



**Montanuniversität Leoben**

Lehrstuhl für Gießereikunde,

Department für Metallurgie



Vorstand Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter Schumacher

---

## **MASTERARBEIT**

# ***Machbarkeitsuntersuchung zur Herstellung von CFK – Aluminium Verbundgussstrukturen im Sandgussverfahren***

Ersteller:

**Ing. Robert Kleinhans, BSc**

**Betreuer:**

**Universität:**

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter Schumacher**

**Unternehmen:**

**Dipl.-Ing. Tim Reimann**



**PORSCHE**

**Leoben, im Oktober 2015**



PORSCHE



## Sperrvermerk

Die vorliegende Abschlussarbeit enthält zum Teil Informationen, die nicht für die Öffentlichkeit bestimmt sind. Alle Rechte an der Abschlussarbeit einschließlich der Verbreitung auf elektronischen Medien liegen bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Abweichend hiervon darf der Inhalt der Abschlussarbeit während einer Sperrzeit von 5 Jahren ab dem Abgabedatum nur mit der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG an Dritte weitergegeben werden. Nach Ablauf der Sperrzeit ist diese Genehmigung nicht mehr erforderlich.



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## **Affidavit**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

---

Ing. Robert Kleinhans, BSc

Leoben, im Oktober 2015

## Danksagung

*Mens agitat molem.  
Der Geist bewegt die Materie.  
(Vergil)*

An dieser Stelle sei es mir erlaubt, all jenen zu danken, welche mir in den Jahren meines Studiums und für die Erstellung dieser Masterarbeit fachlich und persönlich zur Seite gestanden sind.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, einschließlich meiner Großmutter, die mir dieses Studium in an der Montanuniversität Leoben ermöglicht haben. Zu Dank verpflichtet bin ich auch meinen Freunden und Kommilitonen, die mich in vielen Entscheidungen unterstützt und mir mit zahlreichen Ratschlägen und ermutigenden Worten zur Seite standen.

Diese Masterarbeit wäre ohne die Unterstützung von Hr. Prof. Dr. Peter Schumacher vom Lehrstuhl für Gießereikunde und der Firma Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, vertreten durch den Betreuer dieser Arbeit, Dipl.-Ing. Tim Reimann nicht möglich gewesen. Darüber hinaus sei auch zahlreichen Mitarbeitern am Standort Weissach gedankt, hier stellvertretend vor allem Ralf Berger aus der Versuchsgießerei im EZW.

## Kurzfassung

Aktiv betriebener Leichtbau ist das Schlagwort im modernen innovativen Fahrzeugbau. Um die Fahrzeuge bei stets steigenden Anforderungen an die Sicherheit und den Komfort dennoch effizienter zu machen, sind Maßnahmen notwendig, um das Fahrzeuggewicht bei der Entwicklung neuer Modelle zu reduzieren bzw. zumindest stagnieren zu lassen.

Aluminium als Konstruktionsmaterial hat schon lange Einzug in die Automobilindustrie gehalten. Im Motorenbau darf es mittlerweile als Standardwerkstoff genannt werden. Selbiges gilt zunehmend auch für Karosserieteile und tragende Strukturen. Kohlefaserverstärkte Kunststoffe sind hier noch eher die Ausnahme, abgesehen von Anwendungen in hochpreisigen Derivaten. Die Kombination aus Aluminium und CFK eröffnet hinsichtlich der Kombination von Werkstoffeigenschaften eine neue Dimension des Leichtbaudesign.

Um den gegenwärtigen Füge-technologien eine Alternative beizustellen, geht es in dieser Arbeit. CFK in Gusskonstruktionen einzubinden, bietet zahlreiche Vorteile. Und in Kombination mit Sandguss sind auch der gestalterischen Freiheiten kaum Grenzen gesetzt. Um das Sandgussverfahren für den Anwendungsfall zu optimieren, wurden diverse Maßnahmen ergriffen. So musste die Abkühlgeschwindigkeit nach Außen maximiert, und der Wärmeübergang auf den Einleger minimiert werden. Dies geschieht einerseits durch hochwärmeleitende Medien wie metallischen Kühlkörpern, andererseits mittels Sperr oder Grenzschichten, welche einen schlechten Wärmeübergang aufweisen. Eine Reihe von Kombinationen wurde hier in einem Miniaturmodell mit drei Formnestern untersucht. Dabei kamen verschiedene Arten von Formstoffen, Kühlkörpern und keramischen Sperrschichten zum Einsatz. Ebenso wurde der Legierungseinfluss von drei gängigen Aluminium-Gusslegierungen untersucht.

Die hier erhaltenen Erkenntnisse wurden auf eine bauteilnahes Modell übertrage, welche Strukturen aufweist, wie es in einem Fahrzeug vorkommen könnte. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten erfolgreich Themen bearbeitet werden, welche als großer Schritt in Richtung Serienreife des Verfahrens gewertet werden dürfen.

## Abstract

One of the most remarkable keywords in automotive design is manufacturing lightweight components, to fabricate lighter cars and also give a more rigid structure. For more safety and comfort, it is necessary to reduce the weight of newly developed models, in order to reduce fuel consumption.

Aluminum became an established material in the automotive industry several decades ago. In engine construction it could be referred to as a standard material nowadays. The same is increasingly true for body components and supporting structures. Carbon fibre composites are still the exception, apart from applications in high priced derivatives. The combination of aluminum and carbon opens a new dimension of lightweight design with respect to the combination of material properties.

The main purpose of this work is to investigate an alternative for the presently used joining technologies for Carbon fibre and Aluminum. Carbon fibre integrated in cast structures, offers numerous advantages. In combination with sand casting and a high degree of freedom in design can be achieved. In order to optimize the sand casting process for this particular task, various criteria had to be investigated. Thus, the cooling rate towards the outer side had to be maximized, and further the heat transfer to the inside of the cast had to be minimized. This is done firstly by a high heat conducting media as metal chills, and secondly, on the inner side, by thermal barrier layers with poor heat transfer. A number of combinations were investigated in a miniature pattern with three mold cavities. In this case, various kinds of molding materials, heat sinks and ceramic barrier layers were used. Furthermore, the impact of three common aluminum casting alloys were investigated.

The findings obtained here were transferred to a component close model, which has structures, as might occur in vehicle structures. In the context of this thesis issues were successfully elaborated, which may be considered as a great step toward series maturity of the process.



# Inhaltsverzeichnis

<b>SPERRVERMERK</b> .....	<b>I</b>
<b>EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>II</b>
<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>III</b>
<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 ALLGEMEINES</b> .....	<b>1</b>
1.1    EINLEITUNG.....	1
1.2    AUFGABENSTELLUNG.....	2
<b>2 BEDEUTUNG VON MISCHBAUWEISEN IM FAHRZEUGBAU</b> .....	<b>4</b>
2.1    VERBUNDGUSSTECHNOLOGIE.....	7
2.2    CFK-ALUMINIUM-VERBINDUNGEN.....	12
2.2.1 <i>Gießtechnischer Verbund Aluminium – CFK</i> .....	14
<b>3 SANDGUSS</b> .....	<b>15</b>
3.1    ALUMINIUM SANDGUSS.....	16
3.2    ABKÜHLBEDINGUNGEN UND ERSTARRUNGSMORPHOLOGIE VON ALUMINIUMLEGIERUNGEN.....	17
3.2.1 <i>Anwendung von metallischen Kühlkörpern</i> .....	23
3.2.2 <i>Wärmeübergang der Grenzfläche Form-Metall</i> .....	24
3.2.3 <i>Schichten in der Gießerei</i> .....	25
3.2.4 <i>Instationäre Wärmeleitung – Veränderung der Temperatur nach der Zeit</i> .....	27
3.3    FORMSTOFFE, BINDERSYSTEME.....	29
	VI



3.3.1	<i>Formgrundstoffe</i> .....	30
3.3.2	<i>Bestimmung der Korngrößen von Formgrundstoffen</i> .....	35
3.3.3	<i>Formstoffbindesysteme</i> .....	36
3.3.4	<i>Wärmekapazitäten und –leitfähigkeiten von Sanden</i> .....	40
3.3.5	<i>Einfluss des Formstoffes auf die Wärmeleitung</i> .....	43
3.3.6	<i>Formstoffprüfung</i> .....	44
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTELLE METHODEN</b> .....	<b>46</b>
4.1	ABKÜHLRATE, ERSTARRUNGSGESCHWINDIGKEIT .....	49
4.2	EINFLUSS DURCH LEGIERUNG .....	50
4.3	FORMSTOFFSYSTEME .....	50
4.4	BESCHICHTUNG DES CFK-EINLEGERS .....	51
4.5	KÜHLUNG DER INNENSEITE AM CFK EINLEGER .....	52
<b>5</b>	<b>VERSUCHE MINIATURMODELL</b> .....	<b>53</b>
5.1	AUSWERTUNG DER VERSUCHE IM MINIATURMODELL .....	56
5.2	ERGEBNISSE DER VERSUCHE IM MINIATURMODELL .....	57
5.2.1	<i>Bewertung des Einflusses durch Variation des Formstoffes</i> .....	65
5.2.2	<i>Bewertung des Legierungseinflusses</i> .....	66
<b>6</b>	<b>VERSUCHSDURCHFÜHRUNG AM MODELL GUSSKNOTEN</b> .....	<b>68</b>
6.1	ANGEWENDETE MESSTECHNIK BEI VERSUCHEN GUSSKNOTEN .....	72
6.2	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN AM MODELL GUSSKNOTEN .....	73
6.2.1	<i>Beschichtungssysteme im Praxisversuch</i> .....	79
6.2.2	<i>Ausziehversuche am Gussknoten</i> .....	80





7	DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	81
8	AUSBLICK.....	83
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	84
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	92
11	TABELLENVERZEICHNIS.....	97
12	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	99
13	ANHANG.....	A

# 1 Allgemeines

Dem Thema Leichtbau und der damit erzielbaren Gewichtseinsparungen wird heute ein großer Stellenwert in der Industrie, insbesondere im Transportwesen, eingeräumt. In diesem Kapitel sollen dem Leser die Problemstellung und die zu überwindenden Hürden nähergebracht werden.

## 1.1 Einleitung

Die Verbindung von CFK und Aluminium bietet eine Kombination von Eigenschaften, wie sie bei anderen Mischbauweisen nicht zu finden sind. Aluminium, insbesondere als Gusslegierung besitzt gute Eigenschaften hinsichtlich Festigkeiten, Korrosionsbeständigkeit und Bearbeitbarkeit. Kohlefaserverstärkter Kunststoff bietet beste Zugfestigkeiten und Steifigkeit, sofern die konstruktiven Voraussetzungen hinsichtlich des Faserverlaufs gegeben sind. Diese Kombination ist für Anwendungen in der Raum und Luftfahrt als auch im Kraftfahrzeugbau prädestiniert. Überlegungen, den Fügeprozess so einfach und zugleich so prozesssicher als möglich zu gestalten, führen uns zum Urformprozessprozess als Fügetechnologie. Ausgerechnet die älteste Form der Metallverarbeitung, das Gießen von schmelzflüssigem Metall, bietet nun die Voraussetzungen um eine Verbindung von Aluminium und CFK herzustellen. Aluminium wurde erst vor rund 130 Jahren begonnen im industriellen Stil zu verhütten, nachdem die technologischen Voraussetzungen durch HALL, HEROULT und BAYER geschaffen waren [1]. Kohlefaserverstärkte Kunststoffe kommen seit den 1950er Jahren vor Allem in Raumfahrzeugen und seit 1990 aufgrund der geringen Dichte im Hochleistungsrennsport zum Einsatz.

Sandguss wird schon seit der Bronzezeit (in Palästina, 3300 v. Chr.) vom Menschen betrieben, da es gestalterische Freiheit und Flexibilität bietet, und mit relativ einfachen Mittel umzusetzen ist [2]. Anders als Technologien wie Kokillen- oder Druckguss ist Sandguss mit relativ niedrigen Werkzeugkosten verbunden. Um den Sandguss für die Verbindung eines Metalls mit hohem Wärmeenergiegehalt wie Aluminium und einem temperatursensitiven Medium tauglich zu machen, sind Modifizierungsschritte notwendig, welche in dieser Arbeit eingesetzt und untersucht wurden. Ferner wurde danach getrachtet, das Kohlefasermaterial in Epoxidmatrix vor dem Wärmeeintrag zu schützen, um eine Schädigung des Laminats und der Matrix zu unterbinden. Trotzdem soll der (kraftschlüssige) Verbund gewährleistet werden können. Die Versuche dehnen

sich auf eine Vielzahl von Variationen aus, welche im Sandguss mit vertretbaren Mitteln realisierbar sind. Dazu gehören die Verwendung von alternativen Formstoffen sowie das Abkühlen mittels Kühlkokillen aus verschiedenen wärmeleitenden Medien. Ferner soll durch den Verbund die Qualität des vergossenen Metalls nicht beeinträchtigt sein. Es wird also ein porenarmes und feines Gefüge angestrebt.

## 1.2 Aufgabenstellung

Die Gesetzeslage in entwickelten Staaten wie jene der europäischen Union (EU) sowie in den vereinigten Staaten von Amerika erfordern eine deutliche CO<sub>2</sub>- und damit Kraftstoffverbrauchsreduktion der Neufahrzeuge. Um den gesetzlichen Erfordernissen und der Verantwortung gegenüber ihrer Umwelt und den darin lebenden Menschen Rechnung zu tragen ist es unumgänglich neue, in Ihren Eigenschaften veränderte Werkstoffe und Kombinationen aus diesen zu entwickeln. Diese Methodik verfolgt als Ziel eine Verringerung der angetriebenen Massen ohne Einschränkungen beim Komfort, der Sicherheit, oder der Leistungsfähigkeit eines Kraftwagens.

Zielsetzung der Vorliegenden Arbeit war es, die Möglichkeiten des Sandgussverfahrens für die Mischbauweise der Kombination aus Aluminium und kohlefaserverstärktem Kunststoff (kurz CFK) zu evaluieren. Der heutige Stand der Technik ist, dass derartige Verbindungen durch adhäsives oder mechanisches Fügen, also durch Kleben, Schrauben oder Nieten zustande kommen [3]. Zum Teil sind diese Prozesse sehr arbeitsintensiv, da Klebeverbindungen meist eine Oberflächenbehandlung vorangeht, und eine Aushärtung des Klebstoffs zeitaufwändig und / oder durch Erhitzen zu erfolgen hat. Füge-technologien wie Stanznieten, Nieten oder Schrauben sind oft mit Korrosionsproblemen behaftet, gerade wenn ihr Einsatz am Fahrzeug in Gegenwart eines Elektrolyten erfolgt, beispielsweise mit Streusalz kontaminiertes Wasser.

Das Fügen im Zuge des Urformprozesses ist seit Jahrzehnten industrielle Praxis, allerdings ist es üblich, Einlegeteile zu umgießen, die einen höheren Schmelzpunkt aufweisen als das zu umgießende (flüssige) Metall. Mit dem Wissen um die Temperatursensibilität des Einlegematerials, CFK, gingen die Zielsetzungen in Richtung Maximierung der Abkühlrate im Gießprozess, sowie den Einleger vor zu großem Wärmeenergieeintrag zu schützen. Da das Sandgussverfahren hinsichtlich der Abkühlbedingungen nicht die besten Voraussetzungen bietet, war es notwendig, den Prozess an mehreren Punkten zu optimieren. Darin enthalten sind auch Untersuchungen, welchen Einfluss die Legierungswahl auf den Prozess nehmen kann.



Diese Arbeit sollte ebenso den Grundstein für die Weiterentwicklung von Konzepten dienen, welche auch auf Kokillen- oder Druckguss aufbauen können, da hier im Vergleich zum Sandgussverfahren noch größere Abkühlraten realisiert werden können.

## 2 Bedeutung von Mischbauweisen im Fahrzeugbau

Der Terminus Mischbauweise im Fahrzeugbau ist primär mit dem Begriff Leichtbau in Verbindung zu bringen. Leichtbau ist dabei eine Strategie, Massen von Bauteilen, Baugruppen und kompletten Fahrzeugen zu reduzieren. Die Funktion muss in vollem Umfang und über die gesamte Lebensdauer erhalten bleiben [3]. Unter Berücksichtigung der höheren Kosten in der Herstellung und ggf. in der Entwicklungsphase ergibt sich ein Diagramm mit einem Kostenoptimum für Leichtbaustrategien (siehe Abbildung 2.1).

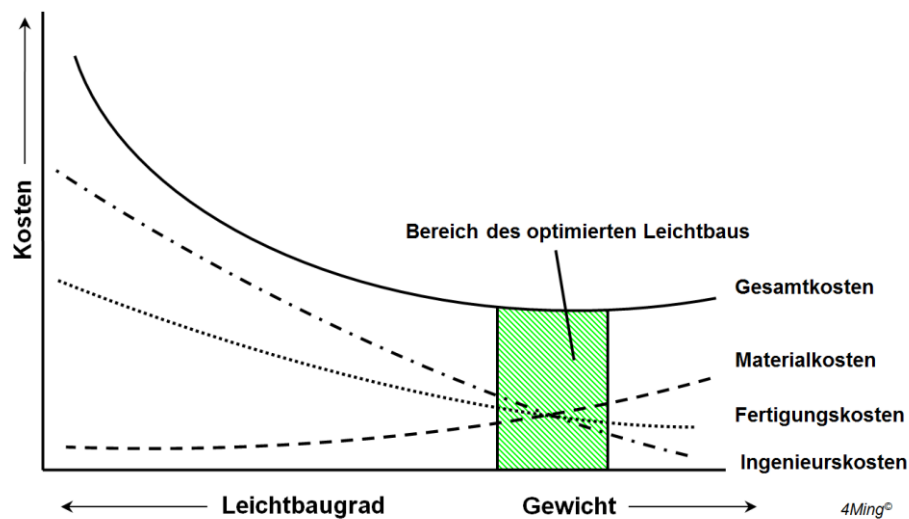


Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen Kosten und Gewicht [4].

Um das Optimum für den umzusetzenden Leichtbaugrad zu finden, ist es nötig die Marktsituation einzuschätzen. Es macht nur Sinn, Leichtbaukomponenten einzusetzen, wenn der Kunde/Konsument bereit ist für das Produkt einen entsprechenden (höheren) Preis zu bezahlen. Exemplarisch angeführt seien Sportwagen im oberen Preissegment, wo sich Leichtbaulösungen finden, welche aufgrund der hohen Herstellkosten in der Großserie nicht zum Einsatz kommen. Je höher der Leichtbaugrad, desto geringer das Gewicht und damit die Materialkosten. Dem gegenüber stehen die Ingenieurs- und Fertigungskosten. Daraus ergibt sich eine Summenkurve (Gesamtkosten). Der optimale Bereich findet sich demzufolge im Bereich der minimalen Kosten [5]. Für optimal ausgelegten Leichtbau gilt, dass für einen attraktiven Leichtbaueffekt der niedrigste Gestehungspreis unter Berücksichtigung wirtschaftlich vertretbarer und geforderter Relationen erzielt wird [6]. Als Leichtbauwerkstoffe kommen Leichtmetalle (Dichte

<4,5 kg/dm<sup>3</sup>), Kunststoffe oder Keramiken zum Einsatz. Daneben existieren Verbundlösungen. Verbunde können durch Fügen, Urformen oder Umformen entstehen.

Eine mögliche Unterscheidung zeigt folgende Aufstellung, illustriert in Abbildung 2.2 [5]:

- **Formleichtbau:**

durch optimale Ausnutzung des Werkstoffs und eine angepasste Dimensionierung wird eine Verbesserung des Funktionsverhaltens erzielt.

- **Stoffleichtbau:**

Bei gleichbleibenden oder sogar gesteigerten Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen wird eine Reduzierung des Bauteilgewichts mittels Werkstoffsubstitution vorgenommen

Sieht die Nutzung neuer, leichterer Bauteilstrukturen unter Ausnutzung beider Strategien vor. Dies führt zu:

- **Strukturleichtbau** (siehe Abbildung 2.2):

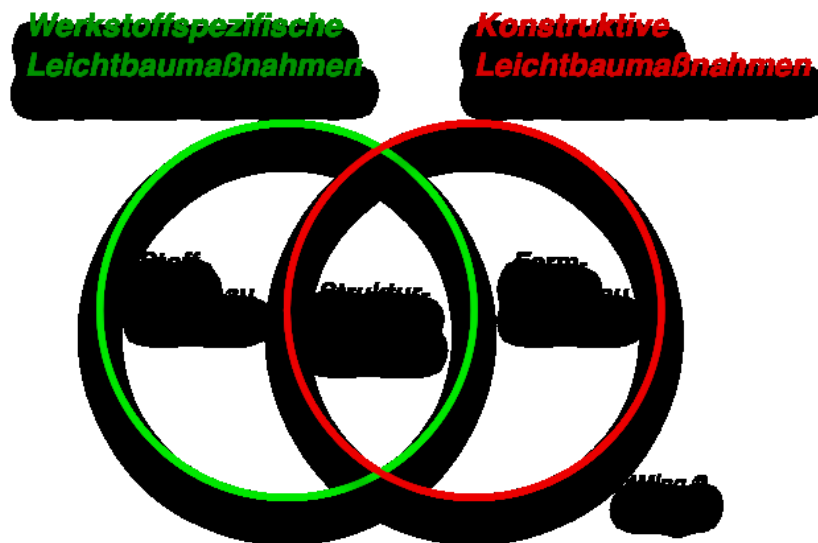


Abbildung 2.2: Strategien des Leichtbaus [5]

Wog ein Porsche 911 bei seiner Markteinführung 1963 (Urmodell) noch 1020 kg, liegt das Gewicht des aktuellen Porsche 911 Carrera (Typ 991), bei 1427 kg [7]. Anforderungen an den Komfort, die aktive sowie die passive Sicherheit und die Rahmenbedingungen des Gesetzgebers haben einen Einfluss auf die Zunahme der Masse [8]. Andererseits verpflichtet die europäische Union sämtliche

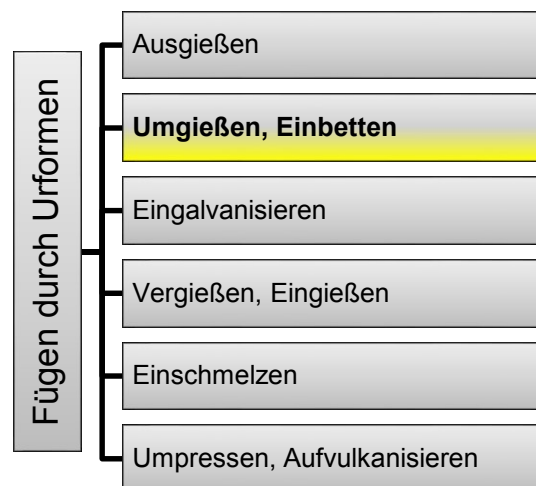
Fahrzeughersteller, die CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen bis 2021 auf 95 g/km zu senken. Dies setzt voraus, die Masse der Fahrzeuge bei weiterhin gleichbleibenden oder verbesserten Fahrleistungen zumindest stagnieren zu lassen oder zu senken. Im Einklang mit der Leitphilosophie, „Ressourcenschonendes Europa“, wird die Vorgabe der Flottenemission (Durchschnitt) nach Hersteller schrittweise bis 2021 gesenkt. Auch für das Jahr 2025 soll bald ein realistisches Ziel gesteckt werden. Waren es 2012 130 g/km CO<sub>2</sub>, so darf ab 2021 der Wert von 95 g/km Durchschnittsemission nicht überschritten werden. Ausnahmeregelungen, bzw. die Abhängigkeit CO<sub>2</sub>-Emissionen von der Fahrzeugmasse sind in [9] nachzuschlagen.

Da ein erhöhter Leichtbaugrade mit einer nach oben hin veränderten Kostenstruktur verbunden ist, ist der Einsatz von leichteren Materialien bei nicht veränderten Eigenschaften in der Großserie zum Teil nur eingeschränkt möglich, da der Druck auf die Kostenstruktur immanent und bis in kleinste Werteinheiten entscheidend ist. Durch sich immer weiter entwickelnde und rationellere Fertigungstechnologien ist es möglich, vermehrt Leichtbau in der Großserienfertigung einfließen zu lassen. Besonders im Karosseriebau gibt es Bestrebungen, vermehrt Leichtmetalle wie Aluminium oder Magnesium einzusetzen. Bei Karosserieanwendungen ist die Hebelwirkung entsprechend groß, da der Anteil an der Gesamtmasse eines Fahrzeuges der Kompaktklasse 43% beträgt. Der französische Automobilhersteller Citroën setzte bereits bei der Markteinführung der DS 1955 auf ein glasfaserverstärktes Dach [10]. Kohlefaserverstärkte Kunststoffe haben sich karosserieseitig bislang nur in höherpreisigen Sportwagen wie dem Porsche 918 Spyder (Dach) oder dem Audi R8 (Seitenteile) durchsetzen können. Der Massenanteil des Fahrwerks beträgt auch immerhin 24%. Hier hat sich der Werkstoffverbund, abgesehen von einigen Derivaten in der Bremstechnik, noch nicht durchgesetzt. Entsprechend gibt es hier Potential, Verbundbauweisen zu nutzen. Dies brächte nicht nur den Vorteil der allgemeinen Gewichtsreduktion, sondern ebenso die Möglichkeit ungefederte Massen zu minimieren und so die Fahrzeuge fahrstabiler und damit sicherer zu gestalten [8].

## 2.1 Verbundgusstechnologie

Wie in DIN 8593-4:1985-09 definiert, handelt es sich beim Verbundguss um „Fügen durch Urformen“. Eine Systematisierung des Fügeverfahrens ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Durch geeignete Technologien entsteht so durch Eingießen oder Umgießen ein Werkstück aus Kombinationen metallischer oder nichtmetallischer Materialien, wobei auch Kombinationen möglich sind.

Da sich die vorliegende Arbeit mit dem Eingießen eines festen Gegenstands in ein schmelzflüssiges Metall beschäftigt, sei aus DIN 8593-4:1985-09 der Sonderfall Einbetten zitiert: „*Einbetten, wobei ein festes Innenteil mit einem Außenteil durch Gießen gefügt wird*“. Was die Norm allerdings nicht berücksichtigt, ist die Tatsache, dass Kohlefaserverstärkte Kunststoffe eine niedrigere Schmelztemperatur aufweisen als das zu umgießende Metall.



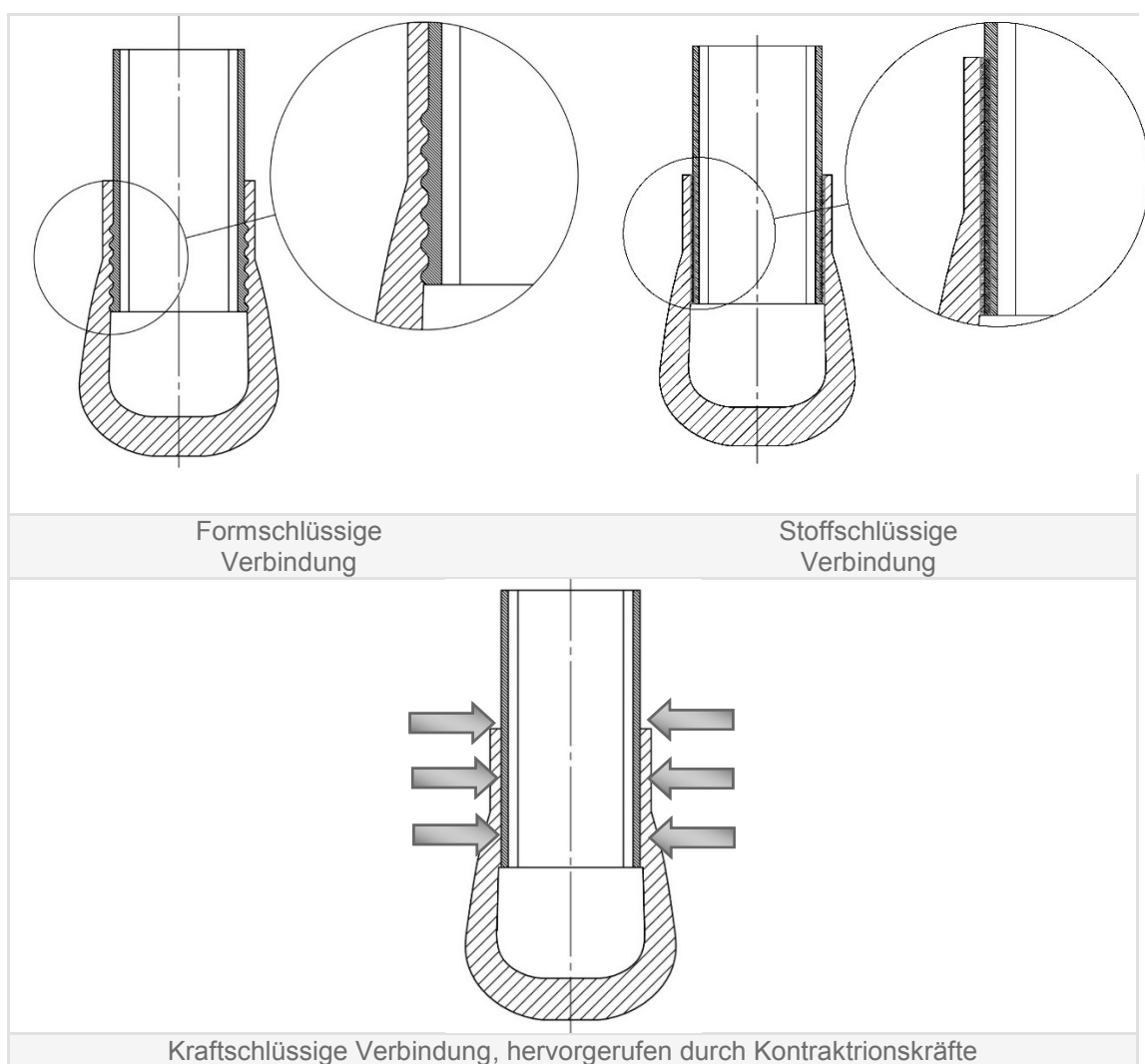
**Abbildung 2.3: Systematisierung des Fügeverfahrens "Fügen durch Umformen" in Anlehnung an DIN 8593, nach [6]; Farbig unterlegt und in fetter Schrift ist das Verfahren, welches im Rahmen dieser Arbeit Anwendung findet.**

Vergossene Materialien können Metalle und Legierungen sein, welche Leichtbaucharakteristik und zugleich gute Gießeigenschaften aufweisen, wie z.B. Aluminium- oder Magnesiumlegierungen, in Sonderfällen auch Titanlegierungen. In Fällen für Sonderanwendungen werden auch Edelmetalle oder nicht, bzw. niedriglegierte Nichteisenmetalle verwendet. Am häufigsten kommen jedoch Aluminiumlegierungen zum Einsatz. Die Zielsetzungen für Verbundguss sind oft mit Erhöhung des Leichtbaugrades, der Steifigkeit und/oder Verbesserung der tribologischen Eigenschaften verbunden.



Aus gießtechnologischer Sicht kommen eine Reihe von Gießverfahren zur Anwendung, insbesondere Sandguss, Kokillenguss, Druckguss und Squeeze-Casting.

Ein Werkstoffverbund entsteht grundsätzlich durch Zusammenführen zweier Materialien, die sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften unterscheiden können, was allerdings keine Voraussetzung ist. Entstehen können Verbindungen in denen Kraftschluss, Form- oder Stoffschluss dominieren (siehe Abbildung 2.4), wobei auch Mischformen häufig Anwendung finden. Die Aufgabe der Verbindungen besteht darin, Kräfte und Momente zu übertragen. Darüber hinaus können diese Verbindungen Funktionen wie Abdichten, Isolieren oder auch das Leiten von Wärme oder elektrischer Energie übernehmen [11].



**Abbildung 2.4: Arten von Verbindungen, welche in der Verbundgusstechnologie zum Einsatz kommen können [13]**

Durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten kann es bei einem Gussverbund zum Lösen der kraftschlüssigen Verbindung kommen, z.B. bei in

Aluminium eingegossenen Graugussbüchsen oder Trommel aus Eisenwerkstoffen. Ein Lockerwerden der Verbindung kann u.U. das Versagen eines ganzen Bauteils verursachen, oder zumindest die Dauerfestigkeit negativ beeinflussen. Aus diesem Grund gab es bereits in der Vergangenheit Bestrebungen seitens der Gießer, den kraftschlüssigen Verbund mit einem stoffschlüssigen zu ergänzen. Resultat war das Al-Fin-Verfahren, welches bis heute für Fe-Al Verbindungen umgesetzt wird [12].

### Al-Fin-Verfahren:

Dieses Verfahren kommt zur Anwendung, wenn Stahl- oder Graugussteile in Aluminium eingegossen werden und wurde erstmals in den Vereinigten Staaten von Amerika in den 1940er-Jahren eingesetzt. Die ersten Bauteile waren luftgekühlte Zylinder für Fluggeräte, woher auch der Name Al-Fin (Fin, engl. = Rippe) rührt [12].

Der Prozess sieht vor, dass das Stahl- oder Eisengussteil bevor es von Aluminium umgossen wird in ein Bad aus Reinaluminium oder einer Aluminiumlegierung getaucht. Dabei entsteht, getrieben von Diffusionsvorgängen, intermetallische Phasen vom Typ  $Al_xFe_y$  von etwa 20-30  $\mu\text{m}$  Dicke, wobei neben der  $\eta$ -Phase ( $Al_5Fe_2$ ) die sogenannte  $\theta$ -Phase ( $Al_3Fe$ ) dominiert. Daraus resultiert in der Grenzschicht eine Mischkristallbildung. Nach dem Tauchbad wird das Einlegeteil noch im „feuchten“ Zustand, d.h. mit einer noch nicht erstarrten Grenzschicht umgossen. Dies erfordert eine exakte Prozessführung, da andernfalls eine stoffschlüssige Schicht nicht gewährleistet werden kann [12; 14].

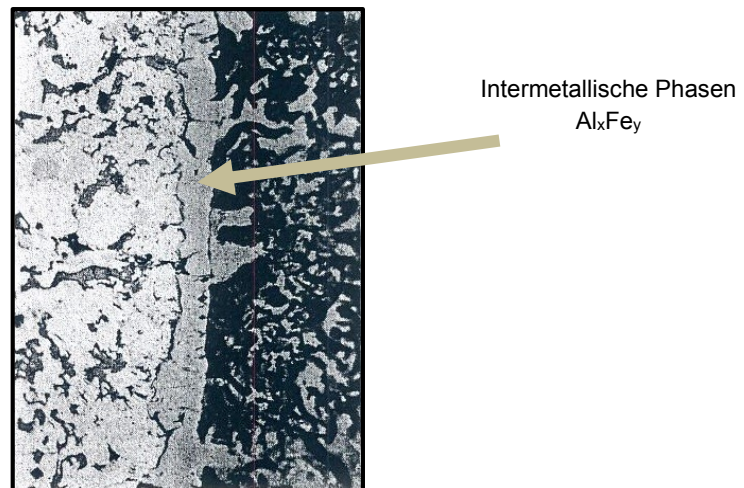


Abbildung 2.5: Schliffbild einer Al-Fin-Bindung zwischen Gusseisen und einer Aluminiumlegierung [12; 14].

### Beispiele für Verbundgussysteme

In der Serienfertigung hat sich der Verbundguss weitestgehend im Motorenbau durchgesetzt. So erreicht man mit Zylinderlaufbuchsen aus Gusseisen, die mit Aluminiumlegierungen umgossen werden, eine deutliche Gewichtsreduzierung im Vergleich zu Kurbelgehäusen (engl. *Crank case*), welche ausschließlich in Grauguss ausgeführt sind. Die thermischen Bedingungen im Motor können sich aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums sogar positiv auswirken. Ebenso zum Einsatz in Großserie kommen Lagerschalen aus Grauguss, welche in Kurbelgehäusen und Lagertraversen (engl. *Bedplates*) eingegossen werden, siehe Abbildung 2.6.

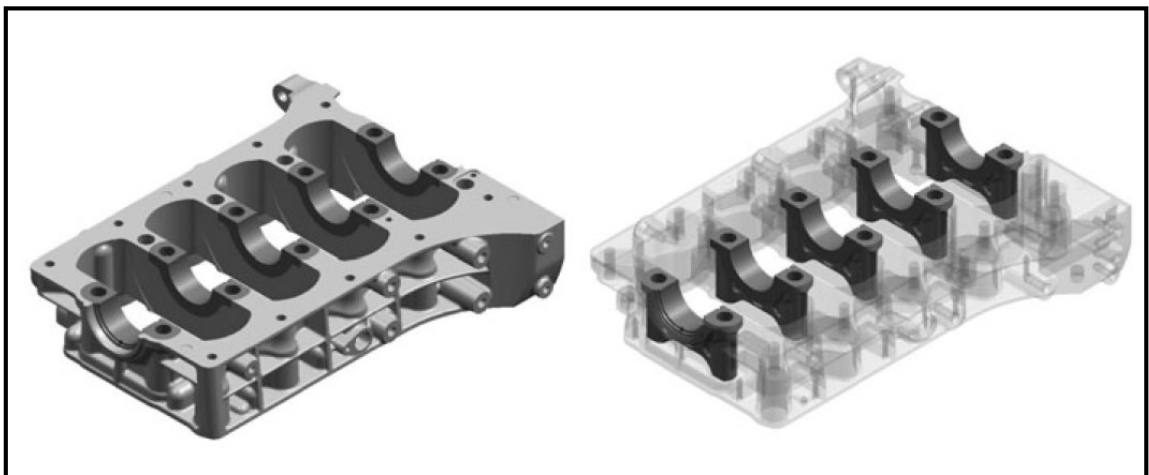
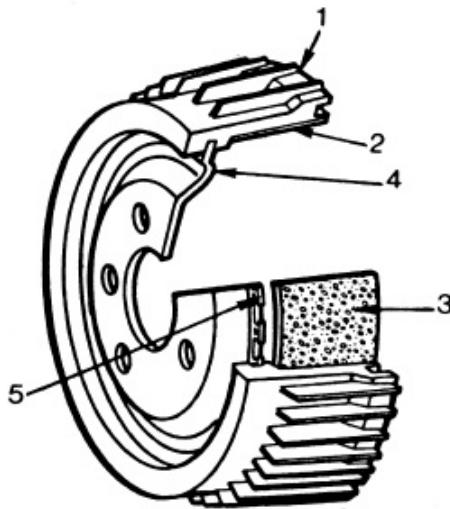


Abbildung 2.6: Lagertraverse mit –eingegossenen Lagerschalen aus Grauguss [15].

