

MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

Institut für Gießereikunde

Diplomarbeit

**Verfahrensentwicklung zur Herstellung von
Innenversteifungen für Keramik – Metall Verbundgußteile**

Vorgelegt von: Wurzer Gerhard

Betreut von: O. Univ. Prof. Dr.-Ing. Andreas BÜHRIG-POLACZEK

Leoben im November 2001

Eidesstattliche Erklärung

„Ich erkläre an Eides statt, daß ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfaßt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.“

Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfassung	III
1	Einleitung	1
	1.1 Motivation	1
	1.2 Zielsetzung	1
2	Literatur- und Patentrecherche	3
	2.1 Verfahren zur Herstellung metallischer Schäume	4
	2.1.1 Pulvermetallurgische Verfahren	4
	2.1.1.1 Sintern loser Pulverschüttungen	4
	2.1.1.2 Hohlkugelformkörper	5
	2.1.1.3 Schäumen von Metallpulverschlickern	7
	2.1.1.4 Ausgießen poröser Formen mit Pulverschlickern	8
	2.1.1.5 Aufschäumen eines kompaktierten Metallpulver – Treibmittel – Gemisches	8
	2.1.1.6 Sinter – Lösungs – Prozeß zur Herstellung von Aluminiumschäumen	13
	2.1.2 Schmelzmetallurgische Verfahren	14
	2.1.2.1 Feinguß, Präzisionsguß	14
	2.1.2.2 Umgießen von Platzhaltern	16
	2.1.2.3 Einbringen von Substitutionswerkstoffen (Platzhalter) in eine Schmelze	20
	2.1.2.4 Herstellung syntaktischer Metallschäume mittels Infiltrationsgußverfahren	21
	2.1.2.5 Spaltung (Zersetzung) gasfreisetzender Partikel in einer Schmelze	24
	2.1.2.6 Einbringen von Gas in partikelverstärkte MMC – Schmelzen	26
	2.1.2.7 Gas – eutektische Umwandlung eines Metall – Wasserstoff – Systems	28
	2.1.3 Sputter – Technologie	30
	2.1.4 Abscheidetechniken	30
	2.2 Patente	33
3	Verfahrens- und werkstofftechnische Grundlagen	43
	3.1 Die Gießereitechnik	43
	3.2 Gießen aus der Sicht des Umweltschutzes	43

3.3 Einteilung der Formverfahren	44
3.3.1 Verfahren mit verlorenen Formen	45
3.4 Gußlegierungen	50
3.5 Formbauteile aus Keramikfaserwerkstoffen	55
3.5.1 Einleitung zu Keramikfaserwerkstoffen	55
3.5.2 Herstellung	56
3.5.3 Anwendung	58
3.5.4 Vakuumformteile	58
4 Versuchsdarstellung	61
4.1 Verwendete Materialien	61
4.2 Versuchsaufbau	62
4.3 Versuchsdurchführung	63
4.3.1 Herstellung des Urmodells mittels Rapid - Prototyping	63
4.3.2 Wachsmodellherstellung	64
4.3.2.1 Herstellen der Dauerform (Matrize)	64
4.3.2.2 Herstellen des Wachsmodells für die Versuchsreihen	65
4.3.3 Vakuumformteilherstellung	67
5 Ergebnisse	74
5.1 Vorversuche	74
5.1.1 Positionierung des Wachsmodells im Vakuumbehälter	74
5.1.2 Fasermenge für die Vakuumformteile	75
5.1.3 Einbetten des Wachsmodells im Vakuumbehälter	76
5.1.4 Trocknungsprozeß	77
5.2 Versuchsreihen	79
5.2.1 Versuchsreihe 1	79
5.2.2 Versuchsreihe 2	83
5.2.3 Auswertung der Versuchsreihen 1 und 2	87
5.2.4 Einbetten des Wachsmodells im Vakuumbehälter	89
5.2.5 Abguß	90
5.3 Vergleich der Abbildungsgenauigkeit	91
6 Zusammenfassung und Ausblick	92
7 Literaturverzeichnis	94

0 Kurzfassung

Motivation und Zielsetzung

Der Trend zu immer leichteren und steiferen Bauteilen fordert die Ingenieure, an innovativen Verfahren und Bauteilen zu arbeiten. Durch die Forschungsk Kooperation zwischen der Firma Rath und dem Institut für Gießereikunde der Montanuniversität besteht die Möglichkeit, ein neues Verfahren zur Herstellung hohler und innenversteifter Gußteile weiter zu entwickeln. Dabei sollen Wachsmodelle mit komplexer Struktur in einer Vakuumabsaugungsanlage zu Verbundgußkernen geformt werden, die in weiterer Folge für die gießtechnische Herstellung von Bauteilen mit beliebig geformten Innenstrukturen zur Versteifung im Feinguß bzw. Genauguß verwendet werden sollen. Durch die Möglichkeit, die Innenstrukturen der Verbundgußkerne gezielt zu konstruieren, kann eine Verbesserung der Steifigkeit und Festigkeit der Bauteile erreicht werden. Dadurch können in der Konstruktion neue Wege beschritten werden und umweltverträgliche Produkte durch Gewichtsreduzierung und den daraus resultierenden Synergieeffekten hergestellt werden. In mehreren Versuchsreihen wird untersucht, ob Wachsmodelle mit vereinfachter Innenstruktur bereits vor der Herstellung der Keramikfaserkerne in der Vakuumabsaugungsanlage positioniert werden können. In der Abbildung I ist der prinzipielle Verfahrensablauf mit dem Versuchsziel dargestellt. Die Literatur- und Patentrecherche soll einen weiteren wesentlichen Schwerpunkt der Diplomarbeit darstellen. Diese soll einen Überblick über die Verfahren zur Herstellung der Metallschäume und möglicher Anwendungen dieser liefern. Die aus der Literatur- und Patentrecherche gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Verfahrensentwicklung für die Innenversteifung von Bauteilen angewandt werden. Die abgegossenen Versuchsteile sollen hinsichtlich Verformung und Abbildungsgenauigkeit untersucht und beurteilt werden.

Literatur- und Patentrecherche

Die Literatur- und Patentrecherche stellt einen Überblick über die Verfahren zur Herstellung der Metallschäume und möglicher Anwendungen dieser dar. Die aus der Literatur- und Patentrecherche gewonnenen Erkenntnisse wurden auf die Verfahrensentwicklung für die Innenversteifung von Bauteilen angewandt. Aus der Fachliteratur ist eine Vielzahl von technischen Verfahren zur Herstellung von metallischen Schäumen bekannt.

Diese Verfahren lassen sich in vier Gruppen einteilen:

- ▶ Pulvermetallurgische Verfahren
- ▶ Gießtechnische Verfahren
- ▶ Sputter technology
- ▶ Abscheidetechniken

Die pulvermetallurgischen Verfahren unterteilen sich in:

- Sintern loser Pulverschüttungen
- Aufschäumen eines kompaktierten Metallpulver – Treibmittel - Gemisches
- Hohkugelformkörper
- Ausgießen poröser Formen mit Pulverschlickern
- Schäumen von Metallpulverschlickern
- Sinter – Lösungs – Prozeß zur Herstellung von Aluminiumschäumen

Die schmelzmetallurgischen Verfahren teilen sich auf in:

- Feinguß, Präzisionsguß
- Umgießen von Platzhaltern
- Einbringen von Substitutionswerkstoffen (Platzhalter) in eine Schmelze
- Herstellung syntaktischer Metallschäume mittels Infiltrationsgußverfahren
- Spaltung (Zersetzung) gasfreisetzender Partikel in einer Schmelze
- Einbringen von Gas in partikelverstärkte MMC- Schmelzen
- Gas – eutektische Umwandlung eines Metall – Wasserstoff- Systems

Sputter Technologie: Mit diesem speziellen Verfahren werden Metallschäume mit geschlossenzelliger Porenstruktur hergestellt.

Abscheidetechniken: Unter dieser Kategorie sind diejenigen Verfahren zusammengefaßt, welche von einem offenporigen, im allgemeinen retikulierten organischen Trägerschaum ausgehen.

Stellvertretend werden zwei Verfahren kurz beschrieben.

Feinguß, Präzisionsguß

Das Gießen mit verlorenen Formen zählt zu diesen speziellen Gießverfahren. Dabei werden die Lücken eines offenporigen Kunststoffschäumens oder eines netzwerkartigen Harzmodells mit einem flüssigen Feuerfestwerkstoff ausgefüllt und anschließend verfestigt. Der Kunststoff wird durch Erhitzen aus der Gußform entfernt. So wird eine inverse Struktur des Kunststoffschäumens als Gußform erzeugt. Diese Gußform wird mit flüssiger Schmelze gefüllt und abgekühlt. Der feuerfeste Werkstoff wird nach der Erstarrung des Metalls entfernt, und ein Metallschaum mit derselben Struktur wie der originale Kunststoffschwamm wird erhalten. In der Abbildung II ist das Verfahren veranschaulicht.

Umgießen von Platzhaltern

Mit diesem Verfahren werden offenporige Metallschäume mit miteinander verbundenen Poren hergestellt. Das Grundprinzip ist in Abbildung III dargestellt. Demnach sind folgende Schritte zu vollziehen: Herstellen der Platzhalterstruktur, Infiltration des Platzhaltergerüsts mit flüssigem Metall, Entfernen des Platzhaltermaterials. Die Dichte und Porenmorphologie wird durch die Wahl der Platzhalter eingestellt.

Die in der Patentrecherche gefundenen Patente sind einerseits in die Beschreibung der Verfahren zur Herstellung metallischer Schäume eingeflossen und andererseits wurden Patente vorgestellt, die in die Serienfertigung aufgenommene Bauteile beschreiben. Die in den Patenten beschriebenen Bauteile weisen Gemeinsamkeiten auf, das sind die Erhöhung der Steifigkeit der Bauteile bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion. Dies wird dadurch erreicht, daß in die Hohlräume der Bauteile Kerne aus Metallschaum eingebracht werden.

Stellvertretend wird das Patent „Rad für ein Kraftfahrzeug mit Hohlspeichen“ angeführt (siehe Abbildung IV). Die Erfindung bezieht sich auf ein Rad für ein Kraftfahrzeug mit Hohlspeichen, das aus Leichtmetall besteht, und in einem Gußverfahren herstellbar ist. Die Radspeichen weisen in einem Hohlraum einen verlorenen Kern auf, der entweder aus Metall- oder Keramikschaum besteht. Durch den Einsatz des verlorenen Kerns wird die Formbeständigkeit der Radspeichen unterstützt, dadurch kann eine geringere Wandstärke der Radspeichen gewählt werden, wodurch das Rad insgesamt leichter wird.

Verfahrens- und werkstofftechnische Grundlagen

Aus den Abläufen des Gipsformverfahrens und der Herstellung von Formbauteilen aus Keramikfaserwerkstoffen wurde die Vorgehensweise für die Versuchsreihen abgeleitet.

Das Gipsformverfahren ist innerhalb der Formverfahren mit verlorenen Formen in die Gruppe der Verfestigungsformverfahren einzuordnen. Es ist eine spezielle Ausführungsart des Feingießverfahrens. Der Name Feingießen wird im gesamten deutschsprachigen Raum für das industriell angewandte Gießen mit einem verlorenen Modell, für das sogenannte Metallausschmelzverfahren, verwendet. Bei diesem Verfahren werden verlorene Formen mit verlorenen Modellen hergestellt. Das Gipsformverfahren unterscheidet sich in der Herstellung der Keramikform vom Feingießverfahren. Beim Gipsformverfahren wird das Wachsmo­dell in einem Kasten in Keramikmasse eingegossen, wobei die Oberseite des Eingußtrichters ausgespart wird. Das Trocknen der Form an der Luft dauert 2 bis 24 Stunden. Nach dem Ausschmelzen des Wachsmodells wird die Form gebrannt. Das flüssige Metall wird in die heiße Form gegossen, das begünstigt das Auslaufen dünnster Querschnitte. Nach dem Erkalten der Abgüsse wird die

keramische Form durch Schlagen oder Rütteln entfernt. Danach werden Anguß und Speiser vom Gußstück getrennt.

Die Formbauteile aus Keramikfaserwerkstoffen werden aus Aluminiumsilikat- und Aluminiumoxidfasern und organischen sowie anorganischen Bindemitteln in der Vakuumformerei der Fa. Rath hergestellt. Die amorphen Aluminiumsilikatfasern werden entweder durch einen Blas- oder Zentrifugierprozeß hergestellt. Die polykristallinen Aluminiumoxidfasern werden durch einen Spinnprozeß hergestellt.

Fasern, Füllstoffe und Binder werden in einem Tank vorgemischt und anschließend in den Formtank übergeführt. Die Form, welche das Negativ des späteren Produktes darstellt, ist mit einem Sieb bespannt und an eine Vakuummaschine angeschlossen. Beim Durchsaugen der Suspension durch die Form bildet sich ein Filterkuchen, das Rohprodukt. Die Flüssigkeit wird in den Prozeß zurückgeführt (siehe Abbildung V). Dieses Rohprodukt wird getrocknet und danach mechanisch bearbeitet. Oft erfolgt als Nachbehandlung ein Standardbrand bei einer Temperatur von 1000°C über einen Zeitraum von 4 Stunden.

Die Brauchbarkeit als feuerfester Werkstoff beruht auf der Anwesenheit des beim Brennen entstehenden Minerals „Mullit“. Dieses zeichnet sich durch hohe Feuerfestigkeit und niedrige thermische Dehnung aus. Je nach Aluminiumoxidgehalt werden diese Materialien bis 1800°C eingesetzt. Im Gegensatz zu Schamottesteinen bilden die Keramikfasern keine dichten Körper. Vielmehr besteht die Textur dieses Werkstoffes aus unzähligen Faserpartikeln, zwischen denen sich Lufträume bilden. Bedingt durch die faserige Textur haben diese Werkstoffe eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit.

Vakuumformteile sind chemisch neutral, unempfindlich gegen die meisten Säuren und Laugen, ausgenommen sind Flußsäure, sowie Phosphorsäure und starke Alkalien.

Versuchsdarstellung

In den Versuchsreihen wird untersucht, ob Wachsbauteile für die Herstellung von Vakuumfaserkernen mit beliebiger Innenstruktur verwendet werden können. Als Versuchsgeometrie wird eine Sechskantstruktur mit Innenversteifung (siehe Abbildung VI) verwendet.

Die einzelnen aufeinander abgestimmten Einsatzstoffe für die Vakuumformteile, die angewendet werden, stammen ausschließlich von der Fa. Rath. Es sind dies Fasermaterialien, Füllstoffe, Bindemittel und Härter. Es werden zwei Fasermaterialien verwendet, nämlich die Faser Alsitra (Aluminiumsilikatfaser) und die Faser Altra (Aluminiumoxidfaser).

Um die Versuchsreihen durchführen zu können, wurde eine Minivakuumanlage entwickelt und am Institut für Gießereikunde der Montanuniversität Leoben aufgebaut. In der Abbildung VII ist das verfahrenstechnische Fließbild dargestellt.

Das Urmodell der Versuchsgeometrie wurde mit der Rapid-Prototyping Anlage, Model Maker II, gefertigt. Mit Hilfe des Urmodells wurde eine Dauerform aus Silikon hergestellt.

Diese Dauerform diente zur Herstellung der Wachsmodelle für die Versuche. Dabei wurde mit Abspritzgerät Gefie I flüssiges Wachs in die Dauerform gespritzt. Nach dem Erstarren wurde das fertige Wachsmo­dell aus der Dauerform entnommen.

Zur Herstellung der Vakuumformteile wird die Minivakuumanlage verwendet. Die einzelnen Einsatzstoffe werden nach der Reihenfolge Fasern, Füllstoffe, Bindemittel und Härter, in bestimmten zeitlichen Abständen dem Rührbehälter, in dem sich eine vorgeschriebene Wassermenge befindet, zugesetzt. Bevor die Suspension in den Vakuumbehälter überführt wird, wird das Wachsmo­dell mit Positionierhilfen über dem Siebboden positioniert. In der ersten Versuchsreihe wird der gesamte Inhalt des Rührbehälters in einem Vorgang in den Vakuumbehälter geleert. In der zweiten Versuchsreihe wird die Suspension mit einer Pumpe in den Vakuumbehälter gefördert. Der Aufbau des Vakuumformteiles funktioniert nach dem Prinzip der Kuchenfiltration. Beim Absaugen der Suspension lagern sich die gebildeten Faserflocken am Siebboden ab und bilden einen Filterkuchen. Dabei wird das Wachsmo­dell vollständig mit Fasermaterial eingeschlossen. Nach dem Entformen wird der Vakuumformteil im Trockenschrank getrocknet. Anschließend wird das Wachsmo­dell bei 150°C über einen Zeitraum von 8 Stunden im Wärmebehandlungs­ofen ausgeschmolzen. Der Abguß erfolgt mit der Aluminiumlegierung (AlSi 12) bei einer Temperatur von 700°C. Nach dem Erstarren werden die Gußteile aus den Vakuumformteilen ausgepackt und gereinigt.

Ergebnisse

Die Vorversuche dienten zur Abklärung grundsätzlicher Fragen: wieviel Fasermenge muß verwendet werden zur Einbettung des Wachsmo­dells, wie wird das Wachsmo­dell im Vakuumbehälter positioniert, treten Verformungen des Wachsmo­dells beim Trocknungsprozeß auf.

Für den ersten Vorversuch wurde zur Positionierung des Wachsmo­dells im Vakuumbehälter die Dauerform zur Herstellung des Wachsmo­dells, die in der Diplomarbeit „Verfahrensentwicklung für das Umgießen von Keramik- Vakuumformteilen“ verwendet wurde, eingesetzt. Durch den relativ engen Öffnungsquerschnitt gelang es nicht, den gesamten Inhalt des Rührbehälters in die Dauerform zu füllen. Dadurch wurde das Wachsmo­dell nicht vollständig mit Fasermaterial eingebettet. Um das Befüllen und Entformen des Vakuumformteiles zu erleichtern, wurden für die weiteren Vorversuche und Versuchsreihen Positionierhilfen (Würfel: 3x3x3 cm mit einer Nut: 1,5x0,3 cm) eingesetzt. Durch die Positionierung des Wachsmo­dells mit den Positionierhilfen stellte sich beim nächsten Versuchskörper die Fasermenge als zu gering dar. Daher wurde für die weiteren Vorversuche die Menge der Faser Alsitra erhöht. Nach weiteren Vorversuchen zeigte sich, daß sich an der Unterseite der Versteifungen des Wachsmo­dells Hohlräume gebildet haben. Daher wurde entschieden zusätzlich die höherwertige Faser Altra einzusetzen. Mit dieser Faser wurde ein weiterer Vakuumformteil hergestellt. Trotzdem bildeten sich an der

Unterseite der Versteifungen des Wachsmodells Hohlräume. Ein Grund dafür ist, daß sich die Faserflocken nach dem Abschalten des Rührwerkes im Rührbehälter absetzen und Agglomerate bilden. Diese Agglomerate bilden beim Einfüllen der Suspension in einem Vorgang in den Vakuumbehälter auf den Versteifungen des Sechskantes bereits einen Filterkuchen. Dadurch wird das Wachsmodell nicht vollständig eingebettet. Um das auszuschließen, wurde beim nächsten Vorversuch die Suspension mit Hilfe einer Pumpe in den Vakuumbehälter gefördert. Der Effekt, daß die Versteifungen Sechskantes wie ein grober Siebboden wirkten, und die Faserflocken auf den Versteifungen einen Filterkuchen bildeten konnte deutlich verringert werden. Dadurch wurde auch mehr Fasermaterial zwischen die Versteifungen des Sechskantes eingebracht. Beim Trocknungsprozeß ($T=70^{\circ}\text{C}$, $t=48\text{ h}$) zeigte sich, daß sich die Wachsmodelle durch die Erwärmung verformten. Zur Verformung trägt auch die Binderwanderung in den Vakuumformteilen bei. Daher wurde die Trocknungstemperatur auf 60°C für die Versuchsreihen eingestellt.

Es wurden 2 Versuchsreihen durchgeführt. Für die beiden Versuchsreihen wurden die Fasern Alsitra und Altra eingesetzt, wobei bei der ersten Versuchsreihe der gesamte Inhalt des Rührbehälters in einem Vorgang in den Vakuumbehälter geleert wurde, und in der zweiten Versuchsreihe wurde die Suspension mit einer Pumpe in den Vakuumbehälter gefördert. Für jede Versuchsreihe wurde die von der Rezeptur vorgeschriebene Wassermenge, die 2 fache Wassermenge und die 3 fache Wassermenge verwendet.

Durch die beiden Versuchsreihen zeigte sich, daß die Faser Altra (Aluminiumoxidfaser) ein deutlich besseres Ergebnis lieferte als die Faser Alsitra (Aluminiumsilikatfaser) (siehe Abbildungen VIII bis XI). Die Faser Altra besitzt zwei wesentliche Vorteile gegenüber der Faser Alsitra. Diese sind einerseits der durch ein anderes Herstellungsverfahren bedingte geringere Shotgehalt und die höhere mechanische Stabilität. Der geringere Shotgehalt erlaubt es ein genau definiertes Verhältnis zwischen Fasern, Füllstoffen und Bindemittel einzuhalten. Daher können die „kleinen“ Faserflocken über einen längeren Zeitraum beim Rühren stabil gehalten werden. Durch die höhere mechanische Stabilität ist gewährleistet, daß die Fasern durch die Rührbewegung nicht zerkleinert werden. Daher wird das Wachsmodell besser eingebettet. Als zweites Ergebnis kann aus den Versuchsreihen abgeleitet werden, daß durch die Förderung der Suspension mittels Pumpe in den Vakuumbehälter deutlich mehr Faserflocken zwischen die Versteifungen des Wachsmodells eingebracht werden. Dadurch wird die Abbildungsgenauigkeit erhöht. Aus der Erhöhung der Menge des Ansatzwassers (2 fache, 3 fache Wassermenge) konnte keine Verbesserung der Einbettung der Wachsmodelle abgeleitet werden. Sämtliche Gußteile weisen eine Durchbiegung in die gleiche Richtung auf, d.h. das Wachsmodell hat sich trotz Erniedrigung der Trocknungstemperatur auf 60°C durch die Wärmeausdehnung des Materials und den dadurch auftretenden Wärmespannungen verformt. Beim Abgießen kam es durch die Hitzeeinwirkung der AlSi 12 Schmelze (Abgußtemperatur 700°C) zur Verbrennung des Bindemittels im Vakuumformteil. Dies führte zu einer Gasbildung.

Aufgrund der Porosität der Vakuumformteile können die Gase entweichen, und es sind daher keine Maßnahmen zur Abführung der entstehenden Gase zu treffen.

Aus den Bildern XII und XIII ist zu erkennen, daß sich die Versteifungen an der Oberseite des Gußteiles gut abgebildet haben. Aus diesem Teilergebnis kann abgeleitet werden, daß durch Lösen des Problems, der Entstehung von Hohlräumen an der Unterseite des Wachsmodells bei der Einbettung mit Fasern, Gußteile mit hoher Abbildungsgenauigkeit mit diesem Verfahren hergestellt werden können.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Literatur- und Patentrecherche stellt einen Überblick über die Verfahren zur Herstellung der Metallschäume und möglicher Anwendungen dieser dar. Die Vorteile der Metallschäume wie z.B. hohe Steifigkeit, geringes spezifisches Gewicht und hohes Energieabsorptionsvermögen, die in der Literatur- und Patentrecherche aufgezeigt wurden, flossen in die Überlegungen für die Herstellung der Verbundgußkerne mit beliebiger Innenstruktur ein.

Um die Versuchsreihen durchführen zu können, wurde am Institut eine Vakuumabsaugungsanlage aufgebaut. Für die Versuchsreihen wurde eine einfache Versuchsgeometrie herangezogen und als Wachsmodell hergestellt. Die Wachsmodelle wurden in den Versuchsreihen in der Vakuumabsaugungsanlage mit Keramikfasern eingebettet und zu Vakuumformteilen geformt. Nach dem Trocknen und Ausschmelzen des Wachsmodells wurden die Vakuumformteile mit der Aluminiumlegierung (AlSi 12) abgegossen. Aus den abgegossen Versuchsteilen war zu erkennen, daß diese nicht genau abgebildet wurden.

Ein möglicher industrieller Einsatz zur Herstellung von Verbundgußkernen mit beliebiger Innenstruktur, und zur Herstellung von Hohlgußteilen ist aus den Versuchsreihen, die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführt wurden, noch nicht ableitbar. Es wird daher im folgenden ein erfolgversprechender Lösungsansatz dargestellt, der in nachfolgenden Arbeiten zu untersuchen ist.

Eine Möglichkeit besteht darin, das Wachsmodell zuerst im Vakuumbehälter starr in einer Vorrichtung, die im Vakuumbehälter integriert und fixierbar ist, zu positionieren. Anschließend wird das Wachsmodell mit dem Fasermaterial eingebettet. Nach Beendigung des Einbettvorganges wird die Arretierung gelöst, und es wird mit einem Stempel von oben nachgedrückt, um den Vakuumformteil zu verdichten, wobei das Wachsmodell mit der Vorrichtung nach unten mitbewegt wird. Dadurch wird die Einbettung des Wachsmodells verbessert, und es sollen weniger Hohlräume bzw. keine Fehlstellen unter den Versteifungen des Sechskantmodells auftreten.

Insgesamt gesehen steckt in dieser Verfahrensentwicklung ein großes Potential und daher sollten zur Abklärung der aufgetauchten Fragen weitere Versuchsreihen durchgeführt werden.

Anwendungsperspektiven für Bauteile mit Verbundgußkernen, die gezielt konstruierte Innenstrukturen aufweisen, liegen im Bereich des Maschinen- und Automobilbaus. Dabei ist vor allem das Verhältnis von Steifigkeit zu Masse interessant. Anwendungsideen umfassen Meßtische, tragende Maschinenteile, Bauteile, die aufgrund von Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen geringe Massen und eine hohe Bauteilsteifigkeit aufweisen sollen, Fahrwerksteile. Im Automobilbau sind Anwendungen denkbar, wo durch die Gewichtsreduzierung und den daraus resultierenden Synergieeffekten der Treibstoffverbrauch gesenkt werden kann.

Aus jetziger Sicht sind noch nicht alle möglichen Einsatzgebiete dieser Bauteile abschätzbar.

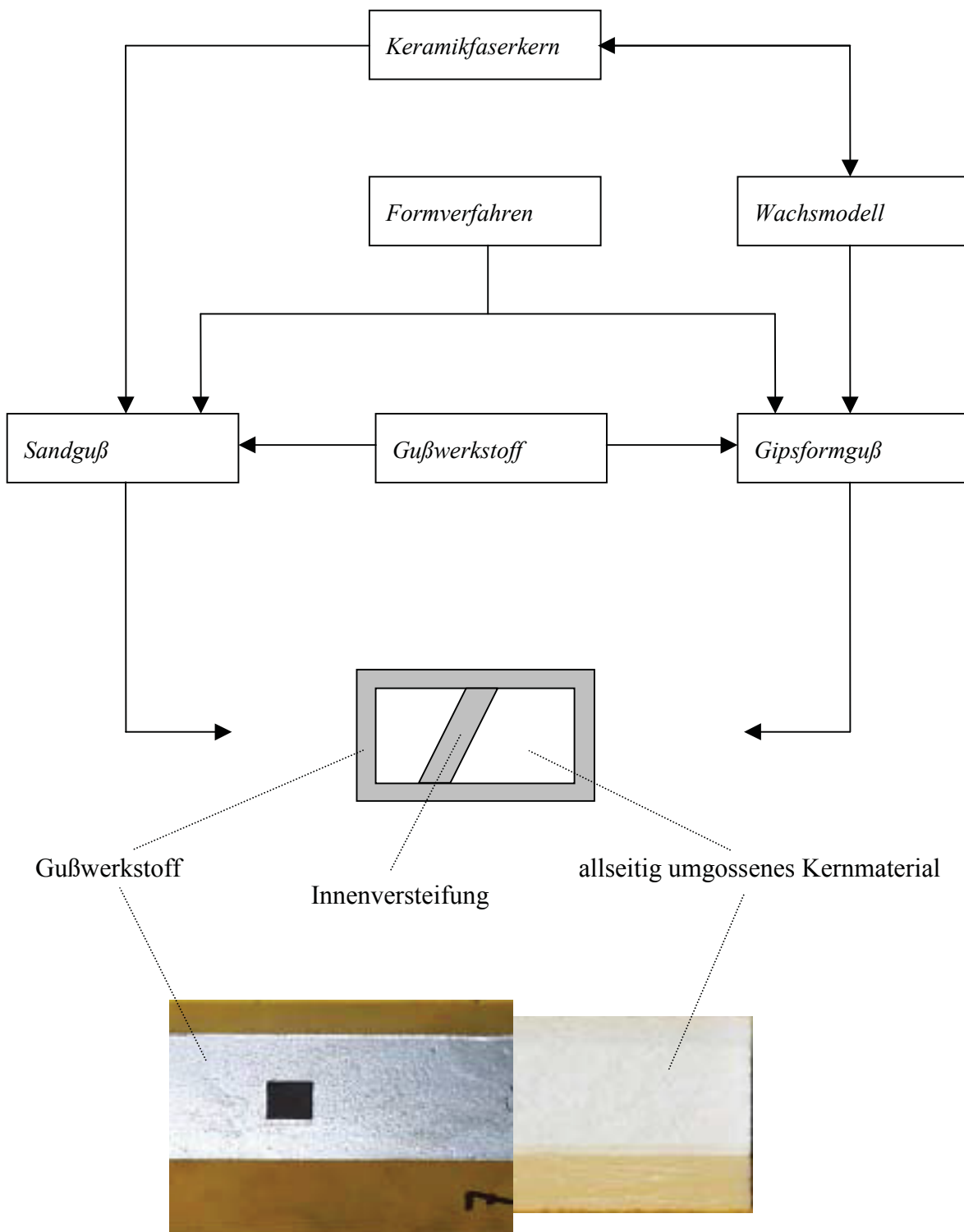


Abbildung I: Prinzipieller Verfahrensablauf mit dem Versuchsziel

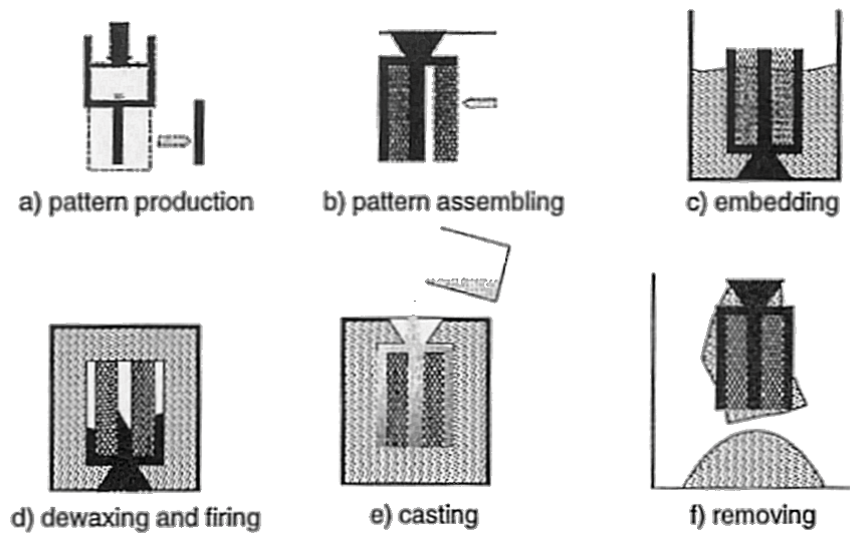


Abbildung II: Präzisionsgießprozeß [28]

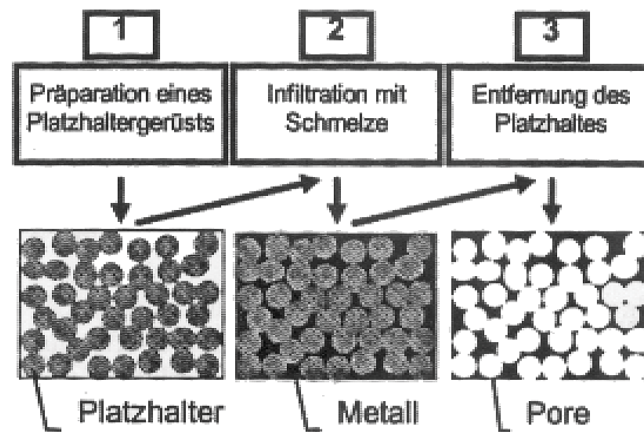


Abbildung III: Verfahren zur Herstellung offenporiger metallischer Strukturen [32]

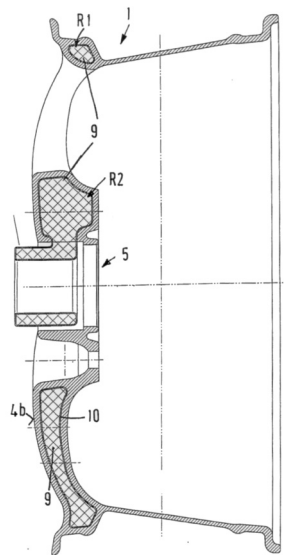


Abbildung IV: Rad für ein Kraftfahrzeug mit Hohlspeichen

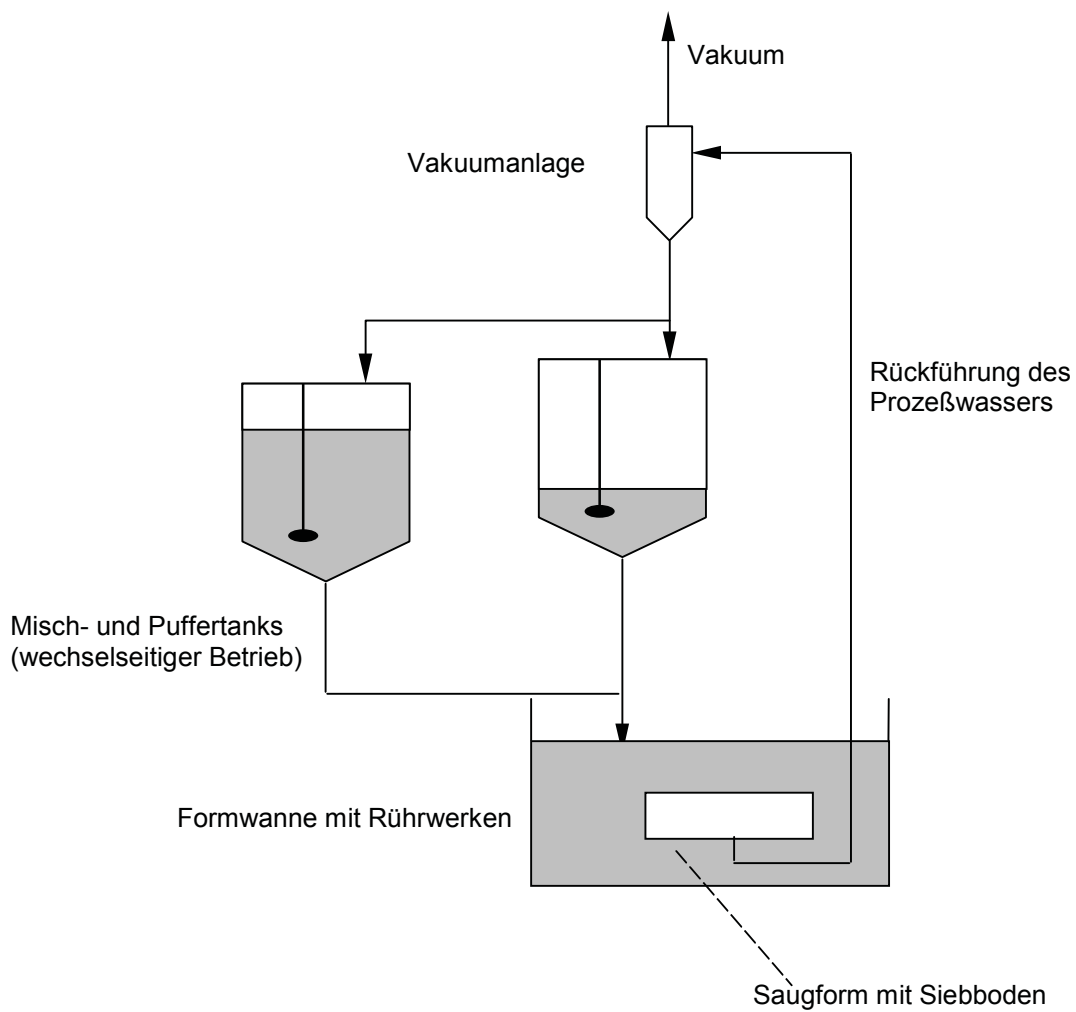


Abbildung V: Schema einer Vakuumformanlage [71]



Abbildung VI: Versuchsgeometrie

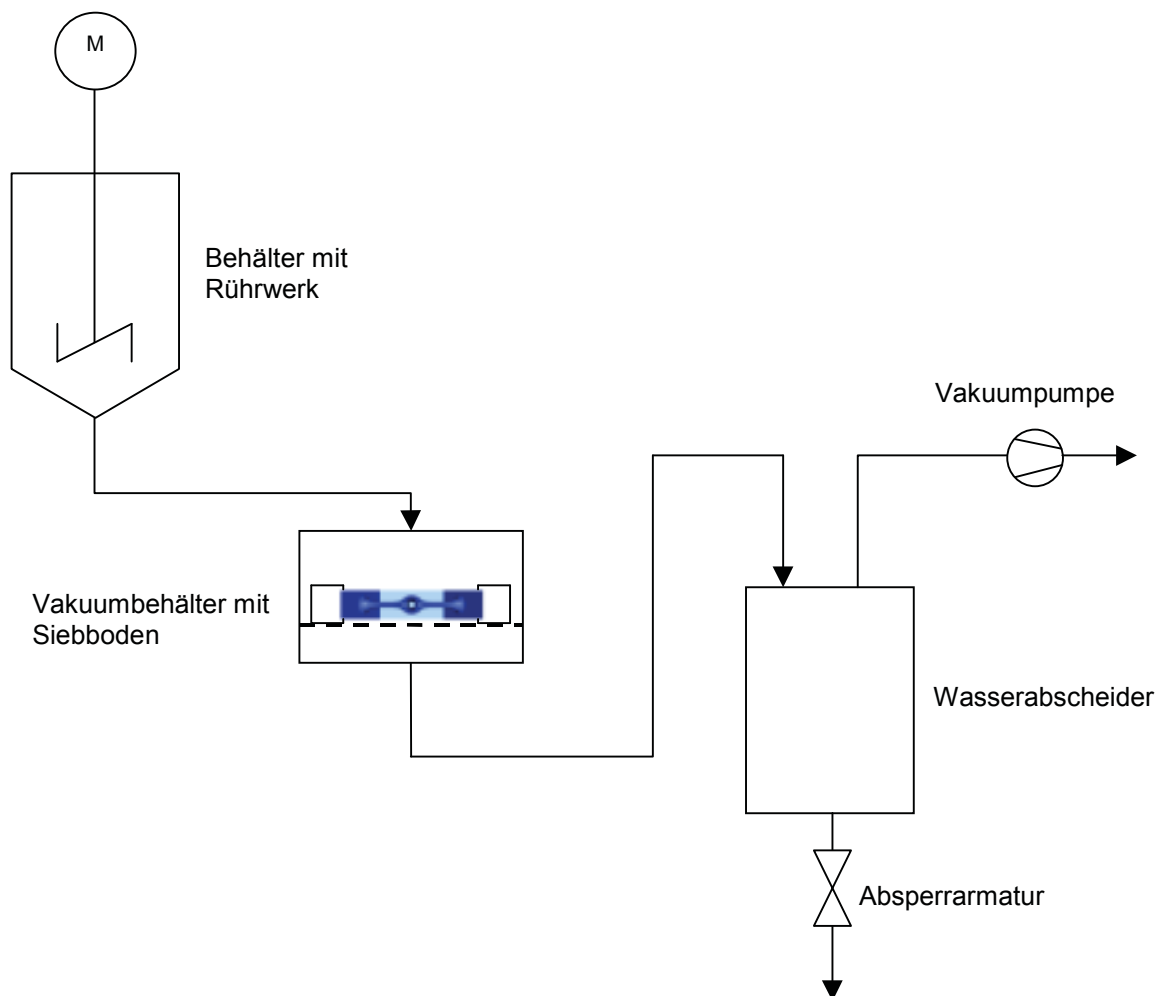


Abbildung VII: verfahrenstechnisches Fließbild der Minivakuumanlage



Abbildung VIII: Gußteil AV3 aus der Versuchsreihe 1 (Altra)



Abbildung IX: Gußteil AP2V6 aus der Versuchsreihe 2 (Altra)



Abbildung X: Gußteil B8 aus der Versuchsreihe 1 (Alsitra)



Abbildung XI: Gußteil BP2V13 aus der Versuchsreihe 2 (Alsitra)



Abbildung XII: Ausschnitt des Wachsmodells



Abbildung XIII: Ausschnitt des Gußteiles AP2V6

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Trend zu immer leichteren und steiferen Bauteilen fordert die Ingenieure, an innovativen Verfahren und Bauteilen zu arbeiten. Durch die Forschungsk Kooperation zwischen der Firma Rath und dem Institut für Gießereikunde der Montanuniversität besteht die Möglichkeit, ein Verfahren weiter zu entwickeln.

