

Leichtbau mit Aluminiumschaumsandwich Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Alexander Sviridov

geboren am 29. Oktober 1980 in Strunino, Russland

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Specht

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Viehweger

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Vesselin Michailov

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Oktober 2011

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus. Dem Lehrstuhlleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Viehweger, danke ich für seine Unterstützung während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl sowie für die Mithilfe beim Aufbau und bei der Strukturierung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Vesselin Michailov danke ich für die Übernahme des Korreferats und für sein Interesse an der Arbeit. Mein Dank gilt auch dem Vorsitzenden der Promotionskommission Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Specht.

Ich bedanke mich bei allen gegenwärtigen und ehemaligen Mitarbeitern des Lehrstuhls Konstruktion und Fertigung, insbesondere bei Herrn Gerhard Richter für die wissenschaftlichen und technischen Diskussionen sowie beim ganzen Team unserer Versuchshalle für die Fertigung vieler Einrichtungen und die Realisierung von zahlreichen Versuchen, ohne die die Durchführung dieser Arbeit unmöglich gewesen wäre.

Den vielen in den begleitenden Projekten beteiligten Mitarbeitern der Unternehmen Wilhelm Schmidt GmbH und AMIC–Angewandte Micro-Messtechnik GmbH danke ich herzlich für die freundschaftliche kooperative Zusammenarbeit. Insbesondere gilt mein Dank Herrn Fritz Alps für die vielen Anregungen, Herrn Frank Westphal und Herrn Thomas Vondrak für die Hilfe bei der Durchführung von Fügeversuchen sowie Herrn Dr. Jürgen Keller für seinen großen Beitrag bei der Realisierung von Bauteilprüfungen.

Weiterhin danke ich Herrn Joachim Baumeister aus dem Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM für die vielen konstruktiven Diskussionen zu den wissenschaftlichen Fragenstellungen rund um das Thema „Metallschäume“.

Sehr dankbar bin ich Frau Renate Rapkow für viele Anregungen sowie für die wertvollen Tipps zum Umgang mit der deutschen Sprache.

Des Weiteren möchte ich mich bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die finanzielle Förderung der zugrundeliegenden Projekte und Anlagen bedanken.

Nicht zuletzt bedanke ich mich recht herzlich bei meiner Frau Elena sowie bei meinem Sohn Igor für die moralische Unterstützung, die sie mir in den Jahren der Promotion geleistet haben.

Meinen Eltern

Leichtbau mit Aluminiumschaumsandwich

Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen

| | |
|---|----|
| Zeichen und Abkürzungen | 9 |
| 1 Einleitung..... | 11 |
| 2 Zielsetzung und Aufgabenstellung..... | 13 |
| 2.1 Ziele der Arbeit..... | 13 |
| 2.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit..... | 13 |
| 3 Stand der Technik..... | 15 |
| 3.1 Leichtbau | 15 |
| 3.2 Leichtbauwerkstoffe | 17 |
| 3.3 Leichtbauweisen | 21 |
| 3.3.1 Differential- und Integralbauweise | 22 |
| 3.3.2 Integrierende Bauweise | 23 |
| 3.3.3 Schalenbauweise | 24 |
| 3.3.4 Verbundbauweise und Mischbauweise | 25 |
| 3.3.5 Sandwichbauweise..... | 26 |
| 3.4 Zellulare Werkstoffe | 28 |
| 3.4.1 Übersicht von Metallschäumen..... | 29 |
| 3.4.2 Eigenschaften von Aluminiumschäumen..... | 31 |
| 3.4.3 Herstellungsverfahren..... | 35 |
| 3.4.4 Schichtverbunde mit Aluminiumschaumkern | 41 |
| 4 Entwicklung einer Prozesskette zur Bauteilherstellung | 49 |
| 4.1 Versuchswerkstoffe..... | 49 |
| 4.2 Versuchsgeometrien..... | 52 |
| 4.3 Entwicklung der Umformtechnologien..... | 53 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.3.1 | Niederhalterloses Tiefziehen des AFS-Rohlings | 54 |
| 4.3.2 | Abkanten / Freibiegen des AFS-Rohlings | 62 |
| 4.3.3 | Umformen eines aufgeschäumten Sandwiches | 62 |
| 4.3.4 | Gehrungsfügen von aufgeschäumten AFS | 64 |
| 4.4 | Entwicklung der Aufschäumtechnologien | 66 |
| 4.4.1 | Gestaltung der Aufschäumwerkzeuge | 66 |
| 4.4.2 | Aufschäumverfahren | 70 |
| 4.4.3 | Prüfung der Schaumstruktur | 79 |
| 4.5 | Entwicklung der Fügetechnologien..... | 82 |
| 4.5.1 | Schweißen von Aluminiumschaumsandwichen | 82 |
| 4.5.2 | Fügetechnik für Anbauteile | 88 |
| 5 | Herstellung des Demonstrators „Frontmodul“ | 99 |
| 5.1 | Konstruktion und Fertigung der Werkzeuge..... | 100 |
| 5.2 | Modellbildung und Umformsimulation..... | 103 |
| 5.3 | Umformen von Bauteilen des Frontmoduls | 104 |
| 5.4 | Das Aufschäumen von Segmenten | 106 |
| 5.5 | Fügen von aufgeschäumten Bauteilen | 107 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 113 |
| | Bilder- und Tabellenverzeichnis..... | 117 |
| | Literaturverzeichnis..... | 123 |
| | Vorträge und Präsentationen..... | 133 |
| | Auszeichnungen | 135 |

Zeichen und Abkürzungen

| | |
|-----------------|--|
| AFS | – Aluminium foam sandwich (eng.), Aluminiumschaumsandwich |
| Abb. | – Abbildung |
| CAD | – Computer Aided Design (eng.), Computergestütztes Konstruieren |
| CFK | – Kohlenfaserverstärkter Kunststoff |
| D_f | – Fußdurchmesser des Einsates/Bolzens |
| D_k | – Kopfdurchmesser des Einsates |
| GFK | – Glasfaserverstärkter Kunststoff |
| Hrsg. | – Herausgeber |
| P | – Porosität des Schaums, % |
| ISO | – Internationale Organisation für Normung |
| kg | – Kilogramm |
| L | – Gesamtlänge des Einsatzes / Bolzens, mm |
| mm | – Millimeter |
| MIG | – Metallschweißen mit inerten Gasen |
| N | – Newton |
| R_f | – Radius am Bolzenfuß, mm |
| t | – Tonne |
| t_g | – Gewindelänge, mm |
| WIG | – Wolfram-Inertgasschweißen |
| °C | – Grad Celsius |
| σ | – Spannung, N/mm ² |
| ϵ | – Dehnung, % |
| ρ^*/ρ_s | – relative Dichte des Schaums |
| ρ^* | – Dichte des Schaums |
| ρ_s | – Dichte des Kompaktmaterials |

1 Einleitung

Aluminiumschaum ist ein neuartiger Leichtbauwerkstoff, der in der letzten Zeit immer mehr in vielen Forschungseinrichtungen untersucht wird. Aufgrund seiner außergewöhnlichen Eigenschaften wie gute Wärme- und Schalldämmung, exzellente Energieabsorption, gute mechanische Eigenschaften und geringes Gewicht ist das Interesse seitens der Industrie an diesem Werkstoff sehr groß. Obwohl Aluminiumschaum seit Jahrzehnten bekannt ist, ist es immer noch Ziel der Forschung, diesen Werkstoff zu optimieren und neue Einsatzgebiete zu öffnen.

Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Blechhalbzeuge. Die blechbearbeitende Industrie sucht dabei nach neuen Werkstoffen mit multifunktionalen Eigenschaften, da die konventionellen Werkstoffe die gestellten Anforderungen nicht bzw. nur teilweise erfüllen können. Als innovativer Werkstoff zeigte dabei der Aluminiumschaum ein großes Potential bei der Verwendung als Komponente eines Verbundes. Dieser Verbund ist Aluminiumschaumsandwich (AFS), das aus Aluminiumblechen als Decklagen und Aluminiumschaum als Kernschicht besteht.

Das Halbzeug für das Aluminiumschaumsandwich wird durch Walzplattieren hergestellt und besteht aus zwei Aluminiumdecklagen und der aufschäumbaren Kernlage aus verpresster Pulvermischung.

Im aufgeschäumten Zustand besitzt das Aluminiumschaumsandwich neben einer hohen Steifigkeit mit einem geringen Gewicht weitere wichtige Eigenschaften wie z. B. eine sehr gute Crashabsorption sowie Wärme- und Schalldämmung durch geschäumte Kernlage. Ein weiterer Vorteil des Aluminiumschaumsandwichs ist dank äußerer Aluminiumbleche eine exzellente Oberflächenbeschaffenheit. Das Material ist außerdem sehr gut recyclebar und umweltfreundlich, da alle Komponenten aus Aluminium bestehen. Diese Eigenschaften können in der Automobilbranche für den Karosseriebau von Kraftfahrzeugen sehr gut genutzt werden. Weiterhin ist das Material für das Bauwesen, die Raum-, Luft-, Schiff- und Bahnfahrtindustrie von großem Interesse.

Die Herstellung der meisten Bauteile erfordert eine Umformoperation, in der das Bauteil eine entsprechende Form erhält. Das Umformen eines aufgeschäumten Sandwiches ist meistens nicht sinnvoll, da es früh zum Versagen kommt. Die Herstellung von dreidimensionalen Bauteilen in diesem Zustand ist also kaum möglich. Aus diesem Grund ist man auf das Umformen des Sandwiches in einem unaufgeschäumten Zustand angewiesen, in dem

die Kernlage des Verbunds noch aus dem schäumbaren gepressten Pulver besteht, so dass sich der Verbund wie ein konventionelles Aluminiumblech umformen lässt.

Eine gute Umformbarkeit des unaufgeschäumten Halbzeugs spricht für den Einsatz des AFS bei dreidimensionalen Bauteilen. Der Herstellungsprozess unterscheidet sich jedoch von der konventionellen Herstellung von Bauteilen aus Aluminiumblechen. Nach dem Umformen ist ein zusätzlicher Fertigungsschritt – das Aufschäumen – notwendig. Die Kernlage wird durch die Wärmezufuhr aufgeschäumt und hat nun die Schaumstruktur. Die Fertigungsschritte – das Aufschäumen und eventuell eine nachfolgende Kalibrierung – setzen entsprechende Werkzeuge sowie eine zusätzliche Ausrüstung voraus, die sich von konventionellen Werkzeugen in der Blechindustrie unterscheiden. Dies erhöht die Herstellungskosten und verhindert den Einsatz dieses Werkstoffs für moderne Bauteile. In Bezug auf die Bauteilform müssen außerdem einige technologische und konstruktive Beschränkungen beachtet werden.

Zur Lösung dieser Fragenstellungen sollen neue Strategien zur wirtschaftlichen Herstellung von Bauteilen aus AFS erarbeitet werden. Des Weiteren bestehen Fragen zum Fügen von Aluminiumschaumsandwichen miteinander sowie mit anderen Werkstoffen. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Klärung von Fragen und Problemen über den Einsatz des Aluminiumschaumsandwiches für moderne Bauteile sowie zur Erarbeitung entsprechender Fertigungsstrategien geleistet werden.

Motivation

Im Kapitel 3 wird der Stand der Technik beschrieben und es wird ersichtlich, dass wissenschaftliche Untersuchungen zu einer prozesssicheren und wirtschaftlichen Herstellung von dreidimensional geformten Bauteilen aus Aluminiumschaumsandwich fehlen. Die gezielten Untersuchungen zur Schaffung einer Prozesskette sind bisher nur eingeschränkt durchgeführt worden.

Trotz Vorhandensein eines exzellenten Leichtbauwerkstoffs – Aluminiumschaumsandwiches, bereits vorhandener Hersteller sowie einer großen Nachfrage dank der Vielfalt seiner ausgezeichneten Eigenschaften wurden nur wenige technisch und wirtschaftlich optimierten Prozessketten zur Herstellung komplexer Bauteile aus AFS erarbeitet. Daher entstanden das Interesse und die Notwendigkeit der Themenwahl mit dem Ziel, eine optimierte Prozesskette mit dazu gehörigen Verfahrensvarianten unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Kriterien zu schaffen. Dadurch soll der Anwendungsbereich für diesen innovativen Werkstoff erweitert werden.

2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

2.1 Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Schaffung der Prozessketten zur Herstellung von geformten Bauteilen aus AFS. Die erforderlichen Prozessschritte auf dem Weg vom Halbzeug bis zur Herstellung eines fertigen Bauteils sind zu analysieren und neben der technischen Machbarkeit auch die wirtschaftlichen Aspekte zu berücksichtigen.

Es wird auf die möglichen Verfahren zum Umformen, Aufschäumen und Fügen eingegangen. Neben den wichtigen Merkmalen zur robusten Herstellungstechnologie sind Auswahlkriterien für ein passendes Verfahren bzw. für die einzusetzende Technik sowie die Besonderheiten beim Einsatz dieser Technik für verschiedene Bauteile zu schaffen, indem die Verfahren durch praktische Versuche mit einfachen Bauteilen sowie mit komplexen Prototypen erprobt werden. Aus einer Gegenüberstellung verschiedener Fertigungstechnologien müssen Vor- und Nachteile jeweiliger Verfahren für bestimmte Zwecke und spezifische Bauteile erarbeitet werden. Zusammenfassend lassen sich die Ziele der Arbeit wie folgt definieren:

1. Analyse der notwendigen Prozessschritte zur Herstellung von Bauteilen aus AFS und Entwicklung der erforderlichen Prozessketten
2. Schaffung möglicher Verfahren und Fertigungstechniken in jedem Prozessschritt
3. Entwicklung der Prozessführungsstrategien für jeden Prozessschritt
4. Bauteilherstellung zum Nachweis technischer Machbarkeit
5. Analyse technischer und wirtschaftlicher Aspekte jeweiliger Verfahren in der Prozesskette
6. Verifizierung der Prozesskette durch die Herstellung von Prototypen mit verschiedenen Fertigungstechnologien

2.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll zunächst ein thematischer Überblick über den Leichtbau insgesamt sowie über die bekannten Bauweisen gegeben werden. Darüber hinaus werden im Stand der Technik Metallschäume und Werkstoffverbunde mit Aluminiumschaumkern, ihre Eigenschaften und Herstellung erläutert.

Im praktischen Teil werden die Untersuchungen zur Entwicklung der Prozessketten zur Herstellung von geformten Bauteilen aus Aluminiumschaumsandwich durchgeführt. Durch diese Untersuchungen sollen die Prozessschritte Umformen, Aufschäumen und Fügen detailliert analysiert und für die Herstellung der Bauteile aus AFS optimiert werden. Jeder der Prozessschritte umfasst mehrere Varianten der Fertigungsverfahren, die durch entsprechende Versuche untersucht und anschließend gegenübergestellt werden.

Da die vorliegende Arbeit auf Ergebnissen der Projekte „Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen“¹ sowie „Aluminiumschaumverbunde bei dynamischer Belastung – Entwicklung eines kompletten Seilrollenrahmens“² basiert, wurden als Versuchsgeometrien zur Entwicklung der Herstellungstechnologien Bauteile aus diesen Projekten verwendet.

Im Anschluss der durchgeführten Untersuchungen wurde ein Prototyp durch entwickelte Fertigungstechnologien hergestellt. Es ist das Frontmodul eines ITINO-Triebzuges. Das Kapitel 5 liefert alle Untersuchungen zur Herstellung dieses Demonstrators.

Ein zukunftsorientierter Ausblick sowie die erzielten Ergebnisse der Arbeit werden im Kapitel 6 zusammengefasst.

¹ - das Forschungsvorhaben wurde durch Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Untersuchungen wurden im Rahmen des BMBF – InnoRegio – Verbundprojektes durchgeführt und durch RIO e. V. – Regionales Innovationsbündnis Oberhavel koordiniert.

² - das Forschungsvorhaben wurde durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert.

3 Stand der Technik

3.1 Leichtbau

Die Anforderungen an Eigenschaften von Blechbauteilen im Maschinenbau steigen ständig. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, versucht man innovative Werkstoffe und neue Bauweisen einzusetzen. Ein Ziel ist dabei, Bauteileigenschaften wie z.B. Steifigkeit, Festigkeit oder Crashesicherheit zu verbessern.

Ein weiteres Ziel ist es, durch innovative Lösungen das Gewicht der Bauteile zu reduzieren. Die Gewichtsreduzierung ist in vielen Bereichen wie Fahrzeug-, Flugzeugbau oder in der Raumfahrt eine zentrale Anforderung unserer Zeit. Zu beachten ist, dass potentielle Anwender durchaus unterschiedliche Vorstellungen darüber haben, wie hoch die Mehrkosten für eine Gewichtsreduzierung sein dürfen. Solche Studien wurden vor einigen Jahren durchgeführt. Nach [Kra08] werden in der Automobilindustrie für eine Gewichtsreduzierung um ein Kilogramm Mehrkosten von 2 € bis 10 € akzeptiert. In der Luftfahrtindustrie hingegen ist man bereit, bis zu 500 € und in der Raumfahrt sogar fünfstelligen Summen zu zahlen, wenn dadurch ein Kilogramm Gewicht gespart wird [Sch94]. Aus diesem Grund haben sich die Wissenschaftler mit Problemstellungen des Leichtbaus seit langem beschäftigt.

Aufgrund hoher Anforderungen an die Sicherheit, das Komfort sowie Größe moderner Fahrzeuge und des dadurch steigenden Fahrzeuggewichts kommt dem Bedarf an Leichtbau, insbesondere im Automobilbau, besondere Bedeutung zu. Wenn man die Entwicklung des Fahrzeuggewichts beispielsweise in der Mittelklasse in den vergangenen Jahrzehnten beobachtet, stellt man eine steigende Tendenz fest (Bild 1). Eine ähnliche Tendenz gilt auch für die Autos anderer Klassen sowie anderer Verkehrsmittel.

Die Veröffentlichungen der letzten Jahrzehnte zeigen, dass sich viele Automobilfirmen weltweit sehr intensiv mit dem Thema Leichtbau auseinandersetzen [Bst94, FBI01, Gei03, GHo03, Hin03, Ost07]. Der Trend ist leicht erklärbar. Speziell im Fahrzeugbau besteht eine starke Forderung nach Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, da die steigenden Kraftstoffpreise die Kunden zur Auswahl der Fahrzeuge mit geringem Verbrauch zwingen.

Weiterhin nehmen die ökologischen Fragen an Bedeutung zu. Die Automobilindustrie hat sich im Jahr 1998 verpflichtet, den CO₂-Ausstoß von derzeit ca. 180 bis 200 g/km auf 140 g/km bis zum Jahr 2008 und auf 120 g/km bis zum Jahr 2012 zu reduzieren, s. Bild 2. Die Verpflichtung zum Jahr 2008 konnte leider nicht bzw. nur teilweise erfüllt werden. Laut JATO Consult, der Beratungsabteilung von JATO Dynamics GmbH, lag der durchschnitt-

liche CO₂-Wert für den gesamten Automobilmarkt im Jahr 2008 volumengewichtet bei 153,7 g/km. Dabei haben lediglich zwei Automobilhersteller, Fiat mit 133,7 g/km und Peugeot mit 138,1 g/km, das Ziel erreicht [pre].

Dies weist auf die Wichtigkeit und Komplexität der gestellten Ziele hin. Der CO₂-Ausstoß steht neben den anderen Faktoren sehr eng mit dem Kraftstoffverbrauch in Verbindung. Die Verpflichtung zum Jahr 2012 kann in erster Linie durch erhebliche Gewichtsreduzierung der Fahrzeuge erreicht werden, denn eine Fahrzeuggewichtsreduktion um 100 kg erbringt eine Verminderung des Kraftstoffverbrauchs um 0,3 bis 0,5 l/100 km [FMe03]. Aus [MZB+00] ist ein prozentualer Zusammenhang des Fahrzeuggewichts mit dem Kraftstoffverbrauch ersichtlich. Dabei entspricht eine 10%-ige Gewichtsreduktion einem Minderverbrauch von 5,5% Kraftstoff.

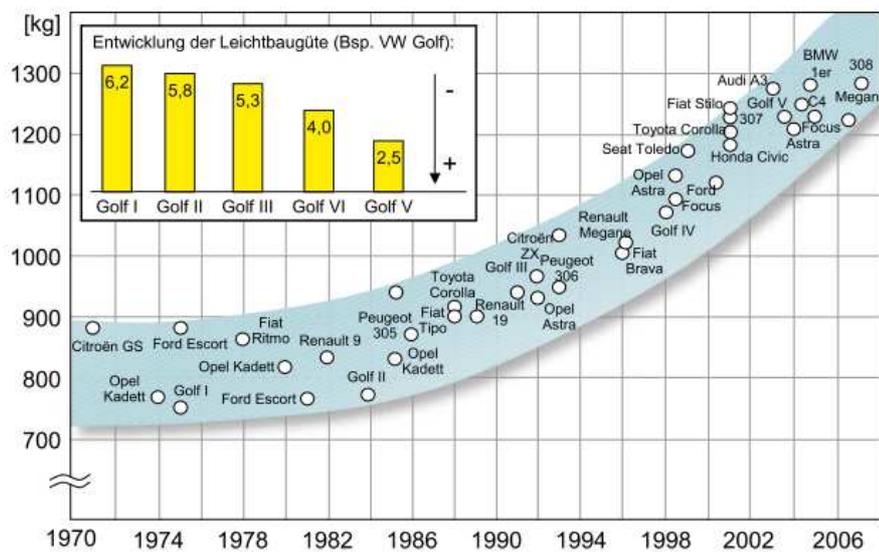


Bild 1: Entwicklung des PKW-Fahrzeuggewichts in der Mittelklasse im Zeitraum 1970-2007 [LBr08]

Eine große Rolle zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes spielen auch die Änderungen der Antriebstechnik mit geringeren CO₂-Emissionen, wie Hybrid- und Gasantriebe, Wasserstoffantrieb bzw. Brennstoffzellen oder Entwicklungen in Abgasreinigungsanlagen. Sie sind jedoch teilweise noch Zukunftsvisionen und führen in der Regel ebenfalls zu höheren Fahrzeuggewichten oder erfordern eine stärkere Motorisierung. Die Notwendigkeit des Leichtbaus wird durch diese Entwicklungen nicht überflüssig.

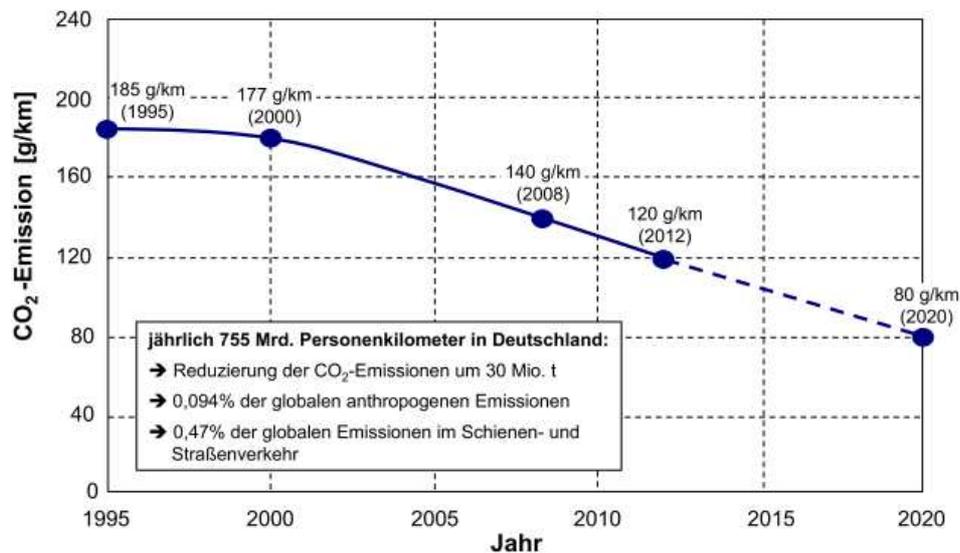


Bild 2: Selbstverpflichtung der Automobilindustrie zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes [LBr08]

Der Verbrauch sowie der CO₂-Ausstoß müssen also neben den Entwicklungen in Brennkammer- und Abgasbereichen insbesondere durch Entwicklungen zur Verringerung des Fahrzeuggewichtes reduziert werden.

Gegenwärtig hat sich ein deutlicher Trend zum Leichtbau herauskristallisiert. Es wird in verschiedensten Branchen wie Luft- und Raumfahrzeugtechnik, Automobil- sowie Schienenfahrzeugindustrie nach Leichtbaulösungen mit neuen Werkstoffen oder neuen Bauweisen geforscht. Zahlreiche Ideen und Innovationen auf diesem Gebiet entstehen sowohl in Projekten an den Hochschulen als auch in Kooperationsprojekten von Hochschulen und Forschungseinrichtungen mit Industriepartnern, wodurch der sehr hohe Stellenwert des Leichtbaus nochmals unterstrichen wird.

Grundsätzlich existieren zwei prinzipielle Lösungen zur Gewichtsreduzierung von Bauteilen. Das sind der Einsatz der Leichtbauwerkstoffe oder neuer Werkstoffe mit besseren Eigenschaften sowie der Einsatz neuer Bauweisen, die durch neue Konstruktions- und Werkstoffaufbauprinzipien eine erhebliche Gewichtsreduzierung ermöglichen.

Folgend wird ein Überblick über die Leichtbauwerkstoffe sowie Leichtbaulösungen durch verschiedene Bauweisen gegeben. Die Entwicklung sowie Tendenzen des Einsatzes von Leichtmetallen werden am Beispiel des Aluminiums erläutert.

3.2 Leichtbauwerkstoffe

Der einfachste Weg zum Leichtbau ist die Verwendung der Werkstoffe mit einer geringen Dichte. Diese Werkstoffe kann man nach ihrem spezifischen Gewicht in zwei große Gruppen unterteilen – Metalle und Nichtmetalle. Beide müssen jedoch nicht nur eine geringe Dichte, sondern auch ein günstiges Verhältnis von spezifischem Gewicht zur ausnutzbaren

Festigkeit, Steifigkeit, Dehnung etc. aufweisen. Welche Kenngrößen im einzelnen Fall maßgebend sind, hängt von der konkreten Anwendung ab. Weiterhin müssen sie gut oder zumindest ohne großen Aufwand mit gängigen Verfahren verarbeitbar sein. Eine weitere Voraussetzung ist der wirtschaftliche Aspekt. Der Einsatz eines Werkstoffes muss unbedingt rentabel sein, nur dann ist sein Einsatz in modernen Bauteilen möglich. Diese Anforderungen schließen dabei eine Menge von Werkstoffen aus, die in einem großen Maßstab zum Einsatz kommen könnten.

Da die Übersicht der Vielfalt aller Leichtbauwerkstoffe sehr umfangreich ist, beschränken wir uns auf den Bereich der metallischen Leichtbauwerkstoffe. Wann werden denn die metallischen Leichtbauwerkstoffe eingesetzt? Die Leichtmetalle finden hauptsächlich dort Anwendung, wo eine hohe Festigkeit und gleichzeitig ein geringes Gewicht erforderlich sind. Im metallischen Bereich sind u. a. Aluminium, Magnesium und Titan bekannt. Zu den Leichtbauwerkstoffen zählt man heute auch hochfeste Stähle, welche die Herstellung von Bauteilen aus deutlich dünneren Blechen ermöglichen. Die Festigkeitsanforderungen werden dank hoher Festigkeit dieser Stähle erfüllt. Somit wird am Gewicht gespart.

Obwohl im Allgemeinen über Reinmetalle gesprochen wird, werden sie in der Realität sehr selten als Reinmetalle eingesetzt. Meistens erfolgt ihr Einsatz in Form verschiedener Legierungen. Bereits seit mehr als 70 Jahren ist bekannt, dass man Aluminium- sowie Magnesiumumlegierungen zur Herstellung von Bauteilen eingesetzt hat. Ein Beispiel dafür ist der VW-Käfer (1933), in dem die Magnesiummenge bei 20 kg je Fahrzeug lag. Ein weiteres Beispiel ist der Panhard Dyna (1954) mit selbsttragender Karosserie aus Aluminium.



Bild 3: Dyna Panhard 1954 mit selbsttragender Karosserie aus Aluminium

Die Großserienproduktionen von Fahrzeugen mit einem großen Anteil von Leichtmetallen waren jedoch vorübergehende Ausnahmereischeinungen und die Herstellung von Bauteilen war immer durch spezifische Eigenschaften neuer Werkstoffe erschwert. Die damit verbundene Verarbeitung dieser Werkstoffe wies ein weiteres Problem auf.

Heute sieht aber die Situation des Leichtmetalleinsatzes anders aus. Die Bauteile aus Leichtmetallen wie z.B. Aluminium oder Magnesium sind in heutigen Verkehrsmitteln kei-

ne Seltenheit. Dies bestätigt nochmals, dass z. B. die Automobilhersteller trotz eventueller Schwierigkeiten bei der Verarbeitung der Leichtmetalle bereit sind, diese zur Gewichtseinsparung einzusetzen. So gewinnen die Leichtmetalle für Bauteile in verschiedenen Bereichen mehr und mehr an Bedeutung.

Aluminium

Der Einsatz von Aluminiumwerkstoffen spielt dabei für moderne Bauteile in vielen Bereichen und insbesondere in Verkehrsmitteln eine entscheidende Rolle. Jahrzehntlang war der Einsatz von Aluminium im Automobil weitgehend auf Formgussanwendungen beschränkt. Beispiele dafür sind Kolben, Aggregategehäuse im Antriebsbereich sowie die Räder. 1955 wurden knapp 14.000 t dieses Leichtmetalls im (west-) deutschen Automobilbau eingesetzt, was etwa einem durchschnittlichen Aluminiumanteil von 2 % pro Fahrzeug (Gesamtproduktion an Fahrzeugen 1955: 718.400) entsprach [NNal-56].

Die Vielfältigkeit der Aluminiumanwendungen hat aber eine rasche Einführung dieses Leichtmetalls im Verkehrswesen ermöglicht. Ausgezeichnete Gestaltungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten trieben diesen Leichtbauwerkstoff weiter voran. In den 60er Jahren kam es zu einer wahren Explosion im Einsatz von Aluminium. Anfang der 70er Jahre wurde ein durchschnittlicher Aluminiumanteil von 23 kg je Fahrzeug festgestellt. Dieser Anteil lag 1992 bei 58 kg [Rin94] und 1996 bei fast 69 kg [Kor98], was eine Steigerung von fast 20% in vier Jahren bedeutet.

Ein gutes Beispiel für den Einsatz von Aluminium aus dieser Zeit ist der Audi A8. Dieser wurde im Jahr 1994 als erstes Großserienfahrzeug mit einer kompletten Aluminiumkarosserie präsentiert und gilt bis heute als ein der erfolgreichsten „Aluminium-Pkw“ [LRu99].



Bild 4: Audi A8 mit Aluminiumkarosserie (Bild: Wikipedia/Rudolf Stricker)

Sein Gesamtkonzept ist der Audi Space Frame ASF[®]. Durch die Verbindung von Strangpressprofilen mit Gussknoten entsteht eine steife Tragwerkstruktur, die mit Blechen zusätzlich verstärkt und verkleidet wird. Durch dieses Konzept war es möglich, das Karosseriegewicht um ca. 37% gegenüber einer gleichwertigen Stahl-Karosserie zu senken [LRu99]. Außerdem wurden viele andere Bauteile wie z.B. das durch Druckguss hergestellte Motorgehäuse aus Aluminiumlegierungen hergestellt.

Die Prognosen des Aluminiumeinsatzes vergangener Jahre lassen sich dem heutigen Stand leicht gegenüberstellen. Dabei stellt man fest, dass die Analytiker die Aluminiumeinsatzentwicklung für die Zukunft sogar etwas unterschätzt haben. Die Prognose von 1998 für das Jahr 2008 lautete: der durchschnittliche Aluminiumgehalt aller Fahrzeuge wird den Anteil von 120 kg je Pkw erreichen und der Aluminiumbedarf für die Produktion von Pkw wird sich auf fast 700.000 t erhöhen [Ven98, MTS99]. Bereits im Jahr 2004 hat sich die Liefermenge an deutsche Automobilwerke auf etwa 750.000 t Aluminium erhöht. Nach amerikanischen Angaben betrug dabei bereits im Jahr 2005 der durchschnittliche Aluminiumanteil pro Neufahrzeug 144,8 kg [Ost07].

Dieser gewaltige Anstieg des Aluminiumeinsatzes bedeutet allerdings nicht nur eine deutliche Durchdringung des Motorenbaus (Zylinderkopf, Motorgehäuse und sonstige Antriebsaggregate). Je nach Anforderungen stehen Aluminiumknetwerkstoffe (in Form von Blechen, Profilen oder Schmiedeteilen) und Aluminiumgusswerkstoffe (in Form von Sand-, Kokillen- oder Druckgussteilen) zur Verfügung. Beide decken ein breites Spektrum der herzustellenden Bauteile im Fahrzeug.

Heute sind die Fahrzeuge mit Bauteilen aus Aluminium keine Seltenheit. Dabei erreicht der Aluminiumeinsatz beispielsweise beim Audi TT Coupé allein bei Karosserie den Wert von 68 % bzw. 140 kg vom 206 kg des gesamten Karosseriegewichts. Die Verteilung verschiedener Werkstoffe in der Karosserie ist aus dem Bild 5 ersichtlich. Der Einsatz des Aluminiums bringt dabei einen Rohbau-Gewichtsvorteil von 48% gegenüber einer vergleichbaren reinen Stahlkarosserie [NNa-07].

Die Wichtigkeit des Einsatzes von Leichtbaumetallen zur Gewichtsreduzierung ist aus den genannten Beispielen deutlich zu erkennen. Das Gewicht kann jedoch nicht nur durch den Einsatz der neuen leichteren Werkstoffe, sondern auch durch neue bzw. optimierte Bauweisen reduziert werden. Seit langem sind die Bauelemente bekannt, die mit vorhandenen Werkstoffen jedoch in neuer Bauweise realisiert wurden. Dadurch lässt sich nicht nur eine Gewichtsreduzierung, sondern auch bessere Eigenschaften wie z. B. eine höhere Steifigkeit erzielen.

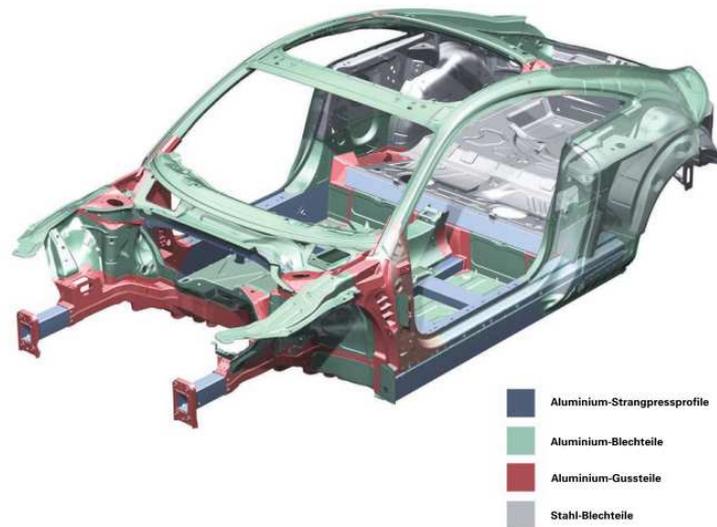


Bild 5: Audi TT Coupé Rohkarosserie mit 68% Aluminiumanteil [NNa-07]

3.3 Leichtbauweisen

Die „klassischen“ Leichtbaumaterialien wie Aluminium- oder Magnesiumlegierungen haben ihre sichere Kraft im Leichtbau und aufgrund einer geringen Dichte kann man ihrem Leichtbaupotenzial nicht widersprechen.

Die steigenden Anforderungen an moderne Bauteile in allen Branchen und insbesondere bei Verkehrsmitteln deuten darauf hin, dass man immer öfter allein mit Werkstoffen doch an die Grenzen stößt. Das große Spektrum von Eigenschaften, das zurzeit den Werkstoffen abverlangt wird, kann meistens nicht ausschließlich durch Werkstoffe abgedeckt werden. Es wird daher angestrebt, neue innovative Lösungen einzusetzen. Die Entwicklungen neuer Werkstoffe führten neben den Fortschritten im Bereich der Werkstoffstrukturen auch zur Erfindung einer Mehrzahl neuer Bauweisen. Gerade die Bauweisen haben dabei einen sehr hohen Stellenwert und bieten mit neuen aber auch mit konventionellen Werkstoffen viele Vorteile bei der Auslegung von Baugruppen und Bauteilen an.

Bevor man sich für einen Werkstoff zur Fertigung eines Bauteils entscheidet, sollte eine eingehende Abschätzung der möglichen Fertigungslösungen durchgeführt werden. Es wird dabei ein bestimmter Ansatz bzw. ein spezielles konstruktives Prinzip (Bauweise) ausgewählt. Die Wahl der Bauweise hängt von einer Reihe innerer und äußerer Zwänge ab. Im Allgemeinen kann man die Richtungen zur Bestimmung der einen oder anderen Bauweise wie folgt definieren:

- Einzel- oder Serienlösung
- Verarbeitbarkeit der gewählten Werkstoffe
- Vorhandene Fertigungsmöglichkeiten

- Einsatz- und Umgebungsbedingungen
- Montage- und Demontagemöglichkeiten.

Diese Überlegungen zwangen die Menschen dazu, neue Baukonzepte und Konstruktionslösungen zu erfinden. Bereits in 50er Jahren wurden die Begriffe „Integralbau“, „Schichtverbund“ oder „Sandwich-Bauweise“ erwähnt [Her60]. Einige davon kamen auch zum Einsatz. Dabei stellte man fest, dass gegenüber dem konventionellen Blechbau neue Bauweisen viele weitere Lösungen zur Gewichtsreduzierung anbieten können, selbst wenn man konventionelle Werkstoffe einsetzt.

3.3.1 Differential- und Integralbauweise

Für die Auslegung und Konstruktion der Bauteile sind zwei grundlegende Bauweisen bekannt: Differentialbauweise und Integralbauweise [Kle00]. Beide sind heute eine wichtige Grundlage zur Herstellung moderner Bauteile und Baugruppen.

Differentialbauweise basiert auf die additive Verbindung einzelner Bauteile zu einer gesamten Baustuktur. Die Einzelemente der Struktur können dadurch fertigungstechnisch günstiger hergestellt werden. Heute wird eine hohe Anzahl von modernen Bauteilen nach Differentialbauweise hergestellt, da sie einen anforderungsgerechten Werkstoffeinsatz fördert. Die Bauteile können beispielsweise durch Bolzen, Nieten, Schrauben oder durch Punktschweißverbindungen zusammengesetzt werden.

Im Bild 6 ist der Aufbau einer Tür für Porsche Cayenne dargestellt. Durch eine Mehrzahl von Bauteilen ist die Differentialbauweise deutlich zu sehen. Dabei wird für jedes Bauteil ein optimaler Werkstoff eingesetzt.

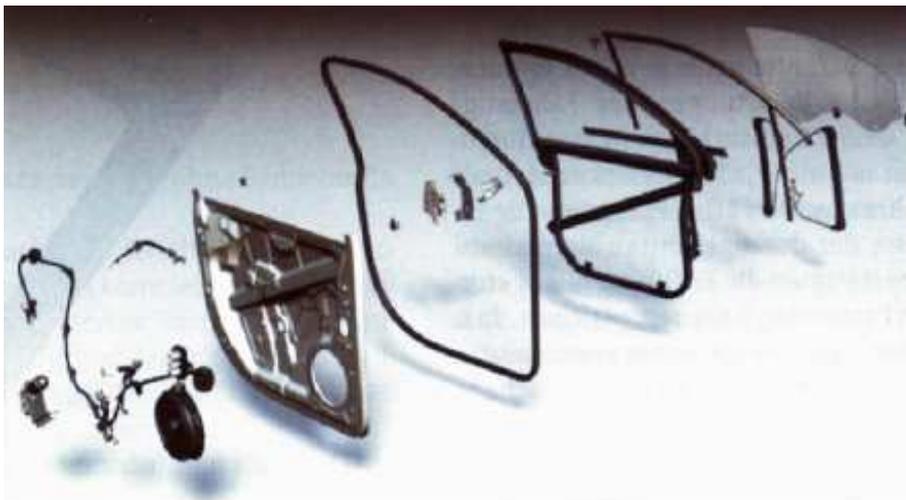


Bild 6: Seitentür für Porsche Cayenne als Beispiel für Differentialbauweise
[SSi08]

Mit Differentialbauweise können zum Beispiel an hochbeanspruchten Stellen hochwertige Werkstoffe in geringem Umfang eingesetzt werden. An allen anderen Stellen sind einfache,

kostengünstigere Werkstoffe für die Erfüllung der Aufgaben ausreichend. Dadurch lassen sich die Werkstoffkosten deutlich reduzieren. Außerdem spricht für die Differentialbauweise eine bessere Reparaturfähigkeit aufgrund der üblicherweise leicht lösbaren Verbindungen und der anschließenden Sortierung in einzelne Elemente. Durch die hohe Anzahl von Einzelteilen sind jedoch die Fertigungs- und Montagekosten entsprechend hoch.

Anders verhält es sich bei der Integralbauweise, bei welcher das Prinzip der Einstückigkeit gilt. Hier sind die Versteifungen oder andere Elemente ein integrierender Bestandteil eines Bauteils als Ganzes. Ein einfaches Beispiel dafür ist ein stranggepresstes Profil mit Rippen. Die Bauteilform und Wandstärkenverlauf sind optimal an den Kraftfluss anpassbar. Dies ermöglicht eine sehr homogene Werkstoffausnutzung und einen nahezu völligen Ausschluss von Spannungskonzentrationen innerhalb des Bauteils. Die Integralbauweise fördert Einstoffprodukte und vermindert Zerlege- bzw. Montageaufwand.

Eines der zahlreichen Beispiele für die Integralbauweise ist der Waggon für Schienenfahrzeuge. Der erste Waggon in Deutschland in Integralbauweise wurde 1979 gebaut. 1987 kam der Mittelwagen des ICE-1 in Aluminium-Integralbauweise. Der prinzipielle Aufbau eines Waggons in Integralbauweise als doppelwandige Großprofilbauweise für den Pendelzug „Pendolino“ ETR-460 zeigt das Bild 7. Ähnliches Prinzip wird auch im modernen ICE der dritten Generation eingesetzt [Ost07].