Den aktuellen Stand der Technik stellen Verbundgussbrems scheiben, z.B. der Firma BREMBO S.p.A. (Bergamo, Italien) dar. Dabei wird bei der sogenannten Leichtbaubremsscheibe der Bremsscheibentopf, bestehend aus einer Aluminiumguss legierung über Edelstahlstifte an den aus GG vorbereiteten Reibring angegossen. Die Edelstahlstifte wirken des Weiteren als Wärmebarriere, da Edelstahl eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Grauguss aufweist. Der Innentopf aus Aluminium wird vor zu großer Hitzeeinwirkung durch diese schlecht wärmeleitenden Edelstahlzapfen geschützt. Alternativ zum diesem Konzept gibt es andere Lösungen von diversen Herstellern, die entweder eine kraftschlüssige, eine formschlüssige, ein Stoffschlüssige oder eine Verbindung aus den drei Möglichkeiten vorsehen [13]. Bremsstrommeln werden ebenso häufig im Verbundgussverfahren hergestellt. Dabei kommt ein Verschleißring aus Eisenguss sowie einer Nabe, bestehend aus einem

Blechformteil, zum Einsatz, welche von Aluminium im Druckgussverfahren umgossen, siehe Abbildung 2.5. Die Nabe besteht aus einem Blechformteil [6].



**Abbildung 2.7: Bremstrommel im Verbundguss: 1.) Aluminiumdruckguss, 2.) Ring aus Eisenguss, 3.) Raue Oberfläche der dem Aluminium zugewandten Ringseite, 4.) Blechformteil aus niedrig legiertem Stahl, 5.) Verzahnung um den Schubverbund zu gewährleisten [6].**

Im Jahre 2004 wagte sich die Gießerei der Bayrischen Motorenwerke (BMW) in Landshut, ein Kurbelgehäuse für einen Reihensechszylinderottomotor (Typ N52) in Verbundbauweise für die Großserie zu gießen, siehe auch Abbildung 4.7. Dabei wurde das sogenannte *Insert* aus einer übereutektischen Aluminiumgusslegierung (AlSi17Cu4Mg, Markenname ALUSIL®), im Niederdruckkokillengussverfahren gegossen, welches anschließend von Magnesium im Druckgussverfahren umgossen wurde. Dafür wurde die Magnesiumlegierung AJ62 verwendet [16]. Diese Innovation wurde in der Fachwelt als Meilenstein gefeiert. Ein solches Zylinderkurbelgehäuse ist in Abbildung 2.8 zu sehen. Allerdings wurde das Konzept nach rd. zehn Jahren Produktionszeit nicht mehr fortgeführt. Probleme ergaben sich aus der erforderlichen Stegbreite (mind. 10mm) zwischen den Zylindern, da hier im Aluminium-Insert eine Wasserkühlung notwendig war. Dies wirkte sich auch negativ auf die Bauraumsituation aus, weil der Motor dadurch länger wurde. Um dem Problem der Korrosionsanfälligkeit beizukommen, wurden für das Kühlmittel spezielle Additive verwendet, und musste regelmäßig getauscht werden [17].

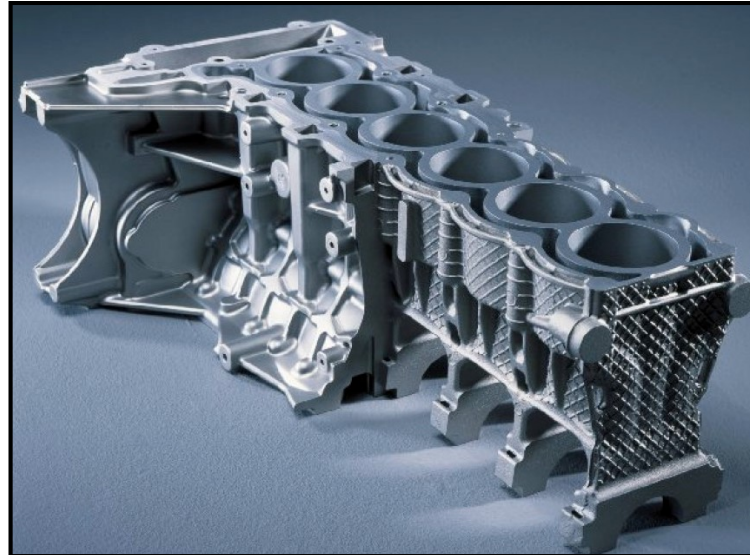


Abbildung 2.8: Kurbelgehäuse eines Reihensechszylinders der Firma BMW (2004) [16].

## 2.2 CFK-Aluminium-Verbindungen

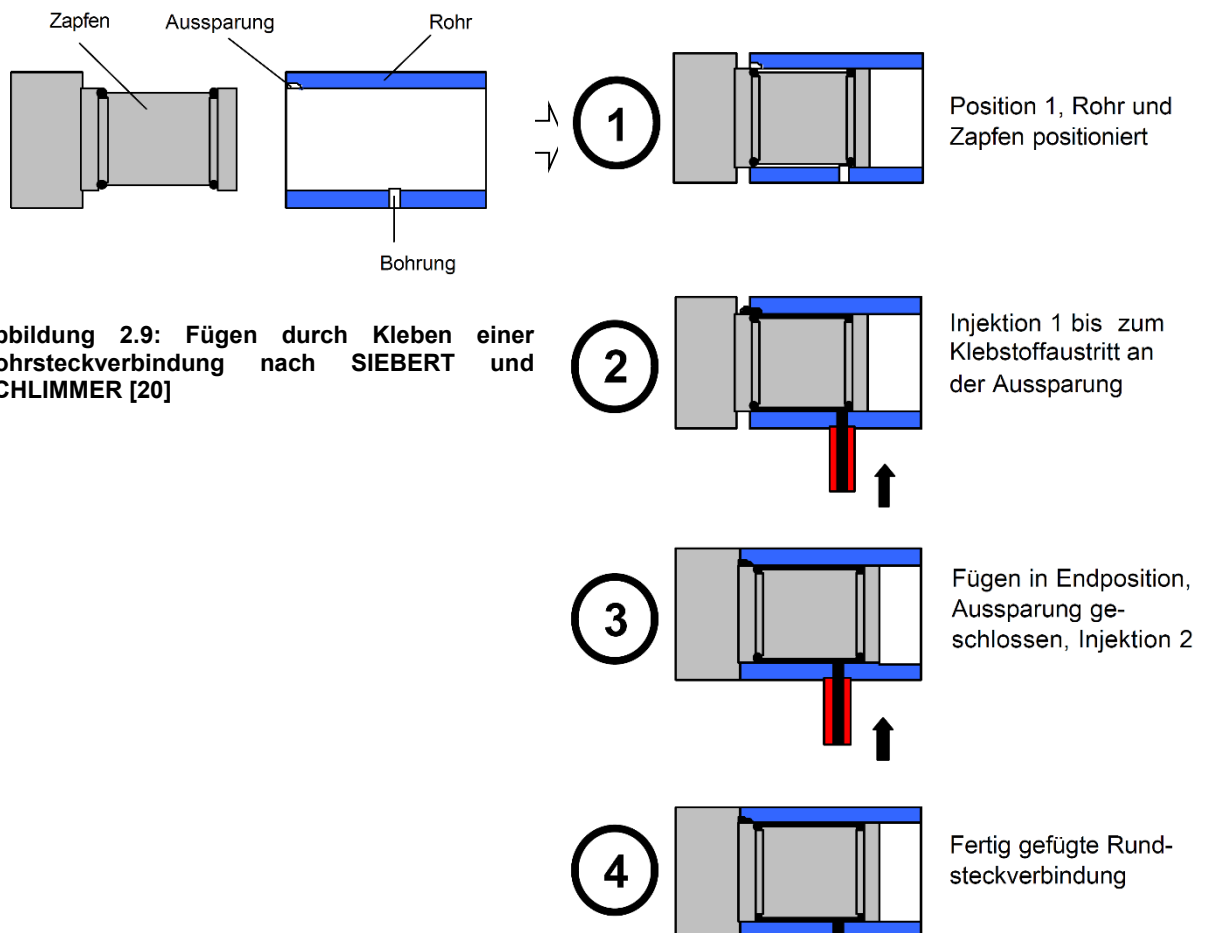
Gegenwärtig werden Kohlefaserverstärkte Kunststoffe mit artfremden Werkstoffen verklebt. Diese Methode birgt Vor- als auch Nachteile, welche in Tabelle 2.1 dargestellt sind.

Tabelle 2.1: Vor und Nachteile des Klebens als Fügetechnik [18]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Wärmebeeinflussung der Fügeiteile</li> <li>• Gleichmäßige Spannungsverteilung</li> <li>• Flächige Verbindung möglich</li> <li>• Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe möglich</li> <li>• Gas- und flüssigkeitsdichte Fugen, keine Gefahr der Spaltkorrosion</li> <li>• Verhinderung von Kontaktkorrosion durch Klebstoff als Isolierung</li> <li>• Keine präzisen Passungen der Fügeflächen erforderlich</li> <li>• Gute Dämpfungseigenschaften der Verbindung</li> <li>• Hohe dynamische Festigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrenzte Warmfestigkeit der Verbindung</li> <li>• Veränderung der Klebefuge bei Lagerung und Langzeiteinsätzen möglich</li> <li>• Sorgfältige Reinigung und Vorbehandlung der zu verbindenden Oberfläche meistens erforderlich</li> <li>• Zerstörungsfreie Prüfung der Verbindung nur bedingt möglich</li> <li>• Kriechneigung bei Langzeitbeanspruchung</li> </ul>

Kohlefaserverstärkte Kunststoffe besitzen aufgrund ihrer Materialkombinationen eine gute Eignung für Kleben. Als Matrixmaterialien kommen Polymere, vornehmlich Duroplaste und Thermoplaste zum Einsatz [19]. Die Schwierigkeit beim Kleben von CFK-Materialien stellt die Notwendigkeit dar, die anliegende Last in die Fasern einzuleiten. Selbstverständlich wird ebenso eine gute Adhäsion auf dem Substrat vorausgesetzt. Dazu muss das zu verklebende Gut durch Schleifen oder Strahlen vorbehandelt werden, um eine definierte Rauigkeit der Oberfläche sicherstellen zu können. Als Klebstoffe kommen physikalisch abbindende Systeme oder chemisch härtende Klebstoffe zum Einsatz [18].

Eine interessante Variante des Klebens wurde 2004 von SIEBERT und SCHLIMMER vorgestellt. Dabei wird eine Rundsteckverbindung durch Injizieren eines Klebstoffes durch den Mantel in den Klebspalt gefügt, siehe auch das Verfahrensschema in Abbildung 2.9 [20]. Vorstellbar ist dies auch für rechteckige, kantengerundete Profile. Allerdings wäre der Aufwand im Hinblick auf Fertigungstoleranzen, sowohl vom Mantelprofil, als auch vom einzuklebenden Profil sehr hoch, weshalb ein Durchbruch dieser Methode in Frage gestellt werden darf.



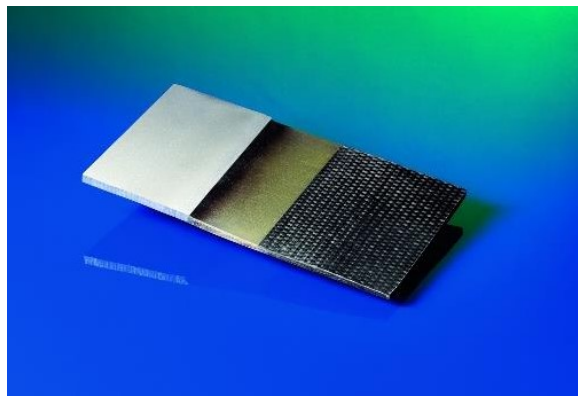
**Abbildung 2.9: Fügen durch Kleben einer Rohrsteckverbindung nach SIEBERT und SCHLIMMER [20]**



### 2.2.1 Gießtechnischer Verbund Aluminium – CFK

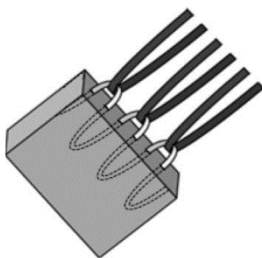
Um den Bedarf der Industrie an innovativen Fügeverfahren für Werkstoffhybride zu decken, gibt es seitens zahlreicher Forschungseinrichtungen wie beispielsweise dem Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM) oder dem deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Untersuchungen auf diesem Gebiet.

Der Ansatz des IFAM, um die beiden charakterverschiedenen Werkstoffe zu verbinden, ist die Implementierung einer Übergangsstruktur, welche aus hitzebeständigen Glasfasern oder Titan bestehen kann. Dadurch ist eine direkte Integration des CFK über den Aluminiumguss möglich. Um die Korrosionsanfälligkeit kontrollierbar zu machen, müssen, gerade bei Titan-Übergangsschichten, Oberflächenmodifikationen vorgenommen werden [3]. Abbildung 2.10 zeigt ein derartiges Demonstrationsteil.



**Abbildung 2.10: CFK-Aluminium-Hybridverbindung mit gießtechnisch in Aluminium integrierten Glasfaserlaminat als Übergangsstruktur [3].**

Eine andere Möglichkeit stellt das Eingießen von Titanschlaufen dar, in welche dann Kohlenstofffasern eingespleißt werden. Diese Fertigungstechnologie ist jedoch nur bedingt als Fügen durch Urformen zu verstehen. Abbildung 2.11 zeigt eine derartige Verbindung schemenhaft [21].



**Abbildung 2.11: Aluminiumkörper mit eingegossenen Titanschlaufen und eingespleißten Kohlenstofffasern [21]**

### 3 Sandguss

Sandguss gehört im Rahmen der Gießtechnologien zur Gruppe der Urformprozesse mit verlorenen Formen [22]. In Abbildung 3.1 sind die verschiedenen, industriell eine Rolle spielenden Gießverfahren aufgeführt. Die Aufstellung ließe sich noch weiter detaillieren.

Das Sandgussverfahren bietet größte gestalterische Freiheit. Der Verwendung von Kernen zur Abbildung von Hinterschnitten und komplexen Geometrien sind dabei allenfalls wirtschaftliche Grenzen gesetzt. So lassen sich praktisch beliebig viele und beliebig ausgeformte Hohlräume erstellen.

Für den Sandguss werden Modelle aus Kunststoff, für größere Serien auch aus Materialkombinationen aus Metall und Kunststoff hergestellt. In früheren Tagen wurden Holzmodelle verwendet, welche aufgrund der CNC-Technik in den letzten zwanzig Jahren immer mehr an Bedeutung verloren haben. Neben dem Schwerkraft-Sandguss hat sich in der Zwischenzeit auch das Verfahren des Niederdrucksandgusses für dünnwandige Strukturteile etabliert, vergleiche LAMICAST [23].

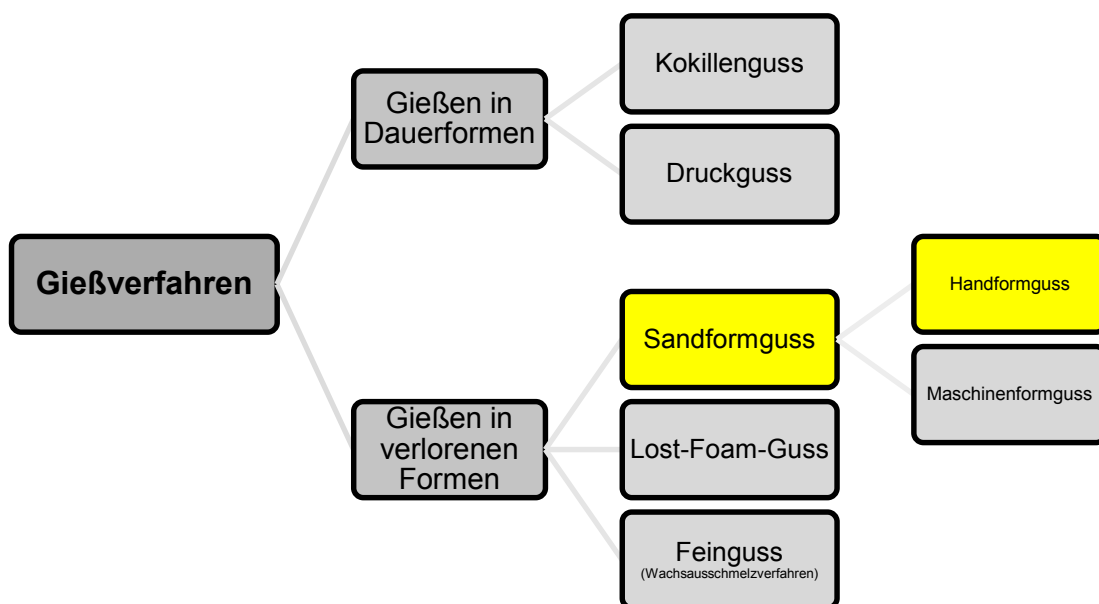


Abbildung 3.1: Gießtechnologien im Überblick; die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit dem Handform-Sandgussverfahren



### 3.1 Aluminium Sandguss

Beim Gießverfahren „Sandguss“ wird zwischen Handformguss und Maschinenformguss unterschieden. Auf automatisierten Anlagen werden heute bereits Mengendurchsätze von bis zu 300 Formen pro Stunde erreicht, beispielsweise auf kastenlosen DISAMATIC®-Anlagen. Im Vergleich zu Kokillen- oder Druckguss, wo mit Dauerformen aus metallischen Werkstoffen gearbeitet wird, werden im Sandguss aufgrund der langsameren Abkühlbedingungen in der Regel schlechtere mechanische Kennwerte im Fertigbauteil erreicht [24]. Für viele Anwendungen stellt es aber nach wie vor die wirtschaftlichste Methode dar, Gussteile im Serienprozess abzubilden. Der größte Vorteil von Sandguss ist die gestalterische Freiheit hinsichtlich der Bauteilgeometrie. Es können hier auch Kerne zum Einsatz kommen, die im späteren Bauteil Hohlräume bilden (siehe dazu Abbildung 3.2). Dies ist auch der größte Vorteil im Wettbewerb mit anderen Herstelltechnologien, wie dem Umformen (Schmieden) oder auch Druckguss, wo Sandkerne nicht bzw. nur bedingt einsetzbar sind. Der Prozessablauf im Sandguss sei in Abbildung 3.3 dargestellt.

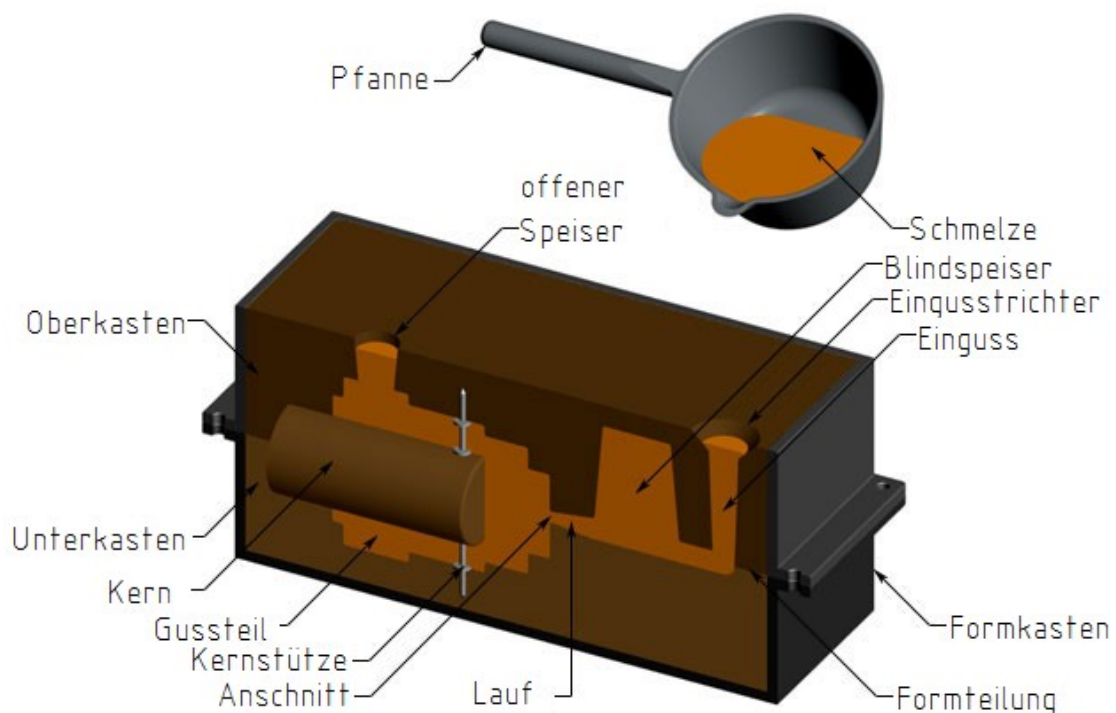


Abbildung 3.2: Im Sandguss dargestelltes Bauteil mit Kern, Form horizontal geteilt; nach [25].

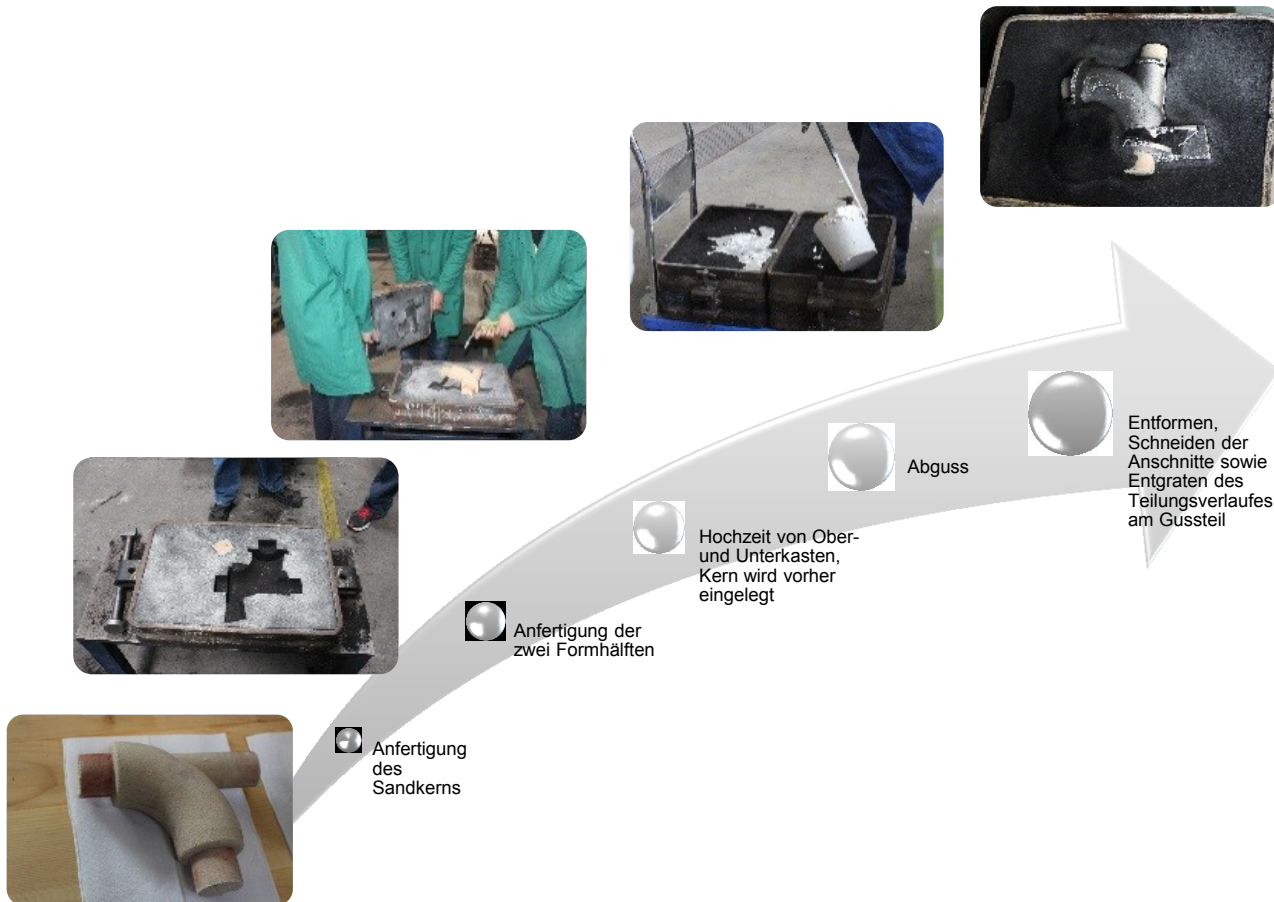


Abbildung 3.3: Prozessablauf beim Sandguss am Beispiel eines Demonstrationsteils mit Kern mit benonitgebundenem Sand. Dieser gegenständliche Versuch wurde im Technikum des Österreichischen Gießereiinstituts (ÖGI) vorgenommen

### 3.2 Abkühlbedingungen und Erstarrungsmorphologie von Aluminiumlegierungen

Bei den Aluminiumlegierungen wird u.a. zwischen der Art der Herstellung der Halbzeuge unterschieden. Daraus ergeben sich die zwei Gruppen der Knet- und Gusslegierungen. Bei beiden Gattungen wird wiederum zwischen aushärtbar und nicht aushärtbar differenziert [26]. Der Unterschied der beiden Legierungsgruppen ist der Legierungsgehalt, welcher bei Gusslegierungen rd. 10-12% und bei Knetlegierungen in den meisten Fällen lediglich 1-2% beträgt. Nur in Ausnahmefällen werden Knetlegierungen mit bis zu 6 oder 8% Legierungselementen beaufschlagt [27; 27] Die

signifikanten Unterschiede zwischen Gussstücken und Produkten aus Knetlegierungen wurden von ARBENZ wie folgt beschrieben [28]:

- a) *In Gussstücken findet keine Rekristallisation statt. Korngrößen bleiben auch nach einer Wärmebehandlung unverändert erhalten.*
- b) *Gussstücke beinhalten Fehlstellen im Gefüge wie Mikrolunker, Mikrorisse oder Gasporen*
- c) *In Gussgefügen sind größere zusammenhängende intermetallische Phasen vorzufinden. Es folgt, dass ein Inlösungsgehen der Gefügebestandteile im Verlauf einer Lösungsglühung wesentlich mehr Zeit in Anspruch nimmt.*

Relevante Legierungen am Gießereisektor sind größtenteils siliziumlegiert. Daneben existiert eine Reihe von Legierungen, welche aber in geringerer Menge vergossen werden. Dazu zählen Al-Cu, Al-Zn oder auch Al-Mg-Legierungen, welche wegen ihrer Festigkeit, Schweißeignung oder Korrosionsbeständigkeit zum Einsatz kommen. Diese Arbeit beschränkt sich auf eine Auswahl von drei handelsüblicher Al-Si-Legierungen, die am Markt breite Verwendung im Sand-, Kokillen- und Druckguss finden. Diese behandelten Legierungen gehören der Gattung der Al-Si-Gusslegierungen an.

Beim Erstarren von Reinstaluminium kommt es durch Kontraktion zu einem Volumendefizit von 7,1%. Dieser Wert lässt sich durch den Zusatz von Silizium auf ca. 3-5% mindern. Grund dafür ist die Volumensexpansion von Silizium bei der Kristallisation. Diese sogenannte Dichteanomalie lässt sich mit ca. 10 %, gemessen am Volumen, quantifizieren. Dies ist der Grund warum das Halbmetall Silizium als Hauptlegierungsmittel für Aluminium-Gusslegierungen zum Einsatz kommt. Darüber hinaus verbessert Si das Fließ- sowie Formfüllungsvermögen [29–31]. In Abbildung 3.4 ist das Aluminium-Silizium Phasendiagramm ersichtlich. Das Eutektikum in diesem Zweistoffsystem liegt bei 12,6 Gew% (entspricht 12,1 At%). Die eutektische Temperatur beträgt 577,6 °C [32].

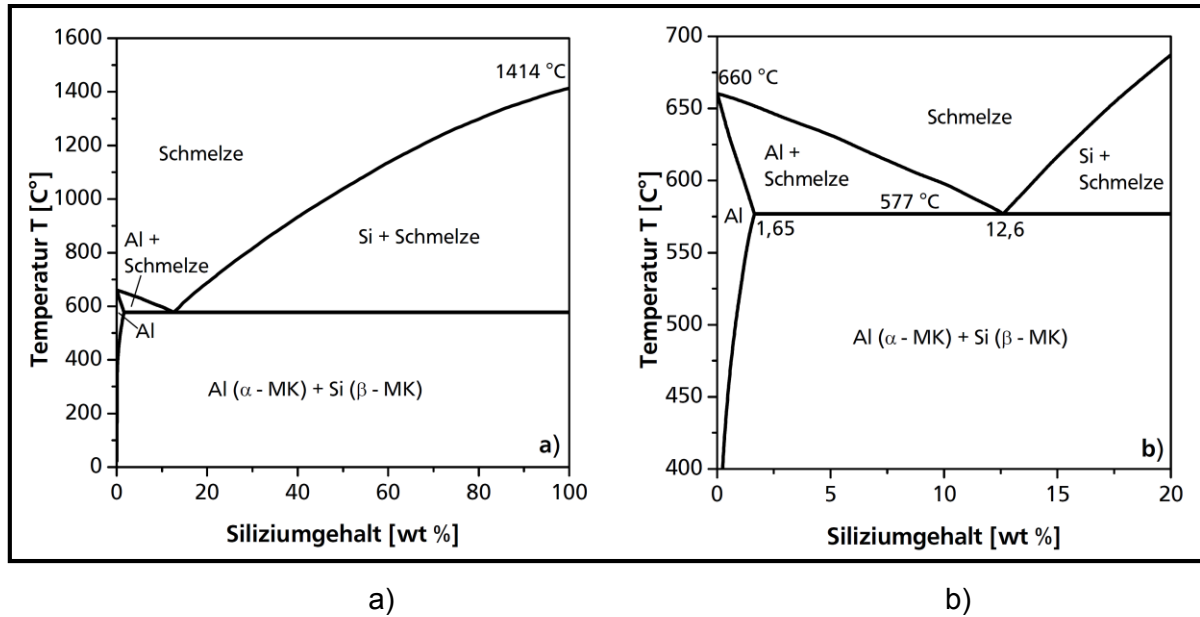


Abbildung 3.4: a) Schaubild Aluminium-Silizium, eutektischer Punkt bei  $T = 577^\circ\text{C}$  und 12,5m% Si; b) mit Ausschnitt des technisch wichtigen Bereichs für AlSi-Legierungen, aus [32].

Abhängig vom Gehalt des Legierungselementes sowie der Abkühlgeschwindigkeit liegt stets eine andere Form des Erstarrungstyps vor. Die einzelnen Erstarrungstypen unterscheiden sich durch die Ausbildung der sich während der Erstarrung bildenden Grenzschicht zwischen fester und flüssiger Phase. Dabei wird zwischen exogener und endogener Erstarrung unterschieden. Die exogene Erstarrung zeichnet sich dadurch aus, dass Kristalle oder Körner von der Formwandung ausgehend in die Schmelze hinein wachsen. Dieser Erstarrungstyp ist bei Reinformen oder eutektischen Erstarrungstypen zu erwarten. Abhängig von der Abkühlrate kann eine Unterscheidung zwischen schalenbildend, dendritisch oder schwammartig vorgenommen werden, siehe Abbildung 3.5.

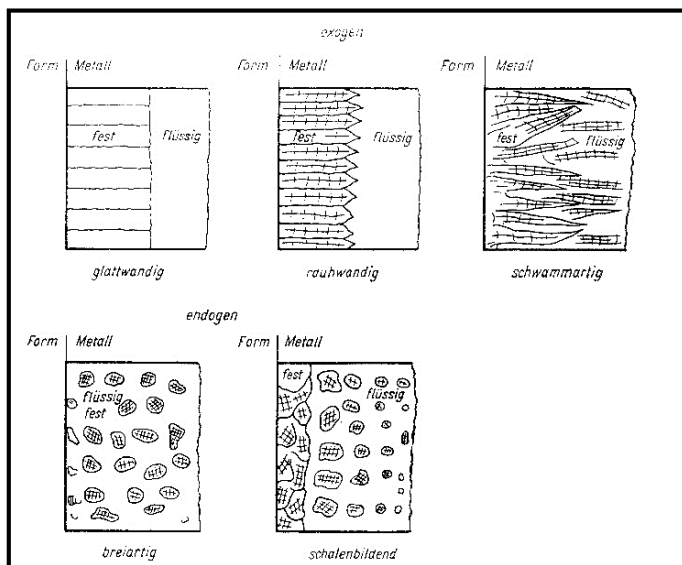
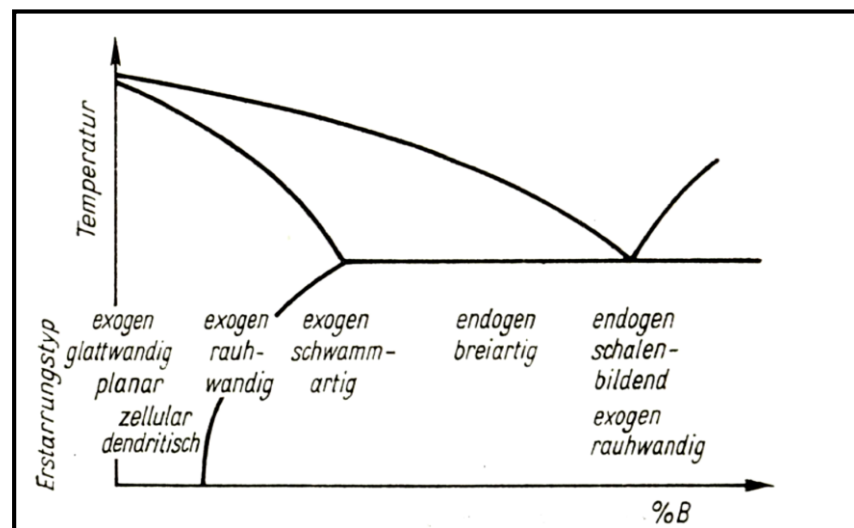


Abbildung 3.5: Erstarrungstypen (schematisch) [33]

Die Formen der endogenen Erstarrung begründen sich in der Tatsache, dass Kristalle in der Schmelze gebildet werden, und diese gleichmäßig wachsen und in der Schmelze frei beweglich sind. Typisch ist dies für unter- oder übereutektische Legierungen (im englischen Sprachraum werden die Termini *hypo-* und *hypereutectic* verwendet), welche ein Erstarrungsintervall aufweisen. Darunter werden Legierungen links oder rechts des eutektischen Punktes verstanden. Bei den endogenen Erstarrungstypen wird zwischen breiartig und schalenbildend unterschieden. Abhängig von der Abkühlrate ist es möglich, dass sich die Erstarrungsmorphologie zeitlich und lokal ändert. Die Erstarrung startet stets mit einem bestimmten Typ, und kann im Verlauf der Erstarrung einen anderen Typ annehmen. In der Praxis sind zumeist Mischformen anzutreffen [34; 35].

In Abbildung 3.6 illustriert ein binäres Zustandsdiagramm, wo welche Form der Erstarrung zu erwarten ist.

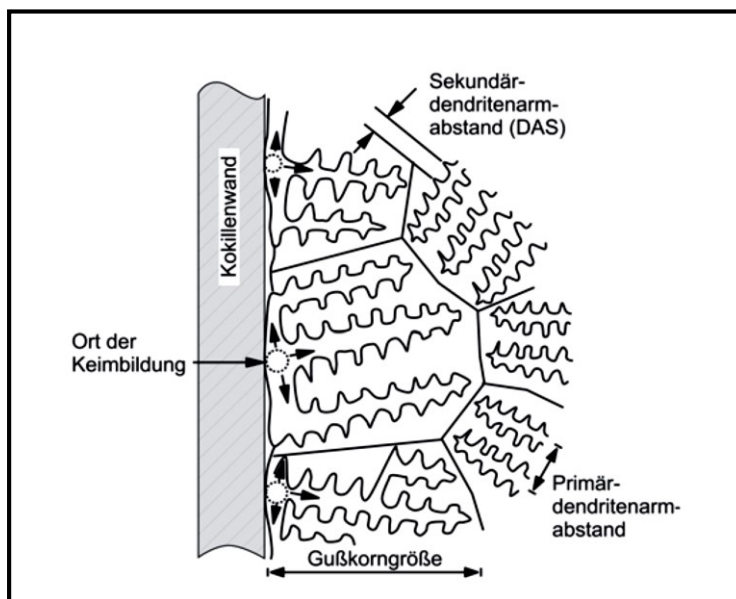
**Abbildung 3.6:**  
Zusammenhang  
zwischen  
Zustandsschaubild  
und Erstarrungstyp  
[33].