Es sollen Wachsmodelle mit komplexer Struktur in einer Vakuumabsaugungsanlage zu Verbundgußkernen geformt werden, die in weiterer Folge für die gießtechnische Herstellung von Bauteilen mit beliebig geformten Innenstrukturen zur Versteifung im Feinguß bzw. Genauß verwendet werden sollen.

Dabei sollen die Vorteile der Metallschäume, die Stand der Technik sind, genutzt werden, wie z.B. hohe Steifigkeit, geringes spezifisches Gewicht, hohes Energieabsorptionsvermögen. Da die Metallschäume in den meisten Fällen zufällige Strukturen aufweisen, sollen diese durch gezielt konstruierte Metallschaum- bzw. Metallschwammstrukturen ersetzt werden. Der Vorteil der konstruierten Struktur ist, daß deren Eigenschaften in alle Raumrichtungen variiert werden können.

Durch die Möglichkeit, die Innenstrukturen der Verbundgußkerne gezielt zu konstruieren, kann eine Verbesserung der Steifigkeit und Festigkeit der Bauteile erreicht werden. Dadurch können in der Konstruktion neue Wege beschritten werden und umweltverträgliche Produkte durch Gewichtsreduzierung und den daraus resultierenden Synergieeffekten hergestellt werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Diplomarbeit ist es, ein Verfahren zur Herstellung von Verbundgußkernen mit beliebiger Innenstruktur aus Keramikfasern zu entwickeln.

In mehreren Versuchsreihen wird untersucht, ob Wachsmodelle mit vereinfachter Innenstruktur bereits vor der Herstellung der Keramikfaserkerne in der Vakuumabsaugungsanlage positioniert werden können.

In der Abbildung 1.1 ist der prinzipielle Verfahrensablauf mit dem Versuchsziel dargestellt.

Im Rahmen einer Literatur- und Patentrecherche soll abgeklärt werden, welche Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen existieren. Weiters soll geklärt werden, ob bereits

Verfahren angewendet werden, die Kerne aus Keramikfasern zur Herstellung von Bauteilen benützen, und ob gleichwertige Versuchsreihen durchgeführt wurden.

Die abgegossenen Versuchsteile sollen hinsichtlich Verformung und Abbildungsgenauigkeit untersucht und beurteilt werden.

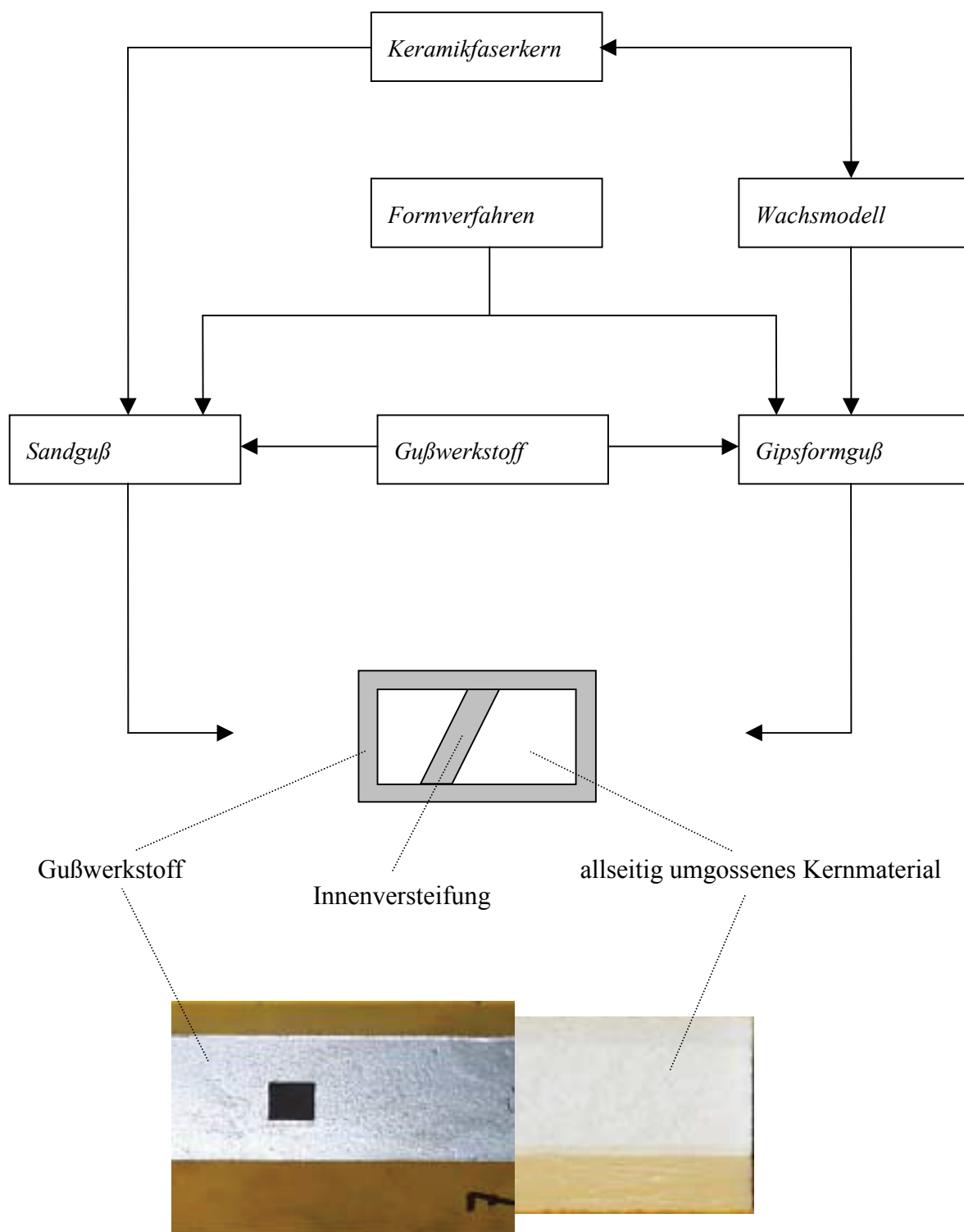


Abbildung 1.1: Prinzipieller Verfahrensablauf mit dem Versuchsziel

2 Literatur- und Patentrecherche

Einleitung

Der Trend zu immer leistungsfähigeren Leichtbaustrukturen im modernen Automobilbau soll zu einer effektiveren Ausnutzung der für die Fortbewegung aufzubringenden Energie führen. Das heißt, Werkstoffe mit niedriger Dichte bei relativ hoher Steifigkeit finden immer größeres Interesse. Abgesehen von der reinen Gewichtsreduktion sind weitere Aspekte wie Komfort, Sicherheit, Werkstoffkreislauf, Umweltverträglichkeit zu berücksichtigen.

Von dieser Seite hat in den letzten Jahren das Interesse an Metallschäumen deutlich zugenommen. Zum einen bedingt durch neue Verfahrensentwicklungen, die eine höhere Qualität, Wirtschaftlichkeit und Reproduzierbarkeit des geschäumten Metalls versprechen als auch durch geänderte Rahmenbedingungen.

Von den Metallschäumen wird eine deutliche Verbesserung der passiven Sicherheit und des Crashverhaltens im Automobilbau sowie des Metallrecyclings erwartet.

Die Literatur- und Patentrecherche stellt einen Überblick über die Verfahren zur Herstellung der Metallschäume und möglicher Anwendungen der Metallschäume dar.

Die Vorteile der Metallschäume wie z.B. hohe Steifigkeit, geringes spezifisches Gewicht und hohes Energieabsorptionsvermögen, die in der Literaturrecherche aufgezeigt wurden, fließen in die Überlegungen für die Herstellung der Verbundgußkerne mit beliebiger Innenstruktur ein. Der Unterschied zu den Metallschäumen besteht darin, daß die Verbundgußkerne eine gezielt konstruierte Metallschaum- bzw. Metallschwammstruktur besitzen. Der Vorteil der konstruierten Struktur ist, daß deren Eigenschaften in alle Raumrichtungen variiert werden können.

Durch die CAD-Konstruktion können die erzeugten Daten für Simulationsprogramme, FEM-Berechnungen und Topologieoptimierungen herangezogen werden. Somit können die Leichtbauteile bezüglich ihrer Beanspruchung optimiert werden.

Aufgrund der Vielzahl und Komplexität der Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen wird in dieser Arbeit ein Schwerpunkt auf die Literatur- und Patentrecherche gelegt.

Die aus der Literatur- und Patentrecherche gewonnenen Erkenntnisse sollen auf die Verfahrensentwicklung für die Innenversteifung von Bauteilen angewandt bzw. optimiert werden.

2.1 Verfahren zur Herstellung metallischer Schäume

Aus der Fachliteratur ist eine Vielzahl von technischen Verfahren zur Herstellung von metallischen Schäumen bekannt. Diese Verfahren lassen sich in vier Gruppen einteilen.

- Pulvermetallurgische Verfahren
- Gießtechnische Verfahren
- Sputter technology
- Abscheidetechniken

2.1.1 Pulvermetallurgische Verfahren

2.1.1.1 Sintern loser Pulverschüttungen

Ein zur Zeit technisch angewandtes Verfahren zur Herstellung poröser Metalle ist das Sintern von losen Pulverschüttungen [1]. Während des Sinterns verbinden sich die Pulverteilchen an deren Berührungspunkten, dies wird durch die Wirkung von Kapillar- oder Oberflächenspannungskräften verursacht. Eine Druckbeaufschlagung ist für den Sinterprozeß nicht notwendig. Daher kann das Metallpulver in Formen gefüllt und anschließend gesintert werden. Dabei ist der Sintervorgang so zu steuern, daß die übliche Schrumpfung beim Sintern so gering wie möglich gehalten wird [2].

Prinzipielle technische Anwendungen für poröse metallische Materialien, die aus diesem Prozeß gewonnen werden, sind die Verwendung als Filter, poröse Membranen, Gleitlager, Elektroden für Batterien und Brennstoffzellen. In der Regel werden Porositäten zwischen 40 und 60 % erreicht [1]. Durch Zugabe von Platzhaltern zum Metallpulver, die sich während des Sinterns entweder zersetzen oder verdampfen durch Sublimation oder Lösen entfernt werden, kann die Porosität wesentlich erhöht werden. Als Platzhalterwerkstoffe kommen beispielsweise organische oder anorganische Verbindungen wie Harnstoff, Ammoniumhydrogencarbonat, Ammoniumtetrachlorid und Methyl - Zellulose (für Ni - Membranen) zum Einsatz. Die so herstellbaren Produkte weisen keine abgeschlossene Zellstruktur auf und werden normalerweise nicht zu den Schäumen gezählt [3].

Während dieses Verfahren für Cu-, Ni-, und Ta- basierte Werkstoffe eingesetzt wird, ist es für Aluminiumwerkstoffe nicht geeignet, da die Aluminiumpartikel von einer stabilen Oxidschicht umgeben sind, welche ein spontanes Sintern verhindert [2].

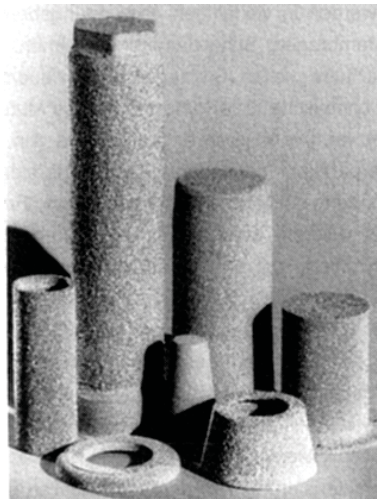


Abbildung 2.1: Hochporöse PM – Produkte [4]

2.1.1.2 Hohlkugelformkörper

Die deutlichen Vorteile von Hohlkugelstrukturen führten in der Vergangenheit zu verschiedenen Realisierungsversuchen. Ihnen gemeinsam ist, daß sie bisher vor allem aus Kostengründen keine praktische Relevanz erlangt haben, da sie zunächst die fertigen metallischen Hohlkugeln benötigten [5]. Bislang standen hauptsächlich galvanisch hergestellte Hohlkugeln zur Verfügung, die lediglich aus technisch weniger interessanten, galvanisch abscheidbaren Metallen dargestellt werden können. Galvanische Hohlkugeln weisen zudem immer ein Loch in der Kugelschale auf und werden bei größeren Wanddicken recht teuer. Die fertigen Hohlkugeln wurden dann in weiteren Prozeßschritten angeordnet und durch Sintern, Kleben, Löten, Heiisostatpressen oder durch Auffüllen der Hohlräume mit pulverförmigen Metallen, Metallegierungen und anschließendem Sintern zur gewünschten Struktur verbunden [6, 7]. Diese Prozeroute ist, abgesehen von den Materialeinschränkungen beim Galvanisieren, durch die große Anzahl der Verarbeitungsschritte gekennzeichnet.

Eine alternative Methode stellt die Hohlkugelgrünlinge durch Verdüsen einer Lösung aus geschmolzenem Metall und einem Gas (Inertgas), das eine geringe Löslichkeit im geschmolzenen Material aufweist, her. Die so gewonnenen Tropfen werden im Fallturm in einer Gasatmosphäre von außen gekühlt. Dabei erstarrt das geschmolzene Material von außen nach innen und es bildet sich im Zentrum des Tropfens eine Gasblase durch den Effekt, daß der Sättigungspartialdruck eines löslichen Gases im festen Material (Metalle) geringer ist. Nach dem Aushärten des Hohlkugelgrünlings wird dieser in einem zweiten Fallturm in einer Atmosphäre, dessen Gesamtdruck niedriger ist als der Druck des Gases innerhalb des Schalenkörpers, wieder erwärmt. Dies verbessert das Verhältnis des Außendurchmessers zur Wanddicke. Die Hohlkugeln werden nach Größe und relativer Dichte sortiert und klassiert und anschließend entweder durch Heiisostatpressen, Vakuumsintern, Flüssigphasensintern verfestigt. Nach dieser Methode werden Hohlkugeln

in der Größe von 0,3 – 1 mm und einer relativen Dichte kleiner als $0,1 \text{ g/cm}^3$ erhalten [8, 9].

Georgia Tech entwickelte ein weiteres Verfahren zur Herstellung der metallischen Hohlkugeln. Ein Schlicker, bestehend aus feinen, zersetzbaren Keramikeilchen (z. B.: TiH_2), organischen Bindemittel und Lösungsmittel, wird verwendet, um 1 – 5 mm große flüssige Hohlkugeln zu produzieren, die während deren freien Fall in einem hohen Fallturm durch Verdampfung aushärten (siehe Abbildung 2.2). Diese Hohlkugeln werden anschließend erhitzt, um das Lösungsmittel auszutreiben und das Bindemittel zu spalten und zu verflüchtigen (siehe Abbildung 2.3). Die abschließende Wärmebehandlung spaltet das Metallhydrid und hinterläßt die fertigen Hohlkugeln. Dieses Verfahren kann für zahlreiche Materialien angewendet werden (z. B.: TiH_2 , oder eine Oxidmischung wie Fe_2O_3 und Cr_2O_3 , welche reduziert wird, um Edelstahl herzustellen). Die Metallkugeln werden gesintert, um deren Festigkeit zu steigern. Anschließend wird durch Heißisostatpressen, Vakuumsintern, Flüssigphasensintern oder durch Infiltrieren einer Kugelpackung mit dem ursprünglichen Schlicker die Struktur verdichtet. Durch das Verdichten und Wärmebehandeln wird die Umwandlung in Metall durchgeführt.

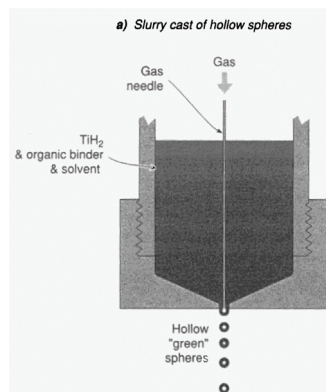


Abbildung 2.2: Georgia Tech Verfahren [9]

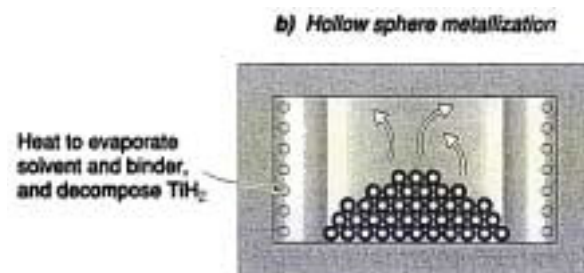


Abbildung 2.3: Wärmebehandlung der Hohlkugeln [9]

Ein weiteres pulvermetallurgisches Verfahren wurde im Jahre 1987 von H. Smigilski erfunden. Dabei werden vorwiegend kommerziell erhältliche Styroporkugeln (\varnothing 1 – 8 mm) in einem Wirbelschichtreaktor eingebracht und dort unter Bewegung mit einer wässrigen Suspension, die gelöstes oder suspendiertes Bindemittel und metallische und/oder keramische Partikel enthält, behandelt. Die so beschichteten und anschließend getrockneten Hohlkugelgrünlinge werden einer Wärmebehandlung unterzogen, bei welcher unter Bewegung die organischen Bestandteile pyrolysiert werden. Nachfolgendes Sintern liefert, ebenfalls unter Bewegung, die fertigen metallischen Hohlkugeln. Dieses Verfahren ist für beliebige Metalle und Legierungen anwendbar [10]. In Anlehnung an das vorab beschriebene Verfahren entwickelte die Dresdner Außenstelle für Pulvermetallurgie und Verbundwerkstoffe des IFAM ein aussichtsreicheres Verfahren. Dabei werden gesinterte Hohlkugelformkörper aus pulvermetallurgisch hergestellten Hohlkugelgrünlingen

ohne den Umweg über die metallische Einzelkugel hergestellt (siehe Abbildungen 2.4, 2.5). Der besondere Vorteil liegt in der verhältnismäßig wenig aufwendigen Formgebung, der prinzipiellen Nutzbarkeit aller technisch relevanten Metalle und Legierungen, sowie die Reduzierung der notwendigen Prozessschritte, indem der Formkörper aus den ungesinterten Hohlkugelgrünlingen hergestellt wird [5].

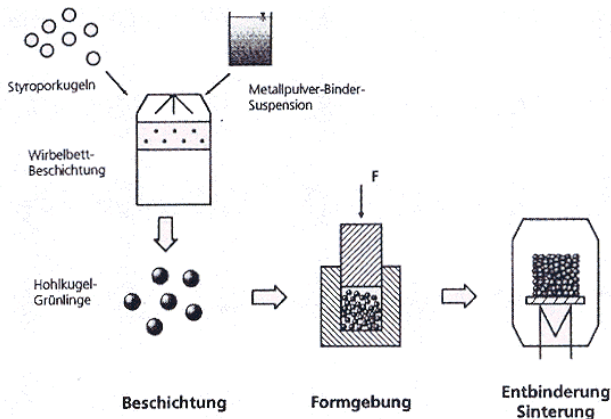


Abbildung 2.4: IFAM Verfahren zur Herstellung statistisch gepackter Hohlkugelformkörper [5]



Abbildung 2.5: Hohlkugelformkörper aus

Chrom – Nickelstahl

(Porosität rd. 80%, Dichte von $1,4 \text{ g/cm}^3$). Links: Kugeldurchmesser 0,5 mm, rechts:

Kugeldurchmesser 5 mm [5]

Hohlkugelformkörper haben eine genau definierte Mischung aus offener und geschlossener Porosität. Der herstellbare Durchmesserbereich reicht von 0,5 bis 10 mm bei Kugeldicken von rund 20 – 500 μm . Durch die praktisch monomodale Verteilung von Hohlkugelgröße und –wanddicke bieten sie von allen porösen Werkstoffen die beste Kontrolle über die mechanischen Eigenschaften [5].

2.1.1.3 Schäumen von Metallpulverschlickern

Das Schäumen von Metallpulverschlickern ist eine weitere pulvermetallurgische Möglichkeit zur Herstellung poröser Metalle. Zuerst wird ein Schlicker, der aus feinem Metallpulver und einem Schäumungsmittel (Treibmittel) fein verteilt in einer organischen Trägerflüssigkeit besteht, vorbereitet. Diese Mischung wird mechanisch zu Schaum aufgeschlagen und in einer nachträglichen Wärmebehandlung wird die Trägersubstanz entfernt und die Festigkeit des porösen Materials erhöht [11]. Diese Technik wurde für Berillimpulver und gebräuchlichere Ni-, Fe-, Cu-, Edelstahl- und Bronzepulver entwickelt. Um geschäumtes Aluminium zu erzeugen, wird ein Schlicker, der hauptsächlich aus feinem Aluminiumpulver und einem Treibmittel, das entweder Salzsäure, Aluminiumhydroxid und ortho - Phosphorsäure oder Salzsäure sein kann, vorbereitet. Der

Schlicker wird nach kurzem Mischen bei Raumtemperatur in Formen gegossen, um die gewünschte Gestalt zu erhalten. Wenn der Schäumprozeß nachläßt, wird dieser Schaum bei einer Temperatur in der Größenordnung von 100°C getrocknet, um dieser Struktur Festigkeit zu geben und die mechanischen Eigenschaften zu verbessern [11,12]. Das Sintern von Aluminiumschäumen ist nicht möglich, da die Partikel von einer stabilen Oxidschicht umgeben sind, und daher keine metallische Bindung zwischen den einzelnen Pulverteilchen ausbildet. Daher besitzt der Aluminiumschaum, der nach diesem Verfahren hergestellt wird, eine geringe Festigkeit und es werden die möglichen Anwendungen eingeschränkt [11].

2.1.1.4 Ausgießen poröser Formen mit Pulverschlickern

Um Metallschäume mit einer gleichmäßig hohen Porosität zu produzieren, können in der Pulvermetallurgie Schwammstrukturen als vorübergehende Stützstrukturen verwendet werden [13,14]. Ein schwammartiges organisches Material, wie z. B. ein Natur- oder Kunststoffschwamm aus Zellulose, Polystyrol, Polyurethan, wird in die gewünschte Form geschnitten und anschließend mit einem Schlicker benetzt oder imprägniert, der das gewünschte Metallpulver enthält. Das Bindemittel für den Schlicker ist Wasser oder eine organische Flüssigkeit (polares oder unpolares Lösungsmittel wie Alkohol, Azeton, Trichlorethylen, Kerosin, Naphthalin, Tetrachlorkohlenstoff). Der getränkte Schwamm wird danach getrocknet, um das Bindemittel zu entfernen. In einer anschließenden Wärmebehandlung wird der fertig getrocknete Schwamm genügend hoch erhitzt, sodaß dieser thermisch zersetzt oder pyrolysiert wird. So erhält man eine Negativform der Schwammstruktur mit der gewollten Form, Porenstruktur und -größe. Die abschließende Sinterbehandlung verbessert die mechanische Festigkeit des Materials. Nach dem Abkühlen liegt ein offenporöser Schaum mit geringster Dichte vor.

In einem alternativen Verfahren wird anstelle des Metallpulvers eine Metallverbindung verwendet [15]. Diese, z. B. Metall - Milchsäuresalz oder 2 - Hydroxycarbonsäuresalz, wird durch Erwärmen über deren Zersetzungstemperatur in das entsprechende Metall umgewandelt. Gleichzeitig wird die temporäre Stützstruktur (z.B. Zellulosefasern) durch Verbrennung (Oxidation) zerstört. Dieser Prozeß wird zur Herstellung von Silberplatten mit einer Porosität von 70 bis 90% verwendet.

2.1.1.5 Aufschäumen eines kompaktierten Metallpulver – Treibmittel- Gemisches

Aus den sechziger Jahren ist ein patentiertes Verfahren [16] bekannt, das ein kompaktiertes Metallpulver – Treibmittel Gemisch aufschäumt. Mit diesem Verfahren läßt sich ein poröser Metallkörper beliebiger Form herstellen. Dabei wird eine Mischung aus

einem Metallpulver und einem Treibmittelpulver mit einem Preßdruck von mindestens 80 MPa im ersten Schritt kompaktiert. Durch anschließendes Strangpressen wird sie um mindestens 87,5 % umgeformt. Dieser hohe Umformgrad ist notwendig, damit durch die Reibung der Teilchen aneinander während des Umformprozesses die Oxydhäute zerstört und die Metallteilchen miteinander verbunden werden. Der so hergestellte extrudierte Stab kann durch die Erwärmung auf mindestens die Schmelztemperatur des Metalls zu einem porösen Metallkörper aufgeschäumt werden. Das Aufschäumen kann in verschiedenen Formen erfolgen, so daß der fertige poröse Metallkörper die gewünschte Form aufweist. Nachteilig ist, daß dieses Verfahren aufgrund seines zweistufigen Kompaktierungsvorganges sowie des erforderlichen sehr hohen Umformgrades aufwendig und auf durch Strangpressen herstellbare Halbzeuge beschränkt ist. Weiters sind hier nur Treibmittel verwendbar, deren Zersetzungstemperatur oberhalb der Kompaktierungstemperatur liegt, da sonst das Gas während des Aufheizvorganges entweichen würde. Während des auf den Kompaktierungsvorgang folgenden Schrittes des Aufschäumens entsteht ein poröser Metallkörper mit offener Porosität, wobei die Poren offen oder miteinander verbunden sind. Der Extrusionsvorgang ist notwendig, da die Verbindung der Metallteilchen durch die beim Extrusionsvorgang auftretenden hohen Temperaturen und die Reibung der Teilchen aneinander, d.h. durch Verschweißung der Teilchen miteinander, entsteht. Da aus obengenannten Gründen die für die Verbindung der Teilchen notwendige Temperatur nicht beliebig hoch angesetzt werden kann, muß mit hohen Umformgraden gearbeitet werden, damit eine möglichst gute und gasdichte Verbindung der Metallteilchen untereinander entsteht [17].

Ein am Fraunhofer Institut für angewandte Materialforschung (IFAM in Bremen) in den neunzigern neu entwickelter Herstellungsprozeß auf Basis der Pulvermetallurgie bietet die Möglichkeit, reproduzierbare Bauteile sowohl plattenförmig als auch in Form von Volumenbauteilen herzustellen. Das Verfahren ist in Abbildung 2.6 verdeutlicht. Am IFAM wurde das Verfahren bereits für Aluminium, Zink, Zinn, Bronze, Messing, Blei, und Gold mit Erfolg durchgeführt und die Prozeßparameter für spezielle Anwendungen optimiert, wobei Aluminium und seine Legierungen jedoch aufgrund des breiteren Anwendungsspektrums bisher im Vordergrund des Interesses stehen [18].

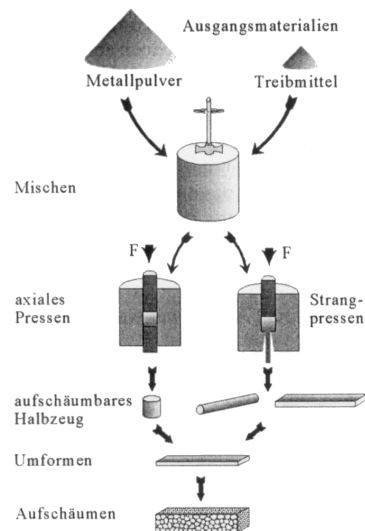


Abbildung 2.6: Prinzip der pulvermetallurgischen Herstellung von Metallschaum [18]

Es werden zunächst ein oder mehrere Metallpulver und ein oder mehrere gasabspaltende Treibmittelpulver und gegebenenfalls weitere Zuschlagstoffe beispielsweise in einem Taumelmischer intensiv gemischt, so daß sich eine sehr homogene Verteilung des gasabspaltenden Treibmittels in dem Pulvergemenge einstellt. Als Treibmittel können Metallhydride, wie z.B. Titanhydrid, Hydrate, wie z.B. Aluminiumsulfathydrat, Alaun, Aluminiumhydroxid oder leicht verdampfende Stoffe, z.B. Quecksilberverbindungen oder pulverisierte organische Substanzen eingesetzt werden. Anschließend wird diese Pulvermischung zu einem festen gasdichten, wenig porösen Vormaterial verdichtet. Hierzu können je nach Anwendungsfall verschiedene Kompaktierungsverfahren (Drucksintern, Strangpressen, Pulverwalzen, Heiß –isostatisches Pressen) eingesetzt werden. Das resultierende Material ist äußerlich nicht vom konventionellen Material zu unterscheiden, birgt aber das Treibmittel in seiner metallischen Matrix: es ist aufschäumbar. Das aufschäumbare Halbzeug kann durch konventionelle Verfahren wie Walzen, Schmieden, Strangpressen oder spanend weiter verarbeitet werden, so daß auch Bleche, Stäbe, (Hohl-) Profile darstellbar sind [19].

Der Anteil an Treibmittel ist sehr gering und liegt in der Regel unter einem Prozent, weil das kompaktierte Halbzeug vollständig verdichtet ist und das Treibgas vor dem Aufschäumen nicht entweichen kann. Somit muß nur die Menge Treibmittel zugegeben werden, die für die Herstellung der Schaumstruktur notwendig ist [17].

Der nächste Schritt des Verfahrens ist das Aufschäumen des hergestellten Halbzeuges. Die Schaumgenese besteht im wesentlichen aus drei Teilschritten: Keimbildung, Porenwachstum und Schaumstabilisierung. Das Aufschäumen erfolgt durch das Erwärmen des Halbzeuges auf eine Temperatur, die oberhalb der Zersetzungstemperatur des verwendeten Treibmittels liegt, damit das Treibmittel Gas freisetzt. Vorzugsweise wird die Temperatur des Schmelzpunktes des verwendeten Metalls gewählt. Richtige Prozeßparameter vorausgesetzt, expandiert die Schmelze und entwickelt eine halbflüssige

schaumige Konsistenz. Nachdem die Expansion bis zum gewünschten Grad erfolgt ist, wird der Schäumvorgang durch Abkühlung unter den Schmelzpunkt beendet und die Schaumstruktur stabilisiert. Der hergestellte Schaumkörper ist aus größtenteils geschlossenen Poren aufgebaut und hat eine geschlossene Oberfläche, die sich grundsätzlich aufgrund hoher Oberflächenspannungen ausbildet [20]. Die Porositäten liegen zwischen 60 und 85 % und die erreichbaren Dichten im Bereich von 0,3 bis 1,0 g/cm³ bei mittleren Porengrößen von 2 bis 6 mm.

Der Schäumvorgang als solcher ist ein entscheidender Prozeßschritt, der über Form, Größe und Qualität der gewünschten Schaumteile entscheidet. Das Aufschäumen der Halbzeuge erfolgt frei, wenn keine Endform vorgegeben ist [17]. Relativ komplexe, endformnahe Bauteile werden hergestellt, indem entsprechend gestaltete Hohlformen ausgeschäumt werden. Der expandierte Schaum füllt den Hohlraum hierbei völlig aus. Die Außenhaut der Schaumteile ist in diesen Fällen geschlossen. Auch flach ausgewalzte Bleche aus aufschäumbarem Halbzeug können auf diese Weise zu Plattenmaterial aufgeschäumt werden. Nach einer Verfahrensmodifikation [21] können Verbundstrukturen (Sandwichstrukturen) aus Aluminiumschaum und massiven Metallprofilen oder -blechen auch ohne Klebstoffe mit einer rein metallischen Bindung hergestellt werden. Hierzu wird durch Walzplattieren ein metallischer Verbund aus zwei Metallblechen (z.B. Aluminium oder Stahl) und einem Blech aufschäumbar Aluminium hergestellt. Ein besonderer Vorzug dieses Herstellungsverfahrens besteht darin, daß die walzplattierten Bleche vor dem Schäumen durch Pressen, Tiefziehen oder ähnlichen Verfahren dreidimensional verformt und anschließend aufgeschäumt werden können. In der Abbildung 2.7 sind drei Schäumvariationen dargestellt.

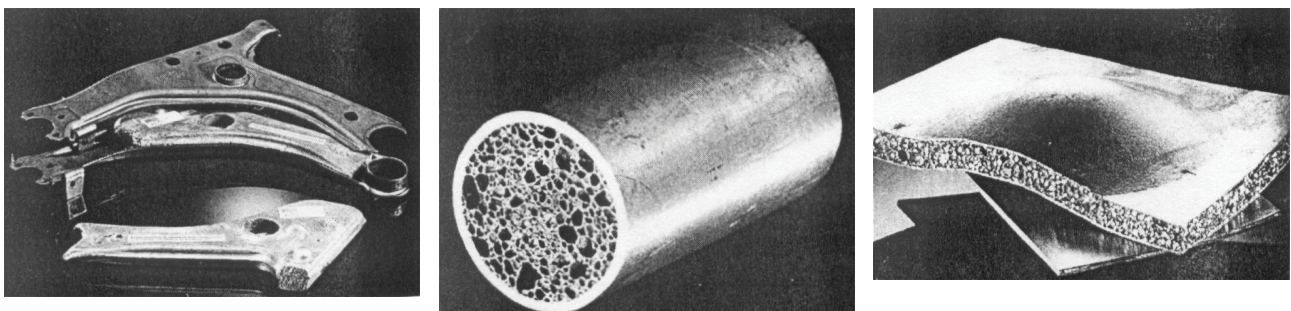


Abbildung 2.7: Schäumvariationen [18]

Die Firma Mepura Metallpulver Ges.m.b.H. entwickelte ein Verfahren [22], das es ermöglicht, Extrudate beliebiger Länge auf einfache Weise herzustellen. Bei diesem Verfahren wird ein Gemisch aus Metallpulver und Treibmittel (0,1 bis 1,0 Gew.%), vorzugsweise Titanhydrid, in einem Rezipienten auf eine erhöhte Temperatur gebracht und durch eine Matrize hindurch stranggepreßt. Das Stranggußteil wird abgelängt und in Formen gefüllt, durch Erwärmen unter Zersetzung des Treibmittelpulvers aufgeschäumt und als fertiger Schaumkörper abgekühlt (siehe Abbildung 2.8).

Das Pulvergemisch wird kontinuierlich in einem zur Matrize führenden Kanal gefüllt. Die Mitnahme des Pulvers im Kanal erfolgt durch Reibung zwischen dem sich drehenden Nutrad und dem Pulver. Durch die dabei auftretende Relativbewegung zwischen der Nutoberfläche und dem Pulverteilchen untereinander kommt es zu der beabsichtigten Erwärmung und Vorkompaktierung des Pulvers vor dem Auspressen durch die Matrize, wobei die Drehgeschwindigkeit des Nutrades mitentscheidend für die beim Transport erzeugte Wärme und die Vorkompaktierung vor der Matrize ist. Durch die dabei auftretende Umschließung der Treibmittelpulverteilchen wird einer vorzeitigen Zersetzung des Treibmittels entgegengewirkt. Auf diese Weise sind auch Treibmittel einsetzbar, die bei Normaldruck eine relativ niedrige Zersetzungstemperatur haben.

