



Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
der Technischen Universität München

Horizontales Stranggießen von Aluminium- Verbundbändern

Martin Wimmer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. i.R. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Baier

Die Dissertation wurde am 31.03.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 17.11.2015 angenommen.

Geleitwort

Die Kombination der ersten und der zweiten Verarbeitungsstufe stellt eine seltene Ausgangsposition für eine fachübergreifende Forschung in der deutschen Hochschullandschaft dar. Für die gestiegenen Anforderungen an Produkte und den verstärkten Kostendruck ist dieses Ineinandergreifen von Fertigungsverfahren ein idealer Nährboden für Forschungsaktivitäten, denn erst die gemeinsame Betrachtungsweise dieser beiden Verfahrensgebiete erlaubt Innovationen in vielen nachgeschalteten Bereichen der Industrie.

Vor allem Neuentwicklungen, aber auch die Weiterentwicklung bestehender Fertigungsverfahren, sollen im Umfeld eines härter werdenden Wettbewerbs dazu beitragen, die Position des Standortes Deutschland zu kräftigen. Das gegenseitige Befruchten von Theorie und Praxis durch die Zusammenarbeit von Hochschule und Industrie kann als Beitrag dafür angesehen werden.

Eine enge Anlehnung der Themen an die in der betrieblichen Praxis auftretenden Probleme als ein Bindeglied zwischen Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung liegt daher im Interesse dieser Berichte. Die einzelnen Arbeiten sind folglich als Bausteine zu betrachten, die einen entscheidenden Einfluss auf die Verbesserung bisheriger Technologien besitzen.

Neben den beiden großen fertigungstechnischen Schwerpunkten Urformtechnik und Umformtechnik, bei denen der isolierte Prozess im Mittelpunkt steht, gehört die gesamtheitliche Betrachtung der Verfahren mit naturwissenschaftlichen und planerischen Themen zum Inhalt der Arbeiten des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen.

Ergebnisse und Inhalte der Forschungsberichte sollen nicht als Einbahnstraße dem Wissenstransfer von Forschungsergebnissen in der Praxis dienen, sondern sie sollen neben der Basis für weiterführende Arbeiten auch als Diskussionsgrundlage für den Dialog zwischen Hochschule und Industrie angesehen werden.

Hartmut Hoffmann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München.

Meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. i. R. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, ehemaliger Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, gilt mein herzlicher Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir zugestandene Freiheit bei der Bearbeitung.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Baier, Ordinarius des Lehrstuhls für Leichtbau der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Diese Dissertation basiert auf den Ergebnissen der öffentlich geförderten Verbundprojekte „High Performance Aluminum Based Bearings“ und „Highly Innovative Produktion of Efficient Radial Bearings“. Für die finanzielle Unterstützung sei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gedankt. Bei allen Projektmitarbeitern möchte ich mich für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit im Projekt bedanken.

Den Mitarbeitern und Studenten des Lehrstuhls die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich für die fruchtbaren Diskussionen und die tatkräftige Unterstützung. Allen voran seien hier Herr Dr.-Ing. Christoph Nerl und Herr Tim Mittler genannt. Weiterhin bedanke ich mich bei den Mitarbeitern unserer Werkstatt und unserer Laborantin Frau Corinna Sutter für die Herstellung der Proben und Schliffe.

Ganz besonderer Dank gebührt jedoch meiner Familie und meiner Freundin Katrin, die durch Ihre Förderung und den uneingeschränkten Rückhalt meinen Werdegang ermöglicht haben.

München, im März 2015

Martin Wimmer

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung eines neu entwickelten kontinuierlichen Verbundgießverfahrens zur Erzeugung von zweischichtigen Aluminiumverbundbändern. Durch die Variation der Gieß- und Anlagenparameter wird das Prozessfenster des Verfahrens für die Werkstoffkombination AlSn6Cu und Al99,5 ermittelt. Die Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Prozessrobustheit sowie der Verbundqualität werden aufgezeigt. Abschließend wird die umformende Weiterverarbeitbarkeit der Verbunde nachgewiesen.

Abstract

The subject of this thesis is the investigation of a newly developed continuous composite casting process. The process window for the production of bilayer aluminium strips consisting of the alloy AlSn6Cu and pure aluminium Al99.5 is identified by varying the procedural and plant-specific parameters. Process parameter influence with respect to the stability of the casting process and compound quality is derived and analyzed. The subsequent processability of the compounds by cold rolling is shown.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Kenntnisse.....	3
2.1	Stranggießen	3
2.1.1	Stranggießen allgemein	3
2.1.2	Horizontales Stranggießen mit ofenabhängiger Gleitkokille	6
2.2	Verbundgießen	13
2.2.1	Definition	13
2.2.2	Verbundgießverfahren	14
2.2.3	Voraussetzungen für die stoffschlüssige Verbundbildung und ablaufende Mechanismen	17
2.2.4	Möglichkeiten zur Beeinflussung der thermischen Verhältnisse	21
2.2.5	Vorgänge beim Erstarren und Abkühlen	25
2.3	Gusswerkstoffe	26
2.3.1	Reinaluminium Al99,5	26
2.3.2	Aluminiumlegierung AlSn6Cu.....	28
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	32
4	Versuchs- und Messeinrichtungen	35
4.1	Versuchsanlagen	35
4.1.1	Stranggießanlage	35
4.1.2	Verbundgießeinheit	36
4.1.3	Laborschmelzofen.....	42
4.2	Messeinrichtungen.....	42
4.2.1	Temperaturmessgerät.....	42
4.2.2	Lichtmikroskop	42
4.2.3	Zug-Druck-Prüfmaschine	43

5	Horizontales Stranggießen des Substratbandes.....	44
5.1	Versuchsdurchführung und -auswertung	44
5.1.1	Gießen des Substratbandes.....	44
5.1.2	Gieß- und Anlagenparameter.....	45
5.1.3	Temperaturmessung	46
5.2	Versuchsergebnisse	47
5.2.1	Einfluss der Gießgeschwindigkeit	48
5.2.2	Einfluss der Strangbewegung (Abziehkinematik).....	51
5.2.3	Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse.....	54
6	Analytische Berechnung des Verbundgießprozesses	55
7	Horizontales Stranggießen von Aluminium-Verbundbändern	63
7.1	Versuchsdurchführung und -auswertung	63
7.1.1	Gießen des Verbundbandes	63
7.1.2	Gieß- und Anlagenparameter.....	64
7.1.3	Temperaturmessung	66
7.1.4	Metallographische Analyse der Verbundzone	66
7.1.5	Binefestigkeitsprüfung	68
7.2	Versuchsergebnisse	72
7.2.1	Reproduzierbarkeit.....	72
7.2.2	Einfluss der Strangbewegung (Abziehkinematik).....	79
7.2.3	Einfluss der Gießgeschwindigkeit	88
7.2.4	Einfluss der Aufgießdicke.....	94
7.2.5	Einfluss der Aufgießschlitzbreite	100
7.2.6	Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze.....	105
7.2.7	Einfluss des Kühlwasserdurchflusses	109
7.2.8	Einfluss der aktiven Kühlzonen	114
7.2.9	Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse.....	118

8 Thermomechanische Weiterverarbeitung der Aluminium-Verbundbänder	124
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	130
10 Verzeichnisse.....	134
10.1 Abbildungsverzeichnis	134
10.2 Tabellenverzeichnis	139
10.3 Literaturverzeichnis.....	141
10.4 Normen und Richtlinien	152
10.5 Sonstige Quellen	153
10.6 Studienarbeiten.....	154
11 Anhang	155

Verzeichnis der Kurzzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung der Größe
a_1	mm	Breite des Substratstranges
a_2	mm	Breite des Aufgussstranges
A	mm ²	Querschnitt des Stranges
A_{Ch}	mm ²	Bindungsfläche bei der Chalmersprüfung
A_{KF}	mm ²	Kontaktfläche
b	mm	Breite des vertikalen Schlitzes im Aufgießmodul
b_{Scher}	mm	Breite der Prüffläche der Scherzugprobe
C_p	J/(kgK)	spezifische Wärmekapazität
$C_{pL,Aufguss}$	J/(kgK)	spezifische Wärmekapazität des Aufgusswerkstoffes in flüssiger Phase
$C_{pS,Aufguss}$	J/(kgK)	spezifische Wärmekapazität des Aufgusswerkstoffes in fester Phase
$C_{pS,Sub}$	J/(kgK)	spezifische Wärmekapazität des Substratwerkstoffes in fester Phase
d_1	mm	Dicke des Substratstranges
d_2	mm	Dicke des Aufgussstranges
$F_{max,Ch}$	N	Höchstkraft bei der Chalmersprüfung
$F_{max,Scher}$	N	Höchstkraft bei der Scherzugprüfung
f_s	-	Festphasenanteil
H	mm	Hubweite beim Ziehzyklus
$h_{Aufguss}$	J/kg	spezifische Umwandlungsenthalpie des Aufgusswerkstoffes
$h_{Sub}(T_{Sub,Aus})$	J/kg	temperaturabhängige spezifische Umwandlungsenthalpie des Substratwerkstoffes
l_{Scher}	mm	Länge der Prüffläche der Scherzugprobe

Zeichen	Einheit	Beschreibung der Größe
m_{Auf}	kg	Masse des Aufgusswerkstoffes
m_{Sub}	kg	Masse des Substrates
Q	l/min	Kühlwasserdurchfluss
$\dot{Q}_{\text{Ab},1}$	W	kapazitiver Wärmestrom des aus der Kokille abgezogenen Bandes
$\dot{Q}_{\text{Ab},2}$	W	durch Kühlwasser abgeführter Wärmestrom
$\dot{Q}_{\text{Ab},3}$	W	Wärmestrom durch Wärmeleitung im Strang
$\dot{Q}_{\text{Ab},4}$	W	Wärmestrom durch Strahlung an die Umgebung
$\dot{Q}_{\text{Aufguss,Schmelze}}$	W	von Aufgusserschmelze zugeführte Wärmemenge je Zeiteinheit
$\dot{Q}_{\text{Aufguss,Strang}}$	W	von Aufgussstrang abgeführte Wärmemenge je Zeiteinheit
$\dot{Q}_{\text{Sub,Zu}}$	W	Wärmestrom in das Substratband
$\dot{Q}_{\text{Sub,Ein}}$	W	von Substratstrang zugeführte Wärmemenge je Zeiteinheit
$\dot{Q}_{\text{Sub,Aus}}$	W	von Substratstrang abgeführte Wärmemenge je Zeiteinheit
$\dot{Q}_{\text{Zu},1}$	W	kapazitiver Wärmestrom des in die Kokille fließenden Metalls
$\dot{Q}_{\text{Zu},2}$	W	Wärmestrom durch Wärmeleitung der Schmelze
$\dot{Q}_{\text{Zu},3}$	W	Wärmestrom durch Wärmeleitung von der Isolierplatte in die Kokille
$\dot{Q}_{\text{Zu},4}$	W	Wärmestrom durch die Erstarrungswärme der Schmelze
R_{Ch}	N/mm ²	Binefestigkeit nach Chalmers
t	s	Zeit
T_{Aufguss}	K	Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes
$T_{\text{Aufguss,Aus}}$	K	Austrittstemperatur des Aufgusswerkstoffes
$T_{\text{Aufguss,Erstar}}$	K	Erstarrungstemperatur des Aufgusswerkstoffes

Zeichen	Einheit	Beschreibung der Größe
T_{KF}	K	Kontakttemperatur
T_{krit}	K	für Verbundbildung nötige Substratoberflächentemperatur
T_{Sol}	K	Solidustemperatur
$T_{Sub,Aus}$	K	Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes
$T_{Sub,Ein}$	K	Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes
T_1	K	Ausgangstemperatur des Substratwerkstoffes
T_2	K	Ausgangstemperatur des Aufgusswerkstoffes
t_w	s	Wartezeit beim Ziehzyklus
v	m/s	Geschwindigkeit
v_g	mm/min	mittlere Gießgeschwindigkeit
α	°	Kontaktwinkel
$\alpha_{Kokille-Kühler}$	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Kokille und dem Kühler
$\alpha_{Kühler-Wasser}$	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient zwischen dem Kühler und dem Kühlwasser
$\alpha_{Strang-Kokille}$	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient zwischen dem Strang und der Kokille
λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{Kokille}$	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit der Kokille
$\lambda_{Kühler}$	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit des Kühlers
ρ	kg/m ³	Dichte
$\rho_{Aufguss}$	kg/m ³	Dichte des Aufgusswerkstoffes
ρ_{Sub}	kg/m ³	Dichte des Substratwerkstoffes
η	Ns/m ²	dynamische Viskosität
σ	kg/s ²	Oberflächenspannung

Zeichen	Einheit	Beschreibung der Größe
σ_{12}	kg/s ²	Grenzflächenspannung zwischen festem Grundwerkstoff und flüssigem Metall
σ_{13}	kg/s ²	Oberflächenspannung zwischen festem Grundwerkstoff und der Atmosphäre
σ_{23}	kg/s ²	Oberflächenspannung zwischen flüssigem Metall und der Atmosphäre
τ	N/mm ²	Scherfestigkeit
ω	rad/s	Walzendrehgeschwindigkeit

1 Einleitung

Die Entwicklungstrends auf dem Gebiet der Verbrennungsmotoren sind geprägt durch die stetig steigenden gesetzlichen und gesellschaftlichen Anforderungen hinsichtlich der Verringerung des Kraftstoffverbrauches sowie des CO₂- und Schadstoffausstoßes. Zur Effizienzsteigerung und Emissionsreduzierung setzen aktuelle und zukünftige Motorenkonzepte verstärkt auf Maßnahmen wie Downsizing, aggressive Direkteinspritzung und Turboaufladung. Auf Grund der damit einhergehenden Erhöhung der Zünddrücke, der Verbrennungstemperaturen und der spezifischen Leistungsdichten nehmen die mechanischen, thermischen sowie tribologischen Anforderungen an die Motorkomponenten erheblich zu. [BACK09, GOLL05, TONN08]

Konventionelle Aluminiumzinn-Verbundgleitlager, deren Einsatz als Grund- und Pleuellager von Verbrennungskraftmaschinen weit verbreitet ist, stoßen auf Grund dieser Entwicklungen zunehmend an ihre Belastungsgrenzen [AFFE96, DAMM09, DEIC02]. Um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es neben der Entwicklung höherfester Werkstoffkonzepte mit guten tribologischen Eigenschaften auch der Erarbeitung neuer, für diese Materialien geeigneten, Fertigungsverfahren für die Halbzugproduktion [GZOV10, LANG10, LANG14].

