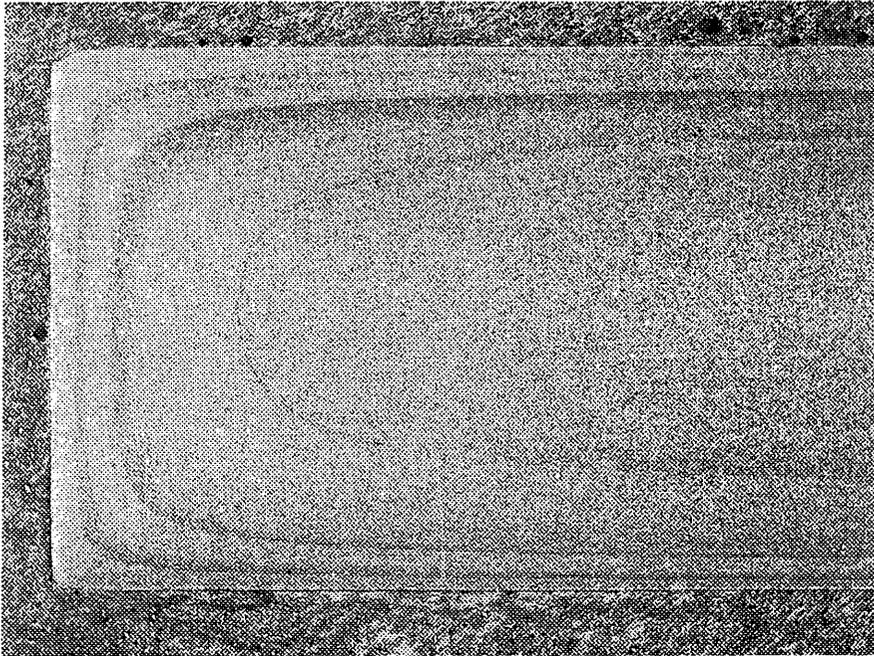


Abb. 1: Strangpreß-Profil aus vorkompaktierten Scheiben, Ätzung: Al1 nach Schrader, Maßstab 6,5:1

Bei der Überprüfung des Schäumverhaltens erwies sich das Material als gut schäumbar. Abhängig von den Schäumparametern konnten Dichtewerte zwischen 0,5 und 1 g/cm³ erzielt werden. Dies entspricht den Dichtewerten, die in der Vergangenheit im IFAM für Reinaluminiumschäume ermittelt wurden.

Aus diesem Grund kann geschlossen werden, daß die oben beschriebene Vorgehensweise, d.h. das Strangpressen von heißkompaktierten Vormaterialien zu gut schäumbaren Halbzeugen führt. Diesem positiven Ergebnis sind jedoch folgende Nachteile dieser Herangehensweise gegenüberzustellen:

- Bedingt durch die unterschiedlichen Durchmesser des Heißpreß-Gesenks und des Strangpreßrezipienten wird das nutzbare Volumen des Rezipienten nur unvollständig ausgenutzt.
- Die Herstellung und Handhabung mehrerer heißgepreßter Scheiben für eine einzelne Strangpressung erscheint aufwendig und unwirtschaftlich.
- Das Auftreten von Delaminationen kann bei anderen Profilgeometrien zu ernsthaften Schwierigkeiten bis hin zum Aufplatzen des Profils führen.

Um diese Nachteile zu beheben, wurde das Pulver in weiteren Versuchen ohne einen vorgeschalteten Kompaktierungsschritt direkt in den Rezipienten der Strangpresse eingebracht und ausgepreßt. Zur einfacheren Handhabung und für die Vorwärmung wurden die Pulver zweckmäßigerweise in eine dünnwandige Aluminiumhülse gefüllt. Bedingt durch die Fließvorgänge im Rezipienten während des Preßvorgangs verbleibt der wesentliche Teil der Aluminiumhülse im Preßrest, der übrige Teil der Hülse fließt mit aus und legt sich als eine dünne Oberflächenschicht um das aufschäumbare Material.