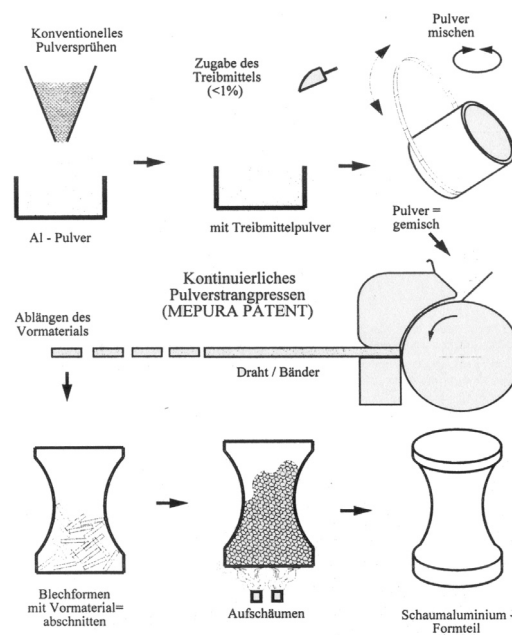


Abbildung 2.8: Verfahren nach Mepura [58]

Das so erzeugte Halbzeug kann in einem Verfahren ebenfalls der Mepura Ges.m.b.H. weiterverarbeitet werden [23]. Ein Vormaterialkörper wird in einem beheizbaren (z.B. induktiv) Heiz- und Durchlaufrezipienten auf eine Temperatur oberhalb der Zersetzungstemperatur des Treibmittels und oberhalb der Schmelztemperatur des Metalls erhitzt. Dabei bildet sich infolge der Zersetzung des Treibmittels ein, bis zu dessen Ausbringungsöffnung hin, in fließfähig plastischen Zustand gehaltener heißer Metallschaum, in Form eines im wesentlichen kontinuierlich ausgetragenen, fließfähig-flexiblen Metallschaumstranges. Dieser wird in eine Formgebungshülle volumenföndend eingebracht und dort zum Erstarren gebracht, wonach gegebenenfalls ein Entformen des Schaummetallkörpers und dessen eventuelle Finalformgebung bzw. -behandlung erfolgt. Diese Methode ermöglicht es Hohlprofile direkt mit Metallen auszuschäumen, was bisher wegen der hohen Temperatur beim direkten Schäumen des metallischen Vormaterials in der Schäumform selbst und der daraus resultierenden Phasenumwandlung,

Rekristallisationsphänomene und dgl. im metallischen Werkstoff des auszuschäumenden Formteils nicht möglich war.

2.1.1.6 Sinter – Lösungs – Prozeß zur Herstellung von Aluminiumschäumen

Dieser Prozeß [24] besteht aus folgenden Teilschritten: Mischen, Verdichten, Sintern und Lösen, wie in Abbildung 2.9 gezeigt.

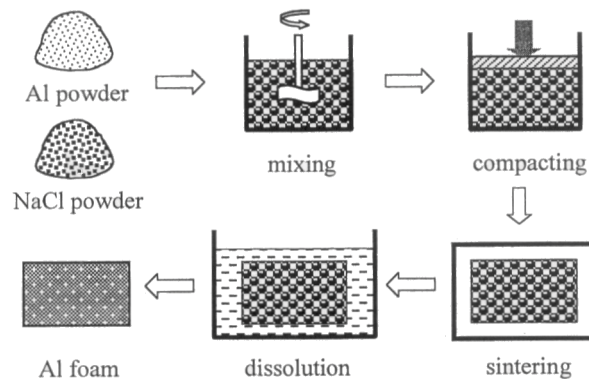


Abbildung 2.9: SDP [24]

Die Ausgangsmaterialien sind gas verdüstertes Aluminiumpulver kommerzieller Reinheit mit Teilchengrößen unter $450\ \mu\text{m}$ und kommerziell reines NaCl Pulver kugelige Form. Die Partikelgröße des Aluminiumpulvers ist nicht entscheidend, sollte aber generell kleiner als $1\ \text{mm}$ betragen. Die Partikelgröße des eingesetzten NaCl Pulvers hängt von der beabsichtigten Porengröße des gefertigten Aluminiumschaumes ab. Die beiden Pulver werden gründlich mit einem vorgegebenen Gewichts- oder Volumenverhältnis gemischt. Diese Mischung wird anschließend in einer Stahlkokille zu einer netzartigen Vorform unter Verwendung einer hydraulischen Presse, die einen Druck von $200\ \text{MPa}$ erzeugt, verdichtet. Die Vorform in der Stahlkokille wird in einem Elektroofen bei einer Temperatur ober- oder unterhalb des Schmelzpunktes von Aluminium (660°C) aber weit unter der Schmelztemperatur von NaCl (801°C) 180 Minuten lang gesintert. Nachdem das Aluminium in der Vorform eine vernetzte gut verbundene Struktur ausgebildet hat, wird diese auf Raumtemperatur abgekühlt und anschließend in einen warmen fließenden Wasserstrahl für 45 Minuten plaziert, um die eingebetteten NaCl Teilchen aus der Aluminiummatrix zu lösen. Dieses Verfahren ist für die Herstellung von offenporigen Aluminiumschäumen mit einer relativen Dichte von $0,15$ bis $0,5\ \text{g/cm}^3$ geeignet.

2.1.2 Schmelzmetallurgische Verfahren

2.1.2.1 Feinguß, Präzisionsguß

Das Gießen mit verlorenen Formen zählt zu diesen speziellen Gießverfahren. Dabei werden die Lücken eines offenporigen Kunststoffschwammes oder eines netzwerkartigen Harzmodells mit einem flüssigen Feuerfestwerkstoff ausgefüllt und anschließend verfestigt (gehärtet). Der Kunststoff wird durch Erhitzen aus der Gußform entfernt. So wird eine inverse Struktur des Kunststoffschwammes als Gußform erzeugt. Diese Gußform wird mit flüssiger Schmelze gefüllt und abgekühlt. Das Eindringen der Schmelze kann durch Aufbringen von Druck auf die Schmelze oder Verringerung des Druckes im Hohlraum der Gußform (Anlegen eines Vakuums) verbessert werden [25]. Der feuerfeste Werkstoff wird nach der Erstarrung des Metalls entfernt, und ein Metallschaum mit derselben Struktur wie der originale Kunststoffschwamm wird erhalten. Die für dieses Verfahren eingesetzten Metalle weisen einen vergleichsweise geringen Schmelzpunkt auf, wie Kupfer, Aluminium, Blei, Zink, Zinn und deren Legierungen [1, 25, 26, 27].

Am Gießereinstitut der technischen Universität Aachen wird das Präzisionsgießen zur Herstellung von regelmäßigen, offenporigen Metallschäumen verwendet [28]. Netzartige regelmäßige Polyurethanschäume werden als Ausgangsmaterial für die Herstellung der offenporigen Struktur verwendet. Das Verfahren ist in Abbildung 2.10 veranschaulicht. Die Polyurethanschäume sind mit verschiedenen Zellparametern erhältlich. Diese werden auf die erforderliche Größe und Geometrie zurechtgeschnitten. Massive Bauteile, Einguß- und Anschnittsysteme werden durch typische Feingußverfahren wie das Wachspritzen erzeugt. Die Wachsformen und die zurechtgeschnittenen Polyurethanschäume werden anschließend zusammengebaut und für die Gußformherstellung vorbereitet. Die feuerfeste (keramische) Feingußformschale wird durch konventionelle Techniken gefertigt. Das verwendete Formschalensmaterial ist von den eingesetzten Metalllegierungen abhängig, chemische und mechanische Eigenschaften müssen berücksichtigt werden. Das Formschalensmaterial muß fest genug sein, um den Kunststoffschaum zu halten und empfindlich genug, um es nach dem Gießen leicht entfernen zu können. Außerdem muß das Formschalensmaterial in Abhängigkeit der Reaktivität der Metallschmelze chemisch beständig sein. Der Kunststoffschaum wird durch das Brennen der Gußform verdampft, wobei diese gleichzeitig ausgehärtet wird. Die Schmelze wird in die Gußform gegossen und erstarrt. Das Vorwärmen der Gußform, ebenso wie die Anwendung von Vakuum im Formhohlraum oder geringer Druck auf die Schmelze unterstützen das Eindringen der Schmelze in die dünnen (schmalen) Gußformhöhlräume. Die Feingußformschale wird anschließend vorsichtig entfernt, damit dünnwandige Strukturen nicht beschädigt werden. Ein wirtschaftliches Entfernen erfordert noch die Änderung und Optimierung der Feuerfest (Keramik) Mischung und des Bindersystems. Dieses Verfahren ist bereits für Metalle mit

einem relativ niedrigen Schmelzpunkt wie Aluminium, Kupfer und Zink und deren Legierungen erprobt.

Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung komplexer near-net-shape Bauteile. Diese können als Bauteile in Wärmetauscher, Filter, als Katalysatoroberflächen, als gewichtsparende Konstruktionselemente, deformierbare Energieabsorber angewendet werden. Verbundstrukturen, die aus geformten zellularen Strukturen und Massivteilen bestehen, werden hier in einem einstufigen Gußprozeß hergestellt (siehe Abbildungen 2.11, 2.12). Typische Eigenschaften dieser Metallschäume sind Porenvolumen von 92 bis 98% und Porositäten von 10 bis 30 Poren pro Inch.

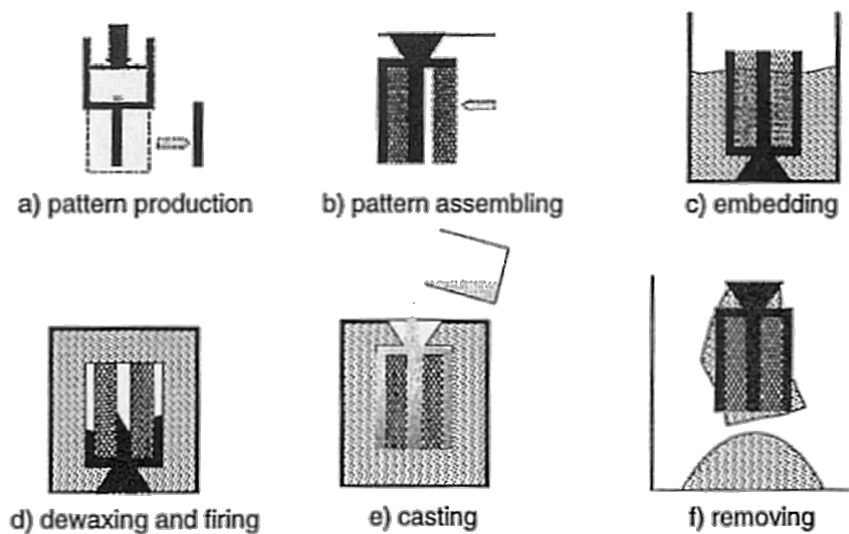


Abbildung 2.10: Präzisionsgießprozeß für near-net-shape CMMs [28]

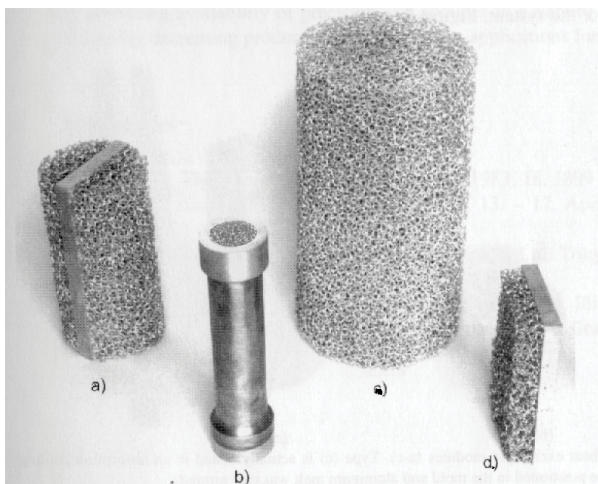


Abbildung 2.11: a) Verbundstruktur,
b) Filter, c) 1500 cm³,
d) Sandwichplatte [28]

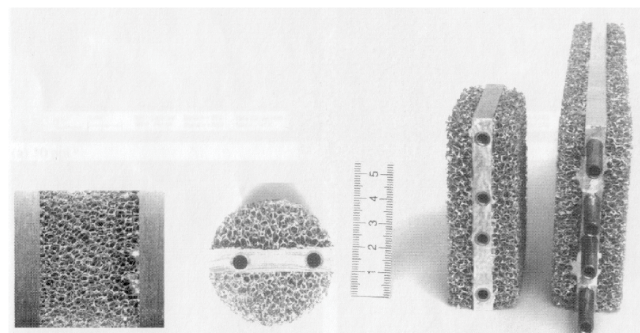


Abbildung 2.12: Wärmetauschermodule [28]

Ein Magnesiumschaum mit offenen Poren [29] kann ebenfalls auf diese Weise hergestellt werden. Diese Methode ist in Abbildung 2.13 schematisch dargestellt. Zuerst wird eine Form, die den Polyurethanschaum enthält, mit Gips aufgefüllt. Die Gipsform wird anschließend auf rund 770 K erhitzt, um den Polyurethanschaum vollständig durch Verdampfen zu entfernen. Die Gipsform wird dabei gleichzeitig gehärtet. Geschmolzenes Magnesium wird in die auf rund 870 K erhitzte Gipsform gegossen, wobei diese evakuiert wurde. Nach dem Abgießen wird die Gipsform durch Besprühen mit Wasser zerstört, und ein openporiger Magnesiumschwamm mit einer Dichte von $0,05 \text{ g/cm}^3$ wird erhalten. Mögliche Anwendungen für diesen sind z. B. Energieabsorber, Schalldämpfer, Flammenschutz, Wärmetauscher.

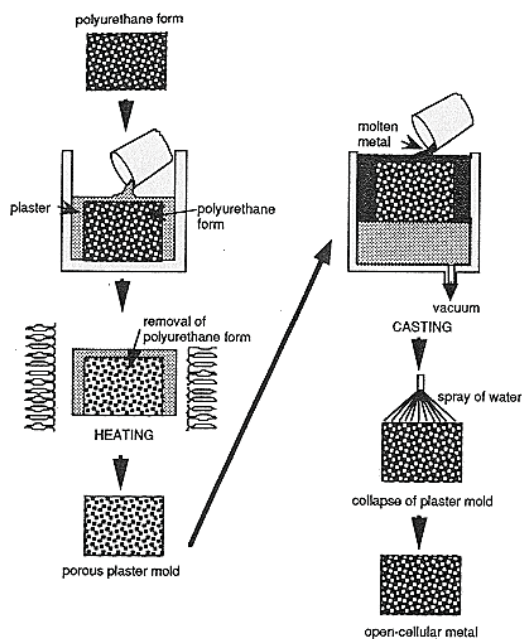
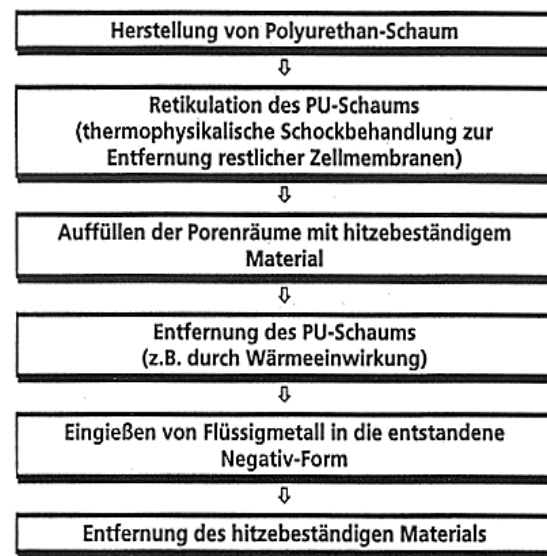


Abbildung 2.13: Magnesiumschaum [29]



Porosität: 80-97%

Abbildung 2.14: Verfahrensablauf nach Duocel [42]

Erg Duocel Metallschäume werden ebenfalls nach diesem Verfahren hergestellt. Der schematische Verfahrensablauf ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Diese openporigen Metallschäume haben eine Dichte geringer als $0,05 \text{ g/cm}^3$, Porengrößen von 1 bis 5 mm und Porositäten von 80 bis 97%.

2.1.2.2 Umgießen von Platzhaltern

Ein seit langem bekanntes Verfahren ist das Umgießen von Platzhalterstrukturen mit metallischen Schmelzen. Mit diesem Verfahren werden openporige Metallschäume (-schwämme) mit miteinander verbundenen Poren hergestellt. Das Grundprinzip des Verfahrens ist in Abbildung 2.15 dargestellt.

Demnach sind folgende Schritte zu vollziehen:

1. Herstellen der Platzhalterstruktur: Als Platzhalter kommen Pellets aus Quarzsand, die unter Zugabe eines Bindemittels auf Harzbasis auf einem Pelletierteller hergestellt werden, inerte anorganische Salze wie z.B. Alkalimetallhalogenide (z. B. NaCl), Erdalkalimetallhalogenide und Alkalimetallborate zum Einsatz [30, 31]. Es können auch aber auch organische Materialien zum Einsatz kommen. Die Platzhalter werden in beliebige Sand- und Dauerformen geschüttet. Eine Vergleichmäßigung der erzeugten Schüttung wird durch leichte Vibrationen erreicht. Platzhalterstrukturen aus NaCl durch Sintern nach der Vergleichmäßigung verfestigt.
2. Infiltration des Platzhaltergerüsts mit Metall: Um die Zwischenräume vollständig mit Metall auszufüllen, werden die Formen vorgewärmt, und die Schmelze wird überhitzt. Zusätzlich kann die Schmelze unter Anwendung eines Vakuums in der Schüttung oder Anwendung eines erhöhten Druckes auf die Schmelze in die Schüttung eingebracht werden.
3. Entfernen des Platzhaltermaterials: Die Platzhalter werden entweder mechanisch, chemisch (durch Lösen z.B.: mit Wasser bei NaCl-Platzhaltern) oder thermisch (Pyrolyse) rückstandsfrei entfernt.

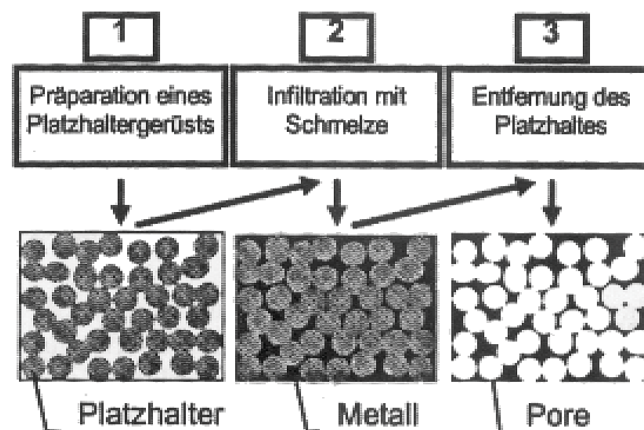


Abbildung 2.15: Verfahren zur Herstellung offener metallischer Strukturen [32]

Die Dichte und Porenmorphologie können durch die Wahl der Platzhalter in weiten Grenzen variiert werden. Die Dichte der offener Aluminiumschäume liegt im Bereich von 0,9 bis 1,2 g/cm³, was einem Porenanteil von 55 bis 67% entspricht [32]. Die Porenstruktur einiger mit diesem Verfahren hergestellter Schwämme ist in Abbildung 2.16 zu sehen. Es können auch Verbundstrukturen hergestellt werden (siehe Abbildung 2.17).

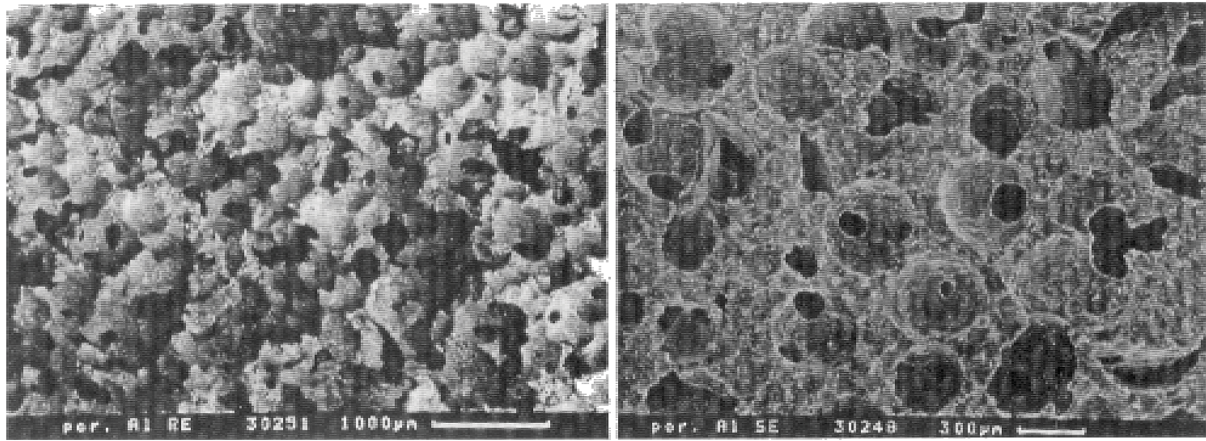


Abbildung 2.16: Porenstruktur der Aluminiumschwämme [32]

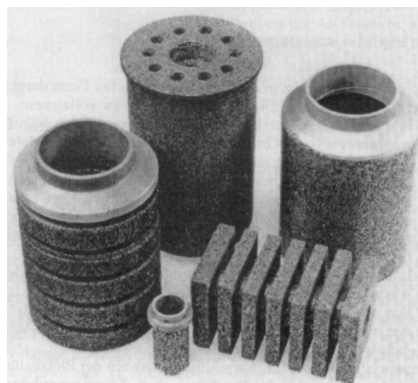


Abbildung 2.17: Teile aus offenporigem Aluminiumschwamm [32]

ACCESS e. V. entwickelte ein umweltschonendes, kostengünstiges Herstellungsverfahren [33, 34] mit dem sich offenporige Metallschwämme aus allen relevanten Legierungen gießen lassen. Das Verfahren läßt sich in vier Prozeßschritte unterteilen: Herstellung von Platzhaltern, Aufbau einer Platzhalterschüttung, Infiltration der Schüttung mit Schmelze und Entfernung der Platzhalter. Die Platzhalterherstellung erfolgt (siehe Abbildung 2.18) durch Aufbauagglomeration von kommerziell verfügbaren Gießereisanden (Quarzsand) oder keramischen Rohmaterials (Mullit) unter Zugabe von Wasser und Bindemittel (Stärke, Zuckermelasse) auf Pelletiertrommeln. Die Größe (1-10 mm) der Pellets wird durch den Neigungswinkel der Pelletiertrommel eingestellt. Der Anteil des Bindemittels wird dabei so eingestellt, daß die Pellets bei der Entnahme aus der Pelletiertrommel nicht zerfallen. Durch Trocknen bei leicht erhöhten Temperaturen steigt die Festigkeit durch Aushärten des Bindemittels. Anschließend werden die Platzhalter in eine beliebige Dauer- oder Sandform (siehe Abbildung 2.20) geschüttet. Durch leichte Vibration wird eine Vergleichmäßigung der Schüttung erreicht. Eine Variation oder Gradierung läßt sich durch Änderung des Formfaktors und/oder geeignete Fraktionierung der Pellets erreichen. Das einstellbare Porenvolumen liegt zwischen 50 und 90%. Die Infiltration der Platzhalterschüttung erfolgt durch Schwerkraftguß (siehe Abbildung 2.21). Um eine weitgehende Formfüllung zu gewährleisten, ist eine Vorwärmung der Form sowie eine leichte Überhitzung der Schmelze von Vorteil. Speziell für große Bauteile oder Bauteile mit

kleinen Poren kann durch Anlegen eines geringen Unterdruckes in der Form oder durch Schleuderguß die Formfüllung optimiert werden. Der Unterdruck in der Form kann durch Evakuieren durch den Sand der Form oder durch den Aufbau der Form in einem Vakuumbehälter erfolgen. Durch die einwirkende Gießhitze wird der Zerfall der Platzhalter in ihre kleinsten Bestandteile, also in einzelne Sandkörner, ausgelöst. Dadurch ist ein rückstandloses Entfernen der Platzhalter über die Durchstoßpunkte zwischen den Poren, an denen sie sich zuvor berührt hatten, durch Vibration oder Druckluft gewährleistet. Der Wiedereinsatz des Sandes ist nach einer Regenerierung wieder möglich. Das Umgießen von Einlegeteilen ist prinzipiell möglich. Mit diesem Verfahren sind bereits Bauteile (siehe Abbildungen 2.22, 2.23) mit einer offenporigen Struktur aus Aluminium, Eisen, Nickel, Kupfer, Zink, Blei und Zinnlegierungen gegossen worden.

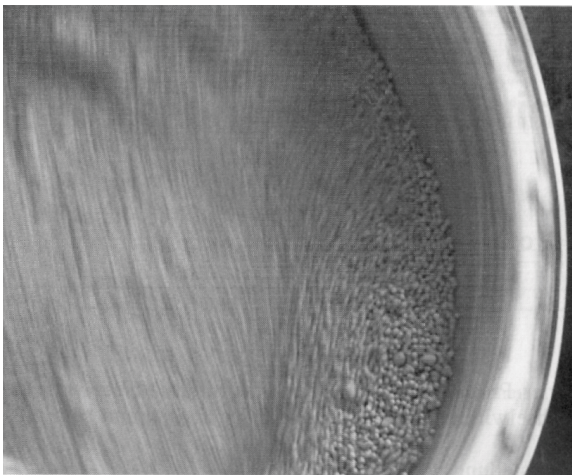


Abbildung 2.18: Aufbauagglomeration von kommerziellen Gießereisanden [33]

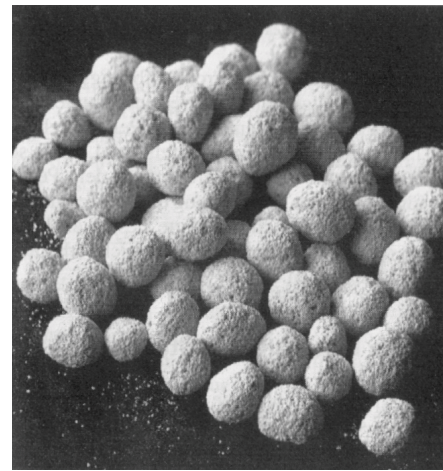


Abbildung 2.19: Platzhalter (\varnothing 5 mm) aus Gießereisand der Körnung F36 [33]

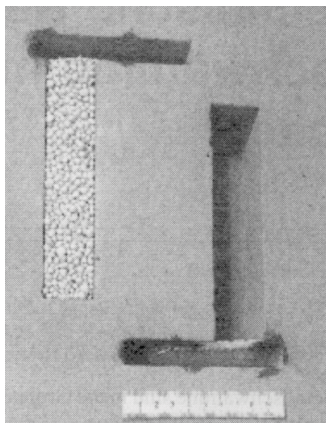


Abbildung 2.20: Schüttung von 4 mm großen Platzhaltern in einer Sandform zur Herstellung von Zugproben [33]

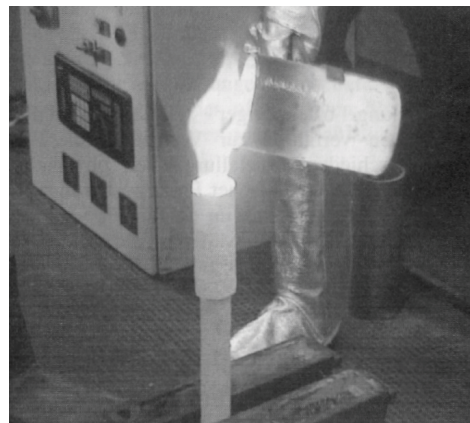


Abbildung 2.21: Infiltration einer Platzhalterschüttung in einer Sandform mit einer Gußeisenschmelze [33]

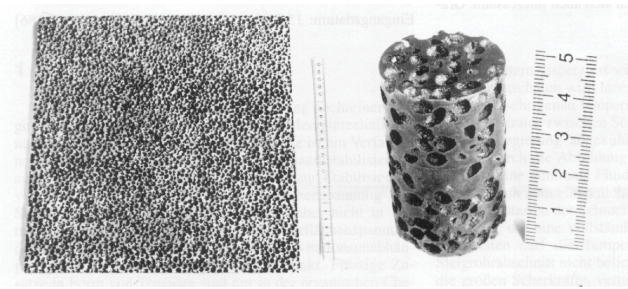


Abbildung 2.22: Metallschwammplatte (links)

aus AlSi12,
Dichte: $0,9\text{g/cm}^3$,
330x330x16 mm
Zylinder (GGG60) (rechts),
Dichte: $3,1\text{ g/cm}^3$,
 \varnothing 30 mm, h 50mm [33]

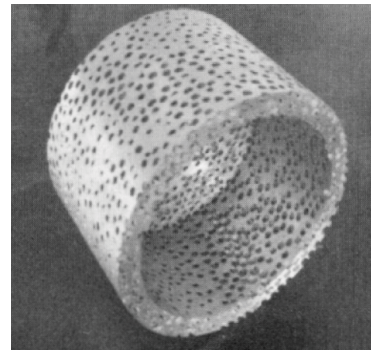


Abbildung 2.23: Topfförmiger Schallabsorber bzw. Filter aus Aluminium [33]

Ein weiterer Verfahrensansatz besteht darin, eine lose Schüttung aus leicht komprimierbaren anorganischen Leichtstoffen, wie z.B. geblähte Tonminerale, Blähton, Glasschaumkugeln oder Hohlkorundkugeln zu umgießen bzw. infiltrieren [35, 36]. Nachteilig ist jedoch, daß die erreichbaren Dichten oberhalb 1 g/cm^3 liegen. Die Anwesenheit der Füllstoffe wirkt störend bei der Weiterverarbeitung und beim Recycling.

2.1.2.3 Einbringen von Substitutionswerkstoffen (Platzhalter) in eine Schmelze

Bei diesem Verfahren wird die Porosität durch Substitutionswerkstoffe erreicht, die in eine Schmelze eingerührt werden. Es kommen Metalle oder Metallegierungen zur Anwendung, deren Schmelzpunkt um oder unterhalb von 700 °C liegt, wie z.B. Blei, Zink, Zinn, Aluminium und Magnesium.

Die für diesen Prozeß verwendeten Füllstoffe sind mineralische Stoffe, diese weisen einen höheren Schmelzpunkt als das eingesetzte Metall auf und sind in der Schmelze nicht lösbar und abbaubar. Für Magnesium und Aluminium und deren Legierungen werden Vermiculite, Perlite, Pellets aus gebranntem Ton und geschliffene Feuerfestmaterialien eingesetzt. Das geforderte Metall wird in einem Tiegel aufgeschmolzen. Anschließend wird der Platzhalterwerkstoff in die Schmelze eingebracht. Das Gemisch wird gründlich gerührt, um die Platzhalter gleichmäßig zu verteilen. Während des Mischvorganges wird die Masse gekühlt, bis ein ausreichend zähflüssiger Zustand erreicht ist, um eine Entmischung oder Schichtung zu verhindern. Bei beginnender Erstarrung wird das Mischen beendet, und die Schmelze mit den eingebetteten Platzhaltern erstarrt. Es ist auch möglich bevor die Schmelze erstarrt, während dessen sie aber noch in relativ zähflüssigem Zustand ist, diese in eine Gußform abzugießen. Die hergestellten Metallschäume weisen eine Dichte von rund 1 g/cm^3 auf [37].

Ein ähnliches Verfahren verwendet metallische Hohlkugeln, die in die Schmelze eingebracht werden. Kommerziell erhältliche Phenolkunststoffkugeln werden in einer Inertatmosphäre erhitzt bis der Kunststoff verkocht, diese bilden dadurch hohle Kugeln aus Kohlenstoff. Diese werden durch Dampfbeschichtung mit Metall beschichtet und der Kohlenstoff durch Verdampfen entfernt. Dieser Prozeß wird für hochschmelzende Metalle wie z.B. Wolfram eingesetzt [1].

2.1.2.4 Herstellung syntaktischer Metallschäume mittels Infiltrationsgußverfahren

Syntaktische Metallschäume [38, 39] sind zellulare Verbundwerkstoffe, bei denen dünnwandige keramische Hohlkugeln in eine Matrix aus einer Metallegierung eingebettet sind. Bezüglich der Morphologie der Zellen handelt es sich um eine geschlossene, homogene und isotrope Struktur.

Syntaktische metallische Schäume werden schmelzmetallurgisch nach dem Prozeß des Infiltrationsgusses hergestellt. Das Verfahrensprinzip (siehe Abbildung 2.24) wurde bereits auf die Leichtmetalle Aluminium, Magnesium und Titan angewandt. Die verwendeten Hohlkugeln bestehen aus gesinterten Al_2O_3 , Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) oder TiO_2 . Die Kugeldurchmesser (siehe Abbildung 2.25) liegen im Bereich von 1 bis 5 mm bei einer Wandstärke von 50 bis 250 μm . Da einige Hohlkugeln makroskopische Defekte, wie Löcher oder Risse in der Kugelwand, aufweisen und diese während der Herstellung Metall – Hohlkugelverbundwerkstoffe im Inneren gefüllt würden, werden diese defekten Kugeln in einem vorangehenden Schritt durch Sedimentationsverfahren aussortiert. Die defektfreien Hohlkugeln werden zum Aufbau der Zellstruktur in eine Stahlform gefüllt und definiert gerüttelt, um die Packungsdichte zu erhöhen. Anschließend erfolgt die Infiltration der Packung keramischer Hohlkugeln nach dem Verfahren des Infiltrationsgusses. Der Infiltrationszyklus gliedert sich in vier Phasen: Schmelzphase, Vakuumphase, Infiltrationsphase, Abkühlphase (siehe Abbildung 2.26). In der Schmelzphase wird die jeweilige Legierung unter Schutzgas (z.B. Argon) erschmolzen. Währenddessen erreicht die im Ofenraum über eine vertikale Verfahreinheit positionierte, mit den keramischen Hohlkugeln gefüllte Gußform, die Vorwärmtemperatur. Die Gußform besteht aus einer gasdichten Stahlkapsel, die von unten mit Schmelze gefüllt werden kann. Anschließend wird der Autoklav evakuiert. Durch Absenken der Gußform kurz vor der Infiltration dichtet das Schmelzbad die Infiltrationskapsel am Steigrohr gasdicht ab. In der Infiltrationsphase erfolgt der Druckaufbau kontinuierlich über Inertgas (z.B. Argon). Der zwischen dem Inneren der Gußform und dem Innenraum des Autoklaven entstehende Druckunterschied führt zur Füllung der Form mit schmelzflüssigem Metall. Mit dem Anheben der Form in die Kühlzone beginnt die Erstarrung der Schmelze.

Nach dem Verfahren des Infiltrationsgusses lassen sich bei richtiger Wahl der Prozeßparameter syntaktische, metallische Schäume mit geschlossenzelliger Morphologie

herstellen. Beispiele für syntaktische Metallschäume auf Magnesiumbasis unter Verwendung keramischer Hohlkugeln sind in den Abbildungen 2.27, 2.28, 2.29 dargestellt. Die Dichten dieser Magnesiumschäume betragen 1,0 bis 1,5 g/cm³ bei einem Volumenanteil von ca. 50%. Dieses Verfahren ermöglicht auch die Herstellung von stoffschlüssigen Sandwichstrukturen in einem Prozessschritt.

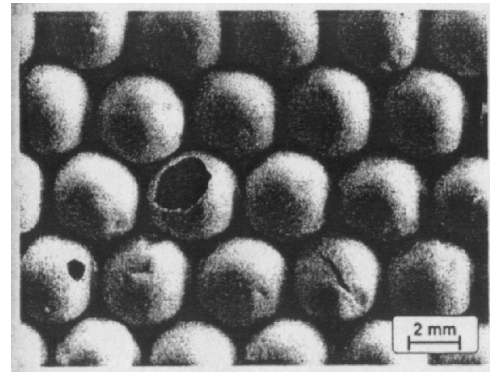
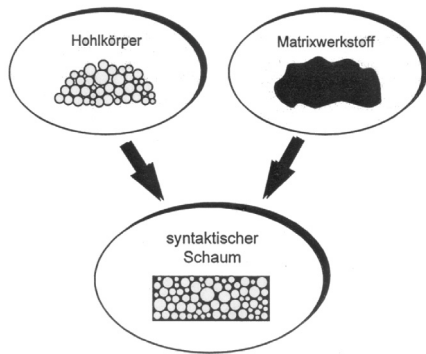


Abbildung 2.24: Schematische Darstellung des Prinzips zur Herstellung zellulärer Verbundwerkstoffe [39]

Abbildung 2.25: Keramische Hohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von 3,6 mm im Anlieferungszustand [39]

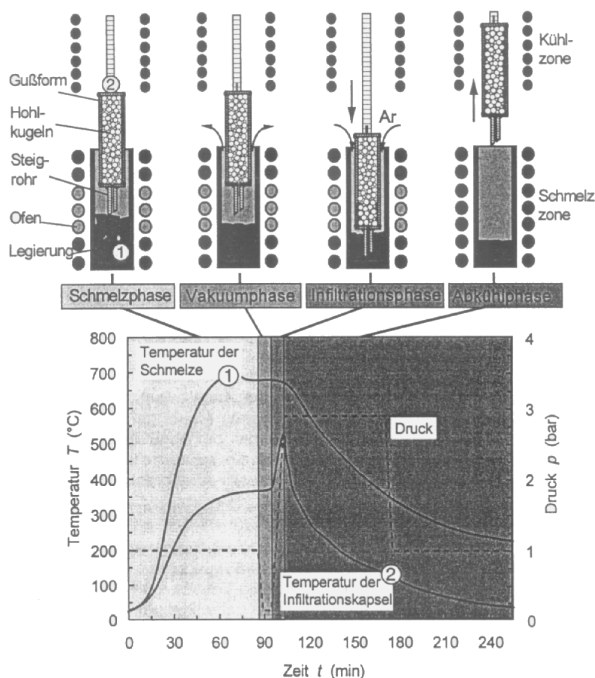


Abbildung 2.26: Schematische Darstellung einzelner Prozessschritte während des Infiltrationsgusses [39]

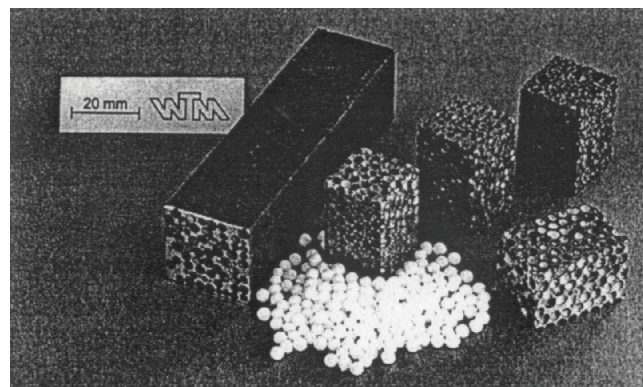


Abbildung 2.27: Syntaktische Magnesiumschäume mit Gußhaut (links) und in Druckprobengeometrie (rechts) [39]

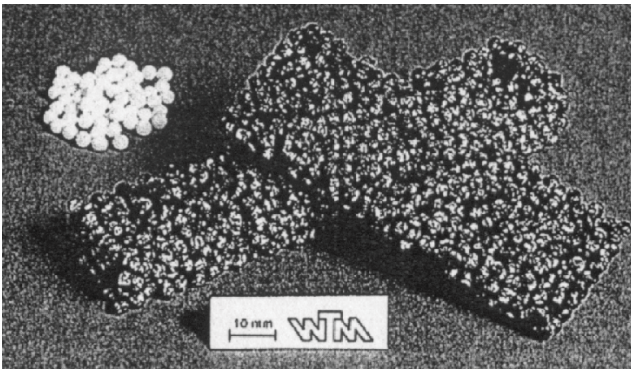


Abbildung 2.28: Selbsttragende Hohlkugelformkörper mit graphithaltigem Bindersystem zur Fertigung von stoffschlüssigen Sandwichstrukturen [39]

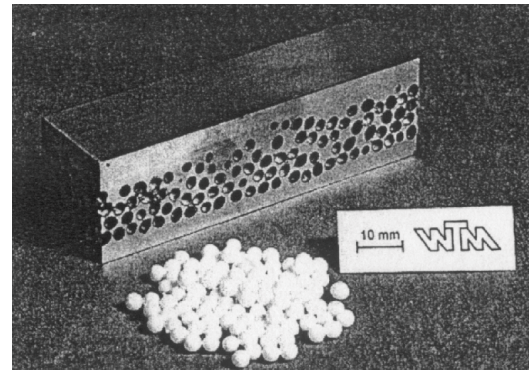


Abbildung 2.29: Stoffschlüssiger Sandwich-Verbund [39]

In einem ähnlichen Verfahren [40] werden Hohlkugeln aus Edelstahl (Fe-Cr Legierung) und eine andere Apparateanordnung verwendet. Diese Gießapparatur (siehe Abbildung 2.30) aus einem schmelzgegossenen Quarzrohr, einer Vakuumkammer und einer Grobvakuumpumpe. Die Packung aus einzelnen Hohlkugeln wird in das Quarzrohr plaziert. Darunter wird ein Korderite Honigwabenfilter angebracht, der eine gleichgerichtete Strömung erzeugt, und dadurch wird erreicht, daß die Hohlkugelpackung gleichmäßig von der Schmelze infiltriert wird. Über der Hohlkugelpackung wird eine Dämmung aus Keramikfasern aufgebaut, diese verhindert, daß flüssiges Metall weiter in die Röhre eindringt. Als sekundäre Sicherheitseinrichtung dient die Vakuumkammer und schützt die Vakuumpumpe. Während des Gießprozesses wird das Matrixmaterial in einem Tiegel durchschnittlich auf 100 °C über die Schmelztemperatur erhitzt. Das Ende der Quarzröhre wird dann in die Schmelze abgesenkt. Die Vakuumpumpe wird eingeschaltet, und das geschmolzene Metall fließt in die Röhre und infiltriert die Hohlkugelschüttung, wenn die Quarzröhre evakuiert ist. Die vollständige Infiltration wird durch optische Überwachung geprüft. Wenn Aluminium verwendet wird, wird die Quarzröhre nach dem Abschalten der Vakuumpumpe mit Wasser gekühlt. Das Kühlen des Gußstückes minimiert die Wirkung der Reaktion der Hohlkugelpackung und des Matrixmetalls. Während des Kühlens verändert sich das Volumen und die Quarzröhre zerbricht und fällt ab. Wenn Magnesium abgegossen wird, sind zusätzliche Einrichtungen und Prozeßeinstellungen notwendig. Die Magnesiumschmelze wird mit einem Flußmittel ($MgCl_2$) bedeckt und mit Inertgas (Argon) beaufschlagt, um eine Reaktion mit der Atmosphäre zu verhindern. Nach der Infiltration der Hohlkugelpackung wird die Quarzröhre aus der Schmelze gefahren und in $MgCl_2$ getaucht, um eine Reaktion des exponierten Metalls zu verhindern. Durch Luftkühlung bricht die Quarzröhre und fällt vom Gußstück ab.