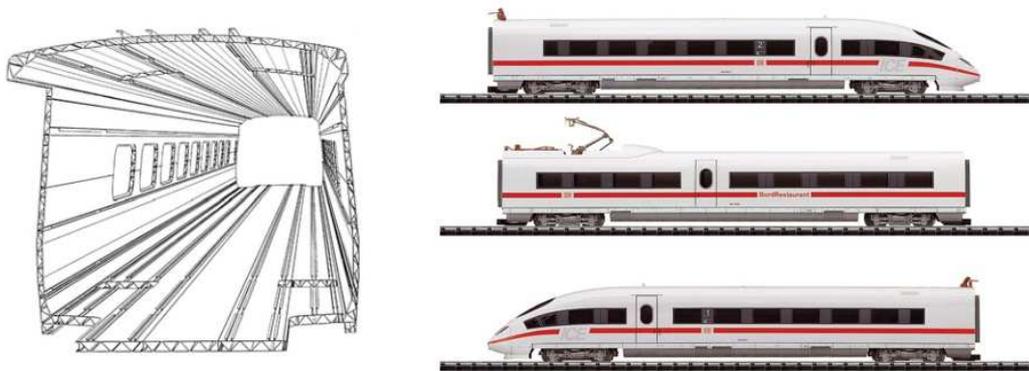


Bild 7: Aufbau eines Waggons für Pendelzug „Pendolino“ ETR-460 (links) [Ost07], ICE Reisezug der 3. Generation (rechts)

Inzwischen sind auch kombinierte Bauweisen entstanden. Sie bieten ein Kompromiss zwischen Differential- und Integralbauweise an.

3.3.2 Integrierende Bauweise

Integrierende Bauweise liegt zwischen der Differential- und Integralbauweise und bietet einen funktionalen Kompromiss. Ziel ist es dabei, die Vorteile der Differentialbauweise, also ein einfaches Herstellen komplexer Bauteile durch Zusammenfügen von mehreren einfach herstellbaren Elementen mit dem Vorteil der Integralbauweise, dem homogenen Kraftfluss innerhalb des Bauteils, zu kombinieren.

Zwar werden auch bei der integrierenden Bauweise zahlreiche Einzelteile zusammengefügt, als Fügeverfahren dienen hier jedoch Klebe- oder Schweißverfahren, wodurch eine entsprechende Homogenisierung der Spannungsfelder innerhalb des Bauteils ermöglicht wird. Nachteilige Kerbwirkungen und Vorspannungen, wie sie sich bei der Differentialbauweise ergeben, werden vermieden, indem ein quasi homogenes Bauteil entsteht. Ein einfaches Beispiel für integrierende Bauweise ist die Außenhaut in Form eines Metallbleches mit aufgeklebten Verstärkungen.

3.3.3 Schalenbauweise

Die am weitesten verbreitete Bauweise, die in der Massenproduktion einen höchsten Stellenwert hat, ist die Schalenbauweise. Das Prinzip der Schalenbauweise besteht darin, dass die Konstruktion aus einer Außenhaut besteht, die auf formgebende Spanten aufgenietet ist. Ein gutes Beispiel für Schalenbauweise ist der Rumpf eines Flugzeugs, der meistens in Schalenbauweise gebaut wird (Bild 8.)

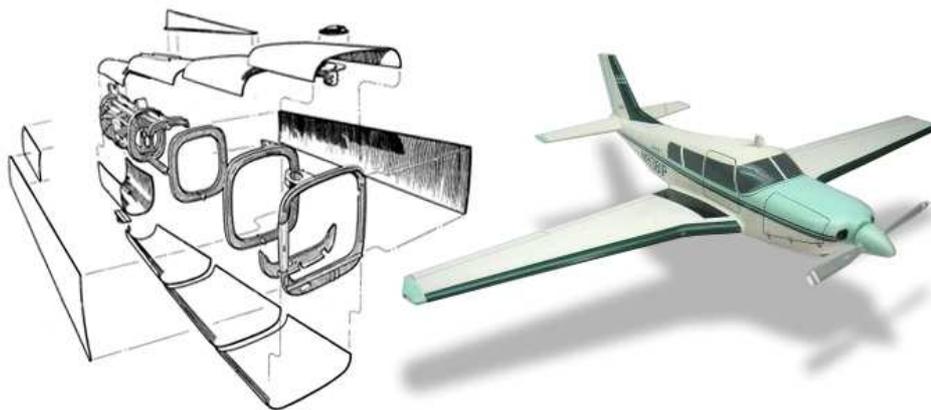


Bild 8: Beispiel für die Schalenbauweise aus der Flugzeugtechnik (Piper PA-24 Comanche)

Stringer und Spanten bilden ein Grundgerüst, das von der Beplankung umschlossen wird. Meistens werden als Beplankung metallische Bleche oder Bauteile aus Kunststoff eingesetzt. Kennzeichnend für die Schalenbauweise ist, dass die Beplankung auch zur Aufnahme von Belastungen herangezogen wird [Kle07]. Das Ergebnis ist eine sehr hohe Steifigkeit und Stabilität der Konstruktion.

Die Einsatzgebiete sind dabei neben dem Flugzeugbau auch Schienenfahrzeugbau, Schiffbau, Architektur und insbesondere Automobilbau [HE192]. Ein modernes Gesicht für die Schalenbauweise aus der Automobilindustrie ist die Karosserie der Mercedes E-Klasse (Bild 9).



Bild 9: Die Karosserie des Mercedes E-Klasse MJ 2006 [NNm06]

3.3.4 Verbundbauweise und Mischbauweise

Bei der Verbundbauweise¹ werden Bauteile aus mehreren unterschiedlichen Werkstoffen zu einem Stück zusammengesetzt. Der Unterschied zur Differentialbauweise ist, dass das Ergebnis dieser Zusammensetzung ein Mehrstoff-Bauteil ist, wobei zwischen den einzelnen Komponenten eine unlösbare Verbindung besteht. Die Komponenten zur Aufnahme der Beanspruchung sind z.B. Kohle, Glas- und/oder Synthesefasern. Das Fundament der Verbundbauweise sieht man ganz gut bei Verbundwerkstoffen – vor allem glas- (GFK) und kohlenfaserverstärkte (CFK) Kunststoffen [Kle00], die in letzter Zeit immer öfter eingesetzt werden. Sie bleiben jedoch aufgrund ihrer hohen Herstellungskosten für die meisten konventionellen Anwendungen noch unbezahlbar.

Die Eigenschaften der Werkstoffe bei Verbundbauweise werden gezielt und vorteilhaft ergänzt, so dass die verwendeten Werkstoffe die an das Bauteil gestellten Anforderungen bestmöglich gemeinsam erfüllen. Man spricht oft von einem „gebauten Werkstoff“, der Funktion und Beanspruchung optimal erfüllt [PBF+07].

Eine andere Bauweise, die oft mit der Verbundbauweise verwechselt wird ist die Mischbauweise. Im Gegensatz zur Verbundbauweise handelt es sich nicht um ein Bauteil aus

¹ - Oft wird Verbundbauweise als Mischbauweise, Hybridbauweise, Multi-Material-Bauweise u. a. bezeichnet. Diese Begriffsdefinition ist jedoch irreführend. Die Begriffe dienen zur Definition jeweils einer anderen Bauweise, die auch als Unikat betrachtet werden soll und nicht mit Verbundbauweise im Sinne der Definition vertauscht werden darf.

unterschiedlichen unlösbar verbundenen Werkstoffen, sondern um eine Baugruppe, in der einzelne Bauteile aus verschiedenen Werkstoffen hergestellt sind. Bild 10 zeigt den Einsatz der Mischbauweise beispielsweise für den Vorderwagen eines Fahrzeugs, deren Bauteile aus Aluminium, Stahl, Magnesium und Kunststoff bestehen.

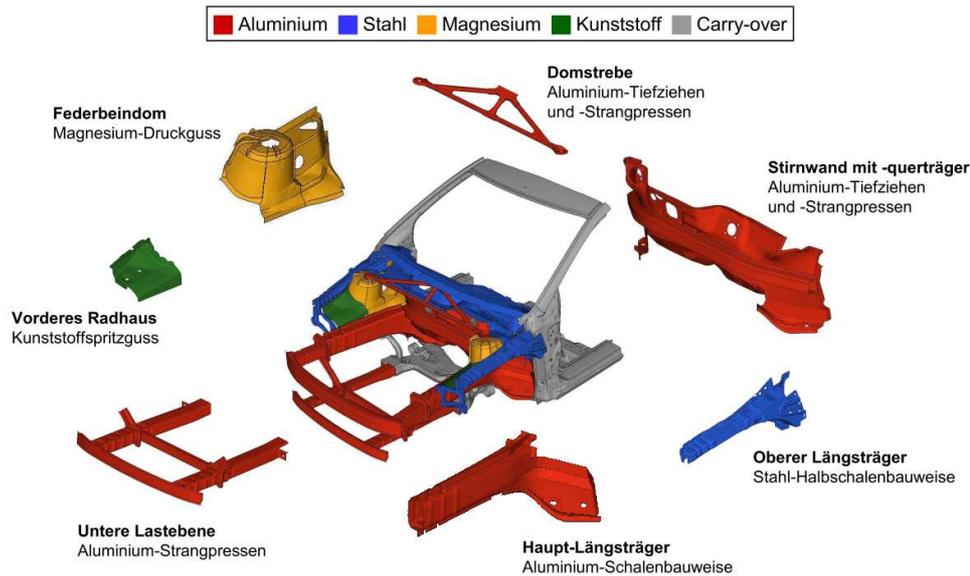


Bild 10: Der Vorderwagen eines Fahrzeugs in Mischbauweise [LBU08]

3.3.5 Sandwichbauweise

Eines der besten Beispiele der Leichtbauweisen ist die Sandwichbauweise. Sie wird in vielen Leichtbauteilen verwendet. Ihr auffallendster Vorteil besteht darin, dass die Bauteile in Sandwichbauweise besonders leicht sind. Gegenüber anderen Bauweisen kann hier eine Gewichtsersparnis von bis zu 50% und sogar mehr erreicht werden.

Die Sandwichbauweise ist durch zwei steife, feste Decklagen gekennzeichnet, zwischen denen sich eine Kernlage mit geringerer Dichte befindet. Die Decklagen sind dabei durch die Kernlage schub- und zugfest miteinander verbunden. Als Kernmaterial können z. B. Wabenstrukturen, Wellbleche, Metall- und Kunststoffschäume verwendet werden. Als Decklagen dienen beispielsweise Metallbleche, Gitterstrukturen oder Platten aus Verbundwerkstoffen. Die Verbindung zwischen dem Kern und Decklagen kann durch Kleben, Schweißen oder auch Walzplattieren hergestellt werden. Das Bild 11 stellt am Beispiel eines geklebten Wabensandwiches der Tripan Leichtbauteile GmbH eine Variation der Gestaltungsmöglichkeiten dar.

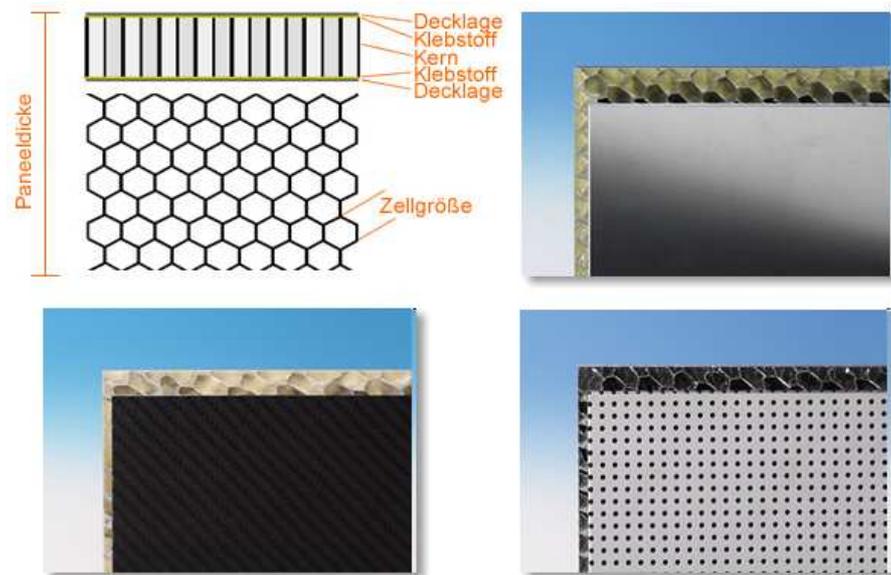


Bild 11: Sandwichstruktur mit Wabenkern und verschiedenen Decklagen, [tripan]

Ob im Fahrzeugbau (Lkw, Pkw, Nutzfahrzeuge), in der Schienenfahrzeugtechnik, im Schiffbau oder der Architektur, man findet immer Anwendungsbeispiele für die Sandwichbauweise. Im Bild 12 sind vier Beispiele – ein Bruchteil aller möglichen Anwendungen – der Sandwichbauweise zu sehen.

Das erste Bild zeigt den Innenraum des Berliner Reichstags, wo die Metawell® Sandwichpanelle als Trägermaterial für hochbelastete Bodenplatten eingesetzt wurden [met].

Sehr beliebt ist die Sandwichbauweise im Schienenverkehr im Bereich des Wagenkastens (Dach, Seitenwände) sowie der Verkleidungsteile. Das zweite Bild zeigt den modernen Transrapid in Shanghai. Die Sandwichbauteile für Fahrgastzelle und den Gestellaußenverkleidungen bestehen aus Aluminium-Deckschichten und einem Kern aus Hartschaumstoff [WLF01]. Die Tragmagnet-Innenverkleidung wurde ebenso in Sandwichbauweise konstruiert. Während die Außenschale die notwendige Steifigkeit und die notwendige Widerstandsfähigkeit gegen Stoßbeanspruchung sicherstellt, bietet der Sandwichkern aus Kunststoffschäum einen optimalen Schutz der spröden Ferritelemente gegenüber mechanischer Beanspruchung [TBB+05].



Bild 12: Anwendungen der Sandwichbauweise

Die Außenhaut der Ahornbahn in Mayrhofen (drittes Bild) wurde aus TRIPAN® Sandwichelementen gebaut. Dadurch werden gleichzeitig eine hohe Steifigkeit sowie ein geringes Gewicht gewährleistet.

Im vierten Bild ist der VW California dargestellt, in dem der Einbauschrank, die Küchenzelle, der Klapptisch, der Dachstaukasten und die Bettplatte aus der Metawell® Produktfamilie hergestellt sind. Die Bettplatte dient zusätzlich zur Erhöhung der Karosseriesteifigkeit und als Trägerplatte für Anbauteile [met].

Aus oben genannten Beispielen und Ausführungen ist deutlich zu sehen, dass die modernen Produkte bzw. Bauteile einen komplizierten Zusammenbau haben sowie immer neue Arten von Bauweisen und Werkstoffen aufweisen. Das Thema „Leichtbau“ ist trotz seines Alters weitaus noch nicht ausgeschöpft. Der Leichtbau sowie die Suche nach modernen Leichtbaulösungen und neuen Werkstoffen sind sogar aktueller denn je.

3.4 Zellulare Werkstoffe

Die Palette von Werkstoffarten und Bauweisen ist sehr breit. Viele in vorherigen Kapiteln erwähnte Leichtbaulösungen sind jedoch nicht vom Mensch entwickelt worden, sondern stellen die bionischen Analogien dar. Zu nennen sind beispielsweise das Versteifungsprinzip eines Seerosenblattes, die Struktur eines Schmetterlingsflügels, das Blatt einer Alge oder Knochen und der Schädel eines Säugetieres.

Die zuletzt genannten Analogien stellen Strukturen dar, die zellular aufgebaut sind. Gerade diese Werkstoffe spielen für den heutigen Leichtbau aufgrund der hervorragenden Kombi-

nation ihrer physikalischen und mechanischen Eigenschaften eine wichtige Rolle. Sie sind unmittelbar mit dem Thema dieser Arbeit verbunden und daher hier näher zu erläutern.

Die zellularen Werkstoffe sind von Menschen als ausgezeichneter Konstruktionswerkstoff seit langem anerkannt worden. Die Kunststoffschäume wie z. B. PUR-Hartschaum haben sich bereits in 70er Jahren etabliert [Och+73]. Bekannt sind jedoch nicht nur die Schäume aus Kunststoffen, sondern auch aus verschiedenen Metallen. Diese wurden dagegen bis vor kurzem nicht so verbreitet eingesetzt. Obwohl sie bereits seit über 50 Jahren existieren, haben die metallischen Schäume einen nur relativ geringen Bekanntheitsgrad.

In der Forschung und in der Industrie wird (wurde) an unterschiedlichen Forschungsstellen auf dem Gebiet Metallschäume gearbeitet. Innerhalb des DFG-Schwerpunktprogramms 1075 „Zellulare metallische Werkstoffe“ (Laufzeit 1999 bis 2004) hat man einen großen Beitrag zum besseren Verständnis und zur weiteren Entwicklung zellulärer Werkstoffe geleistet. Mit rund 25 Projekten wurde der Zusammenhang zwischen Herstellparametern, Mikrostruktur und Eigenschaften von metallischen Schäumen grundlegend untersucht [spp1075, BSH+00, NHB00, AWS+00, HWS+99, HOt00]. Außerdem wurde ein großer Beitrag zur mathematischen Beschreibung sowie Simulation von metallischen Schäumen geleistet [ATK+00, ASu00, SWK00].

Im Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) wurde eine Technologie zur Herstellung von Metallschäumen entwickelt. Das Verfahren stellt eine wichtige Grundlage aller pulvermetallurgischer Herstellungsverfahren dar. Das IFAM in Zusammenarbeit mit der W. Karmann GmbH in Osnabrück hat das entwickelte Verfahren erfolgreich eingesetzt, um Automobilkomponenten wie z.B. die Fahrzeugrückwand herzustellen [BWH+97]. Dieses und auch andere Verfahren werden im Kapitel 3.4.3 ausführlich erläutert.

Zurzeit existieren mehrere Programme bzw. Netzwerke, die sich mit der Forschung und Entwicklung zellulärer Werkstoffe auseinandersetzen. Zu nennen sind u. a. Netzwerk „Zellulare Metallische Werkstoffe“ (ZMW), Verbund Zellulare Werkstoffe Sachsen (VZWS) sowie das Bündnis inno.zellmet Neue MetallWelten. Im Rahmen dieser Programme werden zahlreiche Projekte durchgeführt, die zellulare Werkstoffe vorantreiben. [zellmet, vzws, innozell]. Im Juni 2009 wurde das Informationsportal über Metallschäume gegründet, in dem zahlreiche Informationen über diese innovativen Werkstoffe zur Verfügung stehen - von der Definition von Metallschäumen bis hin zu Erläuterungen mehrerer Herstellungsverfahren sowie einer Datenbank der Forschungseinrichtungen und Unternehmen, die in diesem Bereich tätig sind [met-info].

3.4.1 Übersicht von Metallschäumen

Ähnlich der Knochenstruktur besitzt der Schaum einen zellularen Aufbau. Zellular bedeutet, dass Gasporen Zellen bilden, die durch eine Feststoffschicht getrennt sind. Dementsprechend darf der Begriff „Metallschaum“ wie folgt formuliert werden.

Metallschaum ist ein metallischer Feststoff, der durch die in seiner Struktur stochastisch verteilten Poren und Hohlräume gekennzeichnet ist.

Nach Strukturaufbau werden Metallschäume in offenporige Metallschäume und geschlossporige Metallschäume untergliedert (Bild 13).



Bild 13: Offenporiger und geschlossener Metallschaum

Offenporige Metallschäume werden häufig auch als *Metallschwämme* bezeichnet. Das sind die Strukturen, die ebenso die miteinander verbundenen Hohlräume besitzen. Im Gegensatz zu Schäumen sind Schwämme jedoch offen porös, d.h. die Gasblasen sind miteinander vernetzt. Sie sind vom Konstruktionsprinzip natürlichem Knochengewebe nachempfunden.

In Bezug auf den Werkstoff ist die Herstellung eines Metallschaums nahezu aus einem beliebigen Metall möglich. Allerdings hat jedes Metall eine spezifische Schaumstruktur (Bild 14). Insbesondere Schäume aus Metallen mit einem niedrigen Schmelzpunkt wie Aluminium, Magnesium, Zinn oder Kupfer gewinnen heute zunehmende Bedeutung als industrie-relevante Werkstoffe [ABH+05, Bor05, LPO+07].



Bild 14: Schäume aus verschiedenen Metallen [iwu]

Die Aluminiumschäume nehmen dabei mit Sicherheit die erste Position ein. Die Konzentration der Metallschaumforschung auf Aluminium ist nicht schwer zu erklären. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten mit Aluminiumschäumen waren aus folgenden Gründen besonders erfolgreich und zukunftsorientiert [Wei99, Hip01]:

- Aluminium wird im Maschinen- und Fahrzeugbau am häufigsten nach Stahl eingesetzt und hat einen entsprechend hohen Stellenwert,
- Aluminium ist leicht verfügbar. Außerdem ist der Anteil von Sekundär-aluminium im Werkstoffkreislauf sehr hoch,
- Aluminium hat einen relativ geringen Schmelzpunkt und passt somit hervorragend zum Aufschäumen, denn der Werkstoff muss beim Aufschäumen auf Schmelztemperatur gebracht werden,
- die Expansionsraten sind gut,
- die Werkstoffeigenschaften von Aluminiumschäumen sind nahezu isotrop,
- die Dichte vom Aluminium ($2,7 \text{ g/cm}^3$) ist bereits sehr gering, wodurch eine besonders geringe Schaumdichte möglich ist.

3.4.2 Eigenschaften von Aluminiumschäumen

Die Vorzüge der Aluminiumschäume ergeben sich aus der Kombination von physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Dazu werden in der Literatur zahlreiche Eigenschaften wie hohe Steifigkeit, geringe Dichte, gute Energieabsorption, erhöhte mechanische Dämpfung oder gute Schallisierungseigenschaften genannt [NNi-01, GBN+01, MFA99, DSi94]. Aufgrund der geringen Dichte eignen sich die Aluminiumschäume sehr gut für Leichtbauanwendungen. Die Dichte des Schaums (ca. $0,07 \text{ g/cm}^3 - 0,7 \text{ g/cm}^3$) liegt bei nur einem Bruchteil des Wertes vom Aluminium ($2,7 \text{ g/cm}^3$) [NNm]. Die Steifigkeit des Aluminiumschaums ist dabei im Vergleich zu einem Massivkörper gleicher Masse um bis zu einem Faktor 5 größer. Der Aluminiumschaum hat somit ein großes Leichtbaupotential.

Physikalische Eigenschaften

Eine der wichtigsten physikalischen Charakteristiken eines Schaums ist neben der Dichte seine relative Dichte, ρ^*/ρ_s . Diese ist definiert als Quotient aus der Dichte des Schaums ρ^* und der Dichte des Kompaktmaterials ρ_s , aus dem die Zellstege und Zellwände bestehen. Mit steigender relativer Dichte werden die Zellwände dicker und das Porenvolumen sinkt. Ab einer relativen Dichte von 0,3 wandelt sich eine zellulare Struktur zu einer Struktur, die als Festkörper mit vereinzelt isolierten Poren beschrieben wird [Böl03]. Die Dichte des Schaums wird oft in Abhängigkeit von der relativen Dichte dargestellt (Bild 15).

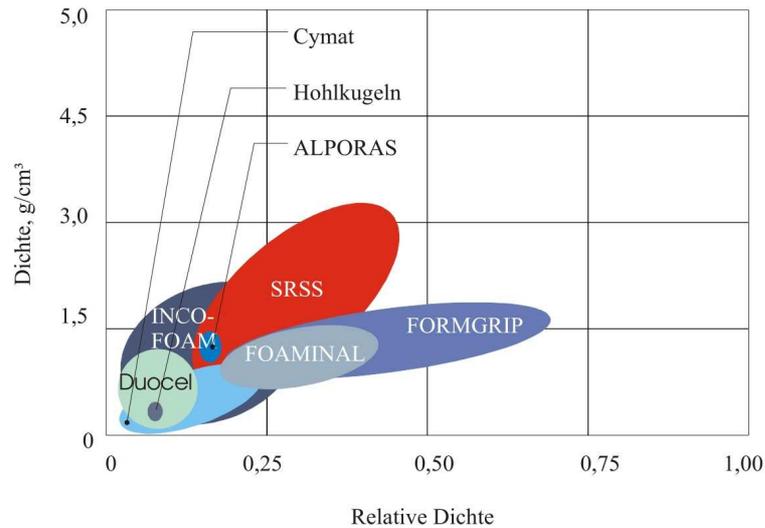


Bild 15: Dichte der bekanntesten Metallschäume [NNm]

Ein weiteres wichtiges Charakteristikum eines Schaums ist die Porosität P . Sie ist durch (1) definiert:

$$P[\%] = \left(1 - \frac{\text{Dichte}_{\text{Schaum}}}{\text{Dichte}_{\text{Matrixwerkstoff}}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Die Porosität des Schaums ist der Anteil des Porenvolumens am Gesamtvolumen in Prozent. Eine Übersicht der Porosität der bekanntesten Schäume ist im Bild 16 dargestellt. Man kann gut sehen, dass die meisten Aluminiumschäume eine Porosität von über 70% haben.

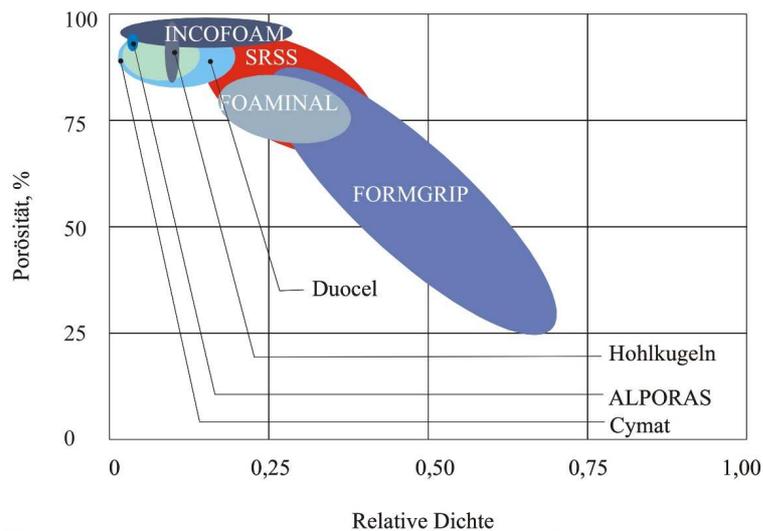


Bild 16: Porosität der bekanntesten Metallschäume [NNm]

Die Wärmeleitfähigkeit der Aluminiumschäume ist eine weitere wichtige physikalische Größe. Obwohl die Wärmeleitung im Grundmaterial des Schaums der Wärmeleitung des

Massivaluminiums entspricht, ergibt sich aufgrund der porösen Struktur des Schaums bzw. geringer Querschnitte der wärmeleitenden Stege eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit. Dies ist schematisch im Bild 17 erklärt.

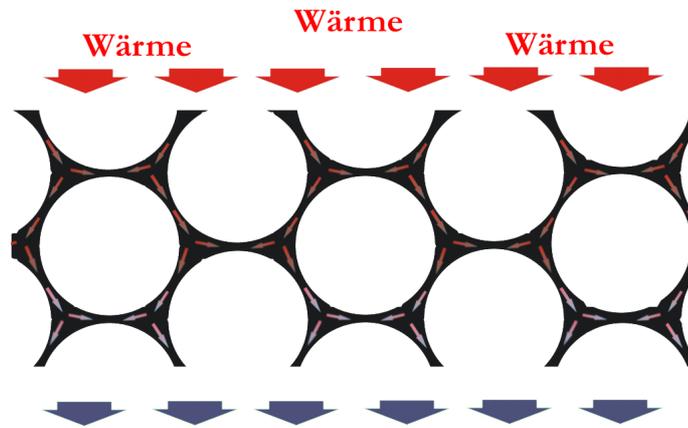


Bild 17: Wärmeleitung im Metallschaum

Der Wärmeleitkoeffizient ist eine Werkstoffkonstante, die sich nur bei einer Werkstoffveränderung ändert. Aus der Darstellung der Wärmeleitung im Metallschaum lässt sich jedoch schlussfolgern, dass in diesem Fall als eine solche Werkstoffveränderung auch die unterschiedliche Dichte eines Schaums anzusehen ist. So lässt sich erwarten, dass die Wärmeleitung mit höherer Dichte zunimmt, da die wärmeleitenden Zellstege je Flächeneinheit dann einen größeren Querschnitt aufweisen [HLP07].

Der Aluminiumschaum mit einer geringen Dichte besitzt daher eine sehr gute Wärmedämmung. Die Wärmeleitfähigkeit von pulvermetallurgisch hergestellten Schäumen ALU-LIGHT beträgt beispielsweise nur ca. 1/10 der Wärmeleitfähigkeit der entsprechenden massiven Aluminiumlegierung. Bei ALPORAS-Schaum liegt sie bei ca. 1/60 der Wärmeleitfähigkeit von Aluminium (s. Tabelle 1).

Weitere Eigenschaften von Aluminiumschäumen sind die Schallabsorption und Vibrationsdämpfung. Laut [AEF+00] ist das Dämpfungsvermögen von Metallschäumen etwa 5- bis 10-mal so groß wie das des massiven Metalls. Die Schallabsorption ist ebenso sehr gut. Die Schallwelle dringt in die Schaumstruktur ein und wird innerhalb des Schaums durch die unregelmäßigen Porenoberflächen reflektiert. Dadurch wird die Intensität des reflektierten Schalls gemindert [Hah05]. Dieser Effekt konnte bei ALPORAS-Schaum weiter verstärkt werden, indem die Zellwände durch eine zusätzliche Walzbehandlung aufgebrochen wurde [AEF+00], [NNw].

Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von Aluminiumschäumen lassen sich sehr gut aus den vielen Literaturquellen entnehmen, da dazu im Laufe der letzten Jahrzehnte viele Untersuchungen durchgeführt wurden.

Als erstes sind die Untersuchungen zur Ermittlung der Festigkeit von Aluminiumschäumen zu erwähnen. Die Werte sind sowohl mathematisch aus Werkstoffgesetzen als auch empirisch im Versuch ermittelt worden [BBE00, GMG00, Gas97, ASC97]. Obwohl neben den Werten für die Druckfestigkeit von Aluminiumschäumen auch die Werte für die Zugfestigkeit existieren, liegen diese nur im begrenzten Umfang vor, da sich die mechanische Prüfung mittels Zugversuch hier schlecht einsetzen lässt. Der effektive Querschnitt von z. B. einem Schaumblock ist relativ gering, so dass der Einsatz des Schaums für die Zugbeanspruchung wenig geeignet ist. Es ist sinnvoll, die Bauteile aus Metallschaum auf Druck zu beanspruchen. Ein entsprechendes Prüfverfahren muss daher auch eine Druckbeanspruchung ermöglichen. Die Ermittlung mechanischer Eigenschaften erfolgt also am sinnvollsten in einem Druckversuch. Die Zug- und Druckfestigkeiten ausgewählter Aluminiumschäume sind in der Tabelle 1 dargestellt.

| | Alporas | Alulight | Cymat | ERG |
|------------------------------|----------------|-----------------|--------------|-------------|
| Material | Al | Al | Al-SiC | Al |
| Struktur | geschlossen | geschlossen | geschlossen | offen |
| Dichte, [g/cm ³] | 0,2 – 0,25 | 0,1 – 1,0 | 0,07 – 0,56 | 0,16 – 0,25 |
| Relative Dichte, - | 0,08 – 0,1 | 0,1 – 0,35 | 0,02 – 0,2 | 0,05 – 0,1 |
| E-Modul, [GPa] | 0,4 – 1,0 | 1,7 – 12 | 0,02 – 2,0 | 0,06 – 0,3 |
| Schubmodul, [MPa] | 0,3 – 0,35 | 0,5 – 5,2 | 0,001 – 1,0 | 0,02 – 0,1 |
| Querkontraktionszahl, | 0,31 – 0,34 | 0,31 – 0,34 | 0,31 – 0,34 | 0,31 – 0,34 |
| Druckfestigkeit, [MPa] | 1,3 – 1,7 | 1,9 – 14 | 0,04 – 7,0 | 0,9 – 3,0 |
| Zugfestigkeit, [MPa] | 1,6 – 1,9 | 2,2 - 30 | 0,05 – 8,5 | 1,9 – 3,5 |

Tabelle 1: Eigenschaften einiger Aluminiumschäume, nach [HLP07]

Aluminiumschäume besitzen als eine direkte Folge der zellularen Struktur neben dem geringen Gewicht eine sehr hohe Biegesteifigkeit. In [HLP07] und [AEF+00] wird ein charakteristischer Materialindex erwähnt, welcher einen Vergleich des Leichtbaupotentials vom Massivmetall und Schaum ermöglicht. Für den Fall der Plattenbiegung besitzen Schäume einen deutlich höheren Indexwert als das Massivmaterial, d.h. bei gleicher Masse kann eine höhere Steifigkeit erreicht werden.

Die Werte der mechanischen Eigenschaften lassen sich nicht allgemein für alle Aluminiumschäume definieren, da sie eine breite Streuung haben. Dies hat damit zu tun, dass die Eigenschaften von vielen Faktoren wie Matrixlegierung, Aufschäumbedingungen, Herstel-

lungsverfahren oder Porengröße stark abhängig sind. Eine Übersicht der Eigenschaften von ausgewählten Aluminiumschäumen ist in der Tabelle 1 zu sehen.

Energieabsorption

Aluminiumschäume besitzen ein großes Potenzial bei der Verwendung als Crashenergieabsorbern. Das ist aus dem Spannungs-Stauchungs-Diagramm eindeutig ersichtlich (Bild 18).

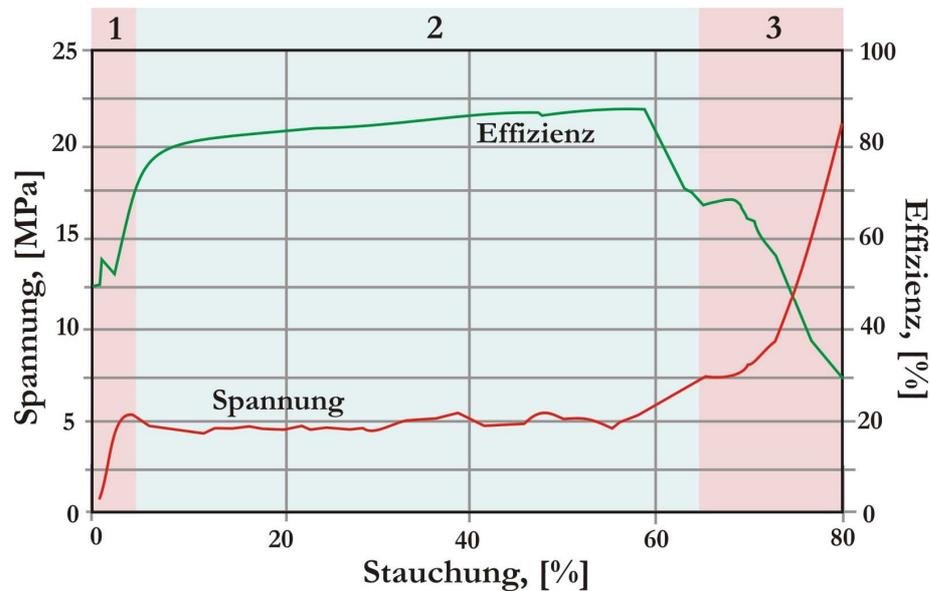


Bild 18: Verlauf der Spannung und der numerisch ermittelten Effizienz der Energieabsorption für einen AlSi12-Schaum mit Dichte $0,36 \text{ g/cm}^3$, nach [Web95]

Wenn man den Verlauf der Spannungskurve auf diesem Diagramm anschaut, stellt man fest, dass das Stauchungsverhalten des Aluminiumschaums einen für den nahezu idealen Energieabsorber entsprechenden Verlauf aufweist. Das Bild 18 zeigt die höchste Effizienz im Spannungsplateau-Bereich.

Im Diagramm sieht man ganz deutlich drei Bereiche mit unterschiedlichem Verhalten. Im ersten Bereich erfolgt ein teilweise elastischer Anstieg der Spannung. Der zweite Bereich ist durch ein ausgeprägtes Spannungsplateau gekennzeichnet. Dabei wird ein erheblicher Anteil der Energie durch die Verformung der Porenstruktur absorbiert. Eine weitgehende Deformation des Schaums im dritten Bereich führt zum weiteren Spannungsanstieg, indem die Verdichtung des Schaums stattfindet.

3.4.3 Herstellungsverfahren

Zur Herstellung von Metallschäumen ist eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren bekannt. Eine Übersicht der bekannten Herstellungsverfahren wird in der Tabelle 2 dargestellt. Alle diese Verfahren sind zur Herstellung von Aluminiumschäumen geeignet.

| Herstellungsverfahren von Aluminiumschäumen | | |
|---|---|---|
| Schmelzmetallurgische Verfahren | | Pulvermetallurgische Verfahren |
| <p>offenporig</p> <ul style="list-style-type: none"> - Niederdruckgussverfahren - Feingussverfahren - Druckgussverfahren mit Platzhaltern | <p>geschlossenporig</p> <ul style="list-style-type: none"> - ALCAN-/HYDRO-Verfahren - ALPORAS-Verfahren - COMBAL-Verfahren - CYMAT-Verfahren - ERG DUOCELL-Verfahren - FORMGRIP-Verfahren - GASAR-Verfahren - HOESCH-Verfahren - Integral Foam Moulding - LPFC-Verfahren - PANTEC-Verfahren | <p>geschlossenporig</p> <ul style="list-style-type: none"> - APM-Verfahren - BAUMEISTER-/IFAM-Verfahren - CONFORM-Verfahren - Diffusions-Verfahren - Illichmann/Neumann-Verfahren - MEPURA-Verfahren - PolyFoM-Verfahren - Pulverwalzen-Verfahren - Thixogieß-Verfahren |

Tabelle 2: Übersicht der bekanntesten Herstellungsverfahren

Wie in Tabelle 2 zu sehen ist, lassen sich die Verfahren im Allgemeinen in schmelzmetallurgische und pulvermetallurgische Verfahren unterteilen². Die schmelzmetallurgische Verfahren eignen sich sowohl zur Herstellung von offenporigen als auch geschlossenporigen Schäumen. Im Gegensatz dazu lassen sich mit pulvermetallurgischen Verfahren nur Schäume mit geschlossenzelliger Struktur herstellen. Bereits vor mehr als 50 Jahren haben sich die Forscher Gedanken über diese zwei Verfahrenstypen gemacht. So wurde schon 1927 in der Patentliteratur ein pulvermetallurgisches Verfahren zur Herstellung von porösen Metallen beschrieben [WBo28]. Das erste Patent für ein schmelzmetallurgisches Verfahren zur Metallschaumherstellung stammt aus dem Jahr 1948 [Sos48]. Da sich diese Arbeit auf geschlossenporigen Aluminiumschaum bezieht, wird im Folgenden auf die relevanten Verfahren zur Herstellung geschlossenporiger Schäume eingegangen. Einige ausgewählte Verfahren werden näher erläutert.

Schmelzmetallurgische Herstellungsverfahren

Die meisten schmelzmetallurgischen Verfahren zur Herstellung geschlossenporiger Schäume basieren auf das Aufschäumen einer Metallschmelze. Dabei kann dieser Prozess

² - Zu nennen sind noch drei Gruppen von Herstellungsverfahren: Verfahren mit Oberflächentechnologie, Sinterverfahren und Abscheidetechniken. Diese Verfahren sind jedoch für die Aluminiumschäume nicht bzw. nur bedingt anwendbar. Daher werden sie in dieser Arbeit nicht erläutert. Nähere Informationen zu diesen Verfahren sind in [ASt02, Bön05, Hip01, NNf04, Web95, Wei99,] zu finden.

durch Zugabe eines Treibmittels³ oder durch direkte Gasinjektion in die Schmelze erfolgen. So lassen sich die schmelzmetallurgischen Verfahren in Verfahren mit und ohne Treibmittel untergliedern.

In der schmelzmetallurgischen Herstellung von Aluminiumschäumen mit Verwendung eines Treibmittels sind drei Verfahren am meisten bekannt. Das sind das ALPORAS[®]-Verfahren [Mit98], [MIA+00] der Firma Shinko Wire Co. Ltd. in Japan, das an der TU Nürnberg/Erlangen entwickelte Verfahren - Integral Foam Moulding [KHW06, HLP07, SKö06] und das seit 2001 von der Cymat Corp. in Mississauga (Kanada) benutzte FORMGRIP-Verfahren⁴ [Bön05, HLP07, Ell56, AWS63]. Der durch das ALPORAS[®]-Verfahren hergestellte Schaum gehörte dabei im Dezember 2000 zu den homogensten kommerziell verfügbaren Metallschäumen [Ban00].

Die Technologie des ALPORAS[®]-Verfahrens basiert auf vier prinzipiellen Schritten (s. Bild 19): Erhöhung der Viskosität der Aluminiumschmelze durch Kalziumzugabe, Einbringen von Treibmittel zum Auslösen des Schäumprozesses, Aufschäumen der Schmelze sowie das anschließende Abkühlen. Das Ergebnis ist ein Schaumblock, der anwendungsabhängig in Schaumplatten verschiedener Größen geschnitten wird.

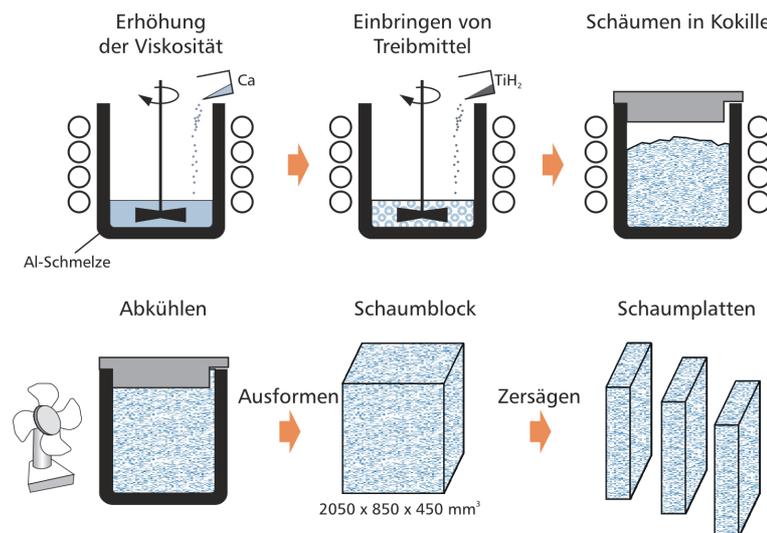


Bild 19: Prinzip des ALPORAS[®]-Verfahrens, nach [Wie07]

³ - Das Treibmittel ist der Werkstoff, der durch eine chemische Reaktion Gas abspaltet oder mit steigender Temperatur gelöste Gase freisetzt. Zum Schäumen von Aluminium wird vorwiegend Titanhydrid TiH₂ verwendet [HLP07].