Die Herstellung von Aluminium-Werkstoffverbunden als Vormaterial zur Gleitlagerfertigung erfolgt derzeit ausschließlich durch Kaltwalzplattieren [LANG14, MANN77, WILH04]. Bei diesem Verfahren werden die Grundwerkstoffe in einem Kaltwalzprozess durch Reib- und Pressschweißvorgänge unter Ausbildung einer vorwiegend adhäsiven Bindung gefügt [GRIT11, YAN04]. Maßgeblich für die Verbundqualität sind der Umformgrad und somit die Formänderung der Werkstoffe im Walzspalt. Zudem wird die Bindefestigkeit durch die Temperatur der Fügepartner, deren Oberflächen- und Werkstoffzustand sowie durch die Walzgeschwindigkeit beeinflusst [BAY85, GROC14, MADA02, SCHM04a, SCHM04b, YAN04].

Vor allem bei der Verarbeitung von höherfesten Aluminium-Werkstoffverbunden stößt das Walzplattieren an seine Verfahrensgrenzen. Zur Sicherstellung einer hinreichen-

den Bindefestigkeit zwischen den Fügepartnern werden bei diesem Verfahren Umformgrade von 50 – 70 % benötigt [LEHN09, MADA02, YAN04]. Bei der Verarbeitung von höherfesten Aluminiumwerkstoffen mit geringer Duktilität wird deren Umformvermögen bei diesen hohen Umformgraden partiell überschritten. In Folge dessen treten stark vermehrt Randrisse im Verbundhalbzeug auf, die den Materialausnutzungsgrad erheblich verringern und somit einer wirtschaftlichen Fertigung entgegenstehen [KAWA01, LANG14, LENA07].

Eine Alternative zur Herstellung von Aluminium-Werkstoffverbunden stellt das kontinuierliche Verbundgießen dar. Gegenüber dem konventionellen Fertigungsverfahren Walzplattieren können durch die Kombination des Gießens und des stoffschlüssigen Fügens in einem einzigen Fertigungsschritt erhebliche technologische und ökonomische Vorteile realisiert werden. Mit diesem Fertigungsverfahren lässt sich die Bandbreite der herstellbaren Werkstoffkombinationen erheblich vergrößern, da sich auf gießtechnischem Weg auch harte, spröde und höherfeste Legierungen mit stark unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften verbinden lassen. Zudem wird die Bindefestigkeit zwischen den Grundwerkstoffen durch die Ausbildung einer stoffschlüssigen metallischen Bindung erheblich erhöht. Ferner können die Herstellkosten durch die Verschlinkung der Prozesskette, auf Grund des Wegfalls von aufwendigen Oberflächenbehandlungs- sowie Zwischenglühschritten, und einer effizienten Materialausnutzung deutlich gesenkt werden. [LANG14, NERL14b]

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein neu entwickeltes Verbundgießverfahren auf Basis der horizontalen Stranggießtechnologie für die Erzeugung von zweischichtigen Aluminiumverbundbändern am Beispiel der Werkstoffkombination AlSn6Cu mit Al99,5 untersucht. Diese Materialpaarung stellt einen Standardwerkstoffverbund bei der Herstellung von Aluminiumzinn-Gleitlagern dar. Ziel der Arbeit ist die systematische experimentelle Erarbeitung des Prozessfensters des Verfahrens. Zudem sollen die Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Prozessrobustheit sowie der sich einstellenden Verbundqualität ermittelt werden. Abschließend soll die industrielle thermomechanische Weiterverarbeitung der erzeugten Verbundbänder nachgewiesen werden.

2 Grundlagen und Stand der Kenntnisse

2.1 Stranggießen

2.1.1 Stranggießen allgemein

Nach [DIN8580] gehört Stranggießen zu den Gießverfahren mit Dauerformen und ist ein Urformverfahren aus dem flüssigen Ausgangszustand. Durch Stranggießen werden geometrisch einfache Vorprodukte und Halbzeuge produziert, die anschließend zumeist in Umformprozessen weiterverarbeitet werden. Beim Stranggießen tritt der eingegossene Werkstoff schon während des Gießprozesses aus der Gießform als erstarrter Strang aus. In der Gießform stellt sich ein stationärer Zustand des Gieß- und Erstarrungsprozesses bei einem kontinuierlichen Materialtransport ein. Das formgebende Element ist die beidseitig offene, gekühlte Kokille. Diese ist stets kürzer als das Gussprodukt. Das Prinzip des Stranggießens ist schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt. [HERF07]

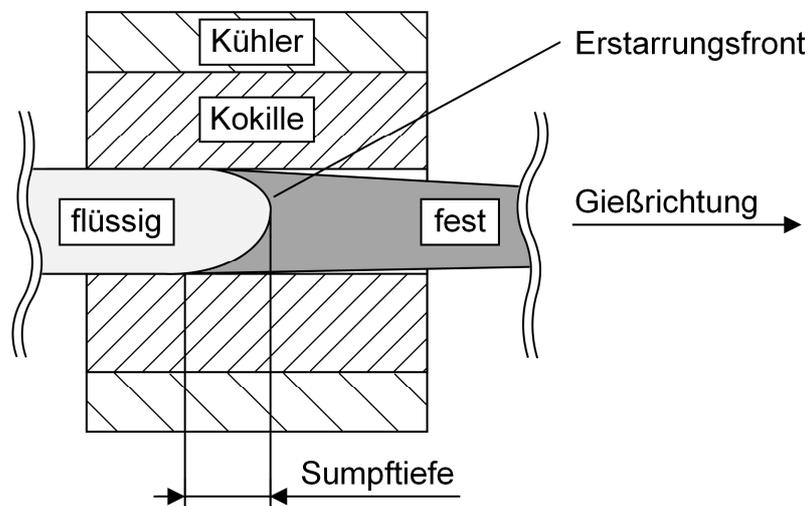


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung des Stranggießens

Während des Gießprozesses wird auf einer Seite der Kokille fortwährend flüssiges Metall zugeführt. Auf dem kurzen Weg durch die Kokille wird dem flüssigen Metall so viel Wärme entzogen, dass es ganz oder unter Bildung einer tragfähigen Randschale erstarrt. Der Strang wird mit Hilfe einer Zieheinrichtung auf der gegenüber liegenden

Seite aus der Kokille gezogen. Auf diese Weise können unterschiedliche Strangformate wie etwa Brammen, Bänder, Knüppel, Rundbolzen oder Rohre mit konstantem Querschnitt hergestellt werden. Auch die Herstellung komplexer Profile mit unterschiedlichen Wandstärken ist möglich. [BAUM00, HERR58, HERR80, WOLF92]

Angepasst an die jeweiligen Anforderungen des Gusswerkstoffes, des Formates, der geforderten Gießleistung sowie der Produktqualität sind seit den Anfängen des Stranggießens im 19. Jahrhundert eine Vielzahl möglicher Verfahrensvarianten entwickelt worden. Eine systematische Gliederung der Stranggießverfahren kann anhand der Merkmale Art der Kokille, Anbindung zwischen Ofen und Kokille sowie Gießrichtung erfolgen (siehe Tabelle 2-1).

	Stranggießverfahren		
Art der Kokille	<i>feststehende Kokillenwand (Gleitkokille)</i>		<i>bewegte Kokillenwand (mitwandernde Kokille)</i>
Anbindung Ofen-Kokille	<i>ofenunabhängig</i>	<i>ofenabhängig</i>	<i>ofenunabhängig</i>
Gießrichtung	<i>vertikal</i>	<i>vertikal bis horizontal</i>	<i>geneigt bis vertikal</i>

Tabelle 2-1: Gliederung der Stranggießverfahren nach [BRAU94, KRAL78, NERL14b, RICK08, SCHW57]

Die heute gebräuchlichen Stranggießanlagen können anhand der Wirkweise der Kokille in zwei Gruppen unterteilt werden. Ein Großteil der Anlagen wird mit Kokillen mit feststehenden Wänden, sogenannten Gleitkokillen, beziehungsweise Durchlaufkokillen betrieben. Während des Strangabzugs findet bei diesen Bauformen eine Relativbewegung zwischen dem Gussprodukt und der Gießform statt. Auf Grund der auftretenden Reibungskräfte zwischen der gerade erstarrten Strangrandschale und der Kokillenoberfläche wird der Strang bei der Abziehbewegung auf Zug belastet. Bei den Verfahren mit mitlaufenden beziehungsweise beweglichen Kokillenwänden erfolgt das Gießen zwischen Walzen, Bändern oder Raupen. Diese Verfahren werden vor allem zum Gießen von sehr dünnen Strängen mit einem kleinen Profilquerschnitt verwendet.

Durch die geringe Belastung des Stranges können damit auch schwer gießbare und heißrissempfindliche Legierungen mit einem großen Erstarrungsintervall prozesssicher verarbeitet werden. Im Vergleich zum Stranggießen mit Gleitkokille können wesentlich höhere Gießgeschwindigkeiten realisiert werden. [DAHM80, HERR58, HERR80, SCHM96, SEIF76, WEBE83]

Prinzipbedingt kann die Anbindung der Kokille an den Ofen bei den Verfahren mit bewegten Kokillenwänden nur ofenunabhängig erfolgen. Bei einer ofenunabhängigen Anbindung ist die Kokille beweglich gegenüber dem Warmhalteofen, der die flüssige Schmelze enthält, angebracht. Bei dieser Anordnung kann eine Gleitkokille eine oszillierende Bewegung ausführen, um das Anhaften der Randschale an der Kokillenwand zu unterbinden. Die Schmelze wird über ein Rohr- oder Rinnensystem der Gießkavität zugeführt. Im Gegensatz hierzu steht die ofenabhängige Anordnung der Kokille. Hier ist die Gießform direkt am Ofen angebunden und kann keine eigenständige Bewegung durchführen. [BAUM00, BRAUN94, NERL14b, SIGG03, RICK08]

Hinsichtlich der Gießrichtung wird zwischen vertikalen und horizontalen Stranggießverfahren unterschieden. Bei den Vertikalanlagen erfolgt der Strangabzug in Schwerkraftrichtung. Von großem Vorteil sind hierbei die symmetrischen Erstarrungsverhältnisse über dem Umfang des Gussproduktes. Nachteilig sind die großen Bauhöhen der Anlage und die daraus resultierenden hohen Investitionskosten. Zudem kann ein kontinuierlicher Gießprozess nur durch Biegen des Stranges in die Horizontale erreicht werden. In der Horizontal-Stranggießtechnik wird der Strang waagrecht aus der Kokille gezogen. Die Anlagenkosten von Horizontalgießmaschinen sind auf Grund der kleineren Bauhöhen und der reduzierten Komplexität im Vergleich zu Vertikalanlagen um ca. 50 % geringer. Zudem zeichnen sich diese Anlagen durch eine hohe Flexibilität bezüglich der gießbaren Formate und Gusswerkstoffe aus. [BAUM00, BRAUN94, DAHM80, NERL14b, SCHM96, SEIF76, SIGG03]

2.1.2 Horizontales Stranggießen mit ofenabhängiger Gleitkokille

Für die Durchführung von Stranggießversuchen steht am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) der Technischen Universität München eine horizontale Stranggießanlage zur Verfügung. Die Anlage wird mit einer ofenabhängigen Gleitkokille betrieben, deren Aufbau schematisch in Abbildung 2-2 dargestellt ist.

Im industriellen Umfeld wird das Einsatzmaterial in der Regel in einem separaten, induktionsbeheizten Ofen erschmolzen und legiert. Die gießfertige Schmelze wird im Anschluss daran in den Warmhalteofen der Stranggießanlage überführt. Der Tiegel des Warmhalteofens verfügt im unteren Bereich über einen Ofenauslauf, gegen den das Kokillen-Kühler-Paket gepresst wird. Die thermische Trennung zwischen dem Warmhalteofen und dem Urformwerkzeug wird durch eine keramische Feuerfestisolierung zwischen der Tiegelloffnung und der Kokille realisiert. Die Kokille wird durch zwei wasserdurchströmte Kupferkühlplatten gekühlt. Die Abziehrollen der Zieheinheit befördern den erstarrten Strang in horizontaler Richtung aus der Kokille.

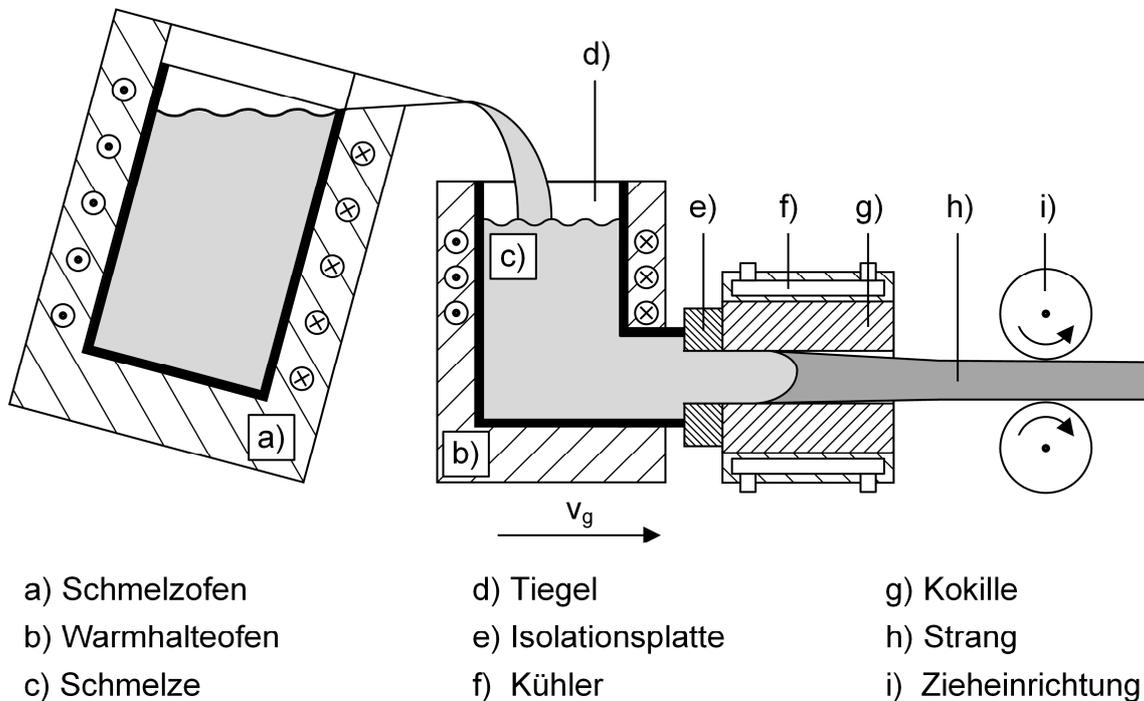


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung des horizontalen Stranggießens mit ofenabhängiger Gleitkokille