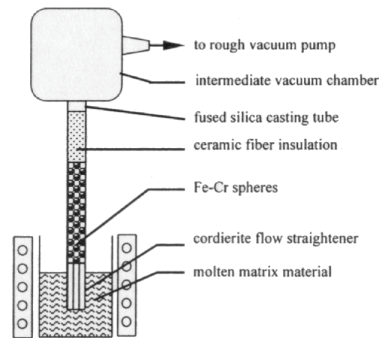


Abbildung 2.30: Schematische Darstellung der Gießeinrichtung [40]

2.1.2.5 Spaltung (Zersetzung) gasfreisetzender Partikel in einer Schmelze

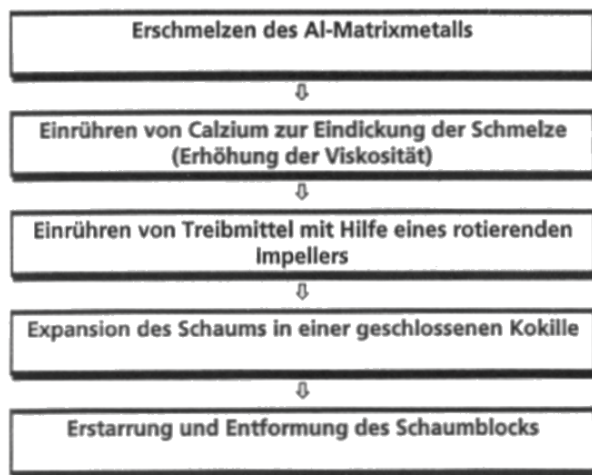
Metalllegierungen können durch Mischen mit einem Treibmittel, das Gas freisetzt, wenn es erhitzt wird, aufgeschäumt werden. Das am meisten verwendete Treibmittel ist Titanhydrid (TiH_2), das sich durch Erwärmen über 465 °C in Titan und gasförmigen Wasserstoff aufspaltet. Durch Zugabe von Titanhydridteilchen in eine Aluminiumschmelze entstehen rasch große Mengen an Wasserstoffgas, das Blasen bildet, und so kann ein geschlossenporiger Metallschaum erzeugt werden. Die Firma Shinko Wire entwickelte einen Aluminiumschaum, der unter der Schutzmarke Alporas vertrieben wird, mit dieser Verfahrensvariante.

Alporas wird durch ein diskontinuierliches Gußverfahren [41, 43] hergestellt. Der Verfahrensablauf ist in Abbildungen 2.31, 2.32 dargestellt. Für die Herstellung des Aluminiumschaumes ist es wichtig, die Gasblasen im geschmolzenen Aluminium zu stabilisieren. Der wichtigste Faktor der Stabilisierung der Gasblasen ist die Erhöhung der Viskosität der Schmelze. Dies kann durch Zugabe von viskositätssteigernden Zusätzen (z.B. Na, Ca) oder keramischen Teilchen (z.B. SiC , Si_3N_4 , Al_2O_3) erreicht werden. Der erste Schritt bei diesem Verfahren ist das Aufschmelzen von Aluminium, und die Stabilisierung der Schmelztemperatur zwischen 670 und 690 °C . Die Viskosität wird durch Zugabe von $0,2$ bis $1,5\%$ metallischem Ca eingestellt. Ca, das rasch oxidiert, bildet fein verteiltes CaO und CaAl_2O_4 , wird mit dem geschmolzenen Aluminium bei einer Temperatur von 680 °C vermengt und für 6 Minuten in einer umgebenden Atmosphäre gerührt. Die Viskosität ist durch den Scherwiderstand oder dem Rührwiderstand der Schmelze gekennzeichnet, und der Scherwiderstand oder der Rührwiderstand werden über das Drehmoment gemessen. Die eingedickte Aluminiumschmelze wird in eine Gußform (Kokille) gegossen. Anschließend wird unter Rühren das Treibmittel 1 bis 3% TiH_2 (oder ZrH [44, 45]) beigemengt. Sobald das Treibmittel in der Schmelze fein verteilt ist, wird der Rührer zurückgefahren, und die Kokille mit einem Deckel oder einer Platte, die auf der Schmelze schwimmt, verschlossen. Nun bildet sich der Metallschaum über der

Schmelze. Kontrolliert wird der Prozeß durch Regeln des Überdrucks, Temperatur und der Zeit. Es dauert rund 15 Minuten bis das Treibmittel vollkommen zersetzt ist, und somit der Schaum die Kokille vollständig ausfüllt. Dann wird das aufgeschäumte geschmolzene Material mit einem starken Gebläse gekühlt, um den Schaum in der Kokille zu erstarren. Ein gegossener Alporas Block mißt 450x2050x650 mm und wiegt ca. 160 kg. Nachdem der Block aus der Kokille entfernt wurde, wird dieser in Platten verschiedener Dicke entsprechend dem Verwendungszweck geschnitten.

Die Menge an Ca und TiH_2 , die der Schmelze beigemischt werden, bestimmt letztendlich die Dichte, und in Kombination mit der Kühlbedingung, die Zellgröße des Aluminiumschaumes. Alporas ist ein geschlossenporiger Aluminiumschaum, deren Dichte zwischen $0,2$ bis $0,8 \text{ g/cm}^3$ und deren Zellgröße zwischen 2 und 10 mm bei einer Porosität von 89 bis 93% (siehe Abbildung 2.33) liegen. Alporas wird hauptsächlich als Stoßabsorber und als Schalldämmelement verwendet (siehe Abbildung 2.34).

Es wird auch an alternativen Treibmitteln (z.B. Karbonate, Nitrate) mit höheren Zersetzungstemperaturen geforscht, um mit dieser Methode auch Fe, Stahl und Nickel-Legierungen aufzuschäumen.



Porosität: 89-93%

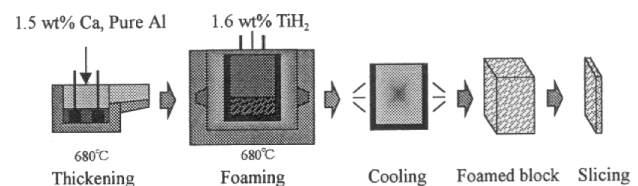


Abbildung 2.32: Prozeßschema [41]

Abbildung 2.31: Herstellung geschloss-
poriger Aluminiumschäume
durch Schmelzeschäumen
[42]

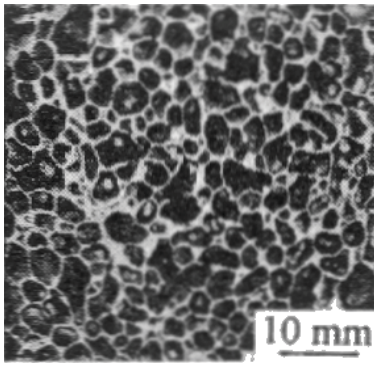


Abbildung 2.33: Alporas mit einer Porosität von 93% [41]

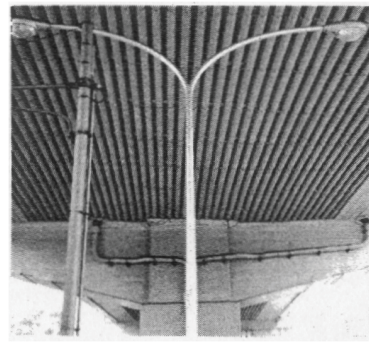


Abbildung 2.34: Schalldämmelement an der Unterseite einer Straßenbrücke [41]

2.1.2.6 Einbringen von Gas in partikelverstärkte MMC – Schmelzen

Gleichzeitig und unabhängig voneinander entwickelten die Firmen Alcan und Norsk Hydro ein Verfahren zur Schaumherstellung durch Einbringen von Gas in partikelverstärkte MMC – Schmelzen (Metall – Matrix – Composite (MMC) Material) [46, 47, 48, 49]. Das Verfahren ist in den Abbildungen 2.35, 2.36 dargestellt.

Bei diesem Verfahren wird als erstes ein Metall (z.B. Aluminium, Blei, Nickel, Magnesium, Kupfer, Zink auch Stahl) oder Metallegierung, die entweder zum ersten Mal oder als Recyclingmaterial wieder aufgeschmolzen werden, in einem Tiegel aufgeschmolzen und auf Temperatur gehalten. Am häufigsten angewandt werden Aluminium und dessen Legierungen, weil diese eine niedrige Dichte aufweisen und nicht übermäßig oxidieren, wenn sie mit dem Gas in Berührung kommen [9]. In das aufgeschmolzene Metall werden anschließend 5 bis 15 Gew.% stabilisierende Partikel, wie z.B. Aluminiumoxid (Al_2O_3), Siliziumcarbid (SiC), Zirkon, Titandiborid (TiB_2), zugesetzt. Diese Schmelze wird in den Halteofen gegossen, wobei dies kontinuierlich oder chargenweise erfolgen kann. In der Schäumkammer, die durch eine Trennwand vom Halteofen abgetrennt ist, wird Gas über eine rotierende Lanze, die am unteren Ende einen Düsenkopf besitzt, unter der Oberfläche der Schmelze eingeblasen. Für dieses Verfahren kann eine Vielzahl von Gasen, wie z.B. Kohlendioxid, Sauerstoff, Luft, Inertgase oder auch Wasser verwendet werden, wobei Luft bevorzugt wird, da Luft leicht erhältlich und zu handhaben ist. Durch das eingeleitete Gas entstehen Blasen, die in der Schmelze sofort bis zur Oberfläche aufsteigen, und dort ein Haufwerk von Blasen mit relativ hoher Stabilität bilden, d.h. durch die stabilisierende Wirkung der Keramikpartikel zeigen die Blasen kaum Neigung zum Zerplatzen. Die Keramikpartikel erhöhen dabei die Viskosität der Schmelze und sorgen dafür, dass die Schmelze langsam entlang der Blasenhaut abläuft, und dadurch wird ein stabiler flüssiger Schaum erhalten. Dieser stabilisierte flüssige Metallschaum wird kontinuierlich durch z.B. ein Förderband abgezogen, wobei dieser gekühlt wird und

erstarrt. Mit diesem Verfahren können geschlossenzellige Metallschäume, deren Dichte im Bereich von $0,02$ bis $0,5 \text{ g/cm}^3$ liegt, und die eine Porosität zwischen 80 und 97% aufweisen, produziert werden, wobei deren durchschnittliche Porengröße zwischen 5 und 20 mm liegt. Die Porengröße und dadurch die Dichte werden durch die Prozeßparameter Gasdurchflußrate durch die Lanze, die Anzahl der Düsen am Düsenkopf, deren Größe und Form, die Drehzahl und der Gehalt der Keramikpartikel in der Schmelze geregelt. Zur Zeit ist dieses Verfahren auf die Erzeugung von Aluminiumschäumen beschränkt. Es werden damit bis zu $20 \times 100 \times 200 \text{ cm}$ große Platten erzeugt, die zur Schalldämmung, Wärmeisolierung, elektromagnetischen Abschirmung, als Energieabsorber, feuerhemmende Platten, Verpackungsschutz oder Auftriebsplatten verwendet werden können. Auch ist es möglich diesem Metallschaum durch Walzen, Prägen und Pressen eine gewünschte Form zu geben [49].

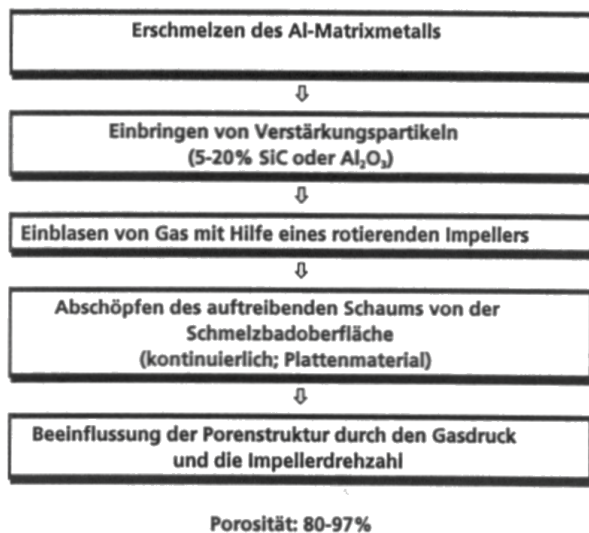


Abbildung 2.35: Herstellung geschlossenzelliger Aluminiumschäume (Norsk Hydro, Alcan) [42]

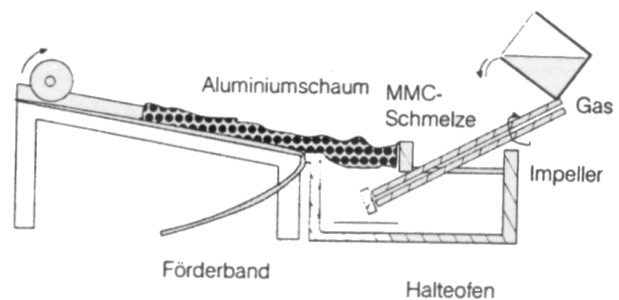


Abbildung 2.36: Schäumen partikelverstärkter Schmelzen (Norsk Hydro, Alcan) [50]

In einem ähnlichen Verfahren [51] wird eine Metallschmelze oder ein aufgeschmolzenes Metall – Matrix – Composite Material in einem durch axiale Wände umschlossenen Kanal geführt und in dem Kanal mit einem Gas versetzt. Die Gaszuführung ist im unteren Bereich des vertikalen Kanalabschnittes angeordnet. Die Gaszuführungseinrichtung besteht aus einer oder mehreren Düsen, die entweder als Düsenkranz oder Düsenfeld angeordnet sind. Der dabei sich bildende Metallschaum wird durch die Abführöffnung des Kanals zur weiteren Verarbeitung abgeführt.

2.1.2.7 Gas – eutektische Umwandlung eines Metall – Wasserstoff- Systems

Diese Verfahrensvariante [52] macht sich die Möglichkeit gas – eutektischer Umwandlungen einiger Metall – Wasserstoff – Systeme zu Nutze. Hier erfolgt bei der Erstarrung der bis zur eutektischen Zusammensetzung an Wasserstoff angereicherten Schmelze am eutektischen Punkt die Umwandlung in eine feste und in eine gasförmige Phase.

Das Verfahren ist in Abbildungen 2.37, 2.38 dargestellt. In einem Tiegel, der im Innenraum eines Autoklaven eingebaut ist, wird ein Metall oder eine Metallegierung, wie z.B. Aluminium, Kupfer, Eisen, Magnesium, Nickel oder deren Legierungen, in einer Gasatmosphäre unter einem bestimmten Druck (20 kPa bis 1 MPa) aufgeschmolzen. Das verwendete Gas ist entweder reiner Wasserstoff oder eine Gasmischung, die Wasserstoff enthält. Wasserstoff wird bevorzugt, weil dieser eine hohe Löslichkeit in den aufgeschmolzenen Materialien besitzt. In Verbindung mit der Temperatur kontrolliert der Druck des Wasserstoffes oder der Partialdruck des Wasserstoffes einer Gasmischung die Menge an gelösten Wasserstoffes in der Schmelze, d.h. mit steigendem Druck steigt die Löslichkeit des Gases in der Schmelze. Die Schmelze wird eine bestimmte Zeit auf Temperatur gehalten, bis sie den Sättigungszustand erreicht. Die mit Wasserstoff gesättigte Schmelze wird danach in eine Kokille, die unterhalb des Autoklaven angeordnet ist, gegossen. In dieser Kokille erfolgt die gerichtete eutektische Erstarrung der Schmelze durch Abkühlen unter einem vorbestimmten Wasserstoffgasdruck (5 kPa bis 3 MPa). Dieser wird je nach geforderter Porenstruktur, Porengröße und Porengehalt erhöht, erniedrigt oder konstant gehalten. Durch das Kühlen der Schmelze und das Kontrollieren des Druckes während der Erstarrung sinkt die Löslichkeit des Wasserstoffes in der Schmelze stark ab, und dadurch beginnt die Ausscheidung von Wasserstoffgas an der Erstarrungsfront. Das Wasserstoffgas bildet Blasen, die gleichzeitig mit dem erstarrenden Metall wachsen, aber die Erstarrungsfront nicht verlassen, und dadurch eine poröse Struktur bilden. Die ausgeschiedene Menge Wasserstoff ist die Differenz zwischen dem gelösten Wasserstoffgehalt in der Schmelze und der Löslichkeit des Wasserstoffes im erstarrten Metall unter dem vorgegebenen Systemdruck. Der Systemdruck wird bis zur vollständigen Erstarrung des Metalls konstant gehalten. Anschließend wird ein Druckausgleich mit der Luftatmosphäre durchgeführt, und das fertige Produkt aus dem Autoklaven entfernt. In Abbildung 2.39 ist ein Schnitt durch ein fertiges Produkt zu sehen. Der Unterschied zur konventionellen eutektischen Erstarrung besteht darin, daß hier die Schmelze nicht in zwei feste, sondern einem festen und einem gasförmigen Bestandteil zerfällt. Die erzielbaren Porositäten liegen bei maximal 75% , der Bereich der Porengröße liegt zwischen 10 µm und 10 mm, und es sind kugelförmige, elliptische, zylindrische Porenstrukturen möglich. Die wichtigsten Prozeßvariablen zur Steuerung der Porenstruktur (Größe, Form und Orientierung der Poren, Porosität) sind die

Legierungsauswahl, die Wasserstoffbeladung der Schmelze, der Gasdruck über der erstarrenden Schmelze und die Richtung und Geschwindigkeit der Abkühlung [42].

Mit diesem Verfahren ist es auch möglich, Bauteile aus dem gleichen Material mit aufeinanderfolgenden porösen und nicht porösen Schichten in einem Arbeitsgang zu bauen. Die nicht poröse Schicht wird dadurch gebildet, daß der Systemdruck bis zu einer oberen Druckgrenze angehoben wird, wo keine Porenbildung mehr möglich ist. Mögliche Anwendungen für Bauteile, die mit diesem Verfahren hergestellt werden, sind Wärmetauscher, Einspritzdüsen für Treibstoffe, Wärmerohre, Trägermaterial für Katalysatoren, leichtgewichtige Strukturbauteile, selbstölende Lager, Filter und Gas – Flüssigkeits - Scheider.

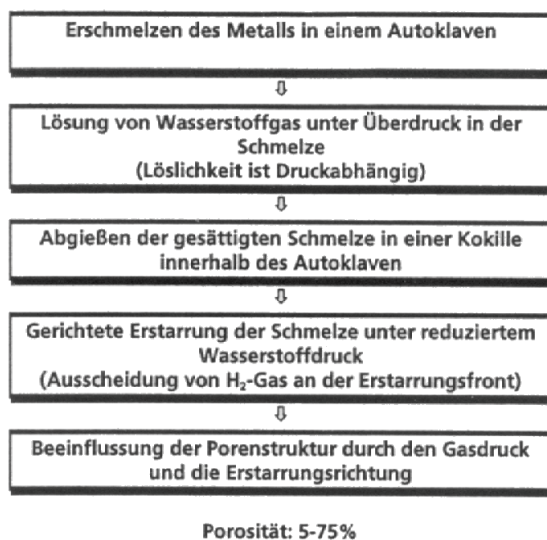


Abbildung 2.37: Herstellung geschlosseno-poriger Metallschäume durch gaseutektische Reaktion (GASARE) [42]

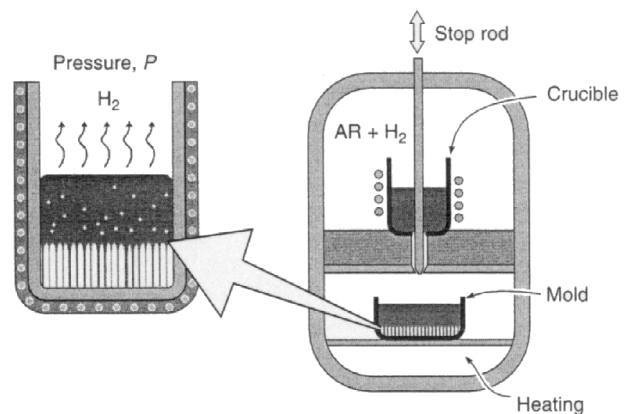


Abbildung 2.38: Prozeßschema GASARE [9]

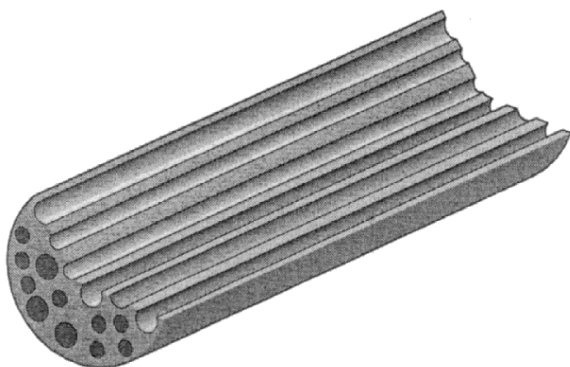


Abbildung 2.39: Schnitt durch ein Bauteil [9]

2.1.3 Sputter – Technologie

Mit dem Sputter – Verfahren (auch Kathodenzerstäubung genannt) [53, 1] werden Metallschäume mit geschlossenzelliger Porenstruktur hergestellt.

In der Vakuumkammer einer Trioden – Sputtering – Anlage wird bei konstantem Gasdruck durch eine Gleich- oder Hochfrequenzspannung zwischen einer Glühkathode und einer Anode, auf der das Substrat befestigt ist, ein Plasma gezündet. Die im Kathodenfall beschleunigten positiven Gasionen (meist Argonionen aber auch Krypton-, Xenon-, Helium-, Stickstoff- oder Sauerstoffionen) können durch ihre hohe kinetische Energie beim Aufprall auf das Target, die als separate Kathode in der Vakuumkammer angebracht ist und aus dem später aufzuschäumenden Metall besteht, Atome aus deren Oberfläche herausschlagen. Während die Gasionen entsprechend dem vertikal gerichteten elektrischen Feld senkrecht auf das Target prallen, ist die Energie der gesputterten Atome gering, und sie verlassen die Targetoberfläche nach allen Richtungen. Substrate, die auf der Anode liegen, werden dadurch mit einer Materialschicht unter Einschluß von Inertgas beschichtet, die der Targetzusammensetzung entspricht. Das Inertgas ist dabei gleichmäßig im abgeschiedenen Metallkörper verteilt. Der Gehalt an eingeschlossenem Inertgas in den abgelagerten Schichten wird durch Verändern des Druckes des Inertgases in der Vakuumkammer, durch die Temperatur des Substrates und der angelegten Spannung am Substrat kontrolliert. Nach Beendigung des Sputter – Vorganges wird das Substrat mit dem darauf befindlichen Metallkörper aus der Vakuumkammer entfernt, und der Metallkörper wird mechanisch vom Substrat getrennt.

Durch Erwärmen des Metallkörpers über den Schmelzpunkt des Metalls bilden sich Gasblasen, und diese expandieren über eine vorgegebene Zeitspanne, bis die geforderte Porosität erreicht ist. Durch Abkühlen unter den Schmelzpunkt des Metalls wird der Schäumvorgang beendet. Der Inertgasgehalt variiert von 15 ppm bis zu 2300 ppm, und somit können Porositäten bis zu 80% erreicht werden.

Dieses Verfahren kann auf die Metalle Aluminium, Titan, Chrom, Nickel, Kupfer, Niob, Silber, Hafnium, Molybdän, Tantal, Wolfram, Platin, Gold, Eisen, Plutonium und Silizium angewendet werden.

2.1.4 Abscheidetechniken

Unter dieser Kategorie sind diejenigen Verfahren zusammenzufassen, welche von einem offenporigen, im allgemeinen retikulierten organischen Trägerschaum ausgehen [54, 55]. Dieses als Substrat dienende Material wird durch geeignete Verfahren (z.B. Bedampfen oder Tränken in Graphitlösungen) zunächst in einen elektrisch leitfähigen Zustand überführt und anschließend elektrochemisch mit dem gewünschten Metall beschichtet. Durch eine nachträgliche Wärmebehandlung zersetzt sich der organische Trägerschaum,

so daß die metallische Beschichtung als Abbild des ursprünglichen Kunststoffschäumens erhalten wird. Der schematische Verfahrensablauf ist in der Abbildung 2.40 dargestellt.

Abgesehen von elektrischen Abschirmeffekten, die einen gleichmäßigen Schichtauftrag im gesamten Porenvolumen behindern, sind diese Verfahren sehr aufwendig und nur für offenporige Schaumstrukturen geeignet. Eine Herstellung von Aluminium- oder Titanschäumen ist nach diesen Verfahren nicht möglich.

Auf diese Weise hergestellte Metallschäume werden als Katalysatorträger, Elektroden und Filter verwendet. In der Abbildung 2.41 ist ein nach diesen Verfahren hergestellter Bauteil dargestellt.

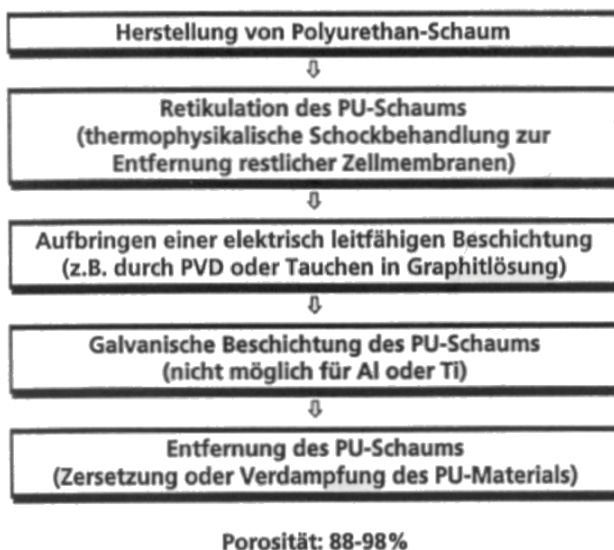


Abbildung 2.40: Herstellung offenporiger Metallschäume durch Abscheidetechniken (Retimet, Celmet) [42]



Abbildung 2.41: Bauteil und 150 fache Vergrößerung eines Ausschnittes dieses Bauteiles [56]

Die Firma Inco Limited entwickelte ein Verfahren [57, 9] bei dem Kunststoffschäume als Trägermaterial dienen. Diese Kunststoffschäume werden entweder durch chemische Dampfersetzung (CVD), Aufdampfen oder Galvanisieren mit Metall beschichtet. Beim Inco Prozeß wird Nickel durch Spaltung von Nickel-Carbonyl Gas ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) am Kunststoffschäum abgelagert. Der offenporige Kunststoffschäum wird im CVD-Reaktor plaziert, und Nickel-Carbonyl Gas wird eingeblasen. Das Gas zersetzt sich bei einer Temperatur über $100\text{ }^\circ\text{C}$ in die beiden Komponenten Nickel und Kohlenmonoxid, wobei die erhitzten Oberflächen des Kunststoffschäumens mit Nickel beschichtet werden. Um ausschließlich den Kunststoffschäum zu erwärmen, werden entweder Infrarot - oder Hochfrequenz - Heizgeräte verwendet. Nach Erreichen der geforderten Schichtdicke wird der mit Nickel beschichtete Kunststoffschäum aus dem Reaktor entnommen, und durch eine Wärmebehandlung in einer Luftatmosphäre wird der Kunststoff verbrannt. Das Ergebnis ist eine zellulare Metallstruktur mit hohlen Stegen. Abschließendes Sintern verdichtet die Struktur. Das Verfahren ist in Abbildung 2.42 schematisch dargestellt.

Dieses Verfahren ist beschränkt auf reine Elemente wie z.B. Nickel oder Titan. Es werden damit Metallschäume mit einer Porengröße von 100 – 300 µm im Durchmesser und einer Dichte von 0,02 – 0,05 g/cm³ hergestellt.

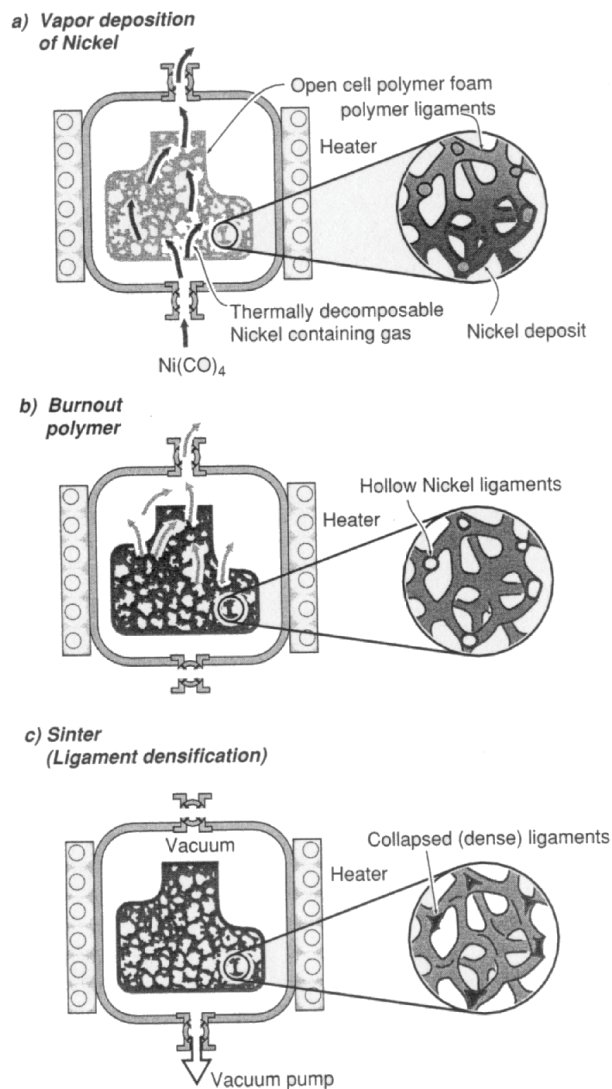


Abbildung 2.42: schematische Darstellung des Inco Prozesses [9]

2.2 Patente

Die in der Patentrecherche gefundenen Patente sind einerseits in die Beschreibung der Verfahren zur Herstellung metallischer Schäume eingeflossen und andererseits werden in diesem Abschnitt Patente vorgestellt, die in die Serienfertigung aufgenommene Bauteile beschreiben. Die in den Patenten beschriebenen Bauteile weisen Gemeinsamkeiten auf, das sind die Erhöhung der Steifigkeit der Bauteile bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion. Dies wird dadurch erreicht, daß in die Hohlräume der Bauteile Kerne aus Metallschaum eingebracht werden. Diese Metallschaumkerne besitzen dabei eine zufällige Struktur. Es konnte jedoch kein Patent gefunden werden, das ein Bauteil mit gezielt konstruierter Schaumstruktur beschreibt.

Die Themen lauten:

Bauteil für das Fahrwerk eines Kraftfahrzeuges und Verfahren zur Herstellung eines solchen Bauteiles:

Patentinhaber: Lemförder Metallwaren AG

Erfinder: Ersoy, Metin

DE 19501508 C1

25.04.1998

Die Erfindung beschreibt ein Bauteil für das Fahrwerk eines Kraftfahrzeuges, welches aus Aluminiumdruckguß besteht und ein Hohlraumprofil aufweist, in dessen Hohlraum sich ein Kern aus Aluminumschaum befindet.

Besonders bei der Herstellung eines hochbelasteten Bauteiles für das Fahrwerk moderner Kraftfahrzeuge gewinnt die Gewichtsreduzierung dieser Bauteile zunehmend an Bedeutung. Diese Erfindung liefert die Lösung, um einteilige Bauteile mit einem Hohlraumprofil zur Gewichtsreduzierung und Erhöhung ihrer Steifigkeit auf möglichst rationelle Weise in großen Stückzahlen herstellen zu können. Bei diesem Verfahren werden in einer Druckgußform Kerne aus Aluminiumschaum eingebracht, die nach dem Einpressen des Aluminiums in das Formwerkzeug in dem Bauteil aus Aluminiumdruckguß verbleiben. Zur Erzielung hochsteifer und gewichtsminimierter Bauteile werden hier Kerne aus vorgeformtem Aluminiumschaummaterial verwendet. Ein in dem Bauteil verbleibender Kern aus aufgeschäumtem Aluminium ist sehr druckfest, hat ein geringes Gewicht und weist eine geschlossene Porosität auf. Vor allem wird durch den in dem Bauteil verbleibenden Kern aus aufgeschäumtem Aluminium eine wesentliche Erhöhung der Biegefestigkeit des Hohlprofiles erreicht.

Der Kern aus aufgeschäumtem Aluminium wird in den wenig belasteten Stellen an der Innenwand des Gußwerkzeuges abgestützt bzw. befestigt, damit zwischen dem Kern und dem Werkzeug ein gleichmäßiger Abstand in gewünschter Wanddicke verbleibt.

Die Abbildung 2.1 zeigt das Bauteil und die Abbildung 2.2 einen Querschnitt durch das Bauteil.

Drehstab – Stabilisator:

Patentinhaber: Hoesch AG

Erfinder: Fischer, Friedhelm; Richter, Jonny; Taube, Günter

DE 4116837 A1

26.03.1992

Die Vorteile des Drehstab – Stabilisators, der in diesem Patent beschrieben ist, sind in der wesentlichen Erhöhung der Lebensdauer und dadurch in der wesentlichen Erhöhung der Sicherheit bei besserer Werkstoffausnutzung zu sehen, da das Innenkugelstrahlen des Rohres nach dem Biegen und vor dem Einbringen der Kernfüllung durchgeführt werden kann, so daß die in den Krümmungsbereichen durch das Innenkugelstrahlen aufgebauten Eigenspannungen erhalten bleiben. Die Kernfüllung übt dabei zumindest in den hoch beanspruchten Krümmungsbereichen eine Stützwirkung aus und wirkt so einer Querschnittsverformung entgegen. Dabei bestehen die Kernfüllungen aus einem fließ- oder rieselfähigen Mittel, das nach dem Einbringen aufschäumt und aushärtet. In Abbildung 2.3 ist der Drehstab - Stabilisator im Querschnitt zu sehen.

Gußbauteil aus Leichtmetall:

Patentinhaber: Bayerische Motoren Werke AG

Erfinder: Wolf, Johann

DE 19912329 A1

21.09.2000

Moderne Antriebsaggregate für Kraftfahrzeuge sind insbesondere aus Gewichtsgründen aus Leichtmetall hergestellt, wobei die Antriebsaggregate oder Teile davon bei Beanspruchung durch relativ hohe Leistung von Torsions- und/oder Biegekräften relativ stark verformt werden. Diese Verformungen sind Ursache für erhöhte Reibung und erhöhten Verschleiß bei reduzierter Leistung.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, für ein als Antriebsaggregat gestaltetes Gußbauteil aus Leichtmetall mit einer mit dem Gußwerkstoff verbundenen

Metallschaumeinlage eine versteifende Ausgestaltung aufzuzeigen. Durch diese Ausgestaltung wird die Biege - und Torsionsteifigkeit des Maschinengehäuses erhöht und damit die Verformungen des ausgesteiften bzw. versteiften Maschinengehäuses reduziert. Dadurch verringert sich die Reibung, das sich in geringeren Verschleiß und höherer Leistung niederschlägt.

Das Maschinengehäuse wird so hergestellt, daß die Metallschaumeinlage ein Aluminiumschaumkern ist, und diese einerseits mit dem Wandabschnitt eines aus einer Aluminiumlegierung gebildeten Zylinder – Kurbelgehäuses und andererseits mit dem Innenumfang eines rinnenartig gestalteten Profilelementes eine stoffschlüssige Verbindung bildet. In Abbildung 2.4 ist eine Skizze dieses Bauteiles zu sehen.