⁴ - Das FORMGRIP-Verfahren wird in [HLP07] zu pulvermetallurgischen Herstellungsverfahren eingeteilt. Eine eindeutige Einteilung dieses Verfahrens ist schwer zu definieren, denn der technologische Schwerpunkt liegt hier in der Schmelzevorbereitung sowie in dem oxidierten Treibmittel, das in die Schmelze hinzugeführt wird. Andererseits entsteht der Schaum nicht direkt aus der Schmelze. Ähnlich wie bei pulvermetallurgischen Verfahren muss das aufschäumbare Halbzeug später durch Wärmezufuhr aufgeschäumt werden.

Im FORMGRIP-Verfahren wird die Viskosität durch SiC-Zugabe erhöht. Ähnlich wie beim ALPORAS®-Verfahren wird hier in die Schmelze auch ein Treibmittel hinzugefügt. Das Treibmittel ist jedoch hier stark oxidiert, was in einem vorbereitenden Prozess ermöglicht wird. Durch die Oxidation des Treibmittels wird seine Zersetzung verzögert, so dass die Schmelze vor Zersetzung des Treibmittels erstarrt. Ergebnis ist hier ein aufschäumbares Halbzeug, das zum Aufschäumen auf Schmelztemperatur erwärmt werden muss, damit das Treibmittel Gase freisetzen kann. So entsteht in einem letzten Schritt ein zellulärer Werkstoff.

Deutlich verbreiteter sind die schmelzmetallurgischen Verfahren ohne Treibmittel, wo das Aufschäumen durch Gaszugabe in die Schmelze realisiert wird. Das Aufschäumen eines flüssigen Metalls nach diesem Prinzip ist jedoch nicht ganz einfach, da eine niedrige Viskosität der Schmelze die Bildung eines stabilen Schaums verhindert. Um die Luftblasen in der Schmelze zu stabilisieren, sind im Allgemeinen entsprechende Zugaben notwendig. Dafür werden zur Schmelze unlösliche Keramikpartikel, Oxid- und Karbidpartikel (z. B. Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC) oder spezielle Legierungselemente hinzugefügt, die stabilisierende Legierungsausscheidungen bilden und somit die Viskosität der Schmelze erhöhen [HLP07, Bru06, Wie07, Sta03].

Unter schmelzmetallurgischen Verfahren mit direkter Gasinjektion in die Schmelze sind Verfahren bekannt, die eine kontinuierliche Aluminiumschaumherstellung ermöglichen. Dazu gehören u. a. ALCAN-/HYDRO Verfahren und CYMAT-Verfahren [Bön05, HLP07, Bru06, Wie07].

Als Beispiel einer kontinuierlichen Herstellung ohne Verwendung eines Treibmittels wird das schmelzmetallurgische ALCAN-/HYDRO-Verfahren näher erläutert (Bild 20).

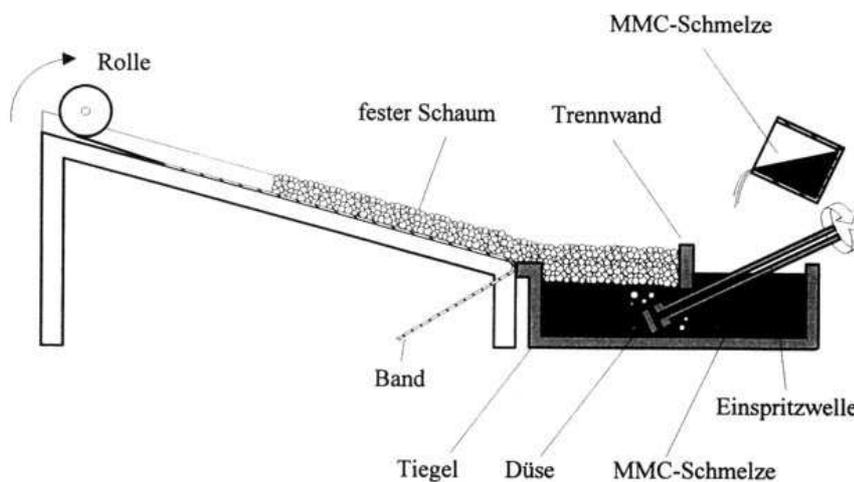


Bild 20: Schematische Darstellung des ALCAN-/HYDRO-Verfahrens, nach [Hus98]

Das ALCAN-/HYDRO-Verfahren stammt von dem kanadischen Aluminiumkonzern Alcan Inc. Das Prinzip des Verfahrens basiert auf die externe Zuführung eines Gases durch rotierende Impeller oder vibrierende Düsen direkt in die Schmelze. Der so entstehende Schaum wird von der Oberfläche durch Förderband abtransportiert. Beim Transport kühlt sich der flüssige Schaum ab und erstarrt zu einem Festschaum.

Bei diesem Verfahren können Produktionsraten von bis zu 1000 kg Aluminiumschaum pro Stunde erreicht werden. Nachteilig ist jedoch die schwer kontrollierbare Porengröße [HLP07].

Eine weitere Möglichkeit, Metallschäume schmelzmetallurgisch herzustellen, ist die Herstellung in einem Gießprozess. Auf diese Weise werden offenporige Metallschäume hergestellt. Hier sind Herstellungsverfahren mit Druckguss-, Niederdruckguss- und Feingussprinzip bekannt [Mun05, Bau04, NNw, HWS+99]. Diese Varianten der Herstellungsverfahren werden auch kommerziell beispielsweise von der m.pore GmbH (Feingussverfahren) und von der Firma ERG aus USA (ERG DUOCEL-Verfahren) eingesetzt [NNw, Bau97, NNe99].

Pulvermetallurgische Herstellungsverfahren

Die pulvermetallurgischen Verfahren zur Herstellung von Aluminiumschäumen basieren auf das Mischen und Verdichten eines Aluminiumpulvers mit einem Treibmittel, welches zum Auslösen des Aufschäumprozesses immer benötigt wird. Eine große Bedeutung hat hier das Verfahren, welches auf die Arbeiten des Fraunhofer Instituts für Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen und der österreichischen Firmen MEPURA Metallpulvergesellschaft m.b.H. und Alulight® International GmbH basiert [Hah05].

Der Ausgangsschritt ist das Vermischen von Metallpulver mit einem Treibmittel. Für Aluminium wird meistens Titanhydrid TiH_2 verwendet. Ähnlich wie bei schmelzmetallurgischen Verfahren kann auch bei pulvermetallurgischen Verfahren ein Stabilisator (z.B. SiC) während des Aufschäumens eingesetzt werden. Dieser wird ebenso in Pulverform dem Gemisch hinzugefügt.

In einem weiteren Schritt erfolgt das Kompaktieren des Pulvergemisches zu einem festen Halbzeug. Die geeigneten Verfahren dazu sind sehr unterschiedlich. Zu nennen sind u. a. axiales Heißpressen, Kalt-Isostatisches-Pressen (CIP) mit nachfolgendem Strangpressen, Pulverwalzen oder ein kontinuierliches Pulverstrangpressen nach CONFORMTM-Verfahren [Sta03].

Das verdichtete Halbzeug wird auf eine Aufschäumtemperatur erwärmt, die nah der Schmelztemperatur des Grundmaterials liegt, so dass das Metall in einem teigigen bzw. flüssigen Zustand vorliegt. Dabei setzt das Treibmittel Gase frei. Somit erhält das ursprünglich volle Halbzeug eine zelluläre Struktur. Um eine bestimmte Bauteilform nach diesem Prinzip zu erzeugen, werden beispielsweise stranggepresste Stränge in eine Schäum-

form gelegt und dort aufgeschäumt. Ein allgemeines Prinzip der pulvermetallurgischen Herstellung ist im Bild 21 dargestellt.

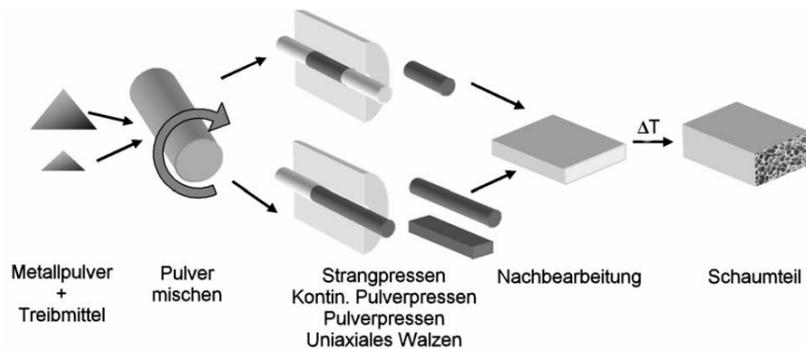


Bild 21: Prinzip der pulvermetallurgischen Herstellung von Aluminiumschaum [Hei03]

Um einen Schritt zur automatisierten und somit industrietauglichen Herstellung näher zu kommen, wurden weitere Modifikationen der pulvermetallurgischen Herstellungsverfahren entwickelt.

In einem patentierten Verfahren PolyFoM[®] [Thü06] wird das sogenannte Polymorphic Foamable Material eingesetzt. Das Verfahren basiert auf einem stranggepressten Vormaterial mit geometrisch vordefiniertem Querschnitt (z. B. Kreuz oder Rohr), welches in kurze Abschnitte zerteilt wird. Mit einem so hergestellten Schüttgut kann ohne manuelle Positionierung eine beliebige Schäumform ausgefüllt werden. Das Bild 22 zeigt das Prinzip des Verfahrens an einem Rohr (jeweils mit PolyFoM[®] ausgefüllt und aufgeschäumt).

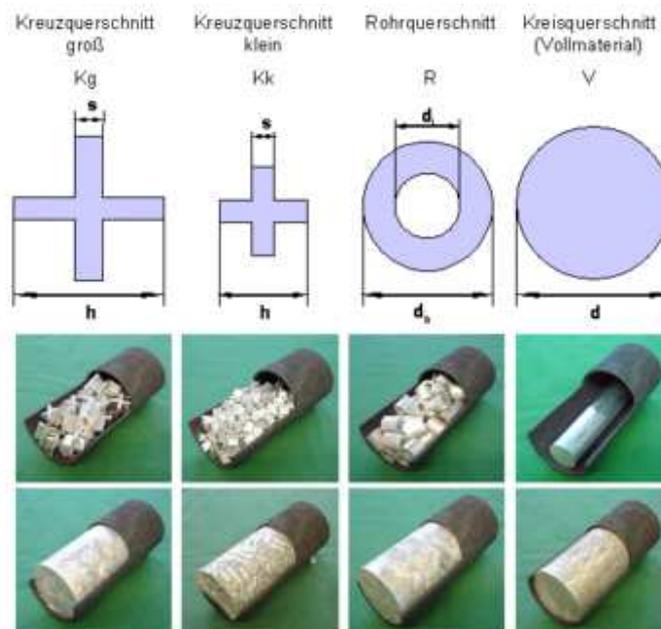


Bild 22: Mit verschiedenen PolyFoM[®]-Schüttgüter ausgefülltes und aufgeschäumtes Rohr, [iwu]

Ein anderes interessantes Verfahren ist das APM-Verfahren, das am Fraunhofer IFAM in Bremen entwickelt wurde. Das Schlüsselwort APM bedeutet Advanced Pore Morphology.

Die Grundidee des Verfahrens ist es, die Prozesskette einer konventionellen pulvermetallurgischen Herstellung in zwei separate Prozessschritte zu trennen und zwar in Schaumexpansion und Bauteilformgebung. Dies wird durch die Herstellung einer Vielzahl von kleinen kugelförmigen Metallschaumelementen ermöglicht (erster Prozessschritt), die in der anschließenden formgebenden Operation durch Fügeverfahren (z. B. Kleben, Lötten, Sintern) zu einem Bauteil verbunden werden. Nach diesem Prinzip können beispielsweise 3D-Schaumkörper, schaumgefüllte Hohlprofile oder auch APM-Sandwichstrukturen hergestellt werden (s. Bild 23).



Bild 23: APM-Technologie zur Herstellung von Schaumbauteilen, nach [ifam, NNif05]

Prinzipiell sind alle erwähnten Verfahren zur Herstellung von Aluminiumschäumen geeignet. In Bezug auf den industriellen Einsatz stellt man jedoch fest, dass weit nicht alle eine serienmäßige Produktion von Aluminiumschäumen ermöglichen. Viele Verfahren haben noch technische Probleme wie z. B. geringe Reproduzierbarkeit und daraus resultierende ungenügende Wirtschaftlichkeit, so dass ihr industrieller Einsatz noch weit in der Zukunft liegt.

3.4.4 Schichtverbunde mit Aluminiumschaumkern

Dieses Kapitel gibt den Stand der Technik zu Produkten bzw. Werkstoffen an, die unmittelbar mit dem Thema der vorliegenden Arbeit verbunden sind. Diese Werkstoffe sind Schichtverbunde mit Aluminiumschaumkern. Sie gehören zu Kernschicht- bzw. Sandwichverbunden, die im Kapitel 3.3.5 mit dem Schlagwort Sandwichbauweise bereits erwähnt wurden.

Der Vorteil eines Sandwiches ist, dass sich das Trägheitsmoment des Bauteils und damit seine Biegesteifigkeit durch Erzeugung des Abstandes zwischen den beiden Deckschichten durch die leichte Kernschicht bedeutend erhöhen. Die offensichtliche Attraktivität von Sandwichstrukturen ist, dass sich eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit ohne wesentlichen Gewichtsanstieg erreichen lässt.

Ein Sandwichverbund ist, wie bereits oben erwähnt, auch durch die Verwendung von Aluminiumschaum herstellbar. Dabei findet der Aluminiumschaum den Einsatz als Material für die leichte Kernschicht eines Sandwiches (Bild 24).

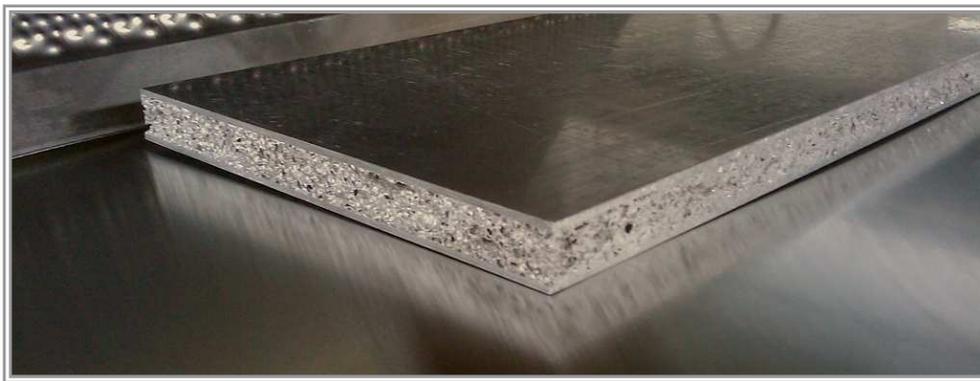


Bild 24: Aufbau des Aluminiumschaumsandwiches

Die Aluminiumschaumsandwiche lassen sich im Allgemeinen in Sandwiches mit einer metallischen und nicht metallischen Verbindung zwischen Kernlage und Deckschichten unterscheiden. Dabei werden sie durch prinzipiell unterschiedliche Verfahren und Methoden hergestellt, die im Folgenden erläutert werden.

Herstellungsverfahren

Eine relativ einfache Methode zur Fertigung von Sandwichstrukturen mit Aluminiumschaumkern ist das Fügen vorgefertigter Aluminiumschaumplatten mit den jeweils gewünschten Deckschichtmaterialien. Die Aluminiumschaumplatten können dabei sowohl durch schmelzmetallurgische als auch durch pulvermetallurgische Verfahren hergestellt werden. Die Verwendung von sowohl geschlossenenporigen als auch offenporigen Schäumen ist ebenso möglich. Die Verbindung der Kernschicht mit Decklagen kann z. B. durch Kleben, Lötten oder Laserstrahlschweißen erfolgen [SSK+97, KBH94, BBe97, NNh94], so dass der Einsatz von nahezu allen Werkstoffen und Dicken denkbar ist. Somit ergeben sich nahezu alle möglichen Werkstoffkombinationen von Aluminiumschaumkernen mit den Decklagen [Bur00, NNs97, NNw]. Ein Nachteil dieser Verfahrensvariante ist jedoch die Beschränkung der Bauteile auf ebene Strukturen. Die Herstellung dreidimensionaler Bauteile wurde bisher nicht realisiert [Hah05]. Weiterhin zeigen beispielsweise geklebte Strukturen nur eine geringe Wärmebeständigkeit und eine begrenzte Lebensdauer. Die Lötverbindungen erfordern eine hohe Maßgenauigkeit und eine aufwändige Vorbehandlung aufgrund der vorhandenen Aluminiumoxidschichten.

Die Idee einer anderen Methode zur Herstellung von Schichtverbunden mit Aluminiumschaumkern ist das Anschäumen der Deckbleche an den Kern. Die Verbindung der Deckbleche mit dem Schaumkern erfolgt dabei durch Diffusionsprozesse während des Aufschäumprozesses. Es entsteht eine metallische Verbindung. Als Decklagen können hier auch strukturierte oder Wellbleche verwendet werden. Die Biegesteifigkeit wird dadurch weiter erhöht.

Hinsichtlich der Werkstoffauswahl ist dieses Verfahren aufgrund der Verbindung im Aufschäumprozess nur auf die metallischen Deckschichten beschränkt, wobei beim Einsatz von Aluminiumblechen eine besondere Vorsicht bei der Legierungsauswahl besteht. Für die Decklagen sollen die höherschmelzenden Legierungen zur Anwendung kommen, während für die Kernlage die Legierungen mit einem niedrigeren Schmelzpunkt zu verwenden sind, um das Anschmelzen der Decklagen beim Aufschäumprozess zu vermeiden. Eine Alternative stellen die Decklagen aus Stahlblechen dar, die allerdings mit sich deutlich mehr Gewicht bringen [NNli01, Hei03].

Ein anderes Verfahren, in dem das Aluminiumschaumsandwich in einem Walzprozess hergestellt wird, wurde von der Firma Taron Technologies Inc. (Kanada) entwickelt und heißt nach Name der Firma Taron-Verfahren [HLP07, NNtar03].

Der Schwerpunkt des Verfahrens liegt in der direkten Herstellung von Aluminiumschaumsandwichen. Dazu wird das Pulverwalzen verwendet. Das Prinzip des Verfahrens zeigt das Bild 25.

Die Verdichtung des Pulvergemisches sowie die Verbindung mit Decklagen finden mittels Warmwalzen in herkömmlichen Walzanlagen statt. Das Verfahren ermöglicht dabei den Einsatz verschiedener Materialien wie z. B. Aluminium, Stahl oder Titan für die Decklagen. In einem weiteren Schritt erfolgt die Erwärmung des Verbundes auf die Schmelztemperatur der Kernlage, wodurch sie sich aufschäumt. So entsteht ein dreischichtiger Verbund mit Aluminiumschaumkern [HLP07].

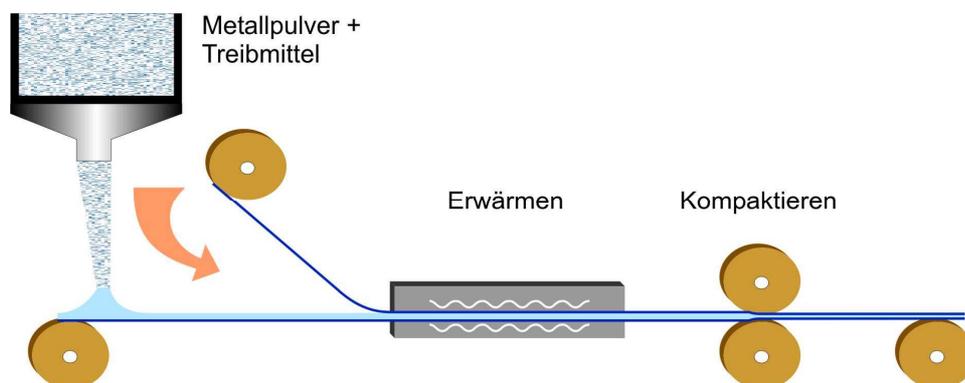


Bild 25: Pulverwalzen nach dem Taron-Verfahren. nach [NNtar03, HLP07]

Ein weiteres interessantes Verfahren zur Herstellung von Schichtverbunden mit Aluminiumschaumkern durch den Walzplattierprozess wurde vom Fraunhofer Institut für Ange-

wandte Materialforschung in Bremen in enger Zusammenarbeit mit der Wilhelm Karmann GmbH in Osnabrück und der Entwicklungsgesellschaft Schunk-Honsel in Gießen und Meschede entwickelt. Das Halbzeug für ein sog. Aluminium Foam Sandwich (AFS) ist ein dreischichtiger metallischer Verbund, der durch Walzplattieren vom bereits verdichteten Aluminiumpulver mit Aluminiumdeckblechen hergestellt wird. Das Prinzip des Verfahrens ist im Bild 26 dargestellt.

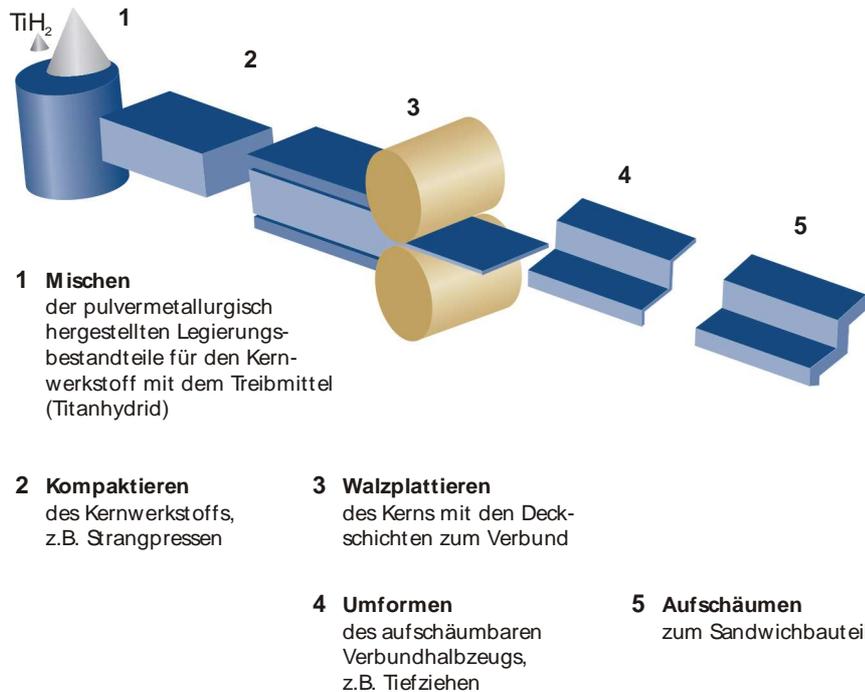


Bild 26: Prozessschritte bei der Herstellung von Aluminiumschaumsandwich

Ähnlich wie beim konventionellen pulvermetallurgischen Herstellungsverfahren wird zur Herstellung des Halbzeugs ein Pulvergemisch verwendet. In einem separaten Schritt entsteht durch Kompaktieren des Pulvers ein fester Kern für das zukünftige Sandwichblech. Dazu wird im Gegensatz zum Pulverwalzen nach dem Taron-Verfahren das Strangpressen verwendet [HLP07].

In einem weiteren Schritt wird der aufschäumbare Kern mit Decklagen walzplattiert und somit auf die gewünschte Dicke ausgewalzt. So entsteht ein Halbzeug für das Aluminiumschaumsandwich, der aus zwei metallischen Decklagen und einer aufschäumbaren Kernlage besteht. Die Decklagen des Sandwiches sind dabei konventionelle Aluminiumbleche verschiedener Legierungen. Alle drei Schichten sind nach dem Walzplattierprozess miteinander kaltverschweißt und ermöglichen somit eine optimale metallische Verbindung. Das Sandwich kann in dieser Form mit konventionellen Fertigungsverfahren wie z.B. Schneiden, Biegen oder Tiefziehen verarbeitet werden.

Um die oben erwähnten Vorteile des Metallschaums im Verbund realisieren zu können, muss die Kernlage aufgeschäumt werden. Dies erfolgt durch Erwärmung des Verbundes

auf eine Aufschäumtemperatur nah der Schmelztemperatur der Kernlage, bei der das Treibmittel Gase freisetzt und die bei dieser Temperatur teigige Schicht zwischen den Aluminiumblechen aufgeschäumt wird. Wichtig ist dabei, dass die Aufschäumtemperatur unter der Schmelztemperatur der Decklagen liegen soll, damit kein Aufschmelzen der Decklagen auftritt. Daher müssen die Legierungen für die einzelnen Schichten des Sandwiches unter Berücksichtigung ihrer Schmelztemperatur ausgewählt werden [See07].

Nach dem Aufschäumen entsteht ein Aluminiumschaumsandwich, das aus zwei Aluminiumdeckblechen und einer Kernlage aus Schaum besteht. Den Aufbau des Sandwiches vor und nach dem Aufschäumen stellt Bild 27 dar.

Das Verfahren wird heute vor allem von der Alulight® AFS GmbH (chem. alm GmbH) verfolgt und weiterentwickelt.

Die Möglichkeit, das Sandwich in dem unaufgeschäumten Zustand umzuformen, stellt einen großen Vorteil dar und eröffnet den Einsatz dieses Werkstoffs für die zwei- bzw. dreidimensionale Bauteile, was bei geklebten Aluminiumschaumsandwichen oder Sandwichen mit anderen Strukturschichten wie z.B. Honeycomb-Kern nicht der Fall ist. Der Einsatz solcher Sandwiches ist daher insbesondere im Fahrzeugbau von großer Bedeutung [See09].

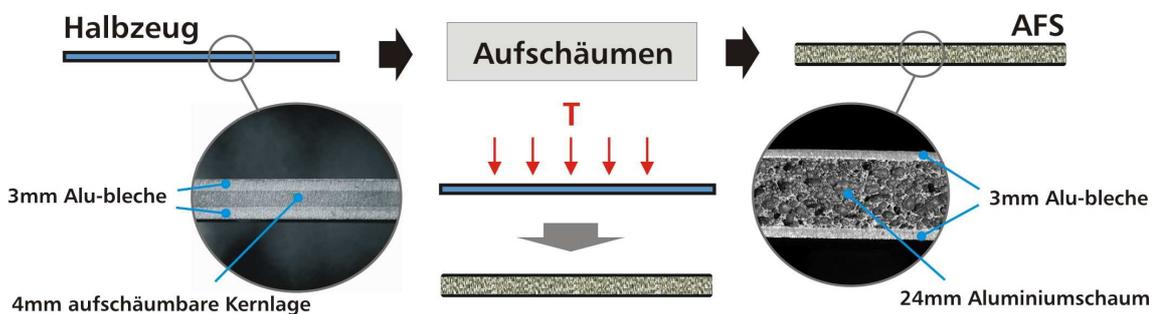


Bild 27: Aufbau des Aluminiumschaumsandwiches vor und nach dem Aufschäumen

In Bezug auf Verbindungsmöglichkeiten können die aufgeschäumten Sandwiches mittels gängiger Verfahren wie z. B. MIG- oder WIG-Schweißen, Schrauben und Kleben miteinander oder mit anderen Bauteilen gefügt werden.

Ein weiterer Vorteil von walzplattierten Sandwichen gegenüber oben erwähnten geklebten Sandwichen ist ihre bessere Recyclierbarkeit, da ihre Herstellung ausschließlich unter Verwendung von Aluminium oder Aluminiumlegierungen erfolgt.

Die beschriebenen Vorteile sowie gute Verarbeitungsmöglichkeiten von AFS sind ohne Zweifel ein gutes Argument für den erfolgreichen Einsatz dieses Werkstoffs in modernen Bauteilen. Obwohl im Allgemeinen gesagt wird, dass sich das AFS in einem unaufgeschäumten Zustand ähnlich wie ein konventionelles Aluminiumblech umformen lässt, gibt

es jedoch auch technologische Grenzen, die bei der Auslegung und Konstruktion von dreidimensionalen Bauteilen berücksichtigt werden müssen.

So wird im [See09] erwähnt, dass bei der Auswahl der Anwendungsgebiete für AFS-Bauteile die nach dem Aufschäumen entstehenden Geometrieänderungen berücksichtigt werden müssen, da eine konstante Bauteildicke nur bei ebenen Platten erzielt werden kann. Anhand eines U-förmigen Bauteils lässt sich diese prozessbedingte Beschränkung sehr gut darstellen.

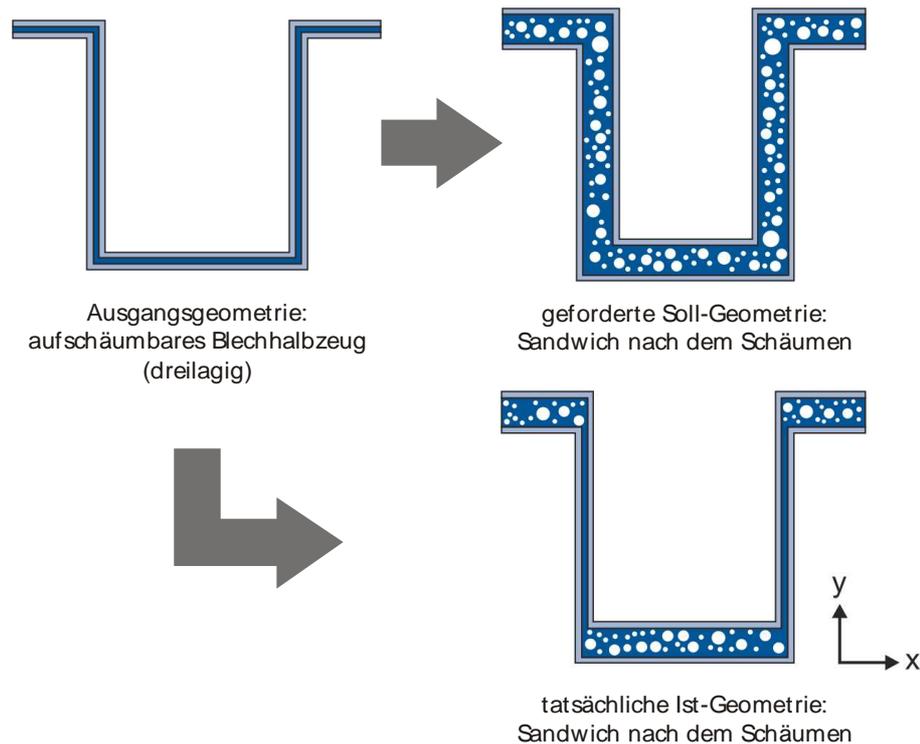


Bild 28: Geometriebeschränkungen bei Aluminiumschaumsandwich, nach [Hah05, See99]

Es ist deutlich zu sehen, dass die tatsächliche Geometrie des Bauteils nach dem Schäumen von der gewünschten Geometrie abweicht. Die Ursache liegt in den Decklagen, deren Form während des Aufschäumens unverändert bleibt. Der Abstand zwischen den Decklagen sollte sich jedoch überall durch Expansion des Schaums vergrößern. Im unteren Bereich stellt das kein Problem dar. Das Aufschäumen in den Seitenwänden wird jedoch durch das innere Blech verhindert, so dass ein inhomogenes Bauteil entsteht. Daher sind solche U- bzw. napfförmige Geometrien zu vermeiden.

Der wirtschaftliche Aspekt ist ein weiteres Hindernis beim Einsatz von AFS. Die eingesetzte Pulvermetallurgie sowie das aufwändige Walzen von diesen Verbunden sind zurzeit immer noch kostenintensiv, was relativ hohe Preise des Materials zur Folge hat. Weiterhin erfordert der Aufschäumprozess einen zusätzlichen Fertigungsschritt, der in der industriellen Fertigung nicht vernachlässigbar ist.

Im Anschluss lässt sich zusammenfassen, dass Aluminiumschaum ein innovativer Leichtbauwerkstoff mit sehr guten Erfolgsaussichten ist. Es gibt bereits mehrere Anwendungsgebiete, wo dieser Werkstoff seinen Nutzen nachgewiesen hat. Das Aluminiumschaumsandwich ist ebenso ein sehr erfolgversprechender Werkstoff. Die Effizienz des Einsatzes hängt jedoch sehr stark von dem Kostenfaktor ab. Die Kostensenkung bei der Herstellung von Bauteilen aus AFS und somit die Effizienzsteigerung sind zum größten Teil durch Optimierung von Herstellungsverfahren aber auch durch Entwicklung von Weiterverarbeitungsverfahren und neuer Verarbeitungsstrategien möglich.

4 Entwicklung einer Prozesskette zur Bauteilherstellung

4.1 Versuchswerkstoffe

Diese Arbeit wurde im Rahmen der zwei nachfolgend genannten Projekte realisiert. Dabei wurden unterschiedliche AFS-Typen verwendet. Der Versuchswerkstoff für das Projekt „Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen“ erforderte eine in der Bahnindustrie verwendete Legierung, um Schweißverbindungen mit anderen Baugruppen ohne Weiteres zu gewährleisten. Im Projekt „Aluminiumschaumverbunde bei dynamischer Belastung – Entwicklung eines kompletten Seilrollenrahmens wurde bei der Auswahl des geeigneten Materials auf die Korrosionsbeständigkeit im Seeklima geachtet.

Mechanische Charakterisierung der Deckbleche

Aufgrund der Temperaturen, die beim Aufschäumvorgang des Sandwichverbundes auch auf die Deckblechwerkstoffe einwirken, ist eine mechanische Untersuchung der Bleche ohne und mit einer an den Aufschäumvorgang angelehnten „Wärmebehandlung“ erforderlich. Dazu wurden drei verschiedene Aluminiumlegierungen (6060, 5005 und 5083) bei den Temperaturen 580°C und 620°C und einer Dauer von 10 bis 15 Minuten ausgelagert. Die Glühversuche wurden in einem Kammerofen durchgeführt. Aus den wärmebehandelten Halbzeugen wurden Proben hergestellt und im Zugversuch getestet.

Im Bild 29 und Bild 30 ist exemplarisch die grundlegende Veränderung des σ - ϵ -Diagramms durch die Wärmebehandlung am Beispiel der Legierung 6060 dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die maximale Zugspannung der geglühten Proben wesentlich geringer ist, als die der unbehandelten Proben. Im Gegensatz zu den maximalen Werten der unbehandelten Proben von ca. 220 N/mm² betrug die maximale Zugspannung der geglühten Proben lediglich ca. 170 N/mm². Diese Veränderung muss bei der Dimensionierung der Sandwiche bzw. Decklagen für entsprechende Anwendung unbedingt berücksichtigt werden.

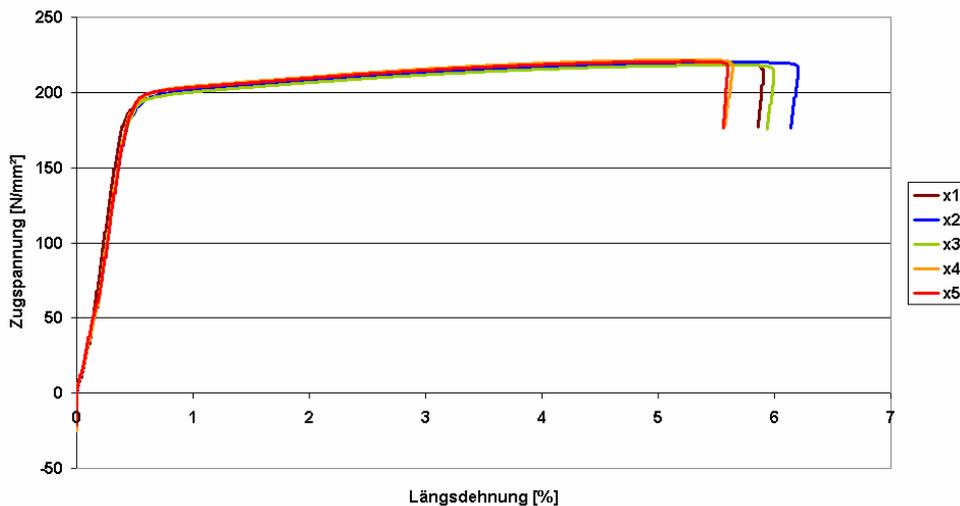


Bild 29: Universalzugversuch, ungeglühte Proben (Al6060)

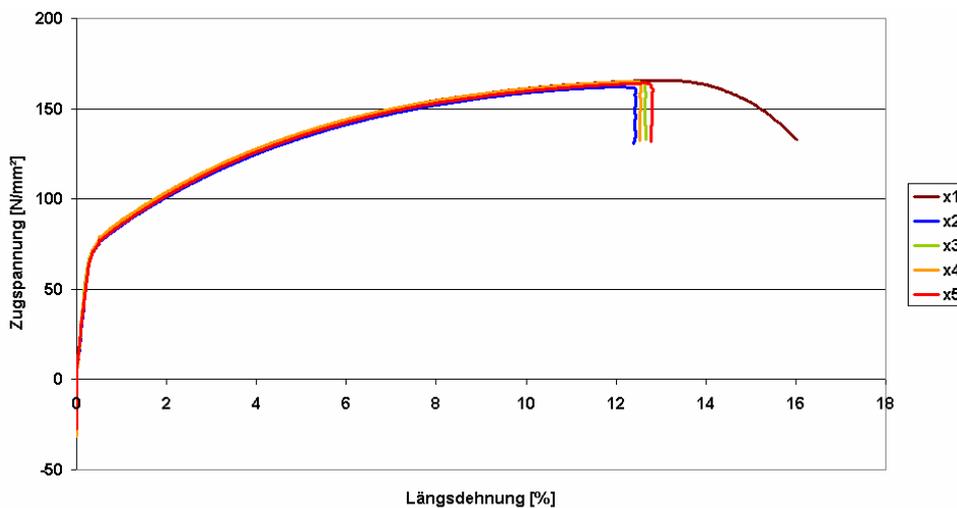


Bild 30: Universalzugversuch, bei 580°C geprüfte Proben (Al6060)

Die Aluminiumschaumsandwiches können nicht nur unter einer statischen bzw. quasi-statischen Belastung, sondern auch unter Dauerbelastung eingesetzt werden. Am Beispiel des Frontmoduls im Schienenfahrzeug tragen die Decklagen des auf Biegung belasteten Sandwichverbunds auch dynamische Zug- und/oder Drucklasten. Die während des Aufschäumprozesses einhergehende „Wärmebehandlung“ kann einen nicht unerheblichen Einfluss auch auf die Dauerfestigkeit haben. Deshalb war das Ziel einer weiteren Versuchsreihe die Analyse des Einflusses der Wärmebehandlung auf das dynamische Verhalten der Deckbleche.

Hierzu wurden Proben mit der Breite von 10 mm und einer Dicke von 3 mm aus Aluminiumblechen gefertigt. Eine Charge von 5 Proben erfuhr den gleichen Temperaturverlauf wie die aufgeschäumten Sandwichverbunde. Zum Vergleich erhielt eine Charge von 5 Proben keine Wärmebehandlung. Mit diesen Proben wurden Dauerfestigkeitsversuche durchgeführt. Die Prüffrequenz betrug 30 Hz. Die Grenzlastwechselzahl wurde mit 2×10^6 defi-

niert¹, wobei das Spannungsverhältnis $R=0.1$ und die Mittelspannung variabel angesetzt wurde.

Tabelle 3 stellt die Ergebnisse der Untersuchungen in einer Übersicht exemplarisch für die Aluminiumlegierung 5005 dar. Es zeigen sich deutliche Unterschiede im Dauerfestigkeitsverhalten zwischen dem unbehandelten und wärmebehandelten Werkstoff. Auch wenn diese Versuche nicht statistisch abgesichert sind, zeigt sich ein deutlicher Trend, der mit den quasi-statisch ermittelten Festigkeitswerten korreliert. Bild 31 zeigt exemplarisch die wärmebehandelten Proben nach der Dauerfestigkeitsprüfung.

Unbehandelte Proben

Zugfestigkeit 150 MPa

| Proben Nr. | σ_o MPa | Fu, kN | Fm, kN | Fo, kN | $\sigma_A \pm kN$ | Lastwechsel | Bruch |
|------------|----------------|--------|--------|--------|-------------------|-------------|-------|
| 1 | 110 | 0,33 | 1,82 | 3,30 | 1,49 | 2257654 | |
| 2 | 130 | 0,39 | 2,15 | 3,90 | 1,76 | 2100000 | |
| 3 | 140 | 0,42 | 2,31 | 4,20 | 1,89 | 974384 | X |
| 4 | 135 | 0,41 | 2,23 | 2,05 | 1,82 | 1176110 | X |
| 5 | 130 | 0,39 | 2,15 | 3,90 | 1,76 | 2273616 | |

Wärmebehandelte Proben

Zugfestigkeit 120 MPa

| Proben Nr. | σ_o MPa | Fu, kN | Fm, kN | Fo, kN | $\sigma_A \pm kN$ | Lastwechsel | Bruch |
|------------|----------------|--------|--------|--------|-------------------|-------------|-------|
| 1 | 50 | 0,15 | 0,83 | 1,50 | 0,68 | 2200000 | |
| 2 | 75 | 0,23 | 1,24 | 2,25 | 1,01 | 2550000 | |
| 3 | 87 | 0,26 | 1,44 | 2,61 | 1,17 | 2570000 | |
| 4 | 100 | 0,30 | 1,65 | 3,00 | 1,35 | 1446336 | X |
| 5 | 100 | 0,30 | 1,65 | 3,00 | 1,35 | 1468541 | X |

Tabelle 3: Ergebnisse der Dauerfestigkeitsversuche (Al5005)

¹ - Bei Kfz-Werkstoffen wie Aluminium geht man gemeinhin nicht von einer echten Dauerfestigkeitsgrenze (vgl. Stahl) aus. Daher werden in der einschlägigen Literatur meistens 10^7 Lastwechsel empfohlen. Die festgelegte Grenzlastwechselzahl von 2×10^6 war für diese Versuchsreihe ausreichend, um die grundlegende Änderungstendenz des Dauerfestigkeitsverhaltens festzustellen.



Bild 31: Wärmebehandelte Proben nach dem Dauerfestigkeitsversuch

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch die Wärmebehandlung, die während des Aufschäumens stattfindet, die Festigkeitswerte sowie das Dauerfestigkeitsverhalten der Decklagen signifikant verringert werden. Diese Verringerung ist bei der Konstruktion der Bauteile, Dimensionierung der Sandwichdecklagen sowie bei der anschließenden FEM-Berechnung der Bauteile unbedingt zu beachten.

