

Herstellung flächiger Leichtbauteile durch Umgießen von Aluminium-Schäumen im Druckgießverfahren

F. Heinrich, C. Körner und R. F. Singer*

1 Einleitung

Der Einsatz von Aluminiumschäumen besitzt ein großes Potential zur Entwicklung gewichtsoptimierter Leichtbauverbundstrukturen. Durch Kombination von Schäumen geringer Dichte, die als Kern eingesetzt werden, mit massiven Deckschichten lassen sich Werkstoffverbunde mit hoher spezifischer Steifigkeit [1] und hohem Energieabsorptionsvermögen [2] herstellen.

Zur Herstellung derartiger Verbunde müssen jedoch geeignete Fügeverfahren bereit stehen. In Frage kommen Techniken wie Walzplattieren, Schweißen, Kleben, etc. [3–7]. Neben bestimmten verfahrensspezifischen Nachteilen ist diesen Fügeverfahren eine nur eingeschränkte Geometriekomplexität und das teilweise Verbleiben von nicht geschlossenen Schaumoberflächen gemeinsam.

Im folgenden wird die Anwendung des Druckgießverfahrens zum Umgießen von Al-Schaumkörpern behandelt. Dieses besonders bei höheren Stückzahlen sehr wirtschaftliche Verfahren [8] erlaubt die Herstellung komplexer Verbundbauteile mit lokalem Al-Schaumkern und zusätzlichen Funktionselementen in nur einem Prozessschritt. Zusätzlich wird eine allseitig geschlossene Oberfläche erzielt. Der Einsatz von Schaumkernen bietet durch seine geringe Dichte auch eine zusätzliche Anwendungsmöglichkeit als Ersatz von Salzkernelementen im Druckguss [9], wodurch bestimmte komplexe Geometrien erst möglich werden, weil der Schaumkern nicht entfernt werden muss und permanent im Bauteil verbleiben kann.

2 Experimentelles

Grundvoraussetzung für den Einsatz von Al-Schaumkernen ist die Verwendung einer echtzeitgeregelten Druckgießanlage, da nur diese Steuerung in der Lage ist, die Gießkurve und insbesondere die Nachdruckphase so zu regeln, dass es zu keiner unkontrollierten Druckspitze am Ende der Formfüllphase kommt (Abb. 1). Als Umgießwerkstoff wurde die Druckgusslegierung AlSi9Cu3 verwendet. Für die Untersuchungen wurde ein plattenförmiges Bauteil mit zusätzlichen Funktionselementen gewählt (Abb. 2), in welches eine entsprechend geformte Al-Schaumplatte eingelegt werden konnte (vgl. Abb. 3). Die Herstellung der Schaumkerne ($h \times b \times d = 148 \times 128 \times 10,5 \text{ mm}^3$) erfolgte nach dem pul-

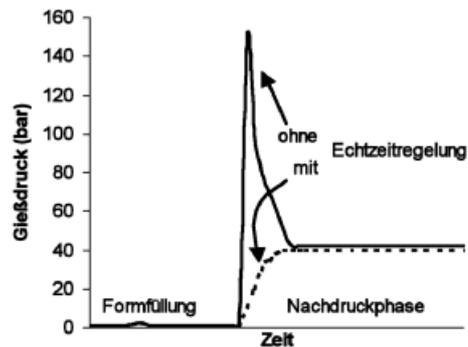


Abb. 1. Vergleich der Druckkurven bei herkömmlicher und echtzeitgeregelter Maschinensteuerung einer Druckgießanlage.



Abb. 2. Plattenförmiges Druckgussteil mit links und rechts je zwei Funktionselementen, das in der vorliegenden Untersuchung als Demonstrationsbauteil diente.

vermetallurgischen Verfahren [3] aus stranggepressten Halbzeugprofilen. Eingesetzt wurden eine AlSi10-Guss- sowie eine AlMg1-Knetlegierung. Das Aufschäumen der entsprechend dimensionierten Kerne geschah durch Einlegen einer ausreichenden Menge Vormaterials in eine Stahlform und anschließendes Aufheizen über Liquidustemperatur in einem auf 750 °C bzw. 800 °C erwärmten Ofen. Die so hergestellten Schaumteile besitzen bedingt durch das Verfahren eine geschlossene Oxidaußenhaut.