Die Gleitkokille besteht beim Gießen von NE-Metallen zumeist aus Graphit. Dieser Werkstoff verfügt über sehr gute Trockenschmier- und Gleiteigenschaften. Zudem ist Graphit inert gegenüber NE-Schmelzen und zeichnet sich durch eine geringe Benetzungsfähigkeit, eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit aus. [BRAU94, KIND95, WEBE83]

Innerhalb der Kokille wird dem Gusswerkstoff so viel Wärme entzogen, dass dieser erstarrt. Ein Großteil der Wärmemenge wird im Einlaufbereich der Kokille aus der Schmelze abgeführt. Hier liegen auf Grund des Kontaktes Festkörper zu Fluid nahezu ideale Wärmeübergangsbedingungen vor. Im weiteren Verlauf beginnt sich eine tragfähige Randschale auszubilden, die das flüssige Metall, den Sumpf, umgibt. In Folge der Erstarrungs- und Festkörperschwindung löst sich diese von der Kokillenwand ab und ein durchgängiger Luftspalt zwischen dem Gussprodukt und der Kokillenoberfläche entsteht. Nachfolgend erstarrt der Strang vollständig und der sich einstellende Luftspalt vergrößert sich. Der Wärmeübergang zwischen Strang und Gießform wird durch die Bildung des Luftspaltes stark verringert. Durch den Einfluss der Schwerkraft ist der sich ausbildende Luftspalt an der Strangoberseite ausgeprägter als an der Strangunterseite. Die Wärmeabfuhr und die Erstarrung verlaufen daher nicht achsymmetrisch zur Gießrichtung. Durch das bessere Anliegen des Stranges an der Unterseite der Kokille herrschen dort bessere Kontakt- und Wärmeübergangsbedingungen als an der Oberseite vor. Die Erstarrungsgeschwindigkeit und somit das Kristallwachstum sind daher an der Unterseite des Stranges schneller als an der Oberseite. Die Sumpfspitze bildet sich unsymmetrisch nach oben verschoben aus. Die sich einstellende Sumpftiefe ist beim Gießen von Aluminiumwerkstoffen auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit sehr gering und beträgt ca. 20 – 40 % der Banddicke. [BAUM00, HADD77, HERZ68, HERZ69, HART92a, HART92b, NERL14b, RICK08, RIED12, SCHM96, SIGG03, SOMM10, WEBE83]

Abgesehen vom Gusswerkstoff werden die Erstarrungsvorgänge beim Stranggießen, das sich einstellende Gefüge sowie die Qualität der Strangoberfläche durch den Wärmehaushalt in der Kokille und die Abziehkinematik geprägt.

Thermische Verhältnisse im Urformwerkzeug

Der Temperaturhaushalt in einer ofenabhängigen Gleitkokille im stationären Zustand mit den zugeführten und abgeführten Wärmemengen je Zeiteinheit und Wärmeströmen ist schematisch in Abbildung 2-3 dargestellt.

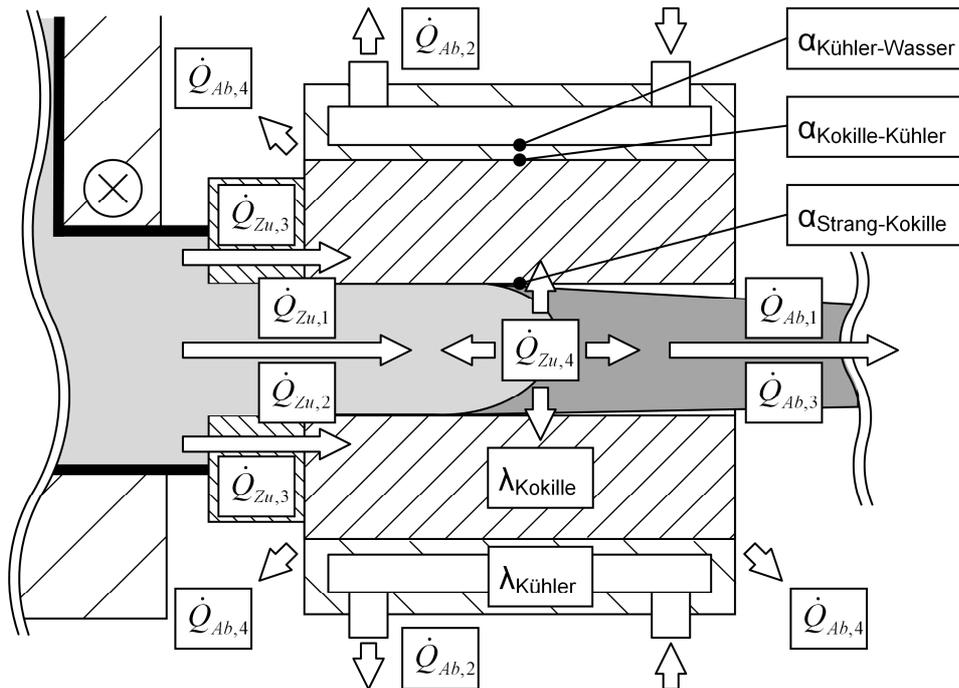


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Wärmehaushaltes in einer ofenabhängigen Gleitkokille

Nach [BAUM00] lässt sich daraus stark vereinfacht folgende Wärmebilanz ableiten. Die einzelnen Wärmeströme sind abhängig vom Gusswerkstoff und den Verfahrensparametern sowie von der konstruktiven Gestaltung des Gießwerkzeuges.

Wärmezuffluss in die Kokille:

- Kapazitiver Wärmestrom des in die Kokille fließenden Metalls $\dot{Q}_{Zu,1}$ abhängig von
 - mittlere Gießgeschwindigkeit
 - Querschnitt des Stranges
 - Gießtemperatur der Schmelze
 - spezifische Wärmekapazität der Schmelze

- Wärmestrom durch Wärmeleitung der Schmelze $\dot{Q}_{Zu,2}$ abhängig von
 - Wärmeleitfähigkeit der Schmelze
 - Temperaturdifferenz zwischen der Schmelze im Ofen und der Schmelze in der Kokille
- Wärmestrom durch Wärmeleitung von Isolierplatte in Kokille $\dot{Q}_{Zu,3}$ abhängig von
 - Wärmeleitfähigkeit der Isolierplatte
 - Wärmeleitfähigkeit der Kokille
 - Temperaturdifferenz zwischen der Schmelze im Ofen und der Isolierplatte
 - Temperaturdifferenz zwischen der Isolierplatte und der Kokille
- Wärmestrom durch die Erstarrungswärme der Schmelze $\dot{Q}_{Zu,4}$

Wärmeabfuhr aus der Kokille:

- Kapazitiver Wärmestrom des aus der Kokille abgezogenen Bandes $\dot{Q}_{Ab,1}$ abhängig von
 - mittlere Gießgeschwindigkeit
 - Querschnitt des Stranges
 - Bandaustrittstemperatur des Stranges
 - spezifische Wärmekapazität der Stranges
- Durch Kühlwasser abgeführter Wärmestrom $\dot{Q}_{Ab,2}$ abhängig von
 - spezifische Wärmekapazität des Kühlwassers
 - Eintrittstemperatur des Kühlwassers
 - Kühlwasserdurchfluss
- Wärmestrom durch Wärmeleitung im Strang $\dot{Q}_{Ab,3}$ abhängig von
 - Wärmeleitfähigkeit des Stranges
 - Temperaturdifferenz zwischen dem Strang in der Kokille und dem Strang außerhalb der Kokille
- Wärmestrom durch Strahlung an die Umgebung $\dot{Q}_{Ab,4}$ abhängig von
 - Temperaturdifferenz zwischen der Kokille und der Umgebung

Der Wärmeeintrag in die Kokille erfolgt demnach größtenteils über die Wärmeenergie der einströmenden Schmelze und ist abhängig von den thermophysikalischen Eigenschaften des Gusswerkstoffes, dem Strangquerschnitt, der Gießtemperatur und der Gießgeschwindigkeit. Die Leistungsfähigkeit der Primärkühlung ist bestimmt durch den gesamten Wärmewiderstand zwischen Strang und Kühlmedium. Entscheidend für die Wärmeabfuhr von der Schmelze bzw. vom Strang zum Kühlwasser sind der Wärmeübergang zwischen Schmelze bzw. Strang und Kokille, die Wärmeleitung durch die Kokille, der Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler, die Wärmeleitung durch den Kühlerwerkstoff sowie der Wärmeübergang vom Kühler auf das Kühlwasser [SEIF76, RIED12]. Die Haupteinflussgrößen auf die Wärmeübergangskoeffizienten sowie auf die Wärmeleitfähigkeiten und damit auf die Wärmedurchgangszahl vom Strang zum Kühlmedium sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

	<i>Einflussgrößen</i>
<i>Wärmeübergangskoeffizient zwischen Strang und Kokille</i> $\alpha_{\text{Strang-Kokille}}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Gusswerkstoff</i> ▪ <i>Kokillenwerkstoff</i> ▪ <i>Oberflächenzustand der Kokille</i> ▪ <i>Abziehkinematik</i> ▪ <i>Gießgeschwindigkeit</i> ▪ <i>Gießtemperatur</i>
<i>Wärmeleitfähigkeit der Kokille</i> λ_{Kokille}	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Kokillenwerkstoff</i> ▪ <i>Temperatur</i>
<i>Wärmeübergangskoeffizient zwischen Kokille und Kühler</i> $\alpha_{\text{Kokille-Kühler}}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Oberflächenzustand von Kokille und Kühler</i> ▪ <i>Ebenheit von Kokille und Kühler</i> ▪ <i>Vorspannkraft zwischen Kokille und Kühler</i>
<i>Wärmeleitfähigkeit des Kühlers</i> $\lambda_{\text{Kühler}}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Kühlerwerkstoff</i> ▪ <i>Temperatur</i>
<i>Wärmeübergangskoeffizient zwischen Kühler und Kühlwasser</i> $\alpha_{\text{Kühler-Wasser}}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Einlauftemperatur des Kühlwassers</i> ▪ <i>Kühlwasserdurchfluss</i> ▪ <i>Strömungseigenschaften des Kühlwassers</i> ▪ <i>Chemische Zusammensetzung des Kühlwassers</i> ▪ <i>Oberfläche der Kühlbohrungen</i>

Tabelle 2-2: *Einflussgrößen auf die Wärmeleitung vom Strang zum Kühlmedium nach [RIED12]*

Kinematik der Strangbewegung (Abziehkinematik)

Von großem Nachteil bei Gleitkokillen ist, im Gegensatz zu Verfahren mit mitlaufenden Kokillen, die Relativbewegung zwischen dem austretenden Strang und der Kokillenwand. Bei der Interaktion zwischen Strang und Kokille entstehen abhängig von der Abziehkinematik Haft- und Gleitreibungskräfte, die auf die gerade erstarrte Strangschale wirken. Auf Grund der geringen Festigkeit der Randschale können diese Kräfte zu Oberflächenschädigungen des Stranges bis hin zum Strangabriss führen. Die thermischen und mechanischen Abhängigkeiten zwischen bewegter Randschale und Kokillenwand sind Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten [BRAUN94, DAHM80, HADD77, HART89, HOFM92, HOLL83, HOLZ85, WEBE83].

Im Vergleich zur kontinuierlichen Abzugsart hat sich ein intermittierender Strangabzug als vorteilhaft für die Qualität des Gussproduktes und die Prozessrobustheit erwiesen. Bei der intermittierenden Abziehweise wird der Strang periodisch eine bestimmte Strecke (Hubweite) aus der Kokille gezogen (Ziehhub) und verweilt danach eine gewisse Zeit (Wartezeit) ortsfest. Während des Ziehhubes wird die Erstarrungsfront um die Hubweite in Gießrichtung verschoben. In der Wartezeit wird dem Strang soviel Wärme entzogen, dass sich eine stabile und tragfähige Randschale ausbildet, die sich auf Grund der Volumenkontraktion von der Kokillenwand ablöst. Die Erstarrungsfront wandert dabei entgegengesetzt zur Gießrichtung zurück. Diese Abzugsart wird als Go-Stop-Bewegung bezeichnet. Gegebenenfalls wird vor dem nächsten Ziehhub der Strang ein kurzes Stück in die Kokille zurück bewegt (Rückhub). Dadurch wird die Haftreibung zwischen Randschale und Kokillenwand unter Druck überwunden und im direkt anschließenden Ziehhub liegt ein Gleitreibungszustand vor, wodurch die Ziehkraft verringert wird. In diesem Fall spricht man von einer Go-Stop-Back-Bewegung. Bei der kontinuierlichen Abzugsart fehlt die Wartezeit. In Folge dessen löst sich die Randschale nicht periodisch von der Kokillenwand ab, wodurch insgesamt höhere Reibungskräfte entstehen, die sich negativ auf die Qualität der Strangoberfläche und auf die Prozessrobustheit auswirken können [WEBE83].

Die Abziehparameter, wie Hubweite, Wartezeit und Walzendrehgeschwindigkeit sowie die daraus bestimmbare mittlere Gießgeschwindigkeit v_g müssen auf das Urformwerkzeug und vor allem auf den Gusswerkstoff genau abgestimmt sein. In Abbildung 2-4 a) sind schematisch die Abzugsarten kontinuierlich, Go-Stop und Go-Stop-Back in einem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm gegenübergestellt. Abbildung 2-4 b) veranschaulicht die Auswirkungen einer Veränderung der Hubweite oder der Walzendrehgeschwindigkeit bei gleicher mittlerer Gießgeschwindigkeit auf den Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf im Go-Stop-Betrieb.