Die Erstarrungsmorphologie kann durch entsprechende Maßnahmen gezielt beeinflusst werden. So kann eine exogene Morphologie in eine endogene durch Einbringen von Keimen (Kornfeinen bei Al-Legierungen, Impfen bei Eisenguss) umgewandelt werden. Weiters hat die Form, in dem der vergossene Stoff den Aggregatzustand von flüssig auf fest verändert, weitreichende Auswirkungen auf das Formfüllvermögen und damit Faktoren wie der Speisung etc. [33].

Werden die Erstarrungsbedingungen verändert, wie z.B. durch den Einsatz von Kühlkokillen, so wird die Erstarrungsmorphologie von schwammartig über rauhwandig zu glattwandig verändert. Bei endogenen Erstarrungstypen findet ein Übergang von breiartiger zu schalenbildender Erstarrung statt, wenn die Abkühlgeschwindigkeit erhöht wird. Dies ist auf den Effekt der konstitutionellen Unterkühlung zurückzuführen, welche aus Mikroseigerungen von Legierungselementen vor der Erstarrungsfront resultiert. Mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit wird die konstitutionelle Unterkühlung vermindert. Damit kann, je nach Legierungstyp, erreicht werden, dass das Speisungsvermögen durch die Änderung der Erstarrungsmorphologie verbessert wird. Eine Beschreibung des zu erwartenden Erstarrungstyps kann Legierungsspezifisch nur schwer abgeschätzt werden, dies hat zumeist experimentell zu erfolgen [36].

Wird die Grenzfläche einer erstarrenden Front betrachtet, so schreitet diese immer parallel entgegengesetzt dem Wärmefluss fort. Im Falle einer starken Unterkühlung durch eine Kokillenwandung kann sich so eine exogene erstarrende Randschicht bilden, wobei im Gussteilinneren eine endogene Erstarrung stattfindet (siehe Abbildung 3.7).



**Abbildung 3.7:**  
Strukturzusammenhänge eines  
Gussgefüges [37]

Die Dendriten bilden sich aufgrund einer lokalen Konzentrationsverschiebung, welche weithin als konstitutionelle Unterkühlung bekannt ist. Durch weitere Konzentrationsverschiebungen kommt es zur Ausbildung von Dendritenarmen. Diese bilden sich innerhalb der Schmelze, wo sich Keime rasch vergrößern. Durch die ständige Abfuhr von Wärme, wie bei technischen Gießverfahren vergrößern sich diese sehr rasch,

indem sich weitere Atome an diese Keime anlegen. Das charakteristische Aussehen eines Gusskornes erklärt sich durch die unterschiedliche Kristallorientierung der Körner. Dabei ist die Orientierung innerhalb eines Kornes, abgesehen von lokalen Gitterfehlern stets einheitlich ausgerichtet. Die Erstarrung wird letztlich nur von den zusammentreffenden Gusskörnern begrenzt [29; 30].

Die Unterkühlung der Schmelze bestimmt dabei wesentlich die Form des erstarrten Gefüges. Dabei entscheidend sind Größen wie der Temperaturgradient  $G$  sowie die Erstarrungsgeschwindigkeit an der Erstarrungsfront [38]:

$$G = \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3.2)$$

Werden die Beträge der beiden Ausdrücke multipliziert, so ergibt sich die Veränderung der Temperatur nach der Zeit,  $\dot{T}$ , siehe Glg. 3.3.

$$\frac{dT}{dt} = G \cdot v \quad (3.3)$$

KURZ und FISHER haben ein Modell entwickelt, welches das zu erwartende Gefüge in Abhängigkeit des Gradienten  $G$  sowie der Erstarrungsfrontgeschwindigkeit vorhersagen lässt. Die ist in Abbildung 3.8 ersichtlich. Besondere Bedeutung kommt dabei dem CET-Übergang (CET- Columnar to equiaxed transition) zu, welcher in der Praxis immer angestrebt werden soll. Besonders wichtig scheint dies bei großen Querschnittsübergängen, da hier  $G$  besonders ungünstige Werte annehmen kann und dann bevorzugt Strukturdefizite oder Ungängen auftreten können [39].



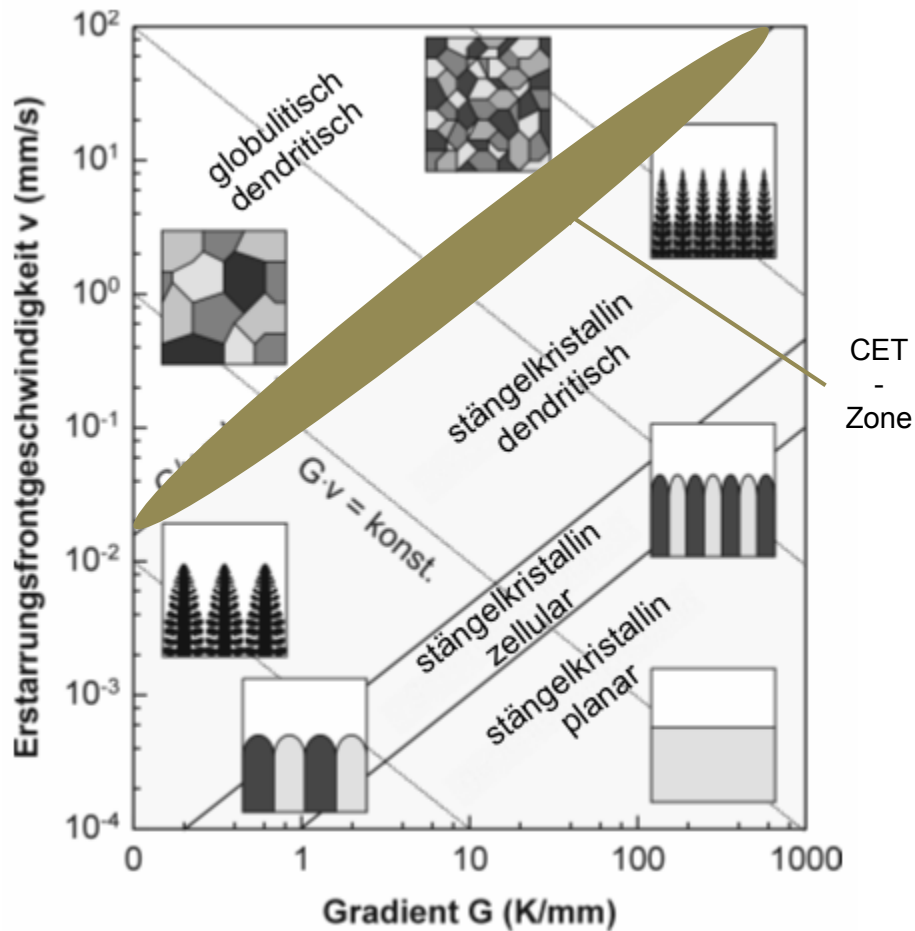


Abbildung 3.8: Abhängigkeit resultierender Erstarrungsmorphologie in Abhängigkeit des Temperaturgradienten  $G$  sowie der Erstarrungsfrontgeschwindigkeit  $v$ . Eine Änderung des Verhältnisses  $G/v$  führt von einer stängelkristallinen planaren Erstarrung (unten rechts) zu einer globulitischen dendritischen Erstarrung (oben links) [40].

### 3.2.1 Anwendung von metallischen Kühlkörpern

Um die bestmöglichen Ergebnisse in den Versuchen zu erzielen, wurde für die Berechnung der Kühlkörper auf ein Formelwerk von RABINOVIC, MAI und DROSSEL [33] zurückgegriffen. Im Wesentlichen handelt es sich um eine Wärmebilanz, welche den Wärmefluss im Zuge der Erstarrung wiedergibt. Diese Berechnung hat allerdings nur Gültigkeit bis zum Erstarrungsende. Um die weitere Abkühlung auf die für das Einlegematerial gesetzte kritische Temperatur zu erreichen, wurde die Berechnung um die Wärmebilanz für die Abkühlung im Festen erweitert. Folgende Ausdrücke wurden zur Kalkulation verwendet:



$$D_{Kü} = \sqrt{\frac{K_{Sa}}{K_{Kü}}} \cdot M_r \cdot \frac{\rho_G \cdot [L_G^* + c_G \cdot (\vartheta_g - \vartheta_{Er})]}{\vartheta_{Kü} \cdot c_{Kü} \cdot \rho_{Kü}} \quad (3.4)$$

$$D_{KüSo} = \frac{m_G \cdot c_G \cdot (T_{Er} - T_{Emd})}{O \cdot \rho_{Kü} \cdot c_{Kü} \cdot (T_{End} - T_0)} \quad (3.5)$$

Wobei:

$D_{Kü}$	Dicke des Kühleisens in cm
$\sqrt{\frac{K_{Sa}}{K_{Kü}}}$	tabellierte Konstante
$M_r$	Gießmodul ( $M_r = \text{Volumen}/\text{Oberfläche}$ ) in cm
$\rho_G$	spezifisches Gewicht des Gießgutes
$L_G^*$	Erstarrungsenthalpie des Gießgutes
$c_G$	spezifische Wärmeaufnahmekapazität des Gießgutes
$\vartheta_G$	Gießtemperatur
$\vartheta_{Er}$	Erstarrungstemperatur (eutektische Temperatur)
$\vartheta_{Kü}$	Temperatur Kühlelement
$c_{Kü}$	spezifische Wärmeaufnahmekapazität des Kühlelements
$\rho_{Kü}$	spezifisches Gewicht des Kühlelements
$m_G$	Masse des zu kühlenden Gießgutes
$O$	Oberfläche in cm <sup>2</sup>
$\vartheta_{End}$	Endtemperatur
$\vartheta_0$	Starttemperatur

### 3.2.2 Wärmeübergang der Grenzfläche Form-Metall

Bei lokaler Betrachtung setzt sich der Wärmeübergang aus mehreren Komponenten zusammen, weil aufgrund der Oberflächenrauheit keine durchgehende Wärmeleitung zwischen erstarrtem Gussstück und Form stattfinden kann (siehe Abbildung 3.9). Es bilden sich kleine gasgefüllte Zwischenräume, welches Luft oder Reaktionsprodukte der Verbrennung des Formstoffbinders können. Aufgrund der im Gegensatz zu Metallen schlechteren Wärmeleitfähigkeit von Gasen wird dadurch der Wärmeübergang zwischen der erstarrten Schmelze und dem Formmaterial reduziert [41].

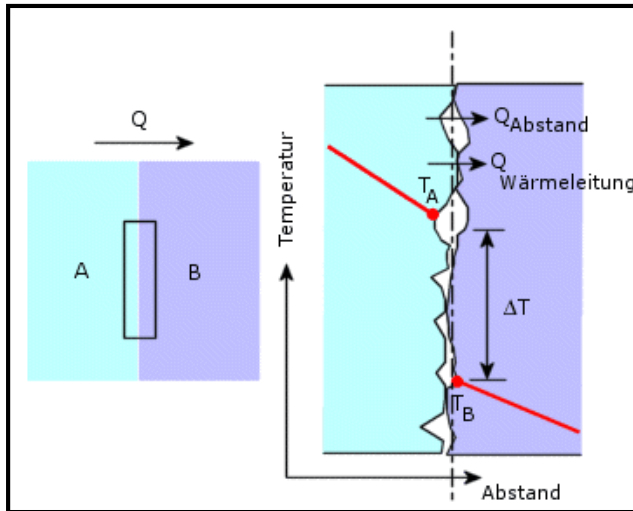


Abbildung 3.9: Thermischer Kontaktwiderstand unter realer Betrachtung; Lokal finden sich Oberflächenrauheiten, welche eine durchgehende Wärmeleitung verhindern [42].

Sobald die gesamte Schmelze in der Form erstarrt ist, setzen Diffusionsvorgänge sowie die eigentliche Abkühlung des Materials ein. Ist die Wärmeabfuhr durch das oben beschriebene Phänomen gehemmt, kommt es zur Auflösung kleinerer Teilchen und dem gleichzeitigen Wachstum größerer Teilchen. Dieser Vorgang wird als OSTWALD-Reifung bezeichnet [43].

### 3.2.3 Schichten in der Gießerei

In der Praxis werden oftmals als Zwischenschicht noch sogenannte Schichten verwendet. Darunter werden Aufschlämmungen verstanden, welche aus feinkörnigen feuerfesten Füllstoffen bestehen. Die Komponenten solcher im Gießereialltag gebräuchlichen Schichten sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Schichten haben die Aufgabe, Formstoffreaktionen zu unterbinden, die Entformbarkeit zu erhöhen bzw. zu gewährleisten, und die Oberflächenqualität von Gussteilen zu verbessern, sei es in technischer oder in optischer/haptischer Hinsicht. Desweiteren sollen sie den Wärmeübergang steuern, und einen Lösungsverschleiß von Aluminium an Dauerformen aus Stahl oder Gusseisen verhindern [41; 44].

Die Füllstoffe solcher Suspensionen sind meist Mineralien wie Zirkon, Tonerde, Mischsilikate, Glimmer oder Talk. Abhängig vom zu vergießenden Material, der gewünschten Temperaturleitfähigkeit und den möglichen Formstoffreaktionen wird die jeweilige Schichte gewählt. Ebenso spielen der Preis sowie die Verfügbarkeit eine Rolle [45].

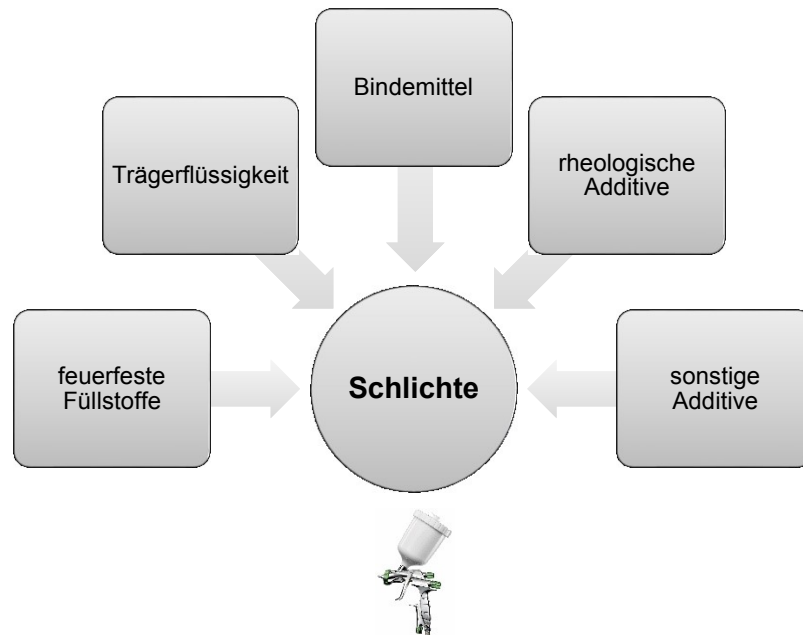


Abbildung 3.10: In Schlichte enthaltene Komponenten [44]

Die **Trägerflüssigkeit** hat nur jenen Sinn, die Verarbeitbarkeit der Schlichte sicher zu stellen. Sie muss nach dem Auftrag ausgetrieben werden, um die Qualität des Gussteiles nicht zu vermindern. Als Trägerflüssigkeit kommt entweder Wasser oder Alkohol (meist als Isopropylalkohol) zur Anwendung. Allerdings wird aktuell aufgrund Diskussionen um Arbeitsplatzsicherheit und Gesundheitsbelastung versucht, den Einsatz alkoholbasierte Schlichten in den Gießereien stark einzudämmen. Alkohol hat den Vorteil, dass er sich aufgrund des höheren Dampfdruckes schneller verflüchtigt als Wasser, welches mittels Temperaturen oberhalb von 100°C verdampft werden muss. Als **Bindemittel** kommen entweder Bindetone wie Bentonit oder Wassergläser in Frage. Ebenso werden alternativ Verdickungsmittel wie Cellulosen (Natriumcarboxymethylcellulose) angewandt. Letztere haben schlechtere thixotrope Eigenschaften als tongebundene Schlichten, und neigen zum Tränenbilden bei Abfließen der Schlichte. Allerdings ist die Neigung zu Rissbildung sehr gering, was aber bei tonhaltigen Schlichten der Fall sein kann. Die **Füllstoffe** bestimmen das physikalische Verhalten im Gießprozess, weil sie maßgeblich den Wärmehaushalt einer metallischen Dauerform oder den Wärmeübergang in einer Sandform kontrollieren. Als Basismaterial dienen verschiedene mineralische und keramische Stoffe, welche oxidische oder silikatische Verbindungen aufweisen. Solche Materialien können sein: Talk, ein magnesiumhaltiges Schichtsilikat oder Pyrophyllit, ein Aluminiumsilikat. Glimmer und das hochfeuerfeste Zirkon (Schmelzpunkt 2200 °C) werden ebenso oft als Grundmaterial für Schlichten herangezogen. Aufgrund des

Dichteunterschiedes der Füllstoffe und der Trägerflüssigkeiten, neigen diese in Suspensionen zum Sedimentieren. Um diesem Umstand entgegen zu wirken, werden **rheologische Additive** eingesetzt, welche die Oberflächenspannung der Füllstoffteilchen beeinflussen. Ebenso soll gewährleistet werden, dass Suspensionen nach einer längeren Lagerzeit wieder gut und leicht aufzurühren sind [44].

### 3.2.4 Instationäre Wärmeleitung – Veränderung der Temperatur nach der Zeit

Die Abkühlbedingungen eines Gussteils sind weitestgehend inhomogen und lassen sich allenfalls durch numerische Näherungen berechnen. Simulationsmodelle wie FEM oder FDM bedienen sich solcher Methoden. Um aber einfache Geometrien bewerten zu können, kann eine Betrachtung auch über dreidimensionales Temperaturfeld vorgenommen werden. Die allgemein gültige *Differentialgleichung für ein dreidimensionales Temperaturfeld* lautet:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} = a \cdot \nabla^2 \vartheta \quad (3.6)$$

wobei:

$\vartheta$	Temperatur
$\tau$	Zeit
$\alpha$	$\lambda/(\rho \cdot c_p)$
$a$	Abstand
$\nabla$	Nabla-Operator, Differenzialoperator in den drei Hauptraumrichtungen

Die Gleichung 3.4 beschreibt die Temperaturverteilung in einem definiertem Volumenelement anhand der geometrischen Bedingungen sowie den Stoffkonstanten (siehe Glg 3.6, Variable „a“).

Aus dieser Gleichung können Fourierreihen erhalten werden, wobei über Hilfsmitteln wie Tabellenwerten oder Diagrammen ein Temperaturfeld für einfache Geometrien berechnet werden kann. Dazu werden folgende essentielle Zusammenhänge benötigt:

*Dimensionslose Temperatur.* Gibt an, um wieviel sich die Temperatur, bezogen auf die Außentemperatur verändert.

$$\theta = \frac{\vartheta - \vartheta_{\infty}}{\vartheta_A - \vartheta_{\infty}} \quad (3.7)$$

*Fourierzahl Fo*: auch genannt die dimensionslose Zeit; Verhältnis des Wärmestroms zur zeitlichen Änderung des Wärmeinhalts des Körpers

$$Fo = a \cdot \frac{t}{s^2} \quad (3.8)$$

*Biotzahl Bi*: dimensionslose Wärmeübergangszahl; Ist das Verhältnis der Wärmeübergangszahl außen am Körper zu derjenigen im Körper

$$Bi = \alpha \cdot s / \lambda \quad (3.9)$$

Dabei kann eine bestimmte Temperaturveränderung mit der Fourierzahl berechnet wird, welche wiederum mittels Biotzahl und der dimensionslosen Zeit aus Diagrammen ermittelt werden.

Die Änderung des Wärmeinhalts kann über folgende Näherung berechnet werden, die gibt die in einer bestimmten Zeit zu- oder abgeführte Wärme wider: [38]

$$Q = m \cdot c_p \cdot (\vartheta_A - \overline{\vartheta}) \quad (3.10)$$

Aus obigen Gleichungen ergibt sich folgend ein Zusammenhang, welcher den Temperaturverlauf im Zuge der Abkühlung eines Körpers in Abhängigkeit der Zeit wiedergibt [46]. Ein derartiger Verlauf ist in Abbildung 5.10 abgebildet.

$$\frac{d(\vartheta_1)}{dt} = \frac{\alpha \cdot A}{m_1 \cdot c_p} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_{A2}) \quad (3.11)$$

A                      Anlagefläche (zu kühlende Oberfläche)

Durch Integration wird folgende Gleichung erhalten:

$$(\vartheta_1 - \vartheta_{A2}) = (\vartheta_{A1} - \vartheta_{A2}) \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot A}{m_1 \cdot c_p} \cdot t} \quad (3.12)$$

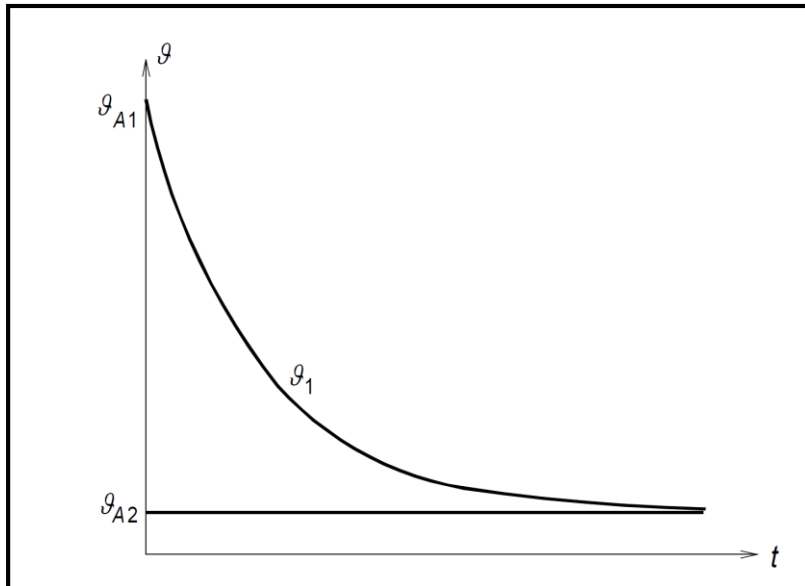


Abbildung 3.11: Temperaturverlauf eines abkühlenden Körpers; die Temperatur nähert sich asymptotisch einem Grenzwert an, welcher durch die Umgebung bestimmt wird [46].

### 3.3 Formstoffe, Bindersysteme

Formstoffe dienen der Produktion von (Sand-)Gussteilen als bildsame Materialien, die mit der flüssigen Phase des zu vergießenden Metalls im zentralen Prozess der Gießerei, dem Abguss, in Berührung kommen. Zum Teil werden derartige Materialien auch als Ergänzung im Gießprozess mit metallischen Dauerformen (z.B. als Sandkerne im Kokillenguss) verwendet. In Abbildung 3.12 ist das Schema der Zusammensetzung eines Formstoffes ersichtlich. Ein Formstoff besteht aus mindestens zwei Komponenten, dem Formgrundstoff und einem Bindemittel. Formgrundstoffe haben in der Regel keine Bindemittelfunktion. Wenn es darum geht, Formstoffreaktionen zu vermeiden, bzw. das Gussstück mit bestimmten Eigenschaften zu versehen, werden Zusätze, wie Glanzkohlenstoffbildner (für Eisen- und Stahlguss) verwendet [38; 41; 45; 47; 48].

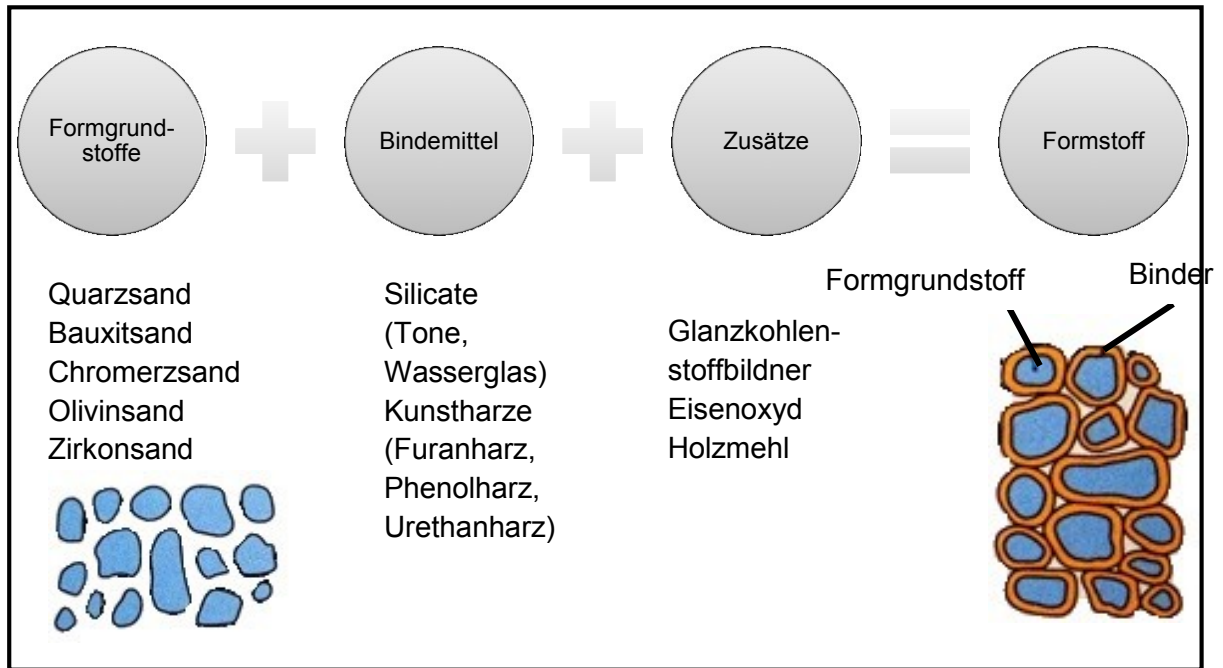


Abbildung 3.12: Bestandteile des Systems Formstoff, nach [41; 47]

Im Folgenden soll auf Formstoffsysteme, die für die vorliegende Arbeit Relevanz besitzen, eingegangen werden. Dabei spielt auch der Faktor Wirtschaftlichkeit eine Rolle, weshalb auch Sandsysteme beschrieben werden, die aufgrund der guten Verfügbarkeit weit verbreitet sind. Ein Beispiel hierfür ist bentonitgebundener Quarzsand.

### 3.3.1 Formgrundstoffe

Formgrundstoffe oder Gießereisande sind mineralische oder synthetische Granularien, welche Korndurchmesser von 0,02 bis 2,0 mm aufweisen. Als Form- bzw. Füllstoff werden bestimmte Anforderungen an derartige Sande gestellt. Formgrundstoffe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer mineralogischer Zusammensetzung, ihren physikalischen Eigenschaften sowie ihrer granulometrischen Eigenschaften. Diesbezügliche Anforderungen an Formgrundstoffe sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

**Tabelle 3.1: Anforderungen an Formgrundstoffe nach [49]**

<b>Eigenschaftskomplex</b>	<b>Eigenschaftsmerkmale</b>
Chemische und mineralogische Zusammensetzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemische Zusammensetzung, Anteil der Basiskomponente (z.B. Quarz- oder Bauxitsand)</li> <li>- Struktur der Körner</li> <li>- Chemismus der Kornsubstanz bzw. Kornoberfläche</li> </ul>
Granulometrische und morphologische Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Korngrößenanteile, mittlere Korngröße, Feinkornanteil und Korngrößenverteilung des Haufwerks</li> <li>- Kornform (kantig, rund)</li> <li>- Struktur der Kornoberfläche</li> <li>- Spezifische Oberfläche des Haufwerks</li> <li>- Chemische Aktivität der Kornoberfläche</li> <li>- Gasdurchlässigkeit</li> </ul>
Physikalischen und technologische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kornhärte</li> <li>- Korndichte</li> <li>- Ausdehnungsverhalten des Sandes</li> <li>- Sinterverhalten (bei LM-Guss nicht relevant)</li> <li>- Thermische Kennwerte (Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit)</li> </ul>

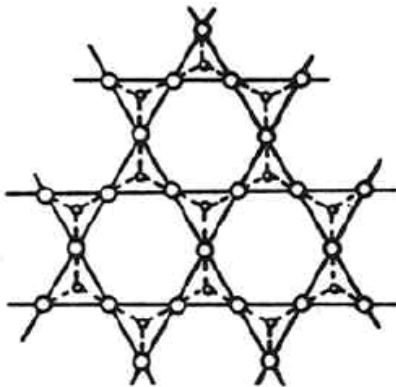
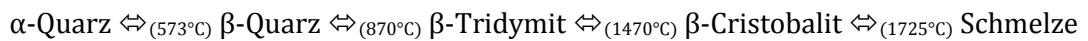
Von der Kornform sind viele Eigenschaften, wie die Benetzbarkeit oder die Schüttdichte abhängig. Nach DIN 52401 wird zwischen rund, kantengerundet, eckig und splittrig eingeteilt (siehe auch [50]). Ebenso wird die Kornoberflächenbeschaffenheit in glatt, rau und zerklüftet eingeteilt, wobei auch Zwischenstufen möglich sind [50]. Zur Bestimmung dieser Eigenschaften werden mikroskopische Untersuchungen herangezogen, wobei Rasterelektronenmikroskop (REM) -Untersuchungen heute schon als Standardmethode genannt werden dürfen.

## QUARZSAND

Der Aufgrund seiner Verfügbarkeit nach wie vor am meisten eingesetzte Formgrundstoff ist Quarzsand. Die Vorteile liegen in der Wirtschaftlichkeit, aber auch in der guten



Verarbeitbarkeit sowie den hohen Werten für Schmelz- und Sintertemperatur [38; 51]. Der Hauptbestandteil von Quarzsand ist Siliziumdioxid,  $\text{SiO}_2$ , welches in tetraedischer Form vorliegt, siehe Abbildung 3.13. Jedes Siliziumatom ist an vier Sauerstoffatome gebunden und jedes Sauerstoffatom immer an zwei Siliziumatome. Es ist in verschiedenen Modifikationen beständig und durchläuft mehrere Umwandlungsstufen mit steigender Temperatur:



**Abbildung 3.13: Struktur von festem Quarz, in der Mitte des Tetraeders jeweils das Siliziumatom, an den äußeren Ecken jeweils das Sauerstoffatom nach [52]**

Neben dem Hauptbestandteil des Quarzsandes, Siliziumdioxid, gibt es abhängig von der Lagerstätte noch Begleitminerale wie Feldspate, Tonminerale oder karbonatische Verbindungen [51].

Der auch für den Nichteisenguss problematische Sprung von  $\alpha$ -Quarz zu  $\beta$ -Quarz bei  $573^\circ\text{C}$  geht mit einer Volumenzunahme von rd. 2,5% einher. Dies bedeutet eine Längenänderung von rd. 1,5%. Für den Gießer kann dies ausschussbehaftete Folgen haben, wie z.B. Blattrippenbildung [38]. Quarz besitzt unter den bekannten einsetzbaren Formgrundstoffen den größten Längenausdehnungskoeffizienten [53].

## CHROMITSAND

Chromitsand, mit einem Anteil von rd. 46%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  hat sich in der Gießerei, und besonders in Anwendungen für Stahlguss bewährt. Aufgrund der hohen Packungsdichte und seiner chemischen Zusammensetzung besitzt der Chromitsand eine höhere Wärmekapazität, sowie eine höhere Leitfähigkeit im Vergleich zu Quarzsand [38; 51; 53].

Die mineralogische Zusammensetzung ist von Lagerstätte zu Lagerstätte unterschiedlich. Hauptbestandteile sind Ferrochromit ( $\text{FeO Cr}_2\text{O}_3$ ), sowie Picochromit ( $\text{MgO Cr}_2\text{O}_3$ ) enthalten. Daneben gibt es noch geringe Anteile an Quarz bzw. Tonerde. Das Schüttgewicht von Chromitsand liegt bei rd.  $2,7 \text{ kg/dm}^3$ , und ist damit deutlich schwerer als Quarzsand mit  $1,5 \text{ kg/dm}^3$ . Eine typische Zusammensetzung von Chromitsand nach ist in Tabelle 3.2 angegeben [54].

**Tabelle 3.2: Zusammensetzung von Chromitsand (Ursprung Südafrika)**

<b>Bestandteil</b>	<b>Anteil in %</b>
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	rd. 45
$\text{SiO}_2$	bis 1
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	bis 0,2
$\text{Al}_2\text{O}_3$	bis 16
MgO	bis 11

## BAUXITSAND

In den vergangenen Jahren bekam der klassische Quarzsand zunehmend Konkurrenz durch Sande alternativer Mineralien. Eines davon ist Bauxit, aus dem ein kugelförmiger Formgrundstoff gebrochen wird. Dieser Sand ist sowohl für den Gebrauch in Eisen- als auch in Leichtmetallgießereien vorgesehen. Durch die beinahe ideale Kugelform der Körner (Abbildung 3.14) besitzt dieser Sand gute Fließigenschaften und gute Gasdurchlässigkeit. Außerdem ist dieser Sand mit geringeren Kosten verbunden als Zirkonsand. Zudem weist Bauxitsand eine wesentlich geringere thermische Ausdehnung im Vergleich zum Quarzsand auf. Er kann mit allen gängigen Bindersystemen kombiniert werden, wobei die Bindersparnis bei gleicher Formstofffestigkeit (vgl. Kapitel 3.3.3) zwischen 35 und 60% beträgt, und deshalb ebenso als Vorteil gewertet werden kann. Allerdings sind im Vergleich zum Quarzsand die Kosten signifikant höher, weshalb eine flächendeckende Nutzung nicht in Frage kommt [55; 56]. Zusammensetzung des Bauxitsandes ist ersichtlich in Tabelle 3.3.



**Abbildung 3.14:** Makroaufnahme eines Bauxitsandes. Charakteristisch ist die runde Kornform des Formgrundstoffs. AFS 52, durchschnittliche Korngröße 289µm

**Tabelle 3.3: Zusammensetzung von Bauxitsand (Ursprung China) [55]**

Bestandteil	Anteil in %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	75
SiO <sub>2</sub>	9,12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-5
TiO <sub>2</sub>	3,9
	1,5
MgO	0,38
CaO	0,55

### 3.3.2 Bestimmung der Korngrößen von Formgrundstoffen

Gemäß dem VDG-Merkblatt P 27 – Prüfung von Formgrundstoffen ([57])– definiert sich die AFS Kornfeinheitsnummer eines Sandes näherungsweise als die Anzahl der Masche je Zoll (1 Zoll = 25,4mm). Als Faustregel gilt: je höher die Zahl, desto feiner ist das untersuchte Material. Im Formstoffbereich sind Werte zwischen 45 und 75 üblich. Die Berechnung kann über Multiplikatoren nach der gravimetrischen Bestimmung der Kornverteilung über folgende Formel vorgenommen werden [57]:

$$AFS = \frac{\sum(g_i \cdot M3_i)}{g} \quad (3.13)$$

Wobei gilt:

$g_i$	Massen der einzelnen Siebfractionen
$M3_i$	Multiplikator (tabelliert)
$g$	Gesamtmasse der Probe

analog lässt sich die mittlere Korngröße berechnen

$$MK_{calc} = \frac{\sum(g_i \cdot M2_i)}{g} \quad (3.14)$$

$M2_i$	Multiplikator (tabelliert)
--------	----------------------------

Der Zusammenhang zwischen mittlerer Korngröße und der AFS-Kornfeinheitsnummer lässt sich mit folgender Formel beschreiben [38]:

$$AFS \cdot \text{mittlerer Korngröße } [\mu\text{m}] = 15000 \quad (3.15)$$

Das sich daraus ergebende Schaubild ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Weiterführend lässt sich über die AFS-Nummer sowie einem Faktor die theoretische Oberfläche  $S_{th}$  berechnen (Glg 5.4), allerdings geht diese Näherung von kugelförmigen Körnern aus.

$$AFS = S_{th} \cdot 0,57 \quad (3.16)$$

Die wirkliche Oberfläche, wird über das sog. Durchströmverfahren ( $S_w$ ) bzw. Adsorptionsverfahren wie dem B.E.T.-Verfahren ( $S_{BET}$ ) bestimmt. Beim Adsorptionsverfahren nach B.E.T., welches nach seinen Entwicklern Brunauer – Emmet

- Teller benannt ist, werden auch innere Oberflächen berücksichtigt, was beim Durchströmverfahren nicht der Fall ist [58].