Die Versuchsauswertung umgossener Schaumkerne erfolgte über Bestimmung der resultierenden Porosität in der gegossenen Außenhaut sowie des Anteils an infiltriertem Po-

* Institut für Werkstoffwissenschaften, Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Technologie der Metalle WTM, Universität Erlangen-Nürnberg

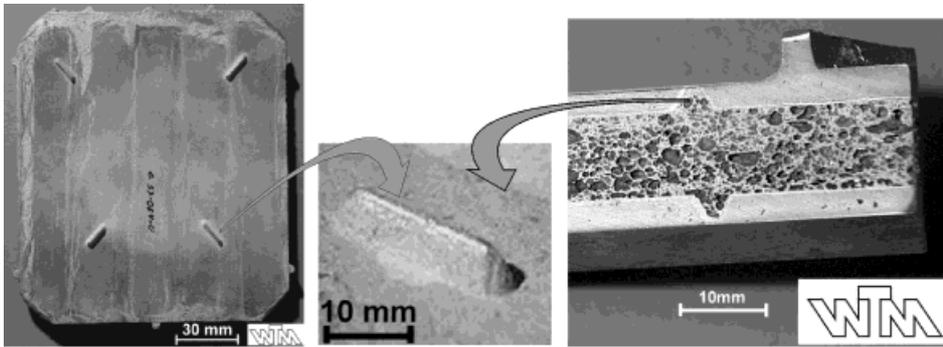


Abb. 3. Al-Schaumkern mit angeschäumten, linienhaften Abstandshaltern (links) und Detailaufnahme eines Abstandshalters (Mitte). Derartige Kerne wurden in das Demonstrationsbauteil (Abb. 2) eingebracht, d. h. im Druckguss umgossen (rechts).

renvolumen. Im Falle der Porosität der Außenhaut geschah dies über mehrfaches Trennen der einzelnen Platten in Längsrichtung und Bestimmung des Porengehaltes mittels optischer Bildanalyse entlang dieser Schlitze. Das infiltrierte Porenvolumen wurde durch Massebestimmung der Kerne und des kompletten Bauteils ermittelt, indem anschließend auf den Gehalt der infiltrierte Poren zurückgerechnet wurde.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Kernfixierung

Aufgabe der Kernfixierung ist zum einen das Einhalten des notwendigen Abstandes zur Formwandung bei der Formfüllung entsprechend der zu erzielenden Außenhaut, zum anderen die Selbstfixierung des Kernes bei geöffneter Form. Fixierelemente auf Werkzeugseite scheiden aufgrund der Forderung nach einer geschlossenen Außenhaut aus.

Realisiert wurde die Kernfixierung mittels angeschäumter Abstandshalter (AH). Hierfür wurden in der Schäumform entsprechende Aussparungen eingebracht. Untersucht wurden zum einen punktförmige, zum anderen linienhafte AH. Die erste Art wurde im Sinne einer minimalen Kontaktfläche zur Form gewählt und hatte die Gestalt einer Halbkugel. Diese AH hielten jedoch dem Druck während der Formfüllung nicht stand. Es kam zu einem Verkippen der Kerne im Druckgießwerkzeug, wodurch eine geschlossene Außenhaut verhindert wurde. Die linienhaften AH (Abb. 3) hatten eine Länge von 15 mm und einen Spitzenwinkel von 45° . Aufgrund der größeren Kontaktfläche, der günstigeren Krafterleitung und des in den AH deutlich niedrigeren Porengehaltes konnte ein Komprimieren der AH und damit ein Verkippen der Kerne zuverlässig verhindert werden. Eine Behinderung des Schmelzflusses während der Formfüllung wurde durch geeignete Orientierung der AH vermieden.