Zur Erprobung dieses Verfahrens wurden Aluminiumhülsen von 175 mm Durchmesser und einer Länge von 350 mm aus 0,8 mm dünnem Reinaluminiumblech hergestellt. In diese Hülsen wurde eine Pulvermischung aus Reinaluminium mit 0,4 Gew.% des Treibmittels TiH₂ gefüllt. Anschließend wurden die Hülsen verschlossen und ca. 4 Stunden lang bei einer Temperatur von 370°C vorgewärmt. Nach dem Einbringen der vorgewärmten Hülsen in den ebenfalls vorgewärmten Rezipienten der Strangpresse wurde zunächst gegen eine Blindmatrize mit einer 2 mm - Bohrung gepreßt, um so eine

Vorverdichtung zu erzielen und die zwischen den Pulverteilchen eingelagerte Luft entweichen zu lassen. Anschließend wurde der Druck entlastet, die Blindmatrize durch ein Strangpreßwerkzeug von 165x5 mm Öffnung ersetzt und der Strang ausgepreßt. Das so erzeugte Strangpreßprofil wies eine sehr gute Oberflächenqualität auf. In Abb. 2 ist ein metallographischer Querschliff des Profils dargestellt. Zu erkennen ist vor allem die gewünschte gleichmäßige Verteilung des Treibmittels und die vollständige gasdichte Einbettung dieser Partikel in die metallische Matrix. Ungänzen, wie Materialdopplungen oder Delaminationen waren nicht zu beobachten.

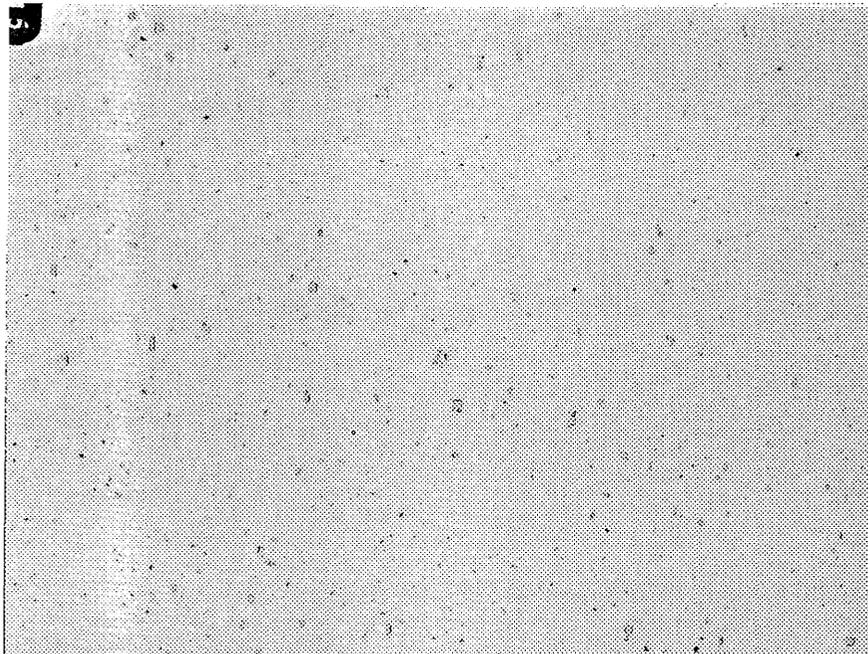


Abb. 2: Aus Pulver (Al+TiH₂) stranggepreßtes Profil, ungeätzt, Maßstab 40:1

Hinsichtlich des Schäumverhaltens dieses Materials wurden keine Abweichungen zu dem vorhergehenden Versuch (Strangpressen von heißkompaktierten Scheiben) festgestellt. Aus diesem Grund ist zu schließen, daß mit dem direkten Pulverstrangpressen eine deutliche Verbesserung und Vereinfachung der Pulverkompaktierung zu aufschäumbaren Halbzeugen erzielt wurde. Die weiteren Untersuchungen konzentrierten sich deshalb auf diese Verfahrensvariante. Ziel dieser Versuche war es, das zunächst für Reinaluminium erprobte Verfahren auf eine Legierung von Typ AlSi12 zu übertragen.