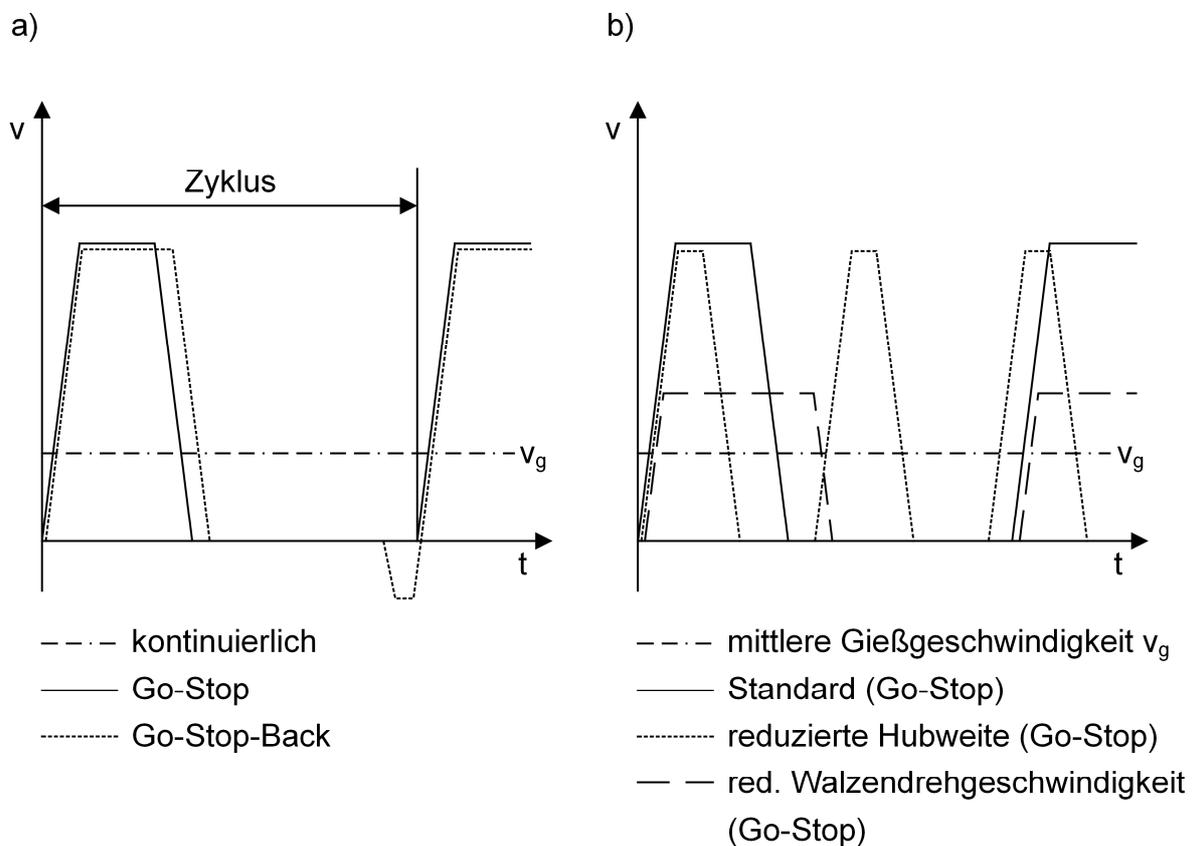


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung verschiedener Abzugsarten

2.2 Verbundgießen

2.2.1 Definition

Nach [HASS07] versteht man unter Verbundgießen „die Fertigung von metallischen Werkstoffverbunden durch gleichzeitiges oder aufeinanderfolgendes Gießen von verschiedenen Schmelzen in eine Form oder durch das Angießen eines Ergänzungsstückes an ein Werkstück“.

In [LANG97] wird der Begriff des Verbundgießens in engeren Grenzen definiert. Unter dem Begriff Verbundgießen werden nur die Verfahren vereint, welche die Erzeugung von Gussstücken aus mehreren Werkstoffen in der Anordnung als Schichtverbund mit dem Ziel der Ausbildung einer stoffschlüssigen Verbindung beinhalten. Durch diese Definition kann das Verbundgießen dem Fügen durch Urformen nach [DIN8593] zugeordnet werden. Für die vorliegende Arbeit ist die Verwendung dieser Definition zweckmäßig, da ein Verbundgießprozess zur Erzeugung von stoffschlüssigen Schichtverbunden untersucht wird. Die Einordnung des Verbundgießens in die Gießtechniken zur Fertigung von Verbundwerkstoffen ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

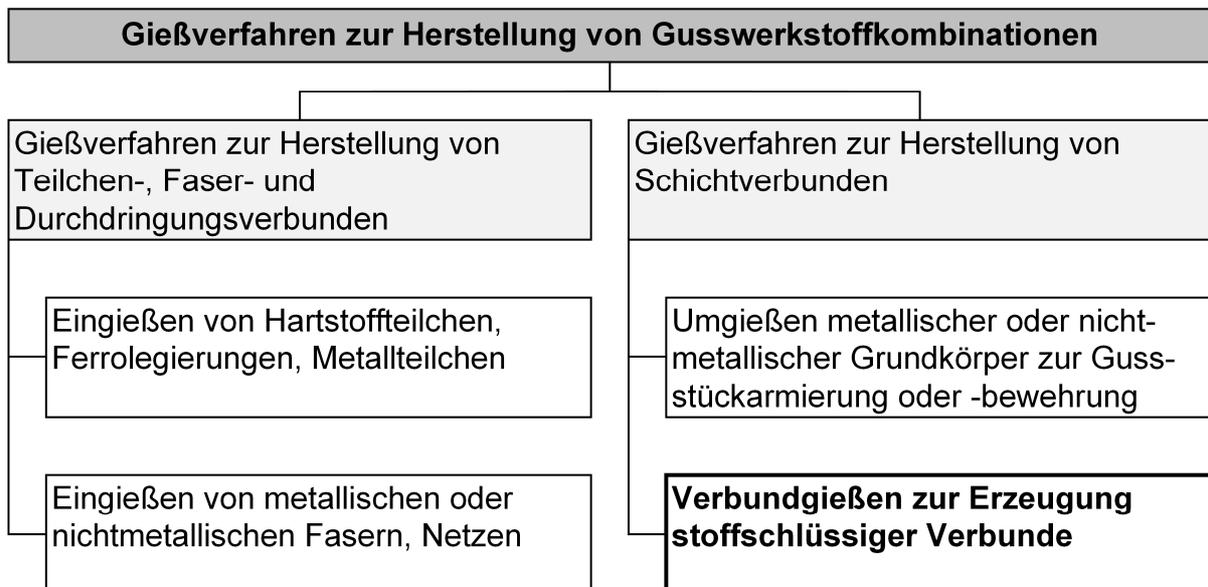


Abbildung 2-5: Einordnung des Verbundgießens in die Gießtechniken zur Fertigung von Verbundwerkstoffen nach [BUCH10, LANG99]

2.2.2 Verbundgießverfahren

Auf Grund des großen ökonomischen und technologischen Potenzials der Verbundgießtechnik wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl an diskontinuierlichen Verbundgießverfahren entwickelt. Eine grundsätzliche Einteilung der Verfahren kann anhand der wirksamen Kräfte bei der Formfüllung erfolgen (siehe Abbildung 2-6). Diese kann nur unter dem Einfluss der Schwerkraft erfolgen oder durch zusätzliche Kräfte unterstützt werden. Das Aufbringen von Zentrifugal- oder Druckkräften wirkt sich auf die Ausbildung einer stoffschlüssigen Verbindung positiv aus. Typische Verfahrensvarianten sind hierbei das Schleuderverbundgießen, welches zum Beispiel zur Herstellung von Verbundwalzen und -rohren verwendet wird, oder das Druckverbundgießen. [LANG97, LANG99]

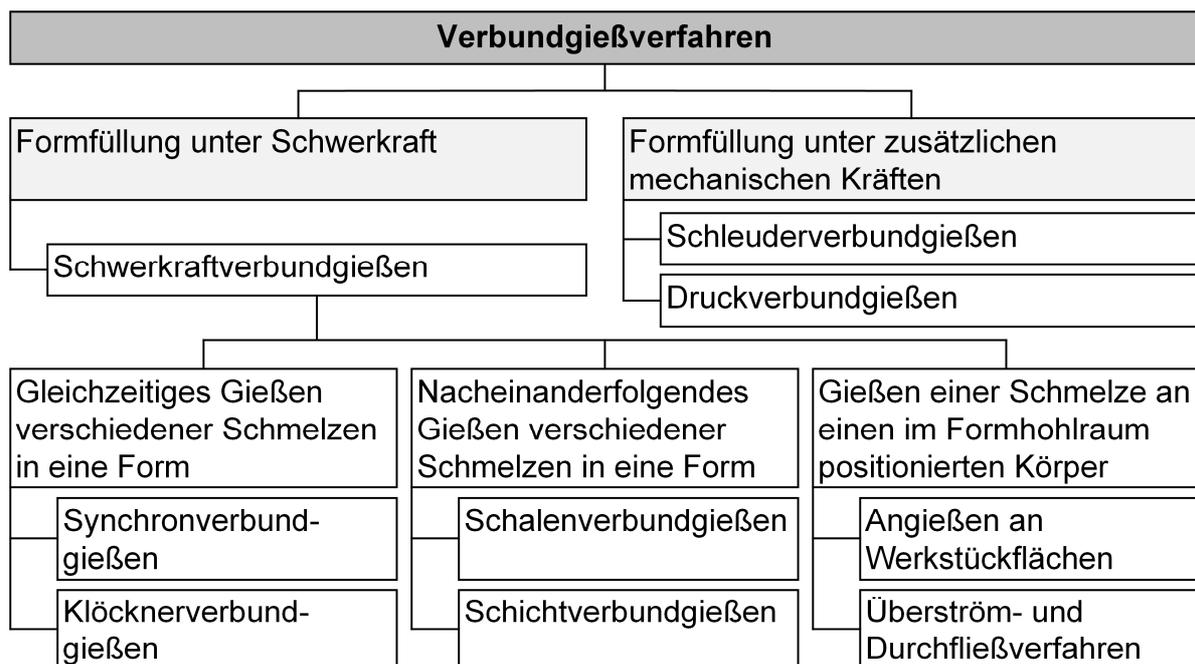


Abbildung 2-6: Einteilung der Verbundgießverfahren nach [LANG99]

Die Verfahren unter Schwerkrafteinfluss können weiter anhand dem Zeitpunkt und der Art des Einbringens der Verbundpartner in den Formhohlraum untergliedert werden. Beim gleichzeitigen Eingießen der Schmelzen in die Gießkavität trennt ein wandartiger

Körper die flüssigen Metalle (Synchronverbundgießen) oder eine gelochte Trennblechkammer fungiert als Dosiereinrichtung für eine gezielte Durchmischung der Schmelzen (Klößnerverbundgießen). [HARN65, ISSL95a, KNAU78, LANG97]

Das Schalenverbundgießen wird hauptsächlich zur Herstellung von Rollen und Walzen aus zwei verschiedenen Werkstoffen verwendet. Der Formhohlraum wird zunächst vollständig mit einem Werkstoff gefüllt. Nachdem sich durch die Erstarrung von außen nach innen eine Randschicht gebildet hat, wird der zweite Werkstoff in das Gießsystem zugeführt. Dieser verdrängt die restliche Schmelze des ersten Werkstoffes, welche nach oben abfließt. [ISSL95a, KAME65, KNAU78, LANG97]

Beim Schichtverbundgießen erfolgt die Dosierung der beiden Schmelzen mit einem zeitlichen Versatz über zwei separate Gießsysteme. Zunächst wird die Gießkavität bis zu einer bestimmten Höhe mit der ersten Schmelze befüllt. Nach teilweiser oder vollständiger Erstarrung des Substrates erfolgt die Zuführung der zweiten Schmelze über ein zweites Angussystem bis zur vollständigen Formfüllung. [ISSL95a, LANG97]

Beim Angießen an Werkstückoberflächen wird ein Einlegeteil im Formhohlraum positioniert, fixiert und anschließend mit der Schmelze des zweiten Werkstoffes beaufschlagt. Zur Verbesserung der Verbundbildung ist das Einlegeteil meist induktiv vorerwärmt. [ISSL95a, LANG97]

Die Vorerwärmung des Einlegeteils erfolgt beim Überström- und Durchfließverfahren durch die Schmelze. Hierzu wird ein Vielfaches des eigentlich benötigten Schmelzevolumens durch den Formhohlraum über das Einlegeteil in ein dahinterliegendes Reservoir geleitet. Erst nachdem das Überlaufvolumen das Reservoir gefüllt hat, erfolgt die vollständige Formfüllung der Gießform. [LANG88, LANG89, LANG97, ISSL95a]

Zum besseren Verständnis sind die einzelnen Verfahrensvarianten des Schwerkraftverbundgießens in Abbildung 2-7 skizziert.