4.2 Versuchsgeometrien

Im Rahmen der Untersuchungen zur Entwicklung einer Prozesskette wurden Versuchsbauteile mit unterschiedlichen Geometrien verwendet. Die Form und Komplexität der Bauteilformen war von den gestellten Zielen abhängig. Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, stand das Prinzip „von leichten und einfachen Formen zu den komplexen Bauteilen“ im Vordergrund. So wurden die meisten Vorversuche mit relativ kleinen Proben mit einfacher Geometrie durchgeführt. Danach wurden die Technologien mit weiteren komplexeren Bauteilen ausprobiert, deren Formen gezielt auf gestellte Ziele konzipiert wurden.

Da die meisten Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit im Rahmen von oben erwähnten Forschungsvorhaben durchgeführt wurden, bezogen sich die Bauteilgeometrien entsprechend auf das Frontmodul eines ITINO-Triebzuges sowie auf den Seilrollenrahmen eines Mobilkrans. Eine Übersicht der Versuchsgeometrien mit dazugehörigen Zielen und untersuchten Verfahren ist in der Tabelle 4 dargestellt.

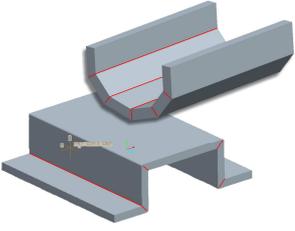
| Bauteil name | CAD-Modell | Ziele und untersuchte Fertigungsverfahren |
|---------------------------------|---|--|
| Sandwichrinne |  | <p>Ziele: Analyse des Werkstoffverhaltens beim Umformen, Ermittlung der Aufschäumparameter, Sammeln der Erfahrungen für die nächsten Bauteile</p> <p>Verfahren: 3D-Umformen mit massiven Werkzeugen, Aufschäumen in einem separaten Werkzeug</p> |
| Frontmodulsegment |  | <p>Ziele: technische und wirtschaftliche Verfahrensoptimierung, Übertragung auf größere Geometrien</p> <p>Verfahren: 3D-Umformen mit kostengünstigeren Werkzeugen und Anlagen, Aufschäumen im Umformwerkzeug ohne Aufschäumwerkzeuge</p> |
| Testgeometrien Gehrungsfügen |  | <p>Ziele: Entwicklung neuer Umform- und Fügeverfahren, Ermittlung der Verfahrensgrenzen</p> <p>Verfahren: Biegen, Gehrungsfügen, Schweißen</p> |

Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Versuchsgeometrien

Die Technologien zur Herstellung dieser Bauteile konzentrierten sich sowohl auf die technische als auch auf die wirtschaftliche Machbarkeit. Im Anschluss aller Untersuchungen konnte ein Demonstrator in Originalgröße hergestellt werden. Somit wurde auch die Machbarkeit realer Bauteile nachgewiesen. Alle Untersuchungen zur Herstellung des Demonstrators liefert Kapitel 5.

4.3 Entwicklung der Umformtechnologien

Das Umformen ist ein unentbehrliches Teil des Produktionsprozesses. Bei der Verwendung neuer Materialien ist sehr wichtig, verschiedenste Möglichkeiten zur Formgebung des Bauteils zu betrachten. Das Studium der möglichen Umformtechnologien zur Herstellung von Bauteilen aus Aluminiumschaumsandwichen hat gezeigt, dass in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie unterschiedliche Umformtechnologien zum Einsatz kommen können. Das Ziel der Untersuchungen war es, spezifische Technologien zu entwickeln und zu er-

proben. Analyse Kriterien sollten dabei nicht nur die technischen Aspekte, sondern auch die Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Verfahrens sein.

4.3.1 Niederhalterloses Tiefziehen des AFS-Rohlings

Das Tiefziehen ist das bedeutendste Fertigungsverfahren zur Herstellung von Blechwerkstücken mit dreidimensionaler Geometrie. DIN 8584 definiert dieses Verfahren folgendermaßen:

„Tiefziehen ist das Zugdruckumformen eines Blechzuschnittes (je nach Werkstoff auch einer Folie oder Platte, eines Ausschnittes oder Abschnittes) zu einem Hohlkörper oder eines Hohlkörpers zu einem Hohlkörper mit kleinerem Umfang ohne beabsichtigte Veränderung der Blechdicke.“

Da AFS zu den Blechwerkstoffen gehört, ist das Verfahren Tiefziehen beim Umformen dieses Werkstoffs von Bedeutung. Die üblichen Bauteile aus Aluminiumschaumsandwich sind jedoch keine Hohlkörper, da es aufgrund der spezifischen Eigenschaften bzw. der technologischen Einschränkungen beim Aufschäumen kaum möglich ist, aus Aluminiumschaumsandwich einen Hohlkörper mit einer konstanten Schaumdicke herzustellen. Die napfförmigen und U-ähnlichen Geometrien aus dem Aluminiumschaumsandwich sind in der Regel ohne Einsatz der Fügeverfahren auch nicht herstellbar. (s. auch Bild 28). Das „Ziehen unregelmäßiger Blechteile“ umfasst die Herstellung der unterschiedlichsten Formen von Zichteilen, wobei allen Teilen gemeinsam ist, dass das Umformen eine Kombination von Tiefziehen, Streckziehen und Biegen darstellt [Lan90]. Daher wird bei der Herstellung von Bauteilen aus AFS in der Regel eine Kombination dieser Verfahren zur Anwendung kommen.

Beim Tiefziehen von Bauteilen aus dünnen Blechen ist der Einsatz eines Niederhalters erforderlich, um Faltenbildung zu vermeiden. Bei dickeren Blechen mit einer genügenden Knickstabilität – zu denen auch das untersuchte AFS mit einer Dicke von 10 mm gehört – kann auf einen Niederhalter verzichtet werden. So erfolgte das Umformen von AFS durch niederhalterloses Tiefziehen [Lan90].

Bei den Umformuntersuchungen wurde auf folgende Aspekte geachtet:

- Umformverhalten der Aluminiumschaumsandwiche
- Rückfederung
- Optimale Umformtemperaturen
- Ablösung der Sandwichschichten beim Umformen.

Wie oben erwähnt, wurden die Untersuchungen zunächst mit einem relativ kleinen und einfachen Versuchsbauteil begonnen. Das Bauteil sollte möglichst komplex sein, um aussagekräftige Ergebnisse über die Herstellung von umgeformten Bauteilen aus AFS bereits bei den ersten Versuchen erzielen zu können.

Die Untersuchungen hat das Projekt „Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen“ ermöglicht, da die Bauteile des Frontmoduls eine komplexe dreidimensionale Geometrie aufweisen. Nach der Analyse des Frontmoduls bezüglich der Geometrie sowie den fertigungsspezifischen Eigenschaften wurden zwei Bauteile konzipiert.

Als erste geeignete Testgeometrie hat sich ein dreidimensional gekrümmtes Bauteil „Sandwichrinne“ erwiesen. Es hat zwar relativ kleine Abmessungen, bildet aber eine in drei Richtungen gebogene Schale mit hohen Anforderungen an die Umformbarkeit (s. Bild 32).

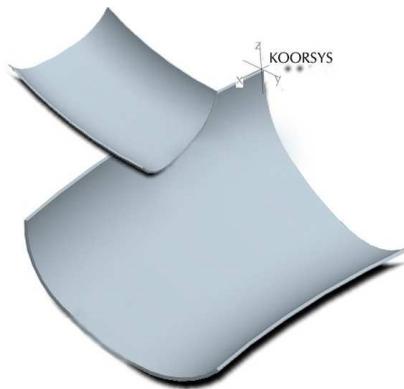


Bild 32: Testgeometrie „Sandwichrinne“ (BxHxT: ca. 250x150x300 mm)

Die in dem Bauteil vorhandenen Umformgrade und Radien sind im Vergleich zum Frontmodul sogar überdimensioniert.

Die zweite Geometrie ist ein Frontmodulsegment. Das Bauteil ist auf dem Bild 33 zu sehen. Es stammt aus einem Bereich des Frontmoduls mit höchsten Anforderungen an die Umformbarkeit. Dieser Bereich (A-Säule) hat eine dreidimensionale Krümmung und erfüllt damit alle Kriterien zur Herstellung des ganzen Frontmoduls. Das Frontmodulsegment ist ein Prototyp im Maßstab 1:5 zur Realgröße. Der kleinere Maßstab erhöht zum einen die Umformanforderung durch kleine Radien, zum anderen werden die Menge des Sandwichmaterials für Versuche sowie die Kosten für die Herstellung der Werkzeuge minimiert.

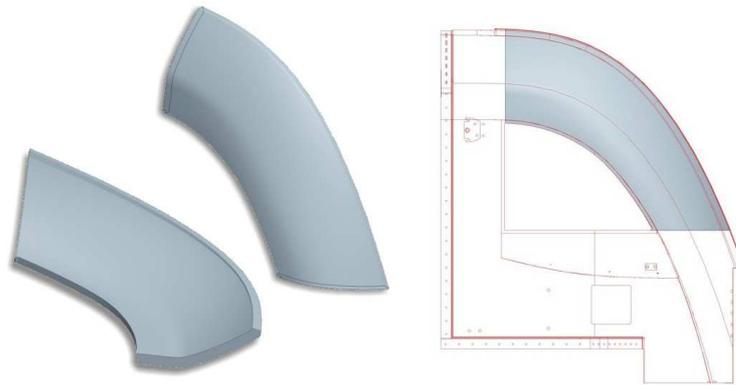


Bild 33: Prototyp „Frontmodulesegment“ (BxHxT: ca. 700x150x300 mm)

Umformversuche: Sandwichrinne

Die Versuchsreihen mit der Sandwichrinne wurden mit konventionellen, aus dem Vollen gefrästen Werkzeugen (Stempel und Matrize) durchgeführt. Ein klarer Vorteil dieser Werkzeuge ist die Freiheit in der Gestaltung des herzustellenden Bauteils. Die Grenze bezüglich der Bauteilform stellt das Material dar und nicht die Technologie bzw. die Werkzeuge. Eine solche Vorgehensweise mit massiven Werkzeugen ist zwar technisch sehr gut realisierbar, erfordert aber einen großen Aufwand bei der Herstellung von Werkzeugen. Das Umformwerkzeug zur Herstellung von Sandwichrinne ist im Bild 34 zu sehen.



Bild 34: Umformwerkzeug zur Herstellung der Sandwichrinne

Das Werkzeug besteht aus einer Matrize, einem Stempel, Führungssäulen und einer Einlegeschaablone zur genauen Positionierung der umzuformenden Sandwiche. Die Werkzeugkomponenten sind also konventionelle Werkzeuge eines Tiefziehwerkzeugs. Die Aufgabe des Niederhalters beim Tiefziehen – Vermeidung der Falten – wird hier nicht gebraucht, da für diese Geometrie und einer Blechstärke von 10 mm keine Gefahr der Faltenbildung besteht. Aus diesem Grund konnte auf den Einsatz des Niederhalters verzichtet werden. Die maßgenau ausgeschnittene Platine wird in die Matrize komplett eingezogen. Ein solcher Umformprozess stellt aber höhere Anforderungen an die Prozessführung. Das bedeu-

tet, dass neben der Ausgangsposition des Bleches auch das ganze Umformverhalten während des Umformprozesses genau definiert werden muss, da die beim Umformen entstehenden Kräfte nicht beeinflusst werden können. Während des Umformvorganges besteht Verschiebungsgefahr, welche zum fehlerhaften Umformen führen kann.

Um eine optimale Positionierung der Platine vor dem Umformen zu gewährleisten, wurde die FEM-Simulation des Umformprozesses durchgeführt. Durch diese Simulation sollte das Verhalten des Sandwichbleches beim Umformen analysiert und die richtige Ausgangsposition des Sandwichbleches in der Matrize bestimmt werden. Die Berechnung erfolgte mittels Simulationssoftware MSC Marc/Mentat 2005. Aufgrund der Dicke des Sandwiches von 10 mm wurde die Simulation mit Volumenelementen ausgeführt. Das Aluminiumsandwich aus drei Schichten – 3 mm obere Decklage, 4 mm Zwischenschicht und 3 mm untere Decklage – wurde vereinfachend als 10 mm Aluminiumblech simuliert. Aufgrund der gleichen Oberfläche und entsprechend gleichen Reibungsbedingungen ist das Umformverhalten des Verbundes ähnlich wie bei einem konventionellen Aluminiumblech. Bei der Simulation wurden die Materialkennwerte für die Aluminiumlegierung 6201 im gewalzten Zustand aus der Datenbank des Simulationstools entnommen. Diese Legierung ist aus der gleichen Legierungsgruppe (Al-Mg-Si-Legierung) wie die Decklagen des Sandwichs, so dass keine große Abweichung bei der Simulation zu erwarten ist.

Das Model zur Berechnung des Umformverhaltens sieht man im Bild 35.

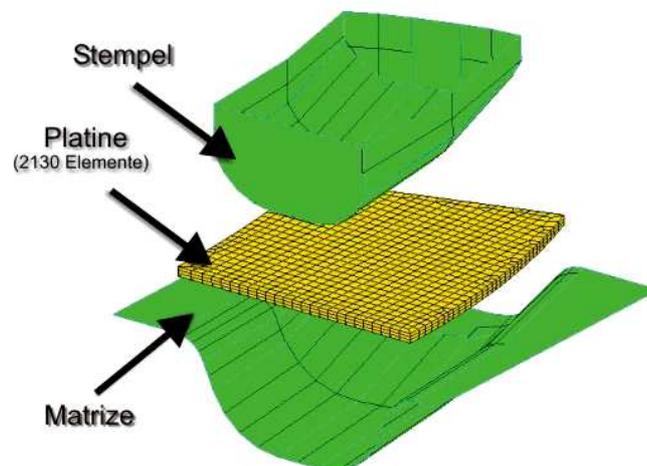


Bild 35: Simulationsmodell für Sandwichrinne

Mittels FEM-Simulation wurde der Umformvorgang simuliert und eine optimale Position der Platine vor dem Umformen ermittelt. Die Simulationsparameter wurden dann in den realen Versuchen umgesetzt. Die Versuchsergebnisse haben das berechnete Materialverhalten bestätigt. Bild 36 zeigt eine sehr genaue Übereinstimmung des Simulationsergebnisses mit dem umgeformten Bauteil.

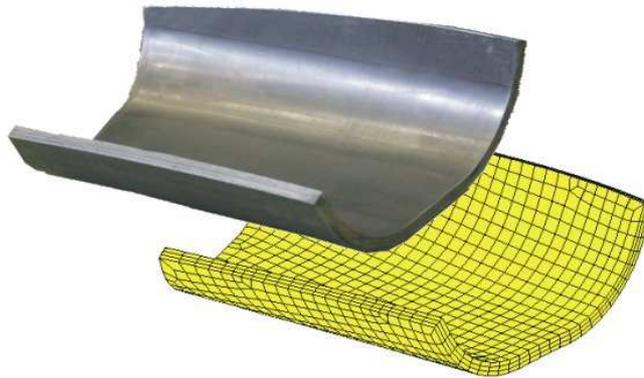


Bild 36: Vergleich des Modells aus der Simulation mit dem umgeformten Bauteil

Während der Versuche mit Sandwichverbunden wurde auf das Ablösen der Decklagen von der Kernschicht besonders geachtet. Die Ergebnisse lieferten entgegen einiger Zweifel ein einwandfreies Umformen des Sandwiches ohne Ablösen der Decklagen von der Kernschicht. Dies weist auf eine sehr gute metallische Verbindung der Sandwichschichten hin, die während der Herstellung der Sandwiches beim Walzplattieren entsteht.

Um die Unterschiede zwischen dem Umformen eines konventionellen Aluminiumbleches und eines Aluminiumschaumsandwichs im Versuch gegenüberstellen zu können, wurden weitere Umformversuche mit Aluminiumblechen durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Umformverhalten vom Sandwich identisch dem konventionellen Aluminiumblech war.

Weiterhin wurde das Verhalten des Sandwiches auf die Neigung zur Rückfederung analysiert. Trotz einer relativ großen Stärke der Sandwiches von 10 mm war eindeutig eine Rückfederung zu verzeichnen. Es ist also sinnvoll, bei der Konzeption des Umformprozesses auch bei starken Sandwiches auf die Rückfederung zu achten.

Die erwähnte Rückfederung wurde in den Umformversuchen bei Raumtemperatur festgestellt. Um diesem Effekt entgegenwirken zu können, wurden die Sandwiches in weiteren Versuchsreihen vor dem Umformen erwärmt. Ein positiver Nebeneffekt war die Verringerung der Umformkraft durch die mit steigender Temperatur abnehmende Festigkeit. Aufgrund einer deutlichen Festigkeitsabnahme bei ca. 450 °C, wurde bei weiteren Versuchen diese Umformtemperatur ausgewählt.

Die Sandwiches wurden vor dem Umformen auf 450 °C aufgeheizt, ins Umformwerkzeug eingelegt und anschließend dort umgeformt. Die Erwärmung des Werkzeuges war dabei nicht erforderlich. Das Bild 37 zeigt das fehlerfrei umgeformte Aluminiumschaumsandwich.



Bild 37: Das umgeformte Bauteil „Sandwichrinne“

Umformversuche: Frontmodulesegment

Das Ziel der Untersuchungen mit dem Frontmodulesegment war die Optimierung der Werkzeuge in Bezug auf die Handhabung und kostengünstigere Herstellung. Weitere Schwerpunkte dieser Versuchsreihe waren die Verwendung der Umformwerkzeuge als Aufschäumeinrichtung und damit eine weitere Kostensenkung des Fertigungsprozesses.

Entsprechend der Anforderung, die 3D-Formteile in einem wirtschaftlichen Prozess herzustellen, wurde die Möglichkeit einer 3D-Umformung ohne kostenintensive Umformpresse und gefräste Werkzeuge entwickelt. Die dreidimensionalen Werkzeugteile wurden dabei nicht durch aufwändiges 5-Achsen-Fräsen aus dem Vollen (s. Werkzeuge mit Sandwichrinne), sondern durch kostengünstigeres 3D-Biegen hergestellt. Der Partner für diese 3D-Umformung war die Firma Ostseestahl GmbH Stralsund mit Referenzen für den Schiffbau sowie für den Flugzeugbau z. B. für die Flügel des A380.

Das Verfahren beruht auf dem Pressen. Dabei wird das Blech mit einem Stempel in die Matrize gedrückt. Die Matrizen sind unterschiedlich, haben aber in der Regel eine einfache Form. Durch Drehen des Bleches und nacheinander erfolgten Druckschritten wird dem Blech eine gezielte Form gegeben. Mit einer Messschablone wird das Bauteil geprüft und ggf. nachkalibriert. Somit ermöglicht das Verfahren das Umformen der Bleche ohne formbezogene Werkzeuge. Das Verfahren ist allerdings ausschließlich für dicke Bleche anwendbar.



Bild 38: 3D-Biegen zur Herstellung von Werkzeugen

Durch dieses Verfahren wurden Teile für das Umformwerkzeug des Frontmodulesegments hergestellt. Das Material war dabei kein voller Metallblock sondern ein 10 mm starkes Stahlblech. Dadurch wurden die Kosten für die Fertigung von Umformwerkzeugen wesentlich gesenkt. Die Nutzoberflächen des Stempels und der Matrize wurden anschließend mit einer 3-Achsen-Fräsmaschine fein bearbeitet, um die fertigungsbedingten Abdrücke vom Biegestempel von der Oberfläche zu entfernen. Diese Operation kann jedoch bei der Herstellung größerer Bauteile entfallen. Das Umformwerkzeug ist im Bild 39 zu sehen.

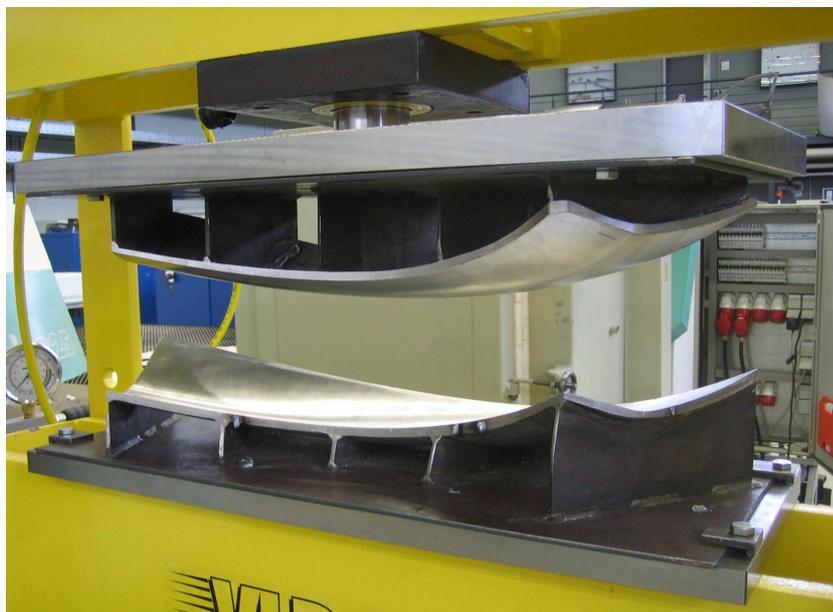


Bild 39: Das Umformwerkzeug aus 10 mm Stahlblech

Das Werkzeug besteht aus zwei Grundplatten, auf denen jeweils das obere und das untere Werkzeug mittels Versteifungsstegen aufgeschweißt sind.

Die Herstellung von Werkzeugen aus 10 mm Stahlblech ist kostengünstiger als die konventionelle Technologie und bietet nachfolgend aufgeführte Vorteile beim Aufschäumprozess. Bei der konventionellen Technologie soll für den Aufschäumprozess ein separates Auf-

schäumwerkzeug gefertigt werden. Im Gegensatz dazu lässt sich das Umformwerkzeug aus Stahlblech gleichzeitig als Aufschäumwerkzeug verwenden. Die Fertigung einer separaten Aufschäumvorrichtung kann dabei entfallen.

Eine weitere Optimierung bestand im Ersatz der Umformmaschine - der Presse. Die Umformkräfte bei einer Temperatur von 450°C sind deutlich geringer als bei der Kaltumformung. Der Umformprozess konnte dadurch ohne eine kostenintensive Presse erfolgen. Zum Umformen wurde eine 50 t-Druckvorrichtung eingesetzt, deren Beschaffungskosten im Vergleich zu einer Presse wesentlich geringer sind. Außerdem ist sie transportabel und kann ohne großen Aufwand an unterschiedlichen Orten installiert werden. Im Bild 40 ist die Druckvorrichtung mit dem eingebauten Umformwerkzeug dargestellt.



Bild 40: Transportable 50t-Druckvorrichtung mit dem eingebauten Umformwerkzeug

Der Umformprozess erfolgte ähnlich wie beim Bauteil „Sandwichrinne“. Nach dem Erwärmen wurde das Sandwich in das kalte Umformwerkzeug gelegt und anschließend umgeformt. Zum Positionieren des Sandwiches beim Einlegen ins Werkzeug wurden Begrenzungselemente verwendet. Sie wurden rund um das Werkzeug aufgeschweißt, so dass die genaue Führung und Position des Bauteils während der Umformung gewährleistet werden kann.

Die Frontmodulsegmente wurden nach diesem Prinzip fehlerfrei umgeformt. Ein umgeformtes Sandwich ist im Bild 41 zu sehen.



Bild 41: Ein umgeformtes Frontmodulesegment

4.3.2 Abkanten / Freibiegen des AFS-Rohlings

Eine weitere Technologie – das Abkanten oder Freibiegen - ermöglicht ebenso das erfolgreiche Umformen von Aluminiumschaumsandwichen. Allerdings sind die herzustellenden Bauteile bzw. Bauteilformen begrenzt, da es die Umformung in einem Schritt auf zwei Dimensionen begrenzt ist. Eine komplexe dreidimensionale Bauteilform, ähnlich zu den Bauteilen „Sandwichrinne“ oder „Frontmodulesegment“, ist daher mit diesem Verfahren nicht realisierbar. Das Verfahren ist aber sehr gut für relativ einfache, meistens zweidimensionale Geometrien geeignet und hat für solche Bauteile mehrere Vorteile.

Ein eindeutiger Vorteil dieser Technologie ist ein kostengünstigeres und nicht formgebundenes Werkzeug. Die erforderliche Umformkraft zum Biegen von Blechen ist deutlich geringer und erfordert keine teureren Maschinen. Zum Umformen genügt eine konventionelle Abkantbank. In Abhängigkeit von der Bauteilgröße sowie Stärke des Sandwiches können hand, mechanisch oder hydraulisch angetriebene Maschinen verwendet werden.

4.3.3 Umformen eines aufgeschäumten Sandwiches

Eine Möglichkeit, die Prozesskette bei der Herstellung von Bauteilen aus AFS zu verkürzen, ist das Umformen eines aufgeschäumten Sandwiches.

Die Probleme des Umformens von aufgeschäumten Sandwichen ergeben sich aus der Dicke der Schaumschicht, in der die auftretenden Scherspannungen beim Umformen zum Versagen des Schaums führen. Inwieweit das Umformen des Sandwiches möglich ist, hängt entsprechend stark von der Dicke der Kernschicht ab. Weiterhin beeinflusst die Umformtemperatur die Umformeigenschaften.

Das Ziel der Untersuchungen war daher die Ermittlung des Umformvermögens der aufgeschäumten Sandwiche mit einer Gesamtdicke von 30 mm (3 mm Decklagen).

Für die Versuche wurde ein in die Druckvorrichtung (s. Kapitel 4.3.1) eingebautes Biege-
werkzeug verwendet. Das Werkzeug ist im Bild 42 dargestellt. Es besteht aus einem Nie-
derhalter, einer Biegeplatte mit Biegekante und einem Stempel. Zur Erwärmung der Sand-
wiche wurden zwei Infrarotstrahler mit einer Leistung von 500 Watt je Strahler verwendet.

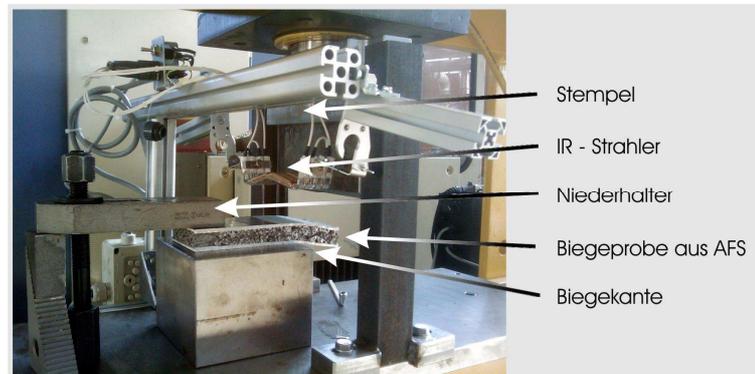


Bild 42: Biegewerkzeug

Die Biegeversuche wurden an AFS-Proben mit Abmessungen 200x70x30 mm und
150x50x12,5 mm durchgeführt.

Die Versuche bei Raumtemperatur haben gezeigt, dass das Umformvermögen von aufge-
schäumten Sandwichen sehr begrenzt ist. Bei Proben mit einer Dicke von 30 mm kam es
nach einem Biegewinkel von ca. 7° aufgrund der Scherspannungen im Kern zum Versagen
vom Schaum.

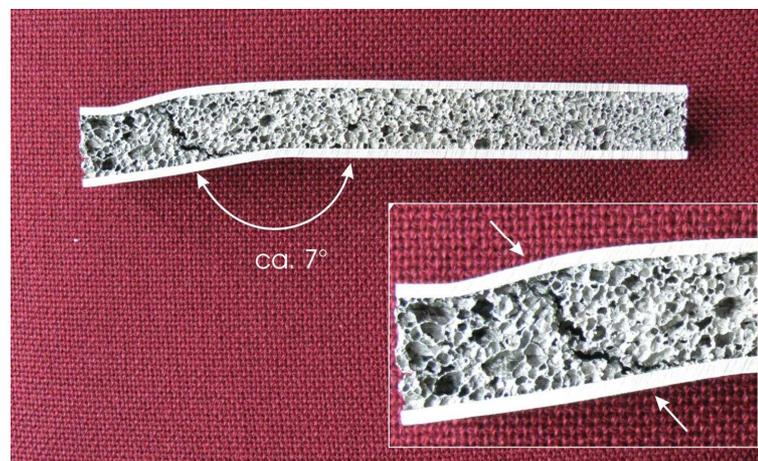


Bild 43: Riss beim Biegen des Aluminiumschaumsandwiches

Die Erwärmung der Sandwiches auf höhere Temperaturen brachte auch kein erfolgreiches
Ergebnis. Das Umformverhalten des Sandwiches bei einer Temperatur von ca. 450°C war
vergleichbar zum Umformen bei Raumtemperatur. Eine weitere Erhöhung der Temperatur
bis auf ca. 600°C hat dazu geführt, dass der Schaum eine so geringe Festigkeit hatte, dass er
zusammengestaucht wurde.

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Umformen von aufgeschäumten Sandwichen vergleichbarer Dicke nur in einem sehr begrenzten Umfang möglich ist. Das Verfahren ist daher zur Herstellung von Bauteilen selbst mit einem kleinen Biegeradius - auch bei Erwärmung - kaum geeignet. Die Vorversuche haben kein befriedigendes Ergebnis gebracht, so dass diese Technologie nicht weiterverfolgt wurde.

4.3.4 Gehrungsfügen von aufgeschäumten AFS

Wie im Kapitel 4.3.3 beschrieben, ist beim Biegen von aufgeschäumten AFS das Versagen der Schaumschicht durch entstehende Scherspannungen nicht zu vermeiden. Eine Möglichkeit, diese Sandwiche nach der Aufschäumoperation umzuformen, bietet das in diesem Kapitel beschriebene Verfahren an.

Das Gehrungsfügen stellt eine Kombination des Umformens, Spannens und Fügens dar. Das zu biegende AFS wird vor dem Umformen spannend bearbeitet. Dabei wird quer zur Sandwichoberfläche ein Gehrungsschnitt verlegt und das Material (das obere Blech und die Schaumschicht) bis zur unteren Decklage entfernt. Im nächsten Fertigungsschritt wird das Sandwich gebogen, so dass die Ränder des oberen Bleches die Schnittöffnung schließen. Der letzte Schritt in der Fertigung ist das Zusammenschweißen des oberen Deckbleches (Bild 44). Das untere Blech bleibt während des ganzen Prozesses unbeschädigt.

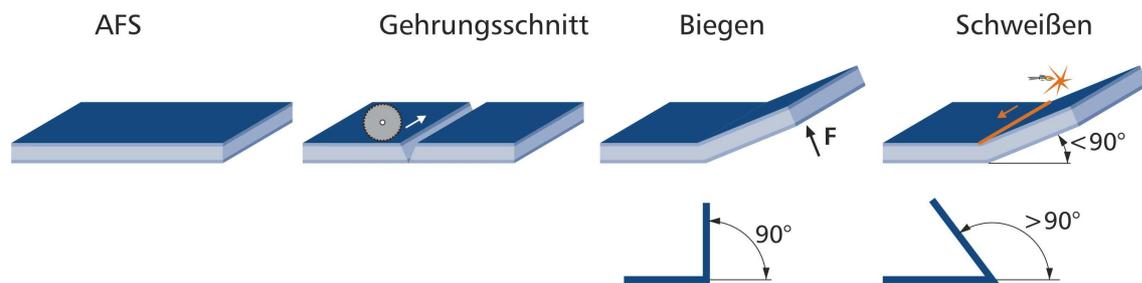


Bild 44: Prinzip des Gehrungsfügens

Durch eine Winkelvariation des Gehrungsschnittes kann ein beliebiger Winkel des Sandwichs (auch über 90°) eingestellt werden. Dabei bleibt die Dicke des Sandwiches im Gegensatz zur konventionellen Herstellung von umgeformten Bauteilen aus AFS über das ganze Bauteil konstant. Die Maßgenauigkeit lässt sich besser einhalten und kann nicht vom Aufschäumprozess beeinträchtigt werden, da das Aufschäumen vor der Umformoperation stattfindet.

Weiterhin ist es möglich, an einem Bauteil mehrere Abkantungen vorzunehmen, wobei die Schnitte auch beidseitig angelegt werden können. Dies ermöglicht die Herstellung einer beliebigen, auch gerundeten Form. Die Schnittanordnung für ausgewählte Geometrien ist im Bild 45 dargestellt.

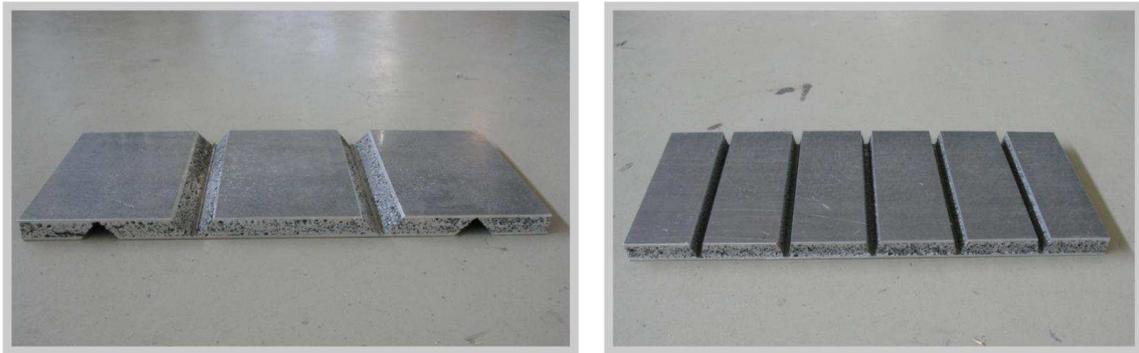


Bild 45: Schnittanordnung für die Herstellung verschiedener Bauteilgeometrien

Das Verfahren wurde durch Herstellung von Testgeometrien erprobt. Das Bild 46 zeigt die hergestellten Testgeometrien. Es ist deutlich zu sehen, dass eine Vielzahl der Gestaltungsmöglichkeiten möglich ist.

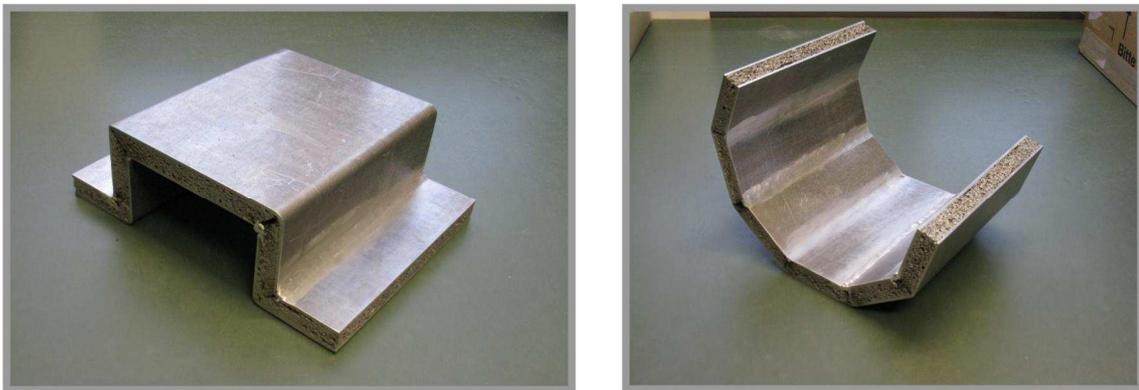


Bild 46: Mögliche Bauteilgeometrien nach Gehrungsfügen-Verfahren

Weiterhin sind konische Geometrien herstellbar, indem die Gehrungsschnitte in der Sandwichenebene unter einem Winkel zueinander liegen. Ein praxisorientiertes Beispiel dieser Technologie hat das bereits erwähnte Projekt „Aluminiumschaumverbunde bei dynamischer Belastung – Entwicklung eines kompletten Seilrollenrahmens“ ermöglicht. Im Projekt sollten die Ecken des Seilrollenrahmens – Containeraufnahme an Mobilien Kränen – aus dem Aluminiumschaumsandwich gefertigt werden. Nach der Auswertung möglicher Herstellungstechnologien hat sich dieses Verfahren als die erfolgversprechendste und kostengünstigste Technologie erwiesen. Die Prozessschritte der Herstellung einer Seilrollenrahmenecke zeigt das Bild 47.

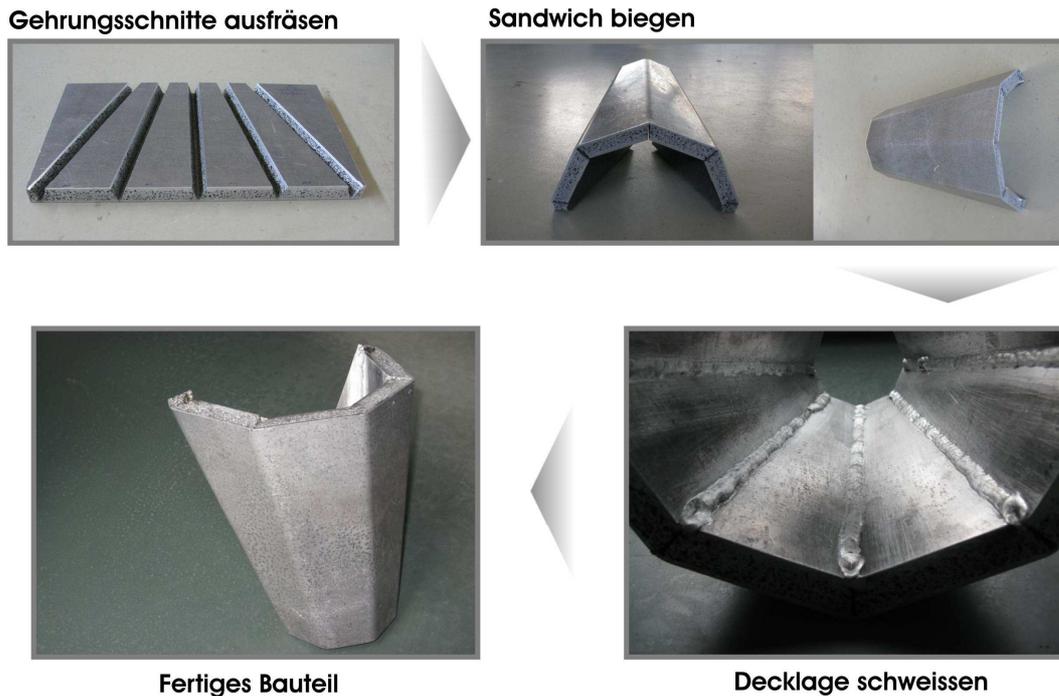


Bild 47: Demonstratorbauteil – verkleinerte Ecke des Seilrollenrahmens in Fertigungsschritten

4.4 Entwicklung der Aufschäumtechnologien

Die Fertigungstechnologie zur Herstellung von dreidimensionalen Bauteilen aus AFS erfordert einen Aufschäumschritt, so weit die Umformoperationen mit einem unaufgeschäumten Halbzeug erfolgen (s. Kapitel 4.3). Die durchgeführten Untersuchungen in dieser Arbeit beziehen sich grundsätzlich auf die Gestaltung der Aufschäumwerkzeuge sowie die Aufschäumverfahren und nicht auf die Aufschäumparameter (z. B. Aufschäumdauer und –temperatur) sowie ihren Einfluss auf die Schaumstruktur. Die Letzten sind zum größten Teil in anderen Arbeiten, beispielsweise in [Hah05] bereits untersucht worden. In erster Linie sollten in dieser Arbeit Prozessführungsstrategien detailliert analysiert werden. Dabei sind Besonderheiten der Prozessführung verschiedener Verfahren hervorzuheben und die industrielle Tauglichkeit des jeweiligen Verfahrens zu definieren.

4.4.1 Gestaltung der Aufschäumwerkzeuge

Unter Ausnahme eines ebenen Bauteils ist zum Aufschäumen immer ein Aufschäumwerkzeug erforderlich. Die Ursache dafür ist eine hohe Aufschäumtemperatur, bei der das Sandwich eine geringe Festigkeit aufweist. Um das Verformen während des Aufschäumens zu vermeiden, ist die Verwendung einer Vorrichtung für umgeformte Bauteile unentbehrlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Möglichkeiten zum Aufbau der Aufschäumwerkzeuge realisiert und einige davon für die Bauteilherstellung eingesetzt.

Der Aufbau von Aufschäumwerkzeugen ist stark von der Bauteilgeometrie abhängig. Im Allgemeinen sollte die Aufschäumvorrichtung nicht aus einem massiven Teil, sondern aus einem Blech hergestellt werden, da es beim Aufschäumen möglichst schnell und gleichmäßig aufgewärmt werden muss. Außerdem ist die aus einem Blech bestehende Vorrichtung leichter und handlicher in die Aufschäumeinheit (z. B. Ofen oder IR-Strahler) einzulegen und wieder zu entnehmen.

Im Bild 48 ist ein CAD – Modell der Aufschäumvorrichtung für die Sandwichrinne (s. Kapitel 4.3) zu sehen. Für dieses Werkzeug wurden Bleche aus dem hitzebeständigen Stahl mit einer Dicke von 5 mm verwendet. Die Unterlage zum Aufschäumen der Sandwiche wurde durch Tiefziehen hergestellt. Dabei muss die Innenkontur der Unterlage der Außenkontur des umgeformten Sandwichs entsprechen, um die Maßgenauigkeit während des Aufschäumens zu gewährleisten. Die Bestandteile der Aufschäumvorrichtung – Grundplatte, drei Stege und umgeformte Aufschäumform (Sandwichunterlage) – wurden anschließend zusammengeschweißt. Beim Schweißen sollte darauf geachtet werden, dass die Schweißnähte eine hohe Temperatur aushalten müssen. Diese Temperatur ergibt sich aus den Aufschäumbedingungen. In der Regel liegt die Ofentemperatur beim Aufschäumen bei ca. 600-750°C.