Die Versuchsdurchführung orientierte sich stark an der oben beschriebenen Vorgehensweise. Das zu verpressende Pulver wurde im IFAM aus den Elementpulvern gemischt. Die pulvergefüllten Hülsen wurden auf eine Temperatur von 420°C vorgewärmt, die Temperatur des beheizbaren Rezipienten lag bei 440°C. Nach einer Vorwärmzeit von 4 Stunden wurde die Hülse in den Rezipienten eingebracht und zunächst gegen eine Blindmatrize gepreßt (Vorkompaktierung). Anschließend wurde die Matrize gegen ein Werkzeug von 120x10 mm Öffnung ausgewechselt und die Pulvermischung ausgepreßt.

Die Oberflächenqualität des so hergestellten Strangpreßprofils war in weiten Bereichen gut, lediglich am Stranganfang waren schuppenartige Aufreißungen in der Oberfläche zu erkennen. Diese Schwierigkeiten ließen sich durch eine Variation der Strangpreßparameter bei weiteren Versuchen beheben.

Ein metallographischer Querschliff eines so erzeugten Profils ist in Abb. 3 dargestellt. Besonders wichtig und gut zu erkennen ist die gleichmäßige Verteilung der Partikel in der Aluminiummatrix, d.h. es sind keine Entmischungen oder Agglomerationen der Silizium- oder Treibmittel-Partikel über den Profilquerschnitt festzustellen.

Dagegen wurden bei Stichproben-Analysen mittels EDX zwischen den Anfangs- und Endbereichen des Strangpreßprofils zum Teil deutliche Abweichungen des Silizium-Gehalts beobachtet. Dabei wies der Stranganfang einen Silizium-Gehalt von ca. 10% auf, während das Strangende einen Gehalt von ca. 15% besaß. Dieser Effekt ist vermutlich als ein Entmischungseffekt zu deuten, der beim Transport der pulvergefüllten Aluminiumhülsen zum Vorwärmofen bzw. zur Strangpresse wirksam werden kann. In Entmischungsversuchen wurde festgestellt, daß die spezifisch leichteren und tendenziell vor allem die größeren Siliziumpulverteilchen sich im oberen Teil der Pulverschüttung anreicherten. Dies kann dazu

führen, daß siliziumärmere Bereiche der Pulverschüttung zuerst ausgepreßt werden und die entsprechend angereicherten Teile des Pulvergemenges erst gegen Ende des Strangpreßvorgangs ausfließen. Geeignete Maßnahmen zur Vermeidung dieses Entmischungseffekts werden am Ende dieses Abschnitts aufgezeigt.

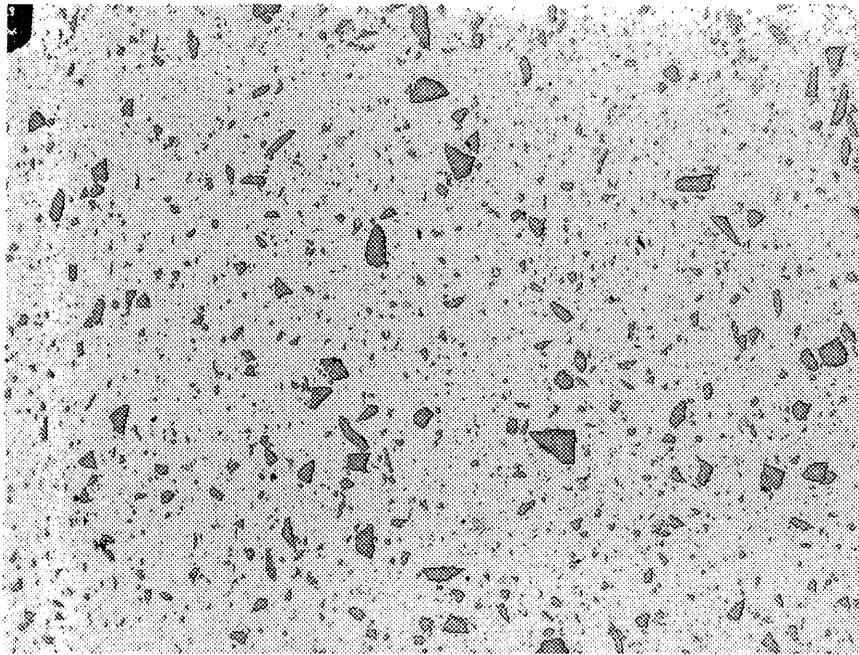


Abb. 3: Aus Pulver (AlSi12 + TiH₂) stranggepreßtes Profil, ungeätzt, Maßstab 50:1