3.2 Einfluss der Druckgießparameter

Vorversuche hatten gezeigt, dass das Anschnittsystem so zu wählen ist, dass ein senkrecht Aufreffen der Schmelze auf den Schaumkern und damit eine Infiltration während der Formfüllung vermieden wird. Bei entsprechend gestalteter paralleler Schmelzeführung trat eine Kernschädigung bei Anschnittgeschwindigkeiten von 8–30 m/s nur noch in extrem belasteten Randbereichen auf. Eine geschlossene Außenhaut konnte bei einer Wandstärke von 3 mm zuverlässig erzielt werden. Ein Aufschmelzen der Schaumkerne wurde auch

bei erhöhten Schmelzetemperaturen (bis 780°C) nicht festgestellt. Kern- und Werkzeugtemperatur hatten in den untersuchten Grenzen keinen signifikanten Einfluss auf die Umgießbarkeit.

Als Haupteinflussgröße wurde der Nachdruck p_N festgestellt. Dabei wird prinzipiell eine Maximierung angestrebt, um die resultierende Gießporosität in der gegossenen Außenhaut zu minimieren. In Abhängigkeit der Höhe des Nachdruckes traten zwei druckabhängige Schaumschädigungsmechanismen auf: Infiltration der Struktur sowie Deformation des Schaumes.

3.3 Schädigungsmechanismen

Überschreitet das Druckniveau p_N die Druckfestigkeit σ_C des Schaumkernes (p_N), kommt es zu einer Deformation des gesamten Schaumkörpers (Abb. 4). Die *allgemeine Druckfestigkeit* des Schaumes definiert damit die Obergrenze des Forminnendruckes und des anwendbaren Nachdruckes. Die Druckfestigkeit ist proportional der Dichte des Schaumes und primär nur über diesen variierbar. Abb. 5 zeigt die Druckfestigkeiten von Proben, die je einem Schaumkern aus Guss- und Knetlegierung entnommen waren, in Abhängigkeit von der Dichte. Es wird eine starke Dichtestreuung innerhalb eines Schaumkernes von 0,45 bis $0,85\text{ g/cm}^3$ deutlich, wobei sich die geringeren Dichten und damit auch die niedrigeren Druckfestigkeiten herstellungsbedingt an den Plattenrändern finden. Insgesamt betrachtet ist das Festigkeitsniveau beider Legierungen gleich. Die Knetlegierung zeigt allgemein eine breitere Streuung der Festigkeitswerte. Diese begründet sich durch deren gröbere Porenstruktur. Aufgrund der Plattendicke von 10,5 mm liegen hier zum Teil nur ein oder zwei Poren in Dickenrichtung übereinander und die Druckfestigkeit einer Probe ergibt sich aus den Mittelwerten sehr weniger Einzelporen. Im Gegensatz dazu findet man bei der Gusslegierung eine Vielzahl von Poren und es kann sich somit auch bei eingeschränkter Probengeometrie ein deutlich zuverlässigerer Mittelwert ausbilden.

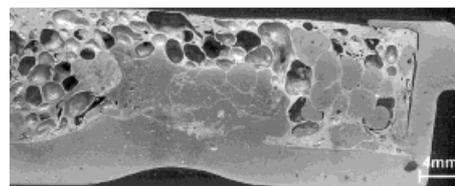


Abb. 4. Komprimierter Schaumkern durch hohen Nachdruck oberhalb der allgemeinen Druckfestigkeit des Schaumes

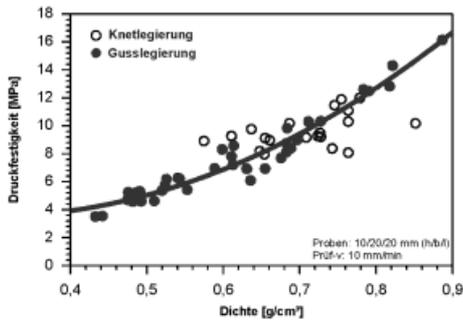


Abb. 5. Verlauf der Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Schaumdichte für Proben aus je einer Platte einer Guss- und einer Knetlegierung