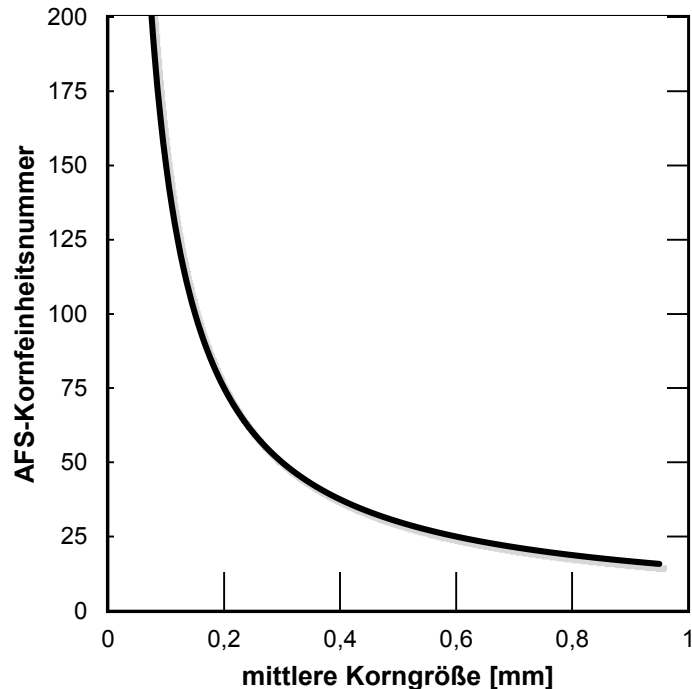


Abbildung 3.15: Abhängigkeit der AFS-Kornfeinheit von der mittleren Korngröße, nach, [38; 51]

### 3.3.3 Formstoffbindesysteme

Formstoffbinder haben die Aufgabe, das lose Kornhaufwerk zu einer kompakten Einheit zu verfestigen, welche während des Gießvorgangs seine Stabilität aufrechterhalten soll, wobei auf der anderen Seite gute Zerfallseigenschaften im Zuge des Auspackvorganges erwartet werden. Auch spielen verarbeitungstechnologische Aspekte wie die Rückführung in den Kreislauf oder die Emissionsneigung im Prozess und auch ökologische Auswirkungen eine große Rolle bei der Bewertung von Formstoff- bzw. Bindesystemen [38; 49].

Analog zu Abbildung 3.16 werden mehrere, auf unterschiedlichste Weisen wirkende Bindesysteme angewandt.

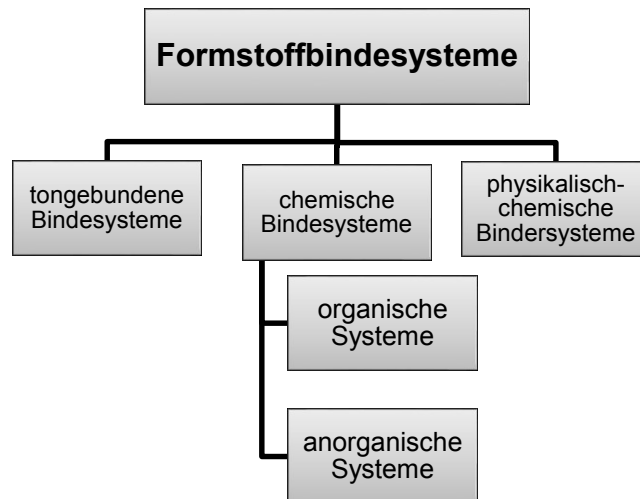
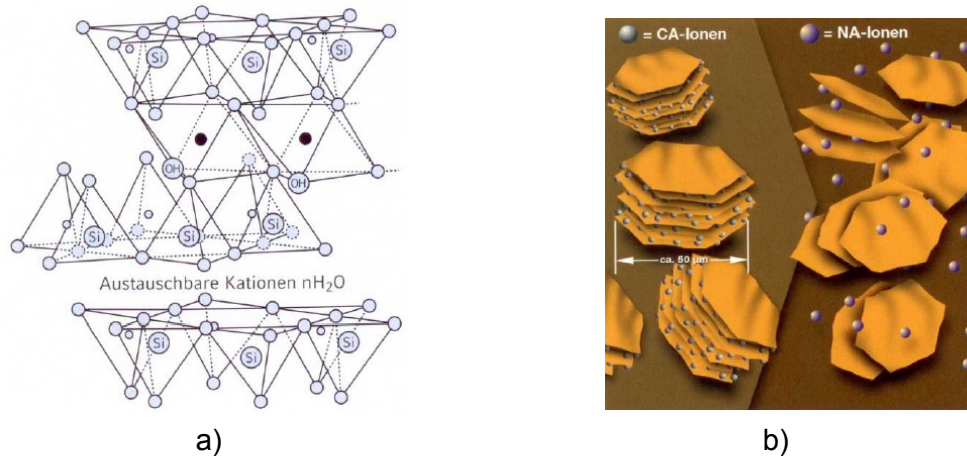


Abbildung 3.16: Einteilung der Bindsysteme nach ihrer Wirkweise

### Tongebundene Formstoffsysteme (Bentonit)

Diese Art von Bindsystemen haben nach wie vor große Bedeutung. Beispielsweise werden auf dem Eisengusssektor ca. 70-80% bentonitbasierende Formstoffe verwendet [59]. Bentonit ist ein Mineral in der Klasse der Smektite, welches definitionsgemäß mehr als 75% Montmorillonit enthält. Benannt ist der Bindeton nach seinem Fundort Fort Benton, Wyoming in den USA. Der Hauptbestandteil von Bentonit, Montmorillonit, bestimmt auch dessen Eigenschaften wie die Quellfähigkeit, Thixotropie sowie die Ionenaustauschfähigkeit. Das Dreischichtmineral Montmorillonit (siehe Abbildung 3.17) ist in Schichtpaketen aufgebaut. Die erste und dritte Schicht ist immer tetraedisch, und die zweite Schicht besitzt stets einen oktaedrischen Aufbau. In der Tetraederschicht vorkommende  $\text{Si}^{4+}$ -Ionen werden durch Kationen aus der Oktaederschicht, wie  $\text{Mg}^{2+}$  oder  $\text{Al}^{3+}$  ausgetauscht. Dadurch entsteht eine negative Überschussladung, welche durch  $\text{Na}^+$  Ionen kompensiert werden kann. Man spricht dann auch von einem „aktivierten“ Bentonit [41; 58–60].



**Abbildung 3.17: a) Dreischichtstruktur des Minerals Montmorillonit, b) Plättchenstruktur von Montmorillonit [61]**

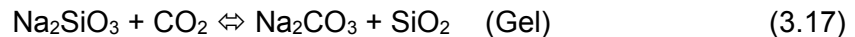
Da Bentonite häufig nur in der Modifikation mit  $Ca^{2+}$ -Einlagerung vorkommen, werden Bentonite im Hinblick auf den Einsatz im Gießereiprozess im Aufbereitungsprozess häufig mit Soda ( $Na_2CO_3$ ) „aktiviert“. Das Quellen der Schichten wird mit einer Wasserzugabe von 3-5% erreicht, was zu einer Aufweitung der Zwischenschichten führt. Angesichts dessen, dass Bentonitgebundene Formsande mechanisch verdichtet werden, entfällt die Wartezeit, wie sie bei chemischen Bindern aufgewendet werden muss. Bentonit hat weiters den Vorteil in geringen Kosten sowie der praktisch nicht vorhandenen Toxizität. Lt. VDG-Merkblatt R100 [62] ist der Ausdruck Nassformverfahren nicht mehr gebräuchlich. Auf modernen Formanlagen werden rechnet man heute mit einem Durchsatz von bis zu 600 Formen pro Stunde. Die Regenerationsrate von Grünsand in einer modernen Sandaufbereitungsanlage beträgt zwischen 95 und 99%. D.h. es müssen lediglich 1-5% Neusand bzw. Binder zugegeben werden [38; 62].

### Chemische Bindersysteme

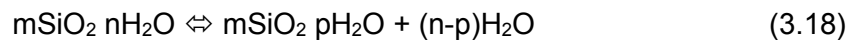
Bei den chemischen Bindemitteln unterscheidet man zwischen organischen und anorganischen Formbindemitteln. Aufgrund der Debatte um Emissionen und Arbeitsplatzbelastung in Gießereien, setzen sich mehr und mehr anorganische Systeme durch. Diese Bindemittel, welche zumeist auf Basis von Alkalisilikaten (Wasserglas), wie ( $Na_2O SiO_2 H_2O$ ) hergestellt werden, haben den Vorteil einer nahezu emissionsfreien Prozessführung. Darüber hinaus lassen sich Wassergläser verhältnismäßig günstig herstellen. Diesen Vorteilen stehen allerdings schlechtere Festigkeiten sowie



Zerfallseigenschaften gegenüber. Wassergläser können prinzipiell luftgetrocknet werden, lassen sich aber auch über Katalysatoren wie  $\text{CO}_2$  oder Estern aushärten [41]. Wasserglas ist eine hochviskose, farblose Flüssigkeit, wobei das  $\text{SiO}_2$  in seiner Funktion als Kolloid hauptsächlich die Eigenschaften als Bindemittel bestimmt. Die Aushärtung des Wasserglases ist reversibel und kann durch Beaufschlagung mit Wasser wieder rückgängig gemacht werden. Der Abbindeprozess kann am Beispiel von der Aushärtung mit  $\text{CO}_2$  wie folgt beschrieben werden (nach [63]):



Das dabei entstehende Gel verfestigt durch Wasserabgabe weiter:



Bei den organischen Bindern haben sich auf dem Sektor des Nichteisengusses vornehmlich Harze wie Phenol-Urethan (PepSet, ColdBox) und Furanharzsysteme durchgesetzt. Der Vorteil dieser Systeme ist dass diese kalt aushärten und keine mechanische Verdichtung, wie es bei Bentonitgebundenen Systemen der Fall ist, nötig ist. Die Dosierung erfolgt entweder in Chargenmischern oder in Druchlaufmischern.

Im Falle von PU-Systemen wird gelöstes Phenolharz mit Polyalkoholen gehärtet, wobei in Folge eines Polymerisationsprozesses Polyurethan entsteht, welches die Härteeigenschaften des Formstoffs bestimmt [38; 41; 51]. Bei der Kernherstellung können Katalysatoren wie Trimethylamin (TEA) oder Dimethylethylamin (DMEA) zum Einsatz kommen, was den Mengendurchsatz wesentlich erhöht. Die Aushärtezeit wird dadurch auf wenige Sekunden herabgesetzt [41].

Das im Zuge dieser Arbeit angewandte Pep-Set<sup>®</sup>-Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es nicht durch Polykondensation, sondern durch Polyaddition aushärtet. Dies hat den Vorteil, dass es gegen Feuchtigkeit nahezu unempfindlich ist, weil beim Molekülwachstum keine Spaltprodukte entstehen. Die Aushärtung erfolgt im Zuge einer Reaktion von Benzyletherpolyol und Polyisocyanat, wobei Polyurethan entsteht, siehe Abbildung 3.18. Ein weiterer wichtiger Vorteil dieses Verfahrens ist die günstige Verarbeitungscharakteristik. Das Verhältnis von Verarbeitungszeit zu Ausschaltzeit beträgt 2:1. Zudem ist das System Schwefel- und Phosphatfrei, besitzt eine gute Fließfähigkeit sowie ein sehr gutes Zerfallsverhalten [64].



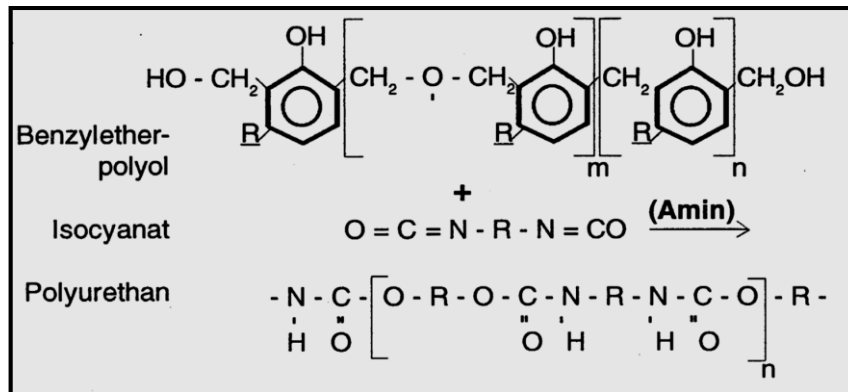


Abbildung 3.18: Reaktion zwischen Benzyletherpolyol und Isocyanat, wobei Polyurethan entsteht [65]

Furanharze sind gerade im Eisen- und Stahlgussbereich aufgrund der erreichbaren Härtegrade beliebt. Darunter versteht man Harze auf Basis von Furfurylalkohol, welche im Falle des kaltaushärtenden Systems mit Paratoluolsulfonsäure reagiert. Ein kritischer Punkt bei der Verwendung von Furanbasierenden Bindern ist der Schwefelgehalt, da Oberflächenfehler und erhöhter Sandverbrauch darauf zurückzuführen sind. Daher gibt es Bestrebungen, den Schwefelgehalt in den Härtersäuren zu reduzieren, wie in [66] nachzuschlagen ist. Außerdem lassen sich durch Reduktion des Gehaltes an Schwefel Arbeitsplatzemissionen signifikant senken.

### 3.3.4 Wärmekapazitäten und –leitfähigkeiten von Sanden

Für Gießereisande, die betrachtungsgemäß ein ungeordnetes Kornhaufwerk darstellen, welches zum großen Teil aus Luftzwischenräumen besteht, setzt sich die Wärmeleitung aus den Komponenten Leitung, Konvektion und Strahlung zusammen. Daraus ergibt sich dann additiv eine Gesamtleitfähigkeit:

$$\lambda_{ges} = \lambda_l + \lambda_{St} + \lambda_{Konv} \quad (3.19)$$

wobei gilt:

- $\lambda_l$                       Wärmetransport durch Leitung
- $\lambda_{St}$                      Wärmetransport durch Strahlung
- $\lambda_{Konv}$                  Wärmetransport durch Konvektion

Die eigentlichen Wärmeübergänge durch Leitung finden im polykristallinen oder amorph vorliegenden Sandkorn statt. In den Zwischenräumen sind die Wärmeübergänge von

Strahlung bestimmt. Und besonders bei feuchten Formstoffen sorgt der durch die Form ziehende Wasserdampf für eine Wärmeübertragung durch Konvektion [33].

Da die einzelnen Größen einer analytischen Betrachtung nur sehr schwer zugänglich sind, müssen experimentelle Methoden herangezogen werden, wie es DIN 52612 vorsieht. Bei diesem Prüfverfahren wird das zu untersuchende Material entweder in eine Einplatten- oder Zweiplattenvorrichtung aufgegeben, und entsprechende Temperaturen eingestellt. Über einfache physikalische Zusammenhänge kann dann die Wärmeleitfähigkeit des zu untersuchenden Stoffes berechnet werden (siehe Ggl. 3.19). Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 3.18. abgebildet.

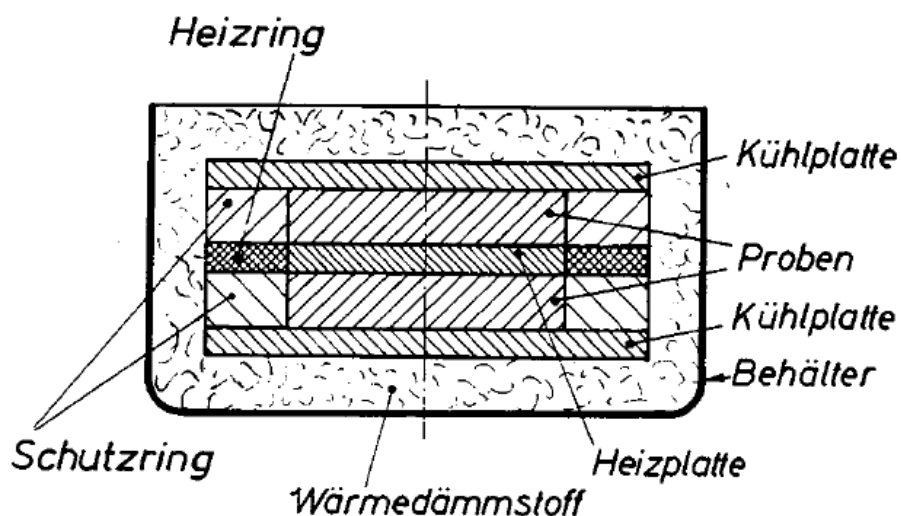


Abbildung 3.19: Zweiplattengerät mit horizontaler Versuchsanordnung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit [67]

Die analytische Auswertung und Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  erfolgt dann gemäß [68]:

$$\lambda = \frac{\varnothing \cdot s_m}{2A (T_{wm} - T_{km})} \quad (3.20)$$

wobei  $\varnothing$  der Wärmestrom ist. Bei elektrischer Heizung mit Gleichstrom kann dieser mit  $\varnothing=U \cdot I$  gleichgesetzt werden.  $s_m$  ist die gemittelte Plattendicke, und  $T_{wm}$  bzw.  $T_{km}$  die gemittelten Temperaturen der Kühl- bzw. Heizplatte.

Die spezifische Wärme beschreibt jene Wärmemenge, die nötig ist um eine gewisse Masse eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Üblicherweise ist diese Masse aus Gründen der Vergleichbarkeit auf 1kg normiert. Die spezifische Wärme, oder auch Wärmekapazität genannt, ist ihrerseits temperaturabhängig. Die Druckabhängigkeit hat bei der Betrachtung von Gasen einen großen Einfluss, kaum aber bei Feststoffen oder Flüssigkeiten [69; 70]. Daher gilt:

Spezifische Wärme bei konstantem Druck:

$$c_p = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_p \equiv \frac{dH}{dT} \quad (3.21)$$

Spezifische Wärme bei konstantem Volumen:

$$c_V = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_V \equiv \frac{dU}{dT} \quad (3.22)$$

Dabei ist H die Enthalpie, und U die innere Energie eines Körpers, bzw. Stoffes.

In Abbildung 3.20 sind spezifische Wärmekapazitäten dreier Formgrundstoffe dargestellt. Wird die Schüttdichte der Sande berücksichtigt, so ergeben sich signifikante Unterschiede bei den Wärmekapazitäten.

Grundsätzlich gilt, dass sich Körper mit steigenden Temperaturen ausdehnen, was konkret heißt, dass eine Volumsarbeit geleistet wird. Die geleistete Volumenarbeit wird gemäß folgender Gleichung geleistet [68]:

$$dH = dU + p \cdot dV \quad (3.23)$$

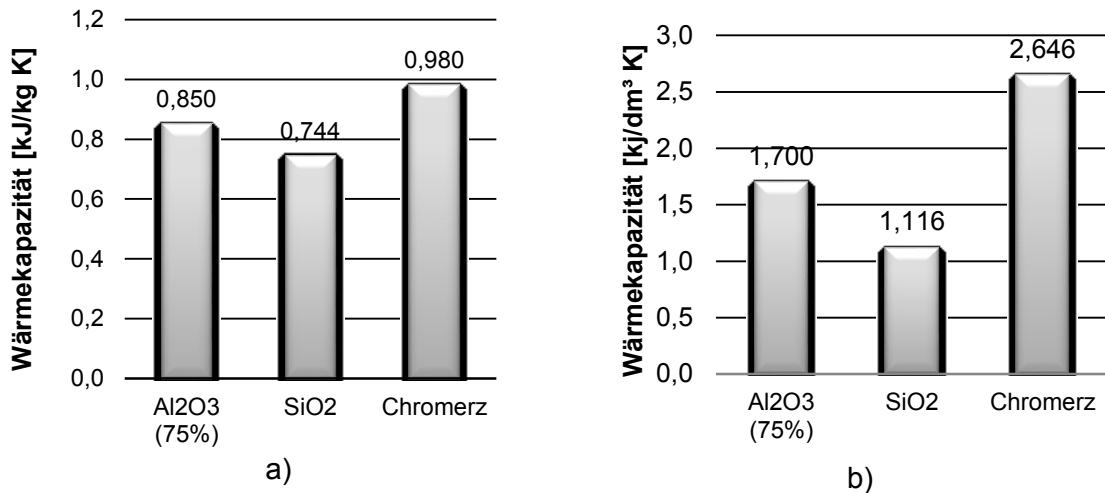


Abbildung 3.20: spezifische Wärmekapazitäten; a) bezogen auf die Masse b) bezogen auf das Volumen

### 3.3.5 Einfluss des Formstoffes auf die Wärmeleitung

Abgesehen von der Art und der Zusammensetzung eines Formstoffes ist die Wärmeleitfähigkeit sehr stark von der Packungsdichte abhängig. Hinzu kommt, dass sich bei steigender Temperatur der Anteil der Wärmestrahlung erhöht. Harzgebundene Sande haben die niedrigsten Wärmeleitwerte, Feuchte, also bentonitgebundene Formstoffe die höchsten. Gewiss ist, dass der Wassergehalt die Wärmeleitfähigkeit und auf –kapazität zu erhöhen vermag, siehe Abbildung 3.21. Korngröße und Kornverteilung haben keinen direkten Einfluss auf die Wärmeleiteigenschaften des Formstoffes. Diese wirken sich nur indirekt über den erreichbaren Packungszustand aus [33].

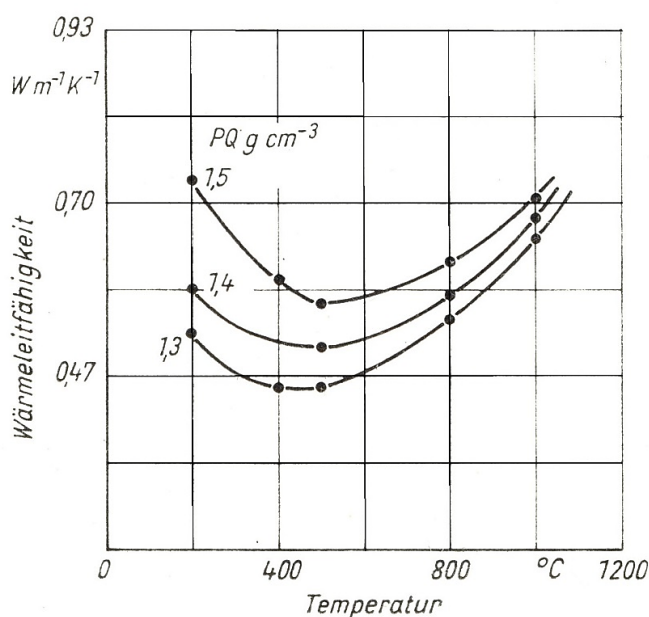


Abbildung 3.21: Wärmeleitfähigkeit für bentonitgebundenen Formstoff in Abhängigkeit von Temperatur und Packungsdichte [33]

### 3.3.6 Formstoffprüfung

Die Bestimmung der Korngröße, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, betrifft lediglich den Formgrundstoff. Die Formstoffprüfung, welche vornehmlich die mechanische Festigkeit der Formstoffe bewertet, hat zur Aufgabe, die Qualität der eingesetzten Materialien, sowie deren mengenmäßige Zusammensetzung in regelmäßigen Abständen zu verifizieren. Dadurch lässt sich formstoffbedingter Ausschuss im Gießprozess vermeiden. Darüber hinaus lassen sich technologische und prozesstechnische Kennzahlen, wie Aushärtungs- bzw. Ausschalzeit bestimmen [41; 45].

Bei den Prüfungen per se wird zwischen Beprobung von bentonitgebundenen und harzgebundenen Formstoffen unterschieden. Daneben werden allgemeine Tests durchgeführt, welche alle Arten von Formstoffen und deren Kombinationen abdeckt, siehe Tabelle 3.4.

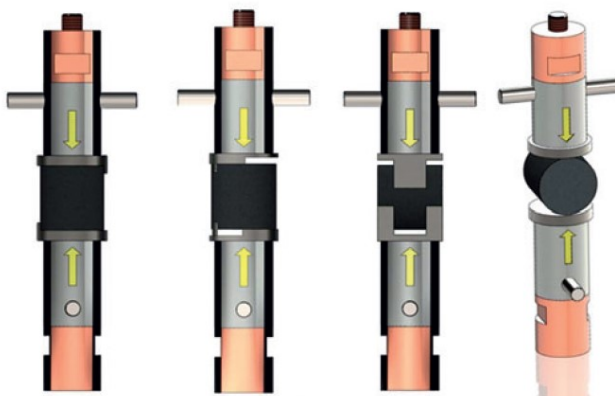
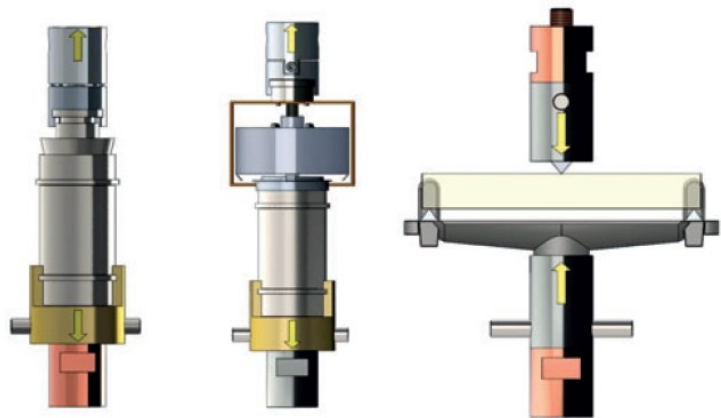
**Tabelle 3.4: Überblick über die wichtigsten Formstoffprüfungen (nach [41])**

<b>Prüfungen von Formstoffmischungen</b>		
<b>Allgemeine Prüfungen</b>	<b>Prüfung bentonitgebundener Formstoffe</b>	<b>Prüfung harzgebundener Formstoffe</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Druckfestigkeit</li> <li>• Scherfestigkeit</li> <li>• Biegefestigkeit</li> <li>• Gasdurchlässigkeit</li> <li>• Formhärte</li> <li>• Mittlere Korngröße</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verdichtbarkeit</li> <li>• Nasszugfestigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Härungsverhalten</li> <li>• Ausschalzeit</li> </ul>

Da die Formstoffprüfung im umfassenden Sinn für diese Arbeit keine Relevanz besitzt, wird auf die einzelnen Möglichkeiten der Prüfung nicht detailliert eingegangen. Es soll aber erwähnt werden, dass die Methoden der Formstoffprüfung bereits vor mehr als 60 Jahren entwickelt wurden, seitdem arbeitet die Gießereiindustrie nach diesem Stand der Technik. Dementsprechend sind noch heute alte handbetriebene Geräte in der

Formstoffprüfung im Einsatz. Zudem ist die qualitätsmäßige Überprüfung und Weiterentwicklung des Formsandes heute nicht mehr im Fokus einzelner Gießereibetriebe. Auf diesem Gebiet wurden in den letzten Jahrzehnten Entwicklungen hauptsächlich von Formstoffproduzenten- und Händlern vorangetrieben [71]. Die Abbildungen 3.22 und 3.23 zeigen die am häufigsten angewandten Prüfmethoden. Dabei ist auch zu beachten, dass einzelne Prüfungen für gewisse Anwendungen keinen Sinn machen. Als Beispiel sei angeführt, dass es für Kernformstoffe nicht auf die Zugfestigkeit ankommt. Kein Kern wird je auf Zug beansprucht werden, allerdings spielen Eigenschaften wie die Durchgasbarkeit oder die Biegefestigkeit sehr wohl eine Rolle.

**Abbildung 3.22: Prüfschema für Grünzug-Nasszug und Biegefestigkeitsprüfung [71]**



**Abbildung 3.23: Probenaufnahmevorrichtung für Druck- Scher-, Doppelscher und Spaltfestigkeitsprüfung [71]**

## 4 Experimentelle Methoden

Die vorliegende Arbeit behandelt den Verbundguss von CFK-Einlegern in Aluminium-Sandguss. Wie in Kapitel 4 beschrieben, ist es gießtechnisch weitgehend unproblematisch, höherschmelzende (Gusseisen oder Stahl in Aluminium) oder zumindest gleich schmelzend (Aluminium in Magnesium). Hier war es aber die Herausforderung, einen temperatursensitiven Einleger mit einer Wärmebeständigkeit von rd. 120 °C mit einer Aluminiumschmelze von rd. 700 °C zu umgießen. Die Einleger sind Profilabschnitte mit dem Querschnitt eines quadratischen Formrohres. Das Gussteil wurde bauteilnah konstruiert, um für spätere Anwendungen im Fahrzeugbereich möglichst plausible Aussagen treffen zu können. Eine Prinzipskizze dieses Aufbaus ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Das universale Ziel war es, eine Aussage zu erhalten ob das Sandgussverfahren für diese Werkstoffkombination geeignet ist. Um den Gießprozess steuern und kontrollieren zu können, war es ferner von Nöten die Prozessgrößen zu definieren und im Versuchsfeld gezielt variieren zu können.

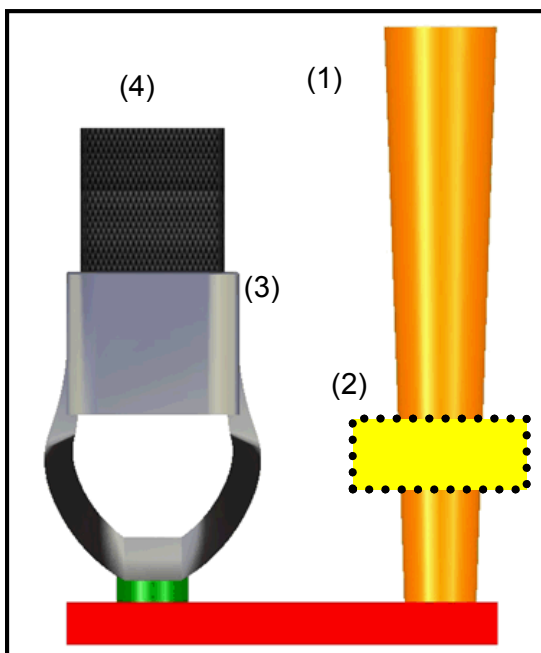
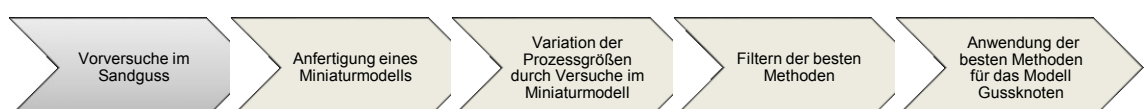


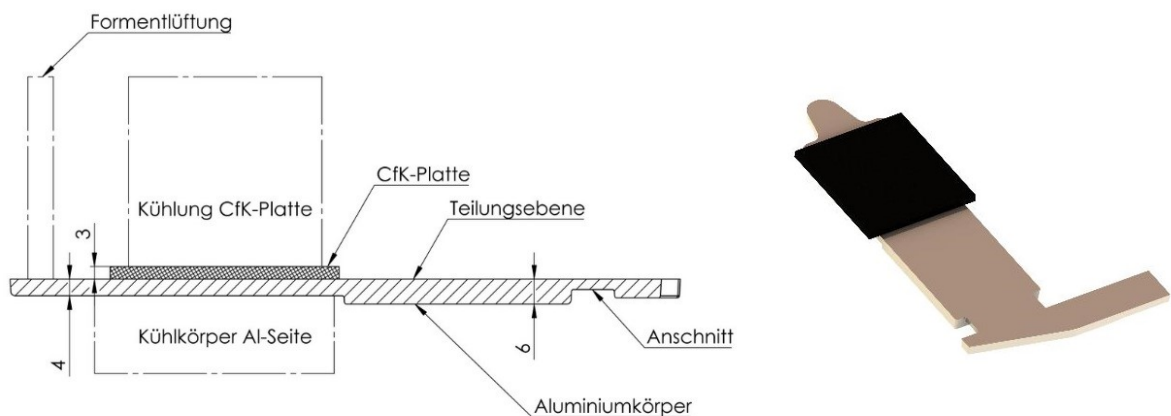
Abbildung 4.1: Schema CFK-Verbundguss im bauteilnahen Abschnittmodell inkl. Gießsystem; (1) Einguss, (2) Gießfilter, (3) Gussknoten, (4) CFK-Einleger;

Die Vorgangsweise, welche gewählt wurde ist in Abbildung 4.2 ersichtlich. Dabei war entscheidend, eine große Anzahl an Versuchen in kurzer Zeit realisieren zu können.



**Abbildung 4.2: Vorgangsweise zur Untersuchung der Prozessgrößen**

Aus diesem Grund wurde ein sogenanntes Miniaturmodell angefertigt. Dieses Modell besitzt drei Formnester, wobei statt CFK-(Hohl-)Profilen CFK-Platten zum Einsatz kommen. Die Platten werden dabei im Oberkasten fixiert, und von unten angegossen. Der Lauf und das Anschnittsystem sind im Unterkasten eingebracht. Der schematische Aufbau ist in einem Schnittbild in Abbildung 4.3 illustriert, nebst eines Formnestes in räumlicher Ansicht.

**Abbildung 4.3: links: Schematische Schnittansicht des Miniaturmodells; rechts: dreidimensionale Ansicht des Gusskörpers mit der CfK-Platte**

Das zweiteilige Modell wurde aus Kunststoff gefertigt, und lässt sich in der Porsche-internen Gießerei im kastenlosen Handformverfahren abbilden. Die zu selektierenden Einflussgrößen sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Dazu wurde eine Versuchsreihe abgebildet, wo diese Einflussgrößen variiert wurden. Die Ergebnisse wurden unter Rücksichtnahme auf für den Guss relevante Kriterien, wie der Erstarrungsgeschwindigkeit oder den Erstarrungsraten, ausgewertet und konnten dann auf den späteren Versuch im Modell Gussknoten übertragen werden. Den Kern der Auswertungen bildeten Temperaturkurven. Gemessen wurde dabei im erstarrenden Aluminiummantel, sowie auf der CFK-Innenseite. Es fanden ausschließlich Thermolemente vom Typ K (NiCr-Ni) der Klasse 1 Verwendung. Diese Thermolemente



können bei Temperaturen bis zu 1200°C eingesetzt werden [72]. In Tabelle 4.1 sind die zulässigen Messtoleranzen der Klassen 1-3 angeführt.

**Tabelle 4.1: Zulässige Abweichungen Thermoelement Typ K und Typ R, nach [72]**

Klasse	Temperaturbereich	Grenzabweichung	
		Fester Wert	Auf Temperatur bezogener Wert T in [°C]
1	-40 °C bis +1000 °C	± 1,5	± 0,004 ·  T
2	-40 °C bis +1200 °C	± 2,5	± 0,0075 ·  T
3	-200 °C bis +40 °C	± 2,5	± 0,015 ·  T

Eine Prozessgröße, welche im Miniaturmodell nicht untersucht werden konnte ist die Kontraktionskraft, welche auf den Einleger nach der Materialschrumpfung des erstarrten Aluminiums wirken. Standardmäßig wurden die Versuche mit der Legierung AlSi10Mg (EN-AC 43000) abgegossen. In weiteren Versuchen wurden die Legierungen AlSi7Mg0,3 (EN-AC 42100) sowie AlSi8Cu3 (EN-AC 46200) verwendet, um den Legierungseinfluss bewerten zu können. Hier können sich unterschiedliche Erstarrungsintervalle, sowie die Wärmeleitfähigkeit im festen Zustand bemerkbar machen. Durch unterschiedliche Erstarrungsschwindigkeit (variabler Siliziumgehalt) kann auch die Kontraktion des Profils unterschiedlich ausfallen, was allerdings im Rahmen dieser Arbeit nur rudimentär behandelt wurde.

Eine entscheidende Rolle fällt bei dieser Materialkombination der Beschichtung des CFK-Profils, bzw. des Einlegers zu. Diese hat die Aufgabe, thermische Einwirkung durch die hohen Temperaturen vom Einleger fern zu halten. Dazu wurden eigens isolierende Schichten auf mineralischer Basis eingesetzt, sowohl alkohol- als auch wasserbasierend. Die Schutzschicht wurde direkt auf das CFK-Material aufgetragen, wobei sich als zielführendste Methode das Spritzen herausgestellt hat.

Prozessgrößen wurden nach den Einflüssen, ersichtlich in Abbildung 6.4 untersucht.