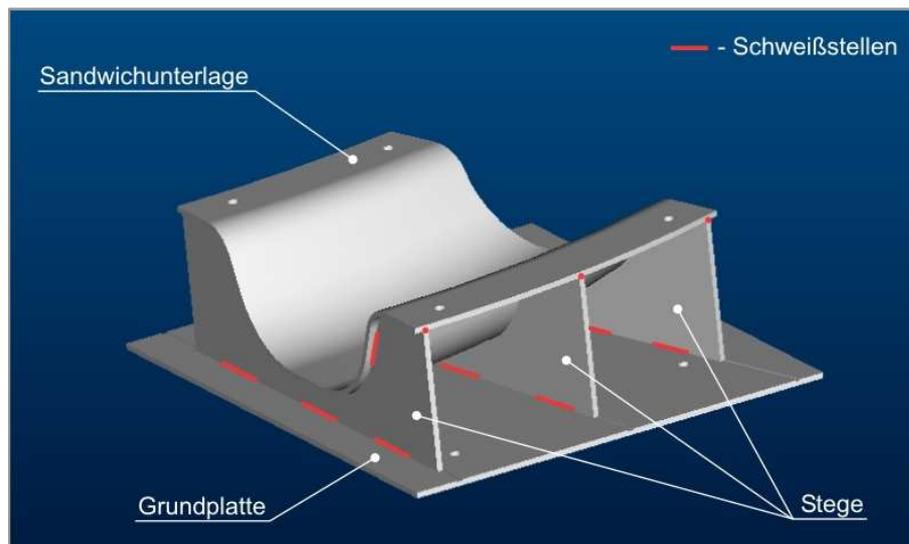


Bild 48: CAD – Modell Aufschäumvorrichtung für Sandwichrinne

Die durchgeführten Untersuchungen mit der Probengeometrie Sandwichrinne haben gezeigt, dass die genaue Einhaltung der Bauteilmaße ohne Verwendung einer Begrenzung des Bauteils von oben schwer zu realisieren ist. Das Bauteil wird also ungleichmäßig aufgeschäumt. Die Ursachen dieses ungleichmäßigen Aufschäumens sind vermutlich der unterschiedliche Aufschäumdruck in verschiedenen Bauteilbereichen oder auch Kräfte, die durch den versetzten Bauteilschwerpunkt hervorgerufen werden. Die Folge davon ist eine unterschiedliche Bauteilenddicke sowie unterschiedliche Porengrößen innerhalb eines Bauteils.

Dieses Problem lässt sich durch den Einsatz eines Gegenhalters beim Aufschäumen lösen. Das Bauteil wird bis zum Anschlag aufgeschäumt, indem der Gegenhalter seine Höhe begrenzt. Die Dicke bleibt also über die ganze Probe konstant.

Durch die Verwendung eines Gegenhalters ist es auch möglich, unterschiedliche Sandwichdicken innerhalb eines Bauteils gezielt einzustellen. Dabei ist es ausreichend, dass die Höhe nur an bestimmten Stellen des Bauteils begrenzt wird. Für jedes Bauteil muss analysiert werden, welche Bereiche durch Gegenhalter sinnvoll zu begrenzen sind.

Eine Variante des Aufschäumwerkzeuges mit einem Gegenhalter für die Sandwichrinne ist im Bild 49 ersichtlich. Dabei ist gut zu sehen, dass die Aufschäumhöhe ausschließlich im mittleren Bodenbereich des Bauteils begrenzt wird.



Bild 49: Aufschäumvorrichtung mit einer Gegenlage

Die Versuche mit Gegenhalter wurden erfolgreich durchgeführt. Die Sandwichrinne konnte entsprechend den Maßanforderungen aufgeschäumt werden. Die Probengeometrie wies eine gleichmäßige Dickenverteilung im vorderen und hinteren Bereich sowie eine gleichmäßige Porenverteilung des Schaums auf (s. auch Kapitel 4.4.2).

Aufschäumen im Umformwerkzeug

Eine andere Strategie in Bezug auf die Aufschäumwerkzeuge wurde beim Aufschäumen des Frontmodulesegments eingesetzt. Es handelt sich dabei um das Aufschäumen im Umformwerkzeug.

Das Aufschäumwerkzeug besteht hier aus Umformwerkzeugen – einem Stempel und einer Matrize. Die Matrize dient dabei als Unterlage für das Sandwich, der Stempel hat die Auf-

gabe, die Bauteilhöhe beim Aufschäumen zu begrenzen und gewährleistet somit eine konstante Bauteilhöhe. Das Werkzeug ist im Bild 39 dargestellt. Es weist eine Schalenbauweise auf, ähnlich dem Aufschäumwerkzeug bei der Sandwichrinne, kann aber sowohl als Umform- als auch als Aufschäumwerkzeug verwendet werden. Um die Festigkeitsanforderungen des Umformwerkzeuges zu erfüllen, wurden die formgebenden Elemente – der Stempel und die Matrize - aus 10 mm Stahlblech ausgeführt (s. Aufbau der Umformwerkzeuge für das Frontmodulesegment). Eine solche Ausführung spart ein zusätzliches Aufschäumwerkzeug und verringert dadurch die Gesamtkosten der Bauteilherstellung. Da sich diese Technologie sowohl technisch als auch wirtschaftlich als erfolgreichste erwies, wurde sie zur Herstellung von Bauteilen des Demonstrators „Frontmodul“ verwendet (s. auch Kapitel 5).

Aufschäumwerkzeug auf Basis von Drahtgitter

Für die Bauteile, die man ohne Formwerkzeuge herstellen kann (z. B. durch Freibiegen oder Abkanten), wurde eine weitere Optimierung des Aufschäumwerkzeuges vorgenommen, um die Massereduzierung, Handhabung sowie Kostensenkung der Werkzeuge zu ermöglichen.

Die formgebenden Teile des Aufschäumwerkzeuges wurden als punktgeschweißte Drahtstruktur realisiert. Durch diese Drahtstruktur ist es möglich, zweidimensionale Formen maßgenau herzustellen und somit eine stabile Unterlage für das Sandwich zu schaffen. Die Herstellung einer dreidimensionalen Form ist durch die Drahtstruktur sehr aufwändig zu realisieren. Es ist jedoch nicht als Nachteil zu betrachten, da beim Freibiegen oder Abkanten keine komplizierte 3D-Formen herstellbar sind.

Ein deutlicher Vorteil dieses Werkzeugs ist sein Nutzen beim Aufschäumen mit Infrarotstrahler (s. Ausblick, Kapitel 6). Das Sandwich kann mit Infrarotstrahler von oben und/oder von unten über die Gitterstruktur ohne Energieverlust erwärmt werden. Ein CAD-Modell eines Aufschäumwerkzeuges, beispielweise zur Herstellung einer Ecke für den Seilrollenrahmen, ist im Bild 50 dargestellt.

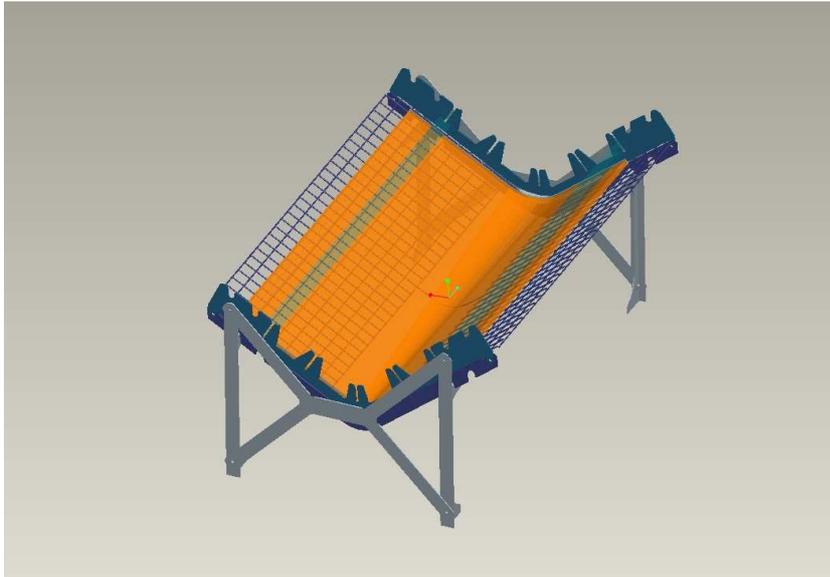


Bild 50: Aufschäumwerkzeug auf Basis von Drahtgitter (CAD-Model)

Weiterhin ist das Werkzeug leichter als das Werkzeug aus Stahlblech sowie deutlich kostengünstiger herzustellen.

Obwohl dieses Werkzeug im Rahmen dieser Arbeit nicht zum Einsatz kam, lässt sich eindeutig sagen, dass diese Konstruktion des Aufschäumwerkzeuges sehr erfolgversprechend ist und kann sehr gut zum Aufschäumen von zweidimensionalen Bauteilen, insbesondere beim Einsatz von IR-Strahler, verwendet werden.

4.4.2 Aufschäumverfahren

In Bezug auf das Aufschäumen von Aluminiumschaumsandwichen wurden verschiedene Verfahren analysiert und erprobt, um die Eignung zur Herstellung von verschiedenen Bauteilgeometrien zu prüfen. Das Aufschäumen von pulvermetallurgisch hergestellten Halbzweigen kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Das Ziel ist den Kern des Sandwiches auf eine Temperatur zu erwärmen, bei der der Aufschäumprozess ausgelöst wird. Diese Aufschäumtemperatur liegt sehr nah zur Schmelztemperatur der Decklagen, so dass hier eine genaue Prozessführung erforderlich ist. Das Aufschmelzen der Decklagen soll dabei ausgeschlossen werden.

4.4.2.1 Aufschäumen mit starren Werkzeugen

Das Aufschäumen von umgeformten Bauteilen im Umformwerkzeug stellt eine interessante Verfahrensvariante dar, wobei die Erwärmung des Bauteils durch den Kontakt mit erwärmten Werkzeugen stattfindet. Diese Vorgehensweise ermöglicht das Aufschäumen während oder sofort nach der Umformoperation. Die Herstellung eines Schaumteils erfolgt ohne eine Trennung der Fertigungsschritte „Umformen“ und „Aufschäumen“.

Die beheizten Umformwerkzeuge formen das Werkstück um. Das Werkstück erwärmt sich dabei bis zur Aufschäumtemperatur. Nach dem Umformen wird der Aufschäumvorgang

ausgelöst, wobei der Stempel und die Matrize des Werkzeuges die Form des Bauteils stabil halten. Durch Festlegung eines bestimmten Abstands zwischen dem Stempel und der Matrize wird das Bauteil auf die gewünschte Dicke aufgeschäumt.

Diese Technologie stellt eine hohe Herausforderung an die Prozessführung in Bezug auf die Erwärmung des Werkstückes. Da sich das Werkstück im Wesentlichen über den Kontakt mit dem Werkzeug erwärmt, muss beim Aufschäumen dieser Kontakt auch beibehalten werden. Aufgrund des relativ großen Aufwands bei der Auslegung und Herstellung der beheizten Werkzeuge sowie der Berechnung der Temperaturführung im Werkzeug wurde diese Technologie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Sie bietet jedoch auch einen interessanten Ansatzpunkt und darf bei der Auslegung einer Prozesskette nicht außer Acht gelassen werden.

4.4.2.2 Aufschäumen durch Induktionserwärmung

Eine weitere Möglichkeit, die pulvermetallurgisch hergestellten Halbzeuge aufzuschäumen, bietet die Induktionserwärmung. Da die Wärme bei diesem Verfahren unmittelbar im Körper selbst entsteht und nicht durch Wärmeleitung oder Strahlung übertragen werden muss, ist diese Technologie durch eine sehr schnelle Erwärmungszeit gekennzeichnet. Weiterhin ist die Leistung sehr hoch und gut steuerbar. Allerdings sind leistungsstarke Anlagen für große Bauteile teuer, so dass dieses Verfahren eher für kleine Bauteile in großen Serien geeignet ist. Ein Beispiel einer industriellen Anwendung dieses Verfahrens ist eine vollautomatisierte Anlage der Alulight International GmbH zur Herstellung von Crashabsorber für die deutsche Automobilindustrie. Die Anlage produziert seit 2006 100.000 Stück pro Jahr. Das ist die weltweit erste, vollautomatische Anlage, zur Produktion von Aluminiumschaumteilen [alulight].

Heute sind auch sogenannte „Flachinduktor“ bekannt, die eventuell auch zum Aufschäumen von Platten oder flächigen Bauteilen anwendbar sind. Über ihren Einsatz kann jedoch noch keine Aussage getroffen werden. Inwieweit diese Technologie für die Herstellung von großflächigen Platten bzw. Bauteilen einsetzbar ist, wird die Zeit zeigen. Da zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Arbeit nur noch geringe Wahrscheinlichkeit des produktiven Einsatzes für dieses Verfahren bestand, wurde das Verfahren nicht weiteruntersucht.

4.4.2.3 Aufschäumen mit Infrarotstrahlern

Eine weitere Alternative ist das Aufschäumen mit Infrarotstrahlern. Die Technologie ist relativ jung und wird zurzeit von wenigen Herstellern eingesetzt. Ihr Einsatz wird zukünftig aufgrund der oben erwähnten Vorteile steigen. Allerdings beschränkt sich der Einsatz dieser Technologie auf das Aufschäumen von ebenen Sandwichblechen und Schaumplatten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen mit der am Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung zur Verfügung stehenden Infrarot-Erwärmungseinrichtung durchgeführt, die im Rahmen des EFRE-Vorhabens entwickelt und beschafft wurde (s. Bild 51).



Bild 51: Infrarot-Aufschäumeinrichtung (Strahler, Pyrometer, SPS-Steuerung Panel)

Die Anlage besteht aus sechs Modulen (zwei Module: 850x1150mm und vier Module: 850x650 mm) mit einer Gesamtleistung von 342 kW, die aus mehreren Infrarotstrahlern bestehen. Jedes der Module ist in Zonen bzw. Strahlergruppen aufgeteilt, die separat über SPS-Steereinrichtung gesteuert werden können. Durch die in den Modulen eingebauten Pyrometer kann die Temperatur von Sandwichoberfläche abgelesen werden. Sie wird sofort in der SPS-Steuerungseinheit ausgewertet und die Leistung der Zonen wird ggf. angepasst, um erforderliche Aufschäumbedingungen zu gewährleisten. Dies ermöglicht eine gezielte lokale Regelung der Temperatur beim Aufschäumen: z.B. eine unterschiedliche Leistungsdosierung im Randbereich und in der Mitte des Bauteils. Die Wärmezufuhr kann schnell geändert bzw. abgebrochen werden. Parallel zur Temperaturentnahme mit Hilfe der eingebauten Pyrometer kann die Temperatur des Bauteils mit digitalen IR-Kameras aufgenommen werden (s. Bild 52). Damit ist es möglich, den Aufschäumprozess genau zu beobachten und gezielt zu regeln mit dem Ziel, eine fehlerfreie und gleichmäßige Schaumstruktur in Bauteilen zu erhalten. Die Handhabung der Werkstoffe sowie die Beobachtung und Kontrolle des Aufschäumprozesses sind durch „offenen“ Aufbau der Einrichtung deutlich besser als beim Aufschäumen im Ofen.

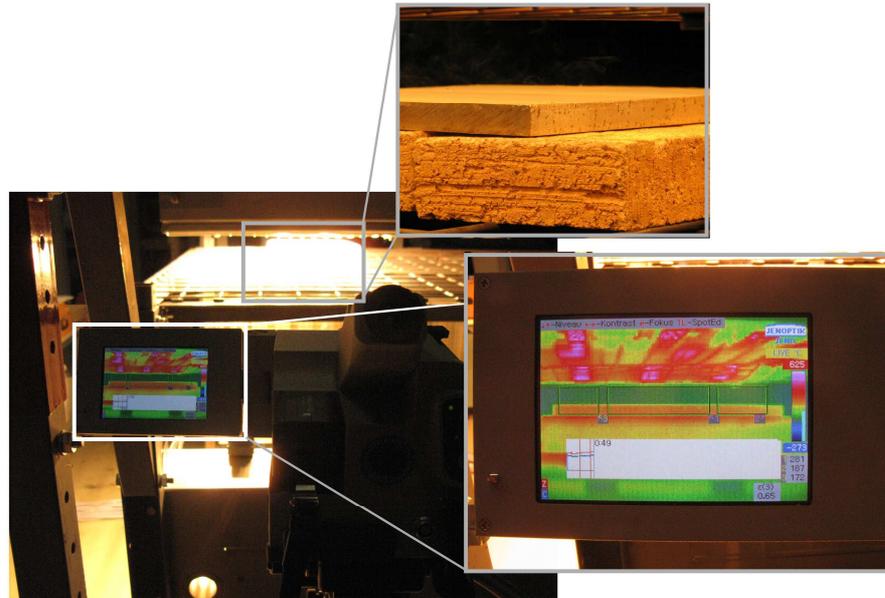


Bild 52: Aufnahme der Temperatur mit IR-Kamera bei einem Aufschäumversuch

Die Versuche haben gezeigt, dass das Aufschäumen von ebenen Sandwichblechen möglich ist und diese Technologie im Vergleich zum konventionellen Aufschäumen im Ofen einige Vorteile hat. Sie bietet einen deutlich besser steuerbaren Aufschäumprozess in Verbindung mit kürzerer Aufschäumzeit und der daraus resultierenden Energieeinsparung. Bessere Steuerung des Aufschäumprozesses hat dementsprechend einen positiven Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Porenverteilung innerhalb des Bauteils. Die aufgeschäumten Proben zeichnen sich durch eine feinpörige und gleichmäßigere Porenstruktur im Vergleich zu den im Ofen aufgeschäumten Proben.

Das Bild 53 zeigt eine mittels IR-Strahlung aufgeschäumte Probe. Eine gleichmäßige Porenverteilung sowie eine feinpörige Struktur des Schaums sind gut ersichtlich. Wie die weitgehenden Versuchen zum Aufschäumen im Ofen gezeigt haben, ist die Einstellung der gleichmäßigen Porenverteilung auch beim Aufschäumen im Ofen möglich. Allerdings sind die Einstellung der Parameter sowie die Steuerung des Prozesses beim Aufschäumen im Ofen deutlich aufwändiger und erfordern Berücksichtigung von vielen Faktoren (s. auch Kapitel 4.4.2.4).

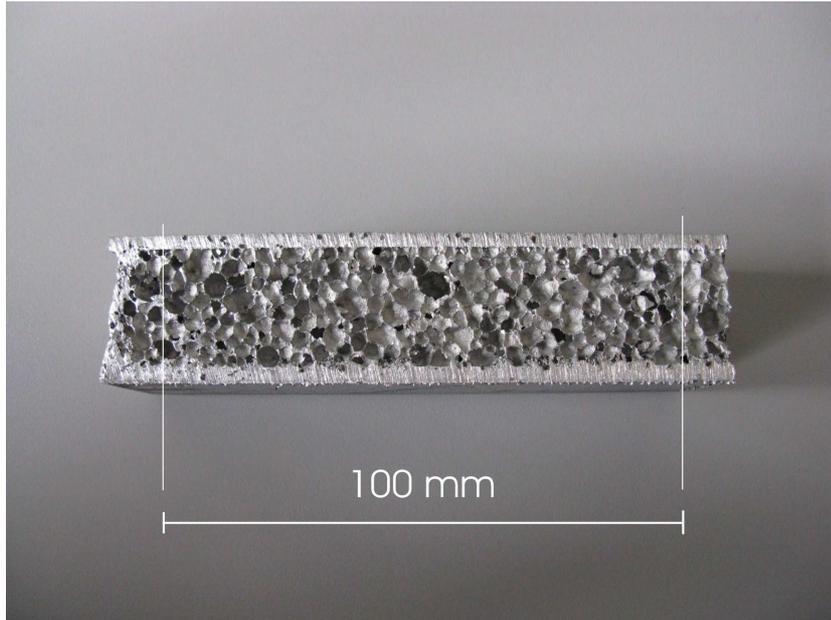


Bild 53: Der Querschnitt einer mit Infrarotstrahlern aufgeschäumten Probe

Die aufgeschäumten ebenen Sandwiche können nach der Aufschäumoperation mittels im Kapitel 4.3.4 beschriebener Technologie „Gehrungsfügen“ zu den dreidimensionalen Bauteilen weiterverarbeitet werden.

Die Verwendung dieser Technologie zum Aufschäumen von dreidimensionalen Bauteilen ist auch denkbar und erfolgversprechend. Die Aufschäumeinrichtung ist modular aufgebaut. Die Module können somit zum Bauteil beliebig angeordnet werden, was das Aufschäumen von Bauteilen mit unterschiedlichsten Geometrien und Formen ermöglicht. Es kann dementsprechend zum Aufschäumen von dreidimensional gekrümmten Bauteilen eingesetzt werden. Aufgrund des großen Versuchsaufwands konnten im Rahmen dieser Arbeit keine Untersuchungen zum Aufschäumen von geformten Bauteilen mit IR-Strahlern durchgeführt werden. Eine weitere Optimierung der Aufschäumparameter sowie ihr Einfluss auf die Schaumstruktur in Bezug auf Besonderheiten dreidimensionaler Bauteilform sind in weiteren Untersuchungen geplant und werden Schwerpunkte weiterer Versuchsreihen.

4.4.2.4 Aufschäumen im Ofen

Als ein am besten geeignetes Verfahren zum Aufschäumen von umgeformten AFS hat sich das Aufschäumen im Ofen erwiesen. Bisher wurden gerade Öfen zum Aufschäumen von Bauteilen aus Aluminiumschäumen verwendet. Dieses Verfahren kam in dieser Arbeit zum Einsatz, da das Aufschäumen von dreidimensionalen Bauteile mit diesem Verfahren zurzeit eine erfolgversprechendste Technologie ist. Das Ziel war es, die Kenntnisse über das Aufschäumverhalten von untersuchten Bauteilen zu sammeln, um diese zur Herstellung von Prototypen zu verwenden.

Für die Aufschäumversuche wurden zunächst umgeformte AFS mit einer Dicke von 10 mm verwendet¹, die im Rahmen des Projektes „Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen“ zur Verfügung standen. Die Aufschäumversuche wurden beim Partner IFAM in Bremen an einem zur Verfügung gestellten Ofen durchgeführt (Bild 54). Die Besonderheit dieses Ofens besteht darin, dass Türbereich, Boden sowie die Wände separat beheizt werden können. Der Ofen ist mit einem Schaufenster ausgerüstet, durch das der Aufschäumprozess beobachtet werden kann. Der Ofen ermöglicht einen Umluftbetrieb, um die Temperaturverteilung zu verbessern. Das Einlegen und Entnehmen der Aufschäumvorrichtung erfolgte mit einem Gabelstapler.



Bild 54: Der Ofen zum Aufschäumen von AFS (IFAM)

Als Unterlage für die Bauteile Sandwichrinne und Frontmodulesegment wurden entsprechende Werkzeuge verwendet (s. Abschnitt 4.4.1). Die Bedingungen für das Aufschäumen sind zuerst mit einer Ofentemperatur von 690°C und einer Umluft von 100% festgelegt worden. Da die Zeit des Aufschäumens von vielen Faktoren abhängig und immer unterschiedlich war, wurde der ganze Prozess durch das Schaufenster beobachtet. Sobald die Höhe des Bauteils erreicht war, wurde die Probe aus dem Ofen entnommen.

Der Aufschäumprozess muss genau kontrolliert werden, da die Überschreitung einer bestimmten Aufschäumdauer zum Aufschmelzen der Decklagen führen kann. Trotz genauer Versuchsführung war bei einigen Versuchen das Aufschmelzen der Decklagen nicht zu vermeiden (s. Bild 55). Der Aufschäumprozess musste aus diesem Grund abgebrochen werden. Die Ursache dafür war eine zu hohe Aufschäumtemperatur. Es wurde vermutet,

¹ - 3mm - Deckbleche (6060) , 4 mm – Kernlage (AlSi6Cu6)

dass es aufgrund der Bauteilgeometrie zu Wirbelungen am Bauteilrand kommt, wodurch die Temperatur in diesem Bereich höher wird. Die weiteren Versuche wurden aus diesem Grund ohne Umluft durchgeführt. Um den Aufschäumprozess sicherer kontrollieren zu können und das Verschmelzen der Deckbleche zu vermeiden, wurde außerdem die Ofentemperatur für weitere Proben auf 670°C eingestellt. So ist es bei dieser Technologie immer erforderlich, nicht nur auf die Aufschäumdauer und Aufschäumtemperatur, sondern auch auf unterschiedliche Bauteilgeometrien und Betrieb des Ofens (mit oder ohne Umluft) zu achten. Dies hat eine relativ hohe Anzahl der Fehlversuche zur Folge.



Bild 55: Probe mit einem verschmolzenen Deckblech

Eine weitere grundsätzliche Besonderheit des Aufschäumens von AFS wurde bei der Herstellung der Sandwichrinne festgestellt. Diese Besonderheit ist aber auch für andere Geometrien zutreffend und sollte unbedingt bei allen Bauteilen berücksichtigt werden.

Im Bild 56 links ist ein Bauteil dargestellt, dessen Aussehen in keiner Weise auf ein fehlerhaftes Aufschäumen deutet. Doch zeigt sich im Inneren des Bauteils ein Fehler, der auf ein fehlerhaftes Aufschäumen zurückzuführen ist. Der Fehler - eine abgelöste Decklage in der Bauteilmitte - ist auf dem Bild rechts im Schnitt deutlich zu sehen.

Die Ursache eines solchen Fehlers liegt in einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung innerhalb des Bauteils. Da sich die Randbereiche schneller erwärmen, wird der Aufschäumprozess dort auch früher ausgelöst. Dabei treibt der expandierende Schaum am Rand das obere Blech hoch. Aufgrund der noch nicht erreichten Aufschäumtemperatur in der Mitte des Bauteils hat das Aufschäumen dort noch nicht bzw. gerade angefangen, so dass die Aufschäumkräfte am Rand das Deckblech von der Kernlage in der Mitte ablösen.

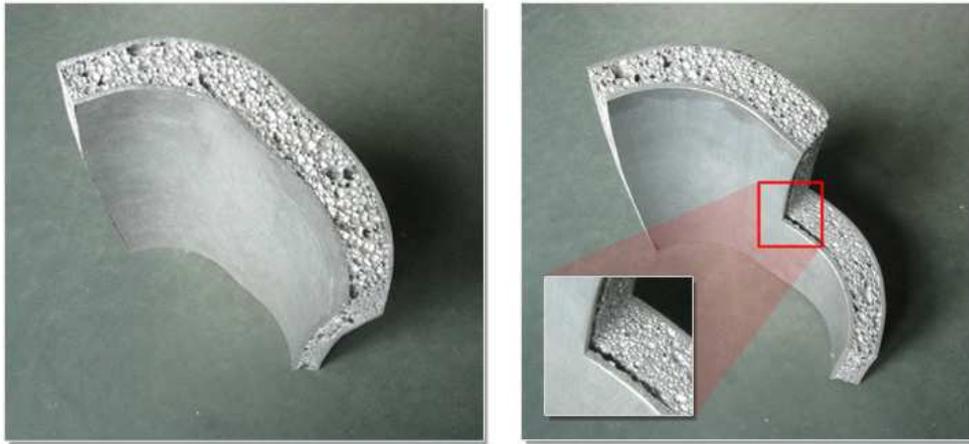


Bild 56: Fehler beim Aufschäumen

Das Bild 57 zeigt die Schaumstruktur im Schnitt des Bauteils vom Rand zur Mitte. Die unterschiedlichen Phasen des Aufschäumens sind dabei deutlich zu erkennen. Während sich im Randbereich eine gute Schaumstruktur mit großen Poren gebildet hat, liegt in der Mitte nur noch eine feinporige Struktur vor, die der Anfangsphase des Schäumens entspricht. Es ist also erforderlich, das Bauteil relativ langsam aufzuheizen, so dass die Temperatur innerhalb des ganzen Bauteils gleichmäßig steigt. Weiterhin kann die Oberfläche des Aluminiumbleches partiell (in der Mitte) geschwärzt werden, um eine bessere Durchwärmung der Bauteilmitte zu ermöglichen. Dies ist insbesondere bei großflächigen Bauteilen nutzbar. Bei der Herstellung von Bauteilen des Demonstrators „Frontmodul“ wurde eine matte Oberfläche verwendet (s. Kapitel 5).

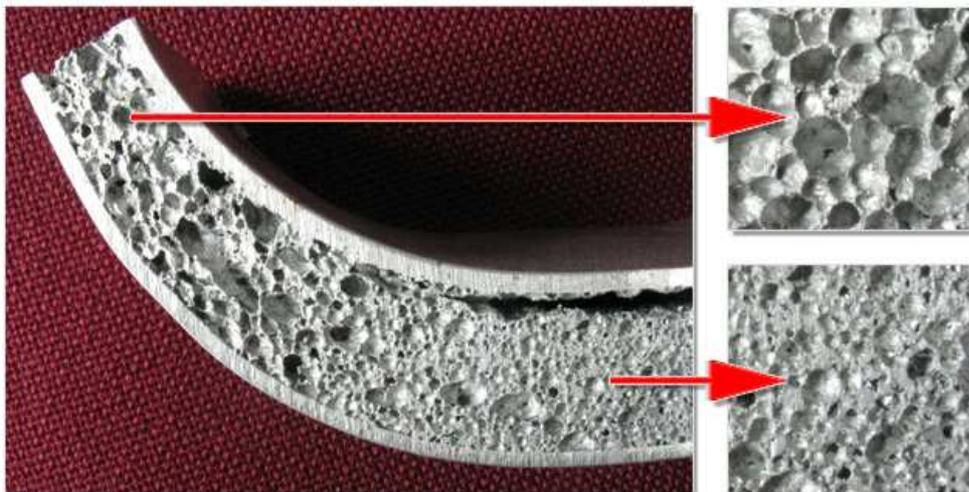


Bild 57: Verzögertes Aufschäumen in der Mitte des Bauteils

Im Allgemeinen strahlt die glänzende Oberfläche der Aluminiumdeckbleche die Wärme stark ab, was zu einer längeren Durchwärmungszeit des Sandwichs führt. Zur schnelleren Durchwärmung soll also die Oberfläche mattiert oder geschwärzt werden. Dafür wurden SiC-Schichten und ein wärmebeständiger Zinn-Mattlack als Sprühmittel eingesetzt. Mehrere

Versuche haben gezeigt, dass die Beschichtung der Oberfläche mit einem matten bzw. schwarzen Mittel sehr sinnvoll ist, da die Erwärmungszeit durch die Verringerung der Abstrahlung erheblich reduziert wird.

So wurden die Bauteile ohne Fehler aufgeschäumt. Eine matte Oberfläche ist am Beispiel der Sandwichrinne auf dem Bild 58 gut zu sehen. Das Ergebnis zeigt Bild 59 – aufgeschäumte Sandwichrinne, fehlerfrei und mit gleichmäßiger Schaumstruktur.



Bild 58: Matte Oberfläche des Bauteils (SiC-Schichte)

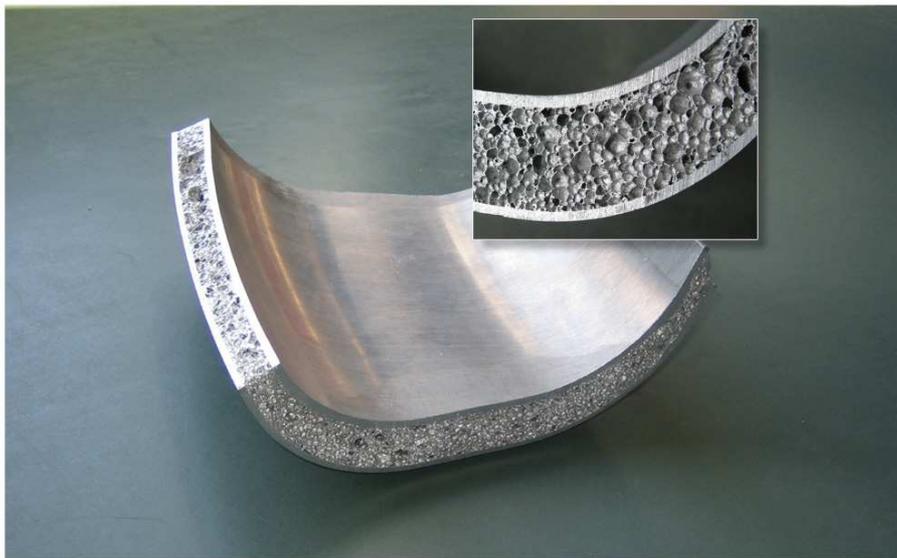


Bild 59: Aufgeschäumte Sandwichrinne (Ränder beschnitten)

Die eingesetzte Technologie kam für das Aufschäumen der Sandwichrinne und des Frontmodulsegments zum Einsatz. Dabei wurden für jede Geometrie optimale Aufschäumparameter ermittelt. Obwohl alle Proben (je Geometrie) bei gleichen technologischen Parametern aufgeschäumt wurden, konnte eine relativ große Streuung der Aufschäumdauer von bis zu 5 Minuten festgestellt werden.

Durch eine Vielzahl von schwer definierbaren Einflussfaktoren z. B. Temperatur des Werkzeuges, Temperaturverlust beim Öffnen der Tür, ist es sehr kompliziert, die Versuchsparameter immer gleich zu halten, so dass ein sicher steuerbarer Prozess schwer realisierbar ist. Die Folge davon ist eine unterschiedliche Aufschäumzeit gleicher Geometrien. Die Herstellung von Bauteilen nach dieser Technologie ist technisch ohne Bedenken möglich, eine robuste und gut steuerbare Prozesskette ist jedoch schwer zu realisieren.

4.4.3 Prüfung der Schaumstruktur

Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch Verfahren zur Prüfung der zellularen Struktur auf die Gleichmäßigkeit analysiert. Für eine sichere Produktion der Bauteile aus Aluminiumschaumen ist der Einsatz solcher Verfahren unentbehrlich. In diesem Abschnitt wird ein kurzer Überblick über die analysierten Verfahren gegeben.

Die Prüfungsverfahren kann man grundsätzlich in zerstörende und zerstörungsfreie Verfahren unterteilen. Die zerstörenden Prüfverfahren basieren auf mechanischer Zerlegung von Bauteilen in definierte Schnitte. So können die Schaumstruktur und ihre Gleichmäßigkeit beurteilt werden oder eventuelle Fehler der Schaumstruktur festgestellt werden. Diese Vorgehensweise eignet sich hauptsächlich für eine allgemeine Beurteilung der Schaumstruktur einer bestimmten Bauteilstelle. Somit ist das Verfahren besser für Bauteile verwendbar, deren Fehlstellen bereits unter Verdacht stehen. Eine eingehende Analyse von kompletten Bauteilen kann hier nur durch eine Vielzahl von Schnitten in einem Bauteil ermöglicht werden. Der Einsatz in Bezug auf die Produktivität ist daher mehr für einzelne Versuchsreihen und nicht für den Produktionsbetrieb sinnvoll. Ein Beispiel einer solchen Analyse ist das geschnittene Bauteil mit einem Fehler in der Mitte (s. Bild 56 und Bild 57).

Da es sich beim Aluminiumschaumsandwich um ein relativ teures Material handelt, ist die Verwendung zerstörender Verfahren nicht immer wirtschaftlich, denn mit jeder Prüfung wird ein Bauteil zerstört. Außerdem ist eine automatisierte und rechnergestützte Auswertung schwer vorstellbar. Für den Produktionsbetrieb ist der Einsatz zerstörungsfreier Prüfungen wesentlich sinnvoller.

Um die Porenverteilung einer Schaumprobe zerstörungsfrei ermitteln zu können, ist man auf die Röntgen-Methoden angewiesen. Hier existieren zwei Alternativen: konventionelles Röntgenverfahren zur Ermittlung eines 2D-Bildes und ein modernes CT-Verfahren zur dreidimensionalen Analyse von Schaumstrukturen.

Die konventionelle Röntgen-Analyse ist hauptsächlich für ebene Bauteile geeignet. Das Ergebnisbild liefert überlappend die Porenstruktur der Probe. Die Auswertung erfolgt nach Grauwert.

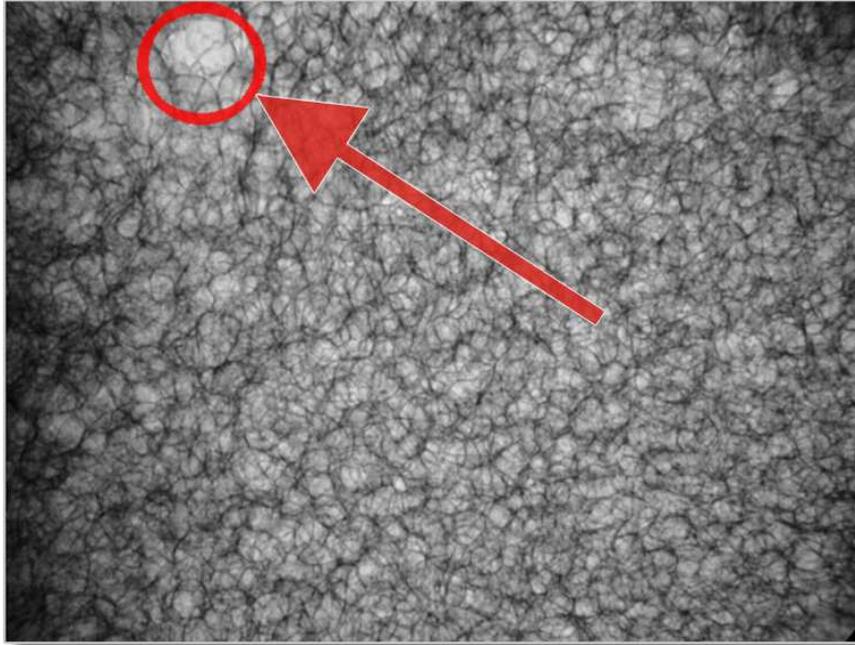


Bild 60: Konventionelle Röntgenaufnahme der Aluminiumschaumstruktur

Im Bild 60 ist eine Analyse von Schaumstruktur mittels konventioneller Röntgendurchstrahlung dargestellt. Es ist ein recht gleichmäßiges wolkiges Bild zu sehen. In der oberen linken Ecke ist jedoch ein deutlich hellerer Fleck zu sehen (mit Pfeil gekennzeichnet), was auf eine wesentlich größere Pore hinweist. So ist es möglich, die Verteilung der Proben zu analysieren und grobe Fehler festzustellen.

Diese Analyse liefert zwar in einer relativ kurzen Zeit das grundsätzliche Strukturbild des Schaums, kann jedoch für eine detaillierte Analyse und Feststellung feiner Fehler bzw. Untersuchung dreidimensionaler Bauteile kaum angewendet werden. Es ist also meistens nur eine qualitative Analyse möglich.

Ein deutlich besseres Ergebnis ist mit moderner Computertomographie -Technik möglich, die ein dreidimensionales Scannen von Schaumbauteilen ermöglicht.

Die Computertomographie basiert auf dem Prinzip der konventionellen Röntgenstrahlung. Der Unterschied besteht darin, dass das Bauteil in einer Serie von zweidimensionalen Bildern aufgenommen wird, wobei jede Aufnahme unter einem bestimmten Winkel zum Bauteil erfolgt. Das Bauteil wird dabei um 360° gedreht, so dass ein dreidimensionales Bild erzeugt wird. Das Prinzip ist schematisch im Bild 61 dargestellt.

Sobald alle Bilder aufgenommen sind, gehen die gesammelten Daten in die Rechereinheit, in der das Volumen des Bauteils numerisch rekonstruiert wird. Der resultierende Vo-

lumendatensatz wird visualisiert und kann zur Auswertung in Form von beliebigen Querschnitten oder als dreidimensionale Ansicht verwendet werden.

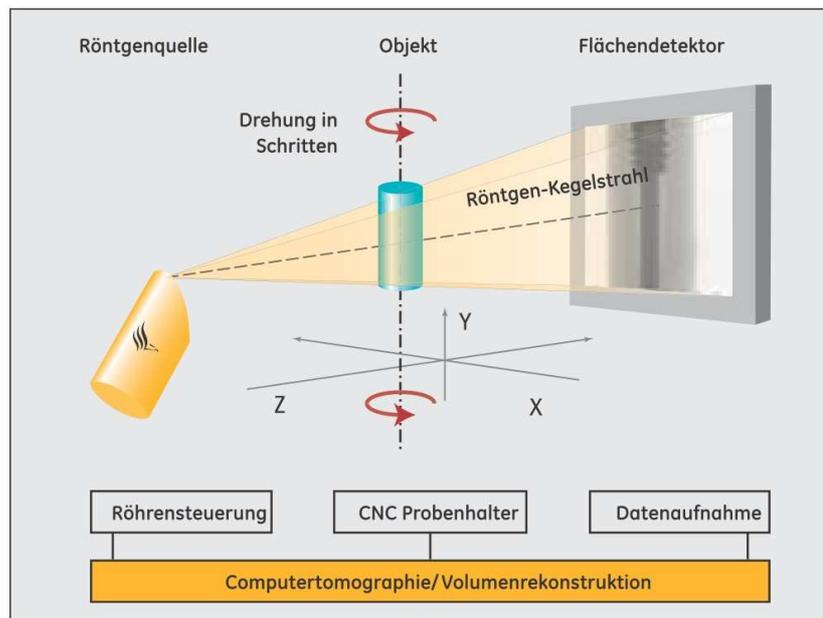


Bild 61: Prinzip der Computertomographie (Bildquelle: Fa. phoenix|x-ray)

Dieses Prinzip wurde absichtlich an einer fehlerhaften Sandwichrinne erfolgreich erprobt, um die Eignung des Verfahrens zur Feststellung von Aufschäumfehlern zu überprüfen. Die Untersuchung wurde durch die Fa. phoenix|x-ray durchgeführt. Das Bild 62 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Untersuchung.

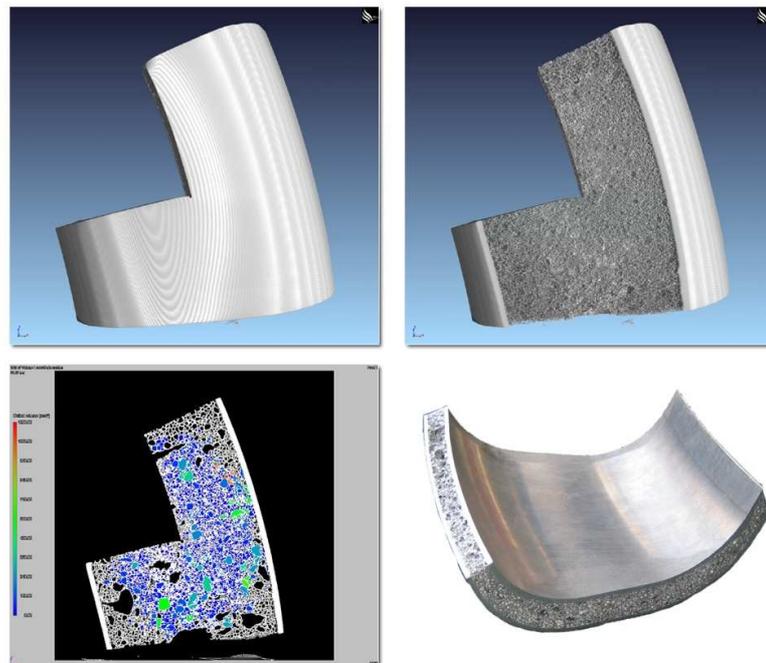


Bild 62: CT-Analyse der Sandwichrinne

Es ist deutlich zu sehen, dass das Ergebnis ein einwandfreies Bild über die Schaumstruktur im gesamten Bauteil liefert. Mit Hilfe moderner Computertechnik lassen sich die Porengröße, Porenverteilung usw. sehr schnell berechnen. Diese Technik ist am besten zur Verifizierung der Bauteile aus Aluminiumschäumen geeignet. In Bezug auf die Größe des Bauteils sind inzwischen Anlagen bekannt, die das Durchstrahlen von relativ großen Bauteilen (z. B. 1000 x 800 mm, Fa. phoenix|x-ray) ermöglichen.