Bei niedrigeren Drücken $0 < p_N < \sigma_C$ kommt es zu einer *Infiltration* von einzelnen Poren ohne allgemeine Deformation der inneren Schaumstruktur (Abb. 6). Das Eindringen der Schmelze geschieht über vorhandene Oberflächenfehler wie Poren, Risse und Falten oder über lokales mechanisches Durchbrechen der Schaumaußenhaut (Abb. 6). Ein Überschreiten dieser *lokalen Druckfestigkeit* und damit Infiltration findet überwiegend in Bereichen hohen Porengehaltes d. h. niedriger Dichte statt. Dies sind zum einen wie oben erwähnt die Randbereiche, wobei hier auch herstellungsbedingt die meisten Oberflächenfehler auftreten, andererseits statistische Abschnitte innerhalb der Platte. Aufgrund der niedrigen Dichte ist die Schaumaußenhaut an diesen Stellen geschwächt bzw. besonders dünn. Der Einsatz eines Gusslegierungskerns erweist sich allgemein als vorteilhaft, da eine Ausbreitung der Schmelze innerhalb des Kerns aufgrund der feinen Porenstruktur erschwert wird.

Eine Verbesserung der lokalen Druckfestigkeit ließe sich durch eine stärkere Ausbildung der Schaumaußenhaut erreichen, was jedoch praktisch noch nicht realisiert werden konnte. Aussichtsreich erscheint hingegen das nachträgliche Aufbringen einer verstärkenden Oberflächenschicht.

3.4 Schaumkernbeschichtungen

Die Anforderungen an eine geeignete Beschichtung sind neben der Dichtheit der Schicht eine ausreichende Festigkeit, die Möglichkeit zum Aufbringen ausreichender Schichtdicken, eine gute Haftung auf der Schaumaußenhaut, eine möglichst einfache Prozessführung und allgemein niedrige Kosten. Aus diesen Gründen wurden insbesondere Schichten aus Rein-Al mittels Drahtflammspritzen sowie eine keramische Schlickerschicht aus einem MgAl-Spinell in einem Kieselöl untersucht.

Die Vorteile der Drahtflammspritzschicht liegen neben der Verwendung eines artgleichen Werkstoffs vor allem in der guten Haftung sowie der für eine stoffschlüssige Verbindung günstigen rauhen Oberfläche, dem einfachen und „trockenen“ Verfahren ohne Gefahr von Rückständen im Schaumkörper sowie der Möglichkeit zur Erzeugung relativ dicker Schichten. Als Gestaltungsrichtlinie für die Kernherstellung ergibt sich die Vermeidung scharfer Kanten, welche nach dem Beschichtungsprozess zu einem Abplatzen der Schichten führen können.

Die Vorteile des keramischen Schlickers liegen in der Anwendung eines einfachen Tauchverfahrens sowie der guten Schichthaftung. Problematisch kann sich der spröde Charakter der Schicht sowie die notwendige hohe Viskosität des Schlickers zur Vermeidung einer Infiltration des Schaumes erweisen.

3.5 Vergleich der Versuchsergebnisse

Abb. 7 zeigt die Ergebnisse von Umgießversuchen mit unbeschichteten und beschichteten Schaumkernen. Verwendet wurden Guss- und Knetlegierungskerne mit mittleren Dichten von 0,54 bis 0,76 g/cm³. Die Spritzschichten hatten eine Dicke von etwa 200 µm, die Schlickerschicht von etwa 300 bis 400 µm. Aufgetragen sind das resultierende mittlere Porenvolumen in der Außenhaut sowie das infiltrierte Porenvolumen des Schaumkerns im Abhängigkeit des spezi-

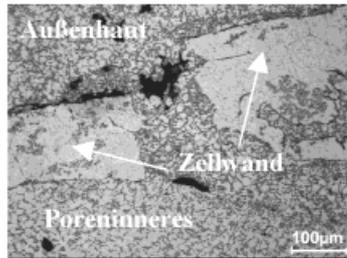
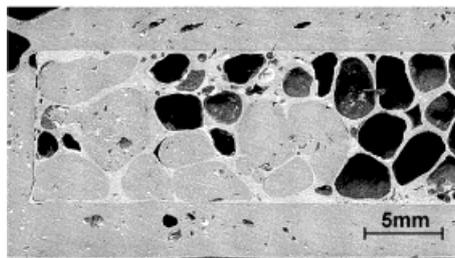