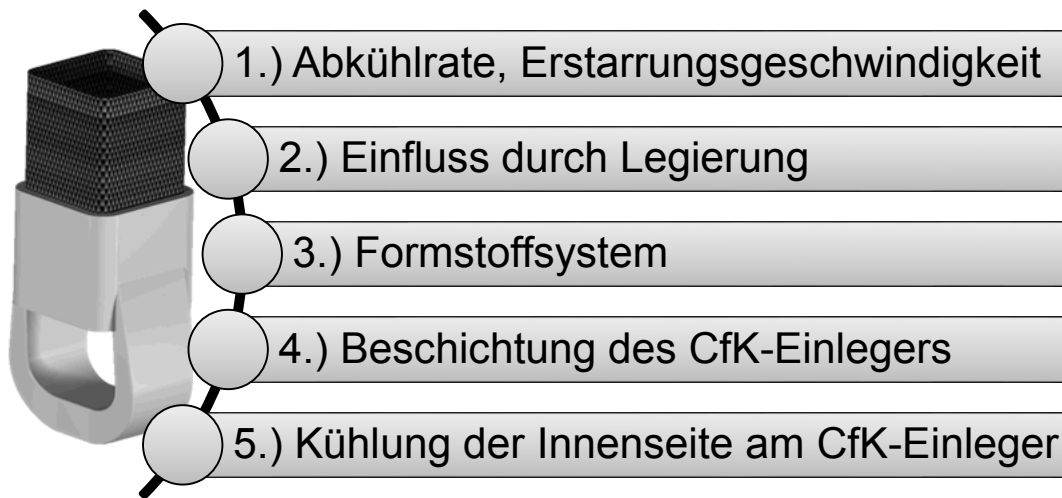


Abbildung 4.4: Zu selektierende Einflussgrößen, welche beim Verbundguss CFK-Aluminium eine Rolle spielen

#### 4.1 Abkühlrate, Erstarrungsgeschwindigkeit

Um eine Schädigung der CFK-Matrix zu verhindern, bzw. auf ein Mindestmaß einzuschränken war es unumgänglich, die Erstarrungsgeschwindigkeit bzw. die Abkühlrate auf ein Maximum zu erhöhen. Formsand hat im Allgemeinen schlechte Wärmeleiteigenschaften, weshalb in der Verbundzone, wo das Aluminium das Faserverbundprofil umgießen sollte, Kühlkokillen eingesetzt wurden. Diese Erkenntnis wurde im Laufe der Testreihen gewonnen, siehe Kapitel 5.2, Ergebnisse. Es wurden Kühlkörper aus unterschiedlichen Materialien angefertigt, um die Einflüsse der Wärmeleiteigenschaften der Kokillenmaterialien untersuchen zu können.

Analog den Forderungen von ALTENPOHL [73] wurde auf den Erstarrungsablauf ein besonderes Augenmerk gelegt. Dazu gehören der instationäre Wärmetransport, Konvektionsströmungen, Luftspaltbildung (infolge Schwindung) sowie die Unterschiede lokaler Erstarrungszeiten. Letzteres konnte in diesem Fall vernachlässigt werden, da der Mantel in der Verbundzone einen homogenen Wandstärkenverlauf besitzt, und dieser Bereich eingehend untersucht wurde.

Die Gefügeausbildung wurde im Rahmen von Schliffuntersuchungen ebenso betrachtet. Dazu standen Lichtmikroskope verschiedener Bauarten der Firma Zeiss zur Verfügung. Die bildanalytische Auswertung wurde mit der Software ImageAccess® der Firma iMagic durchgeführt.

## 4.2 Einfluss durch Legierung

Die in betrachteten Legierungen haben sich in der industriellen Fertigung von Teilen wie Zylinderköpfen, Getriebegehäuse, Automobilräder, Querlenkern uvm. bewährt. Die Legierung AlSi7Mg0,3 besitzt nach einer Wärmebehandlung gute Festigkeits- sowie Dehnungswerte. Aufgrund ihrer ausgezeichneten Gießbarkeit sowie der erreichbaren Festigkeiten ist die Legierung AlSi10Mg im Einsatz. Die beliebteste Legierung im Formguss ist wohl AlSi8Cu3, nicht zuletzt wegen des attraktiven Preises. Diese Legierung kann aufgrund ihrer hervorragenden Warmfestigkeit auch für Zylinderköpfe angewendet werden [73]. Technisch relevante Eigenschaftswerte sind in Tabelle 4.2 hinterlegt.

**Tabelle 4.2: Übersicht über ausgewählte Gusslegierungen und deren Eigenschaften**

Legierung	AlSi7Mg0,3	AlSi10Mg	AlSi8Cu3
EN-Bezeichnung	EN-AC 42100	EN AC-43000	EN AC 46200
Si-Gehalt*	6,5-7,5	9,0-11,0	7,5-9,5
Mg-Gehalt*	0,24-0,45	0,2-0,45	0,05-0,55
Cu-Gehalt*	<0,05	<0,05	2,0-3,5
Wärmeleitfähigkeit	151 W/mK**	113 W/mK***	120W/m/K
Erstarrungsintervall	55,6 °C**	39,0 °C***	bis zu 110 °C
Liquidustemperatur	612,8°	596°C***	
Aushärtung	Wärmebehandlung empfohlen	Wärmebehandlung empfohlen	Kaltaushärtend, Warmaushärtung möglich

\*Angaben entsprechen DIN EN 1706; \*\*nach [74] ; \*\*\* nach [75]

## 4.3 Formstoffsysteme

Analog der Theorie aus Kapitel 3.3, Formstoffe und Bindersysteme, ist es durch Variation des Formstoffsystems möglich, die Abkühlraten sowie das Erstarrungsverhalten gezielt zu beeinflussen. Neben dem am meisten eingesetzten Formgrundstoff Quarzsand existieren noch andere Sandsysteme, welche eine höhere Wärmeleitfähigkeit und eine höhere spezifische Wärmeaufnahmekapazität aufweisen. Allerdings sei angemerkt, dass diese alternativen Sande in ökonomischer Hinsicht differenziert bewertet werden müssen, da ihr Preis teils um Faktor 10 bis 30 höher liegt als jener von Quarzsand.

Im Zuge dieser Arbeit wurde mit Quarzsand und einem alternativen Formgrundstoff gearbeitet. Dabei handelte es sich um Bauxitsand. In beiden Fällen wurde ein als Bindersystem ein PU-

System (Pep-Set®) verwendet. Bauxitsand besteht zu ca. 75% aus dem namensgebenden Mineral Bauxit,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Aufgrund der geringfügig besseren Wärmeleiteigenschaften kann die Erstarrungsgeschwindigkeit und die Abkühlgeschwindigkeit positiv beeinflusst werden. Eine Auflistung verschiedener Formstoffe und deren Werte in Bezug auf Wärmeleitung zeigt Tabelle 4.3.

**Tabelle 4.3: Wärmeleitung verschiedener Formstoffe und Materialien, nach [51]**

<b>Formstoff bzw. Werkzeugmaterial</b>	<b>Wärmeleitung <math>\lambda</math> [W/mK]</b>
Quarzsand	0,2-0,40
Bauxitsand	0,35-0,50
Reinaluminium	235
Aluminiumlegierung 7075	130-160
Grauguss GJL 200	48
Elektrodenkupfer	372
Graphit	140

#### **4.4 Beschichtung des CFK-Einlegers**

Die Schutzschicht hat im Allgemeinen mehrere Anforderungen zu erfüllen. Neben der thermischen Isolationswirkung sind auch Faktoren wie das Korrosionsverhalten, der Beitrag zur Formfüllung und die thermische Ausdehnung zu bewerten [76].

Aufbauend auf vorhergehende Untersuchungen im Rahmen einer Masterarbeit von HEIDER [76]. wurden Schutzschichten eingesetzt, welche hinsichtlich technologischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte sinnvoll erschienen. Im Rahmen der Versuchsreihe am Miniaturmodell konnten hier zahlreiche Möglichkeiten getestet werden, um die am zielführendsten erscheinenden Varianten in die Versuche am Modell „Gussknoten“ zu übertragen. Es wurden neben eigens entwickelten Thermocoatings auch handelsübliche, für den Gießereigebrauch am Markt erhältliche Schichten verwendet. Schichten haben den Vorteil, dass sie aufgrund der Verfügbarkeit und des relativ niedrigen Preises attraktiv sind und fernerhin durch den mineralischen Aufbau keine elektrische Leitfähigkeit befürchtet werden muss, was die Korrosionsresistenz positiv beeinflusst. Da viele Schichten wasserbasierend sind und hydraulisch aushärten, muss das (freie) Wasser durch Erhitzen ausgetrieben werden. Da aber aufgrund der Temperatursensibilität des Substratmaterials eine Erhitzung von mehr als  $110^\circ\text{C}$  nicht zulässig ist, bleibt Kristallwasser gebunden, welches erst bei Temperaturen von  $200\text{-}300^\circ\text{C}$  entweichen kann.

## 4.5 Kühlung der Innenseite am CFK Einleger

Obwohl das Matrixmaterial des CFK-Einlegers (auf Epoxidharzbasis) eine im Vergleich zum Metall geringe Wärmeleitung besitzt, muss kann dennoch auf eine entsprechende Kühlung nicht verzichtet werden. Da das Profil im unteren Bereich verschlossen werden musste, bildet sich ein Wärmestau im Innenbereich. Aufgrund dessen wurden mehrere Untersuchungen vorgenommen, wobei sowohl über Fluide (Gase, Luft) als auch Feststoffe versucht wurde die Wärme von der CFK-Platte weg zu transportieren.

Für die Versuche im Modell Gussknoten setzte sich schließlich eine Luftlanze (siehe Kapitel 6) durch, welche eigens angefertigt wurde. Dabei wird über radial eingebrachte Bohrungen die gesamte Verbundgusszone mit Druckluft gekühlt, und so ein Überhitzen des CFK-Profiles verhindert.

## 5 Versuche Miniaturmodell

Nachdem sich die Versuche im Gussknoten als relativ aufwändig und kostspielig herausgestellt hatten, wurde vom Autor ein Weg gesucht, die Untersuchungen hinsichtlich Abkühlraten mit weniger Aufwand durchführen zu können. Die genaue Ausführung des für diese Sondierungsversuche angefertigten „Miniaturmodells“ wird in Kapitel 4 erläutert. Das Modell ist in Abbildung 5.1 ersichtlich

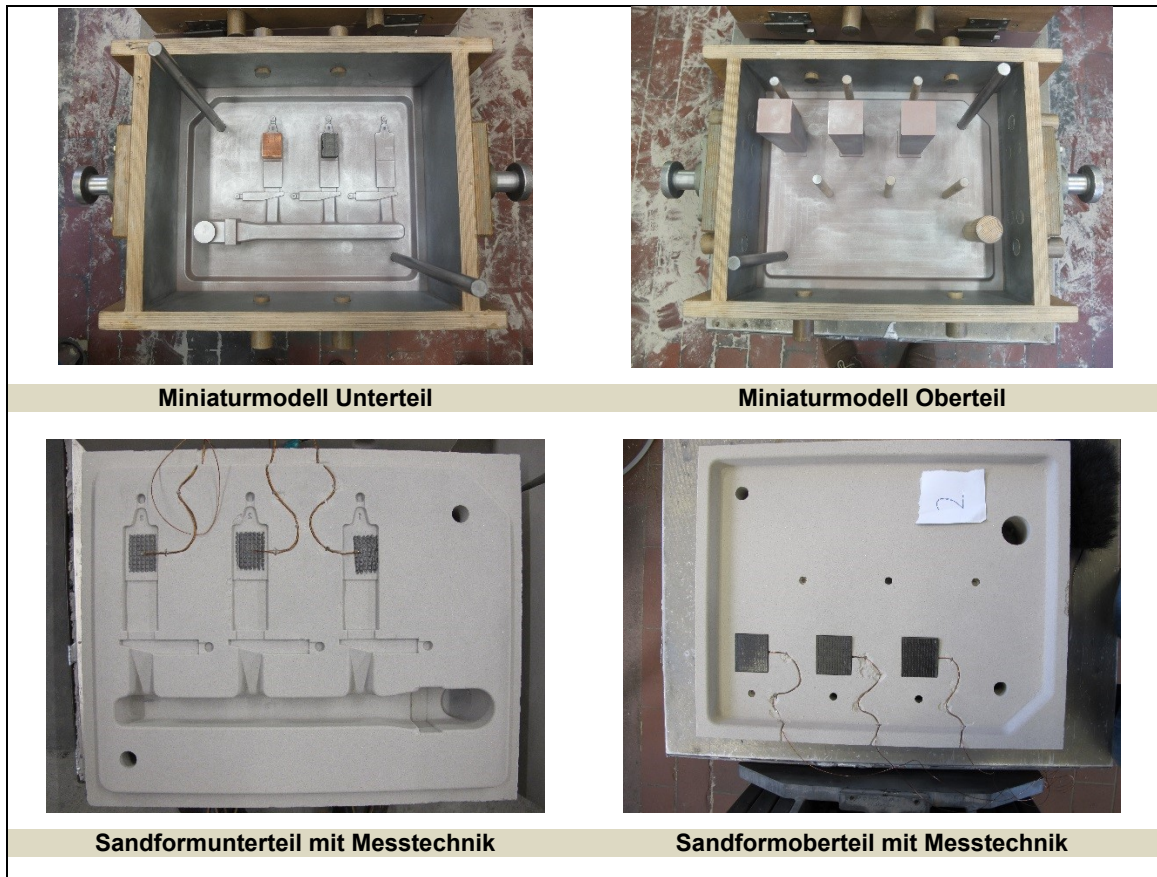


Abbildung 5.1: Eigens entwickeltes und angefertigtes Miniaturmodell für die Vorversuche

Um verschiedene Abkühlbedingungen abbilden und untersuchen zu können, wurden Formnester im Unterteil mit Kühlkörpern beaufschlagt. Für die obere Modellhälfte, wo die CFK-Platten eingesetzt wurden, wurden eigens Platzhalter angefertigt, welche in der späteren Sandform einen Hohlraum ausbilden. In diesen Hohlräumen war es möglich, Kühlmedien wie Kupfergieß oder Stahlkügelchen einzubringen. Die CFK-Platten wurden mit Formstiften im Oberteil fixiert, um sie gegen ein Herausfallen beim Zusammenlegen der Form zu sichern. Im Anschluss wurden die Kanäle für die Kabel der Thermoelemente in Handarbeit eingeritzt.

Der Abguss wurde in der Versuchsgießerei des Porsche Entwicklungszentrums in Weissach (EZW) vorgenommen. Das Standardsandsystem dort ist Quarzsand mit Polyurethanbindung (PepSet®. Firma ASK Chemicals), alternativ wurde Bauxitsand mit demselben Bindersystem angewendet.

Um das Verhalten des Faserverbundmaterials unter Temperatureinwirkung zu analysieren, wurden CFK-Platten ohne Beschichtung verwendet. Da die thermische Isolierung des CFK allerdings eine wichtige Rolle spielt, wurden, aufbauend auf Untersuchungen von HEIDER Beschichtungssysteme in Kombination mit verschiedenen Abkühlraten hinsichtlich ihrer Eignung untersucht.

Eine Form wurde im Bauxitsand abgeformt, um die Unterschiede in Punkte Abkühlung ermitteln zu können. Die restlichen der insgesamt neun Formen wurden in harzgebundenem Quarzsand abgeformt. Die den Versuchen zugrundeliegenden Abkühlkombinationen sind in Tabelle 5.1 gelistet. Die Sandpakete konnten nach rd. 30 min Aushärtezeit ausgeformt und für den Versuch vorbereitet werden. Die Arbeitsschritte sind in Abbildung 5.2 illustriert.

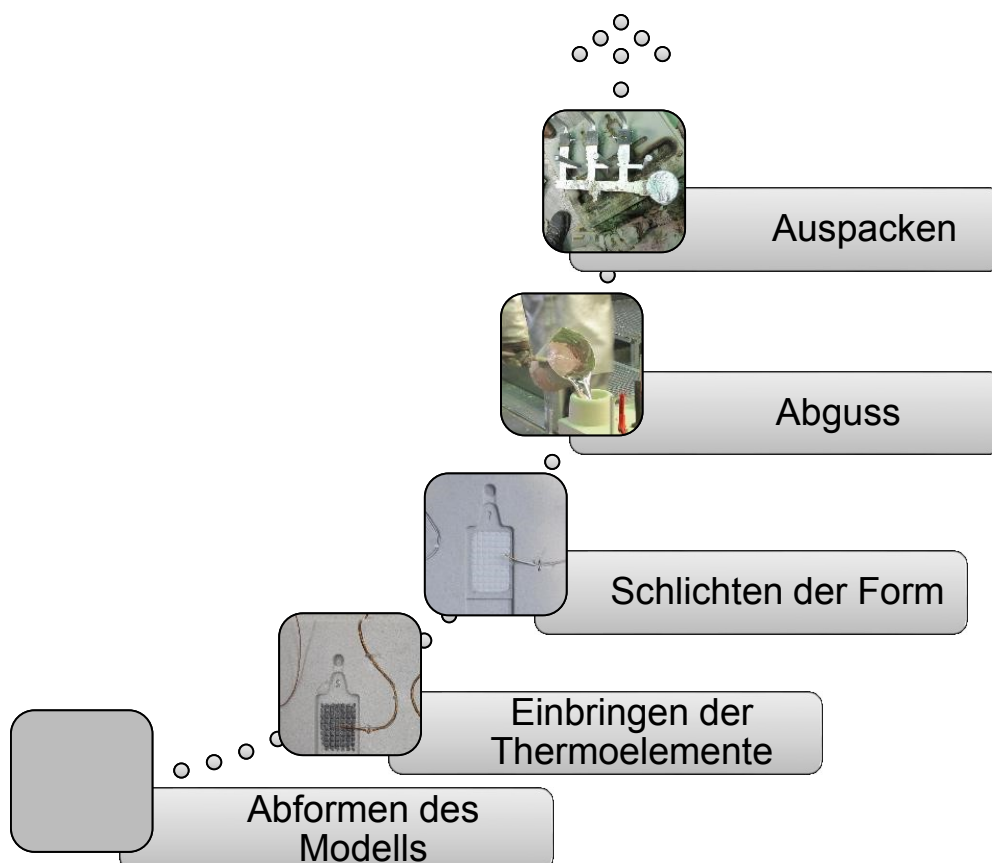


Abbildung 5.2: Arbeitsablauf beim Versuch "Miniaturmodell"



Tabelle 5.1: Übersicht über die Versuchsplanung für die Vorversuche im Miniaturmodell. Insgesamt 27 Kombinationen konnten untersucht werden

Form-Nr./Leg.	CFK-Platten:	Formnest	Seite CFK	Aluminium
1 AlSi10Mg	<b>unbeschichtet</b>	1.1	Quarzsand	Cu-Kühlkörper
		1.2	Quarzsand	GG-Kühlkörper
		1.3	Quarzsand	Quarzsand
2 AlSi10Mg	<b>unbeschichtet</b>	2.1	Kupfergrieß	Cu-Kühlkörper
		2.2	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
		2.3	Kupfergrieß	Quarzsand
3 AlSi10Mg	<b>unbeschichtet</b>	3.1	hohl	GG-Kühlkörper
		3.2	hohl+LK	GG-Kühlkörper
		3.3	Cu-Kühlkörper	GG-Kühlkörper
4 AlSi10Mg	<b>geschlichtet (mit Silico IM 801)</b>	4.1	Cu-Kühlkörper	GG-Kühlkörper
		4.2	Kupfergrieß	Cu-Kühlkörper
		4.3	Quarzsand	Quarzsand
5 AlSi10Mg	<b>H 000-402-129</b>	5.1	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
		5.2	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
		5.3	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
6 AlSi10Mg	<b>H 000-402-132</b>	6.1	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
		6.2	Kupfergrieß	Al-Kühlkörper
		6.3	Kupfergrieß	Gr.-Kühlkörper
7 AlSi10Mg	<b>ASK CC AL 702</b>	7.1	Kupfergrieß	Al-Kühlkörper
		7.2	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
		7.3	Bauxitsand	Bauxitsand
8 AlSi7Mg	<b>KS 1</b>	8.1	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
		8.2	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
		8.3	Quarzsand	Quarzsand
9 AlSi8Cu3	<b>ASK CC AL702</b>	9.1	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
		9.2	Kupfergrieß	GG-Kühlkörper
		9.3	Quarzsand	Quarzsand



## 5.1 Auswertung der Versuche im Miniaturmodell

Um die Auswertung der Versuche einer Systematik zuzuführen, war es notwendig, die zu untersuchenden Kennwerte und Erscheinungen einzugrenzen, siehe Abbildung 5.3. Kern der Messungen bildete hierbei die Abkühlkurve des Aluminiummantels der Verbundgusszone und die Rückseitentemperatur (Miniaturmodell), bzw. die Innentemperaturen des CFK-Profiles (Modell Gussknoten). Diese wurden ausgewertet und Abkühlraten, Dauer der Erstarrung sowie Maximaltemperaturen am CFK-Material bestimmt.

In die Sandform wurden die Thermoelemente zur Aufzeichnung der Temperatur eingebracht, die Abtastrate betrug dabei immer 100Hz, d.h. es werden pro Sekunde 100 Werte aufgezeichnet. Dabei wurde immer ein Thermoelement im Aluminiummantel platziert, ein zweites auf der Rückseite der CFK-Platte. Pro Nest wurden also zwei Werte mitgeschnitten. Die verwendete Software war ein Porsche-eigenes Messtool namens PEA32 2.5.3.

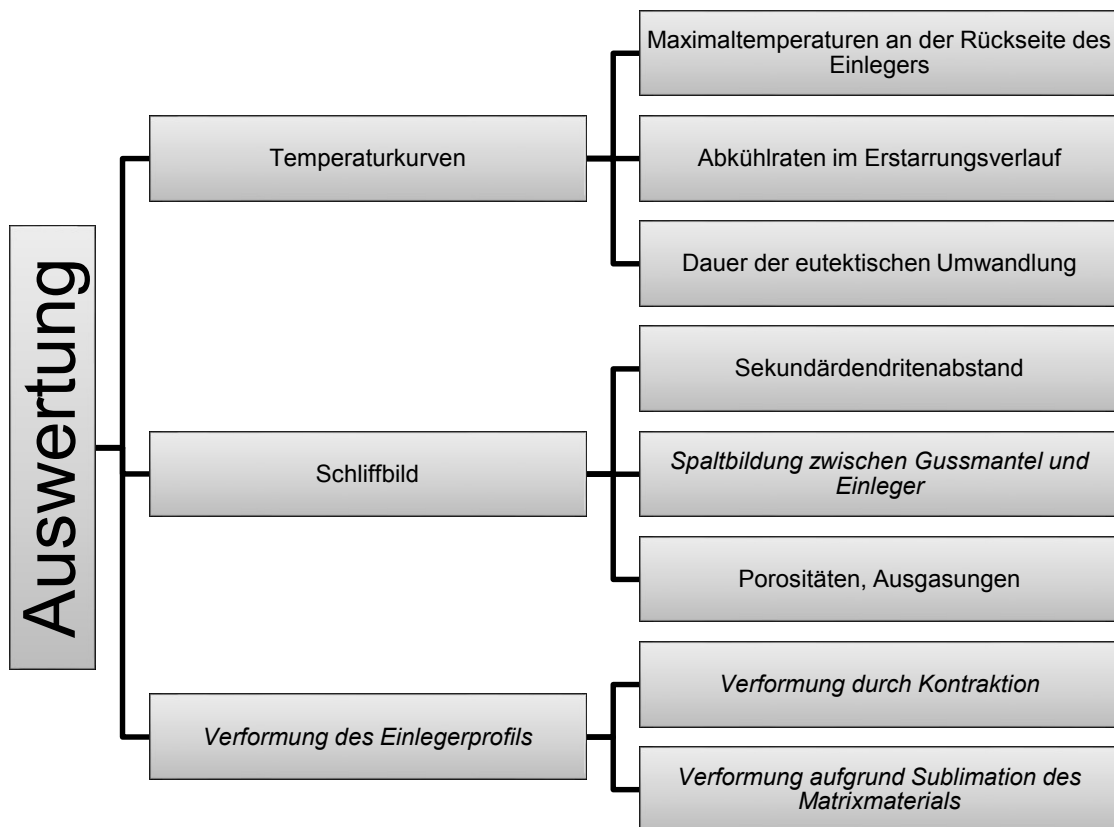


Abbildung 5.3: Auswertungssystematik, kursiv: nur am Modell Gussknoten anwendbar

Die Schliffbilder dienen dazu, Porositäten zu erkennen und ggf. Dendritenarmabstände (engl. Dendrite arm spacing, DAS) zu bestimmen. Der Wert des DAS hat einen Einfluss auf die mechanischen Festigkeitswerte, weshalb dieser auch eine Rolle in den Untersuchungen

spielte [24]. Die Spaltbildung zwischen Gussmantel und Einlegeteil wurde, sofern messbar, ebenso im Lichtmikroskop vermessen. Allerdings sei hier erwähnt, dass diese Messungen mit einer gewissen Unschärfe verbunden sind, da CFK-Profile mit unterschiedlichen Güten verwendet wurden. Ausgasungen, verursacht vom Harz der Faserverbundmatrix, konnten bereits mit freiem Auge detektiert werden, entgegen Porositäten, welche eines einer Messung am Lichtmikroskop bedurften.

Messgrößen, wie der Spalt zwischen Einleger und Gussmaterial konnten nur am Modell Gussknoten gemessen werden, da sich die Platten in den Vorversuchen aufgrund des nicht vorhandenen Stoffschlusses selbstständig lösten. Ebenso war eine Verformung nicht feststellbar.

Die Erkenntnisse aus den Vorversuchen im Miniaturmodell wurden sondiert, und in der Folge auf das Modell Gussknoten übertragen. Einige Strategien konnten dadurch schon im Vorfeld als nicht zielführend und für die Aluminium-CFK-Mischbauweise nicht brauchbar verworfen werden. Übrig blieben Kombinationen (siehe Abbildung 5.4), welche im Modell Gussknoten angewandt und sorgfältig geprüft wurden.

Kühlung Aluminium	Formstoffsystem	Kühlung CfK	Beschichtung CfK
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Graugusskörper</i></li> <li>• Kupfer</li> <li>• <i>Aluminium</i></li> <li>• Graphit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Quarzsand</i></li> <li>• <i>Bauxitsand</i></li> <li>• <i>Chromiterzsand*</i></li> <li>• <i>Zirkonsand*</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kupfergrieß</li> <li>• NIRO-Grieß</li> <li>• Kupfer massiv</li> <li>• Quarzsand</li> <li>• <i>Luftkühlung</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Hescoat-Systeme</i></li> <li>• <i>Albocer-Systeme (Fraunhofer)</i></li> <li>• <i>Schichten</i></li> <li>• unbeschichtet</li> </ul>

Abbildung 5.4: Sondierung der Varianten für die Versuche im Modell Gussknoten; ins Modell Gussknoten übertragene Varianten sind grün, bzw. kursiv gekennzeichnet. Mit \* versehene Systeme konnten nicht beprobt werden.

## 5.2 Ergebnisse der Versuche im Miniaturmodell

Für eine positive Bewertung der Ergebnisse war entscheidend, die Temperatursensitivität des CFK-Einlegers zu berücksichtigen. Da die dauerhaft ertragbare Maximaltemperatur der Epoxidharzmatrix bei rd. 120 °C liegt [77], war es ein entscheidendes Kriterium, bei der Rückseitentemperatur der CFK-Platte 120 °C nicht zu überschreiten. Die aufgezeichneten Temperaturkurven zeigten, abhängig von der Abkühlbedingung des Aluminiummantels, der

CFK-Rückseitenkühlung und der Beschichtung der CFK-Platten unterschiedliche Charakteristika. Die Kombination aus Kühlkörper, Rückseitenkühlung und CFK-Beschichtung sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nochmals in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2: Kombination der Versuchsbedingungen für Form 4 (Auszug aus Tabelle 5.1)

Form-Nr./Leg.	CFK-Platten:	Formnest	Seite CFK	Aluminium
4 AlSi10Mg	<b>geschichtet (mit Silico IM 801)</b>	4.1	Cu-Kühlkörper	GG-Kühlkörper
		4.2	Kupfergieß	Cu-Kühlkörper
		4.3	Quarzsand	Quarzsand

Da für Form 4 ein signifikanter Unterschied der Temperaturverläufe sichtbar ist, wird diese Abkühlkurve in Abbildung 5.5 exemplarisch dargestellt. Bei der Betrachtung des Diagramms ist zu beachten, dass die Abkühlung der Schmelze am oberen Ende mit der Gießtemperatur startet, wohingegen die Temperatur an der Rückseite des CFK-Einlegers ausgehend von Raumtemperatur ansteigt.

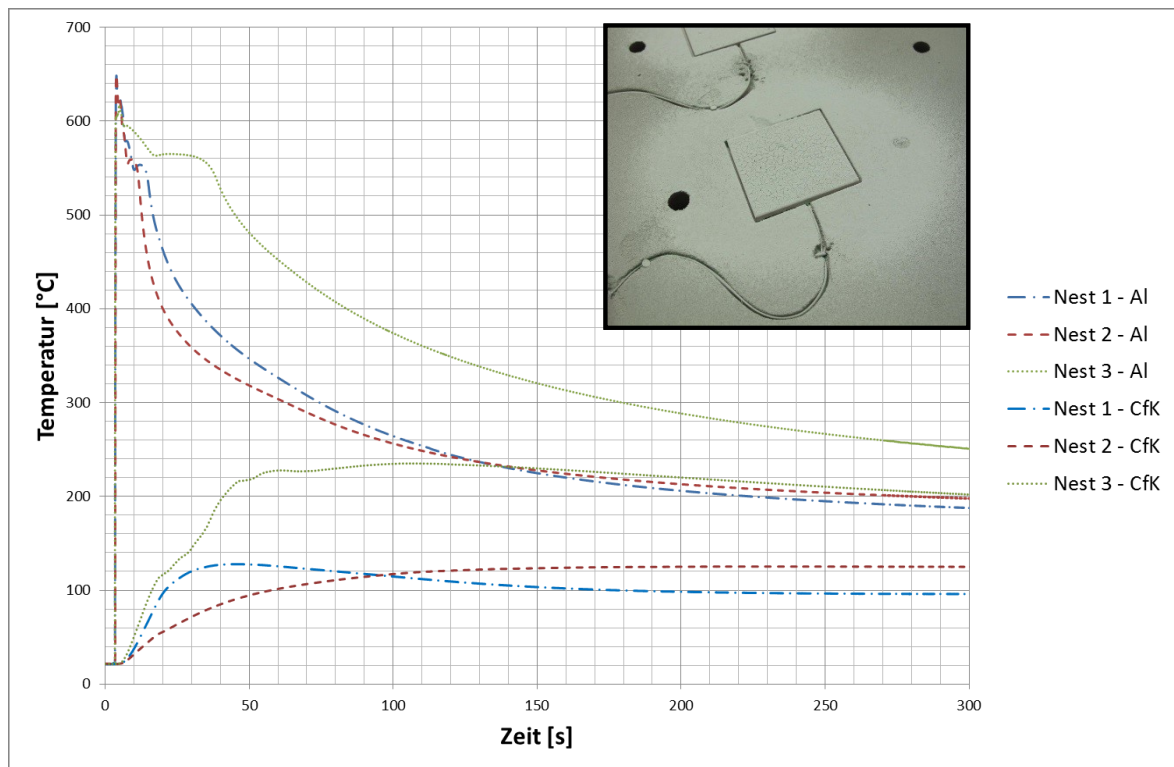


Abbildung 5.5: Abkühlkurve für Versuch im Miniaturmodell, Form 4, Bild rechts oben: thermische Schutzschicht in Form einer handelsüblichen Schichte (Velvacat)

Hier kommt es zu beträchtlichen Unterschieden in der Abkühlrate, welche am deutlichsten im Bereich der Erstarrung (zw. 620°C und 550°C) erkennbar sind, siehe Abbildung 5.6 Der Wärmeentzug beansprucht aufgrund der im Vergleich zu Metallen geringeren Wärmeleitung

im Quarzsand wesentlich länger. Aufgrund höherer Werte für die Depression des eutektischen Bereiches (Gleichgewicht der Wärmeabfuhr und dem Entzug der latenten Wärme bei eutektischer Temperatur) und folglich größerer Unterkühlung der Schmelze stellt sich auch ein feineres Gefüge ein, je höher die Abkühlrate ist, siehe auch Kapitel 3.

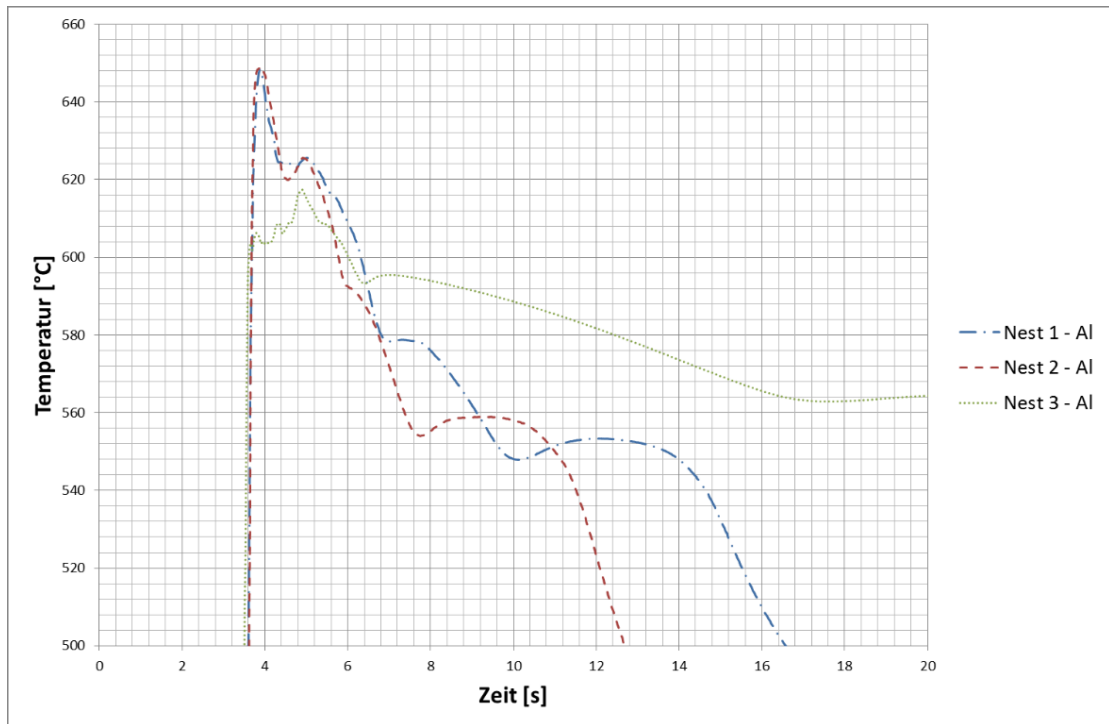


Abbildung 5.6: Abkühlkurve im Erstarrungsbereich für Form 4

Die Abkühlrate innerhalb des Erstarrungsintervalls konnten aufgrund ihres angenähert linearen Charakters ausgewertet werden. Widergegeben wird die Steigung der Abkühlkurve zwischen Liquidus- und Solidustemperatur. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3 gelistet. Hier ist ein deutlicher Unterschied zwischen metallischem Formmaterial und konventionellem Quarzsand erkennbar. Die verwendete Graugusslegierung war GJL-200, für die Kupferkokille wurde Cu-ETP mit einer Reinheit von 99,9 % Cu verwendet.

Tabelle 5.3: Abkühlraten für verschiedene Formmaterialien in den unterschiedlichen Nestern bei Form 4

Formnest	Kühlmedium	Abkühlrate [K/s]
1	Grauguss	-15,41
2	Kupfer	-32,04
3	Quarzsand	-3,49

Deutlich wird der Unterschied der Abkühlraten auch bei Betrachtung der Gefügebilder, woraus Dendritenarmabstände (DAS) vermessen wurden, siehe Abbildung 5.7. Analog einer

Untersuchung des Österreichischen Gießereinstituts [24] konnten dabei signifikante Unterschiede gemessen werden.

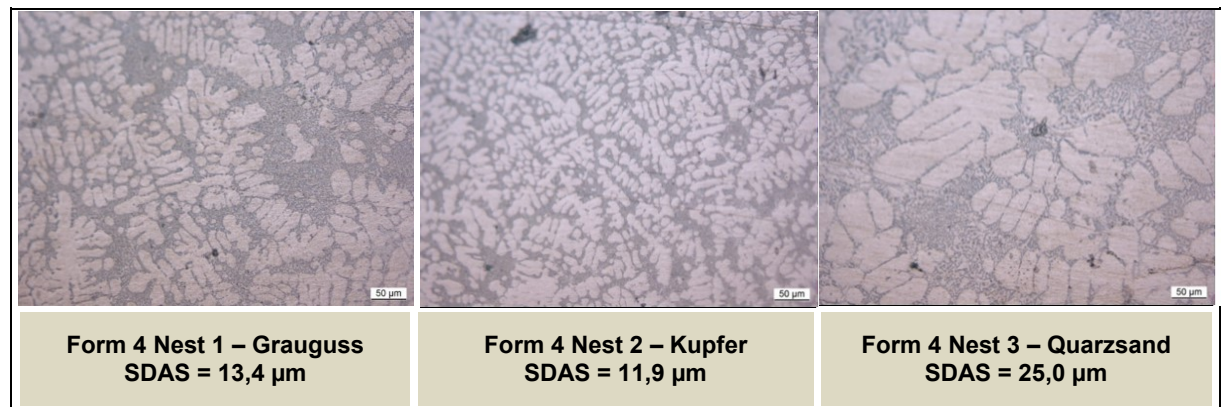


Abbildung 5.7: SDAS-Werte für Form 4, Nest 1-3

Ein signifikanter Unterschied konnte auch bei den eutektischen Temperaturen festgestellt werden. So war das Temperaturmaximum der eutektischen Umwandlung bei auf Grauguss erstarrter Schmelze bei 559,0 °C, für Kupfer wurden 553,3 °C erreicht, und auf Quarzsand war die eutektische Temperatur 564,88 °C. Auch war die Dauer bis zur vollständigen Erstarrung der Schmelze auf metallischen Körpern messbar rascher als auf Quarzsand. Die Zeit bis zur vollständigen Erstarrung sowie die maximale Abkühlrate nach der erfolgten Erstarrung der Schmelze konnten aus der Ableitung der Abkühlkurve ausgewertet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 aufgelistet

Tabelle 5.4: Ende der Erstarrung und maximale Abkühlrate im Festen für Form 4

Formnest	Kühlmedium	Erstarrungsende [s]	max. Abkühlrate [K/s]
1	Grauguss	15,20	-28,3
2	Kupfer	12,0	-40,2
3	Quarzsand	38,9	-8,8

In diesem Fall (Form 4) war die Beschichtung von Rissen durchzogen, in der Folge war das Substrat nicht zur Gänze geschützt, und Reaktionsgase des Epoxidharzes konnten bis zur Grenzschicht zwischen Aluminium und Isolierschicht durchdringen. Alle drei Nester wiesen Ausgasungen aus, erkennbar in Abbildung 5.8. Obwohl die Rückseitentemperaturen in Nest 1 und 2 im Vergleich sehr niedrig waren, musste die Art der Thermoschutzschicht als ungenügend bewertet werden, und wurde für die Versuche im Modell Gussknoten nicht mehr herangezogen.