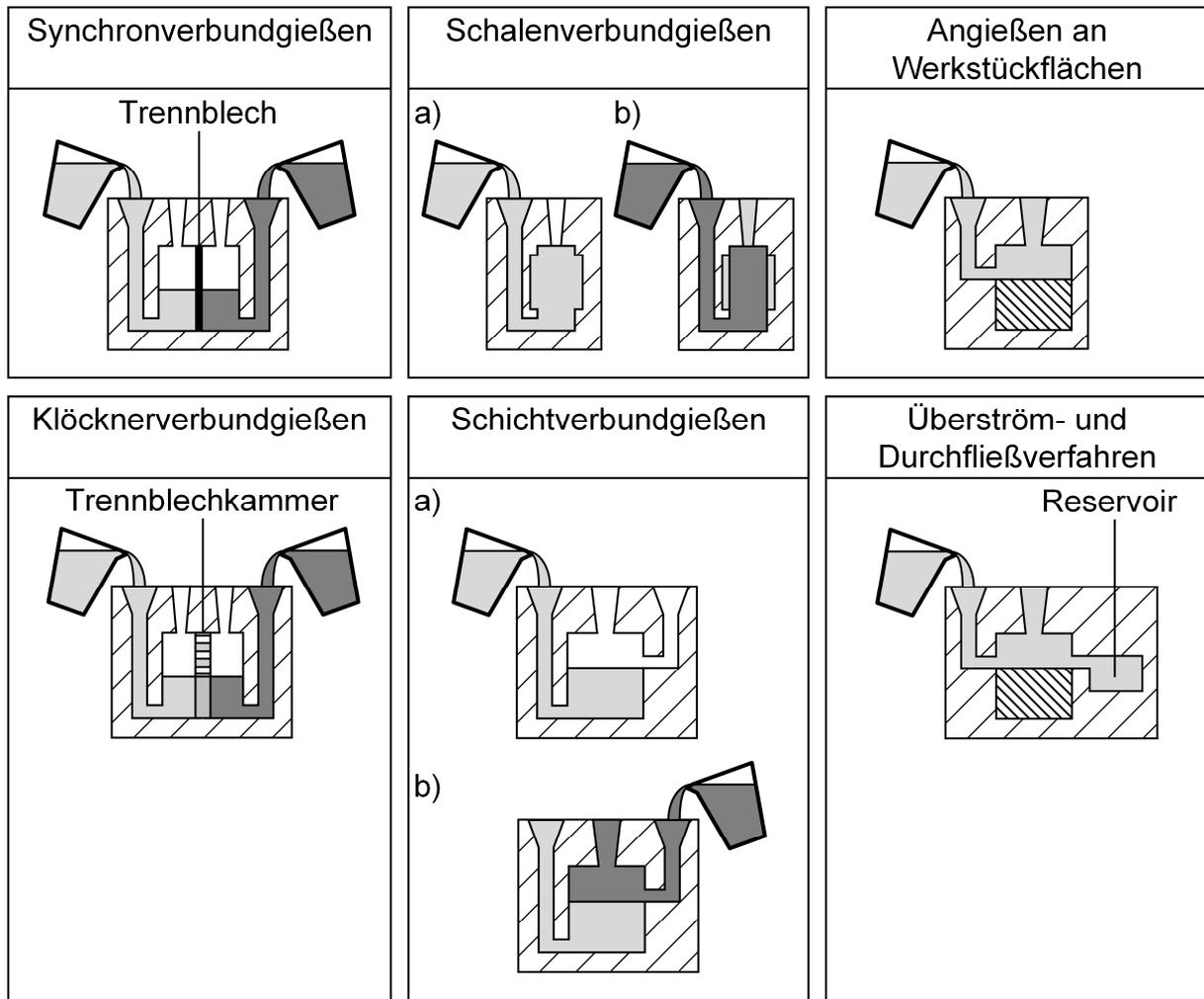


Abbildung 2-7: *Prinzipskizzen der Verfahrensvarianten des Schwerkraftverbundgießens nach [GUEN00, ISSL95a, LANG99]*

Die in der Literatur bisher dargestellten kontinuierlichen Verbundgießverfahren (siehe [HAGA00, HAGA03, HAGA09, HERR80, LIU14, MARU06, WAGS06, ZHAN98, ZHAN09]) entsprechen hinsichtlich der technologischen Gegebenheiten dem Schichtverbundgießen. Alle Verfahren beruhen auf dem Prinzip des Aufgießens einer flüssigen Metallschmelze unter Schwerkrafteinfluss auf ein bereits teilerstarrtes bzw. vollständig erstarrtes Substrat. Die Grenzfläche zwischen Substratwerkstoff und Aufgusswerkstoff kann horizontal oder vertikal verlaufen.

2.2.3 Voraussetzungen für die stoffschlüssige Verbundbildung und ablaufende Mechanismen

Beim Verbundgießen laufen Grenzschichtreaktion zwischen einem festen bzw. teilerstarrten Werkstoff und einer flüssigen Phase ab. Für die Interaktion der beiden Werkstoffe an der Grenzfläche stellt die Benetzbarkeit der Oberfläche des Substratmaterials mit der Schmelze die Grundbedingung dar. [LANG99] und [ISSL95b] setzen daher folgende Voraussetzungen für eine stoffschlüssige Verbundbildung voraus:

1. Das Vorliegen eines direkten Kontaktes zwischen den beiden Fügepartnern auf atomarer Ebene.
2. Die Mischbarkeit der beiden Fügepartner unter Bildung von Mischkristallen und/oder intermetallischen Phasen.
3. Die sich einstellende Kontakttemperatur in der Grenzschicht übersteigt mindestens die Solidustemperatur eines Fügepartners.

Die Benetzbarkeit eines festen Grundkörpers mit einem flüssigen Metall kann durch die Young'sche Gleichung nach Formel 2.1 beschrieben werden. Sie stellt das Kräftegleichgewicht zwischen den Grenzflächenspannungen σ_{ij} an der 3-Phasengrenze dar. Die Grenzflächenspannungen korrelieren mit den Oberflächenenergien der Phasen. Mit dem sich einstellenden Kontaktwinkel α kann die gegenseitige Benetzbarkeit einer Materialkombination quantifiziert werden. Der Kontaktwinkel ist abhängig von den Materialeigenschaften der beteiligten Phasen. [BOBZ13, HOFM04]

$$\sigma_{13} = \sigma_{12} + \sigma_{23} \cdot \cos \alpha \quad (2.1)$$

σ_{13}	<i>Oberflächenspannung zwischen festem Grundwerkstoff und der Atmosphäre [kg/s²]</i>
σ_{12}	<i>Grenzflächenspannung zwischen festem Grundwerkstoff und flüssigem Metall [kg/s²]</i>
σ_{23}	<i>Oberflächenspannung zwischen flüssigem Metall und der Atmosphäre [kg/s²]</i>
α	<i>Kontaktwinkel [°]</i>

Der Kontaktwinkel kann bei verschiedenen Materialpaarungen Werte zwischen 0° und 180° einnehmen. Eine vollständige Benetzung des Grundwerkstoffes mit der flüssigen Schmelze ist bei einem Kontaktwinkel von 0° gegeben. In diesem Fall spricht man von Spreitung. Bis zu einem Kontaktwinkel von 90° liegt eine Benetzung des festen Werkstoffes vor. Bei größeren Kontaktwinkeln ist das Benetzungsverhalten unzureichend. Je kleiner der Kontaktwinkel ist, umso vollkommener ist die Benetzung der Oberfläche (siehe Abbildung 2-8). [HOFM04, OECH99, SCHU01]

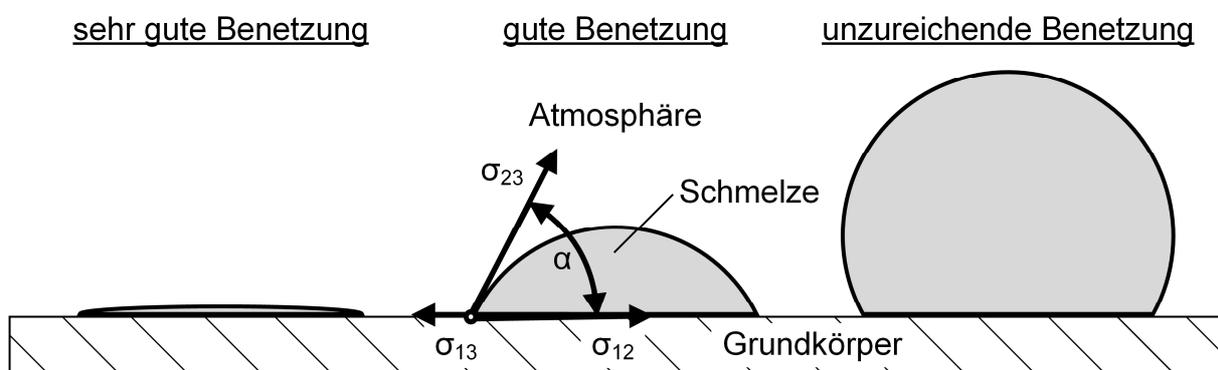


Abbildung 2-8: Grenzflächenspannungen bei der Benetzung eines festen Werkstoffes durch eine flüssige Schmelze nach [CHAN06]

Grundvoraussetzung für die Benetzung ist ein direkter Kontakt zwischen den Fügepartnern. Hierfür muss sichergestellt sein, dass der Grundwerkstoff frei von nichtmetallischen und oxidischen Schichten ist. Zudem darf die Aufgusschmelze nicht von einer Oxidhaut umhüllt sein. [LANG98, ISSL95b]

Aluminiumwerkstoffe bilden an der Luft sehr schnell eine inerte, thermodynamisch stabile und hochschmelzende Oxidschicht an der Oberfläche mit einer Dicke von ca. 50 \AA aus. Diese Oxidschicht wirkt sich negativ auf die Grenzflächenreaktionen und die Diffusionsvorgänge sowie die Wärmeübertragung zwischen den Fügepartnern aus. [PAPI08, ZEUN98]

Die Bildung der Oxidschicht kann durch den Einsatz von Schutzgas unterbunden werden [BUCH10]. [FRAG08] und [PAPI08] schlagen zur Verbesserung der Benetzungsfähigkeit und zum Schutz vor Oxidation eine Beschichtung des Aluminiumeinlegeteils mit Zink vor.

Die Benetzung kann durch ein Absenken der Grenzflächenspannung σ_{12} oder eine Erhöhung der Oberflächenspannung σ_{13} verbessert werden. In der Löttechnik wird dies beispielsweise durch den Einsatz von Flussmitteln erreicht. [SCHU01]

In der Realität laufen zwischen dem flüssigen Metall, dem Grundwerkstoff und der Atmosphäre komplexe Vorgänge ab, die das Benetzungsverhalten entscheidend beeinflussen können. Reaktionen mit der Atmosphäre können die Oberflächenenergie der flüssigen Phase verändern. Wechselwirkungen zwischen der flüssigen Phase und dem Grundkörper, wie die Bildung von intermetallischen Phasen, aber auch Löslichkeitsprozesse und Diffusionsströme über die Grenzfläche hinweg, verringern die Grenzflächenspannung σ_{12} erheblich und führen somit zu einer wesentlich verbesserten Benetzung. Durch eine Erhöhung der Kontakttemperatur zwischen der festen und flüssigen Phase kann das Ablaufen dieser Prozesse signifikant beschleunigt werden. [BOBZ13, PREN00]

Die Forderung nach Mischbarkeit der Verbundpartner begünstigt das Ablaufen der oben beschriebenen Prozesse zwischen Grundwerkstoff und Gießmetall und begünstigt somit das Benetzungsverhalten. Sie ist zudem eine zwingende Voraussetzung für die Ausprägung einer stoffschlüssigen Verbundbildung mit kohäsivem Charakter unter der Bildung von Mischkristallen und/oder intermetallischen Phasen durch einen wechselseitigen Atomaustausch. [ISSL95a, ISSL95b, LANG99]

Das reale Benetzungsverhalten wird zudem durch die Rauigkeit der Oberfläche des Gegenkörpers beeinflusst. Um die kleinen Hohlräume und Unebenheiten mit dem flüssigen Metall zu schließen, darf dieses nicht sofort beim Kontakt mit dem Gegenkörper erstarren, sondern muss über einen ausreichenden Zeitraum in der flüssigen Phase vorliegen. Eine hohe Viskosität des flüssigen Metalls wirkt der Ausbreitung der flüssigen Phase entgegen. [ISSL95a, ISSL95b, LANG99, OECH99, SCHU01]

Sind die oben genannten Bedingungen für eine vollständige Benetzung des Grundwerkstoffes mit der flüssigen Phase erfüllt, kann eine stoffschlüssige Verbundbildung mit einem kohäsiven Bindungscharakter erfolgen. Nach [ISSL95b], [LANG97] und [PELZ00] laufen bei der der Bildung der Verbundschicht folgende komplexe Reaktion ab:

- Diffusionswechselwirkung zwischen festem und flüssigem Metall
- Aufschmelz-, Kristallisations- und Abkühlvorgänge
- Strukturelle Umwandlungen: Lösungs- und Ausscheidungsvorgänge unter Bildung von Mischkristallen und/oder intermetallischen Phasen
- Polymorphe Umwandlungen

Die ablaufenden Mechanismen bei der Verbundbildung, der Aufbau der Verbundzone und die daraus resultierenden Eigenschaften des Verbundes werden maßgeblich durch die chemische Zusammensetzung der Fügepartner, die thermischen Bedingungen in der Phasengrenzfläche und die Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner beeinflusst. Einen wesentlichen Einfluss auf die Benetzung und Verbundbildung beim Verbundgießen haben zudem die vorherrschenden hydrodynamischen Bedingungen bei der Schmelzezuführung. Turbulenzen im Gießmetall wirken sich hierbei negativ auf die Verbundbildung aus und führen zu einer Haftungsverminderung. [ISSL95b, LANG98, BUCH10]

In Abbildung 2-9 sind die Einflussfaktoren auf die Morphologie der Verbundschicht beim Verbundgießverfahren Angießen an Werkstückflächen zusammenfassend dargestellt.

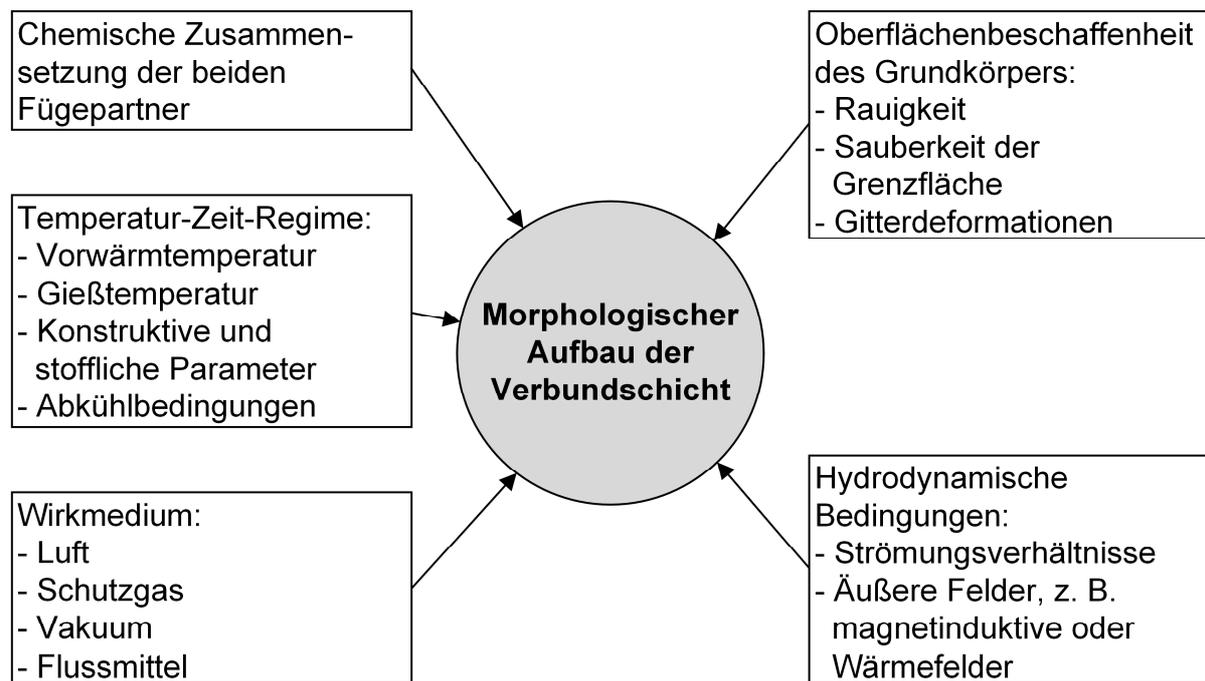


Abbildung 2-9: Einflussfaktoren auf die Morphologie der Verbundschicht nach [ISSL95b]