Rad für ein Kraftfahrzeug mit Hohlspeichen:

Patentinhaber: Porsche AG

Erfinder: Hummel, Frank; Stach, Jens

DE 19754959 A1

EP 0922591, A3

AU 9234198

JP 11240302

16.06.1999

Die Erfindung bezieht sich auf ein Rad für ein Kraftfahrzeug mit Hohlspeichen, das aus Leichtmetall besteht, und in einem Gußverfahren herstellbar ist. Die Radspeichen weisen in einem Hohlraum einen verlorenen Kern auf. Die hauptsächlich erzielten Vorteile bestehen darin, daß die Hohlräume der Radspeichen durch einen verlorenen Kern die Formbeständigkeit der Radspeichen unterstützen. Weiters kann eine geringere Wandstärke der Radspeichen gewählt werden, wodurch das Rad insgesamt leichter wird als ein Rad mit unausgefüllten Hohlräumen, und daß Formsand nicht aus den Hohlräumen ausgeschüttelt werden muß.

Der verlorene Kern ist in der Kokille über Positionselemente, wie beispielsweise Zapfen lagegenau angeordnet, so daß eine Formgenauigkeit wie mit einem Sandkern erzielbar ist. Damit eine Nacharbeit entfällt, sind die Positionselemente aus dem gleichen Leichtmetall wie das Rad ausgeführt, so daß eine stoffschlüssige Verbindung mit der Speichenwandung beim Gießvorgang erfolgt.

Die verlorenen Kerne bestehen entweder aus schalenförmigen Hohlelementen, Metallschaum oder Keramikschaum.

Die schalenförmigen Hohlelemente können aus Metallen wie Leichtmetall, beispielsweise einer Aluminiumlegierung, bzw. Stahllegierung bestehen, wobei auch andere Metalle denkbar sind, die einen Schmelzpunkt oberhalb der Gießtemperatur aufweisen.

Der Metallschaum, bestehend beispielsweise aus Aluminium, weist eine entsprechend behandelte Außenhaut auf. Der Kern sollte eine erheblich geringere Gesamtdichte als der

Gußwerkstoff aufweisen. Des weiteren soll der Kern für die Dauer des Gießvorganges beständig gegen die Temperatur der Schmelze und formbeständig sein.

Die Abbildung 2.5 zeigt einen Schnitt durch das Rad, wobei der Hohlraum Nr. 9 mit Metallschaum ausgefüllt ist. Die Abbildungen 2.6, 2.7 zeigen einen Querschnitt durch die Radspeichen, wobei der Hohlraum einmal einen Metallschaumkern Nr. 8a und einmal ein schalenförmiges Hohlelement aufweist.

Rad – Gußfelge:

Patentinhaber: Austria ALU-GUSS-GESELLSCHAFT M.B.H.

WO 9939923

AT 406134

DE 29817615 U

AU 1863899

12.08.1999

Die Erfindung betrifft eine Rad – Gußfelge, mit einem als Verbundkörper ausgeführten Leichtmetall – Felgenkörper, der einen Nabenbereich, einen Hornbereich und einen zwischen diesen Bereich befindlichen Wand- oder Rippenbereich, z.B. mit Speichen aufweist. Die Rad – Gußfelge ist dadurch gekennzeichnet, daß im Leichtmetall des einteilig gegossenen Felgenkörpers wenigstens ein Formteil eingegossen ist, der ein kleineres mittleres spezifisches Gewicht als das für den Guß verwendete Leichtmetall aufweist, wobei im Wand- oder Rippenbereich zumindest ein sich radial erstreckender Formteil und insbesondere im Hornbereich ein kreisförmiger geschlossener Formteil eingegossen ist. Die Formteile bestehen aus aufgeschäumtem Metall, vorzugsweise aus Aluminiumschaum. Der Aluminiumschaum hat den Vorteil, daß die sich beim Formen bildende Oxidhaut eine vergleichsweise hohe Schmelztemperatur besitzt, und zweitens durch die enthaltenen Gasanteile eine schlechte Wärmeübertragung besitzt. Dadurch kann der Aluminiumschaum der Gießtemperatur standhalten. Der Aluminiumschaumkern wird mit Hilfe von Zentrierstiften im Gießwerkzeug zentriert.

Die Abbildung 2.8 zeigt einen Querschnitt einer solchen Rad – Gußfelge mit dem eingegossenen Formteil (Aluminiumschaum).

Bauteil mit einem Metallschaumkern:

Patentinhaber: Daimler – Benz Aktiengesellschaft

Erfinder: Huschka, Stephan; Hörmann, Rolf;

DE 19650613 A1

10.06.1998

Die Erfindung bezieht sich auf ein Bauteil mit einem Metallschaumkern sowie auf Verfahren zu dessen Herstellung. Dabei wird der Metallschaumkern mit einem Gußwerkstoff umgossen. Dadurch wird eine stoffschlüssige Verbindung zwischen dem Metallschaumkern und dem Gußwerkstoff erreicht. Durch die stoffschlüssige Verbindung wird eine definierte Kraffteinleitung in den Metallschaumkern gewährleistet, so daß das Bauteil einer hohen dynamischen Belastung standhalten kann.

Zur Herstellung der stoffschlüssigen Verbindung zwischen dem Gußwerkstoff und dem Metallschaumkern werden zwei Verfahren angewandt. Nach dem einen Verfahren wird der Metallschaumkern mit einer metallischen Folie ummantelt, bevor der Metallschaumkern mit dem Gußwerkstoff umgossen wird. Die metallische Folie ist dabei derart ausgebildet, daß sie zur stoffschlüssigen Verbindung des Gußwerkstoffes mit dem Metallschaumkern sowohl kernseitig wie gußwerkstoffseitig beim Gießvorgang anschmilzt aber nicht durchschmilzt, und sie verhindert damit das Eindringen der Schmelze in den Metallschaumkern. Die metallische Folie muß daher auf die Gießtemperatur, Gießdauer abgestimmt sein, einen entsprechenden Schmelzpunkt, Dichte und Löslichkeit gegenüber der Gußwerkstoffschmelze besitzen. Die angewandten Gußverfahren sind Kokillenguß, Sandguß oder Druckguß.

Beim zweiten Verfahren wird der Metallschaumkern im Oberflächenbereich mit einer hitzefesten Masse versiegelt, die der Gießtemperatur standhält. Dabei muß ein Teil des Metallschaumkernes an der Oberfläche zur formschlüssigen, also metallurgischen Verbindung des Gußwerkstoffes mit dem Metallschaumkern beim Gießvorgang freiliegen. Beim Gießvorgang wird das Metall an der Oberfläche des Metallschaumkernes durch den geschmolzenen Gußwerkstoff angeschmolzen und damit eine oberflächliche Legierungsbildung zwischen dem Gußwerkstoff und dem Metallschaum erhalten. Nach dem Umgießen wird die Masse aus dem Bauteil entfernt, und das wird dadurch erreicht, daß die Masse entweder in Wasser oder anderen Lösungsmittel lösbar ist.

Der Metallschaumkern besteht aus einem Metall oder Metallegierung, wobei Aluminium oder Aluminiumlegierungen bevorzugt werden. Daneben können auch Metallschäume aus Stahl, Magnesium, Titan und Nickel eingesetzt werden. Der Gußwerkstoff besteht vorzugsweise aus Leichtmetall.

Diese Bauteile werden in der Fahrzeugtechnik und in der Luft- und Raumfahrttechnik eingesetzt, um den Materialeinsatz und das Gewicht zu reduzieren. Weiters können diese Bauteile als Wärmetauscher angewendet werden.

Ein Beispiel ist ein kühlbarer Motorblock, bei dem der Metallschaumkern die Kühlkanäle bildet, die vom Kühlmedium durchströmt werden.

In der Abbildung 2.9 ist ein solches Bauteil abgebildet.

Energieabsorbierendes Deformationselement zum Schutz der Kraftfahrzeugkarosserie:

Patentinhaber: Gerhards & Cie GmbH & CoKG

DE 19502307 A1

19.10.1995

Hier wird ein energieabsorbierendes Deformationselement zum Schutz der Karosserie und zum Einbau zwischen einem Stoßfänger und einem Längsträger vorgestellt. Das Deformationselement ist als Gehäuse ausgeführt, das mit Aluminiumschaum als Energieabsorber gefüllt ist. Das Gehäuse ist entweder als Kunststoffspritzgießteil, als Aluminiumstrangpreßteil oder als Aluminiumblechformteil ausgebildet. Durch diese Werkstoffkombinationen wird ein geringes Gewicht erzielt, wodurch auch eine Gewichtsreduzierung im Fahrzeugbau möglich ist. Die Energieabsorption des Metallschaumes verhindert innerhalb eines weiten Bereiches eine Deformation oder sonstige Beschädigung der Längsträger. Das Gehäuse ist entweder als einteilige Kammer oder als Bauteil mit mehreren Kammern ausgeführt. Ein Hauptvorteil des Deformationselementes ist die Fähigkeit, auch in nicht axialer Richtung eingeleitete Energie zu absorbieren. Die Energieabsorption ist im Vergleich zum Bauteil sehr groß. Die Abbildung 2.10 zeigt in schematischer Teilansicht ein Kraftfahrzeug mit einem Längsträger und einem Stoßfänger. Zwischen Stoßfänger und dem Längsträger ist das Deformationselement befestigt, das nach Beschädigung austauschbar ist.

Karosserie – Seitenteil für ein Kraftfahrzeug:

Patentinhaber: Ymos Aktiengesellschaft Industrieprodukte

Erfinder: Heim, Gunther; Schütt, Stephan; Hock, Jürgen; Bischoff, Holger

DE 19538844 A1

24.04.1997

Die Erfindung betrifft ein Karosserie – Seitenteil, wie Boden – Seitenschweller, A -, B -, oder C – Säule oder dgl. eines Kraftfahrzeuges, bei dem die bis zu einer vorgebbaren Aufprallgeschwindigkeit entstehenden Schäden durch relativ einfache Reparaturmaßnahmen behoben werden können, ohne daß hierdurch die Karosseriesteifigkeit verringert wird.

Das Karosserie – Seitenteil besteht aus einem relativ stabilen Hohlprofil, z.B. Strangpreßteil, an dessen Außenwand eine zusätzliche Materialschicht zur Dämpfung der Kraft auf das Hohlprofil (Absorptionsmaterial) vorgesehen ist. Das Absorptionsmaterial kann außenseitig durch eine Außenhaut aus Blech oder Kunststoff verdeckt sein. Dadurch

ist ein Austausch sowohl der Außenhaut als auch des Absorptionsmaterials auf einfache Weise möglich. Die Außenhaut ist am Hohlprofil beispielsweise mit Hilfe von Schrauben befestigt, oder das Hohlprofil ist mit hakenförmigen Befestigungsteilen versehen, in die die randseitigen Bereiche der Außenhaut lediglich eingesetzt werden.

Als energieabsorbierendes Material wird ein viskoelastisches Material, etwa ein Kunststoffschäum (Polyurethanschäum, Expanded Polypropylen) oder ein Metallschäum (Aluminiumschäum) verwendet. Diese Schäume werden entweder direkt in die Hohlkammer eingeschäumt oder aber vorgefertigt und als Formstück in die Hohlkammer eingelegt.

Ein Vorteil des Seitenteiles besteht darin, daß durch Verwendung des zusätzlichen Absorptionsmaterials auch bei höheren Aufprallgeschwindigkeiten eine effizientere Energieaufnahme gewährleistet ist.

In den Abbildungen 2.11, 2.12 sind jeweils ein Schnitt durch einen Boden – Seitenschweller und einer B – Säule eines Kraftfahrzeuges dargestellt.

Karosserieteil, insbesondere Profilrahmenträger:

Patentinhaber: Wilhelm Karmann GmbH

Erfinder: Emmelmann, Hans-Joachim; Seeliger, Hans-Wolfgang

DE 19648164 A1

US 6135542

EP 0844167, A3

JP 10175567

28.05.1998

Durch die Anordnung eines Strukturbauteiles im Inneren eines Profilrahmenträgers und die Ausschäumung des Zwischenraumes zwischen dem Strukturbauteil und dem Profilrahmenträger wird ein Bauteil gebildet, das sich als Rahmen oder Versteifungselement im Kraftfahrzeug einsetzen läßt, beispielsweise als Windschutzscheibenrahmen oder als Überrollbügel, insbesondere jedoch als tragendes Teil der Grundstruktur, etwa als Seitenschweller, wo bisher im Cabrioletbau in dem Profilrahmenträger angeordnete Rohre o.ä. zur Erhaltung der Torsionssteifigkeit unverzichtbar waren.

Die Ausschäumung des Zwischenraumes ermöglicht eine flächige Abstützung des innenliegenden Strukturbauteiles, so daß über den gesamten Verlauf des Profilrahmenträgers eine gleichmäßige Widerstandsfähigkeit gegen von außen auftretende Deformationen, insbesondere Knickdeformationen, wie sie bei Unfällen auftreten, erreicht ist. Durch den Einsatz eines metallischen Schaumwerkstoffes zur Auffüllung dieses Zwischenraumes ist gleichzeitig das Gewicht gesenkt, weil gegenüber bisherigen Bauteilen die Wandstärke des innenliegenden Strukturbauteiles, insbesondere des Rohres, gesenkt werden kann. Ein Karosseriebauteil, das neben den mit metallischem Schaumwerkstoff (Aluminiumschäum), aufgefüllten Bereichen noch Hohlräume enthält, die

frei bleiben, bietet die Möglichkeit, nur diejenigen Bereiche des Karosseriebauteiles auszusteifen, die einer erhöhten Belastung unterliegen.

Zur Bildung der Bauteile werden in dem Hohlraum des Profilrahmenträgers bzw. Karosserieteiles Halbzeuge aus metallischem Schaumwerkstoff eingesetzt, die in den Profilrahmenträger bzw. Karosserieteil durch Erhitzen auf ihre Endgestalt geschäumt werden. Die Endgestalt wird dabei zumindest von den Innenwandungen des Karosserieteiles begrenzt. Das Halbzeug kann als primitiver Körper ausgebildet sein oder bereits eine Anpassung an die Form des Hohlraumes aufweisen, also endkonturnah verarbeitet sein. Insgesamt eröffnet dieses Verfahren die Möglichkeit, Teilbereiche eines Karosserieteiles derart auszusteifen, daß in diesem Bereich eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen von außen einwirkende Kräfte bei geringstmöglichem Gewicht des Gesamtbaueteiles ermöglicht ist.

In den Abbildungen 2.13, 2.14 sind die Seitenansicht und die Schnittansicht eines solchen Profilrahmenträgers gezeigt. Die Abbildungen 2.15, 2.16 zeigen einen Überrollbügel und dessen Schnittansicht.

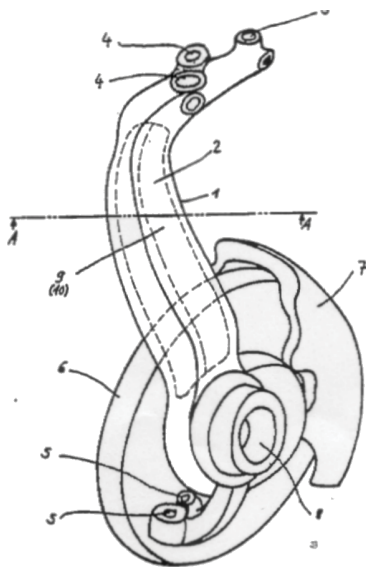


Abbildung 2.1: Bauteil für ein Fahrwerk

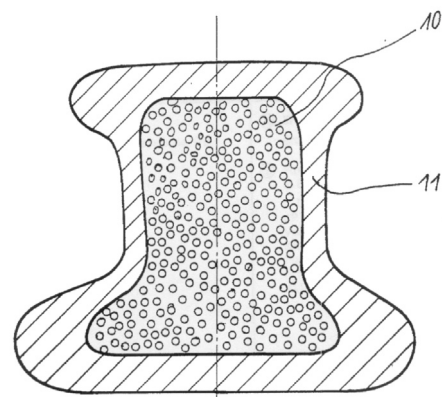


Abbildung 2.2: Schnitt durch das Bauteil

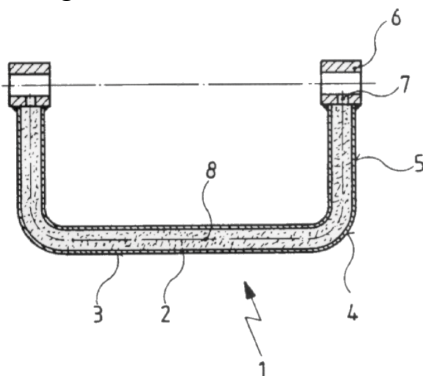


Abbildung 2.3: Drehstab - Stabilisator

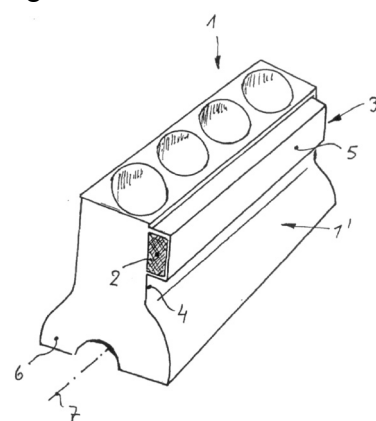


Abbildung 2.4: Gußbauteil aus Leichtmetall

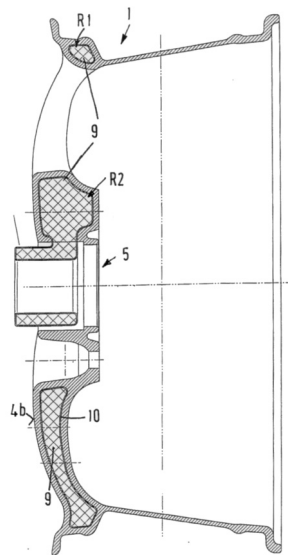
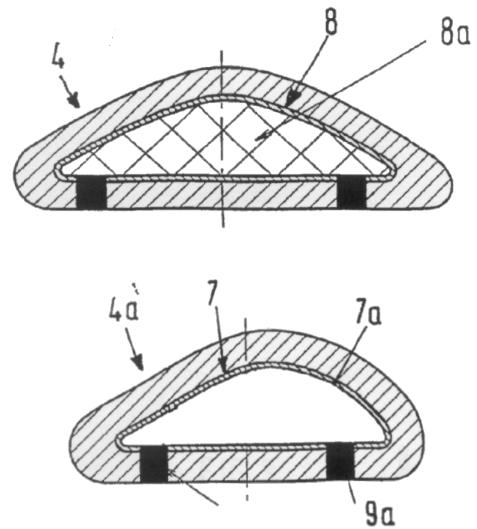


Abbildung 2.5: Rad für ein Kraftfahrzeug mit Hohlspeichen



Abbildungen 2.6, 2.7: Schnitte durch die Hohlspeichen

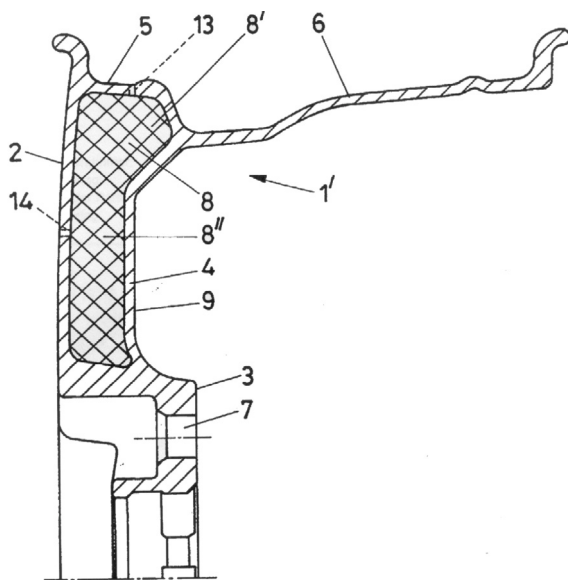


Abbildung 2.8: Schnitt durch die Rad - Gußfelge

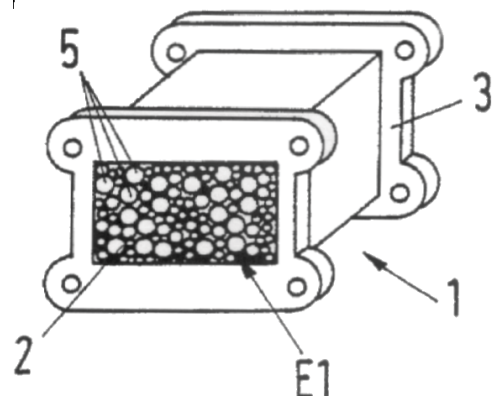


Abbildung 2.9: Bauteil mit einem Metallschaumkern

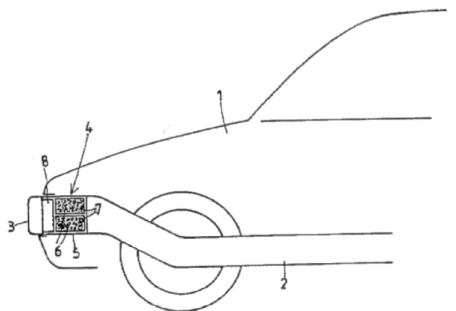


Abbildung 2.10: Deformationselement

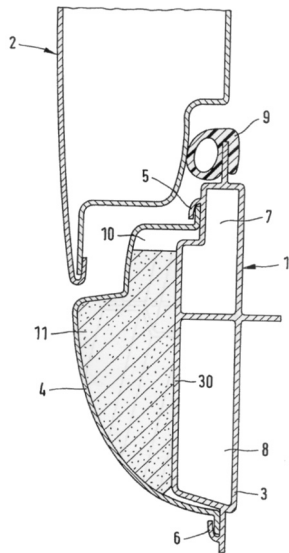


Abbildung 2.11: Schnitt durch einen Boden - Seitenschweller

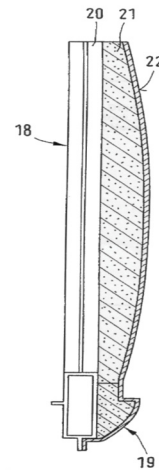


Abbildung 2.12: Schnitt durch eine B - Säule

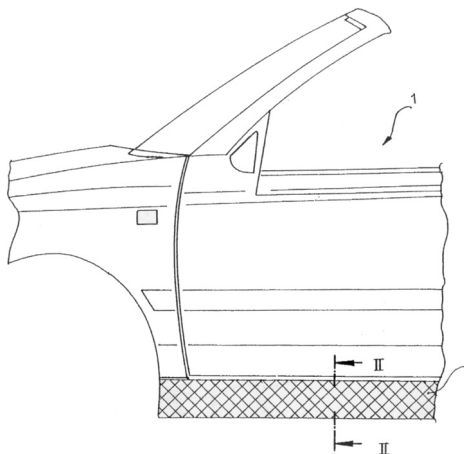


Abbildung 2.13: Seitenansicht des Profilrahmenträgers

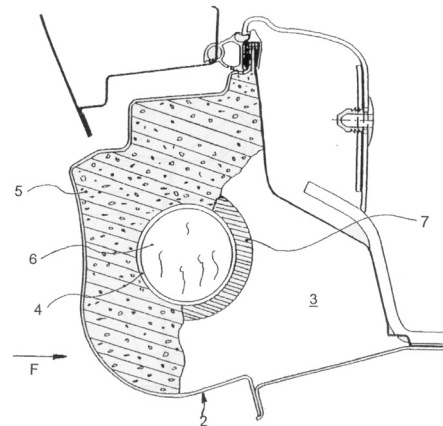


Abbildung 2.14: Schnitt durch den Profilrahmenträger

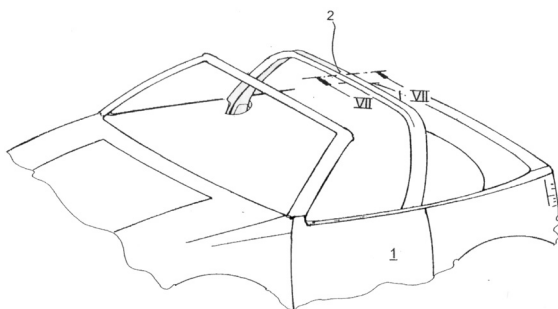


Abbildung 2.15: Überrollbügel

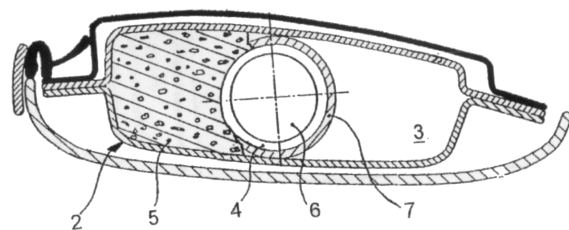


Abbildung 2.16: Schnitt durch den Überrollbügel

3 Verfahrens- und werkstofftechnische Grundlagen

3.1 Die Gießereitechnik

Das Gießen besitzt innerhalb der formgebenden Fertigungsverfahren die größte konstruktive Gestaltungsfreiheit und stellt gleichzeitig den kürzesten Weg vom Werkstoff zum Fertigprodukt dar.

Die Möglichkeit der Reduzierung einer nachfolgenden spanabhebenden Bearbeitung und die weitgehende Wiederverwendung von Sekundärmetallen begrenzen den Material- und Energieeinsatz. Die Fertigung von Teilen durch Gießen schont damit die natürlichen Ressourcen. Gußteile sind langlebig und umweltverträglich und erfüllen somit die Anforderungen des industriellen Umweltschutzes.

Der Einsatzbereich der Gußteile erstreckt sich vom Einzelstück bis zum Massenprodukt und vom Gramm bis zu mehreren hundert Tonnen Stückgewicht.

Ebenso vielseitig sind auch die Gußwerkstoffe. Eisengußwerkstoffe wie Gußeisen, Temperguß, Sphäroguß und Stahlguß, aber auch Leichtmetallgußwerkstoffe wie Aluminium- und Magnesiumlegierungen sowie Kupferwerkstoffe (Bronze und Messing) oder andere Metalle wie Zink, Zinn, Chrom, Nickel, Blei oder Titan werden zu Gußteilen verarbeitet [59].

3.2 Gießen aus der Sicht des Umweltschutzes

Wie kaum ein anderes Erzeugnis erfüllt das gegossene Bauteil die Forderungen des Umweltschutzes. Es ist langlebig und läßt sich, wenn es seinen Zweck erfüllt hat, wieder in den Stoffkreislauf zurückführen. Der durch das Schmelzen, Gießen und Putzen entstehende Rauch und Staub wird in nachgeschalteten Luftreinigungsanlagen behandelt.

Recycling, d.h. die Wiederverwertung der nicht mehr benötigten Gußteile und Produktionsabfälle, wird in den Gießereien schon seit langer Zeit durchgeführt. Mehr als die Hälfte des eingeschmolzenen Metalls besteht aus Schrott, eigenen Fabrikabfällen und zugekauftem Fremdschrott.

Auf diese Weise wirkt die Gießereiindustrie nicht nur rohstoff-, sondern auch energiesparend, denn zur Wiederaufbereitung von Schrott ist weniger Energie nötig als zur Gewinnung neuer Metalle.

Aber auch neu entwickelte Schmelzöfen, Formverfahren und Formstoffe führen zu geringeren Belastungen durch Staub, Abwärme, Abgasen, Lärm und Bodenerschütterungen der Arbeitsplätze und der Umgebung [60].

Altsande haben mit rund 80% den größten Anteil am Abfallaufkommen beim Gießen. Die Regenerierung stellt daher neben der direkten Formstoffrückgewinnung den wichtigsten Weg zur Abfallvermeidung dar. Man versteht unter der Regenerierung von Gießereialtsand dessen Aufbereitung zu einem möglichst vollwertigen Ersatz für Neusand. Kommt eine Altsandregenerierung nicht in Betracht, wird eine Verwertung in der Baustoffindustrie, in Asphaltmischungen, in der Zementindustrie, in Ziegelwerken oder als Bergversatz durchgeführt [61].

An dieser Stelle sei auch die Ablagerung des Gießereialtsandes in geordneten Deponien erwähnt, die in der Regel unbedenklich ist. Gießereialtsand kann sogar zur Bildung neutralisierender Trennschichten in den Deponien verwendet werden [60].

3.3 Einteilung der Formverfahren

Als Formen bezeichnet man das Herstellen von Hohlräumen in Formstoffen mit solcher Gestalt und Abmessung, daß nach dem Erstarren und Abkühlen des flüssigen Metalls in der Form das geforderte Gußstück vorliegt [62].

Die Form ist als Gefäß zu betrachten, dessen innere Gestalt dem räumlichen Negativ des Abgusses entspricht und welches dem flüssigen Metall bis zur Erstarrung Gestalt verleiht [60].

Urformwerkzeuge sind von Maschine oder Hand bewegte bzw. geführte Hilfsmittel, mit denen auf den Formwerkstoff (bei verlorenen Formen) oder auf das flüssige Metall (bei Dauerformen) form- und qualitätsgebend eingewirkt wird. Urformwerkzeuge, die als Hilfsmittel zur Herstellung des Formhohlraumes dienen, können weiter nach der Häufigkeit ihrer Verwendung in verlorene Modelle (einmalige Verwendung) und Dauermodelle (mehrmalige Verwendung) unterschieden werden (siehe Abbildung 3.1) [62].

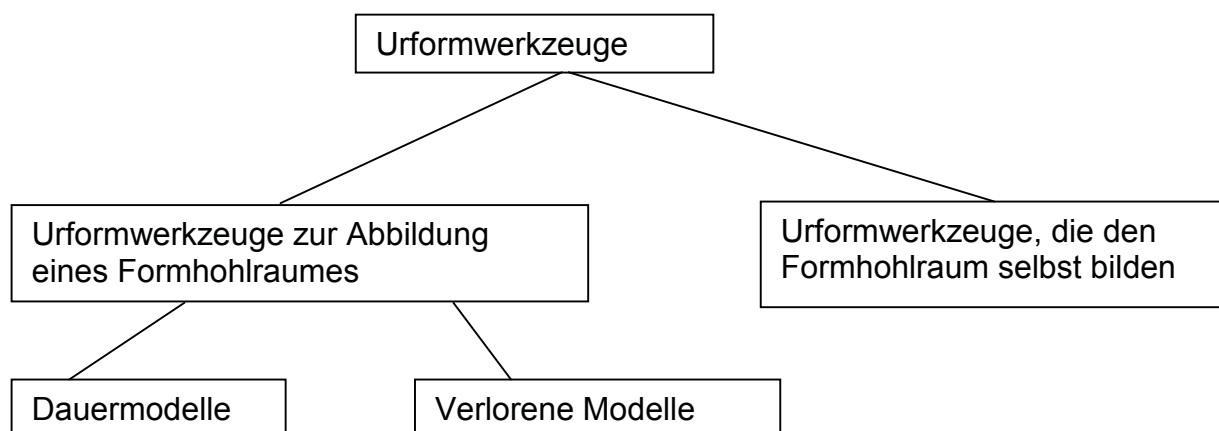


Abbildung 3.1: Gliederung der Urformwerkzeuge nach Funktion und Häufigkeit der Verwendung [62]

Die Maße des Modelles und des zu fertigenden Werkstückes weichen voneinander ab [60]. Es sind folgende Aspekte [62] zu beachten:

- ◆ Schwindmaß ist eine Zugabe auf die Maße des Gußstückes, um die Volumenverminderung (Schwindung) beim Abkühlen bis zur Liquidustemperatur, beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand und beim Abkühlen auf Raumtemperatur auszugleichen.
- ◆ Bearbeitungszugabe ist ein Aufmaß an Gußstückflächen, die bearbeitet werden. Das ist der Fall, wenn die beim Gießen erzielbare Maßgenauigkeit und Oberflächengüte nicht die vom fertig bearbeiteten Einzelteil geforderten Werte erreichen.

Dauermodelle sind Urformwerkzeuge für die mehrfache Herstellung verlorener Formen (Abformzahl $\geq 2 - 100\ 000$). Hierzu gehören vor allem Modelle, Kernkästen und Schablonen.

Verlorene Modelle sind Urformwerkzeuge für die einmalige Herstellung verlorener Formen. Gemäß ihrer Bestimmung, nur der einmaligen Herstellung verlorener Formen zu dienen, unterscheiden sich die verlorenen Modelle von den Dauermodellen. Das betrifft vorrangig den Modellwerkstoff. Es werden vor allem solche Werkstoffe angewendet, die nur einen geringen Arbeitszeitaufwand für die Herstellung der Modelle erfordern, billig sind oder sich für die wiederholte Modellherstellung eignen [62].

Dauerformen sind Urformwerkzeuge, die den gewünschten Formhohlraum selbst beinhalten und zum oftmaligen Abgießen mit flüssigem Metall geeignet sind. Dauerformen bilden das Negativ der Werkstückgestalt und bestehen vornehmlich aus Gußeisen oder Stahl, seltener auch aus Graphit. Hierzu gehören Kokillen, Gesenke für das Flüssigpressen und Druckgießformen [60]. Die Anwendung für große Stückzahlen resultiert aus den hohen Aufwendungen für den Formenwerkstoff und die Herstellung der Dauerformen. Dauerformen sind mindestens einmal geteilt, damit die Gußstücke aus den Formen entnommen werden können (Kokillen, Druckgießformen). Für Schleuder- und Stranggießformen, bei denen die Entnahme der Gußstücke in Richtung der Längsachse erfolgt, kann auf eine Teilung verzichtet werden [62].

3.3.1 Verfahren mit verlorenen Formen

Die Verfahren mit verlorenen Formen werden nach Abbildung 3.2 eingeteilt. Es wird dabei nach der Art und Weise, mit der der Formstoff in einen Zustand gebracht wird, der den Beanspruchungen beim Gießen (Druck, Erosion, Temperatur, Auftrieb u. a.) gewachsen ist, unterschieden [62].

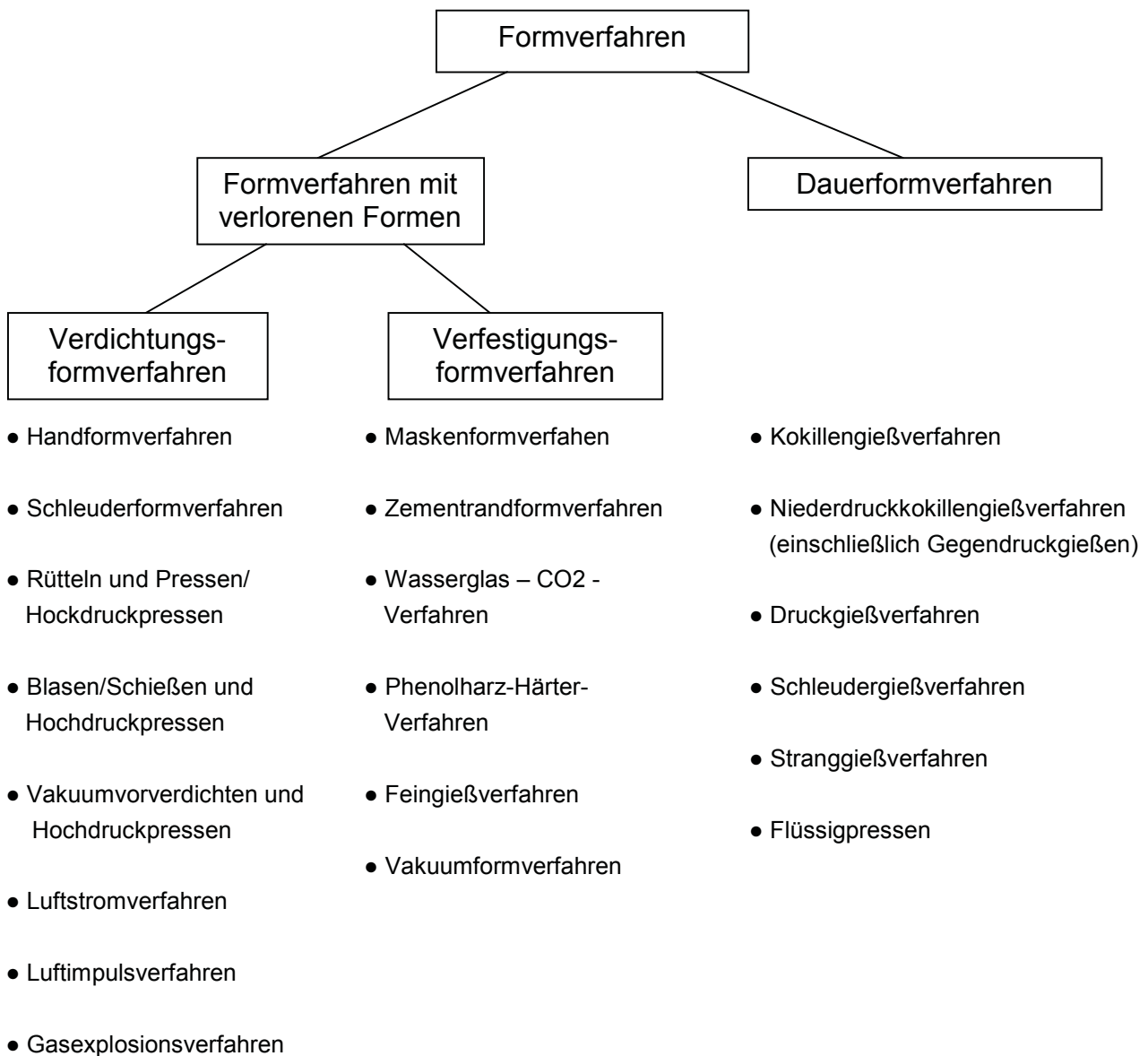


Abbildung 3.2: Einteilung der wichtigsten Formverfahren [62]

Verdichtungsformverfahren sind diejenige Verfahrensgruppe mit der größten Anwendungsbreite. Die Festigkeit des Formstoffes wird durch Einbringen von mechanischer Energie erreicht.

Unter Verfestigungsformverfahren sind solche Formverfahren zu verstehen, bei denen die für die Herstellung maßgenauer Gußstücke erforderliche Festigkeit des Formstoffes durch chemische oder physikalische Bindung erreicht wird.

Dauerformverfahren sind charakterisiert durch das oftmalige Abgießen der einmal hergestellten Gießform. Das Füllen der Dauerform mit flüssigem Metall kann durch unterschiedliche Kräfte erfolgen (z.B.: Schwerkraft, Druckkraft, Zentrifugalkraft), woraus sich gleichzeitig ein Ordnungsprinzip für die verschiedenen Verfahren ableitet [62].