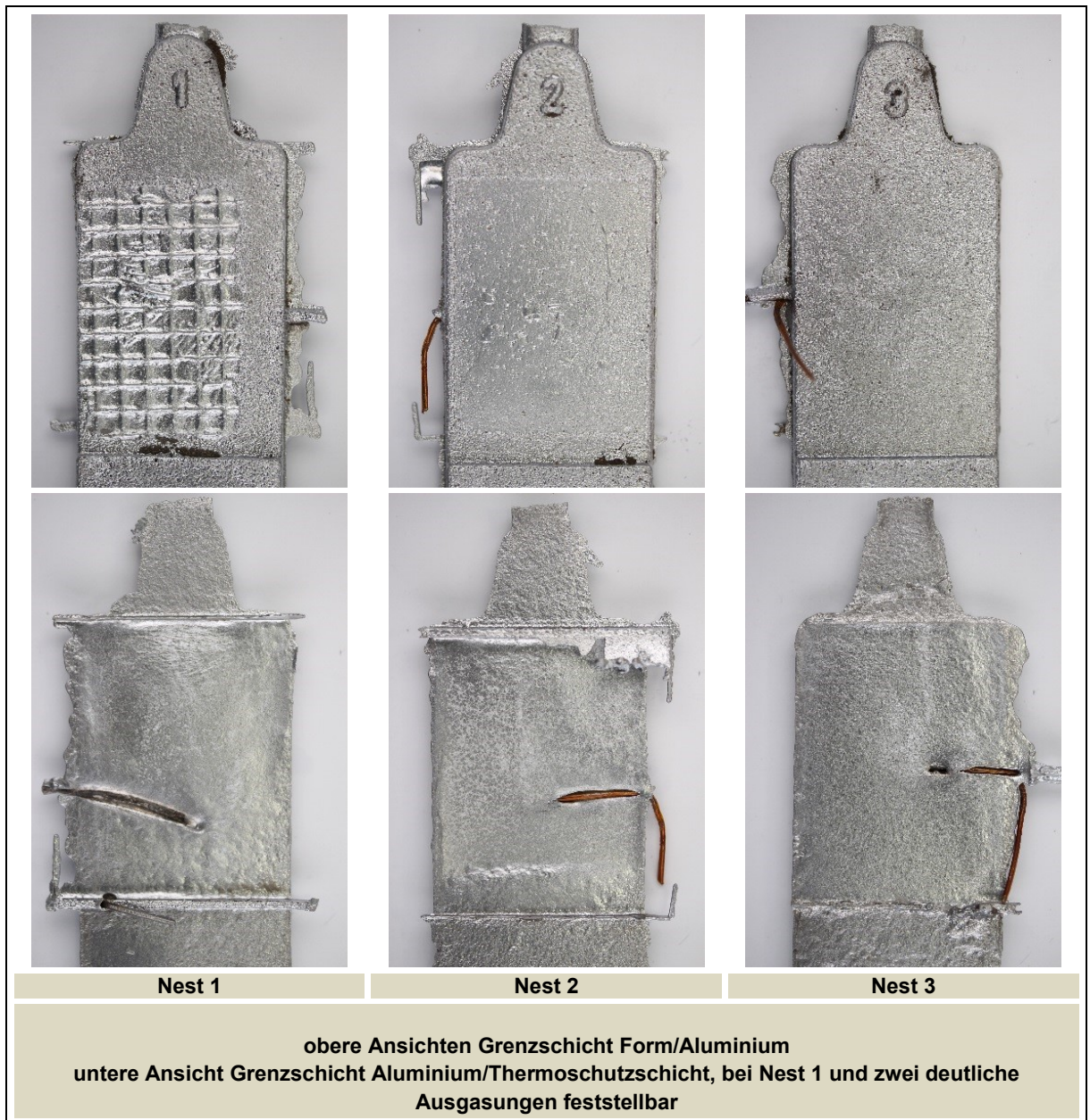


Abbildung 5.8: Abgüsse der einzelnen Fornester aus Form 4

Die Thermoschutzschicht (Isolierschichte Velvacat 801, Firma ASK) wurde mit einer Schichtdicke von 0,8-1,0 mm aufgetragen, welche für den Gebrauch von Schichten nicht zulässig ist. Außerdem liefert der Düsenkopf einer konventionellen Spraydose für eine präzise Anwendung dieser Art ungenügende Dosierbarkeit während des Auftrags. Die geschichtete Platte wurde nach dem Abguss einer Prüfung unterzogen, welche eine Rissbreite von bis zu 100  $\mu\text{m}$  ergab, siehe Abbildung 5.9.

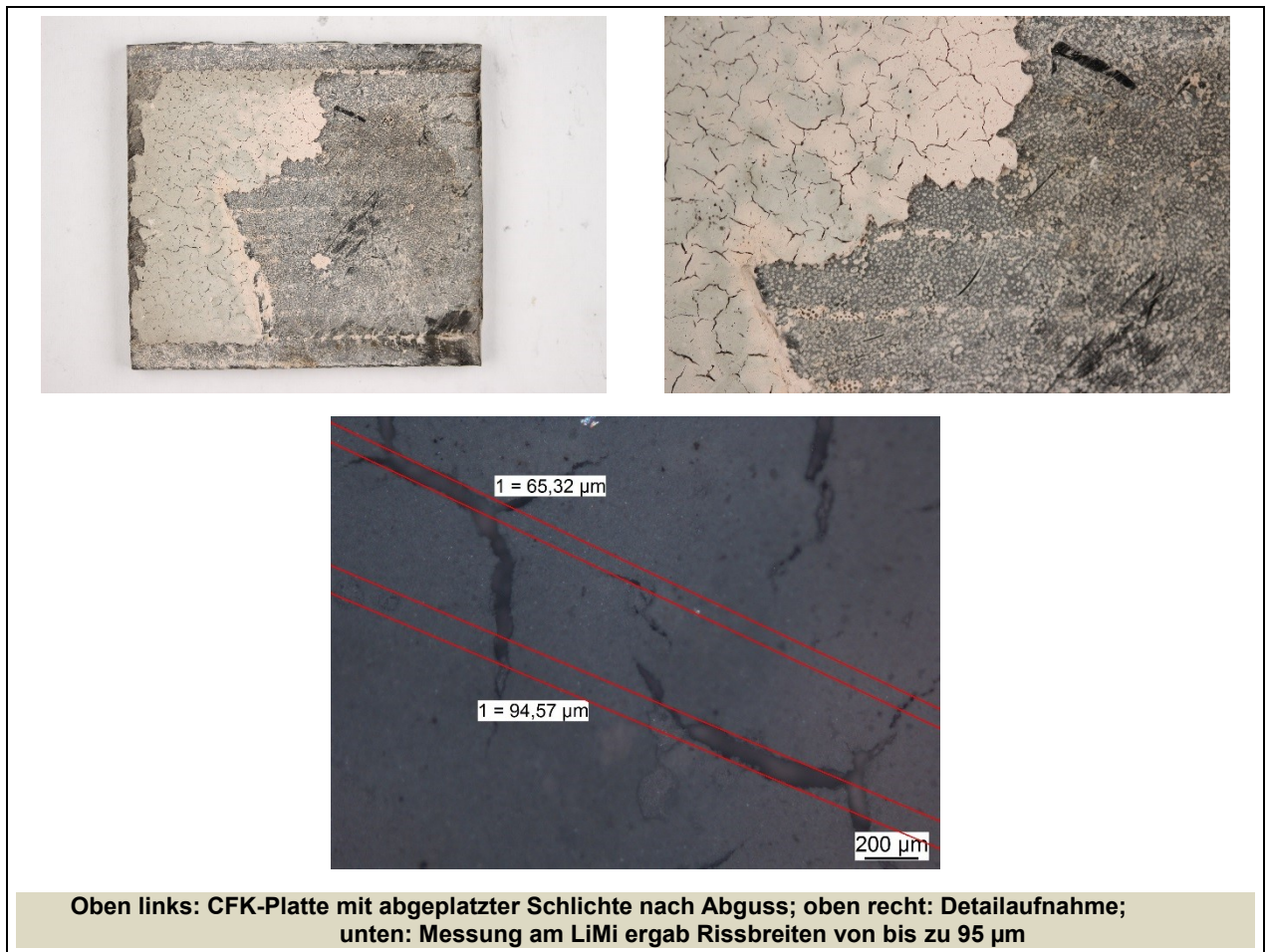


Abbildung 5.9: geschichtete CFK-Platte nach Abguss aus Form 4

Über die Variation von Form 4 wurden noch Abkühlkurven mit Kühlkörpern aus Graphit, und Aluminium umgesetzt.

Wie schon weiter oben beschrieben, hat sich die Luftkühlung als bestes Konzept für die Temperierung des CFK-Einlegers bewährt. Dies wurde durch den Versuch aus Form 3 bestätigt. Durch den Einsatz von Druckluft konnte trotz der geringen Wärmeleitfähigkeit des CFK-Matrixmaterials ein Ausschlag der Temperaturkurve auf der Aluminiumseite festgestellt werden. In diesem Versuch wurde auf eine Beschichtung der CFK-Platten verzichtet. Alle drei Formnester wurden mit Grauguss-Kühlkokillen beaufschlagt. Die CFK-Seite wurde in Nest 1 mit einem Kupferkörper realisiert, Nest 2 wurde zuerst mit Argon (150l/min), dann luftgekühlt. Nest 3 wurde hohl mit einer freien CFK-Rückseite belassen. In der Abkühlkurve (Abbildung 5.10) ist die Stelle gekennzeichnet wo die Argonkühlung mit einer Druckluftkühlung, gespeist aus dem Druckluftnetz, ergänzt wird. Ein deutlicher Ausschlag der Temperatur auf beiden Seiten ist erkennbar.

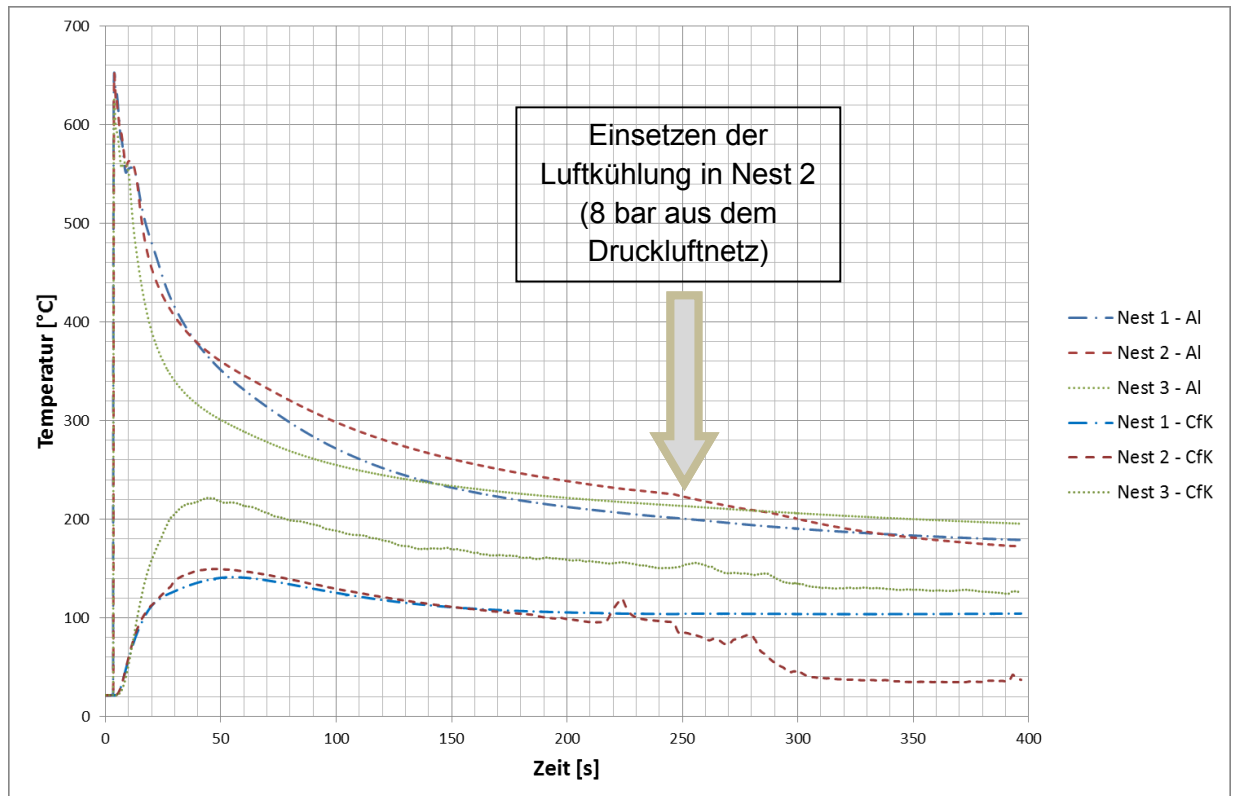


Abbildung 5.10: Abkühlkurve der Form 3, mit Einsatz der Luftkühlung in Nest 2

Da die Rückseitentemperaturen am CFK-Einleger ein signifikantes Kriterium darstellten, wurden diese in einem Diagramm (siehe Abbildung 5.11) zusammengefasst, um die Vergleichbarkeit zu verbessern. Zu sehen sind deutliche Unterschiede, welche auf die Güte der Wärmeabfuhr rückschließen lassen können.



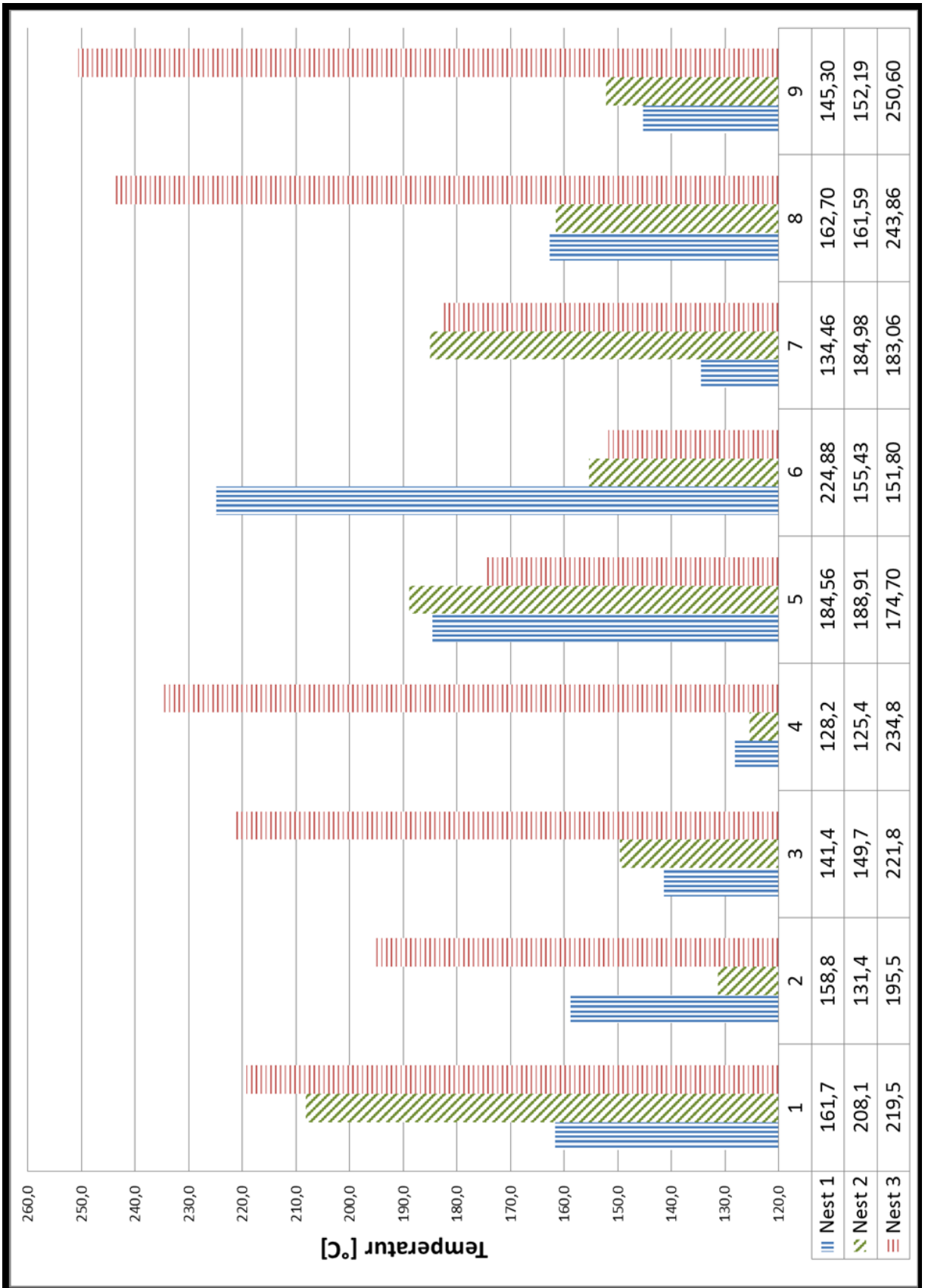


Abbildung 5.11: Maxima der Rückseitentemperaturen im Miniaturmodell

### 5.2.1 Bewertung des Einflusses durch Variation des Formstoffes

In der Versuchsgießerei des EZW wird standardmäßig ein phenolharzgebundenes Sandsystem auf Basis des Formgrundstoffes Quarzsand (Pep-Set®) verwendet. Um Unterschiede hinsichtlich Wärmeleitvermögen bzw. Wärmespeichervermögen bewerten zu können, wurde in Ergänzung zum Quarzsand Untersuchungen anhand eines Formstoffsystems mit Bauxitsand vorgenommen. Aufgrund der runden Kornform war es ausreichend, den Sand mit der halben Bindermenge wie beim Quarzsand anzumischen. Als Vergleichsgröße wird hier das Volumen herangezogen, da die Sande unterschiedliche Dichten aufweisen. Der Bauxitsand wurde im Chargenmischer aufbereitet. Mit den zugegebenen Mengen an Harz und Härter betrug die Verarbeitungszeit rd. 20 min, bis der Sand begann abzubinden. Die Unterschiede waren vor allem in einem größeren Intervall bis zum Erreichen der Liquidustemperatur bemerkbar (siehe Abbildung 5.12). Die Abkühlraten im Zweiphasengebiet unterschieden sich nur um rd. 1,2 K/s.

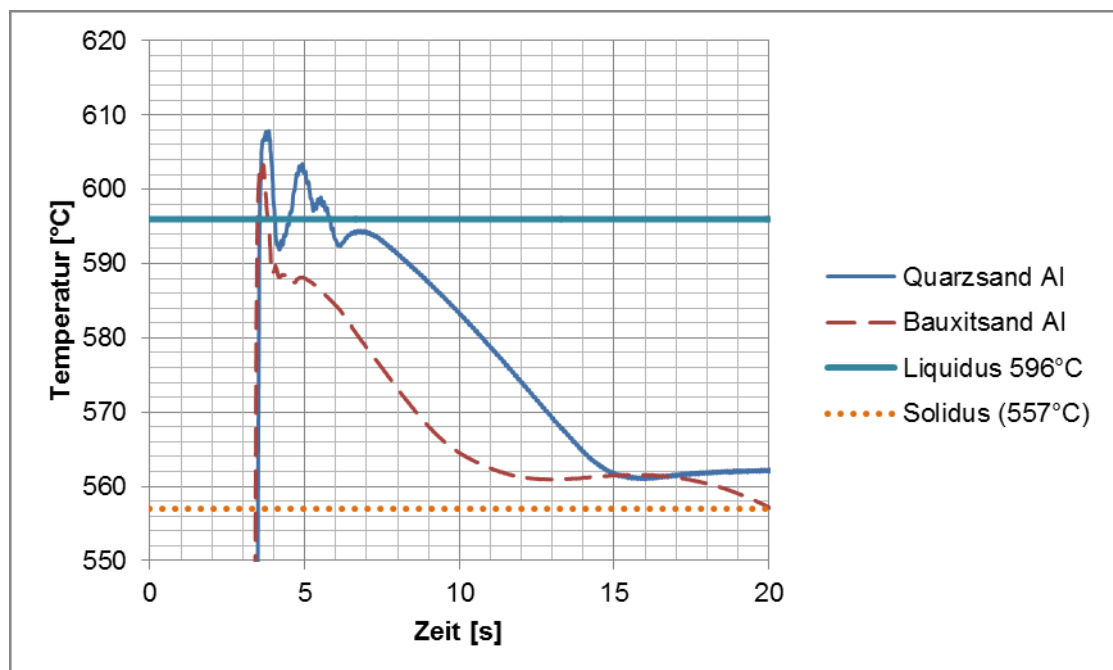


Abbildung 5.12: Abkühlkurven der Proben, mit eingezeichneten Liquidus- und Soliduslinien

Über die Abkühlrate hinaus wurde ebenso der Sekundärdentritenarmabstand anhand des Schlibbildes untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.5 zusammengefasst.

**Tabelle 5.5: unterschiedliche physikalische Daten der untersuchten Sandsysteme sowie Ergebnisse, die im Zuge der Untersuchungen gewonnen werden konnten (farbig hinterlegt)**

	<b>Quarzsand</b>	<b>Bauxitsand</b>
Schüttdichte (gemessen)	1,48 kg/dm <sup>3</sup>	1,98 kg/dm <sup>3</sup>
AFS-Nr.	AFS 36	AFS 52
Wärmekapazität	1,116 kJ/dm <sup>3</sup> K	1,700 kJ/dm <sup>3</sup> K
Sinterpunkt	1550 °C <sup>1</sup>	1100 °C <sup>1</sup>
Harzanteil pro Volumen	300 g pro 25 dm <sup>3</sup> Sand	150 g pro 25 dm <sup>3</sup> Sand
SDAS gemessen	25,00 µm	20,68µm
Abkühlrate	4,27 K/s <sup>2</sup>	5,50 K/s <sup>2</sup>

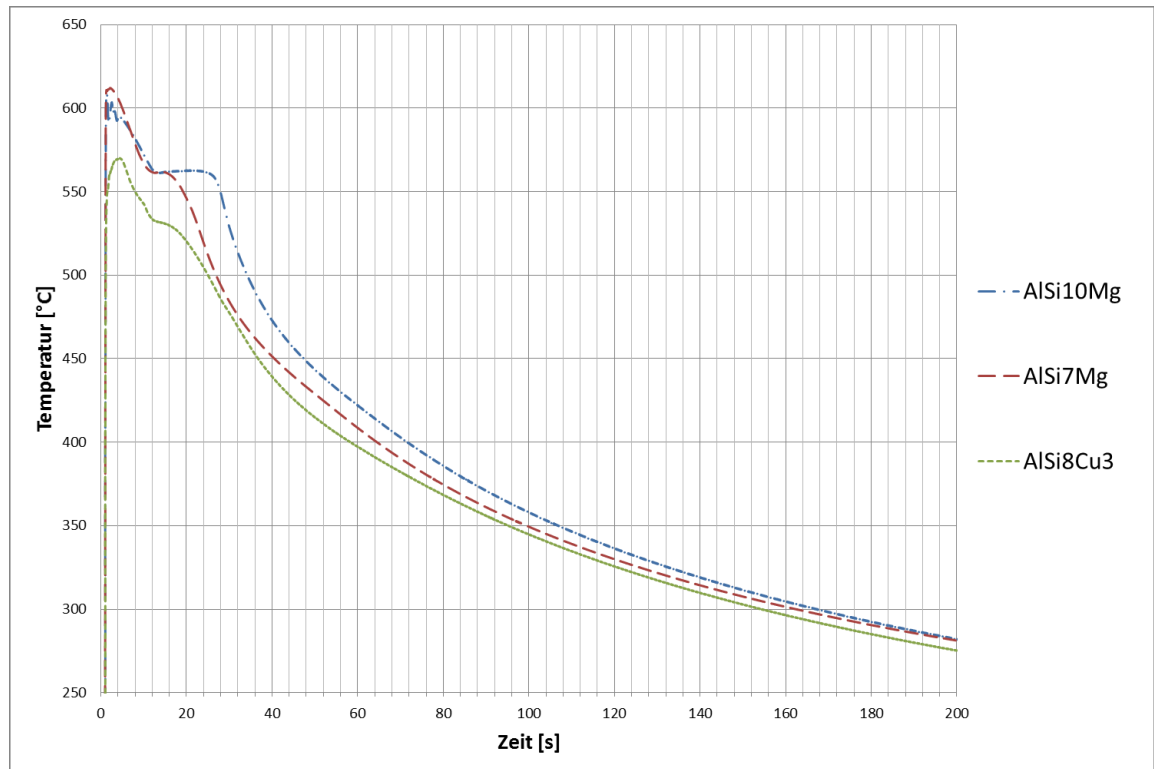
### 5.2.2 Bewertung des Legierungseinflusses

Wie in Kapitel 4.2 angekündigt, wurde auch der Legierungseinfluss einer Untersuchung unterzogen. Es wurden die Legierungen AlSi10Mg, AlSi7Mg sowie AlSi8Cu3 vergossen. Abhängig von den Erstarrungseigenschaften und der Wärmeleitung im Festen ergeben sich dadurch unterschiedliche Charakteristika, die sich in Abkühlraten und Dauer der eutektischen Erstarrung niederschlagen. Um die Ergebnisse vergleichbar zu gestalten, wurden die Untersuchungen bei den langsamsten verfügbaren Abkühlbedingungen, also Quarzsand, als Formmedium verwendet. Die zum Vergleich herangezogenen Temperaturaufzeichnungen stammen ebenso aus dem identischen Formnest Nummer 3. Die Temperaturkurven stammen gemäß Tabelle 8.1 aus den Formen 1,8 sowie 9.

Die Abkühlkurven sind in Abbildung 5.13 gezeigt, weiters sind die Abkühlraten bei der Erstarrung in Tabelle 5.6 aufgelistet.

**Tabelle 5.6: Abkühlraten der unterschiedlichen Legierungen**

<b>Legierung</b>	<b>Abkühlrate [K/s]</b>
AlSi10Mg	-4,64
AlSi7Mg	-6,99
AlSi8Cu3	-4,43



**Abbildung 5.13: Vergleich der Legierungen AlSi10Mg, AlSi7Mg und AlSi8Cu3 hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Erstarrungscharakteristika**

Aus dem Schaubild in Abbildung 5.13 ist erkennbar, dass die Legierung AlSi10Mg die längste Verweildauer bei der eutektischen Temperatur aufweist, jedoch der Temperaturgradient im Festen dann steiler ist als bei Legierung AlSi7Mg und AlSi8Cu3. Nach einer Zeit von 160 Sekunden nähern sich drei Kurven dann einander an, was die Unterschiede bei der Erstarrung wieder egalisiert. Ganzheitlich betrachtet sind die Unterschiede der drei ausgewählten Legierungen, insbesondere unter Inbetrachtung des Anwendungsfalles, marginal. Darüber hinaus sei erwähnt, dass aufgrund des höheren Erstarrungsintervalls und des niedrigeren Siliziumgehaltes ein geringeres Speisungsvermögen der Legierung AlSi7Mg ein höheres Warmrisspotential erwartet werden kann.

## 6 Versuchsdurchführung am Modell Gussknoten

Aufbauend auf die Vorversuche und den Erkenntnissen aus den Versuchen im Miniaturmodell konnte nun das Modell Gussknoten einer Optimierung unterzogen werden. Dazu konnten die Modellhälften unverändert übernommen werden. Es wurde lediglich eine Holzplatte angefertigt, um das Modell in verkürzt abformen zu können. Dies hatte den Effekt die Gießhöhe und damit die Füllgeschwindigkeit und den metallostatischen Druck zu senken. Eine ungekürzte sowie eine gekürzte Form ist in Abbildung 6.1 ersichtlich.

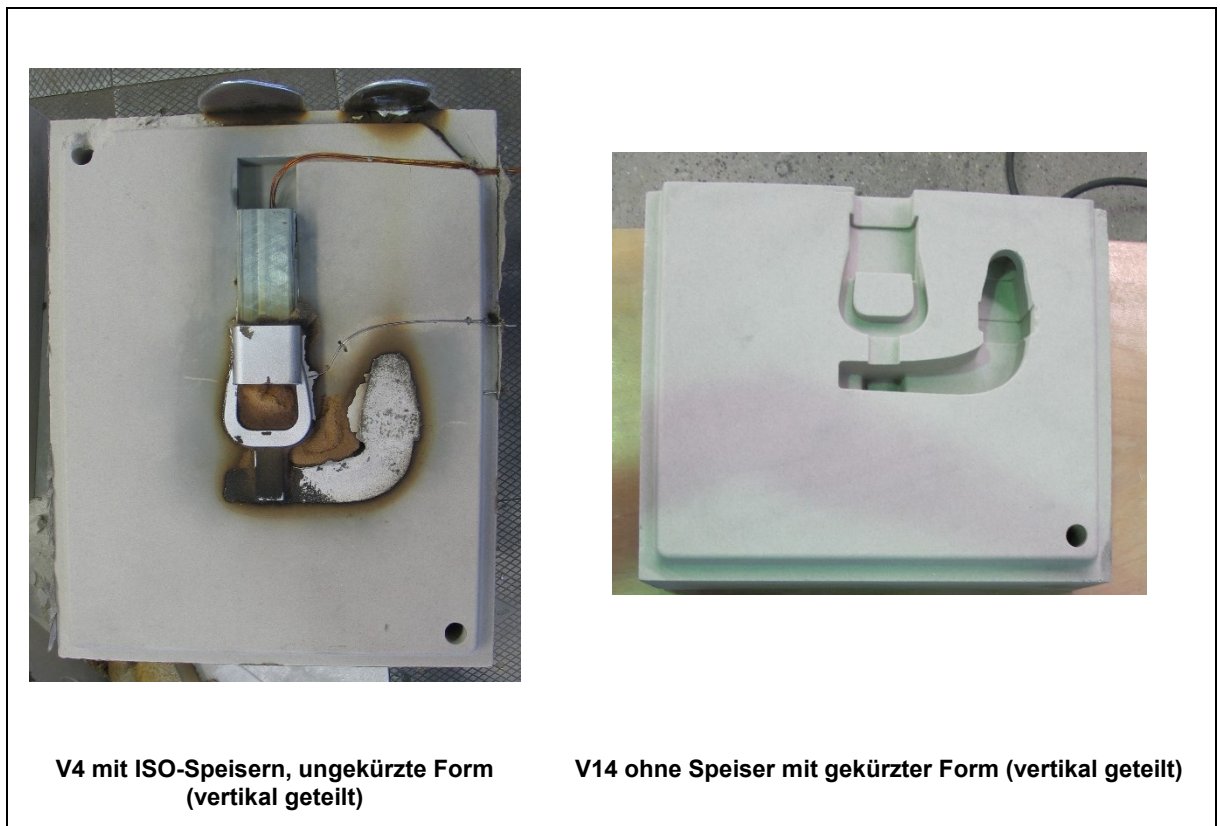


Abbildung 6.1: Vergleich V4 und V14, ungekürzte und gekürzte Form

Mit diesen Optimierungen konnte nun eine turbulenzarme, steigende Formfüllung umgesetzt werden. Durch den kontrollierten Formfüllvorgang konnte die Schädigung des temperatursensitiven Einlegers bereits reduziert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurden die Versuche V13 bis V25 durchgeführt. Die Versuche V1 bis V12 fanden bereits im Rahmen von Voruntersuchungen zu dem Thema statt. V23 und V24 mussten aufgrund von Lufteinschlüssen verworfen werden und konnten nicht zum Vergleich herangezogen werden. Ein Überblick über die Versuche gibt Tabelle 6.1.

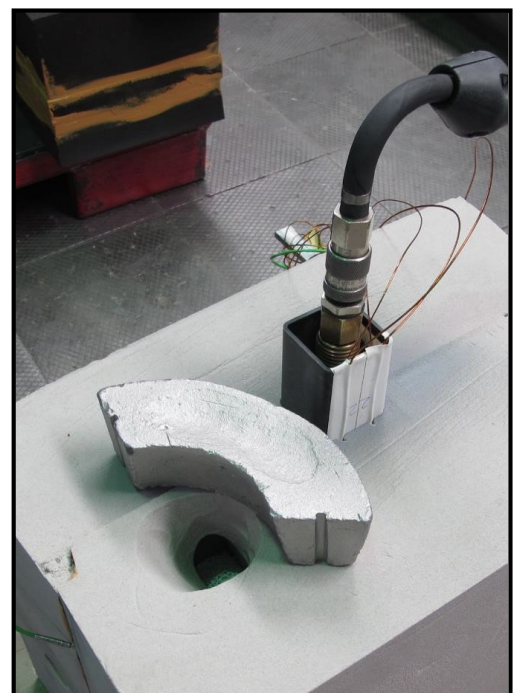
**Tabelle 6.1: Übersicht Versuche ab V13, ab V17 (grau hinterlegter Bereich) wurden ausschließlich metallische Kühlkörper verwendet.**

Versuch	Beschichtung	Sand-system	Innen-kühlung	Gieß.-T. [°C]	Bemerkung	T-Messung	Ergebnis
V13	keine	Quarzsand	keine	690	Formoberseite abgetrennt, Profil hohl (keine Sandfüllung)	Nein	Porositäten im Mantel
V14	keine	Quarzsand	keine	690	Formoberseite abgetrennt, Profil ca. 50mm mit Sand gefüllt	Ja	Mantel nicht gefüllt (hohl)
V15	keine	Quarzsand	keine	690	Formoberseite abgetrennt, Profil ca. 50mm mit Sand gefüllt,	Ja	Mantel nicht gefüllt (hohl)
V16	Albocer (Fraunhofer) 500µm	Quarzsand	keine	690	Formoberseite abgetrennt, Profil ca. 50mm mit Sand gefüllt;	Ja	Mantel nicht gefüllt (hohl)
V17	Albocer (Fraunhofer) 500µm	Bauxitsand	Luftlanze	710	Kühlkokille Al; Profil ca. 10mm mit Sand gefüllt;	Ja	Mantel gefüllt
V18	Hescoat Nr. 133	Bauxitsand	Luftlanze	710	Kühlkokille Al; Profil ca. 10mm mit Sand gefüllt;	Ja	Mantel gefüllt
V19	Hescoat Nr. 133	Bauxitsand	Luftlanze	710	Kühlkokille Al; Profil ca. 10mm mit Sand gefüllt;	Ja	Mantel gefüllt
V20	Albocer (Fraunhofer)	Bauxitsand	Luftlanze	710	Kühlkokille GG; Profil ca. 10mm mit Sand gefüllt;	Ja	Mantel gefüllt
V21	Schlichte Ceramcote Al702	Quarzsand	Luftlanze	710	Kühlkokille Al; Profil ca. 10mm mit OBB-Sand gefüllt;	Ja	Mantel gefüllt
V22	Schlichte Ceramcote Al702	Quarzsand	Luftlanze	710	Kühlkokille GG; Profil ca. 10mm mit OBB-Sand gefüllt;	Ja	Gasblasen in letzten 6mm am Mantel
V23	Albocer (Fraunhofer) 250µm	Quarzsand	Luftlanze	710	Kühlkokille GG, Profil mit Stahldeckel verschlossen	Nein	Mantel komplett hohl, Luft entwich
V24	Albocer (Fraunhofer) 250µm	Quarzsand	Luftlanze	710	Kühlkokille GG, Profil mit Stahldeckel verschlossen	Nein	Mantel komplett hohl, Luft entwich
V25	Albocer (Fraunhofer) 500µm	Quarzsand	Luftlanze	710	Kühlkokille GG 50mm, Profil ca. 10mm mit OBB-Sand gefüllt	Ja	Mantel gefüllt

Um die Schädigung des Einlegers auf ein Mindestmaß zu reduzieren, wurde auch auf der Innenseite des CFK-Profiles mit Kühlmedien gearbeitet. Am Beginn der Versuchsreihe wurde das Profil mit Quarzsand ausgestopft, mit dem Hintergrund, dass die durch das Matrixmaterial durchdringende Wärmeenergie vom Sand aufgenommen werden kann. Allerdings ist das Wärmeleitvermögen aufgrund der mineralischen Eigenschaften im Vergleich zu anderen Kühlmedien sehr gering. Aus diesem Grund konnte eine Schädigung nicht vermieden werden. Wie sich bei Versuchen im Miniaturmodell herausgestellt hat, war eine Kühlung durch das Medium Luft am effektivsten, weshalb eine Luftkühlwanne (siehe Abbildung 6.2) angefertigt wurde. Diese Lanze besitzt Bohrungen in radialer Richtung, wo die einströmende (ungeölte) Druckluft entweichen kann. Der Rahmen fixiert die Lanze im Profil über dessen Diagonale.



a)

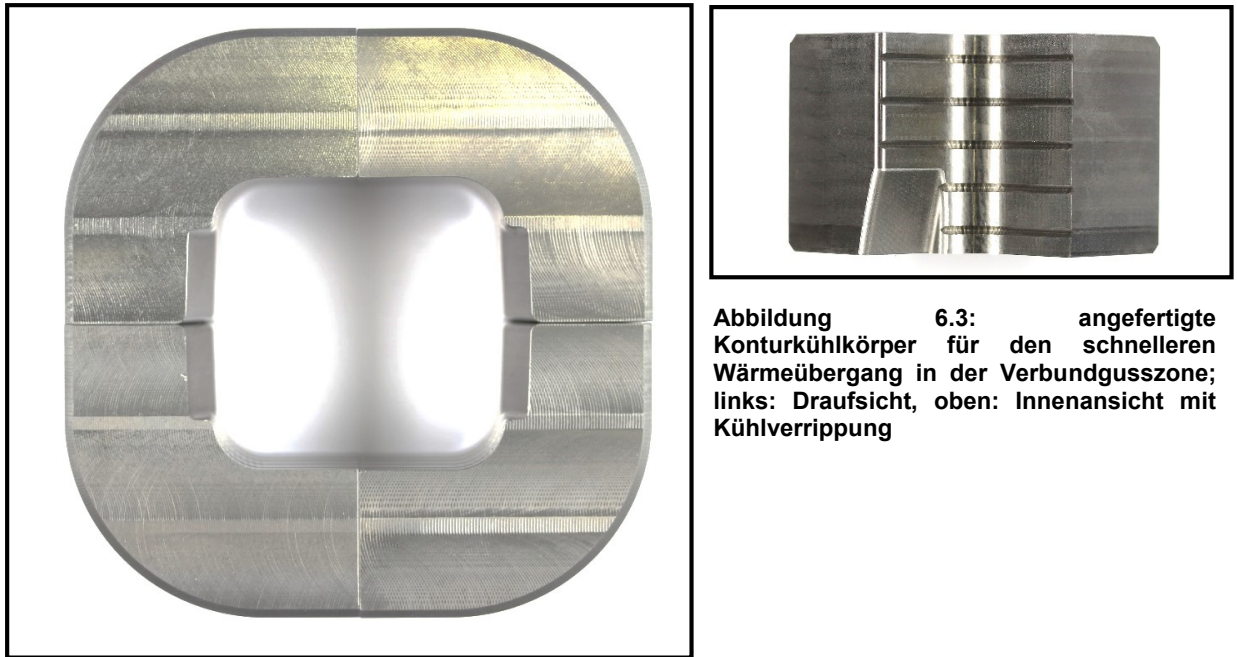


b)

**Abbildung 6.2: Luftkühlwanne mit Rahmen zur indwändigen Kühlung des CFK-Profiles mit Druckluft; a) Lanze mit radialen Bohrungen; b) Lanze im Einsatz**

Da die Abkühlrate im Sand zu gering war, um eine Schädigung am CFK vermeiden zu können, wurden Kühlkörper (siehe Abbildung 6.3) angefertigt, durch welche die komplette Verbundzone abgedeckt wurde. Als Grundmaterialien wurden Grauguss (GJL 200) sowie Aluminium (7075) verwendet. Um die Entformbarkeit zu erleichtern, wurden die Kühlkokillen viergeteilt ausgeführt.