2.2.4 Möglichkeiten zur Beeinflussung der thermischen Verhältnisse

Die thermischen Bedingungen an der Grenzfläche zwischen Substrat- und Aufgusswerkstoff beeinflussen die Vorgänge bei der Verbundbildung maßgeblich. Sie haben einen entscheidenden Einfluss auf das Benetzungsverhalten und die sich ausprägende Bindung sowie auf die Kristallisationsvorgänge, die Diffusionsvorgänge in der Verbundzone und die sich ausbildenden Eigenspannungsfelder. [BUCH10, ISSL95b, GUEN00, LANG99]

Nach [BUNG72] kann die Kontakttemperatur an der Grenzfläche zwischen den Fügepartnern T_{KF} durch Formel 2.2 abgeschätzt werden. Die Formel basiert auf dem Modell von zwei sich berührenden halbumendlichen Körpern mit verschiedenen Ausgangstemperaturen und unterschiedlichen thermophysikalischen Daten. Der Wärmestrom erfolgt eindimensional und die Wärmeübergangsbedingungen werden als ideal angenommen. Phasenumwandlungen der Werkstoffe und die Freisetzung latenter Wärme werden nicht berücksichtigt.

$$T_{KF} = \frac{T_1 + \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot \lambda_2 \cdot c_{p,2}}{\rho_1 \cdot \lambda_1 \cdot c_{p,1}}} \cdot T_2}{1 + \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot \lambda_2 \cdot c_{p,2}}{\rho_1 \cdot \lambda_1 \cdot c_{p,1}}}} \quad (2.2)$$

T_{KF}	<i>Kontakttemperatur [K]</i>
T_1	<i>Ausgangstemperatur des Substratwerkstoffes [K]</i>
T_2	<i>Ausgangstemperatur des Aufgusswerkstoffes [K]</i>
ρ	<i>Dichte [kg/m³]</i>
λ	<i>Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]</i>
c_p	<i>spezifische Wärmekapazität [J/(kgK)]</i>

Um die für eine stoffschlüssige Verbundbildung nötigen Voraussetzungen gemäß Kapitel 2.2.3 zu erfüllen, muss die Kontakttemperatur für einen gewissen Zeitraum über der Solidustemperatur eines der beiden Verbundpartner liegen. Wie aus Formel 2.2 ersichtlich ist, wird die Kontakttemperatur durch die Ausgangstemperaturen der Verbundpartner und die thermophysikalischen Eigenschaften der Werkstoffe bestimmt. Der Einfluss der Ausgangstemperatur des Substratwerkstoffes und der Ausgangstemperatur des Aufgusswerkstoffes auf die Kontakttemperatur ist schematisch für die Werkstoffkombination AlSn6Cu und Al99,5 in Abbildung 2-10 dargestellt. Zur Berechnung wurden die temperaturabhängigen thermophysikalischen Daten aus dem Anhang verwendet. Bei dieser Werkstoffkombination führt eine Erhöhung der Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes T_2 um 100 °C zu einem Anstieg der Kontakttemperatur an der Kontaktfläche um ca. 20 °C. Die Erhöhung der Ausgangstemperatur des Substratwerkstoffes hat einen deutlich größeren Einfluss auf die Ausgleichstemperatur. Das Anheben der Substrattemperatur T_1 um 100 °C bewirkt einen Anstieg der Kontakttemperatur um ca. 80 °C.

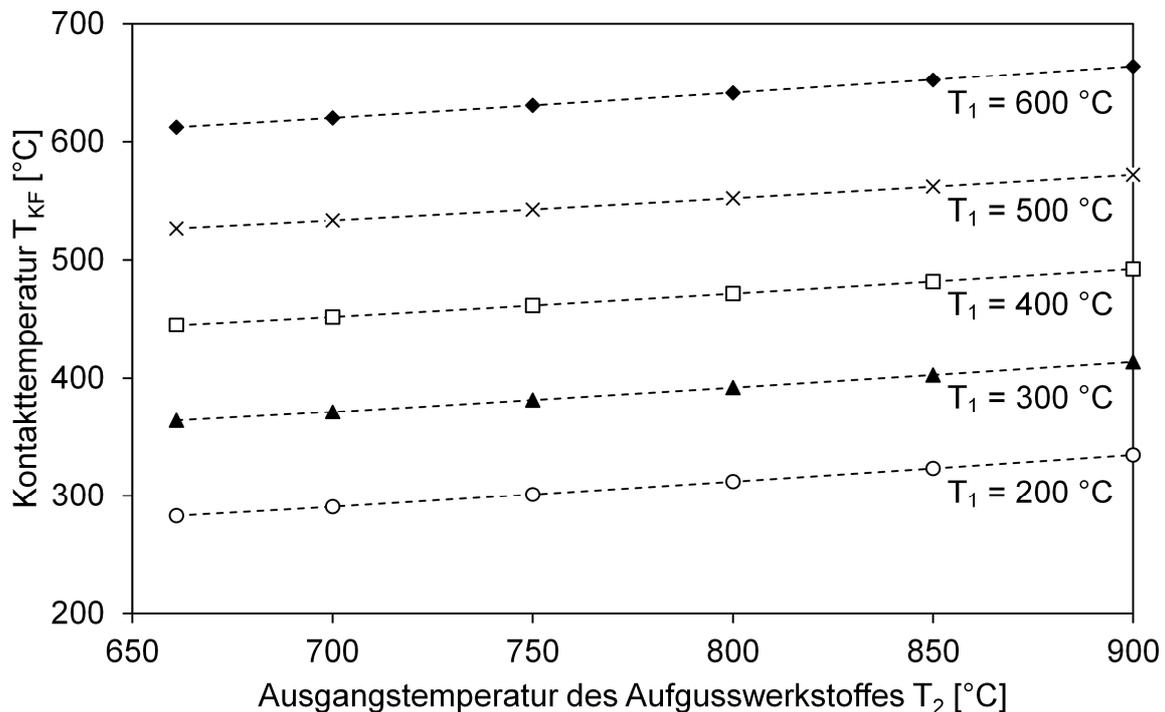


Abbildung 2-10: Kontakttemperatur T_{KF} an der Grenzfläche bei unterschiedlichen Ausgangstemperaturen des Aufgusswerkstoffes T_2 (Al99,5) und des Substrates T_1 (AlSn6Cu) nach Formel 2.2

In der Realität liegt unmittelbar nach dem Aufgießen des Aufgusswerkstoffes auf ein Substrat zunächst ein Temperatursprung an der Grenzfläche zwischen den Werkstoffen vor. Innerhalb einer sehr kurzen Zeit nähern sich die Temperaturen der beiden Fügepartner in der Nähe der Grenzschicht aneinander an (siehe Abbildung 2-11). Liegt die sich einstellende Kontakttemperatur in der Grenzschicht über der Solidustemperatur eines Fügepartners, kann es zur Legierungsbildung der beiden Werkstoffe kommen und ein Werkstoffverbund mit einer gemeinsamen Kontakttemperatur an der Grenzfläche entsteht. Liegt die Ausgleichstemperatur an der Kontaktfläche unterhalb der Solidustemperatur beider Werkstoffe, kann keine stoffschlüssige Verbundbildung stattfinden. In diesem Fall bleibt bei der weiteren Abkühlung des Gussstückes ein Temperatursprung an der Grenzfläche zwischen den beiden Fügepartnern auf Grund des sich ausbildenden Luftspaltes und dem damit vorhandenen Wärmeübergangswiderstand bestehen. [LANG99]

Neben den thermischen Anfangsbedingungen und den thermophysikalischen Eigenschaften der Verbundpartner wird die sich einstellende Kontakttemperatur an der Grenzfläche auch durch das Massenverhältnis zwischen Aufgusswerkstoff und Substratwerkstoff $m_{\text{Auf}}/m_{\text{Sub}}$ sowie durch das Verhältnis der Masse des Gießmetalls zur Kontaktfläche $m_{\text{Auf}}/A_{\text{KF}}$ beeinflusst. Je größer das Massenverhältnis $m_{\text{Auf}}/m_{\text{Sub}}$ gewählt wird, umso mehr Wärme fließt vom Aufgusswerkstoff in das Substrat. Dies kann zu einem Anstieg der Kontakttemperatur über der Zeit führen (siehe Abbildung 2-11 c)). Somit kann auch bei einer anfänglichen Kontakttemperatur unterhalb der Solidustemperatur eines der Fügepartner ein stoffschlüssiger Verbund entstehen. In diesem Fall erstarrt das Gießmetall sofort beim ersten Kontakt mit dem Grundkörper grenzschichtnah. Auf Grund der Wärmeleitung aus dem Gießmetall zum Substratwerkstoff schmilzt die Randschale im Anschluss wieder auf und ein stoffschlüssiger Verbund kann entstehen. Auch eine Steigerung des Verhältnisses $m_{\text{Auf}}/A_{\text{KF}}$ führt zu einer Erhöhung der Kontakttemperatur in der Grenzfläche, da eine größere Wärmemenge bezogen auf die Kontaktfläche in die Grenzschicht eingeleitet wird. [GUEN00, ISSL95b, LANG99]

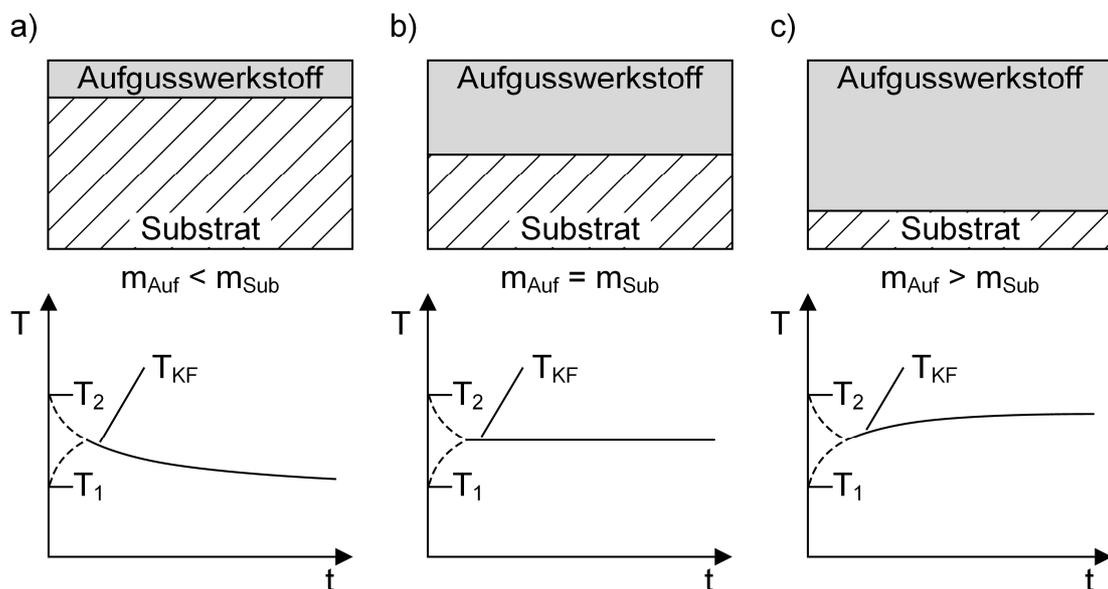


Abbildung 2-11: Zeitlicher Verlauf der Ausgleichstemperatur an der Kontaktfläche T_{KF} für unterschiedliche Massenverhältnisse zwischen Substrat- und Aufgusswerkstoff in einem geschlossenen System nach [LANG99]

2.2.5 Vorgänge beim Erstarren und Abkühlen

Die Erstarrungs- und Kristallisationsvorgänge beim Verbundgießen werden maßgeblich durch das Erstarrungsintervall der Fügepartner und die Gießreihenfolge bestimmt. Prinzipiell kann zwischen zwei Fällen unterschieden werden [GUEN00, ISSL95b, LANG99]:

- Aufgießen eines niedrigerschmelzenden Werkstoffes auf einen höherschmelzenden Werkstoff
- Aufgießen eines höherschmelzenden Werkstoffes auf einen niedrigerschmelzenden Werkstoff

Für den Gieß- und Erstarrungsprozess ist der erste Fall von Vorteil. Der Aufguss des flüssigen Metalls kann auf ein über die Liquidustemperatur des Aufgusswerkstoffes temperiertes Substrat erfolgen. Der Aufgusswerkstoff befindet sich beim Eingießen und bis zur Ausbildung der Ausgleichstemperatur im schmelzflüssigen oder teilerstarrten Zustand, sodass sich ein stoffschlüssiger Verbund ausbilden kann. Die Verbundbildung erfolgt in diesem Fall über Diffusionsvorgänge, da der höherschmelzende Werkstoff in der Grenzschicht nicht verflüssigt wird. Durch den vorliegenden Temperaturgradienten erfolgt die Kristallisation des Aufgusswerkstoffes ausgehend von der Grenzfläche (siehe Abbildung 2-12 a)). [GUEN00, ISSL95b, LANG99]

Im zweiten Fall ist das Substrat im Vergleich zur Aufgusschmelze wesentlich kälter. Dadurch bildet der Aufgusswerkstoff beim Kontakt mit dem Substrat sofort eine Randschale aus. Durch den Wärmeeintrag aus dem Aufgusswerkstoff verflüssigt das Substrat an der Grenzfläche. Damit liegen zwei separate Kristallisationsfronten, im Aufgusswerkstoff ausgehend von der gebildeten Randschale und im Substratwerkstoff ausgehend von den noch festen Bestandteilen, vor (siehe Abbildung 2-12 b)). Durch den Einschluss der schmelzflüssigen Bereiche mit bereits erstarrtem Metall steigt die Gefahr der Entstehung von Lunkern und Einfallstellen. Aus diesem Grund ist bei stark unterschiedlichen Erstarrungsintervallen der Fügepartner das Aufgießen des niedrigerschmelzenden Fügepartners auf den höherschmelzenden Werkstoff zu empfehlen. [GUEN00, ISSL95b, LANG99]