4.5 Entwicklung der Fügetechnologien

„Wer selbst ein Ganzes ist, will nicht als Glied sich fügen“/Arthur Schopenhauer/. Anders ist es jedoch in der Fertigungstechnik, denn kaum ein Bauteil lässt sich ohne Fügen fertigen. So will jedes Bauteil gefügt zu sein, um seine Funktionalität zu zeigen.

Die Fügetechnologien stellen einen wichtigen Arbeitsschritt bei der Herstellung von Bauteilen dar. Diese müssen daher bei der Auslegung der Prozesskette ebenso mit einbezogen werden. Dazu gibt es zwei verschiedene Ansätze. Zum einen spielt das Fügen von AFS miteinander eine große Rolle, zum anderen die Befestigung von Anbauteilen an der Sandwichoberfläche.

Zum Fügen von AFS haben sich gängige Schweißverfahren sehr erfolgversprechend erwiesen. Zur Befestigung von Anbauteilen an der Sandwichoberfläche kamen verschiedene Verbindungselemente wie beispielsweise Klebebolzen, Blindnieten oder eingeklebte Inserts zum Einsatz. Diese Fügemöglichkeiten wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht und werden im Folgenden erläutert.

4.5.1 Schweißen von Aluminiumschaumsandwichen

Zur Herstellung großer Bauteile ist es notwendig, einzelne Aluminiumschaumsandwichteile miteinander zu verbinden. Hier kommen vor allem Stumpfstoßverbindungen mit I-Naht sowie T-Stoßverbindungen mit Kehlnaht in Betracht.

Als Schweißverfahren für Aluminium können das Metal-Inertgas-Verfahren (MIG), das Wolfram-Inertgas-Verfahren (WIG) und das Laserschweißen angewendet werden. Laserschweißen wird aufgrund des komplexeren Verfahrens und der kleineren Toleranzgrenzen erst bei größeren Stückzahlen interessant. Bei den Schweißverfahren sollte auf die Möglichkeit einer guten und unkomplizierten Reparatur geachtet werden. Hierfür sind MIG- und WIG-Verfahren ebenfalls zu bevorzugen, da beim Laserschweißen gewöhnlich Schweißroboter verwendet werden und somit der Einsatz in der Reparaturwerkstatt nicht

in Frage kommt. Aus diesem Grund wird in den folgenden Untersuchungen auf die Verfahren des MIG- und WIG-Schweißens eingegangen¹.

4.5.1.1 Herstellung der Proben

Für die Untersuchung an geschweißten AFS sind Proben für 4-Punkt- sowie für T-Stoß-Biegeversuche hergestellt worden. Die Proben für das jeweilige Prüfverfahren sind schematisch im Bild 63 zu sehen.

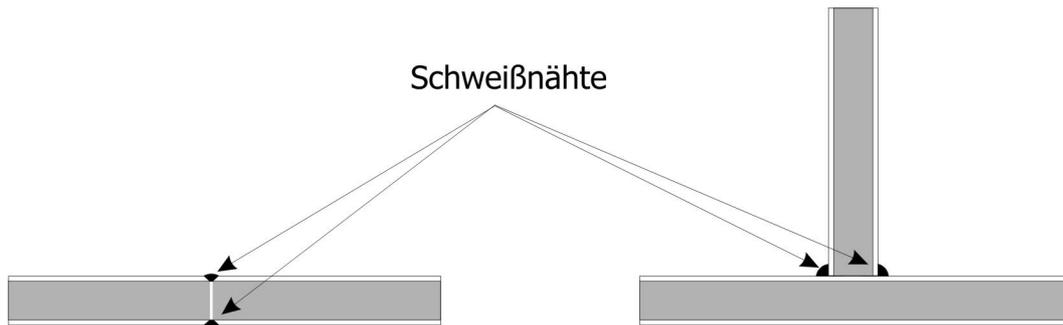


Bild 63: Biegeproben, links: Stumpfstoßverbindung, rechts: T-Stoßverbindung

Es sind umfangreiche Versuchsschweißungen durchgeführt worden, um erste Richtwerte für die Schweißparameter und das Verhalten des unter den Deckblechen liegenden Aluminiumschaums zu erhalten. Da das Verschweißen des Aluminiumschaums nicht möglich ist, sollten lediglich die Deckbleche verschweißt werden. Dabei muss insbesondere darauf geachtet werden, dass der Schaum durch den Wärmeeintrag nicht wieder in sich zusammenfällt bzw. beschädigt wird.

Die ersten Versuche wurden mit geschäumten AFS aus Material Al6060 mit einer Decklagenstärke von 1,7 – 1,8 mm sowie einer Kernlage aus Aluminiumschaum von 26,4 mm durchgeführt. Die Gesamthöhe dieses Verbunds betrug etwa 30 mm.

Für die 4-Punkt-Biegeversuche wurde das AFS in 300 mm lange und 40 mm breite Proben mittels einer Stichsäge zugeschnitten. Die Proben wurden anschließend in der Mitte bei 150 mm getrennt und wieder stumpf mit einer I-Naht verschweißt. Hierbei wurden wie oben bereits erwähnt lediglich die Deckbleche verschweißt, der darunter liegende Aluminiumschaum hatte keine Verbindung mit der anderen Hälfte.

Für die Biegeversuche an T-Stoß-Verbindungen wurde das AFS mit einer Decklagendicke von 3 mm bezogen, als Material wurde ebenso Al6060 verwendet. Das geschäumte Materi-

¹ - Eine entsprechende Ausstattung zur Durchführung von Schweißversuchen war bei der Wilhelm Schmidt GmbH vorhanden, so dass die Schweißuntersuchungen bei diesem Unternehmen durchgeführt wurden.

al ist mit einer Kreissäge in 120x40 mm große Stücke zugeschnitten worden. Anschließend wurden zwei Werkstücke zu einem T mit einer Kehlnaht auf jeder Seite verschweißt.

Die Schweißparameter bei allen Versuchen wurden so eingestellt, dass der Aluminiumschaum aufgrund der zu hohen Temperaturen nicht beschädigt wird.

Die MIG-Schweißungen wurden mit einem Schweißgerät Fronius TPS 330 durchgeführt. Als Schweißgut diente ein Draht AlSi5 mit einem Durchmesser von 0,8 mm für eine Stumpfstoßverbindung und mit einem Durchmesser von 1,2 mm für eine T-Stoßverbindung. Zur besseren Drahtdurchführung ist eine Drahtdüse von 1 mm verwendet worden.

Für die WIG-Schweißungen ist ein Schweißgerät der Firma Kemppi Mastertig 1600 verwendet worden. Als Schweißgut wurde ebenso AlSi5 mit einem Durchmesser von 1,6 mm für beide Verbindungen verwendet. Beim Aluminiumschweißen muss zum Aufbrechen der Oxydschicht mit Wechselstrom geschweißt werden. Für alle Schweißversuche wurde als Inertgas Argon angewandt. Bild 64 und Bild 65 zeigen jeweils eine Stumpfstoß- und eine T-Stoßverbindung des Aluminiumschaumsandwiches.

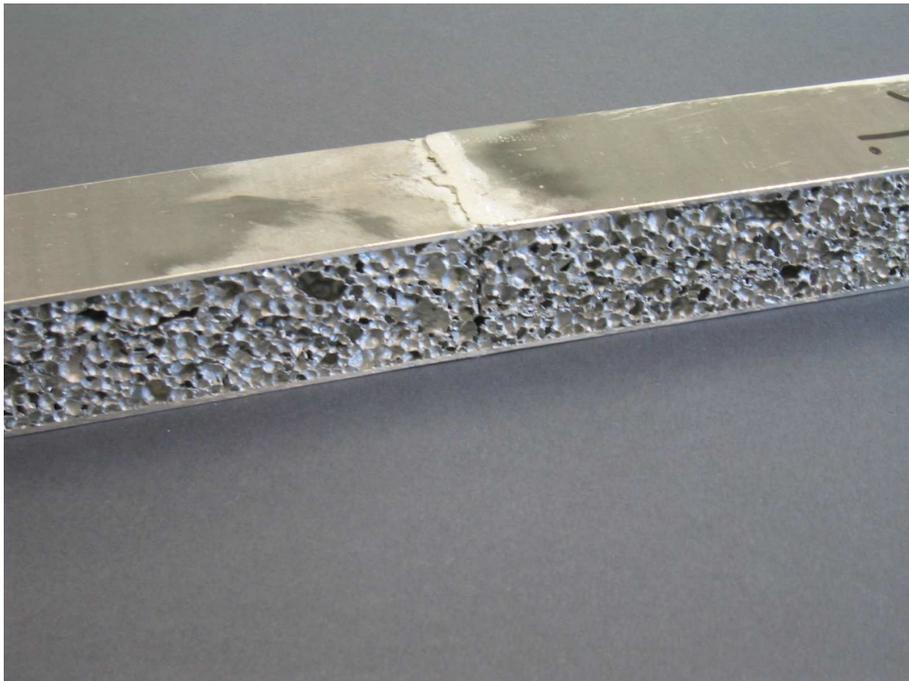


Bild 64: Stumpfstoßverbindung mit I-Schweißnaht

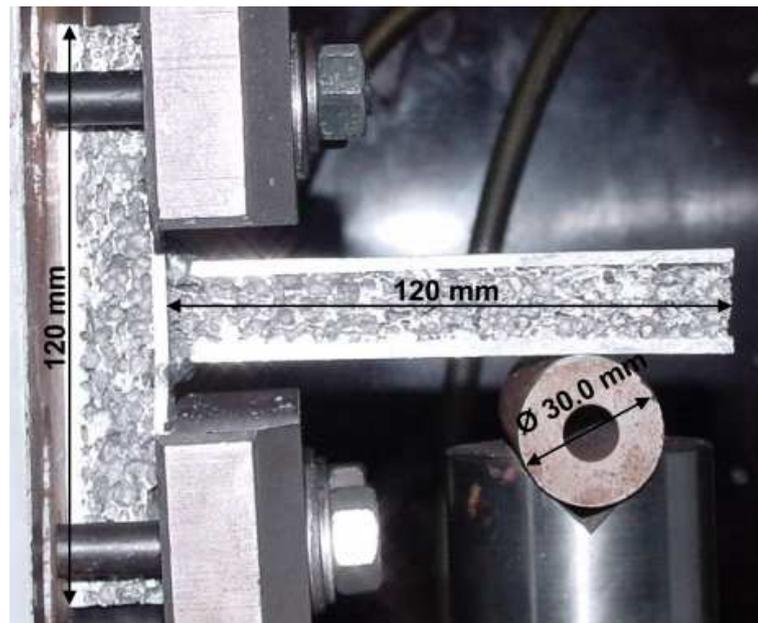


Bild 65: T-Stoßverbindung mit Kehlnaht

4.5.1.2 Qualitative Beurteilung von Schweißverbindungen

Stumpfstoßverbindungen

Untersuchungen zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften einer Decklagenverschweißung im Stumpfstoß wurden mittels 4-Punkt-Biegeversuche an WIG- und MIG-geschweißten Sandwichverbunden durchgeführt. Als Referenz wurden auch die ungeschweißten Proben mittels gleichen Prüfverfahrens getestet. Bild 66 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau mit einer ungeschweißten Probe, die sich durch das Auftreten von Scherversagen im Schaummaterial auszeichnet.

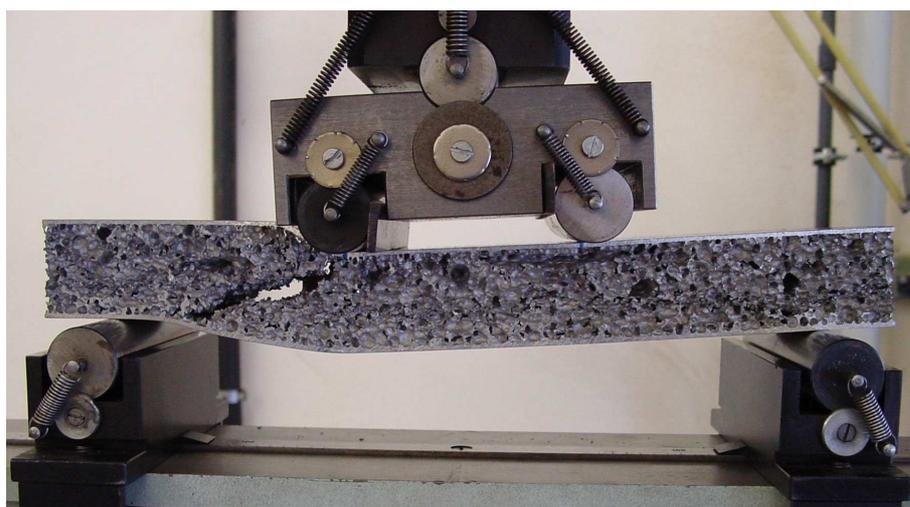


Bild 66: Prinzip des 4-Punkt-Biegeversuchs mit Schaumversagen infolge Scherkraftanteil

Im Bild 67 sind die unterschiedlichen Versagensformen der geschweißten Sandwichverbunde dargestellt. Es tritt entweder ein Scherversagen des Schaums oder ein Bruch der unteren Schweißnaht auf.



Bild 67: Versagensfälle beim 4-Punkt-Biegeversuch

Durch eine weitgehende Untersuchung mit mehreren Schweißproben ließ sich schlussfolgern, dass das Versagen der unteren Schweißnaht mit der Streuung der Schweißnahtausführung zusammenhängt. Die Mehrzahl der geschweißten Proben wies ein Scherversagen im Schaum auf, so dass ähnliche Kraft(Moment)-Durchbiegungsverläufe zwischen ungeschweißten und geschweißten Proben zu beobachten waren.

In Bezug auf die Anwendbarkeit von MIG- und WIG-Schweißen erreichen die MIG-geschweißten Proben subjektiv eine höhere Maximallast bei größerem Maschinenweg sowie eine geringere Streuung der Messergebnisse. Im Allgemeinen wurde, unter der Voraussetzung einwandfrei ausgeführter Schweißnähte, eine sehr gute Eignung beider untersuchten Schweißverfahren zum Fügen von Aluminiumschaumsandwichen festgestellt.

T-Stoßverbindungen

Die Untersuchungen zur Beurteilung der T-Stoßverbindungen wurden anlehnend an die ISO 9018:2003² durchgeführt. Der prinzipielle Versuchsaufbau der Prüfeinrichtung und die Einspannung der Probe zeigt Bild 68.

² - Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Zugversuch am Doppel-T-Stoß und Überlappstoß



Bild 68: Prüfeinrichtung zum Test der T-Stoßverbindung

Die Versuche wurden am Hydraulikaggregat HA130 mit einem servohydraulischen Prüfzylinder 25 kN mit dem Weg ± 100 mm durchgeführt. Alle Proben wurden mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 12 mm/min geprüft. Die Biegung erfolgte bis zum Andruck an die obere Lasche.

Die Versuche haben gezeigt, dass das Versagen der Proben auf zwei Ursachen basiert. Folgende Versagenskriterien wurden dabei festgestellt:

- Schubverformung im Schaum des Stegs: Das Versagen basiert auf der Schubverformung im Schaum des Stegs, so dass Risse in der Kernlage des Sandwiches (im Steg) entstehen. Infolge dieser Schubverformungen im Schaum wurde auch eine ausgedehnte Delamination im Sandwichsteg festgestellt. Weiterhin ist eine lokale Verformung in Umgebung der Schweißnähte vorhanden, diese ist jedoch nicht dominierend (Bild 69 links).
- Deformation der geschweißten Decklage des Gurtbleches: Das Versagen findet im eingespannten Sandwich statt. Aufgrund der Zugspannungen im Bereich der Schweißnähte wird die Verbindung zwischen dem Schaum und dem Gurtblech aufgelöst. Im gegenüberliegenden Druckgebiet wurde dabei das Stauchen des Schaums festgestellt. Die Delamination infolge von Zugkräften ist dabei mehr ausgeprägt. Der Steg bleibt bei diesem Versagen weitestgehend unverformt (Bild 69 rechts).



Bild 69: Versagenskriterien an der T-Stoßverbindungen; links: Versagen des Stegs, rechts: Delamination im Gurt

Die ermittelten Kennwerte für die maximale Kraft und das Biegemoment wiesen in den meisten Versuchen eine relativ große Streuung der Werte auf. So liegen beispielsweise die maximal ermittelten Kräfte aller untersuchten, MIG geschweißten Proben im Bereich von 1,21 kN bis 1,84 kN. Die Streuung des Biegemomentes wurde im Bereich von 57 Nm bei minimalen und maximalen Werten von 109 Nm und 166 Nm festgestellt. Diese Streuung ist vermutlich dadurch zu erklären, dass für das Versagen immer der Schaum mit seiner zufälligen Porenstruktur verantwortlich ist – Abscherung des Schaums im Steg oder Delamination im Gurt.

Im Ergebnis dieser Versuchsreihe wurde festgestellt, dass die Schweißnähte bei einer technologiegerechten Ausführung unkritisch sind und keine Schwachstelle bei diesem Lastfall darstellen.

4.5.2 Fügetechnik für Anbauteile

Im Rahmen der Entwicklung der Fügetechnik für Anbauteile am Aluminiumschaumsandwich wurden Untersuchungen zu Einnietmutter, Einnietbolzen, Schweißbolzen sowie mit geklebten Gewindeeinsätzen und Gewindebolzen durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen war die Anwendbarkeit der genannten Befestigungsverfahren für Aluminiumschaumsandwich.

Mechanisches Fügen – Einnietmuttern und Einnietbolzen

Zur Herstellung der Proben mit Einnietbolzen wurde in das Deckblech und in das darunter befindliche Kernmaterial ein Loch entsprechend dem Außendurchmesser der Niet gebohrt. Der Bolzen wird in das gebohrte Loch eingesetzt und mit einer Nietzange verklemmt. Hierbei stemmt sich die Nietzange an dem Deckblech ab und zieht an dem unteren Teil des Nietbolzens. Dieser wirft eine Klemmwulst auf und verklemmt das Deckblech zwischen dem oberen und unteren Teil des Einnietbolzens. Das Prinzip des Verfahrens zeigt schematisch Bild 70.

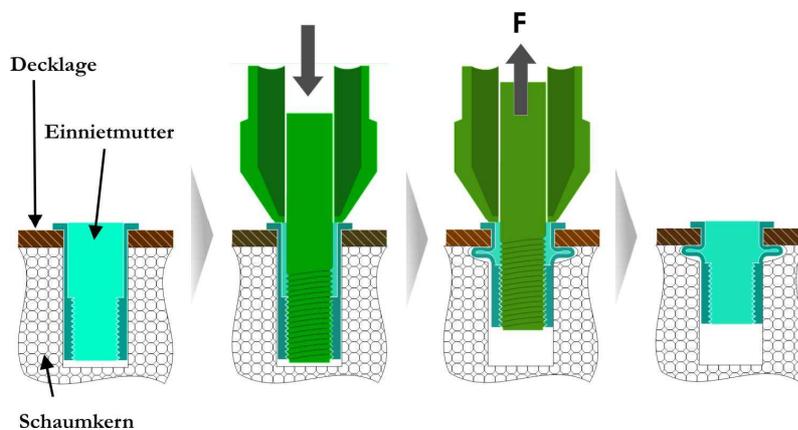


Bild 70: Prinzip des Verfahrens zum Anbringen der Einnietmutter am Aluminiumschaumsandwich

Die Herstellung der Proben mit Einnietbolzen ist mit einer Bolzenzange der Firma Masterfix MFX511Q1 durchgeführt worden. Als Einnietbolzen wurden verzinkte Stahlbolzen der Firma Filko der Dimension M8 x 3020 verwendet. Der Klemmbereich dieser Bolzen liegt bei Blechstärken von 0,3 – 3 mm. Als variable Parameter kann der Hub der Bolzenzange eingestellt werden. Bei den Versuchen hat sich der Wert von 5 – 6 mm als geeignet erwiesen. Bei kleineren Hubwerten war ein Verdrehen der Bolzen in der Bohrung möglich.

Die Proben mit Einnietmutter sind nach dem gleichen Verfahren hergestellt worden. Es wurden Einnietmutter aus verzinktem Stahl der Firma Filko Typ M8 x 3020 mit Senkkopf für den Klemmbereich von 0,3 – 3 mm sowie Einnietmutter aus Aluminium der Firma Titgemeyer Typ 336771 M 8 mit Flachkopf für den Klemmbereich 0,5 – 3 mm verwendet. Die Hubeinstellung der Zange ist hierbei ebenfalls mit 5 – 6 mm gewählt worden.

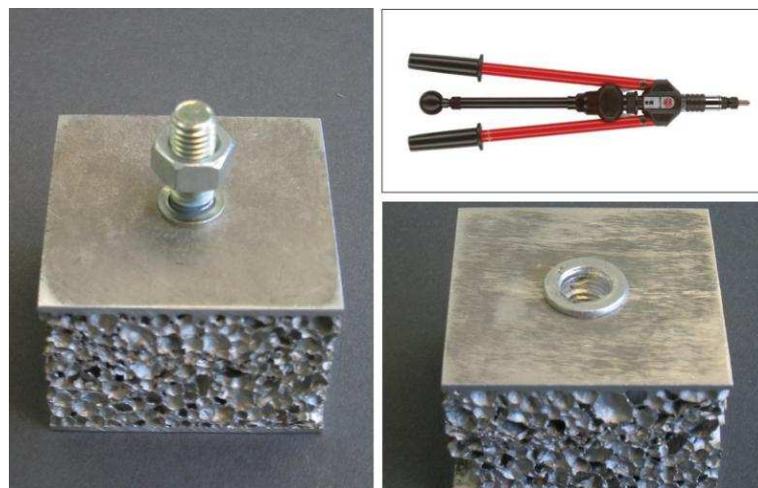


Bild 71: Bolzenzange sowie im Aluminiumschaumsandwich befestigte Verbindungselemente: Einnietbolzen (links) und Einnietmutter (rechts)

Schweißbolzen

Zur Herstellung der Schweißbolzenverbindung wurde ein der Firma Wilhelm Schmidt GmbH zur Verfügung stehendes Schweißgerät der Firma Soyer Typ BMS8N PS1 verwendet. Die verwendeten Schweißbolzen aus Aluminium AlMg3 mit Spitzenzündung wurden ebenfalls von der Firma Soyer bezogen. Hierbei sind Schweißbolzen mit dem Durchmesser von 8 mm verwendet worden.

Zur Vorbereitung der Schweißung musste lediglich die Oberfläche gereinigt werden. Anschließend wurde der Schweißbolzen mit einer Schweißzange aufgesetzt und verschweißt. Die Schweißgeräte sind im Bild 72 zu sehen.



Bild 72: SOYER-Bolzenschweißgerät BMS-8NV und Bolzenschweißpistole PS-1 mit Spitzenzündung

Bei den Schweißproben kann die Amperezahl als variabler Parameter verändert werden. Der Schweißstrom ist von 195 A bis 200 A variiert worden. Alle Proben haben eine visuell gute Verbindung aufgewiesen und wurden anschließend auf deren Materialkennwerte untersucht (s. Kapitel 4.5.2.3). Eine Übersicht der genieteten Verbindungselemente sowie Schweißbolzen stellt das Bild 73 dar.

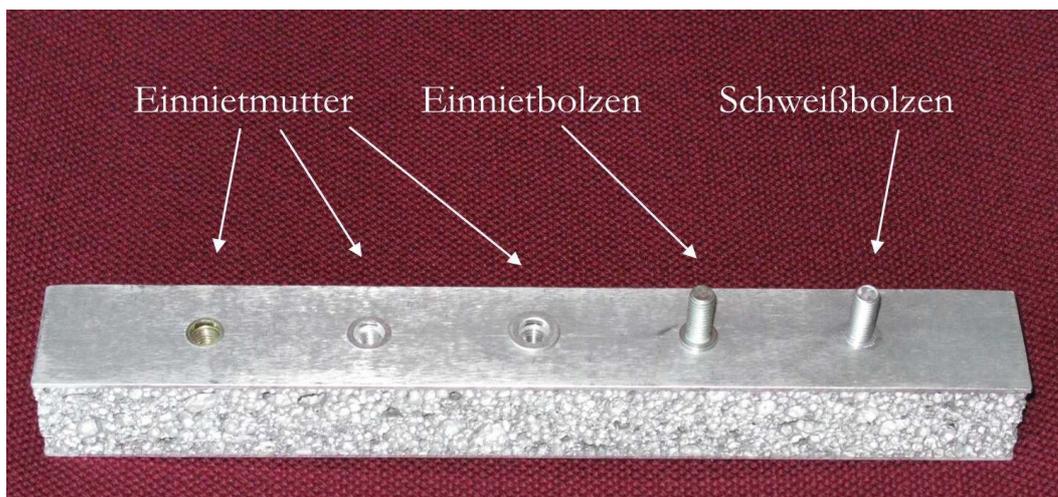


Bild 73: Genietete Verbindungselemente und Schweißbolzen

Klebertechniken – Gewindeeinsätze und Gewindebolzen

Ziel der Untersuchungen war es, eine zuverlässige Klebertechnik zum Fügen von Anbauteilen am Aluminiumschaumsandwich zu entwickeln. Das Kleben von Befestigungselementen wurde erfolgreich vorgenommen und hat sich somit als geeignete Klebertechnik erwiesen.

Die Aluminiumschaumsandwiche wurden in Proben mit den Abmessungen 60x60 mm zugeschnitten. Als Klebstoff kam ein Zweikomponenten Epoxidharz-Konstruktionsklebstoff Scotch-Welt™ 7240 B/A FR der Firma 3M zum Einsatz. Der Klebstoff ist für hochfeste, dauerhafte, zähelastische Klebungen ausgelegt und härtet bei Raumtemperatur aus. Als geeignete Befestigungselemente für Anbauteile haben sich die in die

Schaumstruktur eingeklebten Gewindeeinsätze sowie auf die Oberfläche aufgeklebte Gewindebolzen erwiesen (s. Bild 74). Die verwendete Gewindegröße wurde mit M8 festgelegt.

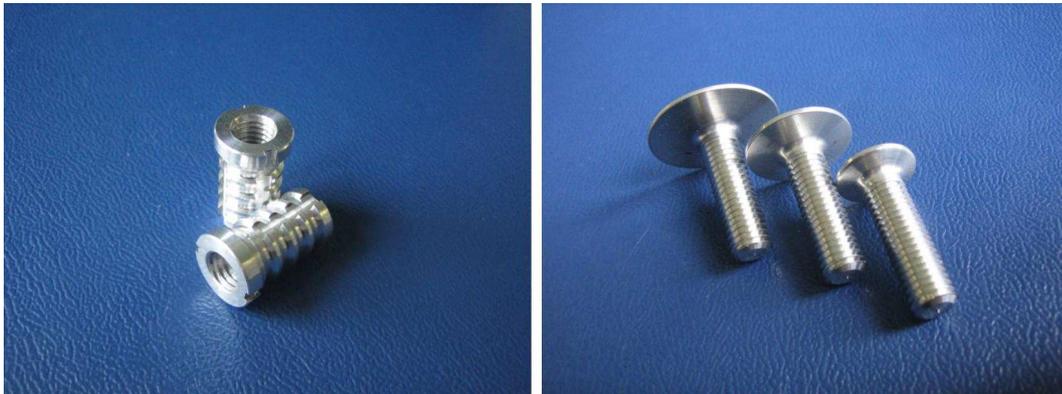


Bild 74: Verwendete Befestigungselemente; links: Gewindeeinsätze, rechts: Gewindebolzen

Die Maße der Befestigungselemente sind in der Tabelle 5 angegeben.

Gewindeeinsätze

| L, mm | D_f , mm | D_k , mm | Gewinde | t_g , mm |
|-------|------------|------------|---------|------------|
| 22 | 12 | 14 | M8 | 18 |

Gewindebolzen (3 Typen)

| L, mm | D_f , mm | R_f , mm | Gewinde | t_g , mm |
|-------|------------|------------|---------|------------|
| 30 | 28, 22, 16 | 1,5 | M8 | 25 |

Tabelle 5: Bemaßungen der Befestigungselemente

Zwei Komponenten des Klebstoffs sollten vor dem Gebrauch gemischt werden, wofür eine Mischpistole MIXPAC® System 400 mit einer Mischdüse verwendet wurde (Bild 75).

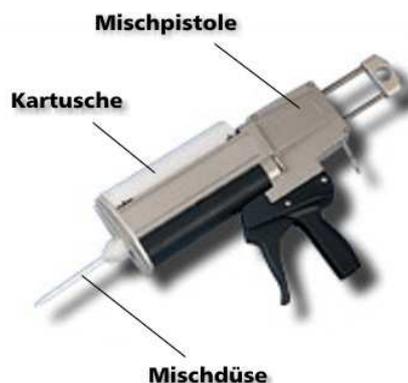


Bild 75: Mischpistole MIXPAC System 400

4.5.2.1 Einkleben der Gewindeinsätze

Zum Einkleben der Gewindeinsätze wurden in den Proben Bohrungen mit einem Durchmesser von 14 mm und einer Tiefe von 22 mm eingebracht. Diese Bohrung wird vollständig mit dem Klebstoff ausgefüllt und der Gewindeinsatz in diese Bohrung eingedrückt. Die Reste des Klebstoffes konnten durch die im Gewindeinsatz eigens dafür vorgesehenen Öffnungen ausfließen und anschließend von der Oberfläche entfernt werden. Die Aushärtung des Klebstoffs erfolgte bei Raumtemperatur.

Bild 76 stellt eine Probe aus Aluminiumschaumsandwich mit dem eingeklebten Gewindeinsatz dar.

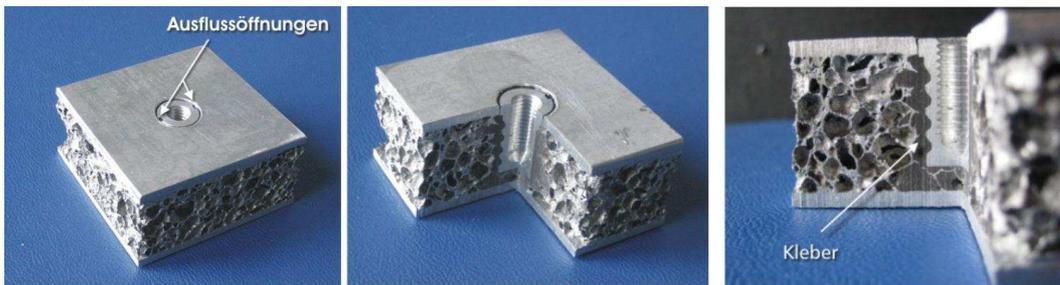


Bild 76: Gewindeinsatz im Aluminiumschaumsandwich

Um beurteilen zu können, ob sich die Porenstruktur vollständig ausfüllt, wurden ausgewählte Proben geschnitten. Im Bild 76 rechts ist solche Probe dargestellt. Dabei ist sehr gut zu sehen, dass die Poren vollständig ausgefüllt sind, so dass zwischen dem Einsatz und der Porenstruktur im Sandwich eine fehlerfreie Klebverbindung gewährleistet wird.

4.5.2.2 Aufkleben der Gewindebolzen

Weitere zu untersuchende Befestigungselemente sind Gewindebolzen. Diese werden ohne Beschädigung des Deckblechs und der Schaumstruktur direkt auf die Sandwichoberfläche aufgeklebt. Der Einfluss der Klebeflächengröße sollte ermittelt werden. Es wurden Gewindebolzen mit drei unterschiedlichen Klebeoberflächen festgelegt (16 mm, 22 mm und 28 mm).

Um eine hochfeste Verbindung zwischen Aluminiumdeckblech des Sandwiches und der Klebefläche des Bolzens zu erzielen, sollte die Oberfläche des Bleches entsprechend vorbereitet werden. Um grobe Verunreinigungen zu entfernen sowie die Oberfläche des Bleches anzurauen, wurde die Oberfläche mit Schleifpapier Scotch-Brite™ very fine der Firma 3M angeschliffen. Das Entfetten der Oberfläche erfolgte mit Isopropanol. Kurz nach der Oberflächenreinigung wurden die Gewindebolzen aufgeklebt. Der Andruck bis zur Aushärtung ist dabei nicht notwendig. Wie bei Gewindeinsätzen wurden die Proben bei Raumtemperatur ausgehärtet. Die Proben mit aufgeklebten Bolzen aller drei Typen kann man im Bild 77 sehen. Um die maximale Festigkeit der Verbindung zu erreichen, sollte die

Klebschicht nach Angaben des Herstellers möglichst dünn sein. Im Querschnitt der Probe auf dem Bild 77 rechts ist gut zu sehen, dass diese Bedingung mit Sicherheit erfüllt wird.

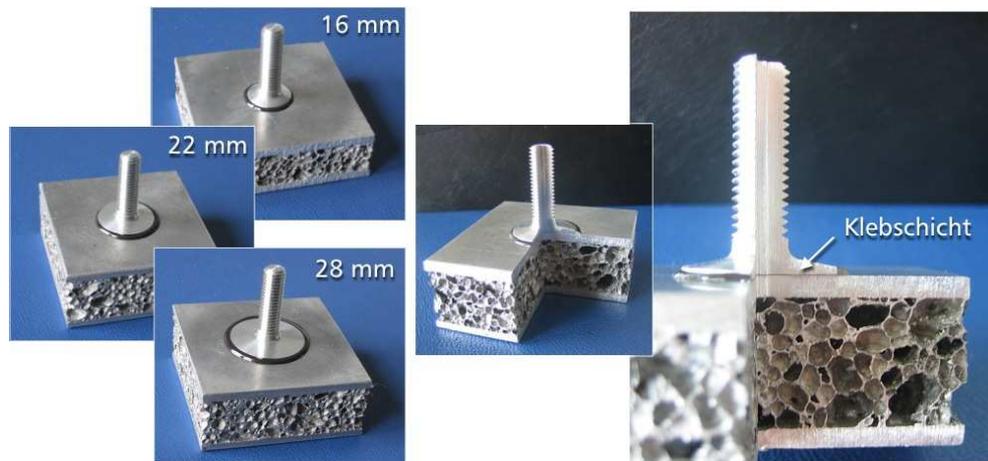


Bild 77: Gewindebolzen: 16 mm, 22 mm und 28 mm

4.5.2.3 Charakterisierung der Fügeverbindungen

Die gefertigten Proben mit allen Verbindungselementen wurden anschließend durch Belastungsversuche untersucht. Es wurden zwei Prüfverfahren festgelegt – die Ermittlung der Anziehungskraft im Zugversuch sowie die Ermittlung des Verdrehmomentes im Torsionsversuch.

Zugversuche

Die Zugversuche zur Ermittlung der maximalen Anziehungskraft der Verbindungselemente wurde mit der im Bild 78 dargestellten Vorrichtung durchgeführt. Die Anzahl der zu prüfenden Proben wurde mit 5 Proben pro Befestigungselement festgelegt. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur und einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt.

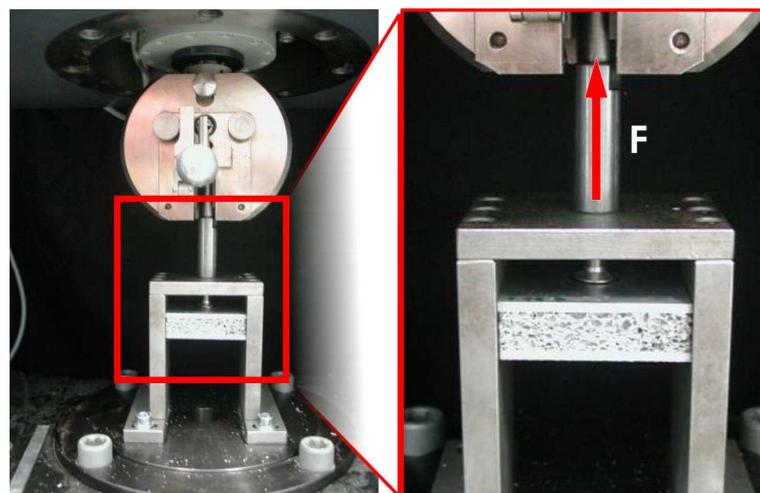


Bild 78: Versuchsvorrichtung zur Ermittlung der Anzugskraft

Tabelle 6 stellt die im Versuch ermittelten Werte dar. Es ist gut zu sehen, dass die Verbindungen ganz unterschiedliche Kräfte von 2,76 bis zu 13,5 kN aushalten. Insbesondere die Verbindungen mit Inserts haben eine ausgezeichnete Verbindungsleistung gezeigt. Die ermittelten Werte liegen mit 13,5 kN deutlich oberhalb der ermittelten Kräfte anderer Elemente. Auf Platz 2 der maximalen Anzugskraft liegen die aufgeklebten Gewindebolzen mit einer Anzugskraft von 5,2 bis 7,5 kN. Der Unterschied der ermittelten Kräfte ist durch unterschiedliche Klebeflächen (16, 22 und 28 mm) bedingt.

| Verbindungselement | Maximale Anzugskraft, kN |
|-----------------------------|--------------------------|
| eingeklebte Gewindeeinsätze | 13,5 |
| aufgeklebte Gewindebolzen | 5,2 ... 7,5 |
| Nietmutter | 4,17 |
| Nietschrauben | 4,11 |
| Schweißbolzen | 3,7 |
| Nietmutter Aluring | 2,94 |
| Nietmutter Senkkopf | 2,76 |

Tabelle 6: Gegenüberstellung der im Zugversuch maximal erreichten Kräfte aller Verbindungselemente

Im Bild 79 sind die ermittelten Kräfte für die jeweilige Klebefläche dargestellt. Wie erwartet steigt die Anzugskraft mit größer werdender Klebefläche.

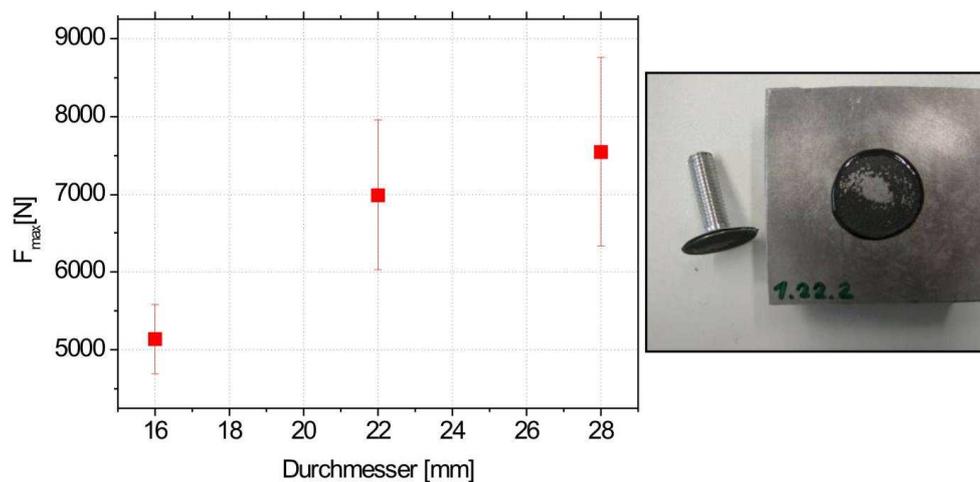


Bild 79: Die im Zugversuch maximal ermittelten Kräfte der Verbindungen mit aufgeklebten Bolzen

Die mechanischen Verbindungselemente sowie Schweißbolzen haben eine schlechtere Verbindungsleistung gezeigt. Die ermittelten Werte liegen hier unter ca. 4 kN.

Deutlich niedrigere Werte der letzten Verbindungselemente im Vergleich zu den eingeklebten Inserts sind leicht zu erklären. Die Ursache einer hohen Verbindungsleistung der Inserts liegt im Kraftschluss im Sandwich. Im Gegensatz zu Einnietmutter, Einnietbolzen und Schweißbolzen, wo die Verbindung ausschließlich durch Deckblech gegeben ist, besteht Kraftschluss bei Inserts nicht nur mit Deckblech, sondern auch mit der Porenstruktur des Schaums.

Das Bild 80 stellt die Versagenskriterien verschiedener Verbindungen dar. Es ist deutlich zu sehen, dass das Versagen beim Schweißbolzen und bei der Einnietmutter durch Delamination der Decklage hervorgerufen ist. Im Gegensatz war Versagen beim Gewindeeinsatz im Klebstoff. Das Sandwich blieb unbeschädigt. Das bedeutet außerdem, dass bei einer entsprechenden Formoptimierung des Inserts eine weitere Leistungssteigerung der Verbindung möglich ist.

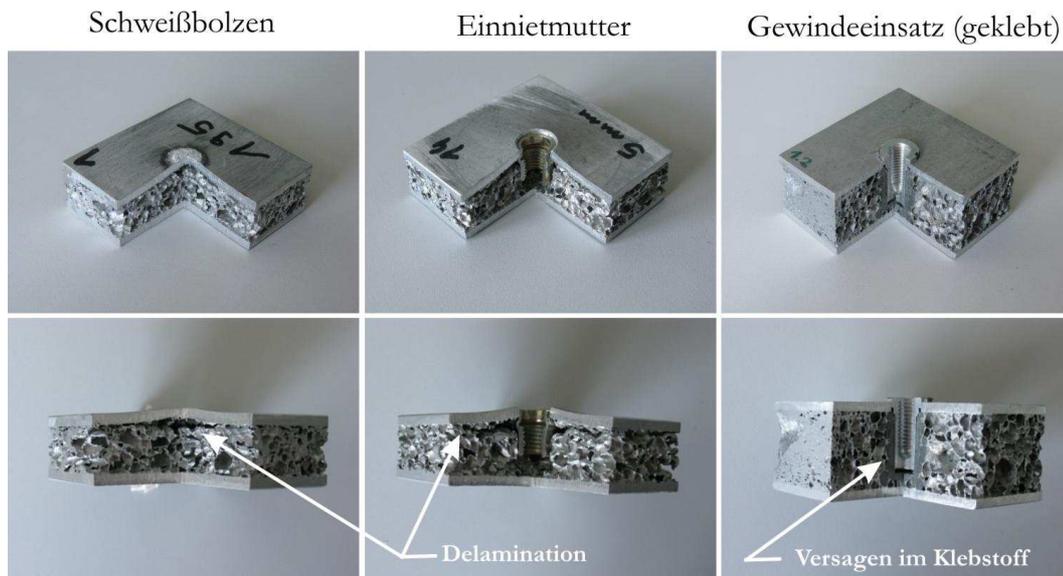


Bild 80: Versagenskriterien beim Zugversuch

Durch die Delamination der Decklagen entsteht an der Sandwichoberfläche eine Wölbung, wobei dies bei Einnietmutter und Einnietbolzen besonders ausgeprägt ist. Die Oberfläche der Sandwiche mit eingeklebten Inserts bleibt dagegen unverformt (vgl. Bild 81.)