Aus den oben angeführten Möglichkeiten wird ein spezielles Verfahren „das Gipsformverfahren“ genauer beschrieben, denn aus der Vorgehensweise des Gipsformverfahrens und der Herstellung von Formbauteilen aus Keramikfaserwerkstoffen wurde die Vorgehensweise bei den Vorversuchen und den Versuchsreihen abgeleitet.

Verfahrensgrundlagen des Gipsformverfahrens

Das Gipsformverfahren ist innerhalb der Formverfahren mit verlorenen Formen in die Gruppe der Verfestigungsformverfahren einzuordnen und des weiteren ist es eine spezielle Ausführungsart des Feingießverfahrens.

Der Name Feingießen wird im gesamten deutschsprachigen Raum für das industriell angewendete Gießen mit einem verlorenen Modell, für das sogenannte Modellausschmelzverfahren, verwendet. Bei diesem Verfahren werden verlorene Formen mit verlorenen Modellen hergestellt [63].

Als das verbreitetste Genaugießverfahren gehört das Feingießverfahren zu den progressivsten Gußherstellungsverfahren. Es entstehen Gußrohteile, die dem geforderten Finalerzeugnis sehr nahe kommen oder ihm voll entsprechen [64].

Anders als beim Formen mit Dauermodellen, das geteilte Formen erfordert, arbeitet man beim Feingießen mit einteiligen Formen. Kennzeichnend für diese Verfahren sind die Gießformen mit herauslösbaren, ausschmelzbaren oder ausbrennbaren Modellen [61]. Viele Feingußstücke mußten vor Jahren noch als Werkstück aus mehreren bearbeiteten Einzelteilen zusammengesetzt werden. Desgleichen wurden einbaufertige Maschinenelemente usw. aus dem vollen Rohling herausgearbeitet, während sie heute als Gußstück im Feinguß nur mit geringer Bearbeitungszugabe oder ohne Bearbeitungszugabe gefertigt werden [65]. Die Gußstückgewichte liegen dabei im Bereich von 0,5 g bis 30 kg [63].

Die wirtschaftlichen Effekte des Feingießverfahrens sind besonders hoch, wenn Gußstücke eine komplizierte geometrische Gestalt haben, schwer zerspanbare und nicht umformbare Werkstoffe vergossen werden oder Montageteile zu einem einzigen Feinguß kombiniert werden [62].

Verfahrensablauf des Gipsformverfahrens

Das Genaugießverfahren ist ein Verfahren mit ausschmelz- oder ausbrennbaren Modellen. Als Modellwerkstoffe kommen vorwiegend synthetische Wachse, Kunststoffe und Harnstoff zur Anwendung. Da die Modelle nach Fertigstellung der Form ausgeschmolzen werden, muß für jedes zu fertigende Gußteil ein Modell hergestellt werden.

Das Gipsformverfahren unterscheidet sich in der Herstellung der Keramikform vom Feingießverfahren.

Beim Gipsformverfahren wird das Wachsmodell in einem Kasten in Keramikmasse eingegossen, wobei die Oberseite des Eingußtrichters ausgespart wird.

Beim Feingießverfahren wird durch abwechselndes mehrmaliges Tauchen in einem keramischen Schlicker und Berieseln durch Sand eine keramische Schale hergestellt. Eine Schale mit einer Dicke von ca. 6 bis 12 mm gibt der Form die erforderliche Festigkeit. Der Formstoff, der die keramische Schale bildet, setzt sich aus feuerfesten Mineralien und Bindemitteln zusammen.

Das Trocknen der Form an der Luft dauert, je nach Bindemittel des Schlickers, 2 bis 24 Stunden. Das Ausschmelzen kann bei Wachs in einem Autoklaven bei 130°C, mit Hilfe von heißem Dampf und einem Druck von 8 bar oder mit Mikrowellen erfolgen. Polystyrolmodelle werden gleichzeitig mit dem Brennen der Form bei ca. 1000°C verbrannt. Harnstoffmodelle werden in Wasser aufgelöst [63].

Die ausgeschmolzene, ungeteilte Form wird bei einer Temperatur von ca. 800°C zwei Stunden gebrannt und gießbereit gehalten. Nach dem Brennen besitzt die Keramikform die notwendige Festigkeit, um dem statischen Druck des Gießmaterials standzuhalten. Weitere Aufgaben des Brennprozesses sind die Entfernung des noch freien Wassers in der Keramik, die Verbrennung und Vergasung von Wachsrückständen und die Schaffung der Formtemperatur zum Abguß [65].

Zum Schmelzen von Legierungen auf der Basis von Kupfer und Aluminium werden gas-, öl- und elektrobeheizte Tiegelöfen verwendet. Das flüssige Material wird in die heißen Formen gegossen. Die heiße Form verhindert ein schnelles Erstarren und begünstigt das gute Auslaufen dünnster Querschnitte (unter 1 mm). Um bei Querschnitten von 1mm ein Ausfließen zu gewährleisten, werden bei komplizierten Gußstücken die Formen während des Gießens gedreht (ca. 120 1/min) und dabei ein Effekt des Schleudergusses erzielt. Es wird auch unter Vakuum abgegossen.

Nach dem Erkalten der Abgüsse wird die keramische Form durch Schlagen oder Rütteln entfernt. Danach werden Anguß und Speiser vom Gußstück getrennt.

Gußwerkstoffe, die im Feingießverfahren gegossen werden, sind Stahl, Aluminium-, Titanlegierungen, Kupferlegierungen, Grauguß und Sphäroguß, Cobalt- und Nickellegierungen, Edelmetalle. Stahl ist beim Feingießverfahren problemloser zu gießen als beim Sandguß, deshalb ist der größte Anteil an den Feingußwerkstoffen Stahlguß, wobei alle Sorten vom einfachen Einsatzstahl bis zum hochlegierten Stahl verwendet werden.

Die Vorteile des Gipsformverfahrens sind große Gestaltungsfreiheit, Maßgenauigkeit, hohe Oberflächenqualität, Einsparung von Material, freie Werkstoffwahl, wirtschaftliche Herstellung [63].

Wachsmodellherstellung

Die Wachsmodelle werden mit Hilfe von Spritzwerkzeugen auf halb- oder vollautomatischen, pneumatisch oder hydraulisch arbeitenden Wachsspritzmaschinen oder Wachspressen bei einem Druck von 60 bis 80 bar hergestellt. Die Spritzwerkzeuge, auch Kokillen oder Matrizen genannt, werden mechanisch aus Stahl und Aluminium oder aus einer Gußlegierung (Zinn-Bismut-Legierung) durch Gießen auf Urmodelle aus Stahl oder Messing hergestellt [63].

Zwei verschiedene Konzepte für Wachsspritzmaschinen haben sich bewährt [66]:

- ◆ Mittels eines Preßkolbens wird mit Preßdrücken von 5 bis 60 bar das im dickflüssigen Zustand befindliche Wachs (ca. 50 –60°C) in die Form befördert. Dies ist vorteilhaft für dickwandige, stark lunkernde und maßgenaue Teile.
- ◆ Das zweite Konzept arbeitet mit geringeren Drücken (0,2 – 1,5 bar), wobei das Wachs im flüssigen Zustand in die Matrize eingespritzt wird. Mit diesem Verfahren werden kleine, dünnwandige und daher nicht lunkernde Teile gefertigt.

Die Vorgaben der Herstellungsfirma des Wachsspritzgerätes wurden für die Herstellung der Wachsmodelle für die Vorversuche und Versuchsreihen zur Diplomarbeit eingehalten. Deren Konzept liegt zwischen den beiden oben angeführten. Das flüssige Wachs wird mit einer Temperatur von 120°C und einem Druck von 8 bar in die Matrize gespritzt.

Das Wachsmodell wird anschließend mit Anschnitt, Speiser und Eingußtrichter aus Wachs auf einer Traube montiert. Diese Montage erfolgt mit Hilfe von Klebevorrichtungen und

erhitzten Spachteln oder Messern durch Aufschmelzen des Wachses am Gießlauf und am Anguß des Modelles und anschließendem Anpressen [63].

3.4 Gußlegierungen

AlSi Gußlegierungen

Die AlSi- Gußlegierungen lassen sich für diese Anwendung am besten gießen, sind vielseitig anwendbar und eignen sich besonders für komplizierte, dünnwandige Gußstücke. Diese erreichen mittlere Festigkeit und Dehnung, besitzen eine gute chemische Beständigkeit und sind schweißbar [67].

Aluminium bildet mit ca. 12,5% Silizium ein Eutektikum, das bei 577°C schmilzt. Die Löslichkeit von Silizium in festem Aluminium beträgt im Gleichgewicht bei 577°C 1,65%, und fällt auf rund 0,07% bei 300°C (siehe Abbildung 3.3). Ist mehr Silizium in einer Legierung enthalten, als der Löslichkeit entspricht, so enthält das Gefüge neben Aluminium – Mischkristallen auch Silizium – Kristalle. Ist die Abkühlgeschwindigkeit klein, erstarrt das Silizium im eutektischen Gemisch in Form kantiger Kristalle, Nadeln und Platten. Diese Ausbildungsformen werden durch kleine Beimengungen von Natrium, Strontium, Antimon oder Phosphor beeinflusst.

Die Festigkeit der AlSi- Legierungen im Gußzustand steigt durch Si- Zusatz bis hin zur eutektischen Zusammensetzung (siehe Abbildung 3.4) [68].

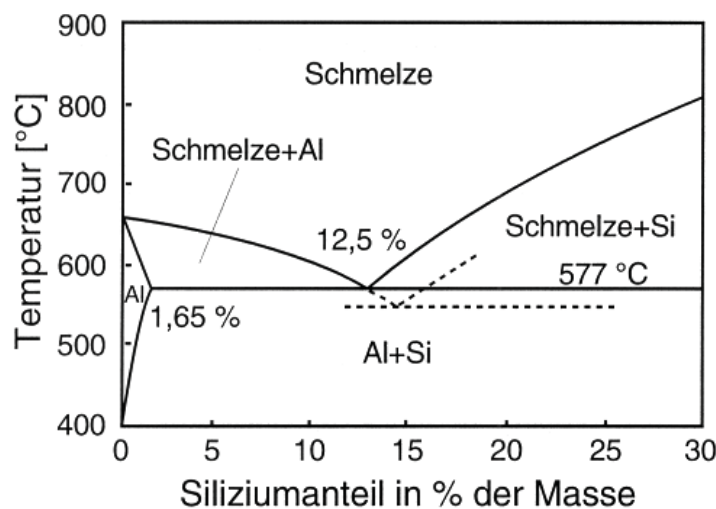


Abbildung 3.3: System AlSi bis 30% Si [67]

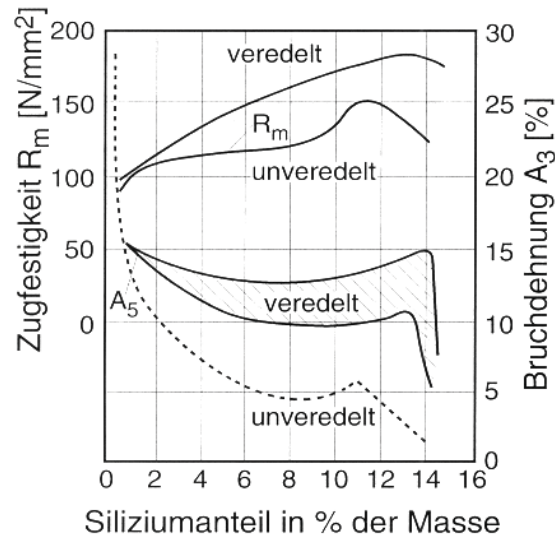


Abbildung 3.4: Einfluß des Si- Gehaltes auf die Festigkeit und Bruchdehnung von G-AlSi-Legierungen, Sandguß, veredelt und unveredelt [67]

Das als Beimengung vorhandene Fe bildet in Gegenwart von Si nadelige Ausscheidungen von β -AlFeSi, die die Zugfestigkeit und Bruchdehnung herabsetzen. Durch Mn-Zusatz entsteht eine Vierstoffphase, die wegen ihrer globulitischen Form weniger störend wirkt. Am günstigsten ist jedoch die Begrenzung des Fe-Gehaltes. Kupfer kommt in AlSi-Legierungen als Beimengung vor und beeinträchtigt bei Gehalten über 0,05% die chemische Beständigkeit. Zusätze um 1% dienen der Erhöhung der Mischkristallhärte und verringern dadurch die Neigung zum Schmieren beim Spanen.

Das System Al-Si ist die Basis weiterer wichtiger Legierungsgruppen: G-AlSiMg, G-AlSiCu und der Aluminium-Kolbenlegierungen. Bei den Kolbenlegierungen kommen übereutektische Si-Zusätze bis 25% zur Anwendung, bei denen Si primär erstarrt. Die primär erstarrten Si-Kristalle erhöhen die Verschleißfestigkeit und vermindern die Wärmeausdehnung der Kolben [67].

Schmelzebehandlung zur Gefügeverbesserung

Kornfeinung:

Je nach Erstarrungstyp und Erstarrungsablauf kann bei einigen Aluminiumlegierungen ein grobes Gefüge auftreten, das geringere Festigkeit hat als feinkörniges Gefüge. Durch keimbildende Zusätze in die Schmelze kann ein feinkörnigeres Gefüge mit günstigeren Eigenschaften erreicht werden. Die in der Regel in Salzform eingesetzten Kornfeiner wirken in Form von Aluminiumborid, Titanborid und Zirkonborid als Fremdkeime [68].

Bei der Erstarrung übereutektischer AlSi- Legierungen kristallisiert das Primärsilizium in einer Form, die im Schliffbild als dünne Platten und Spieße erkennbar ist. Infolge ihrer kerbwirksamen Ausscheidungsform haben diese Kristalle einen ungünstigen Einfluß auf die Festigkeit [68]. Hier erfolgt die Kornfeinung durch Phosphorzusatz. Es handelt sich dabei um die Feinung des primär ausgeschiedenen Siliziums durch Aluminiumphosphidkeime. Die Feinungsmittel sind in Tablettenform erhältlich und haben zugleich entgasende Wirkung [67].

Veredelung:

Als Veredelung wird ein metallurgisches Verfahren bezeichnet, bei dem durch Einbringen geringer Mengen von Natrium oder Strontium in eutektische und untereutektische AlSi- Legierungen ein besonders fein ausgebildetes Eutektikum erzielt wird. Der Natriumgehalt soll bei einigen Hundertstel liegen. Dadurch werden die mechanischen Eigenschaften des Gußstückes verbessert.

Grundsätzlich sind 3 Grundtypen des eutektischen AlSi- Gefüges zu unterscheiden:

- ◆ Lamellares Gefüge: in Gruppen strahlig angeordnete, meist nadelförmige Siliziumkristalle
- ◆ Körniges Gefüge: polyedrische, teilweise regellos verteilte grobe stäbchen- oder plattenförmige Siliziumkristalle
- ◆ Veredeltes Gefüge: sehr feine, gedrungen ausgebildete Siliziumkristalle

Entscheidend für das Auftreten der einzelnen Gefügemodifikationen sind die Abkühlungsgeschwindigkeit und das Vorhandensein bestimmter Elemente in geringer Konzentration. So ist für die Abkühlung des körnigen Gefüges ein geringer Phosphorgehalt maßgebend.

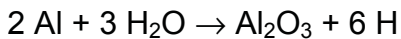
Bei der Veredelung mit Natrium bewirken kleinste Mengen Natrium eine Unterkühlung und eine Verschiebung der eutektischen Konzentration zu höheren Si- Gehalten. Aufgrund der Behinderung der Diffusion der Si- Atome in der Schmelze und des Kristallwachstums bilden sich sehr feine, mehr oder weniger abgerundete Kristalle aus. Das Gefüge entspricht dem einer sehr schnell abgekühlten Schmelze.

Gegenüber der Veredelung mit Natrium hat Strontium eine langanhaltende Veredelungswirkung. Die mit Strontium veredelten Gußwerkstoffe weisen noch nach längerem Abstehen der Schmelze und nach mehrmaligem Umschmelzen ein veredeltes Gefüge auf.

Bei übereutektischen AlSi- Legierungen ist die Veredelung nicht anwendbar [67].

Wasserstoffaufnahme der Schmelze:

Aluminium besitzt in flüssigem Zustand ein hohes Lösungsvermögen für Wasserstoff. Dieser entsteht bei der Umsetzung von flüssigem Aluminium mit Wasserdampf nach der Gleichung



und wird sofort von der Schmelze atomar aufgenommen. Der Wasserdampf kann folgenden Ursprung haben: Feuchtigkeit des Einsatzmaterials, des Ofenfutters, des Tiegelmaterials, der Werkzeuge, der Schmelz- und Flußmittel, Verbrennung gasförmiger und flüssiger Brennstoffe sowie Luftfeuchtigkeit. Die Menge des im Aluminium gelösten Wasserstoffes ist abhängig vom Partialdruck des Wasserstoffes in der Atmosphäre, der Metalltemperatur sowie der Legierungszusammensetzung. So vermindern Cu und Si die Aufnahme von Wasserstoff, Mg erhöht sie. Mit sinkender Metalltemperatur nimmt die Löslichkeit für Wasserstoff ab, beim Übergang vom flüssigen zum festen Zustand sinkt diese sprunghaft (siehe Abbildung 3.5). Hierbei scheidet sich der Wasserstoff in Form von Bläschen aus (Porenbildung).

Anzahl, Größe und Gestalt der Poren hängen von Wasserstoffgehalt, Erstarrungsgeschwindigkeit und Legierungstyp ab. Bei gleichem Wasserstoffgehalt führt eine geringere Erstarrungsgeschwindigkeit zu größeren Poren als eine höhere. Die Gasporen werden in ihrer Gestalt durch die Kristallisation bestimmt und können in runder, länglicher oder gezackter Form auftreten. Eine Unterscheidung von Mikrolunkern ist häufig nicht möglich. Gasporen sind Gefügestörungen und mindern die Festigkeit der Gußstücke. Außerdem können Gasporen, verstärkt im Zusammenhang mit Mikrolunkern, zu Undichtigkeiten des Gusses führen, wenn diese bei der Bearbeitung angeschnitten werden [67].

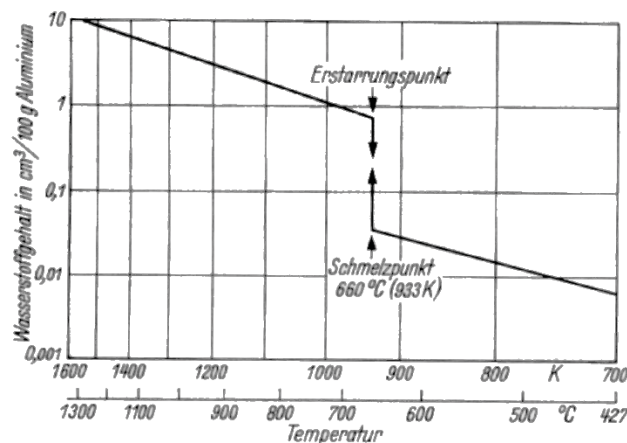


Abbildung 3.5: Löslichkeit von Wasserstoff in flüssigem und festem Reinstaluminium [67]

Gießereigenschaften:

Auswahlkriterien für Gußlegierungen sind deren Festigkeitseigenschaften und die gießtechnischen Eigenschaften, wie das Fließvermögen oder das Erstarrungsverhalten. Einen Überblick der Gießereigenschaften der wichtigsten Aluminiumgußlegierungen liefert die Tabelle 3.1.

Fließvermögen	Warmrißneigung	Legierung	Erstarrungstyp
hoch ↑ niedrig	niedrig ↓ hoch	G-AlSi12 (veredelt) G-AlSi11 G-AlSi12 (Cu) G-AlSi10Mg G-AlSi9Mg G-AlSi10Mg (Cu) G-AlSi9Cu3 G-AlSi7Mg G-AlSi6Cu G-AlSi5Mg G-AlCu4TiMg G-AlMg3Si G-AlMg5Si G-AlMg3 G-AlMg5	exogen-rauwandig endogen-schalenbildend ↑ ↓ schwamm-breiartig

Tabelle 3.1: Gießereigenschaften der Legierungen [70]

Ein niedriges Fließvermögen läßt sich durch eine höhere Gießtemperatur kompensieren, dies ist mit Nachteilen verbunden, wie Oxidation und Wasserstoffaufnahme sowie erhöhtem Formverschleiß. Ein hohes Fließvermögen besitzen die eutektischen AlSi-Gußlegierungen. Umgekehrt wie das Fließvermögen verhält sich die Warmrißempfindlichkeit. Unter Warmriß versteht man eine Trennung der schon kristallisierten Phasen während der Erstarrung, z.B. unter dem Einfluß der Schwindungskräfte oder anderer Spannungen, die über die Gießformen eingeleitet werden. Die dabei entstandenen Spalten und Risse können u.U. durch Nachspeisung von Restschmelze vermieden werden. Ein günstiges Verhalten zeigen auch hier die eutektischen und naheutektischen AlSi- Gußlegierungen.

In der Praxis gibt es Mischformen und Übergangsformen dieser Erstarrungstypen. Das Erstarrungsverhalten ist für die Ausbildung von Lunkern und Schwindungsporositäten oder anderen Defekten im Gußgefüge mitverantwortlich, da es die Verteilung des Volumendefizits im Gußteil bestimmt. Beim Übergang vom flüssigen zum festen Zustand entsteht ein Volumendefizit. Dieses ist bei hochsiliziumhaltigen Gußlegierungen geringer als bei niedrigsiliziumhaltigen, da das Silizium bei der Erstarrung an Volumen zunimmt. In

jedem Falle muß das Volumendefizit durch gießtechnische Maßnahmen kompensiert werden [69].

Die Legierung G- AlSi12 wurde ausgewählt, da diese ein hohes Fließvermögen und eine niedrige Warmrißneigung aufweist, um gute Randbedingungen für die Versuchsreihen zu schaffen.

3.5 Formbauteile aus Keramikfaserwerkstoffen

3.5.1 Einleitung zu Keramikfaserwerkstoffen

Geschichte:

Vor ca. 10.000 Jahren wurde erkannt, daß sich manche Erden gut formen und anschließend durch einen Brand verfestigen lassen. Damit war der erste synthetische Werkstoff „Keramik“ geschaffen. Die Perfektionierung dieser alten Techniken hat zu den heutigen Schamotte-Produkten und in weiterer Folge zur Entwicklung von keramischen Fasern geführt. Seit Beginn dieses Jahrhunderts werden solche Fasern, welche chemisch und mineralogisch den bekannten Schamotte-Produkten entsprechen, hergestellt [71].

Rohstoffe:

Bei den Aluminiumsilikat-Fasern handelt es sich um amorphe Fasern, welche aus einer silikatischen Schmelze mittels Zerblas- oder Zentrifugierverfahren hergestellt werden. Diese Verfahren beschränken den Chemismus auf einen Al_2O_3 -Gehalt unter 56 %. Die maximale Einsatztemperatur beträgt 1430°C . Bei höheren Einsatztemperaturen (bis 1800°C) müssen die sogenannten Aluminiumoxid-Fasern eingesetzt werden. Bei diesen handelt es sich um polykristalline Fasern, welche mittels eines Sol-Gel-Verfahrens hergestellt werden und entsprechend ihrem Chemismus und ihrer thermischen Behandlung aus Tonerden und Mullit bestehen.

In vielen Fällen werden diese Fasern mit keramischen oder (und) organischen Bindern zu Formteilen verarbeitet. Je nach Anwendungsgebiet werden verschiedene Bindersysteme eingesetzt. Am häufigsten wird jedoch kolloidale Kieselsäure verwendet.

Um die Wärmeleitfähigkeit zu minimieren, d.h. die thermische Dämmwirkung zu optimieren, werden Füllstoffe zugesetzt. Bei diesen handelt es sich ebenfalls um Tonerden [71].

Faserarten:

Es werden generell zwei verschiedene Arten von Fasern eingesetzt: Alsitra- und Altra-Fasern.

Die Herstellung der amorphen Alsitra Fasern erfolgt entweder durch einen Blas- oder Zentrifugierprozeß. Dabei wird Al_2O_3 , SiO_2 und wahlweise ZrO_2 unter einem Lichtbogen geschmolzen. Das geschmolzene Material wird durch eine Düse in eine Kammer geblasen. Luft, Dampf oder spezielle Gase werden parallel oder senkrecht auf den flüssigen Faserstrom geblasen. Dabei bilden sich Tropfen, die durch den Gasstrom ausgetragen werden. Diese Tropfen, auch als „Shot“ bezeichnet, ziehen ihrerseits die Faser aus dem Flüssigkeitsstrom. Bei den gesponnenen Fasern wird der Effekt der Tropfenbildung durch Zentrifugalkräfte und das Austragen der Tropfen bzw. Faser durch zusätzliche Beschleunigung erreicht.

Alsitra-Fasern haben einen Shotgehalt bis 50%.

Die hochreinen, polykristallinen Altra-Fasern werden durch einen Spinnprozeß aus wäßriger Lösung bei Raumtemperatur gewonnen. Die Altra-Fasern haben einen Shotgehalt bis 5% und sind in der Herstellung teurer als Alsitra-Fasern [71].

3.5.2 Herstellung

Die oben genannten Fasern können zu einer Reihe unterschiedlichster Produkte verarbeitet werden. Die Palette reicht von Faserwolle, über Schnüre, Matten, Papiere bis hin zu Vakuumformteilen, wie sie auch als Isolierung in Kachelöfen oder Heizkessel eingesetzt werden.

Die bekannteste Formgebung ist sicherlich die Vakuumformerei, wie sie auch bei Rath in Krumnussbaum (Österreich) oder Ungarn, BRD bzw. Südafrika durchgeführt wird.

Fasern, Füllstoffe und Binder werden in einem Tank vorgemischt und anschließend in den Formtank übergeführt. Die Form, welche das Negativ des späteren Produktes darstellt, ist mit einem Sieb bespannt und an eine Vakuummaschine angeschlossen. Beim Durchsaugen der Suspension durch die Form bildet sich ein Filterkuchen, das Rohprodukt. Die Flüssigkeit selbst wird in den Prozeß zurückgeführt (siehe Abbildung 3.7).

Dieses Rohprodukt wird üblicherweise getrocknet und danach mechanisch bearbeitet. Solcherart setzen die Kunden von RATH die Vakuumformteile in ihrem Heizaggregat ein. Oft erfolgt als Nachbehandlung ein Standardbrand bei einer Temperatur von 1000 °C über einen Zeitraum von 4 h. Die Eigenschaften ändern sich dabei in Bezug auf Festigkeit und Schwindung, da ein nicht vorgebrannter Faserformstoff eine höhere Schwindung aufweist als ein gebrannter. Die Kaltdruck- bzw. Kaltbiegefestigkeiten sind bei ungebrannten Faserformstoffen höher als bei gebrannten. Will man ein organikfreies Produkt haben, muß man auf die gebrannte Variante ausweichen, um z.B. ein Ausgasen zu vermeiden.

An dieser Stelle soll ferner angemerkt werden, daß alle „Abfallprodukte“ der Produktion (Abschnitt, Staub, Rückwasser, Kühlwasser,...) wiederum in die Produktion einfließen und kein produktionsspezifischer Abfall deponiert werden muß [71].

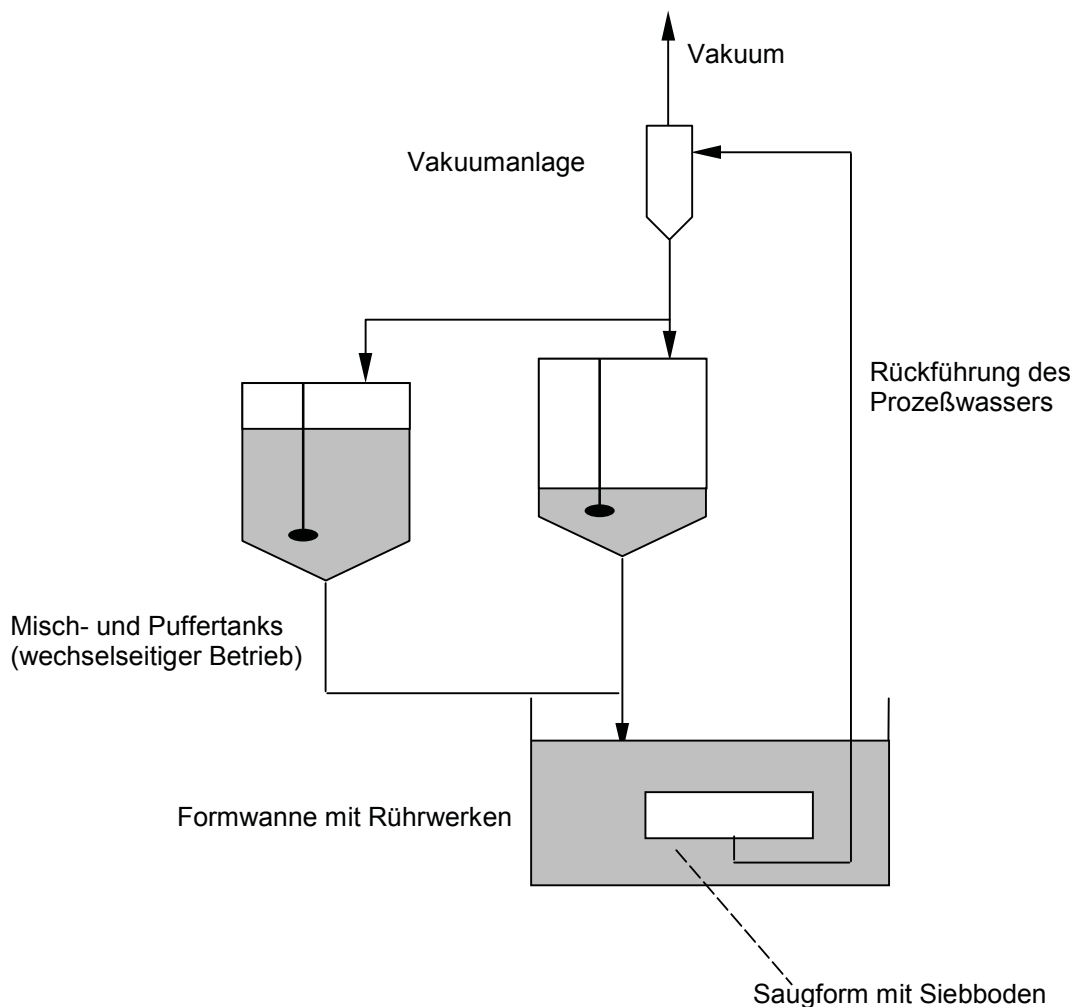


Abbildung 3.7: Schema einer Vakuumformanlage [71]

3.5.3 Anwendung

Die Brauchbarkeit als feuerfester Werkstoff beruht vor allem auf der Anwesenheit des beim Brennen entstehenden Minerals „Mullit“. Dieses zeichnet sich durch hohe Feuerfestigkeit und niedrige thermische Dehnung aus. Je nach Aluminiumoxidgehalt werden diese Materialien bis 1800°C eingesetzt. Im Gegensatz zu Schamottesteinen bilden die Keramikfasern keinen dichten Körper. Vielmehr besteht die Textur dieses Werkstoffes aus unzähligen Faserpartikeln, zwischen denen sich Lufträume bilden. Bedingt durch die fasrige Textur haben diese Werkstoffe eine hervorragende Temperaturwechselbeständigkeit.

So finden sich Keramikfaserprodukte in beinahe jedem Heizkessel und Laborofen. Jedoch auch große Industrieaggregate der Stahlindustrie werden mit keramischen Fasermodulen ausgekleidet [71].

3.5.4 Vakuumformteile

Im folgenden werden unterschiedliche Arten von Vakuumformteilen beschrieben. Die Produktbezeichnungen entsprechen denen der Fa. Rath.

KERFORM KVS wird aus hochwertigen Aluminiumsilikat- und Aluminiumoxidfasern, Füllstoffen und organischen sowie anorganischen Bindemitteln nach dem Vakuumsaugverfahren geformt. Diese Erzeugnisse sind chemisch neutral, unempfindlich gegen die meisten Säuren und Laugen. Dabei ausgenommen sind Flußsäure, Phosphorsäure sowie starke Alkalien.

KERFORM KVS kann mit Rohdichten bis zu 1500 kg/m³ gefertigt werden. Verschiedene Faserlängen, Füllstoffe und Veredelungsverfahren bestimmen die Verwendbarkeit der Formteile. Dieses Produkt kann sowohl als Platte als auch in komplizierter Geometrie hergestellt werden.

KERFORM KVS wird im Ofenbau (Laboröfen bis hin zu Industrieaggregaten), in Dentalöfen, als Hinterisolierung, in der Kesselindustrie, bei Haushaltsgeräten und in Mikrowellenöfen eingesetzt [71].

KERFORM KVS 144

Für den Faserformteil KVS 144 wurde die Faser Alsitra 1400 mit einem Shotgehalt von ca. 50% eingesetzt. Diese Faser besteht aus ca. 50% Al_2O_3 und ca. 50% SiO_2 , die Faserlängen betragen bis zu 10 mm. Die Zahl 144 steht für Klassifikation 1400 °C und bei 1000 °C über eine Zeitdauer von 4 h gebrannt.

KERFORM KVS 186

Für den Faserformteil KVS 186 wurde die Faser Altra 80 mit einem Shotgehalt von ca. 5% eingesetzt. Diese Faser besteht aus ca. 80% Al_2O_3 und ca. 20% SiO_2 , die Faserlängen betragen 0 bis 15 mm. Die Zahl 186 steht für Klassifikation 1800 °C und bei 1000 °C über einen Zeitraum von 4 h gebrannt.

3.5.5 Möglichkeiten zur Veränderung der Eigenschaften

Um den Einsatz des Fasermaterials für spezielle Anwendungen möglich zu machen bzw. zu optimieren, können einige Eigenschaften verändert werden.

Härtung

KERATHIN - HÄRTER besteht aus kolloidaler Kieselsäure.

Bei einer Oberflächenhärtung wird dieser mit einem Pinsel eingestrichen oder mit einer handelsüblichen Farbsprühpistole aufgebracht. Die Stärke der gehärteten Schicht kann mit der aufgetragenen Menge Härter eingestellt werden.

Sollte der Körper durchgehärtet werden, wird dieser in den Härter völlig eingetaucht. Wenn keine Luftblasen mehr aufsteigen, ist eine völlige Durchdringung erfolgt.

Der Körper härtet durch Trocknung an der Luft aus. Dieser Vorgang kann durch eine 24-stündige Temperatureinwirkung im Trockenofen bei 105 °C beschleunigt werden [71].

Coating

KERATHIN – COATING ist ein auf Basis feuerfester Rohstoffe und anorganischer Bindemittel hergestellter keramischer Schutzanstrich, der bereits nach der Austrocknung an der Luft verfestigt.

Dieser Vorgang kann durch eine 24-stündige Temperatureinwirkung im Trockenofen bei 105° C beschleunigt werden.

Eine keramische Abbindung erfolgt ab ca. 1000°C.

Vor jeder Verarbeitung muß gut aufgerührt werden. Es kann mit reinem Wasser bis 5 Gew.-% verdünnt werden.

Die Auftragsmenge variiert je nach Saugfähigkeit der zu schützenden Oberfläche.

Die Schichtdicken variieren von 0,1 bis 1mm. Dabei werden 2 – 4 kg/m² Coating verbraucht.

Die Oberfläche der zu schützenden Teile muß fett- und staubfrei sein. Lose Partikel und Anbackungen müssen entfernt werden. Es wird empfohlen, die Oberfläche vor dem Coating mit Wasser zu benetzen.

Die Haftung des Anstrichs wird verbessert, wenn die Schicht in mehreren Arbeitsgängen aufgebracht wird. Das Aufbringen kann durch Streichen mit Pinsel oder Spachtel, oder durch Tauchen erfolgen. Wird eine Farbsprühpistole (Düsendurchmesser 2 mm, Druck 3 – 6 bar) verwendet, muß KERATHIN – COATING im Verhältnis 1:1 mit Wasser verdünnt werden [71].

Kombinationsmöglichkeiten

Keine Behandlung: Es wird nur das Ausgangsmaterials KERFORM KVS verwendet.

Oberflächenhärtung: Die Oberfläche des Kernes wird gehärtet.

Durchhärtung des ganzen Körpers: Das gesamte Kernmaterial wird gehärtet.

Coating: Keramischer Schutzanstrich auf dem Kern.

Oberflächenhärtung mit Coating: Auf den bereits oberflächengehärteten Kern wird ein keramischer Schutzanstrich aufgebracht.

Durchhärtung mit Coating: Auf den bereits durchgehärteten Kern wird ein keramischer Schutzanstrich aufgebracht.

4 Versuchsdarstellung

Einleitung

In diesen Versuchsreihen wird untersucht, ob Wachsbauteile für die Herstellung von Vakuumfaserkernen mit beliebiger Innenstruktur verwendet werden können. Als Versuchsgeometrie wird eine Sechskantstruktur mit Innenversteifung gewählt. Diese Versuchsgeometrie ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Zielsetzung ist es, die Vorteile von Hohlgußteilen, die eine höhere Torsionsteifigkeit besitzen, mit der Optimierung der Festigkeit von Bauteilen zu kombinieren, und Hohlbauteile mit beliebiger Innenstruktur zu bauen.

Im Gegensatz zu den in Kapitel 2 (Verfahren zur Herstellung metallischer Schäume) beschriebenen Metallschäumen und Metallschwämmen, kann bei dieser Versuchsgeometrie auch von einem konstruierten Schaum gesprochen werden. Der Vorteil von konstruierten Schäumen liegt darin, daß in den einzelnen Raumrichtungen verschiedene Eigenschaften eingestellt werden können.



Abbildung 4.1: Versuchsgeometrie

4.1 Verwendete Materialien

Die einzelnen Einsatzstoffe für die Vakuumformteile, die angewendet werden, stammen ausschließlich von der Fa. Rath. Es sind dies Fasermaterialien, Füllstoffe, Bindemittel und Härter.

Es werden zwei Fasermaterialien verwendet, nämlich die Faser Alsitra und die Faser Altra. Der Einsatzbereich der Faser Alsitra liegt bis zu einer Temperatur von 1400°C , und der Faser Altra bis zu einer Temperatur von 1800°C .

4.2 Versuchsaufbau

Um den Versuchsaufbau am Institut für Gießereikunde realisieren zu können, wurde bei der Fa. Rath die Produktionsanlage zur Herstellung der Faserformteile besichtigt. Daraufhin wurde eine Minivakuumanlage entwickelt und am Institut für Gießereikunde der Montanuniversität aufgebaut. Auf dieser Minivakuumanlage werden die Versuchsreihen zur Herstellung der Probekörper durchgeführt. In der Abbildung 4.2 ist das verfahrenstechnische Fließbild dieser Minivakuumanlage dargestellt.