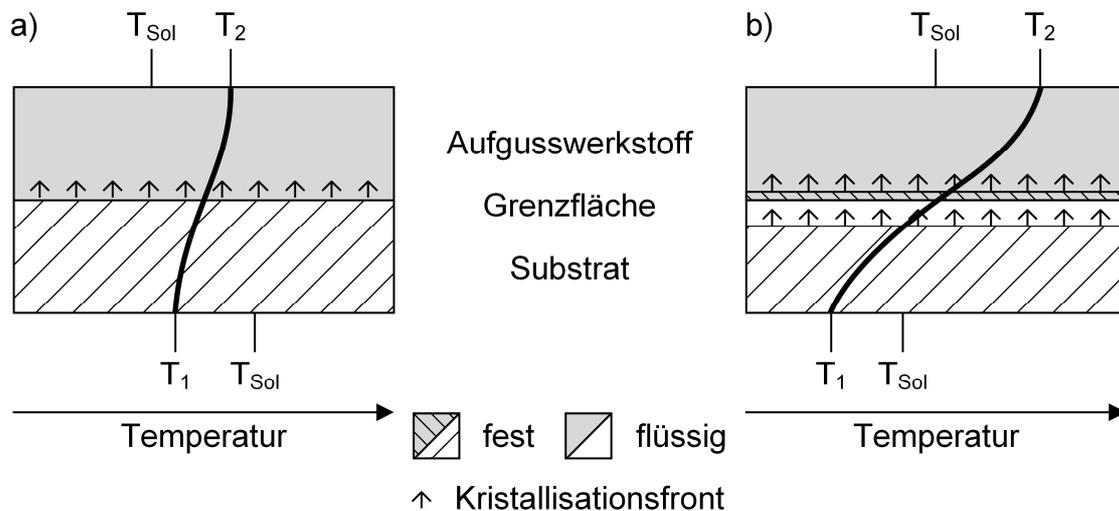


Abbildung 2-12: Erstarrungsablauf beim Verbundgießen für a) das Aufgießen des niedragschmelzenden Werkstoffes auf den höherschmelzenden und b) umgekehrt nach [ISSL95b, LANG99]

2.3 Gusswerkstoffe

2.3.1 Reinaluminium Al99,5

Als Aufgusswerkstoff beim kontinuierlichen Verbundgießen wurde bei den experimentellen Untersuchungen Reinaluminium Al99,5 eingesetzt. Das technisch reine Aluminium wird nach [DIN573] der Serie 1xxx zugeordnet. Die chemische Zusammensetzung des Gusswerkstoffes ist in Tabelle 2-3 dargestellt.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sonstige	Al
≤ 0,25	≤ 0,40	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,07	≤ 0,05	≤ 0,03	≥ 99,50

Tabelle 2-3: Chemische Zusammensetzung von Reinaluminium Al99,5 in Massenprozent nach [DIN573]

Zu den wichtigsten physikalischen Eigenschaften zur Charakterisierung des schmelzflüssigen Zustandes zählen die Viskosität und die Oberflächenspannung eines Werkstoffes. Die Viskosität und die Oberflächenspannung einer Reinaluminiumschmelze nehmen mit steigender Schmelztemperatur erheblich ab (siehe Abbildung 2-13). Die

in Kapitel 2.2.3 dargestellten Bedingungen für die Ausbildung eines stoffschlüssigen Verbundes verbessern sich daher durch eine Erhöhung der Gießtemperatur.

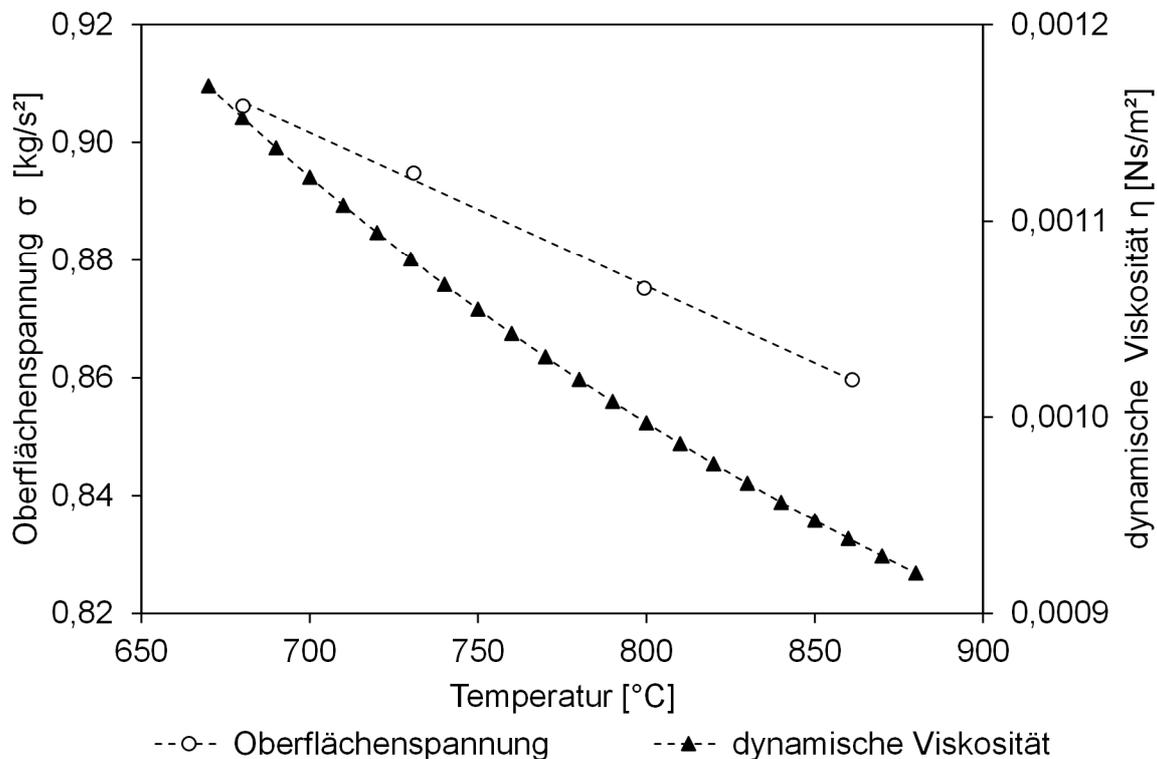


Abbildung 2-13: Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung und der dynamischen Viskosität einer Reinaluminiumschmelze Al99,9 nach [ENGL74a, MEER89]

Diesen Zusammenhang spiegeln auch Untersuchungen zu den gießtechnologischen Eigenschaften von Reinaluminium wider. Das Formfüllungs- und das Fließvermögen von Reinaluminium erhöhen sich deutlich mit steigender Gießtemperatur (siehe Abbildung 2-14). Das Formfüllungsvermögen beschreibt die Fähigkeit eines Gießmetalls, die Konturen der Form wiederzugeben. Zur Messung des Formfüllungsvermögens hat sich die Bolzenprobe durchgesetzt. Das Fließvermögen beschreibt, wie weit das Gießmetall in einer Form fließen kann, bis der Materialfluss durch die fortschreitende Erstarrung zu stocken beginnt. Die Bestimmung des Fließvermögens erfolgt meist durch Versuche mit einer Gießspirale. Je weniger Verunreinigungen im Reinaluminium enthalten sind, umso höher ist das Fließvermögen. [ENGL81, LANG72, LANG73]

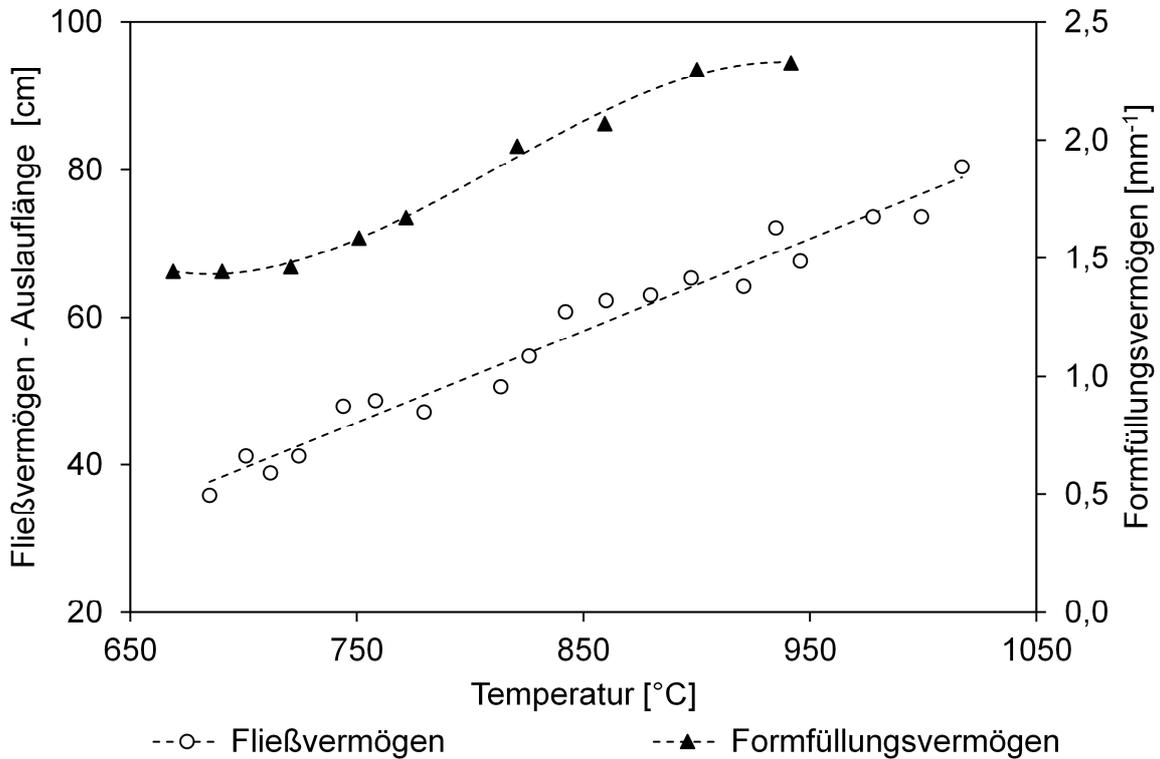


Abbildung 2-14: Fließ- und Formfüllungsvermögen von Reinaluminium in Abhängigkeit der Gießtemperatur ermittelt mit Gießspirale und Bolzenprobe nach [ENGL74b, KOEL81, LANG72, LANG73]

Die für die analytischen Berechnungen des Verbundgießprozesses verwendeten temperaturabhängigen thermophysikalischen Daten des Werkstoffes Al99,5 sind im Anhang in der Tabelle 11-1 zusammenfassend dargestellt.

2.3.2 Aluminiumlegierung AlSn6Cu

Zur Herstellung von Aluminiumgleitlagern werden fast ausschließlich Aluminium-Zinn-Legierungen verwendet. Die eingesetzten Lagerwerkstoffe weisen einen Zinngehalt von bis zu 40 Massenprozent auf. In Europa ist die Lagerlegierung AlSn6Cu am weitesten verbreitet und stellt den Standardwerkstoff für Grund- und Pleuellager in Diesel- und Ottomotoren dar. Als Lagerbauform werden hier meist Zweistofflager verwendet. Diese bestehen aus einer Aluminium-Zinn-Gleitschicht und einer Tragschicht aus Stahl. Bei der Herstellung des Vormaterials für die Gleitlager wird der Aluminium-Zinn-

Lagerwerkstoff mit Hilfe einer Reinaluminium-Zwischenschicht auf das Trägermaterial Stahl walzplattiert. Das Vormaterial wird zur Einstellung der Endabmessungen und der mechanischen Eigenschaften in mehreren Walz- und Glühoperationen thermomechanisch weiterverarbeitet und anschließend zur Herstellung der Gleitlager verwendet. [AFFE96, DAMM09, DAVI93, MANN78]

Aluminium-Zinn-Legierungen sind, wie die meisten Gleitlager-Werkstoffe, durch ein heterogenes zweiphasiges Gefüge, bestehend aus einer harten und einer weichen Phase gekennzeichnet (siehe Abbildung 2-15 a)). Die Aluminiummatrix stellt die harte Phase dar und ist verantwortlich für die Dauerbelastbarkeit und die Verschleißfestigkeit des Lagerwerkstoffes. Die weiche Zinn-Phase sorgt für die nötigen Gleit- und Notlaufesigenschaften sowie für die gute Anpassungsfähigkeit und große Einbettfähigkeit. [AFFE96, BERG01, MANN78]

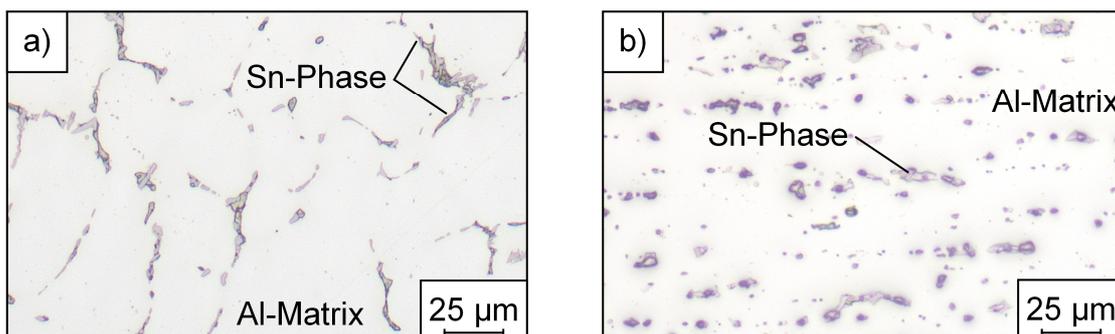


Abbildung 2-15: Gefüge der Legierung AlSn6Cu im Gusszustand a) und nach der thermomechanischen Weiterverarbeitung b)

Die Legierung AlSn6Cu ist nach [DIN4383] als Lagerlegierung genormt. Die chemische Zusammensetzung der Legierung ist in Tabelle 2-4 aufgelistet. Neben dem Hauptlegierungselement Sn werden noch geringe Anteile von Cu, Ni, und Si zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Aluminiummatrix, durch Mischkristallverfestigung (Cu) und Ausscheidungshärtung (Ni und Si) beigemischt. [BERG01, DAMM09, DAVI93]

Sn	Cu	Ni	Fe	Si	Mn	Ti	Sonstige	Al
5,5 – 7	0,7 – 1,3	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,2	≤ 0,03	Rest

Tabelle 2-4: Chemische Zusammensetzung der Legierung AlSn6Cu in Massenprozent nach [DIN4383]

Die beschriebene Gefügestruktur von Al-Sn-Werkstoffen ist bedingt durch das Erstarrungsverhalten der Legierung. Dieses kann anhand des binären Phasendiagramms Al-Sn erläutert werden (siehe Abbildung 2-16).