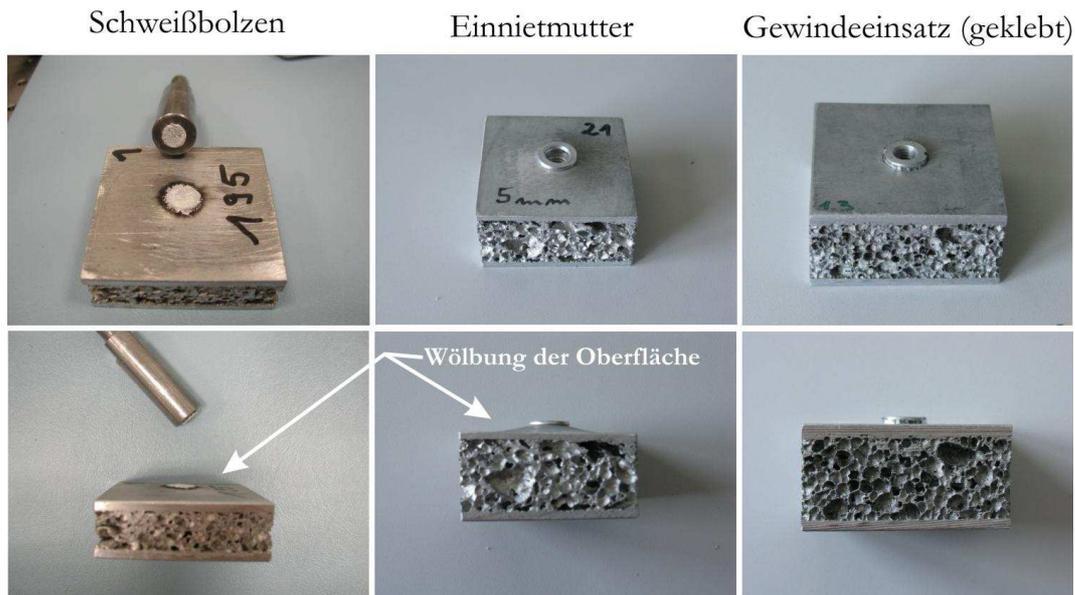


Bild 81: Proben nach dem Versuch

Torsionsversuche

Eine weitere Versuchsreihe war die Ermittlung des Anzugs- bzw. Verdrehmomentes. Der Aufbau der Versuchseinrichtung ist im Bild 82 dargestellt. Die Probe wurde zwischen zwei senkrecht stehenden Platten eingespannt und das jeweilige Verbindungselement wurde mit einem Drehmoment bis zum Versagen belastet.

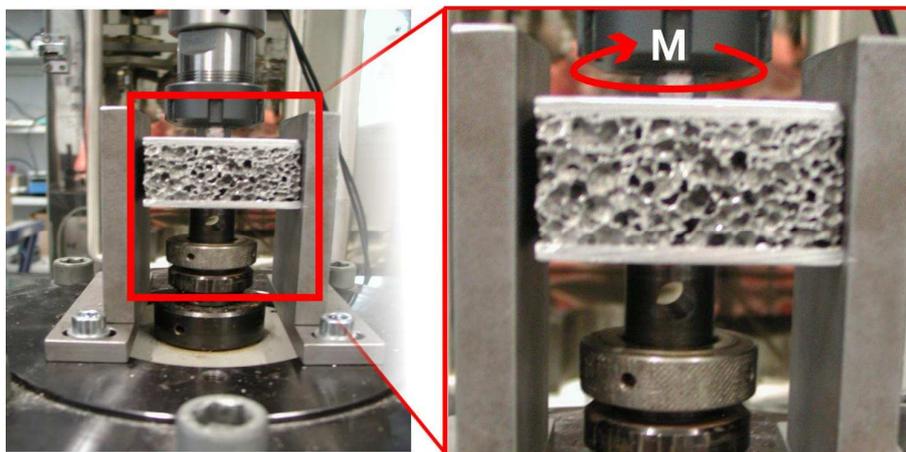


Bild 82: Versuchseinrichtung zur Ermittlung des Anzugs-/ Verdrehmomentes

Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Tabelle 7 veranschaulicht weitere Versuchsbedingungen.

| Kraftbereich, Nm | Vormoment, Nm | Geschwindigkeit, 1/s |
|------------------|---------------|----------------------|
| 100 | 0,1 | 0,5 |

Tabelle 7: Versuchsbedingungen beim Torsionsversuch

Bei allen Torsionsversuchen mit aufgeklebten und geschweißten Gewindebolzen kam es bei üblichen Werten des maximalen Anzugsmoments von 12,5 Nm für M8 Gewinde zum Bruch der Bolzen. Bild 83 zeigt exemplarisch den Drehmomentverlauf von aufgeklebten Gewindebolzen.

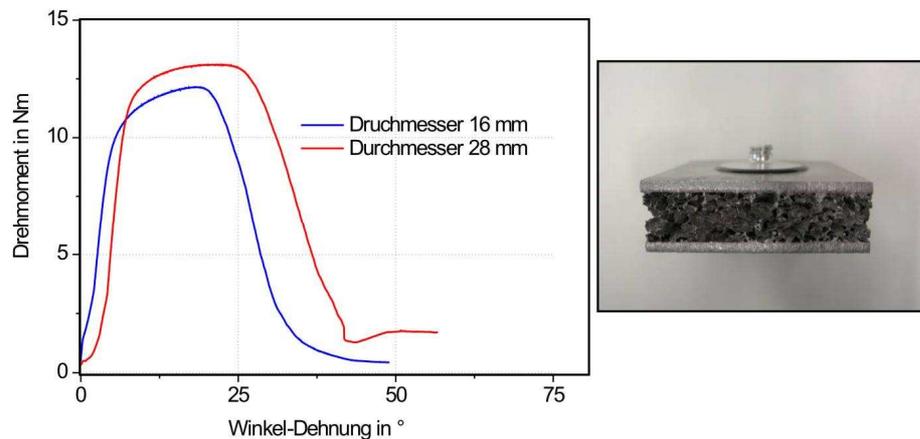


Bild 83: Drehmomentverläufe während des Versuchs mit aufgeklebten Bolzen (16 mm und 28 mm)

Bei einer Klebefläche von 16 mm als auch bei einer Klebefläche von 28 mm wurde bei einem Drehmoment von etwa 12 Nm bzw. 13 Nm das Gewinde vollständig vom Rumpf der Probe abgedreht. Die Klebefläche blieb bei diesem Experiment unbeschädigt. Die Versuche mit anderen Verbindungselementen zeigten ebenso, dass das Versagen immer in der Probe und nicht in der Verbindungszone stattgefunden hat.

Zusammenfassend kann man sagen, dass alle untersuchten Verbindungselemente zum Befestigen von Bauteilen am Aluminiumschaumsandwich gut geeignet sind. Je nach Anforderungen und Anwendungsfall sollte ein entsprechendes Verbindungselement ausgewählt und eingesetzt werden. So eignen sich beispielsweise eingeklebte Inserts für Hochleistungsverbindungen mit hoher erforderlicher Anzugskraft. Andererseits, wenn keine hohe Anzugskraft nötig ist und z. B. die Anzahl der Verbindungselemente sehr hoch ist, können die Einnietelemente oder Schweißbolzen gut eingesetzt werden.

5 Herstellung des Demonstrators „Frontmodul“

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Versuche zur Herstellung des Demonstrators „Frontmodul eines ITINO-Triebzuges“ aus Aluminiumschaumsandwich erläutert. Somit ist das Kapitel das zusammenfassende Teil, das den Einsatz der entwickelten Technologien an einem praxisnahen Prototyp darstellt.

Der Demonstrator „Frontmodul“ ist die Führerkabine des ITINO-Triebzuges im Maßstab 1:1. Ein CAD-Model ist im Bild 84 zu sehen.

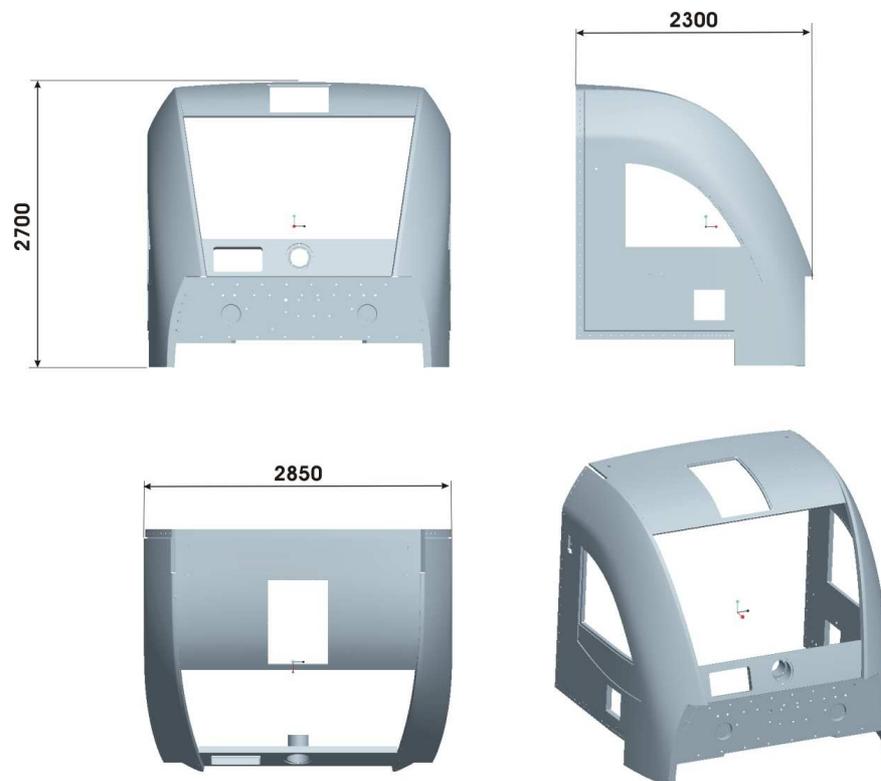


Bild 84: CAD-Model der ITINO-Führerkabine

Die Aufgabe bestand darin, das Frontmodul in entsprechende Segmente zu zerlegen sowie Werkzeuge für alle Segmente zu konstruieren und zu fertigen. Nachfolgend sollten die Aluminiumschaumsandwiche mit der entwickelten Technologie umgeformt und aufgeschäumt werden und abschließend zum ganzen Frontmodul zusammengefügt werden.

5.1 Konstruktion und Fertigung der Werkzeuge

Teilung des Frontmoduls in Segmente

Das Frontmodul besteht aus dem Dach, zwei Seitenwänden und der Stirnwand. Es wurde festgelegt, die rechte Hälfte des Frontmoduls (in Fahrtrichtung gesehen) als Demonstrator herzustellen. Da die beiden Seitenwände die gleiche Form aufweisen und das Dach symmetrisch ist, hat es auf den Herstellungsprozess bzw. auf die Technologie und Ergebnisse keinen Einfluss. Die Stirnwand sollte ursprünglich nicht aus dem Aluminiumschaumsandwich hergestellt werden und kam daher nicht in Frage. Es waren für den Demonstrator zwei Bauteile zu fertigen: eine Dachhälfte und die rechte Seitenwand (s. Bild 85):

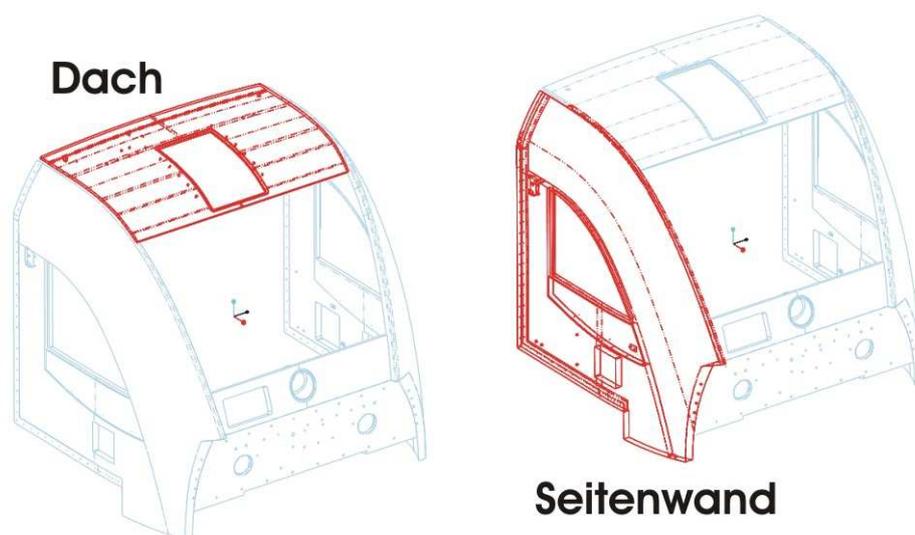


Bild 85: Die herzustellenden Bauteile: das Dach (herzustellen war nur die Hälfte) und die Seitenwand

Durch die Größe des zur Verfügung stehenden Aufschäumofens sowie die großflächigen Bauteile in der Konstruktion des Frontmoduls war die Zerlegung in Segmente erforderlich. Aufgrund der Komplexität der ganzen Baugruppe musste das Frontmodul eingehend analysiert werden, um optimale Schnittstellen zu definieren. Bei der Festlegung der Schnitte wurde insbesondere auf die unterschiedlichen Umformgrade sowie das nachträgliche Fügen der Segmente geachtet.

Das Dach ist ein dreidimensional gekrümmtes und in einer Richtung symmetrisches Teil. Die rechte Hälfte des Dachs wurde in weitere zwei Segmente (D1 und D2) zerlegt. Die Teilung des Dachs ist schematisch im Bild 86 dargestellt.

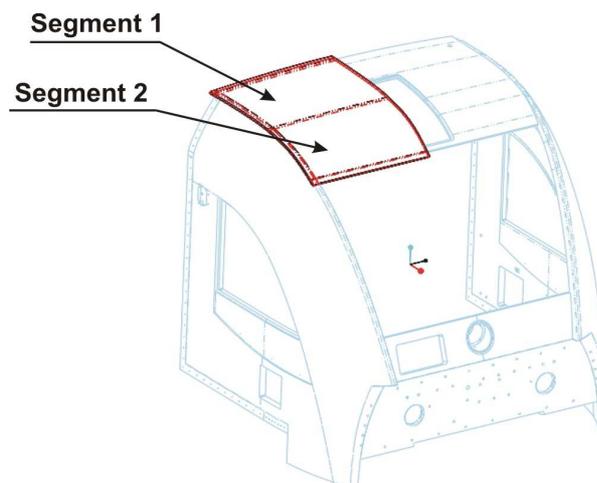


Bild 86: Teilung des Dachs zur Fertigung

Die Seitenwand (s. Bild 87) besteht aus zwei flachen Bereichen (T1 und T2) neben dem Fenster, einem zweidimensional gekrümmten Segment (T3) sowie aus einer formkomplexen A-Säule. Bedingt durch die Größe und Form musste die A-Säule in weitere Segmente zerlegt werden (s. Bild 88). So waren zur Herstellung des Demonstrators insgesamt neun Segmente zu fertigen, die anschließend gefügt werden mussten.

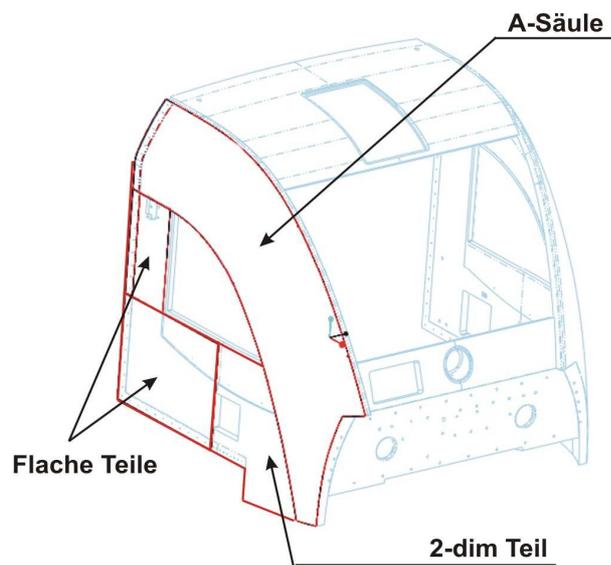


Bild 87: Teilung der Seitenwand

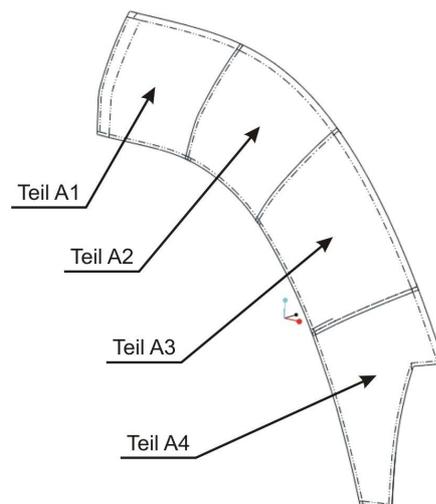


Bild 88: Teilung der A-Säule in Segmente

Herstellung der Werkzeuge

Für beide Dachteile sowie alle Segmente der A-Säule musste je eine Umform-/Aufschäumvorrichtung hergestellt werden. Da sich die im Abschnitt 4.3.1 beschriebene Technologie als beste erwies, wurde sie zur Herstellung von Werkzeugen verwendet.

Die Werkzeugteile sollten entsprechend den Segmenten des Frontmoduls ausgelegt werden und anschließend zusammenschweißt werden. Als Grundplatten für Werkzeuge dreidimensional gekrümmter Bauteile kamen 5mm-NIROSTA-Stahlbleche zum Einsatz. Die Versteifungsstege aus gleichem Material wurden nach der Form des Stempels und der Matrize durch Laserstrahlschneiden zugeschnitten. Die durch 3D-Biegen umgeformten 10 mm-Bleche (Stempel und Matrize) wurden anschließend auf die Grundplatte mit Versteifungsstegen aufgeschweißt. Ein Werkzeug zum Umformen eines Frontmodulteils ist im Bild 89 zu sehen.



Bild 89: Das zusammengebaute Werkzeug zum Umformen eines Teils des Frontmoduls

Im Gegensatz zu den dreidimensionalen Segmenten der A-Säule sind zur Herstellung von flachen Teilen keine Umform- bzw. Aufschäumwerkzeuge notwendig. Die Bauteile konnten im Ofen auf einer Blechunterlage ohne Werkzeuge aufgeschäumt werden. Der Aufwand zur Herstellung der Werkzeuge für das Teil T3 war ebenso gering, da ihre Herstellung ohne formgebende Umformwerkzeuge und ohne Presse realisiert wurde. Die Formbleche für das Werkzeug dieses Bauteils wurden mittels 3-Walzen-Biegen hergestellt. Auch das Bauteil selbst wurde durch Walzbiegen umgeformt.

5.2 Modellbildung und Umformsimulation

Um das Umformen von Teilen des Demonstrators optimal durchführen zu können, wurde das Umformen mit Hilfe der FEM-Simulation abgebildet. Die ermittelten Ergebnisse wurden bei der Konstruktion der Werkzeuge und beim Umformprozess berücksichtigt.

Das FEM-Modell für das Bauteil A1 der Säule zeigt das Bild 90. Zu sehen ist die Matrize, der Stempel, das Sandwich sowie zwei Führungen zum Fixieren des Bauteils im Werkzeug während des Umformens.

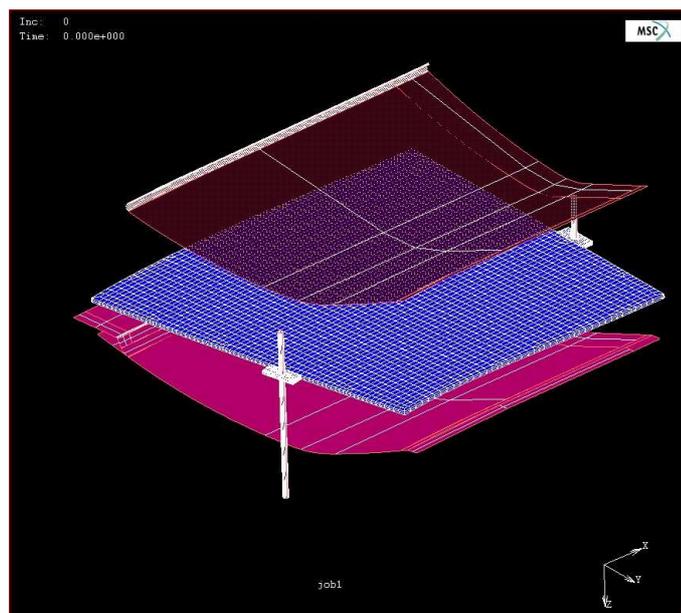


Bild 90: Simulationsmodell, Bauteil A1 vor dem Umformen

Die Modelle wurden für alle Segmente der A-Säule erstellt und es wurden Berechnungen des Umformverhaltens durchgeführt. Wie bei der Simulation der Probengeometrie und des Fronmodulsegments wurden die Kennwerte für die Aluminiumlegierung 6061 verwendet. Durch die Simulation wurde der Einzug von Sandwichbereichen beim Umformen analysiert und notwendige Änderungen von Sandwichzuschnitten für das optimale Umformen vorgenommen. Das Ergebnis - das Modell nach dem Umformen - ist im Bild 91 zu sehen. Die gelben (hellen) Bereiche zeigen den Kontakt des Werkstückes mit dem Werkzeug.

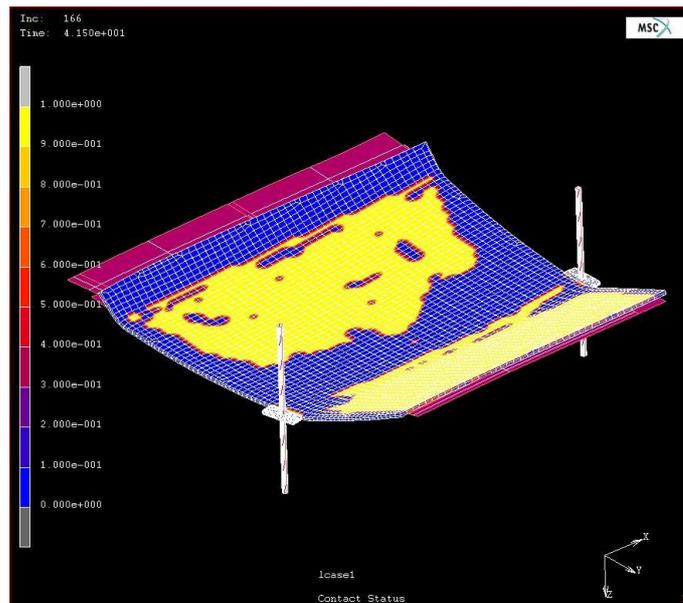


Bild 91: Ergebnis der Berechnung des Umformprozesses für das Teil A1

5.3 Umformen von Bauteilen des Frontmoduls

Die Sandwiche wurden nach entsprechendem Maß durch Wasserstrahlschneiden zugeschnitten. Zum Umformen wurden die Aluminiumschaumsandwiche auf 450°C erwärmt. Da die Segmente für alle Bauteile in einem Staffeln erwärmt wurden (Bild 92), konnte die Zeit zur Erwärmung wesentlich verringert werden. Außerdem führte es zu einer wesentlichen Energieeinsparung. Nach dem Vorwärmen konnten die Sandwiche nacheinander ohne Zwischenerwärmung umgeformt werden.



Bild 92: Erwärmung der Sandwichplatten zum Umformen

Die Umformung erfolgte mit einer an der BTU vorhandenen hydraulischen Presse. Die in die Presse eingebaute Umformvorrichtung ist im Bild 93 zu sehen. Da die Festigkeitswerte

vom Aluminium bei 450°C relativ gering sind, ist bei einer Produktion in Industriemaßstäben keine kostenintensive Presse erforderlich. Eine einfachere und preiswerte Druckvorrichtung ist völlig ausreichend.

Gleich nach der Umformoperation wurden die umgeformten Aluminiumschaumsandwiche aus dem Umformwerkzeug entnommen und auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei einer Serienfertigung kann die Umformwärme auch während des Aufschäumvorgangs genutzt werden, indem die Bauteile nach dem Umformen gleich zum Aufschäumen transportiert werden. Nach dieser Technologie wurden folgende Teile für vier Demonstratoren fehlerfrei hergestellt und zum Aufschäumen vorbereitet:

- Bauteile für das Dach: D1 und D2 (umgeformt in der Presse)
- Bauteile für die A-Säule: A1, A2, A3 und A4 (umgeformt in der Presse)
- Dreidimensional gekrümmte Teile: T3 (umgeformt durch Dreiwalzenbiegen)
- Flache Teile: T1 und T2 (zugeschnitten mit Wasserstahl)

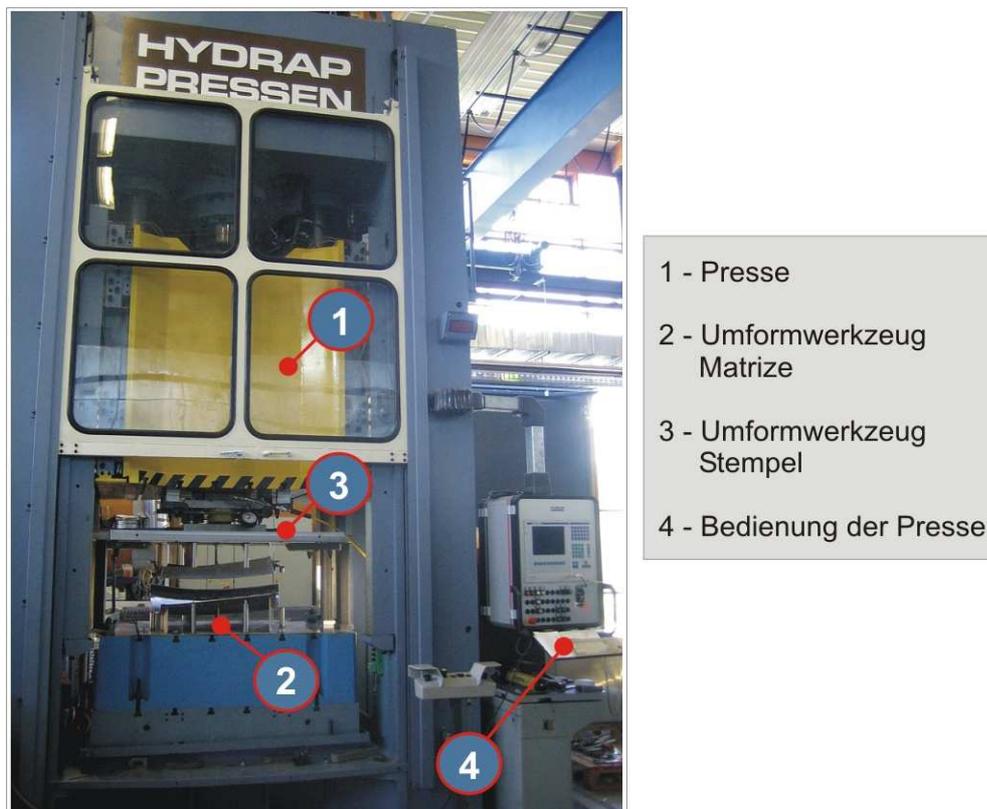


Bild 93: Umformpresse mit der eingebauten Umformvorrichtung

Bevor die Teile zum nächsten Fertigungsschritt „Aufschäumen“ kamen, wurden sie nach der Abkühlung auf Maßgenauigkeit geprüft. Dafür mussten die Teile der A-Säule miteinan-

der verbunden werden. An den Anschlussstellen wurde dann die Maßgenauigkeit kontrolliert.

Im Bild 94 werden die Anschlussstellen der A-Säule-Segmente gezeigt. Es ist ersichtlich, dass die Genauigkeit der umgeformten Aluminiumschaumsandwiche an den Anschlussstellen hoch genug ist, um ein perfektes Zusammenschweißen der Teile miteinander zu ermöglichen.



Bild 94: Maßgenauigkeit der Anschlussstellen bei den Teilen der A-Säule

5.4 Das Aufschäumen von Segmenten

Das Aufschäumen der Frontmoduleteile erfolgte am Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in Chemnitz unter Beachtung der gesammelten Erfahrungen mit der Sandwichrinne und dem Frontmodulesegment. Durch das Anbringen von Abstandsstücken zwischen der Werkzeugmatrize und dem Werkzeugstempel wurde die Aufschäumhöhe begrenzt. Beim Aufschäumen drückt das obere Deckblech des Bauteils gegen den Oberstempel und liegt dort gleichmäßig an.

Das Werkzeug zum Aufschäumen wurde zunächst vorgewärmt. Um ein besseres Durchwärmen des Aluminiumschaumsandwiches zu ermöglichen, wurde auf das umgeformte Sandwich Schlichte aufgetragen und somit eine matte Oberfläche erreicht, wodurch die Wärmeabstrahlung deutlich reduziert wird. Aufgrund der besseren Wärmezufuhr im Randbereich des Sandwiches wurde dieser Bereich ohne Schlichte gelassen. Nach einigen Versuchen konnte erreicht werden, dass eine gleichmäßige Wärmeverteilung im Bauteil gewährleistet ist. Dies ist unbedingt wichtig, da davon die Gleichmäßigkeit der Struktur des Schaums innerhalb des Bauteiles unmittelbar beeinflusst wird. Durch das Anpassen der

Verfahrensparameter konnte eine gleichmäßige Schaumstruktur über alle Bauteile des Demonstrators erzielt werden.

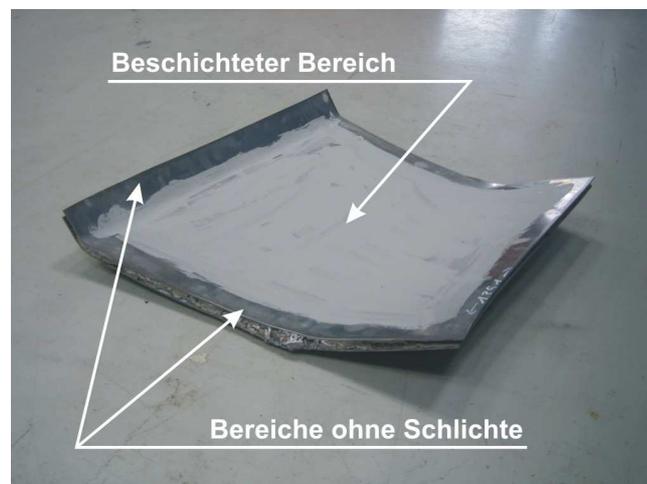


Bild 95: Beschichtung des Sandwiches mit Schlichte

In das vorgewärmte Werkzeug wurde das Bauteil eingelegt und mit einem Gabelstapler in den Ofen eingeschoben. Der Aufschäumprozess wurde durch das Fenster des Ofens beobachtet. Nach ca. 25 bis 40 Minuten (je nach Bauteil) konnte das Bauteil aufgeschäumt aus dem Ofen entnommen werden. Das Bild 96 zeigt das Bauteil beim Entnehmen aus dem Ofen.

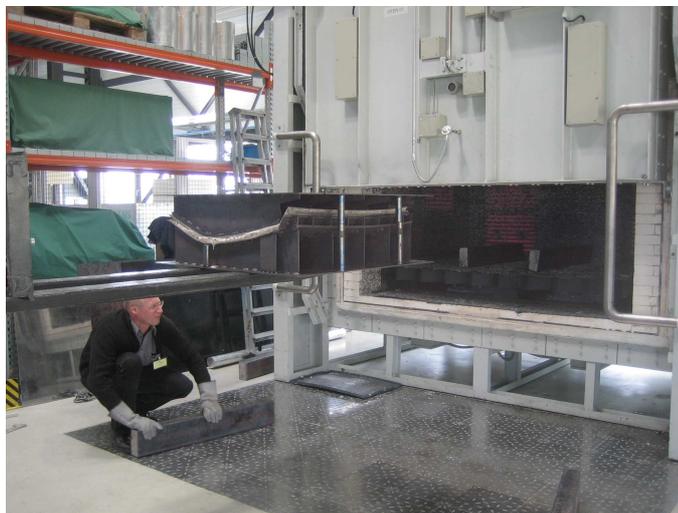


Bild 96: Ein aufgeschäumtes Bauteil beim Entnehmen aus dem Ofen

5.5 Fügen von aufgeschäumten Bauteilen

Der erste Schritt beim Fügen des Frontmoduls bestand im Zusammenfügen von aufgeschäumten A-Säule-Teilen. Danach wurden andere Teile der Seitenwand sowie die Dachteile an die A-Säule angeschweißt. Das Fügen der Bauteile erfolgte beim Projektpartner Wilhelm Schmidt.

Die Ränder der aufgeschäumten Teile wurden vor dem Fügen abgeschnitten, um eine entsprechende Vorbereitung zum Schweißen zu gewährleisten. Die Teile wurden nach Matrizenmaß angerissen und abgeschnitten. Ein Teil der A-Säule nach dem Abschneiden der Ränder sieht man im Bild 97.



Bild 97: Ein Teil der A-Säule nach dem Abschneiden der Ränder

Zum Fügen der Frontmodulteile wurde eine entsprechende Vorrichtung entwickelt und gefertigt. Sie besteht aus einem Hauptrahmen, auf dem L-Profile in einem festgelegten Raster geklemmt sind. Zwischen diesen sind Gewindestangen so angebracht, dass die Spitzen der Gewindestangen der Kontur der fertigen Seitenwand entsprechen (s. Bild 98). An den Außenkanten der eingelegten Segmente befinden sich Anschläge, die auf dem Fertigmaß des Triebkopfes angebracht sind. Beim Einlegen der Segmente werden die Stoßstellen zwischen den Segmenten zueinander angepasst.



Bild 98: Vorrichtung zum Schweißen der Seitenwand

Die zugeschnittenen Segmente wurden in die Schweißvorrichtung eingelegt und an den Stoßstellen mit Schraubzwingen fixiert (s. Bild 99).



Bild 99: Einlegen einzelner Bauteile in die Vorrichtung

Das Fügen des Frontmoduls erfolgte in folgenden Schritten:

1. Zusammenfügen der A-Säule-Teilen A1, A2, A3 und A4
2. Anschweißen der flachen Teile T1 und T2 zur A-Säule
3. Anpassung und Anschweißen des Teils T3
4. Zusammenschweißen der Dachteile D1 und D2
5. Anschließende Verbindung des Dachs zur Seitenwand.

Nach dem Fixieren aller Teile der Seitenwand wurden sie durch Schweißen geheftet (s. Bild 100).



Bild 100: Heften der Teile durch Schweißen

Nachdem alle Segmente durch Heftschweißungen miteinander verbunden waren, begann die Schweißnahtvorbereitung. Dazu wurden die Stoßstellen mit den Heftschweißungen Stück für Stück mit einer Handkreissäge aufgeschnitten. Die Dicke des Kreissägeblattes bestimmt dabei die Spaltbreite von 3mm. Die Schnitttiefe beträgt dabei 3mm (Dicke des Deckbleches). Anschließend wurden die Segmente durch I-Nähte miteinander verbunden. Als Schweißverfahren kam das MIG-Schweißen zum Einsatz.

Durch das Aufsägen der Stoßstellen und der Heftnähte wurde ein homogenes Schweißergebnis über die gesamte Nahtlänge erreicht. Nach dem Zusammenschweißen aller Segmente auf der Innen- und der Außenseite wurden die Nähte auf der Außenseite bis zur Deckblechaußenseite eingeebnet und anschließend glattgeschliffen. Im Bild 101 ist ein zusammengefügter Demonstrator zu sehen.



Bild 101: Das zusammengefügte ITINO-Frontmodul

Zu den letzten Schritten in der Fertigung des Frontmoduls zählten die Anbringung der Einfassprofile im Bereich des Fensters und der Windschutzscheibe sowie der Anschlussprofile im Bereich der Ankopplung zum Wagenkasten. Dazu wurden an diesen Stellen die Deckbleche des Sandwiches mit Fasern für die HV-Naht versehen. Anschließend wurden die Profile angeschweißt.

Nachdem alle Schweißarbeiten am Frontmodul beendet waren, begann die Nachbehandlung der Oberfläche. Die Oberfläche des Frontmoduls wurde nach Schweißspritzern abgesehen und eventuelle Schweißspritzer wurden mit einem Winkelschleifer mit Sandpapier-scheibe vorsichtig abgeschliffen.

Anschließend erfolgte die Vorbereitung zum Lackieren. Um einen tragfähigen Untergrund für die späteren Lackschichten zu erhalten, konnte auf verschiedene Möglichkeiten wie z. B. Anschleifen der Oberfläche oder Strahlen mit einem Strahlgut zurückgegriffen werden. Das Anschleifen ist bei so großflächigen Bauteilen wie das Frontmodul sehr zeitintensiv. Insbesondere in den Ecken ist das Schleifen sehr schwierig, da diese nicht gut erreichbar sind. Aus diesem Grund wurde das Frontmodul glasperlgestrahlt. Bei diesem Verfahren wird ein Strahlgut aus kleinen Glaskugeln mit hoher Geschwindigkeit auf die Oberfläche geschleudert, so dass aus der Oberfläche Partikel durch Abrasion abgelöst werden. Der Materialabtrag ist dabei sehr gering. Die Schwächung der Deckbleche ist somit ausgeschlossen. Durch das Glasperlstrahlen erfolgt zusätzlich eine Oberflächenverdichtung bzw. -verfestigung. Die Bauteilecken sind mit diesem Verfahren gut erreichbar. Mit anschließendem Lackieren war die Fertigung des Frontmoduls abgeschlossen. Das Ergebnis ist im Bild 102 dargestellt.



Bild 102: Das Frontmodul des ITINO-Triebzuges im Hauptfoyer der Messe Leichtbaumesse euroLITE 2008

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden umfassende Untersuchungen an Aluminiumschaumsandwichen durchgeführt und Fertigungsstrategien zur Herstellung von praxisnahen Prototypen entwickelt. Die nachgewiesene Machbarkeit von hergestellten Bauteilen verdeutlicht das Einsatzpotential dieses innovativen Werkstoffes.

Durch die verschiedenen Bauteilgeometrien konnte der Einsatz von unterschiedlichen Fertigungstechnologien untersucht werden. Zur Herstellung des Demonstrators „Frontmodul“ wurde eine technisch und wirtschaftlich optimierte Technologie entwickelt. Schwerpunkte dieser Technologie sind die Werkzeuge aus umgeformten Stahlblechen. Sie sind wesentlich kostengünstiger als die konventionell gefrästen Werkzeuge: Stempel und Matrize. Der Aufbau dieser Werkzeuge ermöglichte gleichzeitig ihren Einsatz als Aufschäumwerkzeuge. Somit war keine zusätzliche Herstellung von Werkzeugen für den Aufschäumprozess notwendig - das Aufschäumen konnte im Umformwerkzeug realisiert werden.

Das Umformen von Aluminiumschaumsandwichen im unaufgeschäumten Zustand wurde untersucht. Die Versuche haben gezeigt, dass sich das Sandwichblech sehr gut durch Biegen – auch dreidimensional – umformen lässt. Die Delamination der Schichten wurde auch bei hohen Umformgraden und komplexen Geometrien nicht festgestellt. Allerdings muss bei der Konstruktion von Bauteilen darauf geachtet werden, dass U-förmige Geometrien vermieden werden.

Zum Aufschäumen von Bauteilen wurde die Technologie unter Einsatz eines Ofens verwendet. Durch eine genaue und vor allem geometriebezogene Einstellung der Aufschäumparameter konnten fehlerfreie Bauteile mit einer gleichmäßigen Porenstruktur hergestellt werden. Das Aufschäumen von umgeformten Bauteilen im Ofen ist ohne Bedenken möglich. Allerdings ist der Einsatz dieser Technologie in einem Produktionsbetrieb sowie für relativ große Serien durch komplizierte Prozessführung sehr schwer zu realisieren. Außerdem sind die Erwärmungs- bzw. Aufschäumzeiten für eine Großserienproduktion mit über 15 min (je nach Bauteilgröße über 30 min) sehr lang. Aus diesem Grund wird auf eine deutlich prozesssichere und energiesparende Technologie hingewiesen – Aufschäumen mit Infrarotstrahlern (s. Kapitel 4.4.2).

Je nach Bauteilgeometrie ist es sinnvoll, andere Fertigungsstrategien zur Bauteileherstellung in Betracht zu ziehen. So wurde eine andere Technologie im Rahmen des Projektes „Aluminiumschaumverbunde bei dynamischer Belastung – Entwicklung eines kompletten Seil-

rollenrahmens“ eingesetzt. Die Herstellung zweidimensional gekrümmter Bauteile durch eine konventionelle Prozesskette – Umformen und das nachträgliche Aufschäumen – hat sich als nicht wirtschaftlich und technisch sinnvolle Lösung erwiesen. Es wurde eine neue Technologie „Gehrungsfügen“ entwickelt. Diese Technologie ermöglicht die Herstellung von gebogenen Bauteilen ohne Einsatz von kostenintensiven Umformwerkzeugen, Presse und Aufschäumofen. Das Ausgangsmaterial für dieses Verfahren ist das bereits aufgeschäumte Aluminiumschaumsandwich. Das Gehrungsfügen ermöglicht die Herstellung von gebogenen Bauteilen durch einen teilweise in das Sandwich eindringenden Gehrungsschnitt bis zum unteren Blech, das Biegen des unteren Blechs auf einen definierten Winkel und das anschließende Schweißen des geschnittenen oberen Blechs zum fertigen Bauteil. Der Einsatz dieser Technologie wurde weiterhin an anderen Prototypbauteilen gezeigt, in denen auch mehrere Schnitte verlegt wurden. Diese Technologie hat sich als beste Technologie für zweidimensionale Bauteilgeometrien erwiesen.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Prozessketten beinhalteten neben den Umform- und Aufschäumtechnologien auch die Fügeverfahren. Zum Fügen wurden mechanische Fügeverfahren wie z.B. Blindnieten sowie Klebetechniken und Schweißverfahren angewendet. Die Untersuchungen mit Probengeometrien sowie der Einsatz der entwickelten Fügeverfahren in den Prototypen haben eine sehr gute Eignung der meisten Verfahren gezeigt. Welches Verfahren in einem einzelnen Fall besser geeignet ist, hängt stark von der Anwendung sowie von den gestellten Anforderungen ab.