Bezüglich des Schäumverhaltens entspricht das stranggepreßte Material voll den Erwartungen. Es konnten Dichtewerte um 0,5 g/cm³, in einigen Versuchen sogar bis hinab zu 0,36 g/cm³ erzielt werden. Diese Werte stimmen weitgehend mit den im IFAM an heißgepreßten Proben dieser Legierung (AlSi12) gewonnenen Daten überein.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß mit dem direkten Pulverstrangpressen ein vereinfachtes Kompaktierungsverfahren gefunden wurde, welches mit Hilfe von industriellen Produktionsmaschinen problemlos umgesetzt werden kann. Die Eigenschaften der so hergestellten aufschäumbaren Halbzeuge entsprechen weitgehend denen der heißkompaktierten Vormaterialien. Hinsichtlich der erreichbaren Dichtebereiche der daraus erzeugten Aluminiumschäume sind ebenfalls keine Unterschiede zu verzeichnen.

Für das so entwickelte Strangpreßverfahren bestehen jedoch noch weitere Verbesserungsmöglichkeiten. Diese beruhen darauf, daß das Verfahren noch mit einigen Nachteilen behaftet ist:

- Da in den Aluminiumhülsen lediglich eine lose Pulverschüttung mit entsprechend geringer Wärmeleitfähigkeit vorliegt, sind relativ lange Vorwärmzeiten (z.B. 4 Stunden) zur Durchwärmung des Pulvers erforderlich.
- Aufgrund der geringen Schüttdichte der Pulver wird das Volumen des Rezipienten der Strangpresse nur zu ca. einem Drittel ausgenutzt.
- Beim Transport der pulvergefüllten Aluminiumhülsen können Entmischungen der einzelnen Komponenten der Pulvermischungen auftreten.

Zur Vermeidung dieser Nachteile soll das Verfahren dahingehend weiterentwickelt werden, daß die Pulvermischungen durch kaltisostatisches Pressen (CIP) zu Bolzen verdichtet und anschließend stranggepreßt werden. Diese CIP-Bolzen können ohne eine Hülse gehandhabt werden, besitzen aufgrund der höheren Dichte (ca. 2,6 g/cm³) eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit und die Entmischung der einzelnen Komponenten der Pulvermischungen ist ausgeschlossen.

Weiterhin ist auf diese Weise eine Vereinfachung des gesamten Prozesses der Halbzeugherstellung möglich, da auf die Herstellung der Aluminiumhülsen und die Vorkompaktierung mit Hilfe einer Blindmatrize verzichtet werden kann.

Ermittlung der notwendigen Kompaktierungsparameter

Das Ziel der Arbeiten war es, die geringste Dichte zu ermitteln, die das Halbzeug aufweisen muß, um noch geschäumt werden zu können. Ein weiterer Teilaspekt war dabei die Frage, ob eine einfache technologische Prüfmethode - insbesondere die Härteprüfung - verwendet werden kann, um die Schäumbarkeit eines beliebigen Halbzeugs festzustellen.

Zur Untersuchung dieser Fragestellungen wurde eine Pulvermischung aus Reinaluminiumpulver, 12% Siliziumpulver und 0,4 Gew.% des Treibmittels hergestellt und mit verschiedenen Kompaktierungsparametern durch uniaxiales Pressen verdichtet. Dabei kam eine Doppelständerpresse mit einer maximalen Preßkraft von 300 Tonnen zum Einsatz, in welche ein beheizbares, zylindrisches Gesenk von 147 mm Durchmesser eingebaut wurde. Im einzelnen wurden die Preßkräfte zwischen 50 und 300 Tonnen in Schritten von 50 to variiert. Die Kompaktierungstemperatur betrug stets 400°C. Bei jedem Versuch wurden ca. 750 Gramm der treibmittelhaltigen Pulvermischung in das Gesenk eingefüllt und zu Scheiben verpreßt. An diesen Probekörpern wurde zunächst die Dichte bestimmt, anschließend wurden die Scheiben diametral aufgetrennt und an den Schnittflächen Härteprüfungen durchgeführt.