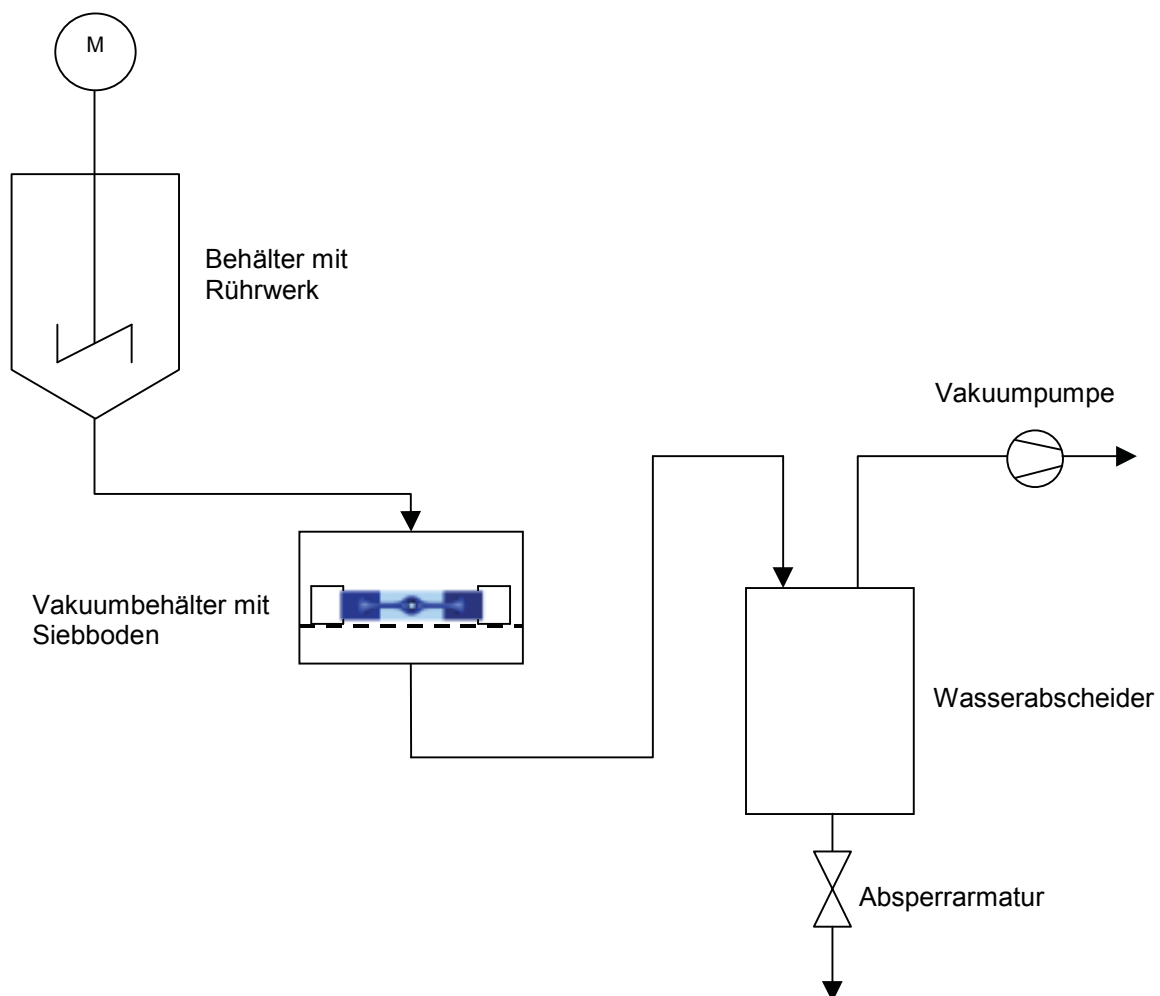


Abbildung 4.2: verfahrenstechnisches Fließbild der Minivakuumanlage

Diese Minivakuumanlage besteht aus einer Rührereinheit, in der die Einsatzstoffe (Wasser, Fasern, Füllstoffe, Binder und Härter) vermischt werden, und einem Behälter mit

Vakuumabsaugung. Dieser Behälter besteht aus zwei Teilen, um die Probekörper leichter entformen zu können.

4.3 Versuchsdurchführung

4.3.1 Herstellung des Urmodells mittels Rapid – Prototyping

Grundsätzlich ermöglichen Rapid – Prototyping Verfahren die schnelle Herstellung von komplexen Modellen, Musterteilen und Prototypen direkt auf Basis von CAD – Datensätzen ohne den Einsatz von Formen und Werkzeugen, wobei auch komplizierte geformte Bauteile, die Hinterschneidungen besitzen, innerhalb weniger Stunden gebaut werden können.

Der Sechskant mit Innenstruktur wurde mit Hilfe des EDV – Programmes Pro/ENGINEER konstruiert. Dies lieferte die notwendigen CAD – Daten, um mit Hilfe der Rapid – Prototyping Anlage, Model Maker II, das Urmodell zu fertigen. Der Modell Maker II arbeitet nach dem Rapid – Prototyping Verfahren, dem sogenannten Fused Deposition Modeling.

Die erzeugten CAD – Daten wurden in den Modell Maker II eingelesen und mit diesen das Urmodell erzeugt. Der Modell Maker II arbeitet nach dem Prinzip eines Tintenstrahlplotters.

Bei diesem Verfahren werden das Bau- und Stützmaterial im flüssigen Zustand auf das Trägermaterial aufgesprüht. Das Trägermaterial ist auf den in z- Richtung verfahrbaren Tisch montiert. Das Bau- und Stützmaterial werden im flüssigen Zustand über zwei Heizdüsen, die auf einem verfahrbaren Schlitten montiert sind, aufgesprüht. Der Aufbau des zu fertigenden Urmodells erfolgt schichtweise, wobei das Bau- und Stützmaterial Schicht für Schicht aufgetragen wird (siehe Abbildung 4.3).

Das Baumaterial ist ein thermoplastisches Material mit grüner Farbe und ergibt das Urmodell. Das Stützmaterial mit roter Farbe, ist ein Wachs, das verwendet wird, um Überhänge bauen zu können. Da die beiden Materialien keine Verbindung eingehen, wird das Stützmaterial nach der Fertigstellung des Urmodells mit dem Lösungsmittel Bioact rückstandslos entfernt.

Das fertige Urmodell (Sechskant mit Innenstruktur) ist in Abbildung 4.4 zu sehen.

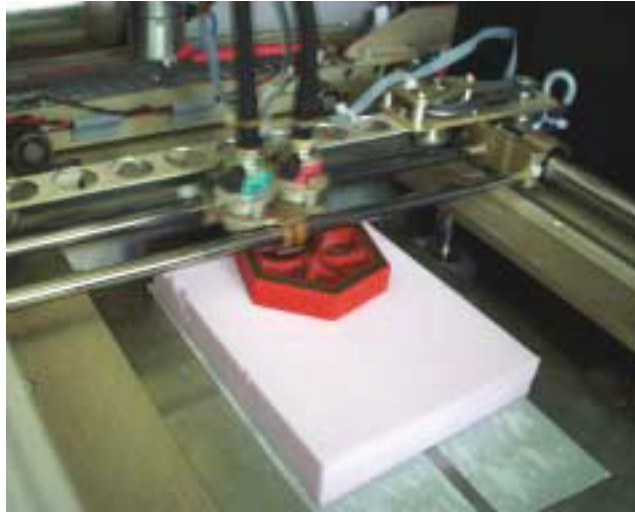


Abbildung 4.3: Urmodell bei der Herstellung im Model Maker II



Abbildung 4.4: Fertiges Urmodell

4.3.2 Wachsmodellherstellung

4.3.2.1 Herstellen der Dauerform (Matrize)

Zur Herstellung der Dauerform wird das Urmodell auf einer Seite mit einem zylindrischen Stab aus Modellwachs versehen. Dieser Stab dient einerseits zur Positionierung des Urmodells in der Kunststoffschale (\varnothing 9,5 cm, H = 4 cm) und andererseits zur Ausbildung des Einspritzkanals. Zum Umgießen des Urmodells, welches in der Kunststoffschale positioniert ist, wird Silikon Betacon 5 der Fa. Horbach GmbH verwendet. Um eine feste Dauerform zu erhalten, wird das Silikon Betacon 5 mit dem dafür vorgesehenen Härter im Verhältnis 1:10 in einem Gefäß vermischt. Die fertige Mischung wird in die

Kunststoffschale gegossen, bis das Urmodell vollständig eingeschlossen ist. Nach einer Aushärtezeit von 24 Stunden wird die Dauerform mit dem darin eingeschlossenen Urmodell aus der Kunststoffschale entnommen.

Zum Ausschmelzen des in der Silikonform eingebetteten Urmodells, wird die Dauerform mit dem Einspritzkanal nach unten in eine Haltevorrichtung des Wärmebehandlungsofens über eine Auffangschale gestellt. Das Ausschmelzen erfolgt bei einer Temperatur von 150°C über einen Zeitraum von 2 Stunden.

Die Dauerform wird anschließend unter Zuhilfenahme eines Skalpell in der Mitte auseinandergeschnitten, wobei die Teilungsebene wellenförmig ausgebildet ist, um die beiden Formhälften wieder exakt zusammenzufügen. In der Abbildung 4.5 sind die beiden Formhälften der Dauerform abgebildet.



Abbildung 4.5: Formhälften der Dauerform

4.3.2.2 Herstellen des Wachsmodells für die Versuchsreihen

Zur Herstellung des Wachsmodells wird das Gefie Abspritzgerät I verwendet. In diesem Abspritzgerät wird das Gießwachs (blaues Gießwachs LJ832B der Fa. Gefie) in einer dafür vorgesehenen Kammer mit Aufheizvorrichtung verflüssigt.

Zur leichteren Entnahme des Wachsmodells nach dem Abspritzvorgang werden die beiden Formhälften mit einem Trennmittel besprüht.

Die Dauerform wird zwischen zwei Metallplatten mit dem Einspritzkanal nach oben positioniert und in den Schraubstock eingespannt, wobei die Spannkraft nicht zu groß

gewählt werden darf, um die Dauerform nicht zu verformen. Um das Abspritzgerät genau zu positionieren, wird eine Metalldeckplatte mit einer Aufnahmebohrung für die Düse des Abspritzgerätes über den Einspritzkanal verankert.

Zum Abspritzen wird das Abspritzgerät (siehe Abbildung 4.6), welches das flüssige Wachs ($T = 120^{\circ}\text{C}$) mit Hilfe von Druckluft in die Dauerform preßt, mit der Düse an der Aufnahmebohrung angesetzt und mit der Hand niedergedrückt. Dadurch wird das Ventil in der Düse des Abspritzgerätes geöffnet und das flüssige Wachs strömt in die Dauerform. Während des Abspritzvorganges wird das Abspritzgerät dabei über Druckluft mit einem Druck von rund 8 bar beaufschlagt. Sobald die Dauerform vollständig gefüllt ist, ist der Abspritzvorgang beendet.

Bevor das Wachsmodell aus der Dauerform entnommen werden kann, muß noch die Erstarrungszeit des Wachses von rund 10 Minuten eingehalten werden.

In der Abbildung 4.7 ist das Wachsmodell in der Dauerform zu sehen und in der Abbildung 4.8 ist das aus der Dauerform entnommene Wachsmodell dargestellt.



Abbildung 4.6: Abspritzgerät Gefie I



Abbildung 4.7: Wachsmodell nach dem Abspritzvorgang

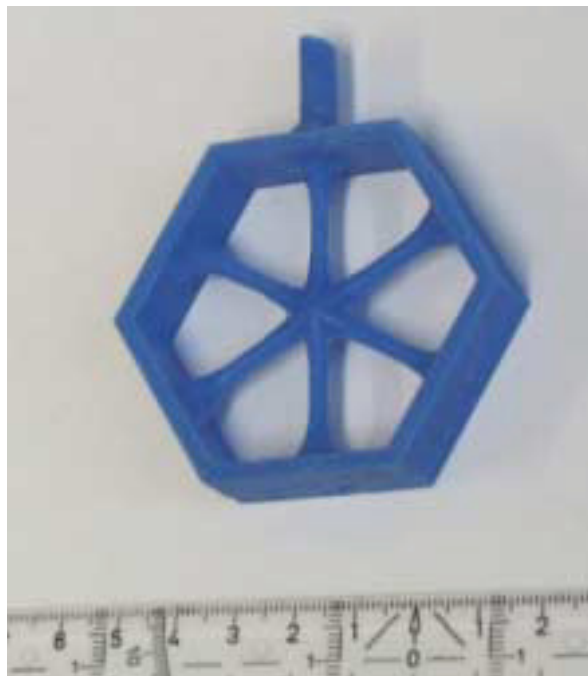


Abbildung 4.8: fertiges Wachsmodell

4.3.3 Vakuumformteilherstellung

Zur Herstellung der Vakuumformteile wird die am Institut für Gießereikunde installierte Minivakuumanlage verwendet. Diese Minivakuumanlage besteht aus einer Rührereinheit, in der die Einsatzstoffe (Wasser, Fasern, Füllstoffe, Bindemittel und Härter) vermischt werden, und einem Behälter mit Vakuumabsaugung. Dieser Behälter ist zweiteilig ausgeführt, um die Vakuumformteile leichter entformen zu können. Die Rührereinheit und der Behälter mit Vakuumabsaugung sind in den Abbildungen 4.9 und 4.10 dargestellt.



Abbildung 4.9: Rühreinheit



Abbildung 4.10: Behälter mit Vakuumsaugung

Die einzelnen Einsatzstoffe werden nach einer Rezeptur der Fa. Rath genau abgewogen. Diese Einsatzstoffe werden in der Reihenfolge Faser, Füllstoffe, Bindemittel und Härter in bestimmten zeitlichen Abständen dem Rührbehälter, in dem sich eine vorgeschriebene Wassermenge befindet, zugesetzt. Zum Suspendieren wird ein Schrägblattrührer eingesetzt, und das Rührwerk wird mit 1100 U/min betrieben.

Bevor die Suspension in den Vakuumbehälter überführt wird, wird das Wachsmodell mit Positionierhilfen über den Siebboden des Vakuumbehälters positioniert (siehe Abbildung 4.11). In der ersten Versuchsreihe wird der gesamte Inhalt des Rührbehälters in den Vakuumbehälter gefüllt. In der zweiten Versuchsreihe wird die Suspension mit einer Pumpe in den Vakuumbehälter gefördert.

Der Aufbau des Vakuumformteiles funktioniert nach dem Prinzip der Kuchenfiltration. Beim Absaugen der Suspension lagern sich die gebildeten Faserflocken am Siebboden ab und bilden einen Filterkuchen. Dabei wird das Wachsmodell von der Faser vollständig eingeschlossen. Nach dem vollständigen Absaugen des Ansatzwassers bleibt der Vakuumformteil mit dem darin eingebetteten Wachsmodell im Vakuumbehälter zurück. Zum Entformen des Vakuumformteiles wird der Vakuumbehälter gestürzt, wobei der Siebboden am Vakuumformteil verbleibt (siehe Abbildung 4.12). Der Siebboden wird vorsichtig vom Vakuumformteil entfernt. Anschließend wird der Vakuumformteil im Trockenschrank getrocknet. In der Abbildung 4.13 sind Vakuumformteile vor dem Trocknungsprozeß zu sehen.

Die Versuche werden mit der Alsitra- und der Altra- Faser durchgeführt.

In der Tabelle 1 sind die Versuche zur Herstellung der Vakuumformteile dargestellt.

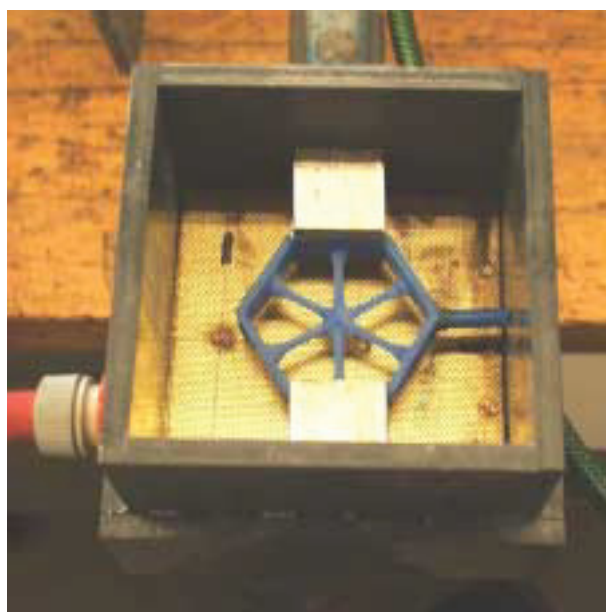


Abbildung 4.11: Wachsmodell im Vakuumbehälter

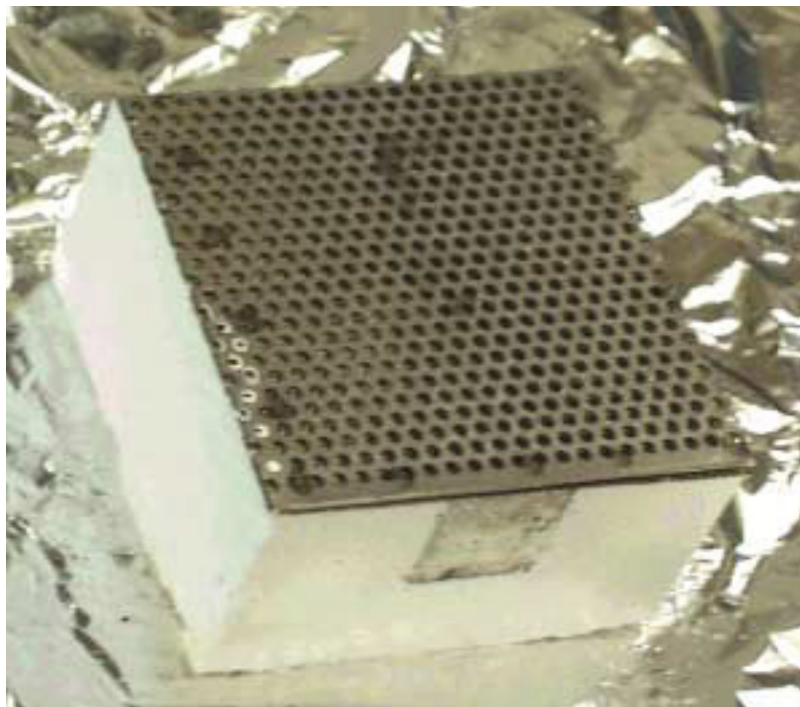


Abbildung 4.12: Vakuumformteil mit Siebboden



Abbildung 4.13: Vakuumformteile vor dem Trocknen

Faser Alsitra				Faser Altra				
	Nr.	Trocknung		Beschreibung	Nr.	Trocknung		Beschreibung
		Temp.	Dauer			Temp.	Dauer	
Vorversuche	VB1	60°C	48 h	Wachsmoell in der Dauerform zur Herstellung der Wachsmoelle positioniert (Form aus der Diplomarbeit Verfahrensentwicklung für das Umgießen von Keramik – Vakuumformteilen)	VA7	70°C	48 h	Wachsmoell mit den Positionierhilfen im Vakuumbehälter positioniert, Vakuumformteil nach dem Trocknen in der Mitte auseinandergeschnitten
	VB2			Einsatz der Positionierhilfen, Suspension in einem in den Vakuumbehälter geleert	VAP8	70°C	48 h	Positionierhilfen vor dem Trocknen entfernt, Suspension mittels Pumpe in Vakuumbehälter gefördert
	VBD3			2 fache Fasermenge wie bei VB2, VB1, ansonsten wie VB2				
	VBD4			Zuerst einen Teil der Suspension in Vakuumbehälter geleert, Wachsmoell mit Positionierhilfen positioniert, Rest der Suspension in den Vakuumbehälter geleert				
	VBD0W5	100°C	36 h	Vakuumformteil ohne Wachsmoell, kontrolliert durch die Fa. Rath				
	VBD0W6	100°C	36 h	Vakuumformteil ohne Wachsmoell, kontrolliert durch die Fa. Rath				
Versuchsreihen	B7	60°C	48 h	Gleiche Fasermenge wie bei VBD3, Wachsmoell mit Positionierhilfen im Vakuumbehälter positioniert	A1	60°C	48 h	Gleiche Fasermenge wie bei VA7, Wachsmoell mit Positionierhilfen im Vakuumbehälter positioniert, Suspension in einem in den Vakuumbehälter geleert
	B8	60°C	48 h	1,5 fache Fasermenge von B7, Suspension in einem in den Vakuumbehälter geleert	AP2	60°C	48 h	Suspension mittels Pumpe in Vakuumbehälter gefördert, ansonsten gleich wie A1
	BP9	60°C	48 h	Gleiche Fasermenge wie bei B8, Suspension mittels Pumpe in Vakuumbehälter gefördert	AV3	60°C	48 h	2 fache Wassermenge von A1, ansonsten gleich wie A1
	BV10	60°C	48 h	2 fache Wassermenge von B8, ansonsten gleich wie B8	APV4	60°C	48 h	2 fache Wassermenge von A1, ansonsten gleich wie AP2
	BPV11	60°C	48 h	2 fache Wassermenge von B8, ansonsten gleich wie BP9	A2V5	60°C	48 h	3 fache Wassermenge von A1, ansonsten gleich wie A1
	B2V12	60°C	48 h	3 fache Wassermenge von B8, ansonsten gleich wie B8	AP2V6	60°C	48 h	3 fache Wassermenge von A1, ansonsten gleich wie AP2
	BP2V13	60°C	48 h	3 fache Wassermenge von B8, ansonsten gleich wie BP9				
B8, BP9, BV10, BPV11, B2V12, BP2V13, A1, AP2, AV3, APV4, A2V5, AP2V6 mit AISi 12 abgegossen								

Tabelle 1: Versuche zur Herstellung der Vakuumformteile

Um das Wachsmodell auszuschmelzen, werden die Vakuumformteile mit dem Gußkanal nach unten über einen Auffangbehälter im Wärmebehandlungsofen gestellt. Das Ausschmelzen erfolgte bei einer Temperatur von 150°C über einen Zeitraum von 8 Stunden.

Bevor abgegossen werden kann, werden auf der Seite der Vakuumformteile, wo die Positionierhilfen zu sehen sind, Faserplatten mit einem Kerathin Kleber aufgeklebt, und sämtliche Spalten mit diesem Kleber abgedichtet, um ein Auslaufen der Schmelze zu verhindern. Nach der Aushärtezeit von 24 Stunden des Klebers wird in die Vakuumformteile ein Eingußtrichter geschnitten.

Der Abguß erfolgt mit der Aluminiumlegierung (AlSi 12) bei einer Temperatur von 700°C (siehe Abbildung 4.14). Nach dem Erstarren werden die Gußteile aus den Vakuumformteilen ausgepackt und gereinigt (siehe Abbildung 4.15).



Abbildung 4.14: Abguß der Vakuumformteile



Abbildung 4.15: Auspacken der Gußteile



Abbildung 4.16: Gußteil gereinigt

In der Abbildung 4.16 ist ein fertig ausgepacktes und gereinigtes Gußteil abgebildet.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die bei der Durchführung der Vorversuche und Versuchsreihen aufgetretenen Probleme und deren Lösungsansätze behandelt.

Einen Überblick über die durchgeführten Vorversuche und Versuchsreihen liefert die Tabelle 1: Versuche zur Herstellung der Vakuumformteile im Kapitel 4 Versuchsdarstellung.

5.1 Vorversuche

Die Vorversuche dienten zur Abklärung grundsätzlicher Fragen: wieviel Fasermenge muß verwendet werden zur vollständigen Einbettung des Wachsmodells, wie wird das Wachsmodell im Vakuumbehälter positioniert, treten Verformungen des Wachsmodells beim Trocknungsprozeß auf.

5.1.1 Positionierung des Wachsmodells im Vakuumbehälter

Für den ersten Vorversuch wurde zur Positionierung des Wachsmodells im Vakuumbehälter die Dauerform zur Herstellung des Wachsmodells, die in der Diplomarbeit „Verfahrensentwicklung für das Umgießen von Keramik – Vakuumformteilen“ verwendet wurde, eingesetzt (siehe Abbildung 5.1). Diese Dauerform ist zweiteilig aufgebaut.



Abbildung 5.1: Dauerform zur Herstellung des Wachsmodells

Das Wachsmodell wurde in der einen Formhälfte mit Isolierband fixiert. Anschließend wurden die beiden Formhälften zusammengesteckt. Die Dauerform mit dem Wachsmodell wurde im Zentrum des Vakuumbehälters über den Siebboden positioniert. Der gesamte Inhalt des Rührbehälters wurde in einem in die im Vakuumbehälter positionierte Dauerform gefüllt. Durch den relativ engen Öffnungsquerschnitt gelang es nicht, den

gesamten Inhalt in die Dauerform zu füllen. Ein Teil der Suspension lief daneben, dies führte zu einer unvollständigen Formfüllung. Beim Entformen fiel der untere Teil des Vakuumformteiles VB1 herunter, d.h. das Wachsmo­dell wurde nicht vollständig mit der Faser (Alsitra) eingebettet (siehe Abbildung 5.2).

Um das Befüllen des Vakuumbehälters und das Entformen des Vakuumformteiles zu erleichtern, wurden für die weiteren Vorversuche und Versuchsreihen Positionierhilfen (Würfel: 3x3x3 cm mit einer Nut: 1,5x0,3 cm) eingesetzt. In der Abbildung 5.3 ist ein mit den Positionierhilfen im Vakuumbehälter positioniertes Wachsmo­dell dargestellt.



Abbildung 5.2: Vakuumformteil VB1

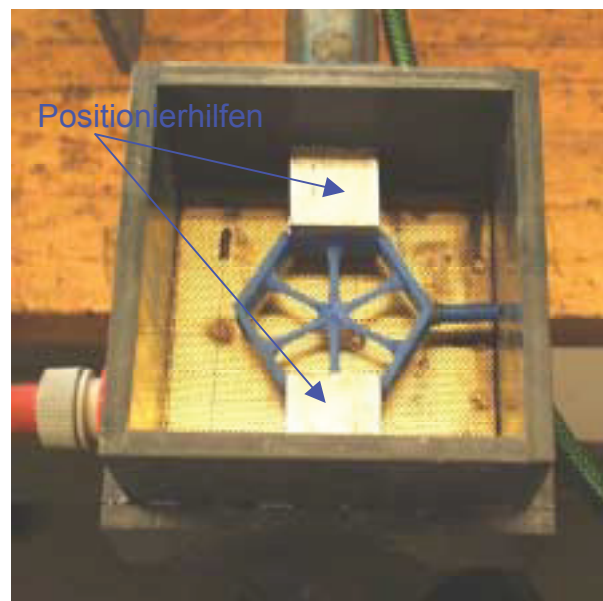


Abbildung 5.3: Wachsmo­dell im Vakuumbehälter

5.1.2 Fasermenge für die Vakuumformteile

Für den Vakuumformteil VB2 wurde die gleiche Menge an Faser (Alsitra) wie für den Vakuumformteil VB1 verwendet. Das Wachsmo­dell wurde nicht vollständig eingebettet. Da dieser mit den Positionierhilfen im Vakuumbehälter positioniert wurde, stellte sich die gewählte Fasermenge als zu gering heraus, denn mit derselben Fasermenge mußte ein größerer Raum ausgefüllt werden (siehe Abbildung 5.4). Für die weiteren Vorversuche für die Vakuumformteile VBD3, VBD4 wurde daher die 2 fache Fasermenge (Alsitra) verwendet.



Abbildung 5.4: Vakuumformteil VB2

5.1.3 Einbetten des Wachsmodells im Vakuumbehälter

Nach dem Entformen und Entfernen des Siebbodens waren an der geschlossenen Oberfläche des Vakuumformteiles VBD3 eine Wölbung und die Konturen des Wachsmodells zu sehen. Nach dem Öffnen der geschlossenen Oberfläche war zu erkennen, daß sich an der Unterseite der Versteifungen Hohlräume gebildet haben, d.h. es wurde zu wenig Fasermaterial unter den Versteifungen des Sechskantes abgelagert. Um genügend Fasermaterial unter den Versteifungen des Sechskantes abzulagern, wurde beim Vakuumformteil VBD4 zuerst ein Teil der Suspension in den Vakuumbehälter geleert, und das Ansatzwasser abgesaugt. Danach wurde das Wachsmodell mit den Positionierhilfen auf die bereits gebildete Faserschicht niedergedrückt, und der Rest der Suspension in den Vakuumbehälter gefüllt, und das Ansatzwasser abgesaugt. Dies führte aber zum selben Ergebnis wie bei dem Vakuumformteil VBD3.

Daher wurde entschieden zusätzlich die höherwertige Faser Altra einzusetzen. Mit dieser Faser (Altra) wurde der Vakuumformteil VA7 nach der gleichen Vorgehensweise wie beim Vakuumformteil VBD3 hergestellt. Nach dem Entformen des Vakuumformteiles VA7 war an der geschlossenen Oberfläche keine Wölbung zu sehen, und die Konturen des Vakuumformteiles waren nicht zu erkennen. Der Vakuumformteil VA7 wurde im Trockenschrank bei einer Temperatur von 70°C 48 Stunden lang getrocknet. Nach dem Trocknungsprozeß wurde der Vakuumformteil VA7 in der Mitte auseinander geschnitten. Es sind an der Unterseite des Wachsmodells Hohlräume (mit Pfeilen gekennzeichnet) zu sehen (siehe Abbildung 5.5).

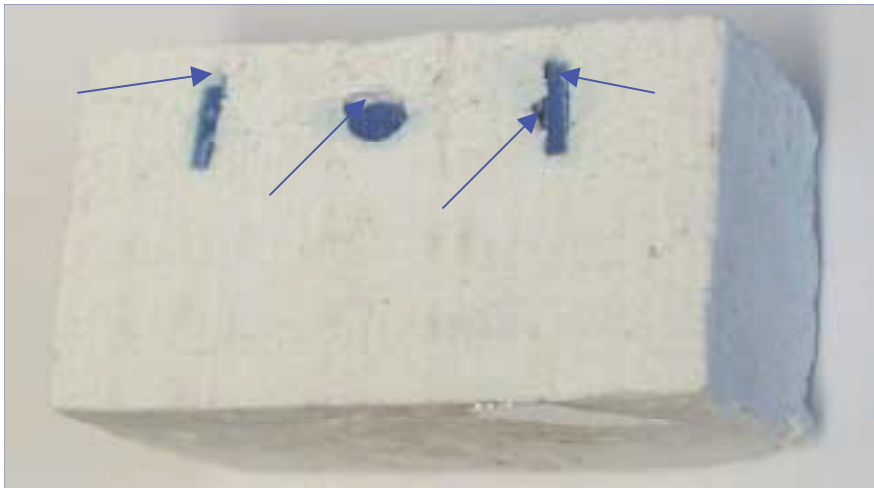


Abbildung 5.5: Vakuumformteil VA7

Ein Grund dafür ist, daß sich die Faserflocken nach dem Abschalten des Rührwerkes im Rührbehälter absetzen, und daher beim Einfüllen der Suspension in den Vakuumbehälter zuerst fast nur Ansatzwasser mit wenig Faserflocken in den Vakuumbehälter gelangen, und danach fast ausschließlich Faserflocken in den Vakuumbehälter geleert werden. Die Faserflocken bilden im Rührbehälter Agglomerate, und diese bilden bereits beim Einfüllen der Suspension in den Vakuumbehälter auf den Versteifungen des Sechskantes einen Filterkuchen, und dadurch wird das Wachsmo­dell nicht vollständig eingebettet.

Um dies zu vermeiden, wurde für den Vakuumformteil VAP8 (Faser Altra) die Suspension mittels einer Pumpe in den Vakuumbehälter gefördert. Durch das Weiterlaufen des Rührwerkes während des Pumpvorganges blieben die Faserflocken im Ansatzwasser gleichmäßig verteilt. Ein weiterer Vorteil ist der, daß die Suspension gleichmäßig in den Vakuumbehälter gefördert wird, und durch die Handführung des Schlauches die Suspension gezielt über dem Wachsmo­dell verteilt wird, dadurch wurde auch mehr Fasermaterial zwischen die Versteifungen des Sechskantes eingebracht. Der Effekt, daß die Versteifungen des Sechskantes wie ein grober Siebboden wirkten, und die Faserflocken auf den Versteifungen einen Filterkuchen bildeten, konnte deutlich verringert werden.

5.1.4 Trocknungsprozeß

Die Vakuumformteile VB1, VA7 (getrocknet mit Positionierhilfen), VAP8 (getrocknet ohne Positionierhilfen) wurden im Trockenschrank bei einer Temperatur von 70°C über einen Zeitraum von 48 Stunden getrocknet. Das für die Wachsmo­delle verwendete Wachs (blaues Gießwachs LJ832B der Fa. Gefie) hat einen Erstarrungspunkt von 84°C.

Dabei zeigte sich, daß sich die Wachsmo­delle durch die Erwärmung verformten (siehe Abbildungen 5.6, 5.7). Beim Vakuumformteil VAP8 führten die auftretenden Wärmespannungen zum Bruch des Wachsmo­dells (siehe Abbildungen 5.8,5.9).

Zur Verformung der Wachsmodele trägt auch die Binderwanderung beim Trocknungsprozeß zur Oberfläche (Siebbodenseite) in den Vakuumformteilen bei. Im nassen Zustand besitzen die Vakuumformteile die Grünfestigkeit, und erlangen während des Trocknungsprozesses ihre Festigkeit. Daher ist es möglich, daß sich durch die Verformung der Wachsmodele die Faser von den Wänden des Wachsmodells lösen, und durch die Verformung des Wachsmodells die Hohlräume vergrößern.

Daher wurde die Trocknungstemperatur für die Versuchsreihen auf 60°C eingestellt. Eine Absenkung der Trocknungstemperatur unter 60°C ist nicht sinnvoll, da dadurch der Trocknungsprozeß zu lange dauern würde.

Ein möglicher Verzug der Wachsmodele in den Vakuumformteilen kann an den fertigen Gußteilen der Versuchsreihen abgelesen werden, darum wurden keine Vakuumformteile aus den Versuchsreihen auseinandergeschnitten.



Abbildung 5.6: Vakuumformteil VB1



Abbildung 5.7: Vakuumformteil VA7



Abbildung 5.8: Vakuumformteil VAP8



Abbildung 5.9: Vakuumformteil VAP8

Aus den Vorversuchen wurden die beiden Versuchsreihen abgeleitet. Für die beiden Versuchsreihen wurden die Fasern Alsitra und Altra verwendet, wobei bei der ersten Versuchsreihe der gesamte Inhalt des Rührbehälters in den Vakuumbehälter geleert wurde, und in der zweiten Versuchsreihe wurde die Suspension mit einer Pumpe in den Vakuumbehälter gefördert. Für jede Versuchsreihe wurde die von der Rezeptur vorgeschriebene Wassermenge, die 2 fache Wassermenge und die 3 fache Wassermenge verwendet. Die Erhöhung der Wassermenge diente zur feineren Verteilung der Einsatzstoffe im Ansatzwasser, sowie der feineren Verteilung der sich bildenden Faserflocken, und die Wachsmodule sollten dadurch besser eingebettet werden.

5.2 Versuchsreihen

Der Vakuumformteil B7 wurde mit der gleichen Menge an Faser (Alsitra) wie der Vakuumformteil VBD3 hergestellt. Da das Wachsmodule im Vakuumformteil VBD3 nicht vollständig eingebettet wurde, lieferte der Vakuumformteil B7 das gleiche Ergebnis. Der Vakuumformteil wurde zur Untersuchung des Ausschmelzverhaltens des Gießwachses (blaues Gießwachs LJ832B der Fa. Gefie) verwendet. Das Ausschmelzen erfolgte bei einer Temperatur von 150°C im Wärmebehandlungsofen. Eine Infiltration des Vakuumformteiles mit Wachs war nicht zu erkennen.

Für die Versuchsreihen mit der Faser Alsitra wurde die Fasermenge auf das 1,5 fache erhöht, um die Einbettung des Wachsmodells mit Fasermaterial sicherzustellen.

5.2.1 Versuchsreihe 1 (Inhalt des Rührbehälters in einem Vorgang in den Vakuumbehälter geleert)

Bei der Versuchsreihe wurde der gesamte Inhalt des Rührbehälters in einem Vorgang in den Vakuumbehälter geleert. Für diese Versuchsreihe wurde die von der Rezeptur vorgeschriebene Wassermenge, die 2 fache Wassermenge und die 3 fache Wassermenge verwendet. Die Versuche mit der Faser Alsitra (Aluminiumsilikatfaser) und der Faser Altra (Aluminiumoxidfaser) wurden mit allen Verdünnungsreihen durchgeführt. In der Abbildung 5.10 ist das verfahrenstechnische Fließbild der Versuchsreihe 1 dargestellt.