Ausblick

Bei der derzeitigen rasanten Entwicklung neuer Werkstoffe hinsichtlich der Verbesserung der Eigenschaften mit gleichzeitiger Gewichtsreduzierung sind in den nächsten Jahren interessante Entwicklungen zu erwarten. Dies betrifft auch Entwicklungen im Bereich „Zellulare Werkstoffe“.

Innovationen in der Entwicklung neuer Strukturen sowie die Verbesserung der Eigenschaften werden dabei helfen, die Herausforderungen zu bewältigen, die bei modernen Bauteilen auftreten können. Auf der internationalen Konferenz MetFoam 2009 mit dem Schwerpunkt „Zellulare Metalle“ wurde eine Vielzahl von Innovationen aus diesem Gebiet vorgestellt. Offen- und geschlossporige Schäume aus verschiedenen Metallen sowie neue Verfahren zur Erhöhung ihrer Eigenschaften wurden von vielen Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus der ganzen Welt vorgestellt.

Weitere Ziele für wissenschaftliche Untersuchungen werden Entwicklungen im Bereich „Werkstoffwissenschaften“ und die Optimierungen im technologischen Bereich. Einen besonderen Stellenwert hat die technische und wirtschaftliche Optimierung der Herstellungsverfahren von Metallschäumen bzw. die Entwicklung von alternativen Aufschäumtechnologien im Hinblick auf den wirtschaftlichen Einsatz der zellularen Metalle. Die im

Kapitel 4.4.2 erwähnten Verfahren, z.B. Aufschäumen mit Infrarotstrahlern, sind dabei von besonderem Interesse.

Anhand der in der Arbeit dargestellten Beispiele und Erläuterungen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Einsatz einer geeigneten Technologie sehr oft von der Bauteilgeometrie abhängt. Dies betrifft sowohl die Umform- und Aufschäumstrategie als auch die gesamte Prozesskette inklusive der Fügetechnik. Unterschiedliche Umform- und Fügestrategien wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Weiterhin wurden mehrere alternative Vorgehensweisen am Beispiel von Aufschäumstrategien aufgezeigt. Der Nachweis ihrer technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit wird zur Aufgabe weiterer wissenschaftlichen Studien und Projekte.

Bilder- und Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Bild 1: Entwicklung des PKW-Fahrzeuggewichts in der Mittelklasse im Zeitraum 1970-2007 [LBr08] | 16 |
| Bild 2: Selbstverpflichtung der Automobilindustrie zur Reduzierung des CO ₂ -Ausstoßes [LBr08]..... | 17 |
| Bild 3: Dyna Panhard 1954 mit selbsttragender Karosserie aus Aluminium..... | 18 |
| Bild 4: Audi A8 mit Aluminiumkarosserie (Bild: Wikipedia/Rudolf Stricker) | 19 |
| Bild 5: Audi TT Coupé Rohkarosserie mit 68% Aluminiumanteil [NNa-07] | 21 |
| Bild 6: Seitentür für Porsche Cayenne als Beispiel für Differentialbauweise [SSi08] | 22 |
| Bild 7: Aufbau eines Waggons für Pendelzug „Pendolino“ ETR-460 (links) [Ost07], ICE Reisezug der 3. Generation (rechts)..... | 23 |
| Bild 8: Beispiel für die Schalenbauweise aus der Flugzeugtechnik (Piper PA-24 Comanche) | 24 |
| Bild 9: Die Karosserie des Mercedes E-Klasse MJ 2006 [NNm06]..... | 25 |
| Bild 10: Der Vorderwagen eines Fahrzeugs in Mischbauweise [LBU08]..... | 26 |
| Bild 11: Sandwichstruktur mit Wabenkern und verschiedenen Decklagen, [tripan] | 27 |
| Bild 12: Anwendungen der Sandwichbauweise..... | 28 |
| Bild 13: Offenporiger und geschlossenerporiger Metallschaum | 30 |
| Bild 14: Schäume aus verschiedenen Metallen [iwu] | 30 |
| Bild 15: Dichte der bekanntesten Metallschäume [NNm]..... | 32 |
| Bild 16: Porosität der bekanntesten Metallschäume [NNm]..... | 32 |
| Bild 17: Wärmeleitung im Metallschaum | 33 |
| Bild 18: Verlauf der Spannung und der numerisch ermittelten Effizienz der Energieabsorption für einen AlSi12-Schaum mit Dichte 0,36 g/cm ³ , nach [Web95]..... | 35 |
| Bild 19: Prinzip des ALPORAS [®] -Verfahrens, nach [Wie07] | 37 |
| Bild 20: Schematische Darstellung des ALCAN-/HYDRO-Verfahrens, nach [Hus98] | 38 |
| Bild 21: Prinzip der pulvermetallurgischen Herstellung von Aluminiumschaum [Hei03] | 40 |

| | |
|--|----|
| Bild 22: Mit verschiedenen PolyFoM [®] -Schüttgüter ausgefülltes und ausgeschäumtes Rohr, [fww] | 40 |
| Bild 23: APM-Technologie zur Herstellung von Schaumbauteilen, nach [ifam, NNif05] | 41 |
| Bild 24: Aufbau des Aluminiumschaumsandwiches | 42 |
| Bild 25: Pulverwalzen nach dem Taron-Verfahren. nach [NNtar03, HLP07] | 43 |
| Bild 26: Prozessschritte bei der Herstellung von Aluminiumschaumsandwich..... | 44 |
| Bild 27: Aufbau des Aluminiumschaumsandwiches vor und nach dem Aufschäumen | 45 |
| Bild 28: Geometriebeschränkungen bei Aluminiumschaumsandwich, nach [Hah05, See99]..... | 46 |
| Bild 29: Universalzugversuch, ungeglühte Proben (Al6060)..... | 50 |
| Bild 30: Universalzugversuch, bei 580°C geprüfte Proben (Al6060) | 50 |
| Bild 31: Wärmebehandelte Proben nach dem Dauerfestigkeitsversuch | 52 |
| Bild 32: Testgeometrie „Sandwichrinne“ (BxHxT: ca. 250x150x300 mm) | 55 |
| Bild 33: Prototyp „Frontmodulsegment“ (BxHxT: ca. 700x150x300 mm)..... | 56 |
| Bild 34: Umformwerkzeug zur Herstellung der Sandwichrinne | 56 |
| Bild 35: Simulationsmodell für Sandwichrinne | 57 |
| Bild 36: Vergleich des Modells aus der Simulation mit dem umgeformten Bauteil | 58 |
| Bild 37: Das umgeformte Bauteil „Sandwichrinne“ | 59 |
| Bild 38: 3D-Biegen zur Herstellung von Werkzeugen..... | 60 |
| Bild 39: Das Umformwerkzeug aus 10 mm Stahlblech..... | 60 |
| Bild 40: Transportable 50t-Druckvorrichtung mit dem eingebauten Umformwerkzeug | 61 |
| Bild 41: Ein umgeformtes Frontmodulsegment | 62 |
| Bild 42: Biegewerkzeug..... | 63 |
| Bild 43: Riss beim Biegen des Aluminiumschaumsandwiches | 63 |
| Bild 44: Prinzip des Gehrungsfügens | 64 |
| Bild 45: Schnittanordnung für die Herstellung verschiedener Bauteilgeometrien..... | 65 |
| Bild 46: Mögliche Bauteilgeometrien nach Gehrungsfügen-Verfahren | 65 |

| | |
|---|----|
| Bild 47: Demonstratorbauteil – verkleinerte Ecke des Seilrollenrahmens in Fertigungsschritten..... | 66 |
| Bild 48: CAD – Modell Aufschäumvorrichtung für Sandwichrinne | 67 |
| Bild 49: Aufschäumvorrichtung mit einer Gegenlage..... | 68 |
| Bild 50: Aufschäumwerkzeug auf Basis von Drahtgitter (CAD-Model)..... | 70 |
| Bild 51: Infrarot-Aufschäumeinrichtung (Strahler, Pyrometer, SPS-Steuerung Panel)..... | 72 |
| Bild 52: Aufnahme der Temperatur mit IR-Kamera bei einem Aufschäumversuch | 73 |
| Bild 53: Der Querschnitt einer mit Infrarotstrahlern aufgeschäumten Probe..... | 74 |
| Bild 54: Der Ofen zum Aufschäumen von AFS (IFAM)..... | 75 |
| Bild 55: Probe mit einem verschmolzenen Deckblech..... | 76 |
| Bild 56: Fehler beim Aufschäumen..... | 77 |
| Bild 57: Verzögertes Aufschäumen in der Mitte des Bauteils..... | 77 |
| Bild 58: Matte Oberfläche des Bauteils (SiC-Schlichte)..... | 78 |
| Bild 59: Aufgeschäumte Sandwichrinne (Ränder beschnitten)..... | 78 |
| Bild 60: Konventionelle Röntgenaufnahme der Aluminiumschaumstruktur | 80 |
| Bild 61: Prinzip der Computertomographie (Bildquelle: Fa. phoenix x-ray)..... | 81 |
| Bild 62: CT-Analyse der Sandwichrinne | 81 |
| Bild 63: Biegeproben, links: Stumpfstoßverbindung, rechts: T-Stoßverbindung..... | 83 |
| Bild 64: Stumpfstoßverbindung mit I-Schweißnaht..... | 84 |
| Bild 65: T-Stoßverbindung mit Kehlnaht | 85 |
| Bild 66: Prinzip des 4-Punkt-Biegeversuchs mit Schaumversagen infolge Scherkraftanteil..... | 85 |
| Bild 67: Versagensfälle beim 4-Punkt-Biegeversuch | 86 |
| Bild 68: Prüfeinrichtung zum Test der T-Stoßverbindung..... | 87 |
| Bild 69: Versagenskriterien an der T-Stoßverbindungen; links: Versagen des Stegs, rechts: Delamination im Gurt | 87 |
| Bild 70: Prinzip des Verfahrens zum Anbringen der Einnietmutter am Aluminiumschaumsandwich..... | 88 |

| | |
|--|-----|
| Bild 71: Bolzenzange sowie im Aluminiumschaumsandwich befestigte Verbindungselemente: Einnietbolzen (links) und Einnietmutter (rechts)..... | 89 |
| Bild 72: SOYER-Bolzenschweißgerät BMS-8NV und Bolzenschweißpistole PS-1 mit Spitzenzündung..... | 90 |
| Bild 73: Genietete Verbindungselemente und Schweißbolzen..... | 90 |
| Bild 74: Verwendete Befestigungselemente; links: Gewindeeinsätze, rechts: Gewindebolzen | 91 |
| Bild 75: Mischpistole MIXPAC System 400 | 91 |
| Bild 76: Gewindeeinsatz im Aluminiumschaumsandwich | 92 |
| Bild 77: Gewindebolzen: 16 mm, 22 mm und 28 mm..... | 93 |
| Bild 78: Versuchsvorrichtung zur Ermittlung der Anzugskraft | 93 |
| Bild 79: Die im Zugversuch maximal ermittelten Kräfte der Verbindungen mit aufgeklebten Bolzen | 94 |
| Bild 80: Versagenskriterien beim Zugversuch | 95 |
| Bild 81: Proben nach dem Versuch | 96 |
| Bild 82: Versuchseinrichtung zur Ermittlung des Anzugs-/ Verdrehmomentes | 96 |
| Bild 83: Drehmomentverläufe während des Versuchs mit aufgeklebten Bolzen (16 mm und 28 mm)..... | 97 |
| Bild 84: CAD-Model der ITINO-Führerkabine..... | 99 |
| Bild 85: Die herzustellenden Bauteile: das Dach (herzustellen war nur die Hälfte) und die Seitenwand..... | 100 |
| Bild 86: Teilung des Dachs zur Fertigung | 101 |
| Bild 87: Teilung der Seitenwand..... | 101 |
| Bild 88: Teilung der A-Säule in Segmente | 102 |
| Bild 89: Das zusammengebaute Werkzeug zum Umformen eines Teils des Frontmoduls | 102 |
| Bild 90: Simulationsmodell, Bauteil A1 vor dem Umformen..... | 103 |
| Bild 91: Ergebnis der Berechnung des Umformprozesses für das Teil A1 | 104 |
| Bild 92: Erwärmung der Sandwichplatten zum Umformen | 104 |
| Bild 93: Umformpresse mit der eingebauten Umformvorrichtung..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| Bild 94: Maßgenauigkeit der Anschlussstellen bei den Teilen der A-Säule..... | 106 |
| Bild 95: Beschichtung des Sandwiches mit Schlichte..... | 107 |
| Bild 96: Ein aufgeschäumtes Bauteil beim Entnehmen aus dem Ofen..... | 107 |
| Bild 97: Ein Teil der A-Säule nach dem Abschneiden der Ränder | 108 |
| Bild 98: Vorrichtung zum Schweißen der Seitenwand..... | 109 |
| Bild 99: Einlegen einzelner Bauteile in die Vorrichtung..... | 109 |
| Bild 100: Heften der Teile durch Schweißen..... | 110 |
| Bild 101: Das zusammengefügte ITINO-Frontmodul | 110 |
| Bild 102: Das Frontmodul des ITINO-Triebzuges im Hauptfoyer der Messe Leichtbaumesse euroLITE 2008..... | 111 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Eigenschaften einiger Aluminiumschäume, nach [HLP07] | 34 |
| Tabelle 2: Übersicht der bekanntesten Herstellungsverfahren | 36 |
| Tabelle 3: Ergebnisse der Dauerfestigkeitsversuche (Al5005)..... | 51 |
| Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Versuchsgeometrien..... | 53 |
| Tabelle 5: Bemaßungen der Befestigungselemente..... | 91 |
| Tabelle 6: Gegenüberstellung der im Zugversuch maximal erreichten Kräfte aller Verbindungselemente | 94 |
| Tabelle 7: Versuchsbedingungen beim Torsionsversuch | 97 |

Literaturverzeichnis

- [ABH+05] S. Angel, W. Bleck, S. Harksen, P.-F. Scholz: Functional and structural characteristics of metallic foams produced by the SlipReactionFoam-Sintering (SRFS)-process, In: Materials Science Forum, Functionally graded materials VIII, S. 492-493, 39-45, 2005, ISSN: 0255-5476
- [AEF+00] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G Wadley: Metal Foams: A Design Guide, Hrsg. H.N.G Wadley, Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 2000
- [alulight] Homepage der Alulight®-International GmbH, www.alulight.com
- [And95] K. Anderegg: Neue Faserverbund-Bauweisen für Tram- und Reisezugwagen, In: ZEV+DET–Glaser's Annalen 119 (9/10), 1995, S. 484-492
- [ASC97] M.F. Ashby, C. Seymour, D. Cebon: A database of metal foams and honeycombs, International Symposium "Metallschäume", 06./07.03.1997, Bremen, MIT-Verlag Bremen
- [ASt02] O. Andersen, G. Stephani: Solid-State und Deposition Methods, In: H.-P. Degisher, B. Kriszt (Hrsg.): Handbook of Cellular Metals, Weinheim: Wiley-VCH, 2002, S. 56-68
- [ASu00] F. Andrieux, D.-Z. Sun: "Entwicklung und Anwendung von Werkstoffmodellen zur Beschreibung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Aluminiumschäumen", In: Metallschäume. WILEY-VCH, 2000: 531-34
- [ATK+00] M. Arnold, M. Thies, C. Körner and R.F. Singer: "Experimental and Numerical Investigation of the Formation of Metal Foam." Materialsweek 2000.
- [AWS+00] O. Andersen, U. Waag, L. Schneider, G. Stephani, B. Kieback: "Novel metallic hollow sphere structures." Advanced Engineering Materials, 2000 4: 192-5
- [AWS63] Patent US 3 087 807, Method of making foamed metal, 1963, B.C. Allen, M.W. Mote, A.M. Sabroff
- [Ban00] J. Banhart: Manufacturing Routes for Metallic Foams, In: JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Volume 52, Nr. 12, Dezember 2000, S. 22-27, ISSN 1047-4838
- [Bau04] E. Baumeister: Hohlkugelkomposit – Charakterisierung thermischer Eigenschaften eines neuen Leichtbauwerkstoffes, Dissertation, Uni Magdeburg, 2004
- [Bau90] Patent DE 401 83 60, Verfahren zur Herstellung poröser Metallkörper, 1990, J. Baumeister

- [Bau97] J. Baumeister: Überblick: Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen, In: Symposium Metallschäume, J. Banhart, Metall Innovation Technologie MIT, Bremen, Germany, 1997
- [BBE00] A.-F. Bastawros, H. Bart-Smith, A.G. Evans: Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminium alloy foam, In: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 48, 2000
- [BBE97] J. Burzer, H.W. Bergmann: Laserstrahlschweißen von Aluminium-Blech-Schaumverbunden, J. Banhart (Hrsg.): Metallschäume, Symposium Metallschäume, MIT-Verlag Bremen, 1997, S. 163-170
- [BBM+98] J. Banhart, J. Baumeister, A. Melzer, W. Seeliger, M. Weber: Aluminiumschaum-Leichtbaustrukturen für den Fahrzeugbau, ATZ/MTZ-Sonderausgabe „Werkstoffe im Automobilbau 98/99“, 66 (1998)
- [BBS+98] J. Banhart, J. Baumeister, W. Seeliger, M. Weber, A. Melzer: Innovative Leichtbaustrukturen mit Aluminiumschaum für den Fahrzeugbau, In: Metall 52, 726, 1998
- [Ber03] T. Bernard: Verstärkung von Blechstrukturen mit Aluminiumschaum unter besonderer Berücksichtigung der Fügetechnik; Dissertation, Universität Bayreuth, 2003, ISBN 3-8322-2216-2
- [Böl03] T. Böllinghaus: Werkstoffeigenschaften und Verarbeitung von Aluminiumschäumen; Dissertation, RWTH Aachen, 2003, ISBN 3-8322-1338-4
- [Bön05] S. Bönick: Herstellungsverfahren für Aluminiumschäume, Studienarbeit, BTU Cottbus, Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung, 2005
- [Bor05] D. Bormann: Zukunft gestalten mit Magnesiumschaum, In: Phi – die gemeinsame Zeitschrift des produktionstechnischen Institute in Hannover, 6. Jahrgang, Ausgabe 1, Jan. 2005, S. 6, ISSN 1616-2757
- [Bru06] O. Brunke: Untersuchung der Strukturentwicklung von Aluminiumschäumen mit Röntgenmethoden, Dissertation, Uni Bremen, 2006, ISBN 3-18-384903-8
- [BSH+00] J. Banhart, H. Stanzick, L. Helfen, T. Baumbach: “Metal foam evolution studied by synchrotron radiography.” Applied Physics Letters, 2000. 78: 1152-54
- [BSt96] H.-P. Bäuerle, V. Steininger: Neue Lösungen mit Stahl beim Automobil-Leichtbau, In: Tagungsband – Entwicklungen im Karosseriebau, Tagung Hamburg 14./15. Mai 1996 / VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, Düsseldorf, VDI Verlag, 1996, S. 433, ISBN 3-18-091264-2
- [Bur00] J. Burzer: Beitrag zur Einsetzbarkeit von Metallschäumen in der Verkehrstechnik, Dissertation, Universität Bayreuth, München: Utz, 2000
- [BWH+97] J. Baumeister, M. Weber, H. von Hagen, D. Hatzfeld, M. Paschen: Sandwichkonstruktionen aus Stahlblech mit geschäumtem Aluminium, Tagungsband Werkstoffwoche '96, Bd.6, S. 1017, DGM-Informationsgesellschaft Verlag (1997)

- [DSi94] H.P. Degisher und F. Simančík: Recyclable foamed aluminium as an alternative to composite, In: H. Warlimont (Hrsg.): Environmental Aspects in Materials Research, DGM Informationsgesellschaft Verlag, 1994
- [Ell56] Patent US 2 751 289, Method of producing metal foam, 1956, J.C. Elliott
- [FBI01] Peter Furrer, Margarete Bloeck: Aluminium-Karosseriebleche: Lösungen für den kosteneffizienten Automobil-Leichtbau, Verlag Moderne Industrie, 2001, ISBN 3-478-93250-5
- [FMe03] H.E. Friedrich, G. Meschut: Autovision: Zukünftige Werkstoffe und Fügekonzepte im Automobilbau, Konferenz-Einzelbericht: DVS-Berichte. Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren. DVS-Verlag, Band 222 (2003), S. 5-10
- [GAs97] L.J. Gibson, M.F. Ashby: Cellular Solids, Structure and Properties, Pergamon Press, Oxford, 1997
- [PBF+07] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote, Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung, 7. Auflage; 2007; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN-10 3-540-34060-2
- [GBN+00] H. Gers, D. Brungs, K. Nijhof, F. Baumgärtner, H.-J.Mäuer: Pulvermetallurgische Fertigung von Bauteilen aus Aluminiumschaum, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 31, 2000
- [Gei03] W. Geib: Technologieträger Z22 „Das superleichte Mechatronik-Auto“, BMW Technik GmbH, München, In: Tagungsband zum Kolloquium „Innovationen und Erfahrungen im Leichtbau-Kompetenznetzwerk“, 19./20. Februar 2003, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Otto Huber, Marc Bicker, S. 117, ISBN 3-00-010535-2
- [GHo03] A. Gusinde, M. Hoogen: Aluminiumblechwerkstoffe, Einsatz in der Automobilherstellung, BMW AG München, In: Tagungsband zum Kolloquium „Innovationen und Erfahrungen im Leichtbau-Kompetenznetzwerk“, 19./20. Februar 2003, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Otto Huber, Marc Bicker, S. 47, ISBN 3-00-010535-2
- [GMG00] G. Gioux, T.M. McCormack, L.J. Gibson: Failure of aluminium foams under multiaxial loads, In: Intern. Journal of Mechanical Sciences, 42, 2000
- [GNo06] J. Grabner, R. Nothaft: Konstruieren von Pkw-Karosserien - Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht, Beispiele mit CATIA V4 und V5 (Gebundene Ausgabe), Springer Verlag, Berlin, Auflage: 3., erweiterte Ausgabe (14. Februar 2006), ISBN 978-3-540-23884-3
- [Hah05] M. C. Hahn: Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern; Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT), Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Manfred Geiger, Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann; 2005, ISBN 3-87525-228-4

- [Hei03] F. Heinrich: Leichtbauverbundstrukturen durch Umgießen von Aluminiumschaumkernen im Druckguss, Dissertation Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2003
- [Hei03] F. Heinrich: Leichtbauverbundstrukturen durch Umgießen von Aluminiumschaumkernen im Druckguss, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2003
- [Hel92] J. Hermann, O. Elsner: Auf dem Weg vom Werkstoff zur Schienenfahrzeugkonstruktion, In: Aluminium-Schienenfahrzeuge, Aluminium-Zentrale e.V., Hrsg. Hestra-Verlag, Darmstadt, 1992
- [Her60] H. Hertel: Leichtbau, Bauelemente, Bemessungen und Konstruktionen von Flugzeugen und anderen Leichtbauwerken, Springer Verlag, 1960
- [Hin03] M. Hinz: Innovative Türkonzepte - Stahl Potentiale für den Leichtbau, ThyssenKrupp Stahl AG, Duisburg, In: Tagungsband zum Kolloquium „Innovationen und Erfahrungen im Leichtbau-Kompetenznetzwerk“, 19./20. Februar 2003, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Otto Huber, Marc Bicker, S. 195, ISBN 3-00-010535-2
- [Hip01] T. Hipke: Analyse, Bewertung und Eignung von Aluminiumschäumen für die Werkzeugmaschinenkonstruktion, Dissertation, Berichte aus dem IWU Band 15, Zwickau Verl. Wiss. Scripten, S. 20-32, 2001, ISBN 3-928921-74-6
- [HLP07] T. Hipke, G. Lange, R. Poss: Taschenbuch für Aluminiumschäume, Aluminiumverlag, Düsseldorf, 1. Auflage, 2007, ISBN 978-3-87017-285-5
- [HOt00] M. Hahn, A. Otto: "Hochtemperatur-Umformung von zellularem Aluminium." in Metallschäume, H. P. Degischer (Ed.), Wiley-VCH, 2000: 432-35.
- [Hus98] S. Huschka: Modellierung eines Materialgesetzes zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Aluminiumschaum, Fortschritt-Berichte, VDI Reihe 5 Nr. 525, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- [HWS+99] C. Hintz, I. Wagner, P.R. Sahm, P. Stoyanov: "Investment Cast Near-Net-Shape Components Based on Cellular Metal Materials." in Metal Foams and Porous Metal Structures, J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck (ed.). MIT Verlag, 1999: 153-58.
- [HWS+99] C. Hintz, I. Wagner, P.R. Sahm, P. Stoyanov: Investments cast near-net shape components based on cellular metal materials, In: Banhart, Ashby, Fleck: „Metal Foams and Porous Metal Structures“, MIT-Verlag, Bremen, 1999
- [ifam] Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Bremen; www.ifam.fraunhofer.de
- [innozell] Homepage des vom BMBF geförderten Projekts „inno.zellmet“, www.innozellmet.de

- [iwu] Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz, www.iwu.fraunhofer.de
- [Kam00] C. Kammer: Magnesium Taschenbuch; Kapitel 16 – Anwendung, Hrsg. Aluminium-Zentrale Düsseldorf, 2000, ISBN 3-87017-264-9
- [KBH94] A. Kinzel, F.-W. Bach, H. Haferkamp: Schweißen von Leichtbaublechen mit Laserstrahlung, Leichtbaustrukturen und leichte Bauteile (Werkstofftag 1994), Düsseldorf: VDI Berichte Nr. 1080, 1994, S. 237-245
- [KFK04] T. Krusche, H.J. Franke, R. Koschorrek: Innovative Leichtbaukonzepte – Ermittlung weiterführender Ansätze für zukünftige Karosseriekonzepte, VDI Tagung; Fortschritte im Karosseriebau, Hamburg, 4. bis 5. Mai 2004, VDI-Berichte Nr. 1883, VDI Verlag, 2004
- [KHW06] C. Körner, M. Hirschmann, H. Wiehler: Integral foam moulding of light metals, In: Materials Transactions 47, No. 9, 2006, 2188-2194
- [Kle00] B. Klein: Leichtbau im Automobilbau, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Leichtbau-Konstruktion, 2000
- [Kle07] B. Klein: Leichtbau-Konstruktion, 7., verbesserte und erweiterte Auflage Februar 2007, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007, ISBN 978-3-8348-0271-2, S. 19-22
- [Kor98] S. Korff: Untersuchung des Aluminium-Einsatzes im Verkehr, Stand der Technik und zukünftige Entwicklung, Diplomarbeit, Institut für Bergwerks- und Hüttenmaschinenkunde, RWTH Aachen, 1998
- [Kra08] J. Krautz: Leichtbau mit Titan, Maschinenmarkt, Online, 05.08.2008, Artikel ID 264464
- [Lan90] K. Lange: Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 3: Blechbearbeitung; ISBN 3-540-50037-1, S. 349, 385
- [LBr08] M. Lesemann, M. Bröckenhoff: Leichtbau durch Multi-Material-Design, Vortrag im Rahmen der Gemeinschaftsveranstaltung "Leichtbau in der Automobilindustrie" von Automotive Rheinland und Südwestfalen und den Industrie- und Handelskammern in Nordrhein-Westfalen, 3. Juni 2008, Daimler AG Mercedes-Benz Werk Düsseldorf
- [LBU08] M. Lesemann, M. Bröckerhoff, Peter Urban: Multi-Material-Leichtbau – Vergleich zweier Vorderwagenkonzepte, In: mobiles – Fachzeitschrift für Konstrukteure, Ausgabe 34 (10/2008)
- [LPO+07] S. Longerich, D. Piontek, P. Ohse, A. Harms, U. Dilthey, S. Angel, W. Bleck. Joining strategies for open porous metallic foams on iron and nickel base materials, In: Advanced Engineering Materials, 9 (8), S. 670-678, Aug. 2007, ISSN: 1438-1656
- [LRu99] W. Leitermann, T. Rudlaff: Aluminium im PKW-Karosseriebau – Die Alternative mit Zukunft, In: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, 30; WILEY-VCH Verlag GmbH, S. 703-706, 1999

- [met] Produktmappe der Metawell GmbH, Metawell® Sandwich Element, www.metawell.com
- [met-info] Informationsportal über Metallschäume, www.metallschaum.info
- [MFA99] K.Y.G. McCullough, N.A. Fleck, M.F. Ashby: Uniaxial stress-strain behaviour of aluminium alloy foams, *Acta Materialia*, 47 (8), 1999
- [MIA+00] T. Miyoshu, M. Itoh, S. Akiyama, A. Kitahara: ALPORAS aluminium foam: Production process, properties and applications, In: *Advanced Engineering Materials*, 2 (4), S. 179-183, 2000
- [MI98] T. Miyoshu, M. Itoh: Aluminiumfoams „ALPORAS“, the production process, properties and applications, MRS Spring Meeting, Symposium R, USA, 1998
- [MTS99] J. Mandelartz, R. Teschers, T. Schumacher: Aluminium-Einsatz im Verkehrssektor, In: *Erzmetall*, 52 (1999) Nr.7/8, S.411-418
- [Mun05] U. Munz: Aluminiumschaum serienreif, *Kunden & Mitarbeitermagazin der Kurtz Gruppe*, Juli 2005
- [MZB+00] W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vierregge: Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering*. A280 (2000), S. 37-49
- [NHB00] M. Niemeyer, H. Haferkamp, D. Bormann: “Gießtechnisches Herstellverfahren für Magnesiumschäume” in *Metallschäume*, H.P. Degischer (Ed.). Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2000: 419-21
- [NNa-07] Audi TT Coupé '07 - Karosserie, Selbststudienprogramm 383, Audi
- [NNal-56] Der Leichtmetallanteil im modernen deutschen Personenkraftwagen. *Aluminium* 32 (1956), S. 426–427
- [NNe99] ERG, Duocel Aluminum Foam Data Sheet., ERG Material and Aerospace, Oakland, 1999
- [NNf04] Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, FOAMINAL® - Eigenschaftsübersicht Konstruktionsrichtlinien, Produktinformation, 2004
- [NNh94] Hydro-Aluminium: Aluminium Foam Brochure, 1994
- [NNi01] Metal foams, Bericht des Fraunhofer Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen, 2001
- [NNif05] Produktblatt 2801: Advanced Pore Morphology (APM) Metallschäume, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, 2005
- [NNli01] Outstanding properties, Produktinformation, Alulight International GmbH, Ranshofen, Österreich, 2001

- [NNm] Datenblatt Metallschaum, Das SchlickerReaktionsSchaumSinter (SRSS) – Verfahren im Vergleich zu Aluminium- und Nickelschaum, RWTH Aachen, Institut für Eisenhüttenkunde-IEHK
- [NNm06] Pressemappe Mercedes E-Klasse 2006
- [NNs97] Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V. (Hrsg.): Charakterisierung von Sandwichbauteilen aus Stahldeckblechen mit einem Kern aus schmelzmetallurgisch hergestelltem, geschäumtem Aluminium, Forschung für die Praxis, Projekt 368, Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, 1997
- [NNtar03] Realizing the Promise of Aluminium Foam. Firmenprospekt A.G.S. Taron Technologies Inc., Québec, Kanada, 2003
- [NNw] Aluminiumschaum, Merkblatt W 17, 1. Auflage, Aluminium-Zentrale e.V., Düsseldorf, ISBN 3-87017-259-2
- [NNw] Aluminiumschaum, Merkblatt W 17, 1. Auflage, Aluminium-Zentrale e.V., Düsseldorf, ISBN 3-87017-259-2
- [Och+73] H. Ochmann (Leiter des Autorenkollektivs): Beiträge zum konstruktiven Plasteinsatz, Gestaltung und Einsatz von Formteilen aus PUR-Hartschaumstoffen und PUR-Strukturschaumstoffen sowie von Schäumwerkzeugen; Hrsg. Institut für Leichtbau und ökonomische Verwendung von Werkstoffen, Dresden, 1973
- [Ost07] F. Ostermann: Anwendungstechnologie Aluminium, 2., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Verlag, 2007, ISBN 978-3-540-71196-4
- [pre] FIAT stand auch 2008 auf Platz 1 der Rangliste beim CO₂-Emissionswert der Volumenmarken, In: Pressemitteilung der PresseBox, Huber Verlag für Neue Medien GmbH, www.pressebox.de, BoxID 243569
- [Rin94] C. Rink: Aluminium, Automobil und Recycling, Hrsg. Aluminium-Zentrale e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht, Institut für Kraftfahrwesen, Universität Hannover, 1994
- [RMV02] K. Röhrs, V. G. Michailov u. H. Wohlfahrt: "Einfluss von Beimengungen zum Schutzgas beim Lichtbogenschweißen von Aluminiumwerkstoffen", DVS-Berichte, Band 216, DVS-Verlag Düsseldorf, 2002, 349-354
- [Sch94] G. Scharf: Späte Entdeckung – Aluminium, Magnesium und Titan haben als Leichtmetalle die Werkstoffpalette bereichert; Der Maschinenmarkt, Jubiläumsausgabe 100 Jahre Maschinenmarkt, Band 100, 1994, S. 81 / 82, 84 / 86
- [See07] H.-W. Seeliger: Aluminium-Schaum-Sandwich – Bauteile, Fertigung und Anwendung. DGM-Fortbildungsseminar Zelluläre Metalle, 19./20.04.2007, Erlangen

- [See99] H.-W. Seeliger: Application strategies for aluminium-foam-sandwich parts (AFS). In: Bahnhard, J.; Ashby, M.F.; Fleck, N.M. (Hrsg.): Metal Foams and Porous Metal Structures. Proceedings of the International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures MetFoam 1999, Bremen: MIT, 1999, S. 29-36
- [SKö06] R.F. Singer, C. Körner: Umgießen von Metallschäumen zur Herstellung von Verbundbauteilen, Projektbeschreibung DFG SFB396, Teilprojekt B5, WTM, Technische Universität Erkangen-Nürnberg, 2006
- [Sos48] Patent US 2 434 775, Process for Making Foamlke Mass of Metal, 1948, B. Sosnick
- [spp1075] Priority Programme Cellular Metals, Broschüre DFG SPP 1075, www.spp-metallschaume.uni-erlangen.de
- [SSi08] V. Schindler, I. Sievers: Forschungen für das Auto von Morgen, Aus Tradition entsteht Zukunft, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2008, ISBN 978-3-540-74150-3
- [SSK+97] N. Sedliakova, F. Simančík, J. Kovacik, P. Minar: Joining of Aluminium Foams; J. Banhart (Hrsg.): Metallschäume, Symposium Metallschäume, MIT-Verlag Bremen, 1997, S. 177-185
- [Sta03] H. Stanzick: Untersuchung der Bildung und des Kollapses von Metallschäumen, Logos Verlag Berlin, 2003, ISBN 978-3-8325-0342-0
- [SWK00] S. Ströhla, W. Winter, G. Kuhn: "Numerische Ermittlung elastischer Eigenschaften von Metallschäumen mit Polyeder-Einheitszellen." in Metallschäume, H. P. Degischer (ed.). Wiley VCH, Weinheim, 2000: 444-46.
- [TBB+05] Q. Theng, P. Becker, M. Bauer, A. Diekmann: Berührungslose Energieübertragung für die Bordenergieversorgung der Transrapid-Fahrzeuge, ThyssenKrupp techforum, Dezember 2005, S. 74
- [Thü06] Patent DE 102 53 382 B4, Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung metallischer Schaumkörper sowie Schüttgut hierfür, 2006, R. Thümmeler
- [tripan] TRIPAN Leichtbauteile GmbH, www.tripan.com
- [Ven98] F. Venier: Leichtbau stimuliert den Einsatz, In: Werkstoffe im Automobilbau 98/99, Sonderausgabe von ATZ 10/1998 und MTZ 10/1998, S. 54-56
- [VKS+11] J. Vogel, J. Keller, A. Sviridov, H.-J. Feige, K. Kreyszig, J. Auersperg, P. Plass and H. Walter; Characterisation of Strength Behaviour of Aluminium Foam Sandwiches Under Static Load; In: Strain, Volume 47, Issue Supplement s1, S. e234-e242, Juni 2011, Blackwell Publishing Ltd
- [VSv07a] B. Viehweger, A. Sviridov; Aluminiumschaum für Schienenfahrzeuge - Leicht, crashsicher und gut recycelbar; In: Automotive Materials, Giesel Verlag GmbH, Ausgabe 03/07 Juni 2007, S. 30 – 33

- [VSv07b] B. Viehweger, A. Sviridov; Wie mit neuen Fertigungslösungen Bauteile aus Aluminiumschaumsandwiches entstehen; In: MM Das IndustrieMagazin 48/2007 S. 24 – 27
- [VSv07c] B. Viehweger, A. Sviridov; Frontmodule für Schienenfahrzeuge aus Aluminiumschaumsandwich-Fertigungstechnologien zur Bauteilherstellung; In: Forum der Forschung 20/2007: S. 69 - 72, BTU Cottbus, Eigenverlag, ISSN-Nr. 0947-6989
- [VSvUN] Aluminium foam sandwich for industrial applications – the front module of a railway vehicle and the head block for a mobile crane; In: Conference Proceedings (noch nicht erschienen) MetFoam 2009, Bratislava, Slovakia
- [vzws] Homepage des Verbunds “Zellulare Werkstoffe Sachsen”, www.vzws.de
- [WBo28] Patent US 1 642 349, Alloy Structure, 1928, H.M. Williams, A.L. Boegehold
- [Web95] M. Weber: Herstellung von Metallschäumen und Beschreibung der Werkstoffeigenschaften, Dissertation, Zugl.: Technische Universität Clausthal, 1995
- [Wei99] P. Weigand: Untersuchung der Einflussfaktoren auf die pulvermetallurgische Herstellung von Aluminiumschäumen; Bremen: Verl. MIT, Zugl.: Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation D82, 1999
- [Wie07] H. Wiehler: Herstellungsverfahren geschlossenzelliger Metallschäume, DGM-Fortbildungsseminar Zellulare Metalle 19./20.04.2007, Erlangen
- [WLF01] W. Kracht, L. Miller, F. Löser: Transrapid – Innovative Bahntechnik für den Weltmarkt, In: Forum ThyssenKrupp, 2/2001, S. 79
- [zellmet] Homepage des Netzwerkes „Zellulare Metallische Werkstoffe“ (ZMW), www.zellmetall.de

Vorträge und Präsentationen

Dieses Kapitel beinhaltet eine Übersicht von Vorträgen und Präsentationen der Ergebnisse vorliegender Arbeit bzw. der Projekte, die eine erfolgreiche Durchführung vorliegender Arbeit ermöglicht haben.

Vorträge

„Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen“ – im Symposium „Alternative Materialien im Schienenfahrzeugbau“, 18. Juni 2004, Hennigsdorf

„Aluminiumschaumsandwich - innovativer Werkstoff für Frontmodule von Schienenfahrzeugen“ - im DGM 16. Symposium „Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde“, 14.-16. März 2007, Bremen

„AFS – Sandwiche an der Schwelle zur Serienfertigung“ – DGM-Sitzung des Arbeitskreises „Zellulare Metalle“, 21. März 2007, Berlin

„Aluminiumschaum – Leichtbauwerkstoff mit multifunktionalen Eigenschaften“ – im 7. Cottbuser Leichtbauworkshop „Innovationen im Leichtbau“ Themenkomplex: Poröse Werkstoffe, 06. Mai 2009, Cottbus

Posterpräsentationen

“Aluminium foam sandwich for industrial applications: the front module of a railway vehicle and the head block for a mobile crane”, In: MetFoam 2009, 1.-4. September 2009, Bratislava, Slowakei

Messenauftritte

Vorstellung des Projektes „Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen“:

- InnoTrans (2004 und 2006), Berlin, Deutschland
- Railway Interiors Expo (2004 und 2005), Berlin, Deutschland
- Green Ventures Kooperationsbörse für Unternehmen der Umwelt- und Energietechnik (2004 bis 2006), Stadt, Land

Ausstellung des Demonstrators „Frontmodul“ auf euroLITE 2008 im Hauptfoyer der Messe, 24.-26. Juni 2008, Salzburg, Österreich.

Auszeichnungen

Brandenburger Technologietransfer-Preis 2009

Am 03. Juni 2009 hat der Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung der BTU Cottbus den Technologietransfer-Preis für das Projekt „Aluminiumschäume für crashsichere Frontmodule von Schienenfahrzeugen“ gewonnen.

„Die Brandenburgische Technische Universität Cottbus (BTU) gewinnt den diesjährigen Technologietransfer-Preis Berlin-Brandenburg 2009. Der Preis ging an eine Entwicklung des BTU-Lehrstuhls Konstruktion und Fertigung.“

Die Forscher hatten gemeinsam mit Partnern aus der Industrie Frontpartien von Schienenfahrzeugen entwickelt, die bei einem Aufprall stabiler sind als herkömmliche Teile. Bei ihren Frontmodulen setzten die Ingenieure der BTU einen neuartigen Aluminiumschaumstoff ein. Partner des Projektes waren Bombardier Transportation GmbH, Wilhelm Schmidt GmbH und Angewandte Micro-Messtechnik (AMIC) GmbH.“

Quelle: ZAB ZukunftsAgentur Brandenburg GmbH, 03.06.2009



August-Borsig-Preis 2006

Am 19. September 2006 wurde das Frontmodul aus Aluminiumschaumsandwich im Rahmen der Verkehrstechnikmesse "InnoTrans 2006" in Berlin mit August-Borsig-Preis für innovative Ideen aus dem Bereich der Schienenverkehrstechnik ausgezeichnet.

„Mit dem August-Borsig-Preis geehrt werden das Fachgebiet Schienenfahrzeuge der Technischen Universität Berlin und die brandenburgische Firma Wilhelm Schmidt GmbH aus Groß Kienitz (Landkreis Teltow-Fläming). Beide erhalten jeweils 4.000 Euro. Die Wilhelm Schmidt GmbH nahm mit Frontmodulen von Schienenfahrzeugen aus Aluschaum zur Crashoptimierung und Gewichtsreduzierung am Wettbewerb teil.“

Quelle: BerliNews, 20.09.2006