Zur Überprüfung des Schäumverhaltens wurden Teilstücke der heißkompaktierten Scheiben in einem auf 710°C vorgewärmten Laborofen bis zur maximalen Expansion aufgeschäumt. Anschließend wurde die Dichte der Schaumproben nach dem archimedischen Prinzip bestimmt. Die ermittelten Meßwerte sind neben der Dichte und Härte des Halbzeugs in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben.

Kompaktierungskraft [to]	Temperatur [°C]	Dichte [g/cm ³]	Härte HB2,5	Schaumdichte [g/cm ³]
50	400	2,1	33	2,15
100	400	2,48	37	1,60
150	400	2,53	43	1,15
200	400	2,54	52	0,60
250	400	2,59	55	0,52
300	400	2,60	55	0,57

Zunächst ist festzustellen, daß erwartungsgemäß die Dichte der Preßlinge mit ansteigender Preßkraft zunimmt und sich dabei asymptotisch an den theoretischen Höchstwert von 2,65 g/cm³ annähert. Weiterhin erkennt man eine monotone Zunahme der Härtewerte mit der Kompaktierungskraft und damit der Halbzeugdichte, d.h. eine Härteprüfung am aufschäumbaren Material erlaubt eine schnelle Abschätzung der Halbzeugdichte. Wenn es also gelingt, eine geringste Halbzeugdichte zu definieren, oberhalb derer das Halbzeug als gut schäumbar eingestuft werden kann, dann ist mit der Härteprüfung eine schnelle Qualifizierung des aufschäumbaren Materials hinsichtlich seiner Schäumbarkeit möglich. In Abb. 4 wurde deshalb die erreichte Schaumdichte gegen die zugehörigen Dichtewerte des aufschäumbaren Materials aufgetragen.

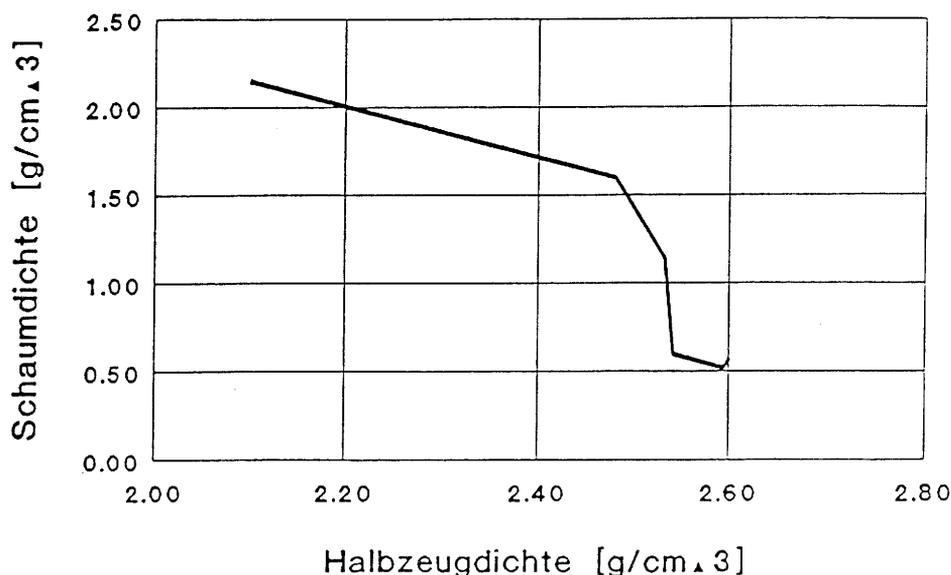


Abb. 4: Einfluß der Halbzeugdichte auf die erreichbare Schaumdichte

Es ist ein steiler Abfall der Schaumdichte bei Dichtewerten des Halbzeugs von ca. $2,55 \text{ g/cm}^3$ zu verzeichnen. Somit kann geschlossen werden, daß im Fall der Legierung AlSi12 nur Halbzeuge mit einer Dichte von mindestens $2,55 \text{ g/cm}^3$ als gut schäumbar anzusehen sind. Ob dieser kritische Dichtewert von der jeweiligen Legierung abhängig ist, muß in weiteren Versuchsreihen untersucht werden.