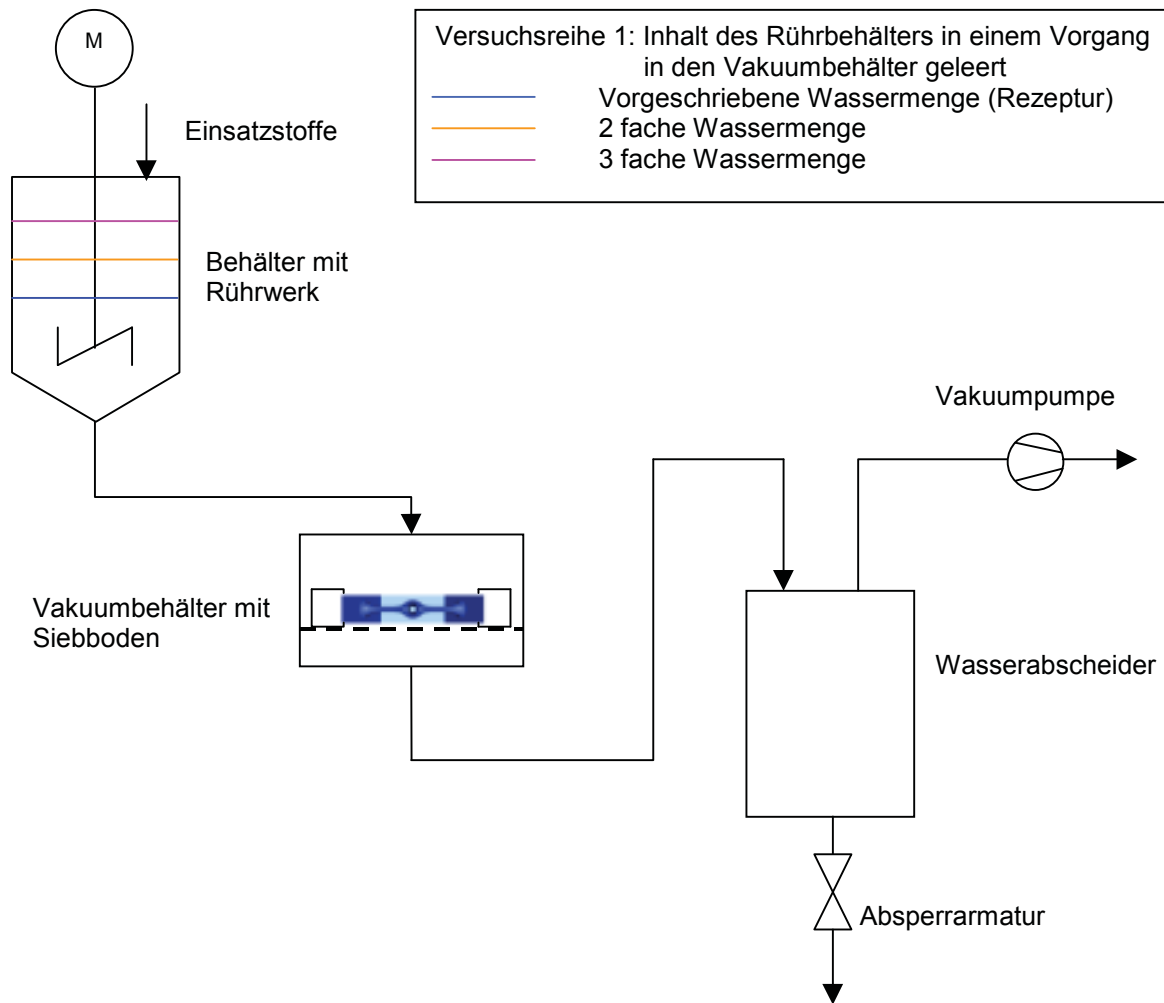


Abbildung 5.10: verfahrenstechnisches Fließbild der Versuchsreihe 1

In den Abbildungen 5.11 bis 5.22 sind die ausgepackten und gereinigten Gußteile aus dieser Versuchsreihe zu sehen. Dabei kennzeichnet der Buchstabe A die Faser Altra, B die Faser Alsitra.

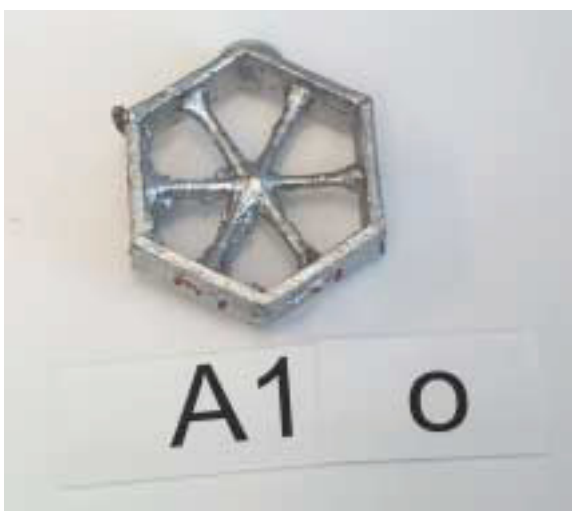


Abbildung 5.11: Gußteil A1



Abbildung 5.12: Gußteil A1



Abbildung 5.13: Gußteil B8



Abbildung 5.14: Gußteil B8



Abbildung 5.15: Gußteil AV3



Abbildung 5.16: Gußteil AV3



Abbildung 5.17: Gußteil BV10



Abbildung 5.18: Gußteil BV10



Abbildung 5.19: Gußteil A2V5



Abbildung 5.20: Gußteil A2V5



Abbildung 5.21: Gußteil B2V12



Abbildung 5.22: Gußteil B2V12

Aus den Abbildungen der Gußteile dieser Versuchsreihe ist zu erkennen, daß die Faser Altra ein besseres Ergebnis lieferte, als die Faser Alsitra. Um den gesamten Inhalt des Rührbehälters in einem Vorgang in den Vakuumbehälter leeren zu können, wurde das Rührwerk abgeschaltet. Nach dem Abschalten des Rührwerkes setzten sich die Faserflocken im Rührbehälter ab und bildeten Agglomerate. Beim Hineinleeren der Suspension in den Vakuumbehälter setzten sich diese Agglomerate verstärkt auf den Versteifungen des Sechskantes ab und bildeten dort einen Filterkuchen. Dadurch wurde das Wachsmodell nicht vollständig mit Fasermaterial eingebettet. Um das auszuschließen, wurde eine zweite Versuchsreihe durchgeführt, bei der die Suspension mittels Pumpe in den Vakuumbehälter gefördert wurde.

5.2.2 Versuchsreihe 2 (Inhalt des Rührbehälters mit Pumpe in den Vakuumbehälter gefördert)

Bei der Versuchsreihe 2 wurde die Suspension mit einer Pumpe in den Vakuumbehälter gefördert. Für diese Versuchsreihe wurde die von der Rezeptur vorgeschriebene Wassermenge, die 2 fache Wassermenge und die 3 fache Wassermenge verwendet. Die Versuche mit der Faser Alsitra (Aluminiumsilikatfaser) und der Faser Altra (Aluminiumoxidfaser) wurden mit allen Verdünnungsreihen durchgeführt. In der Abbildung 5.23 ist das verfahrenstechnische Fließbild der Versuchsreihe 2 dargestellt.

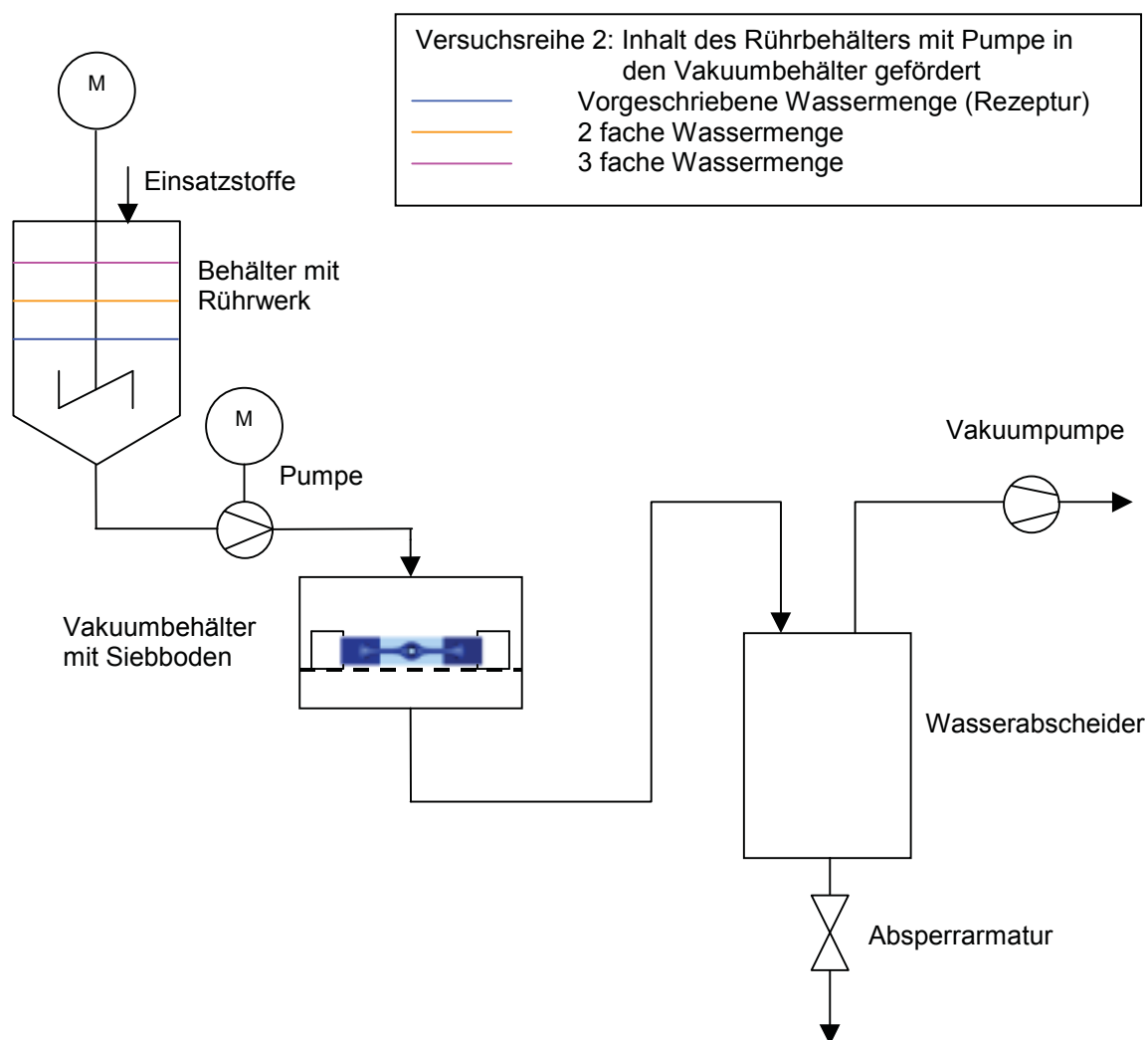


Abbildung 5.23: verfahrenstechnisches Fließbild der Versuchsreihe 2

In den Abbildungen 5.24 bis 5.35 sind die ausgepackten und gereinigten Gußteile aus dieser Versuchsreihe zu sehen. Dabei kennzeichnet der Buchstabe A die Faser Altra, B die Faser Alsitra.



Abbildung 5.24: Gußteil AP2



Abbildung 5.25: Gußteil AP2



Abbildung 5.26: Gußteil BP9



Abbildung 5.27: Gußteil BP9



Abbildung 5.28: Gußteil APV4



Abbildung 5.29: Gußteil APV4





Abbildung 5.34: Gußteil BP2V13



Abbildung 5.35: Gußteil BP2V13

Die Faser Altra lieferte wieder ein besseres Ergebnis als die Faser Alsitra. Da bei dieser Versuchsreihe das Rührwerk weiter lief, blieben die Faserflocken im Ansatzwasser gleichmäßig verteilt, d. h. die Faserflocken setzten sich im Rührbehälter nicht ab. Ein weiterer Vorteil ist der, daß die Suspension gleichmäßig in den Vakuumbehälter gefördert wurde, und durch die Handführung des Schlauches die Suspension gezielt über dem Wachsmo- dell verteilt wurde. Dadurch wurde auch mehr Fasermaterial zwischen die Versteifungen des Sechskantes eingebracht. Der Effekt, daß die Versteifungen des Sechskantes wie ein grober Siebboden wirkten, und die Faserflocken auf den Versteifungen einen Filterkuchen bildeten, konnte deutlich verringert werden. Im Gegensatz zur Versuchsreihe 1 konnte bei dieser Versuchsreihe 2 die Abbildungsgenauigkeit erhöht werden.

5.2.3 Auswertung der Versuchsreihen 1 und 2

Aus den Abbildungen der Gußteile beider Versuchsreihen ist zu erkennen, daß die Faser Altra ein deutlich besseres Ergebnis lieferte, als die Faser Alsitra. Beim Anrühren der Suspension und während der Einbettung der Wachsmo- delle ist es notwendig, eine möglichst feine Struktur zu schaffen, d.h. die sich bildenden „kleinen“ Faserflocken sollten während des Rührens der Suspension und der Einbettung beständig sein. Da der Shotgehalt der Alsitrafasern (Aluminiumsilikatfasern) bei ca. 50% liegt und durch die Zugabe der Füllstoffe, ist es nicht möglich, eine stabile Form der sich bildenden Faserflocken über einen längeren Zeitraum beim Rühren aufrecht zu halten. Zusätzlich werden die Fasern während des Rührens durch das Rührwerk stetig zerkleinert. Es erhöht sich der Anteil von Feinstpartikeln in der Suspension und dadurch ist keine definierte Verteilung zwischen Fasern, Füllstoffen und Bindemittel mehr vorhanden. Dies führte zur

schlechteren Einbettung der Wachsmodele und in weiterer Folge zu den schlechteren Gußteilen.

Um dies zu vermeiden, wurde die höherwertige Faser Altra (Aluminiumoxidfaser) verwendet. Die Faser Altra besitzt zwei wesentliche Vorteile gegenüber der Faser Alsitra, diese sind einerseits der durch ein anderes Herstellungsverfahren bedingte geringere Shotgehalt (5%) und die höhere mechanische Stabilität. Der geringere Shotgehalt erlaubt es, ein genau definiertes Verhältnis zwischen Fasern, Füllstoffen und Bindemittel einzuhalten, und daher können die „kleinen“ Faserflocken über einen längeren Zeitraum stabil gehalten werden. Durch die höhere mechanische Stabilität der Faser Altra ist auch gewährleistet, daß sie nicht durch die Rührbewegung zerkleinert werden. Daher fiel das Ergebnis wesentlich besser aus.

Als zweites Ergebnis kann aus den Versuchsreihen abgeleitet werden, daß durch die Förderung der Suspension mittels Pumpe in den Vakuumbehälter deutlich mehr Faserflocken zwischen die Versteifungen des Wachsmodells eingebracht werden. Daher wird das Wachsmodell besser eingebettet. Weiters wird dadurch vermieden, daß die einzelnen Faserflocken Agglomerate beim Absetzen im Rührbehälter bilden, wie es in der Versuchsreihe 1 „Inhalt des Rührbehälters in einem Vorgang in den Vakuumbehälter geleert“ zu erkennen ist, da das Rührwerk bei dieser Versuchsreihe abgeschaltet wird.

Aus der Erhöhung der Menge des Ansatzwassers (2 fache, 3 fache Wassermenge), um die Faserflocken in der Suspension feiner zu verteilen, konnte keine Verbesserung der Einbettung der Wachsmodele und somit keine verbesserte Qualität der Gußteile abgeleitet werden.

Ein weiteres Ergebnis, das abgeleitet werden kann, ist das, daß sämtliche Gußteile eine Durchbiegung in die gleiche Richtung aufweisen, d.h. das Wachsmodell hat sich trotz Erniedrigung der Trocknungstemperatur auf 60°C durch die Wärmeausdehnung des Materials und den dadurch auftretenden Wärmespannungen verformt. Eine weitere Absenkung der Trocknungstemperatur ist nicht sinnvoll, da dadurch der Trocknungsprozeß zu lange dauern würde. Es müßten daher weitere Versuche mit anderen Wachsorten oder anderen Werkstoffen, die ausschmelzbar sind, für die Herstellung der Modelle, die sich bei den Trocknungstemperaturen nicht verformen, durchgeführt werden.

Ein möglicher industrieller Einsatz zur Herstellung von Vakuumfaserkernen mit beliebiger Innenstruktur, und zur Herstellung von Hohlgußteilen mit beliebiger Innenstruktur ist aus den Versuchsreihen, die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführt wurden, noch nicht ableitbar. Zur Abklärung der aufgetauchten Fragen, sollten weitere Versuchsreihen

durchgeführt werden, die im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht mehr behandelt werden können.

5.2.4 Einbetten des Wachsmodells im Vakuumbehälter

Bei sämtlichen Vakuumbehältern der Versuchsreihe bildeten sich Spalten an den Positionierhilfen zwischen 1 und 2mm. Diese könnten beim Entformen entstanden sein, denn zum Entformen mußte der Vakuumbehälter gestürzt werden. In den Abbildungen 5.36, 5.37 sind die Vakuumbehälter A1, AP2, AV3 und APV4 zu sehen. Bei den Vakuumbehältern A1, AV3 ist zu erkennen, daß die Spalten auf einer Seite aufgeweitet sind (in den Abbildungen 5.36, 5.37 mit Pfeilen gekennzeichnet). Dies läßt den Rückschluß zu, daß sich Hohlräume in den Vakuumbehältern gebildet haben, d.h. die Wachsmodelle sind nicht vollständig eingebettet worden.



Abbildung 5.36: Vakuumbehälter A1 (links), AP2 (rechts)

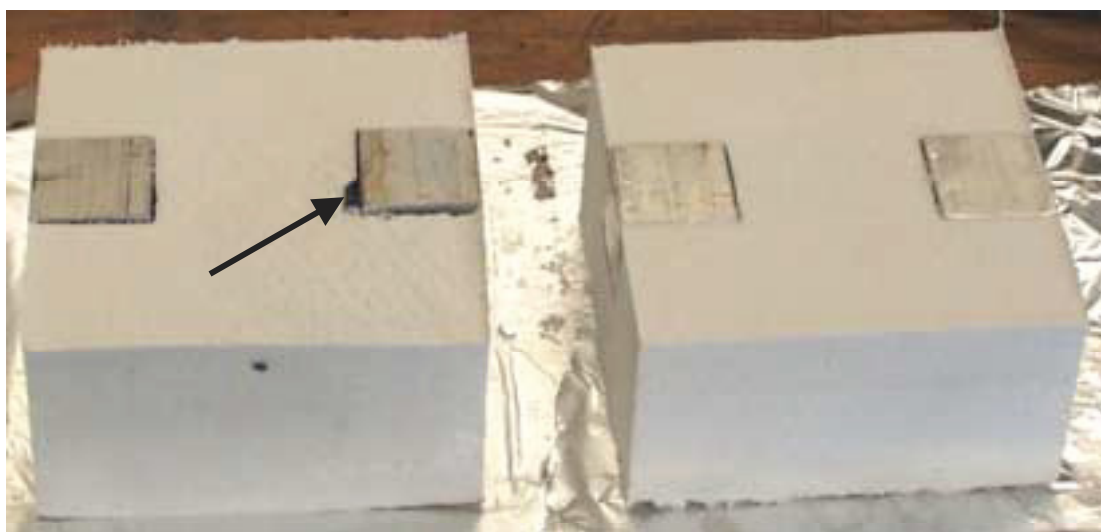


Abbildung 5.37: Vakuumbehälter AV3 (links), APV4 (rechts)

5.2.5 Abguß

Beim Abgießen der Vakuumformteile kam es zu einer Gasentwicklung. Die Vakuumformteile wurden vollständig mit Metall ausgefüllt.

Durch die Hitzeeinwirkung der AlSi 12 Schmelze (Abgußtemperatur 700°C) kam es zur Verbrennung des Bindemittels in den Vakuumformteilen, dies führte zur Gasentwicklung. Aufgrund der Porosität der Vakuumformteile können die Gase entweichen, und es sind daher keine Maßnahmen zur Abführung der entstehenden Gase zu treffen. In der Abbildung 5.38 ist ein geöffnetes Vakuumformteil mit den Brandspuren (schwarze Färbung der Faser) zu sehen.



Abbildung 5.38: geöffnetes Vakuumformteil

Beim Auspacken der Gußteile zeigte sich, daß die Schmelze über die Spalten zwischen den Positionierhilfen und dem Vakuumformteil in den Zwischenraum der aufgeklebten Faserplatte und dem Vakuumformteil geflossen ist (siehe Abbildungen 5.39, 5.40).



Abbildung 5.39: Vakuumformteil A1 mit abgenommener Faserplatte



Abbildung 5.40: Vakuumformteil A2V5 mit abgenommener Faserplatte

Um dies zu verhindern, müßten vor dem Abgießen sämtliche Spalten an den Positionierhilfen mit Kerathin Kleber abgedichtet werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das Wachsmo­dell im Vakuumbehälter ohne Positionierhilfen zu fixieren, und so das Auftreten der Spalten zu verhindern.

5.3 Vergleich der Abbildungsgenauigkeit

Anhand der Abbildungen 5.41 und 5.42 wird ein Vergleich der Abbildungsgenauigkeit zwischen dem Wachsmo­dell und dem Gußteil AP2V6 dargestellt, wobei nur ein Ausschnitt der Versteifungen des Wachsmo­dells und des Gußteiles AP2V6 mit der Ansicht von oben betrachtet wird.



Abbildung 5.41: Ausschnitt des Wachsmo­dells



Abbildung 5.42: Ausschnitt des Gußteiles AP2V6

Aus den beiden Bildern ist zu erkennen, daß sich die Versteifungen an der Oberseite des Gußteiles gut abgebildet haben, d. h. optisch ist kein Unterschied zwischen der Oberflächenrau­higkeit des Wachsmo­dells und des Gußteiles zu erkennen. Das Problem liegt auf der Unterseite, da die Fasern beim Einbetten des Wachsmo­dells an der Unterseite der Versteifungen Hohlräume gebildet haben. Dadurch wird keine genaue Abbildung des Modells erreicht. Aus diesem Teilergebnis kann abgeleitet werden, daß durch Lösen des Problems, der Entstehung von Hohlräumen an der Unterseite bei der Einbettung mit den Fasern, Gußteile mit hoher Abbildungsgenauigkeit mit diesem Verfahren hergestellt werden können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Diplomarbeit wird die Verfahrensentwicklung zur Herstellung von Innenversteifungen für Keramik – Metall Verbundgußteilen dargestellt.

Die Literatur- und Patentrecherche stellt einen Überblick über die Verfahren zur Herstellung der Metallschäume und möglicher Anwendungen dieser dar. Die Vorteile der Metallschäume wie z.B. hohe Steifigkeit, geringes spezifisches Gewicht und hohes Energieabsorptionsvermögen, die in der Literatur- und Patentrecherche aufgezeigt wurden, flossen in die Überlegungen für die Herstellung der Verbundgußkerne mit beliebiger Innenstruktur ein. Der Unterschied zu den Metallschäumen besteht darin, daß die Verbundgußkerne eine gezielt konstruierte Metallschaum- bzw. Metallschwammstruktur besitzen. Der Vorteil der konstruierten Struktur ist, daß deren Eigenschaften in alle Raumrichtungen variiert werden können.

Um die Versuchsreihen durchführen zu können, wurde am Institut eine Vakuumabsaugungsanlage aufgebaut. Für die Versuchsreihen wurde eine einfache Versuchsgeometrie herangezogen und als Wachsmo­dell hergestellt. Die Wachsmo­delle wurden in den Versuchsreihen in der Vakuumabsaugungsanlage mit Keramikfasern eingebettet und zu Vakuumformteilen geformt. Nach dem Trocknen und Ausschmelzen des Wachsmo­dells wurden die Vakuumformteile mit der Aluminiumlegierung (AlSi 12) abgegossen. Aus den abgegossen Versuchsteilen war zu erkennen, daß diese nicht genau abgebildet wurden.

Ein möglicher industrieller Einsatz zur Herstellung von Verbundgußkernen mit beliebiger Innenstruktur, und zur Herstellung von Hohlgußteilen ist aus den Versuchsreihen, die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführt wurden, noch nicht ableitbar. Es werden daher im folgenden einige erfolgversprechende Lösungsansätze dargestellt, die in nachfolgenden Arbeiten zu untersuchen sind.

Ein Lösungsansatz besteht darin, Fasertypen mit genau definierten Längen einzusetzen, um die Größe der sich bildenden Faserflocken zu beeinflussen, und in weiterer Folge die Einbettung des Wachsmo­dells zu optimieren.

Ein weiterer Lösungsansatz besteht darin, das Wachsmo­dell in zwei Modellhälften zu teilen. Die Modellhälften mit der Schnittfläche nach unten auf den Siebboden zu positionieren, und danach mit Fasermaterial einzubetten. Die so hergestellten Vakuumformteile werden vor dem Abgießen zusammengefügt, beispielsweise mit Kerathin Kleber. Dadurch müssen die Innenversteifungen des Modells nicht mehr mit Fasermaterial hinterfüllt werden, und damit kann die Qualität der Gußteile gesteigert werden.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, das Wachsmo­dell zuerst im Vakuumbehälter starr in einer Vorrichtung, die im Vakuumbehälter integriert und fixierbar ist, zu positionieren. Anschließend wird das Wachsmo­dell mit dem Fasermaterial eingebettet. Nach Be­endigung des Einbettvorganges wird die Arretierung gelöst, und es wird mit einem Stempel von oben nachgedrückt, um den Vakuumformteil zu verdichten, wobei das Wachsmo­dell mit der Vorrichtung nach unten mitbewegt wird. Dadurch wird die Einbettung des Wachsmo­dells verbessert, und es sollen weniger Hohlräume bzw. keine Fehlstellen unter den Versteifungen des Sechskantmodells auftreten.

Abschließend soll ein weiterer Lösungsansatz dargestellt werden. Die einzelnen Einsatzstoffe (Fasern, Füllstoffe, Bindemittel) werden in einem Rührbehälter trocken vermischt. Das Wachsmo­dell wird in einer mehrteiligen Form plaziert. In diese Form sind mehrere Düsen eingebaut. Das Gemisch wird über die eingebauten Düsen in die Form eingeblasen. Dadurch wird das Wachsmo­dell in der Form eingebettet. Nach dem Beenden des Einblasvorganges wird das flüssige Vernetzungsmittel (Wasser und Härter) in die Form gefüllt. Das in Fasermaterial eingebettete Wachsmo­dell wird nach dem Ende des Trocknungsvorganges aus der Form entnommen. Abschließend wird das Wachsmo­dell ausgeschmolzen.

Insgesamt gesehen steckt in dieser Verfahrensentwicklung ein großes Potential und daher sollten zur Abklärung der aufgetauchten Fragen weitere Versuchsreihen durchgeführt werden.

Anwendungsperspektiven für Bauteile mit Verbundgußkernen, die gezielt konstruierte Innenstrukturen aufweisen, liegen im Bereich des Maschinen- und Automobilbaus. Dabei ist vor allem das Verhältnis von Steifigkeit zu Masse interessant. Anwendungsideen umfassen Meßtische, tragende Maschinenteile, Bauteile, die aufgrund von Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen geringe Massen und eine hohe Bauteilsteifigkeit aufweisen sollen, Fahrwerksteile. Im Automobilbau sind Anwendungen denkbar, wo durch die Gewichtsreduzierung und den daraus resultierenden Synergieeffekten der Treibstoffverbrauch gesenkt werden kann.

Aus jetziger Sicht sind noch nicht alle möglichen Einsatzgebiete dieser Bauteile abschätzbar.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Davies, G.J.; Zhen, S.: Review-Metallic Foams: Their Production, Properties and Applications; Journal of Materials Science 18, (1983), S. 1899 – 1911
- [2] Symposiumsbeitrag: Baumeister, J.: Überblick: Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen.
Symposium: Metallschäume 6. – 7.3.1997 in Bremen, Bremen MIT, 1997, S. 3-13
- [3] Weber, M.: Herstellung von Metallschäumen und Beschreibung der Werkstoffeigenschaften, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1995
- [4] Symposiumsbeitrag: Neumann, P.; Arnhold, V.: Innovative poröse Bauteile und Möglichkeiten ihrer Charakterisierung.
Symposium: Innovative und wirtschaftliche Bauteile durch Pulvermetallurgie 25.-26. November 1993 in Hagen, VDI Verlag, Düsseldorf 1993
- [5] Anderson, O.; Schneider, L.; Stephanie, G.: Neue hochporöse metallische Werkstoffe, Ingenieur Werkstoffe 7 (1998), Nr. 4 November, S. 36-38
- [6] Smarsly, W.; Track, W.: Gesintertes Leichtbaumaterial mit Herstellungsverfahren, DE 3902032, 1989
- [7] Roßmann, A.: Bauteil hoher Festigkeit mit komplizierter geometrischer Form und Verfahren zu dessen Herstellung, DE 2737248, 1979
- [8] Mark, C. L.; Schilling, C.H.; Wang, T. G.: Method and Apparatus for Producing Microshells, US 5055240, 1991
- [9] Ahsby, M. F.: Metal Foams: A Design Guide, Verlag Butterworth – Heinemann, Boston 2000
- [10] Smigilski, H.: Verfahren zum Herstellen von metallischen oder keramischen Hohlkugeln, DE 3724156, 1989
- [11] Drolet, J. P.: Low Density Foams Produced from Aluminium Powders. The International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology Vol. 13 (1977), No. 3, S. 221 – 225

-
- [12] Kulkarni, S. B.; Ramakrishan, P.: Foamed Aluminium. The International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology Vol. 9 (1973), No. 1, S. 41 – 45
- [13] Arrance, F. C.: Battery Electrode and Battery, and Process for Preparing said Electrode, US 3287166, 1966
- [14] Tracey, V. A.: Porous Materials: Current and Future Trends. The International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology Vol. 12 (1976), S. 25 – 35
- [15] Bruns, L.; Schnuchl, G.: Verfahren zur Herstellung von porösen Silber, DE 1286757, 1969
- [16] Allen, B. C.; Sabroff, A. M.: Method of Making Foamed Metal, US 3087807, 1959
- [17] Baumeister, J.; Schrader, H.: Verfahren zur Herstellung aufschäumbarer Metallkörper und Verwendung derselben, DE 4101630, 1991
- [18] Melzer, A.; Baumeister, J.; Banhart, J.; Weber, M.; Irretier, O.; Jöbstl, J.: Aluminiumschäumen im kontinuierlichen Betrieb. Metall 53 (1999), Nr. 9, S. 501 – 503
- [19] Gus, H.; Brungs, D.; Nyhof, K.; Baumgärtner, F.; Mäurer, H. J.: Pulvermetallurgische Fertigung von Bauteilen aus Aluminiumschaum. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 31 (2000), S. 403 – 406
- [20] Baumgärtner, F.; Gers, H.; Seeliger, H. W.: Baumeister, J.: Bauteile aus Aluminiumschäumen. Ingenieur Werkstoffe 7 (1998), Nr. 4, S. 36 – 38
- [21] Baumeister, J.; Banhart, J.; Weber, M.: Metallischer Verbundwerkstoff und Verfahren zu seiner Herstellung, DE 4426627, 1994
- [22] Wörz, H.; Degischer, H. P.: Verfahren zur Herstellung von Metallschaumkörper, DE 4206303, 1992
- [23] Wörz, H.; Degischer, H. P.; Simancik, F.: Verfahren zur Herstellung von Poren aufweisenden Formkörper bzw. Werkstücken auf Basis von (Leicht-) Metallen, deren Herstellung und deren Verwendung, DE 19744300, 1997
- [24] Zhao, Y. Y.; Sun, D.X.: A Novel Sintering – Dissolution Process for Manufacturing Al Foams, Scripta Materialia 44 (2001), S. 105 –110

- [25] Tatshushi, A.; Tatsuo, N.; Masakatsu, H.; Takeo, T.: Verfahren zum Erzeugen eines dreidimensional – netzwerkartigen, porösen, metallischen Gefüges mit zusammenhängenden Innenhohlraum, DE 2843316, 1978
- [26] Olaf, A.: Verfahren zur Herstellung offenporiger metallischer Strukturen, DE 3917033, 1989
- [27] Grundei, H.: Implantat als Ersatz für spongiöse Knochen und Verfahren zu seiner Herstellung, DE 3106917, 1981
- [28] Tagungsbeitrag: Hintz, C.; Wagner, I.; Sahm, P.R.: Investment Cast, Near – Net – Shape Components based on Cellular Metal Materials.
Tagung: International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures, 14 th – 16 th June 1999 in Bremen, Ed. Banhart, J., MIT Verlag Bremen 1999
- [29] Tagungsbeitrag: Yamada, Y.; Shinojima, K.; Sakguchi, Y.; Mabuchi, M.; Nakamura, H.; Asahina, T.; Mukai, T.: Processing of Cellular Magnesium materials.
Tagung: International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures, 14 th – 16 th June 1999 in Bremen, Ed. Banhart, J., MIT Verlag Bremen 1999
- [30] Kuhek, H.A.: Method of Making Porous Metallic Article, US 3236706, 1966
- [31] Marchi, C. S.; Desposis, J. F.; Martensen, A.: Fabrication and Compressive Response of Open – Cell Aluminium Foams with Sub – Milimeter Pores, in Metal Matrix Composites and Metallic Foams, Euromat 99 Vol. 5, Eds. Clyne, T. W.; Simancik, F., Verlag Willey – VCH Weinheim 1999, S. 34 – 39
- [32] Banhart, J.: Eigenschaften und Anwendungsgebiete offenporiger metallischer Werkstoffe. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 31 (2000), S. 501 – 504
- [33] Grote, F.; Busse, P.: Gießtechnische Herstellung offenporiger Metallschäume mittels mineralischer Platzhalter. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 31 (2000), S. 415 – 418
- [34] Wagner, M.: Verfahren zur Herstellung metallischer Schwämme, DE 19725210, 1997
- [35] Thiele, W.: Füllstoffhaltiger Aluminiumschwamm – ein kompressibler Gußwerkstoff zur Absorption von Stoßenergie. Metall 28 (1974), Nr. 1, S. 39 – 42

- [36] Thiele, W.: Verfahren zur Herstellung von füllstoffhaltigen Schwammmetall, DE 1933321, 1971
- [37] Kreigh, J. R.; Keith, G.: Metal – Aggregate Product, US 3055763, 1962
- [38] Hartmann, M.: Syntaktische Schäume auf Magnesiumbasis. Aluminium 75 (1999), Nr. 3, S. 154 – 156
- [39] Symposiumsbeitrag: Hartmann, M.; Singer, R. F.: Herstellung und Eigenschaften syntaktischer Magnesiumschäume.
Symposium: Metallschäume 6. – 7.3.1997 in Bremen, Bremen MIT 1997, S. 39 – 57
- [40] Tagungsbeitrag: Nadler, J. H.; Hurysz, K. M.; Cochran, J. L. Clark; Lee, K. J.; Sanders, T. H.: Fabrication and Microstructure of Metal – Metal Syntactic Foams.
Tagung: Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures, 14 th – 16 th June 1999 in Bremen, Ed. Banhart, J., Bremen MIT Verlag 1999
- [41] Tagungsbeitrag: Miyoshi, T.; Itoh, M.; Akiyama, S.; Kitahara, A.: Aluminium Foam, „Alporas“: The Production Process, Properties and Application.
Tagung: Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures, 14 th – 16 th June 1999 in Bremen, Ed. Banhart, J., MIT Verlag, Bremen 1999
- [42] Symposiumsbeitrag: Baumeister, J.: Überblick: Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen.
Symposium: Metallschäume 6. – 7.3.1997 in Bremen, Bremen MIT 1997, S. 3 – 13
- [43] Akiyama, S.; Hidetoshi, U.; Imagowa, K.; Negala, S.; Itoh, M.: Foamed Metal and Method of Producing Same, Us 4713277, 1987
- [44] Celliot, J. C.: Method of Producing Metal Foam, US 2751289, 1956
- [45] Sidney, E.: Foaming of Metal by the Catalysed and Controlled Decompositon of Zirconiumhydride and Titanium Hydride, US 3981720, 1976
- [46] Ruch, W.: A Process of Manufacturing Particle Reinforced Metal Foam and Product thereof, WO 91/01387, 1989
- [47] Jin, I.; Kenny, L. D.; Sang, H.: Method of Producing Lightweight Faomed Metal, US 4973358, 1990

-
- [48] Jin, I.; Kenny, L. D.; Sang, H.: Stabilized Metal Foam Body, US 5112697, 1992
- [49] Thomas, M.; Kenny, L.D.: Process for Shape Casting of Particle stabilized Metal Foam, US 5281251, 1994
- [50] Kammer, L.: Aluminiumschäume – Konstruktionswerkstoffe mit großem Potential. Aluminium 73 (1997), Nr. 5, S. 336 – 339
- [51] Linke, M.; Jungk, W.; Fischer, E.; Maurus, G.: Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Metallschaumes, DE 4139020, 1991
- [52] Shapovalov, V. I.: Method for Manufacturing Porous Articles, US 5181549, 1993
- [53] Patten, J. W.: Closed Cell Metal Foam Method, US 4094961, 1978
- [54] Pinkhasov, E.: Method of Making Open – Pore Structures, US 5011638, 1991
- [55] Harada, K.; Ishii, M.; Yamanaka, S.: Porous Metal Body, Process for Producing the Same and Battery Plate Foamed Therefrom, US 5597665, 1997
- [56] Sei News: Developed A Porous Stainless Metall,
<http://www.sei.co.jp/sn/0001/p1.html>
- [57] Babjak, J.; Ettl, V. A.; Paserin, V.: Method of Forming Nickel Foam, US 4957543, 1990
- [58] Symposiumsbeitrag: Degischer, H. P.; Galovsky, U.; Gradinger, R.; Kratz, R.; Simancik, F.: Über mechanische Eigenschaften von Aluminiumschäumen. Symposium: Metallschäume 6. – 7.3.1997 in Bremen, Bremen MIT 1997, S. 79 – 102
- [59] Sigut, F.: Handbuch über die Gestaltung von Eisengußwerkstoffe, FV Gießereiindustrie, Trauner Linz, Wien 1977
- [60] VDG: Gießereitechnik – was ist das?, Giesserei – Verlag GmbH, Düsseldorf 1984, S. 8 – 11
- [61] Weitgasser: Abfälle und Altstoffe aus Gußeisen, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben 1999

- [62] Ambos, E.: Urformtechnik metallischer Werkstoffe, 3. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1990, S. 66 – 121
- [63] Roller, R.: Grund und Fachkenntnisse gießereitechnischer Berufe, 2. Auflage, Verlag Handwerk und Technik, 1990, S. 71 –75
- [64] Pasternak, M.: Fachkunde Gießereitechnik, VEB Deutscher Verlag für die Grundstoffindustrie, Leipzig 1984, S. 157 –161
- [65] Hufnagel, W.: Aluminium - Taschenbuch, 14. Auflage, Aluminium – Verlag, Düsseldorf 1983, S. 365 – 386
- [66] Schädlich – Stubenrauch, J.: Entwicklung einer Schleudergießtechnologie für kleine dünnwandige und filigrane Gußteile aus Titan und Titanlegierungen, Dissertation, RWTH Aachen 1989, S 83 – 84
- [67] Lehnert, W.; Drossel, G.; Liesenberg, O.; Huppatz, W.; Paul, M.; Friedrich, S.; Kammer, C.: Aluminium – Taschenbuch, Band 2, 15. Auflage, Aluminium – Verlag GmbH, Düsseldorf 1996, S. 324
- [68] RWTH Aachen: Gießereikunde – Skriptum, 5. Auflage, 1998, S. 18
- [69] VAW IMCO Guß- u. Recycling GmbH: Aluminium Gußlegierungen, Gußlegierungskatalog, Grevenbroich 1998
- [70] VDG – Weiterbildung 1992: Leichtmetall – Gußwerkstoffe und ihre Schmelztechnik, Düsseldorf 1992
- [71] Reicher, M.: Rath Keramikfaser Produkte, Firmeninformation der Firma Rath, Krummnußbaum 2001