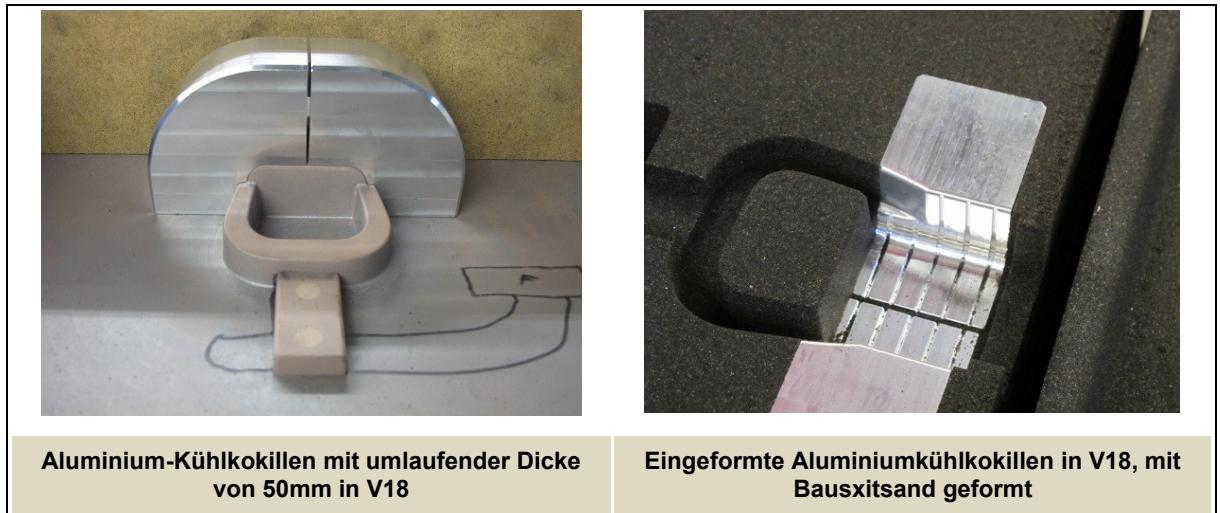




**Abbildung 6.3:** angefertigte Konturkühlkörper für den schnelleren Wärmeübergang in der Verbundgusszone; links: Draufsicht, oben: Innenansicht mit Kühlverrippung

Die Dicke der Kühlkörper wurden mit Gleichungen (3.4) sowie (3.5) berechnet, wobei jeweils die Summen der beiden Gleichungen als umlaufende Kokillenstärke herangezogen wurde. Der Kühlkörper aus Grauguss wurde mit einer Stärke von 30 mm gefertigt, die Kokillen aus Aluminium mit 50 mm. Die verwendete Aluminiumlegierung besitzt eine im Vergleich zum Grauguss etwa fünfmal höhere Wärmeleitfähigkeit. Um die Oberfläche zu vergrößern wurden Kühlrippen eingebracht, was den Gießmodul  $M$  reduziert. Überdies wird die Fließfähigkeit des flüssigen Aluminiums verbessert, da die Oxidhaut gebrochen wird.

Die Kühlkokillen wurden an das Gussmodell angepasst, so dass diese lediglich aufgelegt und mit eingeformt (Abbildung 6.4) werden mussten. Damit wurde die Verbundzone als „Quasi-Kokille“ ausgeführt, was letztlich nur in diesem Bereich zu einer im Vergleich zum Formsand wesentlich höheren Abkühlrate führte.



**Abbildung 6.4: Kühlkokillen aus Aluminium in V18, Formenvorbereitung**

Zu einem späteren Zeitpunkt wurde noch ein Satz Kühlkörper mit einer Stärke von 50 mm angefertigt, um etwaige messbare Unterschiede detektieren und verifizieren zu können. Ziel dieses Ansatzes war es, die Durchwärmtemperatur des Einlegers noch weiter zu senken, um eine damit verbundene Schädigung des Einlegers komplett ausschließen oder vermeiden zu können. Im Endeffekt fungieren Kühlkokillen als Wärmespeicher, da diese die durch die Schmelze eingebrachte Wärmeenergie in sich speichern.

## **6.1 Angewendete Messtechnik bei Versuchen Gussknoten**

Analog zu den Versuchen im Miniaturmodell wurden Abkühlkurven an verschiedenen Punkten im Gussteil aufgenommen. Dabei wurden zwei Elemente im erstarrenden Mantel der Verbundzone eingebracht. Im Profil wurden an den Wandungen im Innenbereich ebenso Thermoelemente angebracht. Darüber hinaus wurde im Bügelbereich unterhalb der Verbundzone gemessen. Als Triggerelement (zum Start der Messung) wurde ein Temperaturfühler oberhalb des Filters positioniert. Gleich wie im Versuch Miniaturmodell wurden Thermoelemente vom Typ K verwendet. Die jeweiligen Positionen sind in Abbildung 6.5 ersichtlich.



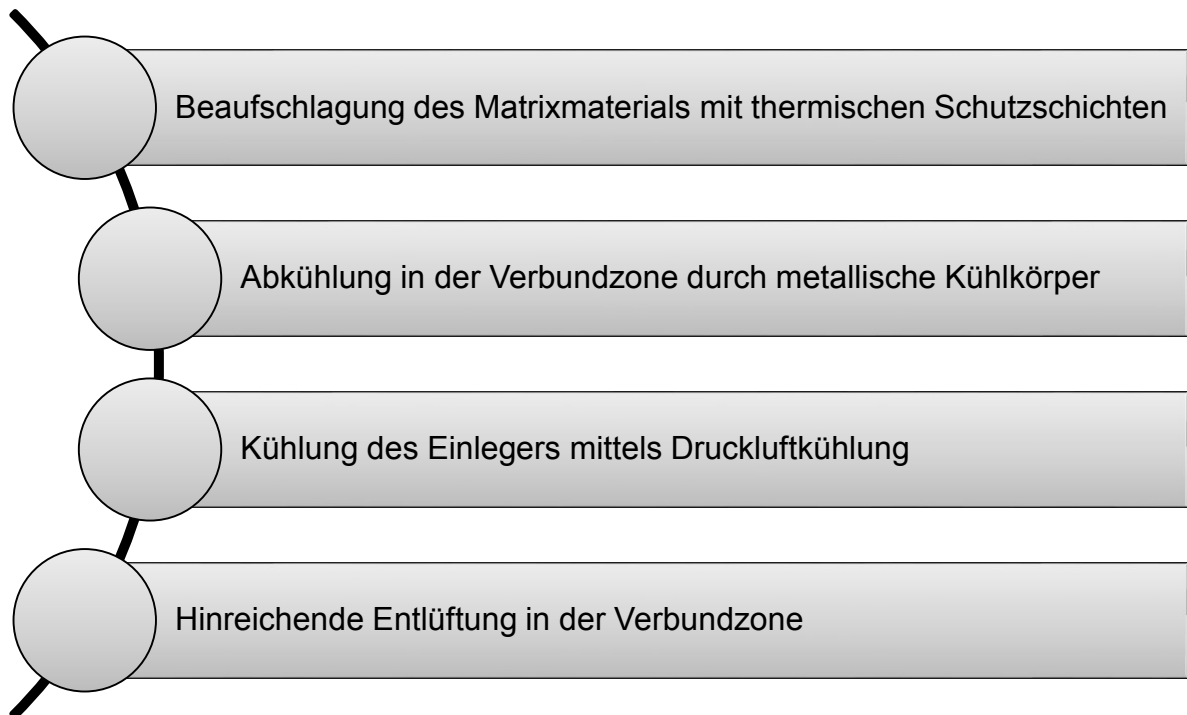
**Abbildung 6.5: Positionen der Messpunkte am Gussknoten; rot: Element Filter, blau: Element Zulauf, grün: Element oben (innen und außen), orange: Element unten (innen und außen)**

Zur Aufzeichnung wurde ein Messmodul, zur Auswertung wurde die Porsche-eigene Software PEA32 2.5.3 verwendet.

## 6.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Modell Gussknoten

Wie zu erwarten war, wiesen die Messungen mit Abkühlung in Sand, bzw. in der Kühlkokille große Unterschiede auf. Dies ist auf die höhere Wärmeleitfähigkeit sowie auf die größere Wärmeaufnahmekapazität metallischer Kühlkörper im Vergleich zu Formsanden zurückzuführen. Ab Versuch 16 wurde mit thermischen Schutzschichten als thermische Barriere gearbeitet, um die Einlegeteile von großen Wärmeeinträgen zu schützen. Dies hatte ebenso einen positiven Effekt auf das Schädigungsmaß, allerdings konnten allein durch diese Maßnahme Schädigungen der Matrix nicht vollständig vermieden werden.

Bei Versuchen ohne metallische Kühlkörper und Innenkühlung durch Druckluft war weiters eine starke Rauchentwicklung zu beobachten, was auf eine Verflüchtigung des Matrixmaterials durch Sublimation hindeutet. Folglich kann eine hinreichend zufriedenstellende Verbindung nur durch folgende Maßnahmen (Abbildung 6.6) gewährleistet werden:



**Abbildung 6.6: Maßnahmen zur positiven Umsetzung des Verbundes Aluminium-CFK durch Sandguss**

Nachfolgend abgebildet (Abbildung 6.7 und 6.8) sind zwei Abkühlkurven, um die messbaren Unterschiede der Abkühlungen zu verdeutlichen. Darin ist klar sichtbar zu erkennen, dass die Durchwärmtemperatur der Profile von über 300 °C auf unter 100 °C gesenkt werden konnte. Weiters wurde die Zeit der Abkühlung im Festen deutlich reduziert, was dazu führt dass für das Unterschreiten der 300 °C-Marke bei der Abkühlung im Sand mehr als 250 s benötigt werden, bei Abkühlung durch Aluminium-Kühlkörper, wie in diesem Versuch geschehen nur mehr 20 s benötigt wurden. Diese Maßnahme hat auch Auswirkungen auf die mechanische Festigkeit des Verbundes, da der DAS deutlich reduziert werden kann. So betrug der DAS bei V14 34,7 µm, wohingegen dieser bei V18 16,3 µm maß. Außerdem wird durch die größere Schreckwirkung ein dichteres Gefüge realisiert, welches sich in einer größeren Schwindung und damit höheren Kontraktionskräften niederschlägt.

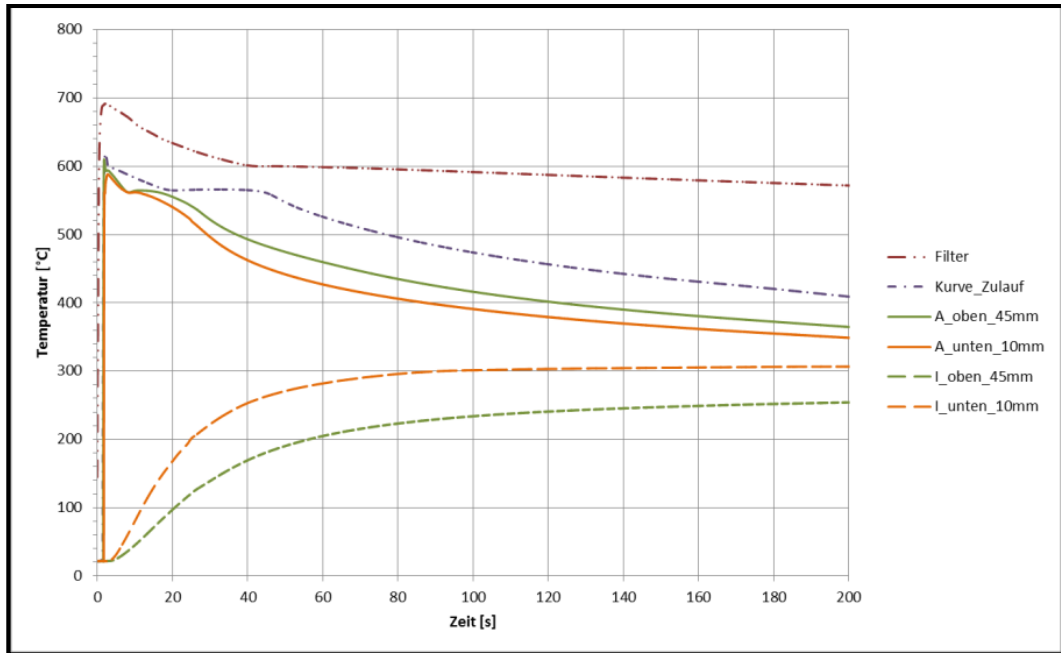


Abbildung 6.7: Abkühlkurve für V14, Abkühlung im Sand ohne Innenkühlung

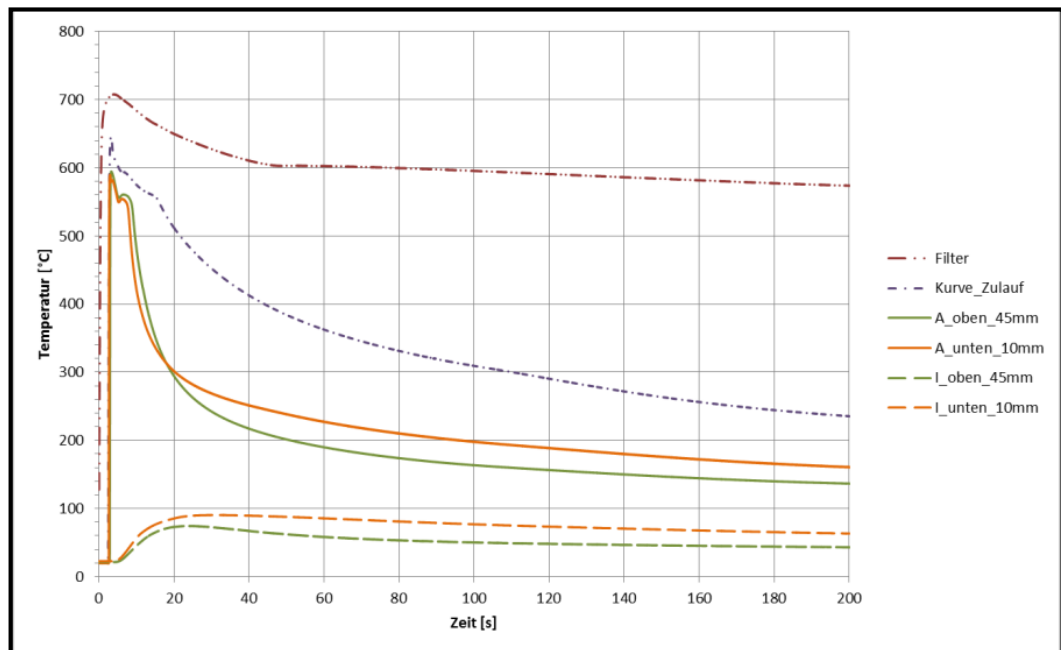


Abbildung 6.8: Abkühlkurve für V18, Abkühlung im Sand mit Innenkühlung durch Druckluft

Wie sich die Durchwärmtemperatur auf das Schädigungsmaß auswirkt, ist in Abbildung 6.9 ersichtlich. Die Schnitte wurden an derselben Position 5mm über dem Bügel vorgenommen. Hier ist bei V14 eine deutliche Delamination der Faser erkennbar. Grund ist die Auflösung der Matrix. Optisch ist eine Schädigung bei V18 nicht auszumachen. Dies ist auf die



Durchwärmtemperatur zurückzuführen, welche deutlich unter der Glasübergangstemperatur (rd. 120 °C) liegt.

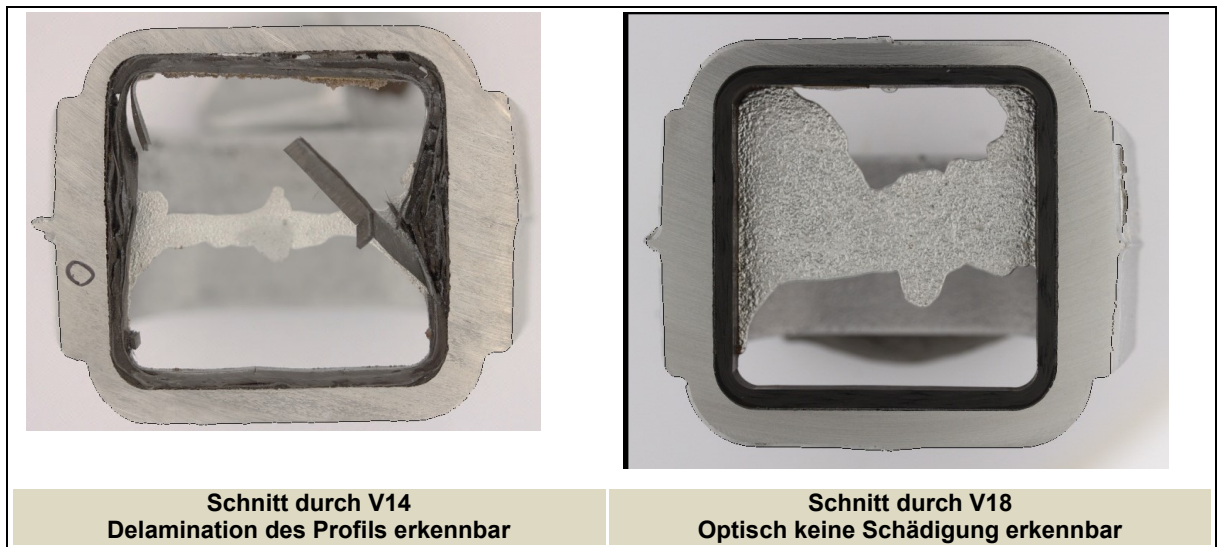
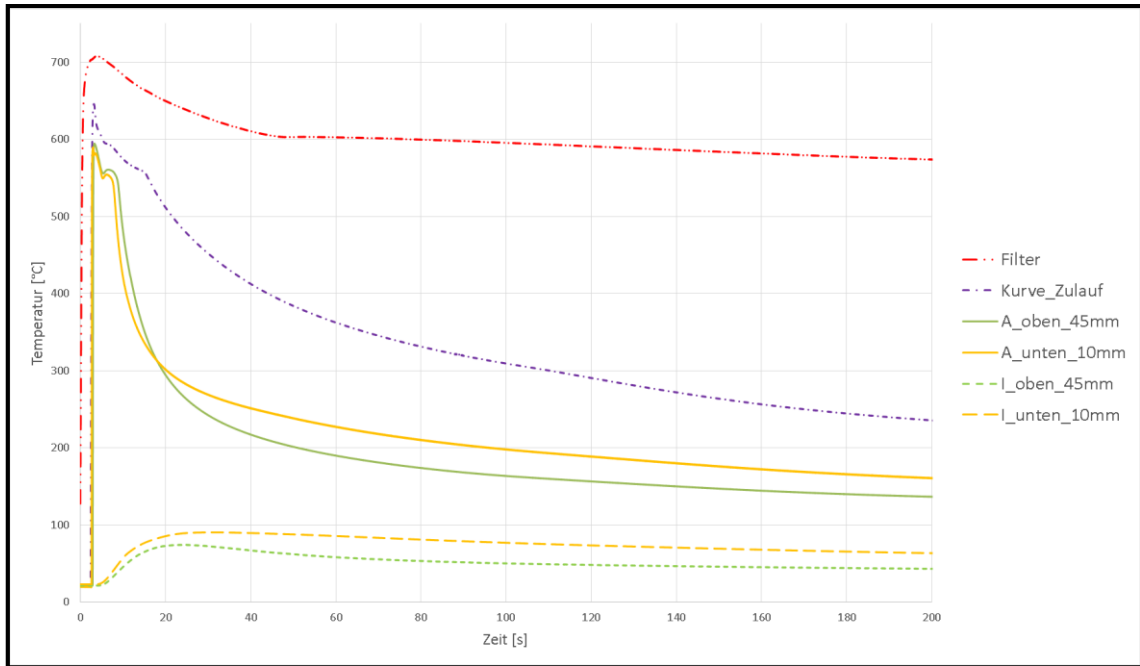


Abbildung 6.9: Schnitt durch V14 (links) und V18 (rechts)

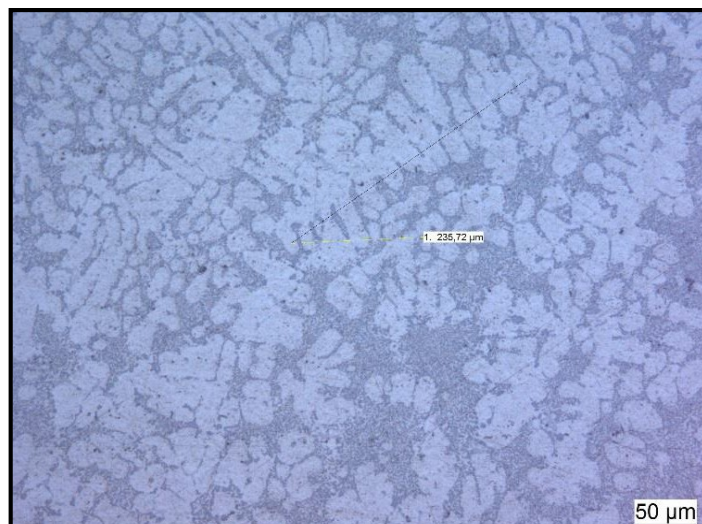
Ähnlich verhielt sich Versuch 22, wo als thermische Schutzschicht Schlichte eingesetzt wurde. Für diesen Versuch wurden Graugusskühleisen mit einer Stärke von 30 mm verwendet. Aufgrund der im Vergleich zu Aluminium niedrigeren Wärmeleitung war der Gradient der Abkühlung kleiner, was zur Folge hatte, dass die Durchwärmung mit einer höheren Temperatur einherging. Jedoch stellte sich in der Praxis heraus, dass Graugusskühlkokillen aufgrund ihrer höheren Oberflächenhärte eine höhere Widerstandsfähigkeit im Hinblick auf das Handling aufwiesen. Mit diesen musste im Vergleich zu Aluminiumkühlkokillen weniger sorgsam umgegangen werden, was besonders beim Auspackvorgang als Pluspunkt gewertet werden konnte. Die Abkühlkurve für Versuch 18 ist in Abbildung 6.10 dargestellt.



**Abbildung 6.10: Abkühlkurve von V18 mit GG-Kokillen und Ceramcote Al 702 als thermische Schutzschicht**

Erkennbar ist, dass die 300 °C-Linie erst bei 25 bzw. 40 s unterschritten wird. Die Temperaturmaxima im Innenbereich liegen hier bei 110 °C, bzw. 85 °C. Da diese Temperaturen noch unterhalb der angenommenen Glasübergangstemperatur des Kunststoffes liegen, kann der Versuch dennoch als positiv betrachtet werden.

Die DAS liegen in der Verbundzone bei 14,85 µm. Das Schlibbild ist in Abbildung 6.11 zu sehen.



**Abbildung 6.11: Schlibbild der Verbundzone von V22**



Für Versuch 25 wurden Kühlkörper aus Grauguss angefertigt, welche eine umlaufende Stärke von 50 mm aufwiesen, was 20 mm mehr entsprach als bei den vorhergehenden Versuchen mit GG-Kühlkörpern. Ziel war, die Durchwärmtemperatur durch die größere Wärmekapazität noch weiter zu senken. Die Abkühlkurve dieses Versuches ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Bei der Auswertung muss allerdings berücksichtigt werden, dass der Schlichteauftrag (Schichtdicke, Art der Schlichte) einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizienten hat.

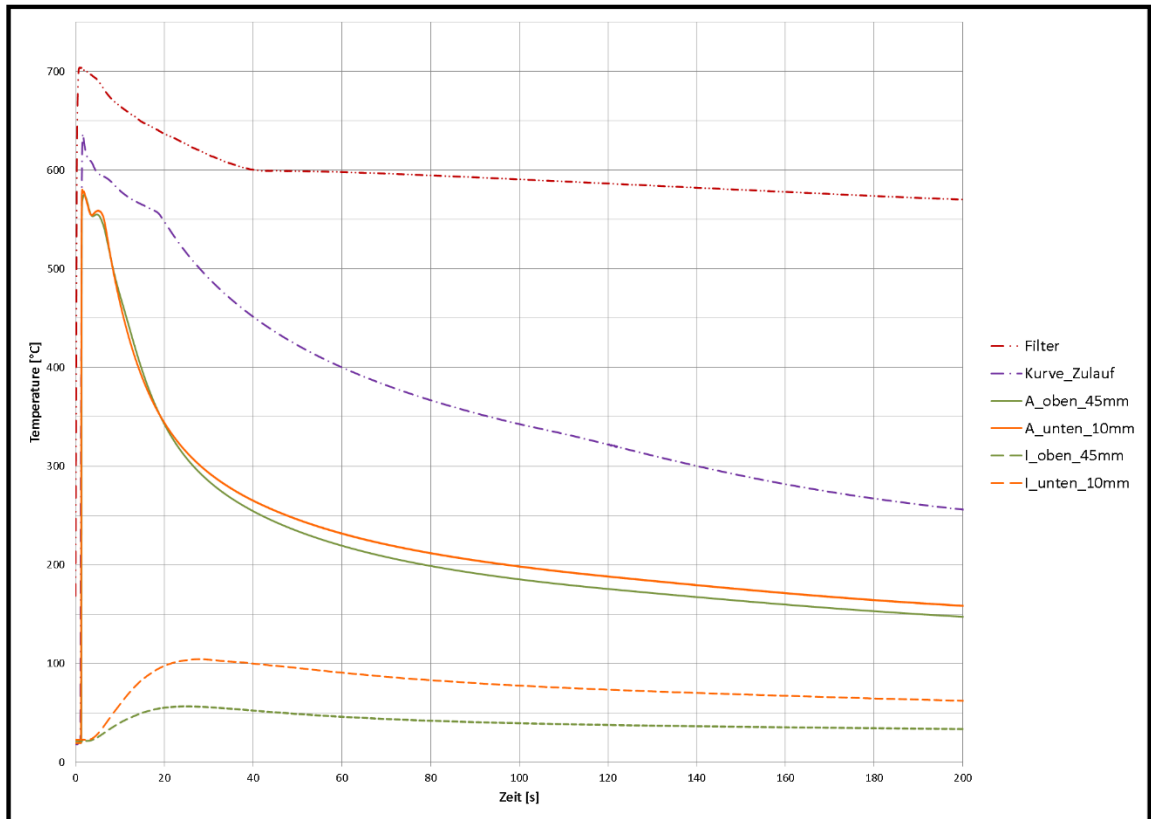


Abbildung 6.12: Abkühlkurve von V25 mit GG-Kühlkörpern mit einer umlaufenden Dicke von 50mm

Im Vergleich zu V22 ergaben sich folgende Unterschiede in der Abkühlung, siehe Tabelle 6.2

Tabelle 6.2: Resultate der Auswertung der Abkühlkurven von V22 und V25 (GG-Kühlkörper in unterschiedlichen Stärken)

Versuch	Stärke Kühlkokille [mm]	Abkühlrate im Erstarrungsintervall [K/s]	Abkühlrate im Festen [K/s]	Unterschreiten der 200°C-Marke (A_oben_45mm) [s]
V22	30	-25,1	-12,8	104,9
V25	50	-17,5	-21,2	78,7

### 6.2.1 Beschichtungssysteme im Praxisversuch

Es wurden verschiedene Beschichtungssysteme getestet, wobei eine Aussage hinsichtlich Ihrer Eignung für die Materialmischbauweise Aluminium-CFK im Sandguss getätigt werden kann. Wasserbasierende Systeme weisen die Problematik auf, dass im Kristall gebundenes Hydratwasser nicht ausgetrieben werden kann, da das Substrat keine dementsprechende Temperaturbeständigkeit aufweist. Lediglich freies Wasser konnte verdampft werden, wozu die beschichteten Einleger bei 110 °C wärmebehandelt wurden. Die Schichtdicke ist dabei, besonders bei von Hand aufgetragenen Schichten, prozesstechnischen Schwankungen unterworfen. Die Schichtstärken variierten daher zwischen 250 und 500 µm.

Hier haben sich alkoholbasierende Schichten bewährt, da sich die Trägerflüssigkeit (meist Isopropanol) bei Temperaturen von 50-80 °C verflüchtigt. Als Konsequenz war bei den Versuchen erkennbar, dass bei wasserbasierenden Systemen eine Ausgasung im oberen Bereich der Verbundzone auftrat. Diese Ausgasungen haben zu Folge, dass der Verbund entsprechend geschwächt wird, weil weniger Fläche zur Kontrahierung des Einlegers zu Verfügung steht. Eine Auflistung der verwendeten Schutzschichten ist in Tabelle 9. ersichtlich.

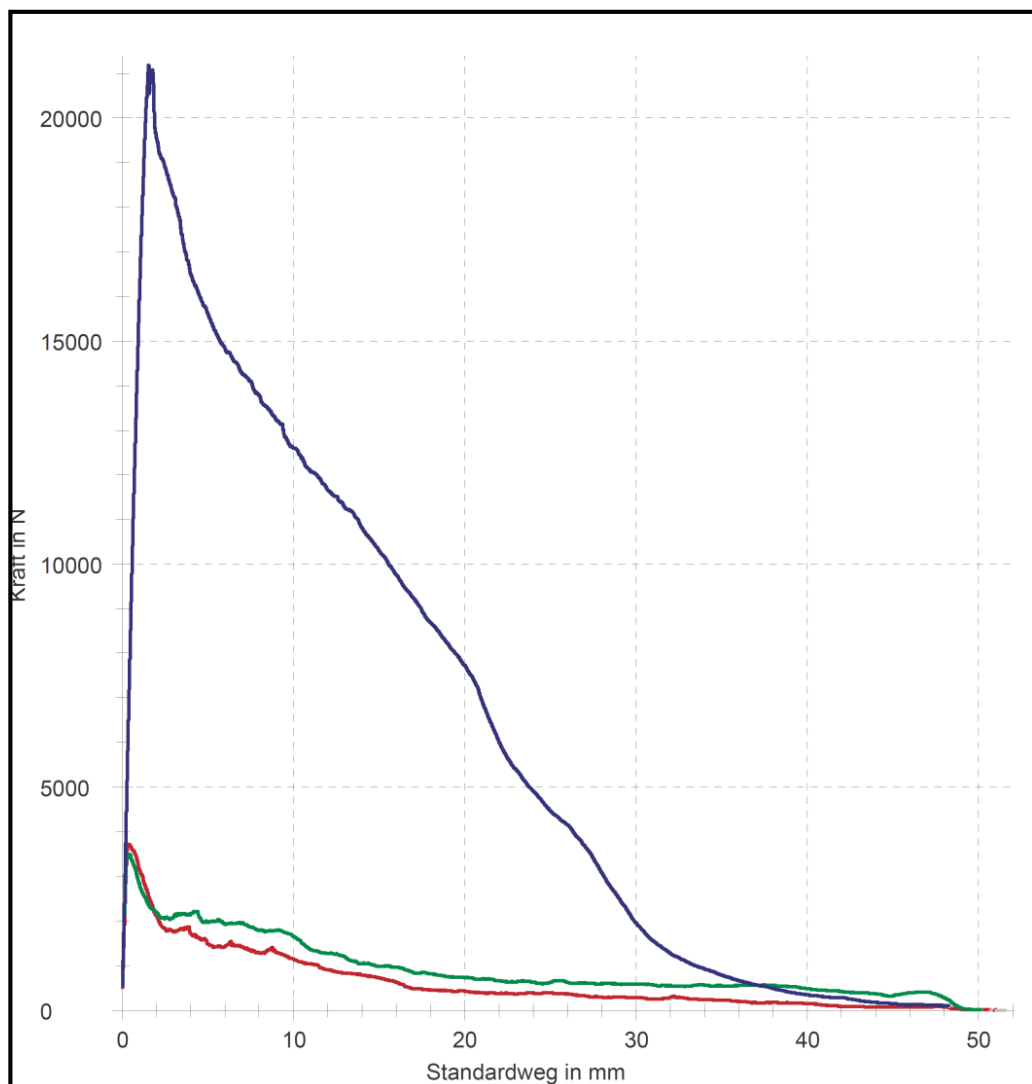
**Tabelle 6.3: verwendete Thermoschutzschichten bei Versuchen Gussknoten**

Hersteller	Bezeichnung	Aufbau	Schichtdicke [µm]	Resultat
Fraunhofer IKTS	Albocer	ZrO <sub>2</sub> , plasmagespritzt,	250, 500	Positiv, z.T. Rissbildung
Hescoat	Nr 133	Unbekannt, alkoholbasierend	500	Positiv
ASK	Ceramcote Al702	Glimmer (Mischsilikat), wasserbasierend	400-500	Negativ, Ausgasungen

Alle Schichten wurden ihrem Zweck gerecht, einen Direktkontakt zwischen dem Einleger und der flüssigen Schmelze zu verhindern. Da die Wärmeleitfähigkeiten keiner direkten Messung zugänglich waren, konnten nur die Innenseitentemperaturen des CFK-Profils für eine Bewertung herangezogen werden. Da dort bei allen Versuchen mit beschichteten Profilen die Temperaturen unter 120 °C lagen, kann auch dieser Punkt als positiv abgeschlossen gewertet werden.