Möglichkeiten zur nachträglichen Beeinflussung der Materialeigenschaften durch Wärmebehandlungen

Wie konventionelle Aluminiumwerkstoffe sollten auch geschäumte Aluminiumlegierungen in Ihrer Festigkeit durch eine Wärmebehandlung zu beeinflussen sein. Die Kenntnis um die Machbarkeit einer solchen Behandlung ist von Bedeutung für mögliche Anwendungen. So könnten beispielsweise Energieabsorber wesentlich mehr Energie aufnehmen, wenn sie bei gleichem Verformungsverhalten eine höhere Festigkeit aufwiesen.

Eine übliche Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen besteht aus den Schritten Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern. Ein erster Ansatz ist, Aluminiumschäume auf die gleiche Weise wie konventionelle Aluminiumwerkstoffe zu behandeln. Folgende Besonderheiten sind jedoch zu beachten:

- Aluminiumschäume sind in ihrer Wärmeleitfähigkeit infolge der eingeschlossenen Luftblasen reduziert. Bei der Abschreckung nach dem Lösungsglühen ist daher mit Schwierigkeiten zu rechnen, wenn aufgrund einer bestimmten Legierungszusammensetzung sehr hohe Abschreckraten erzielt werden müssen.
- Das Abschrecken in Wasser wird immer dann bevorzugt, wenn besonders hohe Abschreckraten erzielt werden sollen. Schreckt man jedoch geschäumte Werkstoffe in Wasser ab, so ist aufgrund der thermischen Kontraktion des Gases in den Poren mit der Bildung eines Unterdruckes im Schaum und somit mit einem Eindringen von Wasser in die Poren zu rechnen. Es ist bekannt, daß auf diese Weise die Integrität der Zellstruktur beschädigt werden kann, was zu einem Nachlassen der Festigkeit führt.

Um die Auswirkungen einer Wärmebehandlung auf Aluminiumschäume zu untersuchen, wurde die Legierung AlCu4SiMg (AA 2014) ausgewählt. Diese Legierung zeichnet sich durch eine gute Aushärtbarkeit aus. Aufgrund der zu erwartenden Schwierigkeiten mit dem Abschrecken in Wasser wurde an Luft abgekühlt, wobei jedoch die Abschreckgeschwindigkeit durch Verwenden von Druckluft erhöht wurde.

Die Legierung wurde aus den Elementpulvern dargestellt und durch axiales Heißpressen verdichtet. Das aufschäumbare Material wurde in passende Stücke zersägt und in einer zylindrischen Stahlform zu Schaumzylindern von 45 mm Durchmesser und 60 mm Höhe geschäumt. Die Dichten der so gewonnenen Schaumzylinder betragen zwischen $0,6$ und $0,7 \text{ g/cm}^3$.

Ein Teil der Proben wurde nach dem Schäumen sofort im Druckversuch geprüft und die Spannungs-Stauchungs-Kurve aufgenommen ($\dot{\epsilon} = 5 \text{ mm/min}$, maximale Stauchung 80%). Die restlichen Proben wurden einer Wärmebehandlung unterzogen. Dazu wurden die Proben zunächst 2 Stunden bei 500°C lösungsgeglüht und dann mit Druckluft abgeschreckt. Die so behandelten Proben wurden in zwei Gruppen aufgeteilt und auf zwei verschiedene Weisen ausgelagert:

Gruppe 1: Kaltauslagerung bei Raumtemperatur (7 Tage)

Gruppe 2: Warmauslagerung bei 160°C (18 std.)

Ein Vergleich der Resultate der Spannungs-Stauchungs Versuche an Proben mit verschiedenen Wärmebehandlungszuständen kann anhand der in Abb. 5 gezeigten typischen Resultate vorgenommen werden. Hier sind die Mittelwerte der Druckfestigkeiten von nicht ausgelagerten, warm ausgelagerten und kalt ausgelagerten Proben gezeigt. Die Proben wurden so ausgewählt, daß sie etwa den gleichen Dichten entsprechen ($0,64 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$).