Abb. 6. Infiltrierter Schaumkern ohne Deformation der Schaumstruktur (links). Der Nachdruck lag tiefer als im Beispiel der Abbildung 4. Querschnitt einer von der Schmelze durchbrochenen Zellaußenwand (rechts)

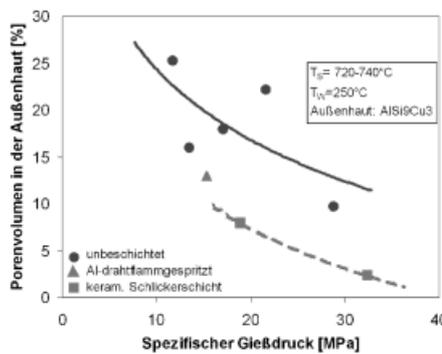
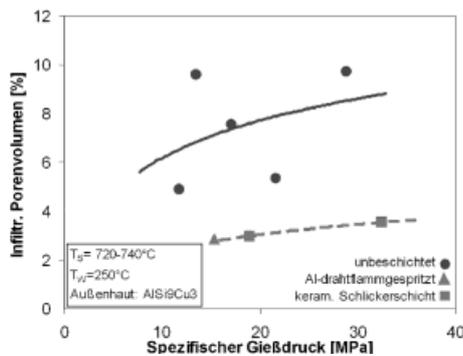


Abb. 7. Ergebnisse von Umgießversuchen mit unbeschichteten und beschichteten Schaumkernen. Aufgetragen ist das infiltrierte Porenvolumen im Schaumkern und das Porenvolumen in der Außenhaut (Gussporosität im umgossen Bereich) als Funktion des spezifischen Gießdruckes in der Gießkammer. Beschichtungen wirken sich sehr vorteilhaft aus.

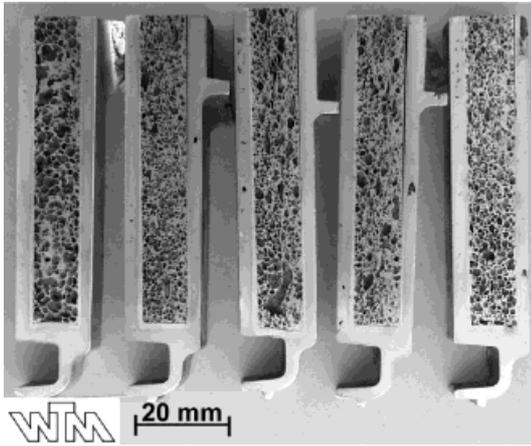


Abb. 8. Schnitte durch einen umgossenen, mit Al-Drahtflammspritzten beschichteten Schaumkern mit einer geringen Außenhautporosität von 2,3% und einem geringen infiltriertem Porenvolumen von 3,6 %

fischen Gießdruckes p_S . p_S ist der tatsächlich in der Gießkammer wirkende Druck, welcher z. T. deutlich über den gemessenen Druckfestigkeiten liegt. Dies deutet darauf hin, dass p_S nicht in voller Höhe auf den Kern einwirkt, was sich durch die komplexen Strömungsverhältnisse in der Form sowie sofortige teilweise Erstarrung und entsprechende Reibung erklären lässt.

Die Graphen zeigen die erwartete Abnahme der Außenhautporosität mit zunehmendem Gießdruck, was durch eine zunehmende Porenverdichtung und Nachspeisung begründet ist. Gleichzeitig nimmt jedoch die Infiltration von Porenvolumen im Schaum zu, da es mit zunehmendem Druck zu einer großflächigeren Überschreitung der lokalen Druckfestigkeit kommt. Vergleicht man beide Auftragungen, so wird die gute Korrelation zwischen Außenhautporosität und Infiltration deutlich, was den unmittelbaren Zusammenhang dieser beiden Phänomene bestätigt. Eine Beschichtung der Schaumkerne führt zu einer deutlichen Verringerung der beiden Effekte (vgl. Abb. 8). Durch die Erhöhung der lokalen Druckfestigkeit steigt der Infiltrationswiderstand der Schaumaußenhaut und das infiltrierte Porenvolumen wird deutlich verringert. Der Rückgang der Außenhautporosität bei gleichem Druckniveau ist Folge der geringeren Infiltration, wodurch ein lokaler Druckabfall in der Form vermieden und somit eine bessere Verdichtung und Nachspeisung erreicht wird.