## 6.2.2 Ausziehversuche am Gussknoten

Um die mechanische Festigkeit darlegen zu können, wurde ein Ausziehversuch an V25 durchgeführt. Primär sollte damit der kraftschlüssige Charakter der Verbindung bewiesen werden. Dazu wurde der Prüfling auf eine ZWICK-Zugprüfmaschine aufgespannt, wobei in den Bügel ein Gewinde zur Verschraubung auf die feste Platte der Maschine eingebracht wurde. Das CFK-Profil wurde gegen einen Metallkern auf den losen Teil der Maschine eingespannt. Das Ergebnis ist eine maximale Zugkraft von 20.350 N, bei einem maximalen Weg von 1,5 mm. Der Kraft-Weg Verlauf ist im Diagramm in Abbildung 6.13 ersichtlich



**Abbildung 6.13: Ergebnis des Ausziehversuches, aufgetragen in einem Kraft-Weg Diagramm. Die Fläche unter der Kurve gibt die nötige Energie wider, welche benötigt wird um das Profil aus dem Aluminiummantel zu ziehen. Relevanz besitzt lediglich die blaue (oberste) Linie**

## 7 Diskussion der Ergebnisse

Ausgehend von den Vorversuchen war es Inhalt der vorliegenden Masterarbeit, das Sandgussverfahren so zu optimieren, dass eine prozesssichere Darstellung CFK-Aluminium Mischbauweise erfolgen kann. Die Erkenntnisse können in einem Satz ausgedrückt werden: Es ist mit dem Sandgussverfahren und einigen Optimierungen möglich, Kunststoffe wie CFK in Epoxidharzmatrix, mit schmelzflüssigem Aluminium zu umgießen. Die Optimierungen betreffen dabei die Abkühlrate beeinflussende Maßnahmen, sowie den Einleger schützende prozesstechnische Notwendigkeiten wie eine thermisch beständige Schutzschicht und der Innenkühlung durch Pressluft.

Da durch Variation der Formstoffe (Quarz- Bauxitsand) keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Abkühlraten gemessen werden konnten, müssen, um die eingetragene Wärmeenergie so schnell wie möglich auszutragen, als Wärmespeicher fungierende Kühlkokillen eingebracht werden. Zum Einsatz kommen, wie auch in Serienprozessen üblich, Kühlkokillen aus Grauguss oder Aluminium. Dank der höheren Abkühlrate und der größeren Unterkühlung der Schmelze an der Erstarrungsfront lässt sich ein feiner ausgebildetes Gefüge realisieren, was wiederum Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils hat, sowohl bei statischen als auch dynamischen Lastsituationen [23]. Es konnten SDAS realisiert werden, welche mit jenen von reinen Kokillengussteilen durchwegs in Konkurrenz treten können. Diese Kühlkokillen werden, um Anhaftungen des Aluminiums zu vermeiden, mit sogenannten Schlichten versehen. Im vorliegenden Fall wurde eine wärmeleitende graphithaltige Schlichte verwendet. Allerdings ist die Prozesssicherheit, besonders bei Auftrag von Hand mit einer gewissen Unschärfe hinsichtlich der Schichtdicke verbunden. Dies führt dazu, dass der Wärmeübergangskoeffizient wesentlich von der Schichtdicke der Schlichte beeinflusst wird. Die in unseren Versuchen zu Tage tretenden Unterschiede, siehe Vergleich zwischen V22 und V25 können auf diese Schichtdickenproblematik zurückgeführt werden. Beim Schlichten metallischer Formwerkstoffe sollten diese auf 150-200 C vorgewärmt werden, was bei in Sandformen eingebrachten Kühlkörpern nicht möglich ist. Hier würde sich das aus Harz und Härter entstandene Bindeprodukt vorzeitig verflüchtigen. Die Alternative, die Kühlkokillen in losem Zustand zu erwärmen und mit der Schlichte zu beaufschlagen, scheitert an handlungstechnischen Überlegungen, da die Schlichte beim Auflegen auf die Form abplatzen oder zumindest Schaden nehmen würde.

In der Praxis sind Einfallstellen aufgetreten, welche den in der Verbundzone wirksamen Querschnitt, insbesondere bei Querbelastrung des Bauteils mindern. Diese können zum Einen

auf das Gießsystem, zum Anderen auf den Schlichteauftrag zurückgeführt werden. Weil eine Speisung in der Verbundzone nicht möglich ist, sind Maßnahmen nur über die Schmelzevorbereitung und dem Temperaturhaushalt möglich, was auch die Schlichteaufträge und die Gießtemperatur betrifft. Da der Filter im vorliegenden Modell horizontal angebracht ist, würde eine Drehung des Filters und entsprechende Anpassung des Gießsystems hier Verbesserungen herbeiführen.

Ebenso unterliegt der Auftrag der thermischen Schutzschicht einer gewissen Prozessunsicherheit, welche sich besonders beim Auftrag von Schichten von Hand bemerkbar machte. Hier ist es von der Erfahrung und dem feinmotorischen Geschick des Auftragers abhängig, welche Schichtdicke die Schutzschicht besitzt. Ferner ist die Vorbereitung des Einlegers entscheidend. Die Gratwanderung, den Einleger oberflächlich aufzurauen, und dabei die Fasern zu beschädigen, birgt ebenso prozesstechnische Risiken. In den Versuchen im Miniaturmodell zeigte sich auch die Neigung einzelner Schichten, Gase unter Temperatureinwirkung zu produzieren, was den Verbund in entsprechender Weise reduziert. Jedenfalls hat sich gezeigt, dass thermischen Schutzschichten in Verbindung mit flüchtigen Trägerflüssigkeiten wie Alkoholen aufgrund ihrer niedrigeren Neigung Gase zu bilden besser geeignet sind als wasserbasierende Systeme.

Die Innenkühlung des Einlegers durch Druckluft hat sich als probate Maßnahme herausgestellt, da die Wärmeabfuhr hier kontinuierlich erfolgt und nicht gespeichert werden muss, wie es bei einem Metallkern oder Metallgranulaten der Fall wäre. Eine Kühlung über Wasserdampf wurde von vornherein verworfen, da ein Übertritt des Dampfes in das Formnest nicht ausgeschlossen werden kann. Die Abdichtung des Einlegers nach unten erfolgte in den Versuchen V17 bis V25, mit Ausnahme von V23 und V24 mit einer 10 mm dicken Sandschicht. Bei V23 und V24 wurden Metallstopfen verwendet, welche allerdings Undichtigkeiten nach sich zogen und Luft in den Formhohlraum entwich. Diese beiden Versuche mussten für die Auswertung verworfen werden.

Bei richtiger Kombination der Prozessparameter ist es also möglich, CFK und Aluminium im Sandguss miteinander zu verbinden, was auch für einen Serienprozess denkbar wäre. Die Voraussetzungen hierfür sind durch Untersuchungen wie dieser gegeben, allerdings sind diverse andere Fragen noch zu klären. Dies betrifft vor allem die Möglichkeiten der Wärmebehandlung sowie die Frage nach der Dauerfestigkeit des Verbundes

## 8 Ausblick

Aufbauend auf den Erkenntnisstand, welcher im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet werden konnte, ist es möglich den Prozess weiter zu entwickeln. Dennoch gibt es Fragestellungen, welche nicht trivial beantwortet werden können. So gestaltet sich eine Wärmebehandlung aufgrund der Temperatursensitivität der Einleger als schwierig. Es ist unmöglich, das CFK-Aluminium Verbundgussbauteil bei einer Temperatur von 530-550 °C zu glühen, um die Elemente im Mischkristall aus Ihrem Verbund zu lösen. Hier gibt es zwei Lösungsansätze. Der erste wäre, das Bauteil einer T5-Wärmebehandlung zuzuführen, welche eine Abschreckung aus der Gießtemperatur vorsieht, und eine Warmauslagerung bei Temperaturen von 150 bis 180 °C nach sich zöge. Die hier genannten Temperaturen beziehen sich auf die in den Versuchen verwendeten AlSi - Legierung und können für andere aushärtbaren Legierungen variieren. Der zweite Weg wäre, selbstaushärtende oder naturharte Legierungen zu verwenden, welche keiner Wärmebehandlung bedürfen. Allerdings sind Gesichtspunkte wie Korrosionsbeständigkeit (AlSi8Cu3) oder Warmrissanfälligkeit (System Al-Mg) zu hinterfragen. Die Weiterentwicklung in Richtung Kokillenguss wurde bereits von einer parallel laufenden Masterarbeit bei der PAG näher beleuchtet. Um den Bedarf für Serien im Automobilbau abzudecken, werden in Zukunft auch rationelle Gießverfahren wie Druckguss oder Thixomolding für die CFK-Aluminium-Mischbauweise angedacht werden müssen. Der Vorteil von großen Abkühlraten und folglichweise große Wärmeausträge liegen hier klar auf der Hand. Eingeschränkte Schweißbarkeit und der Nachteil keine Hohlräume durch Kerne ausbilden zu können, stehen den Vorteilen dieser Verfahren jedoch gegenüber.

Weitere Bestrebungen betrifft die Entwicklung der Kunststoffe. Temperaturbeständigere Materialien müssten marktwirtschaftlich attraktiver gestaltet sein. Dies würde die Prozessführung ebenso positiv beeinflussen.

Für den Einsatz des Systems im Automobil sind weiters eine Reihe von Prüfungen notwendig, welche das Werkstoffverhalten entsprechend charakterisieren. Im Rahmen von Betriebsfestigkeitsuntersuchungen wird es notwendig sein, das System auf die Haltbarkeit bei gewissen Lastniveaus und Zyklen zu verifizieren.

Basierend auf den Ergebnissen dieser vorliegenden Masterarbeit kann die Frage der Machbarkeit zwar mit einem klaren „Ja“ beantwortet werden, jedoch bedarf es noch zahlreicher Untersuchungen und Überlegungen, wie eine derartiger Prozess in einer Serienfertigung aussehen könnte.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Altenpohl, D.: Aluminium von innen - das Profil eines modernen Metalles. Kapitel 1: Der Werkstoff Aluminium, S1-5. Aluminium-Verl., Auflage 5. Aufl., ISBN: 3870172355, Düsseldorf. 1994;
- [2] Harding, A.F.: European societies in the Bronze Age. Kapitel 2: The bronze age house and village, S22-72. Cambridge University Press, ISBN: 0521364779, Cambridge. 2000;
- [3] Ohle, M.: Gießtechnisch verbunden: Hybride CFK--Aluminium-Fügeverbindungen für den Leichtbau. Fraunhofer IFAM, Bremen. 21.05.2013;
- [4] Albers, A.und Braun, A.: Der Prozess der Produktentstehung. Henning, F.; Moeller, E. 9783446422674. Hanser. München. 2011;
- [5] Reitter, G.K.: Leichtbau durch Sicken. 4Ming e.K.  
<http://4ming.de/index.php/leichtbau-durch-sicken-fachbuch>, Abruf: 28.09.2015;
- [6] Kammer, C.und G. Drossel: Aluminium-Taschenbuch. Aluminium-Verl., Auflage 16. Aufl., ISBN: 3870172754, Düsseldorf. 2003;
- [7] Schlegelmilch, R.W.von Osterroth, J. et al.: Porsche. Ullmann, Auflage Special ed., updated ed., ISBN: 9783848004416, Potsdam. 2013;
- [8] Träger, O.und Plath, A.: Bedeutung des Leichtbaus für die Automobilindustrie. thermoPre, Chemnitz. 28.08.2013;
- [9] Europäische Union: zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen neuer Personenkraftwagen 333/2014. 5.4.2014;
- [10] unbekannt: Enkel der Göttin. Spiegel 38, Seite: 258–260. 1982;
- [11] Oberschelp, C.: Hybride Leichtbaustrukturen für den Karosseriebau. Gusswerkstofforientierte Anwendungsuntersuchungen für das Druckgießen.



- Gießerei-Inst; Hochschulbibliothek Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, ISBN: 9783981387285, Aachen, Aachen. 2013;
- [12] Gürtler, G.: Verbundguss zwischen Gusseisen oder Stahl und Aluminium. Gießerei, Technologisch wissenschaftliche Beihefte Heft 9, Seite: 1–5. 1952;
- [13] Céspedes-Gonzales, G.-E.: Aluminium-Stahl-Verbundguss als strukturgebendes Fügeverfahren für attraktive Fahrwerkskomponenten. Darlegung der Prozesskette. Akad. Buchh. Münzner; Techn. Univ. Bergakad, Auflage 1. Aufl., ISBN: 9783860124406, Freiberg, Freiberg. 2012;
- [14] Gürtler, G. und Sagel, K.: Wachstumsschichten bei der Reaktion von festem Eisen mit Schmelzen aus Aluminium und Aluminiumlegierungen. Zeitschrift für Metallkunde 46 10, Seite: 738–739. 1955;
- [15] Schöffmann, W. Howlett, M. et al.: Hochleistungs-Kurbelgehäuse für 180 bar Zünddruck. Gießerei-Rundschau 58 (3/4), Seite: 70–78. 2011;
- [16] Steaves, J.: Werkstofftrends im Verbrennungsmotor. Metalle und Beschichtungen. Bayerische Motorenwerke, München. 22.09.2004;
- [17] Doerr, J.: Konzeption, werkstoffgerechte Gestaltung und Festigkeitsnachweis für ein Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuse. Dissertation. Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern. 12.01.2005;
- [18] Henning, F. und E. Moeller: Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Hanser, ISBN: 9783446422674, München. 2011;
- [19] Moore, C.: Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK). Schunk Kohlenstofftechnik GmbH. <http://www.ingenieurparadies.de/de/ipar/18832>, Abruf: 10.03.2015;
- [20] Siebert, M. und Schlimmer, M.: Rundsteckverbindungen an Edelstahlgeländern prozesssicher kleben. Der Praktiker 7, Seite: 202–204. 2004;
- [21] von Hehl, A. und Hermann, A.: Schwarz-Silber: Übergangsstrukturen zur Verbindung von CFK und Aluminium. DLR Institut für Werkstoff-Forschung, Köln. 02.12.2014;

- [22] Ambos, E.: Urformtechnik metallischer Werkstoffe. Kapitel 7: Formverfahren und -ausrüstung, S66-145. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Auflage 3., überarb. Aufl., ISBN: 3342003790, Leipzig. 1990;
- [23] Bittner, G.Kniewallner, L. et al.: Dünnwandige Strukturteile für den Fahrzeugbau – Fertigung durch Niederdruck-Sandgießen. Gießerei-Rundschau 51 (11/12), Seite: 206–210. 2004;
- [24] Pabel, T.und Schindelbacher, G.: Wirkung von Kühlkokillen im Sandguss auf Gefüge und mechanische Eigenschaften der Legierung EN AC AlSi7Mg. Gießerei-Rundschau 55 (7/8), Seite: 153–157. 2008;
- [25] Crawford, R.: Sand Casting. CustomPartNet.  
<http://www.custompartnet.com/wu/SandCasting>. 2009;
- [26] Mader, W.und Heidrich, W.: Aluminium und seine Legierungen. Moeller, E. 9783446435902. Hanser. München. 2014;
- [27] Rohr, A.: Dauerfestigkeitserhöhung und Reduktion des irreversiblen Gusswachstums bei Aluminiumsandgusslegierungen. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. 20.01.2012;
- [28] Arbenz, H.: Kapitel A.4, Metallkundliche Probleme beim Gießen von von Gusslegierungen. Altenpohl, D. Springer. Berlin. 1965;
- [29] Altenpohl, D.: Aluminium von innen - das Profil eines modernen Metalles. Aluminium-Verl., Auflage 5. Aufl., ISBN: 3870172355, Düsseldorf. 1994;
- [30] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Auflage 2., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, ISBN: 978-3-540-69451-9, Berlin, Heidelberg. 2007;
- [31] Campbell, J.: Complete casting handbook. Metal casting processes, metallurgy, techniques and design; Chapter 6: Casting Alloys, S255-390. Butterworth-Heinemann, ISBN: 9781856178099, Oxford. 2011;
- [32] Anderko, K.und M. Hansen: Constitution of binary Alloys, Auflage 1, McGraw Hill, New York. 1965;

- [33] Rabinovič, B.V.Mai, R. et al.: Grundlagen der Gieß- und Speisetechnik für Sandformguß. Kapitel 3: Grundlagen der Gusskörperbildung S108-190. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Auflage 2., überarb. Aufl., ISBN: 3342002999, Leipzig. 1989;
- [34] Glatt, W. und E. Bruch: Aluminium Gusslegierungen. Sekundär-Aluminium. Qualität und Recycling. VDS, ISBN: 3872600923, Düsseldorf. 1988;
- [35] Sylvia, J.G.: Cast metals technology. Addison-Wesley, ISBN: 0201073951, Reading[Mass.], London. 1972;
- [36] Fischer, S.F.: Erstarrung, erschienen in: Handbuch Urformen. Bühring-Polaczek, A.; Michaeli, W., et al. ISBN 9783446420359. Hanser. München. 2014;
- [37] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Kapitel 3: Legierungsaufbau, Wärmebehandlung, Normen, S69-199. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Auflage 2., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, ISBN: 978-3-540-69451-9, Berlin, Heidelberg. 2007;
- [38] Campbell, J.: Complete casting handbook - Metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Chapter 15: Molding, S911-938. Butterworth-Heinemann, ISBN: 9781856178099, Oxford. 2011;
- [39] Kurz, W. und Fisher, D.J.: Fundamentals of solidification. Chapter 4: Solidification microstructure: cells and dendrites; S 63-92. Trans Tech Publ, Auflage 4., rev. ed., reprinted., ISBN: 0878498044, Uetikon-Zuerich. 2005;
- [40] Lamm, M.: Einfluss der Erstarrungsbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften von einkristallinen Superlegierungen bei großen Wandstärken. Dissertation. Kapitel 1: Stand der Literatur, S3-41. Universität Erlangen, Erlangen. 2007;
- [41] Roller, R.: Fachkunde für gießereitechnische Berufe -. Kapitel 6: Formstofftechnik, S250-274. Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, Auflage 5., überarb. und erw. Aufl., 1. Dr, ISBN: 978-3808517956, Haan-Gruiten. 2007;

- [42] unbekannt: Thermischer Kontaktwiderstand. Dassault Systems.  
[http://help.solidworks.com/2012/german/SolidWorks/cworks/Thermal\\_Contact\\_Resistance.htm](http://help.solidworks.com/2012/german/SolidWorks/cworks/Thermal_Contact_Resistance.htm). 2012, Abruf: 14.03.2015;
- [43] Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde. Kapitel 9: Umwandlungen im festen Zustand, S391-421. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Auflage 3. Auflage, ISBN: 9783540711049, Berlin, Heidelberg. 2007;
- [44] Rudolph, S.: Betrachtung zum Aufbau von Form- und Kernschichten unter besonderer Berücksichtigung ihrer feuerfesten Bestandteile. Gießerei-Praxis 8, Seite: 165–178. 1994;
- [45] Herfurth, K., N. Ketscher und M. Köhler: Gießereitechnik kompakt. Werkstoffe, Verfahren, Anwendungen. Giesserei-Verl., Auflage Veränd. Nachdr, ISBN: 9783872601483, Düsseldorf. 2005;
- [46] Böckh, P.v.: Wärmeübertragung - Grundlagen und Praxis. Kapitel 2: Wärmeleitung in ruhenden Stoffen, S17-72. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Auflage 2., bearbeitete Auflage, ISBN: 9783540314325, Berlin, Heidelberg. 2006;
- [47] Verein Deutscher Gießereifachleute (VDG). Merkblatt R 201: Gießerei-Formstoffe, Düsseldorf. Dezember 1976;
- [48] Tilch, W. und Flemming, E.: Formstoffe und Formverfahren. Kapitel 2: Grundoperationen der Formteilmfertigung und Beanspruchung im Fertigungsprozess, S23-29. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, Auflage 1. Aufl., ISBN: 3342005319, Leipzig, Stuttgart, Weinheim. 2001;
- [49] Tilch, W. und Flemming, E.: Formstoffe und Formverfahren. Kapitel 3: Grundeigenschaften der Formstoffkomponenten und ihre gießtechnologise Bewertung, S37-104;. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, Auflage 1. Aufl., ISBN: 3342005319, Leipzig, Stuttgart, Weinheim. 2001;
- [50] Hasse, S.: Gießerei-Lexikon. Schiele & Schön, Auflage 19, ISBN: 9783794907533, Berlin. 2008;



- [51] Tilch, W. und Flemming, E.: Formstoffe und Formverfahren. Mit 118 Tabellen. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, Auflage 1. Aufl., ISBN: 3342005319, Leipzig, Stuttgart, Weinheim. 2001;
- [52] Pawlek, F.: Metallhüttenkunde. De Gruyter, ISBN: 9783110074581, Berlin. 1983;
- [53] Recknagel, U. und M. Dahlmann: Spezielsand - Formgusndstoff für die moderne Kern- und Formherstellung.
- [54] thyssenKrupp Metallurgical Products: Produktspezifikation Chromiterzsand. 2013;
- [55] unbekannt: Bauxitsand. Produktbeschreibung. Termit D.D.O.,
- [56] GPT Schäfer GmbH: Cerasec B +C. Alternative Formgrundstoffe zu Quarz-, Chromerz- und Zirkonsand. Grevenbroich,.
- [57] Verein Deutscher Gießereifachleute (VDG): Prüfung von Formgrundstoffen - Bestimmung der granulometrischen Kennwerte, Düsseldorf. Oktober 1999;
- [58] Bindernagel, I.: Formstoffe und Formverfahren in der Gießereitechnik. Giesserei-Verl., ISBN: 3872600575, Düsseldorf. 1983;
- [59] Holtzer, M. Bobrowski, A. et al.: MONTMORILLONITE: A COMPARISON OF METHODS FOR ITS DETERMINATION IN FOUNDRY BENTONITES. Metalurgija 50 2, Seite: 119–122. 2011;
- [60] Tilch, W. und Flemming, E.: Formstoffe und Formverfahren. Kapitel 5: Technologie tongebundener Formstoffe, S135-264;. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, Auflage 1. Aufl., ISBN: 3342005319, Leipzig, Stuttgart, Weinheim. 2001;
- [61] unbekannt: Beste Gießereibentonite und Glanzkohlenstoffträger. Produktbeschreibung. Clariant (Süd-Chemie AG), Moosburg,
- [62] Verein Deutscher Gießereifachleute (VDG) R 100: Formstoff-Bindemittel, Düsseldorf. April 1989;

- [63] Tilch, W. und Flemming, E.: Formstoffe und Formverfahren. Kapitel 6: Verfahren mit kaltaushärtenden Formstoffen, S267-326. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, Auflage 1. Aufl., ISBN: 3342005319, Leipzig, Stuttgart, Weinheim. 2001;
- [64] Polzin, H.: Herstellung verloreener Formen und Kerne unter Verwendung von Dauermodellen, erschienen in: Handbuch Urformen. Bühring-Polaczek, A.; Michaeli, W., et al. ISBN 9783446420359. Hanser. München. 2014;
- [65] Verein Deutscher Gießereifachleute (VDG). Merkblatt R 305: Urethan-Cold-Box-Verfahren, Düsseldorf. Februar 1998;
- [66] Benz, N., C. Reinisch und M. Lüking: Schwefelreduziertes Furanharzsystem im Einsatz. 2013;
- [67] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 52612: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät - Durchführung und Auswertung, Berlin. September 1979;
- [68] Atkins, P.W. und Paula, J. de: Physikalische Chemie. Wiley-VCH, Auflage 4., vollst. überarb. Aufl., 2. Nachdr, ISBN: 9783527315468, Weinheim. 2012;
- [69] Kingery, W.D., Bowen, H.K. et al.: Introduction to ceramics. Wiley, Auflage 2. ed., ISBN: 0471478601, New York. 1976;
- [70] Kleiber, M. und Joh, R.: VDI-Wärmeatlas. Abschnitt C: Berechnung von Wärmeübertragern. Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978 3642199813,
- [71] Schindelbacher, G. und Kerber, H.: Umfassende Charakterisierung von Formstoffen mit einer neuen Prüfmethode. Gießerei-Rundschau 60 (3/4), Seite: 58–66. 0213;
- [72] Wiegand, A.: Einsatz von Thermoelementen. WIKA Datenblatt IN 00.23, Klingenberg. 2013;
- [73] Altenpohl, D.: Aluminium von innen - das Profil eines modernen Metalles. Kapitel 6: Technische Gießverfahren, S77-128;. Aluminium-Verl., Auflage 5. Aufl., ISBN: 3870172355, Düsseldorf. 1994;



- [74] unbekannt: Aluminum 356.0-T6. [www.mathweb.com](http://www.mathweb.com), Abruf: 14.10.2014;
- [75] unbekannt: Aluminum 360.0-F. [www.mathweb.com](http://www.mathweb.com), Abruf: 14.10.2014;
- [76] Heider, M.: Beschichtungstechnologien für die CFK-Aluminium Mischbauweise am Beispiel eines Fahrwerkstrukturbauteils. Masterarbeit. Hochschule Hof, Hof. 2014;
- [77] unbekannt: Compositeharz-System für Heisshärtung. Produktdatenblatt, Bad Urach. Sika Deutschland GmbH, Bad Urach,



## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen Kosten und Gewicht [4].....	4
Abbildung 2.2: Strategien des Leichtbaus [5] .....	5
Abbildung 2.3: Systematisierung des Fügeverfahrens "Fügen durch Umformen" in Anlehnung an DIN 8593, nach [6]; Farbig unterlegt und in fetter Schrift ist das Verfahren, welches im Rahmen dieser Arbeit Anwendung findet.....	7
Abbildung 2.4: Arten von Verbindungen in der Verbundgusstechnologie.....	8
Abbildung 2.5: Schliffbild einer Al-Fin-Bindung zwischen Gusseisen und einer Aluminiumlegierung [12; 13].....	9
Abbildung 2.6: Lagertraverse mit –eingegossenen Lagerschalen aus Grauguss [14]. .....	10
Abbildung 2.7: Bremsstrommel im Verbundguss: 1.) Aluminiumdruckguss, 2.) Ring aus Eisenguss, 3.) Rauhe Oberfläche der dem Aluminium zugewandten Ringseite, 4.) Blechformteil aus niedrig legiertem Stahl, 5.) Verzahnung um den Schubverbund zu gewährleisten [6]. .....	11
Abbildung 2.8: Kurbelgehäuse eines Reihensechszylinders der Firma BMW (2004) [16].....	12
Abbildung 2.9: Fügen durch Kleben einer Rohrsteckverbindung nach SIEBERT und SCHLIMMER [20].....	13
Abbildung 2.10:CFK-Aluminium-Hybridverbindung mit gießtechnisch in Aluminium integrierten Glasfaserlaminat als Übergangsstruktur [3]. .....	14
Abbildung 2.11: Aluminiumkörper mit eingegossenen Titanschlaufen und eingespleißten Kohlenstofffasern [21] .....	14
Abbildung 3.1: Gießtechnologien im Überblick; die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit dem Handform-Sandgussverfahren.....	15

Abbildung 3.2: Im Sandguss dargestelltes Bauteil mit Kern, Form horizontal geteilt; nach [25]. ..... 16

Abbildung 3.3: Prozessablauf beim Sandguss am Beispiel eines Demonstrationsteils mit Kern mit benonitgebundenem Sand. Dieser gegenständliche Versuch wurde im Technikum des Österreichischen Gießereiiinstituts (ÖGI) vorgenommen..... 17

Abbildung 3.4: a) Schaubild Aluminium-Silizium, eutektischer Punkt bei  $T= 577^{\circ}\text{C}$  und 12,5m% Si; b) mit Ausschnitt des technisch wichtigen Bereichs für AlSi-Legierungen, aus [32]...... 19

Abbildung 3.5: Erstarrungstypen (schematisch) [33]..... 19

Abbildung 3.6: Zusammenhang zwischen Zustandsschaubild und Erstarrungstyp [33]...... 20

Abbildung 3.7: Strukturzusammenhänge eines Gussgefüges [37]..... 21

Abbildung 3.8: Abhängigkeit resultierenden Erstarrungsmorphologie in Abhängigkeit des Temperaturgradienten  $G$  sowie der Erstarrungsfrontgeschwindigkeit  $v$ . Eine Änderung des Verhältnisses  $G/v$  führt von einer stängelkristallinen planaren Erstarrung (unten rechts) zu einer globulitischen dendritischen Erstarrung (oben links) [40]...... 23

Abbildung 3.9: Thermischer Kontakt-widerstand unter realer Betrachtung; Lokal finden sich Oberflächenrauheiten, welche eine durchgehende Wärmeleitung verhindern [42]. ..... 25

Abbildung 3.10: In Schlichte enthaltene Komponenten [44]...... 26

Abbildung 3.11: Temperaturverlauf eines abkühlenden Körpers; die Temperatur nähert sich asymptotisch einem Grenzwert an, welcher durch die Umgebung bestimmt wird [46]. ..... 29

Abbildung 3.12: Bestandteile des Systems Formstoff, nach [41; 47] ..... 30

Abbildung 3.13: Struktur von festem Quarz, in der Mitte des Tetraeders jeweils das Siliziumatom, an den äußeren Ecken jeweils das Sauerstoffatom nach [52]...... 32

Abbildung 3.14: Makroaufnahme eines Bauxitsandes. Charakteristisch ist die runde Kornform des Formgrundstoffs. AFS 52, durchschnittliche Korngröße 289µm .....34

Abbildung 3.15: Abhängigkeit der AFS-Kornfeinheit von der mittleren Korngröße, nach, [38; 51] .....36

Abbildung 3.16: Einteilung der Bindersysteme nach ihrer Wirkweise.....37

Abbildung 3.17: a) Dreischichtstruktur des Minerals Montmorillonit, b) Plättchenstruktur von Montmorillonit [61].....38

Abbildung 3.18: Reaktion zwischen Benzyletherpolyol und Isocyanat, wobei Polyurethan entsteht [65].....40

Abbildung 3.19: Zweiplattengerät mit horizontaler Versuchsanordnung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit [67] .....41

Abbildung 3.20: spezifische Wärmekapazitäten; a) bezogen auf die Masse b) bezogen auf das Volumen.....43

Abbildung 3.21: Wärmeleitfähigkeit für bentonitgebundenen Formstoff in Abhängigkeit von Temperatur und Packungsdichte [33].....43

Abbildung 3.22: Prüfschema für Grünzug-Nasszug und Biegefestigkeitsprüfung [71] .....45

Abbildung 3.23: Probenaufnahmevorrichtung für Druck- Scher-, Doppelscher und Spaltfestigkeitsprüfung [71] .....45

Abbildung 4.1: Schema CFK-Verbundguss im bauteilnahen Abschnittsmodell inkl. Gießsystem; (1) Einguss, (2) Gießfilter, (3) Gussknoten, (4) CFK-Einleger; .....46

Abbildung 4.2: Vorgangsweise zur Untersuchung der Prozessgrößen .....47

Abbildung 4.3: links: Schematische Schnittansicht des Miniaturmodells; rechts: dreidimensionale Ansicht des Gusskörpers mit der CfK-Platte .....47

Abbildung 4.4: Zu selektierende Einflussgrößen, welche beim Verbundguss CFK-Aluminium eine Rolle spielen .....49

Abbildung 5.1: Eigens entwickeltes und angefertigtes Miniaturmodell für die Vorversuche .....	53
Abbildung 5.2: Arbeitsablauf beim Versuch "Miniaturmodell" .....	54
Abbildung 5.3: Auswertungssystematik, kursiv: nur am Modell Gussknoten anwendbar .....	56
Abbildung 5.4: Sondierung der Varianten für die Versuche im Modell Gussknoten; ins Modell Gussknoten übertragene Varianten sind grün, bzw. kursiv gekennzeichnet. Mit * versehene Systeme konnten nicht beprobt werden. ....	57
Abbildung 5.5: Abkühlkurve für Versuch im Miniaturmodell, Form 4, Bild rechts oben: thermische Schutzschicht in Form einer handelsüblichen Schlichte (Velvacoat) ..	58
Abbildung 5.6: Abkühlkurve im Erstarrungsbereich für Form 4 .....	59
Abbildung 5.7: SDAS-Werte für Form 4, Nest 1-3 .....	60
Abbildung 5.8: Abgüsse der einzelnen Fomnester aus Form 4.....	61
Abbildung 5.9: geschichtete CFK-Platte nach Abguss aus Form 4 .....	62
Abbildung 5.10: Abkühlkurve der Form 3, mit Einsatz der Luftkühlung in Nest 2 ..	63
Abbildung 5.11: Maxima der Rückseitentemperaturen im Miniaturmodell.....	64
Abbildung 5.12: Abkühlkurven der Proben, mit eingezeichneten Liquidus- und Soliduslinien .....	65
Abbildung 5.13: Vergleich der Legierungen AlSi10Mg, AlSi7Mg und AlSi8Cu3 hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Erstarrungscharakteristika .....	67
Abbildung 6.1: Vergleich V4 und V14, ungekürzte und gekürzte Form .....	68
Abbildung 6.2: Luftkühlwanne mit Rahmen zur indwendigen Kühlung des CFK-Profiles mit Druckluft; a) Lanze mit radialen Bohrungen; b) Lanze im Einsatz .....	70

Abbildung 6.3: angefertigte Konturkühlkörper für den schnelleren Wärmeübergang in der Verbundgusszone; links: Draufsicht, oben: Innenansicht mit Kühlverrippung ..... 71

Abbildung 6.4: Kühlkokillen aus Aluminium in V18, Formenvorbereitung..... 72

Abbildung 6.5: Messpunkte am Gussknoten; rot: Element Filter, blau: Element Zulauf, grün: Element oben (innen und außen), orange: Element unten (innen und außen)..... 73

Abbildung 6.6: Maßnahmen zur positiven Umsetzung des Verbundes Aluminium-CFK durch Sandguss ..... 74

Abbildung 6.7: Abkühlkurve für V14, Abkühlung im Sand ohne Innenkühlung ..... 75

Abbildung 6.8: Abkühlkurve für V18, Abkühlung im Sand mit Innenkühlung durch Druckluft..... 75

Abbildung 6.9: Schnitt durch V14 (links) und V18 (rechts) ..... 76

Abbildung 6.10: Abkühlkurve von V18 mit GG-Kokillen und Ceramcote Al 702 als thermische Schutzschicht..... 77

Abbildung 6.11: Schliffbild der Verbundzone von V22 ..... 77

Abbildung 6.12: Abkühlkurve von V25 mit GG-Kühlkörpern mit einer umlaufenden Dicke von 50mm ..... 78

Abbildung 6.13: Ergebnis des Ausziehversuches, aufgetragen in einem Kraft-Weg Diagramm. Die Fläche unter der Kurve gibt die nötige energie wider, welche benötigt wird um das Profil aus dem Aluminiummantel zu ziehen. Relevanz besitzt lediglich die blaue (oberste) Linie ..... 80

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vor und Nachteile des Klebens als Füge­technik [18] .....	12
Tabelle 3.1: Anforderungen an Form­grundstoffe nach [49].....	31
Tabelle 3.2: Zusammen­setzung von Chromitsand (Ursprung Südafrika) .....	33
Tabelle 3.3: Zusammen­setzung von Bauxitsand (Ursprung China) [55] .....	34
Tabelle 3.4: Überblick über die wichtigsten Form­stoffprüfungen (nach [41]) .....	44
Tabelle 4.1: Zulässige Abweichungen Thermo­element Typ K und Typ R, nach [72]....	48
Tabelle 4.2: Übersicht über ausgewählte Guss­legierungen und deren Eigenschaften.	50
Tabelle 4.3: Wärme­leitung verschiedener Form­stoffe und Materialien, nach [51] .....	51
Tabelle 5.1: Übersicht über die Versuchs­planung für die Vorversuche im Miniaturmodell. Insgesamt 27 Kombinationen konnten untersucht werden.....	55
Tabelle 5.2: Kombination der Versuchs­bedingungen für Form 4 (Auszug aus Tabelle 5.1) .....	58
Tabelle 5.3: Abkühlraten für verschiedene Form­materialien in den unterschiedlichen Nestern bei Form 4.....	59
Tabelle 5.4: Ende der Erstarrung und maximale Abkühlrate im Festen für Form 4 .....	60
Tabelle 5.5: unterschiedliche physikalische Daten der untersuchten Sand­systeme sowie Ergebnisse, die im Zuge der Untersuchungen gewonnen werden konnten (farbig hinterlegt).....	66
Tabelle 5.6: Abkühlraten der unterschiedlichen Legierungen .....	66
Tabelle 6.1: Übersicht Versuche ab V13, ab V17 (grau hinterlegter Bereich) wurden ausschließlich metallische Kühlkörper verwendet.....	69
Tabelle 6.2: Resultate der Auswertung der Abkühlkurven von V22 und V25 (GG-Kühlkörper in unterschiedlichen Stärken) .....	78



Tabelle 6.3: verwendete Thermoschutzschichten bei Versuchen Gussknoten.....79



## 12 Abkürzungsverzeichnis

ADI	Austemperd ductile iron
AFS	American Foundry Society
At%	Atomprozent
B.E.T.	Brunauer, Emmet, Teller
BMW	Bayrische Motorenwerke
CET	Columnar to equiaxed
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computer-Numerical Controlled
DAS	Dendrite Arm Spacing
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMEA	Dimethylethylamin
ETP	Electrolytic Tough Pitch
EZW	Entwicklungszentrum Weissach (Porsche)
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
G	Gradient [K/mm]
Gew%	Gewichtsprozent
GG	Grauguss
GJL	Grauguss mit Lamellengraphit
K	Kelvin
M	Gießmodul (M=Volumen/Oberfläche)
PAG	Porsche Aktiengesellschaft
PEA	Porsche Eigene Anwendung
PU	Polyurethan
REM	Rasterelektronenmikroskop
TEA	Trimethylamin
USA	United States of America
V	Erstarrungsgeschwindigkeit [mm/s]
VDG	Verein deutscher Gießereifachleute
VEB	Volkseigener Betrieb



## 13 Anhang