Zunächst ist festzustellen, daß durch die Kaltauslagerung nur eine unwesentliche Steigerung der Festigkeitswerte erzielt wird. Es ist deshalb zu vermuten, daß auch bei den nicht wärmebehandelten Proben nach dem Abkühlen von der Schäumtemperatur bereits ein Kaltaushärtungseffekt eingesetzt hat, obwohl die Druckprüfungen nur ca. 4-5 Stunden nach dem Schäumvorgang durchgeführt wurden.

Deutlicher ist dagegen der Effekt der Warmauslagerung. Während die Festigkeitswerte vor der Auslagerung bei ca. 11 MPa lagen, so beträgt der Mittelwert der warmausgelagerten Proben ca. 15

MPa, d.h. die Festigkeit konnte um ca. 40% gesteigert werden. Allerdings zerfallen die gestauchten Proben während des Druckversuchs in mehrere Einzelteile. Offensichtlich führt die Warmauslagerung zwar zu einer Festigkeitssteigerung, jedoch wird das Material erwartungsgemäß auch spröder. Dieses an sich bekannte Werkstoffverhalten ist bei der Auswahl von Aluminiumschäumen für die jeweiligen Anwendungen - z.B. im Bereich der Energieabsorption - entsprechend zu berücksichtigen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Wärmebehandlungsmethoden, wie sie von konventionellen Aluminiumwerkstoffen her bekannt sind, auch auf geschäumte Aluminiumlegierungen übertragen werden können. Jedoch ist zu beachten, daß die Festigkeit um den Preis der Verformbarkeit erhöht wird, wodurch die dünnen Zellstege spröder brechen und die günstige Energieabsorptionscharakteristik des Materials beeinträchtigt werden kann. Dieses Problem tritt bei Schäumen aufgrund der dünnen Wandstärken der Membranen stärker auf als bei massiven Werkstoffen und ist insofern typisch für den Werkstoff Metallschaum.

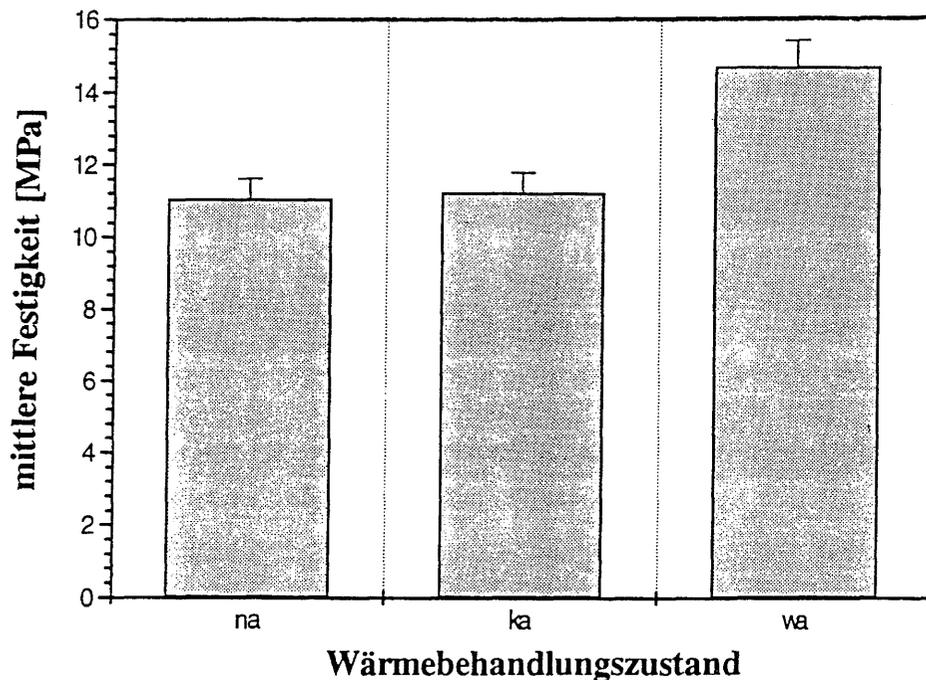


Abb. 5: Mittelwerte der Druckfestigkeit unterschiedlich wärmebehandelter Schaumproben (Dichte ca. $0,64 \text{ g/cm}^3$); na: unbehandelt; ka: kalt ausgelagert; wa: warm ausgelagert