4. Zusammenfassung

Es wurde die Anwendung des Druckgießverfahrens zur Herstellung flächiger Leichtbauteile durch Umgießen von Aluminiumschäumen untersucht. Eine zuverlässige Fixierung der Al-Schaumkerne in der Druckgießform erfolgte durch Anschäumen von Abstandshaltern bei der Kernherstellung. Als entscheidende Störgröße erwies sich die Höhe des Druckes in der Nachdruckphase. Bei niedrigen Drücken er-

folgt eine Schädigung der Schaumkerne durch *Infiltration* von einzelnen Poren (überschrittene *lokale Druckfestigkeit*), bei Drücken oberhalb der Druckfestigkeit des Schaumes kommt es zu einer Deformation der Kerne (überschrittene *allgemeine Druckfestigkeit*). Während der zweite Effekt den möglichen Nachdruck grundsätzlich begrenzt, ist eine Verbesserung des Infiltrationswiderstandes durch eine nachträgliche Beschichtung der Schaumkerne möglich. Schichten durch Aluminium-Drahtflammspritzten sowie aus einem keramischen Schlicker führen bei gleichen Drücken zu einer deutlichen Reduzierung des infiltrierte Porenvolumens im Schaum sowie der resultierenden Porosität in der gegossenen Außenhaut.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgesellschaft für die Unterstützung dieses Projektes im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 396.

Literatur

1. H. von Hagen, W. Bleck, Bending and bulging tests on steel sheet/aluminium foam sandwiches; In: J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck (Hrsg.): Metal foams and porous metal structures; International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures, 14th–16th June 1999, Verlag MIT, Bremen, S. 317–324.
2. C. Haberling, H. G. Haldenwanger, T. Bernard, J. Burzer, H. W. Bergmann, Aluminium foams for energy absorbing structures under axial loading. In: J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck (Hrsg.): Metal foams and porous metal structures; International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures, 14th–16th June 1999, Verlag MIT, Bremen, S. 37–44.
3. J. Baumeister, Überblick: Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen. In: J. Banhart (Hrsg.): Metallschäume; Symposium Metallschäume. Verlag MIT, Bremen, 1997, S. 3–13.
4. N. Sedliakova, F. Simancik, J. Kovacik, P. Minar, Joining of aluminium foams. In: Metallschäume; Symposium Metallschäume. Verlag MIT, Bremen, 1997, S. 177–185.
5. A. Kinzel, F.-W. Bach, H. Haferkamp, Schweißen von Leichtbaublechen mit Laserstrahlung. In: Leichtbaustrukturen und leichte Bauteile (Werkstofftag '94). Düsseldorf: VDI Berichte Nr. 1080, 1994, S. 237–245.
6. J. Burzer, H. W. Bergmann, Laserstrahlschweißen von Aluminium-Blech-Schaumverbindungen. In: Metallschäume; Symposium Metallschäume. Verlag MIT, Bremen, 1997, S. 163–170.
7. Hydro Aluminium: Aluminium-Foam Brochure, 1994.
8. E. Brunhuber, Praxis der Druckgussfertigung. Fachverlag Schiele & Schön, Berlin, 1991.
9. F. Simancik, F. Schoergruber, Complex foamed aluminium parts as permanent cores in aluminium castings. In: D. S. Schwartz, D. S. Shih, A. G. Evans, H. N. G. Wodley (Hrsg.): Porous & Cellular Materials for Structure Applications. April 13–15, 1998, San Francisco, USA. Materials Research Soc., Warrendale, USA, 1998.

Eingangsdatum: 15.3.00

[T 190]