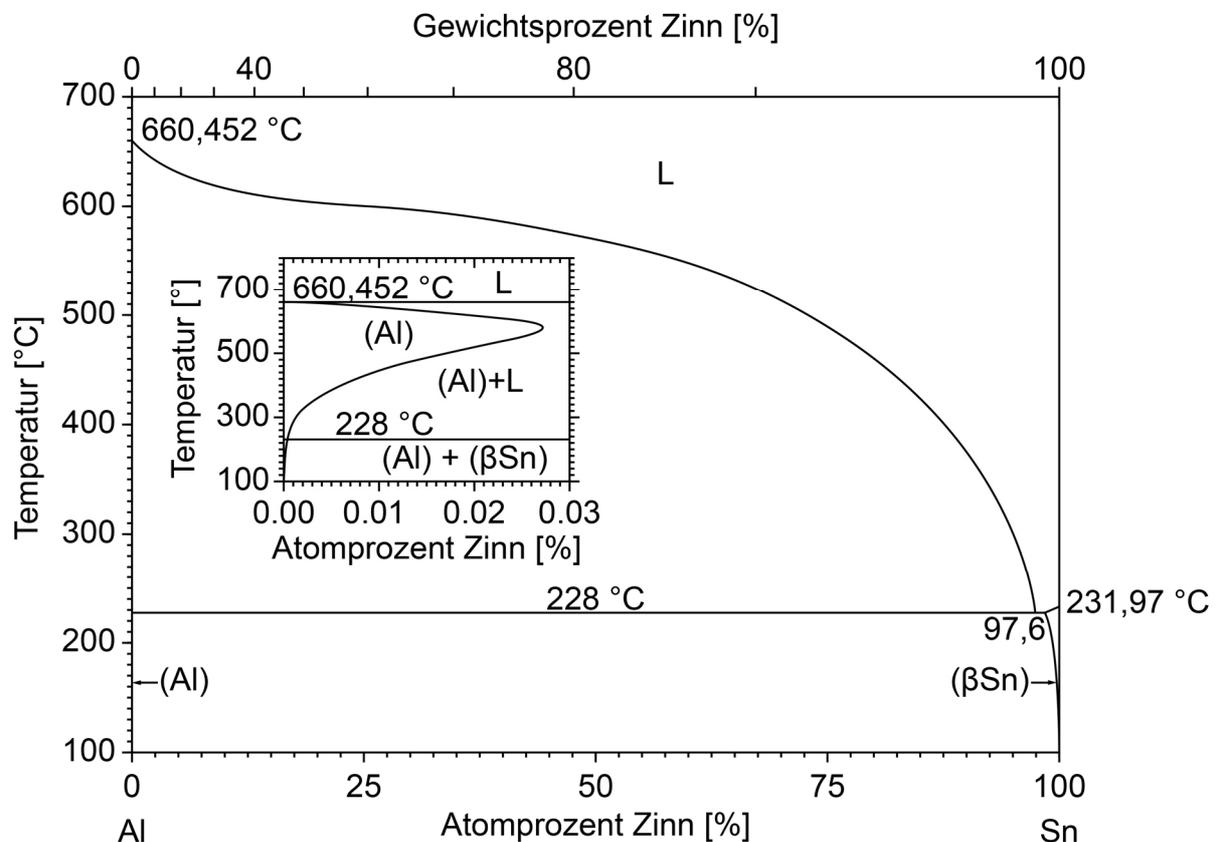


Abbildung 2-16: Binäres Phasendiagramm des Systems Al-Sn nach [MCAL83]

Aluminium und Zinn bilden ein einfaches eutektisches System mit einer Mischungslücke im festen Zustand. Der eutektische Punkt liegt bei einer Konzentration von 97,6 Atomprozent Zinn und einer Temperatur von 228 °C. Das System weist eine retrograde Randlöslichkeit von Zinn in Aluminium von maximal 0,026 Atomprozent bei einer Temperatur von 625 ± 25 °C auf. [MASS90, MCAL83]

Beim Abkühlen einer untereutektischen Al-Sn-Legierung bilden sich beim Unterschreiten der Liquiduslinie primäre Aluminiumkristalle aus. Durch die fortwährende Erstarrung der Primärkristalle erhöht sich im weiteren Verlauf der Abkühlung die Konzentration des Zinns in der Restschmelze, bis diese bei einer Temperatur von 228 °C die eutektische Zusammensetzung (97,6 Atomprozent Zinn) erreicht und als eutektisches Gefüge erstarrt. Das Eutektikum liegt zwischen den primären Aluminiumkristallen vor und umhüllt diese nahezu vollständig.

Al-Sn-Legierungen sind auf Grund des großen Erstarrungsintervalls und der damit einhergehenden Heißrissempfindlichkeit gießtechnisch nur sehr schwer herstellbar. Die Produktion von Bändern, als Halbzeug für die Gleitlagerfertigung, erfolgt großteils durch horizontale Stranggießverfahren mit ofenabhängiger Graphitgleitkokille unter Verwendung einer Go-Stop oder einer Go-Stop-Back Abziehkinematik. Vereinzelt werden auch Verfahren mit mitlaufenden Kokillenwänden nach dem Prinzip des Belt-Casters angewandt. [AFFE96, BRAUN94, HERR80, KASC02, MANN78]

Die fast vollständige Umhüllung der Korngrenzen mit dem Eutektikum wirkt sich nachteilig auf die mechanischen Eigenschaften der Al-Sn-Legierungen im Gusszustand aus. Um die Werkstoffeigenschaften zu verbessern, wird bei der anschließenden thermomechanischen Weiterverarbeitung der Bänder die Gefügebildung gezielt verändert. In den Kaltwalzprozessen wird die Sn-Phase langgestreckt und liegt in Form von Zinnfäden im Gefüge vor. Bei der abschließenden Rekristallisationsglühung formt sich das Zinn globular ein (siehe Abbildung 2-15 b)). In diesem Zustand weist eine AlSn6Cu-Legierung eine Härte von ca. 40 HB und eine Zugfestigkeit von ca. 135 N/mm² auf. [AFFE96, DAVI93, MANN78]

Die für die analytischen Berechnungen des Verbundgießprozesses verwendeten thermophysikalischen Daten und der Verlauf des Festphasenanteils während der Erstarrung der Legierung AlSn6Cu sind im Anhang zusammengefasst.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) der Technischen Universität München wurde ein kontinuierliches Verbundgießverfahren auf Basis der horizontalen Stranggießtechnologie mit ofenabhängiger Gleitkokille entwickelt. Mit dem Verfahren können zweischichtige Aluminiumverbundbänder erzeugt werden. Das Verfahrensprinzip beruht auf dem Aufgießen eines schmelzflüssigen Metalls auf ein bereits vollständig oder teilweise erstarrtes Substratband. [NERL10, WIMM10]

In [NERL14a] und [NERL14b] wird ausführlich die simulationsgestützte Verfahrensentwicklung dargestellt. Der Machbarkeitsnachweis für das Verfahren konnte exemplarisch anhand zweier Versuchskonfigurationen mit der Werkstoffkombination AlSn6Cu und Al99,5 erbracht werden. Eine systematische experimentelle Verfahrenserprobung und -optimierung sowie eine quantitative Beurteilung der Verbundqualität erfolgte jedoch nicht. Die Wechselwirkungen zwischen den Prozessparametern und der erreichbaren Verbundqualität sind nicht bekannt.

Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist, das kontinuierliche Verbundgießen auf Basis der horizontalen Stranggießtechnologie zur Herstellung von AlSn6Cu-Al99,5-Verbundbändern experimentell systematisch zu untersuchen und die Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Prozessrobustheit sowie der sich einstellenden Verbundqualität zu ermitteln. Im Einzelnen resultieren daraus folgende Teilziele:

- Definition der Prozessgrenzen des Verfahrens durch methodische Variation der Gieß- und Anlagenparameter
- Qualitative Bewertung des Einflusses der einzelnen Prozessparameter auf die Prozessrobustheit
- Qualitative und quantitative Bewertung der erzeugten Verbunde durch geeignete Prüfmethode
- Ermittlung der Wechselwirkungen zwischen den Prozessparametern und der resultierenden Verbundqualität
- Überprüfung der thermomechanischen Weiterverarbeitbarkeit der Verbunde

Vorgehensweise

Als Voraussetzung für die experimentelle Untersuchung des Verbundgießprozesses gilt es zunächst die Grenzen des Substratbandgießprozesses zu erarbeiten. In einer Grundlagenversuchsreihe wird daher das Prozessfenster für das Gießen des AlSn6Cu-Bandes definiert. Das Hauptaugenmerk der Versuche liegt auf der Ermittlung der realisierbaren Abziehkinematiken und der möglichen Gießgeschwindigkeiten. Anschließend wird der Einfluss dieser Prozessparameter auf den thermischen Haushalt im Urformwerkzeug, die Qualität des Bandes und die Prozessrobustheit evaluiert.

Die ermittelten Daten dienen als Eingangsgrößen für die thermische Analyse des Verbundgießprozesses. Mit analytischen Berechnungen wird die sich einstellende Temperatur in der Verbundzone bei unterschiedlichen Gieß- und Anlagenparametern abgeschätzt. Somit können erfolgversprechende Versuchskonfigurationen und sensitive Parameter für den kontinuierlichen Verbundgießprozess ermittelt werden.

Im Anschluss daran wird das Prozessfenster des Verbundgießverfahrens für die Werkstoffkombination AlSn6Cu und Al99,5 erarbeitet. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Grundlagenversuche und der analytischen Berechnungen werden systematisch die Gieß- und Anlagenparameter variiert. Die veränderbaren Parameter lassen sich in die Kategorien Strangbewegung, geometrische Merkmale und Wärmezufuhr und -abfuhr unterteilen. Nachfolgend wird der Einfluss der einzelnen Parameter auf das Temperaturniveau im Gießwerkzeug, die Qualität des Verbundes und die Prozessrobustheit bewertet.

Abschließend sollen die erzeugten Verbunde umformend verarbeitet werden. Anhand ausgewählter Verbundbänder soll die Machbarkeit der industriellen thermomechanische Weiterverarbeitbarkeit zu Verbundblechen überprüft werden.

Zusammenfassend ist die der Arbeit zu Grunde liegende Vorgehensweise in Abbildung 3-1 dargestellt.

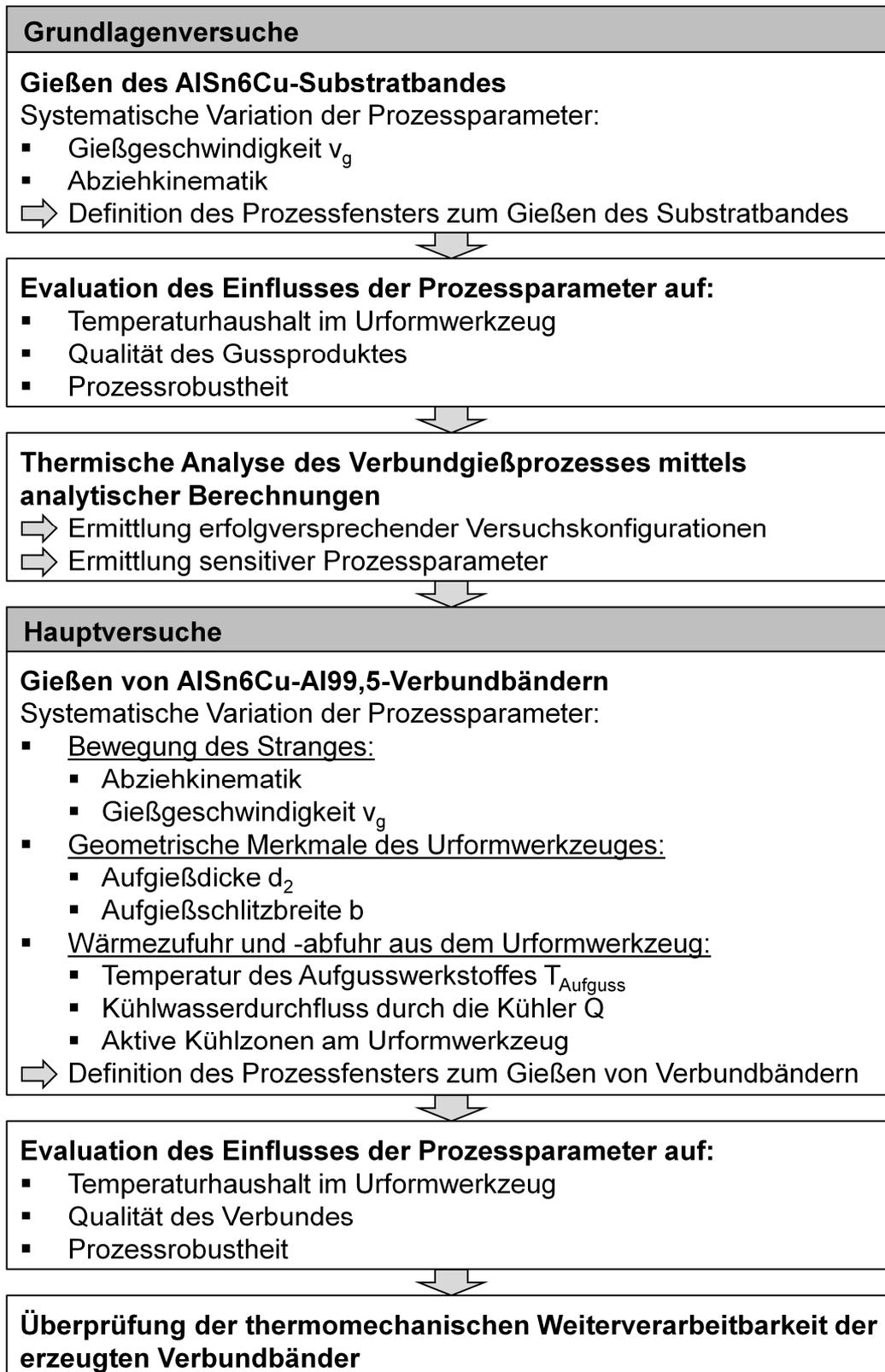


Abbildung 3-1: Vorgehensweise

4 Versuchs- und Messeinrichtungen

4.1 Versuchsanlagen

4.1.1 Stranggießanlage

Für die experimentellen Untersuchungen stand eine kippbare Stranggießanlage der Bauart Demag Technica Typ 30/10 D I MCP N (Firma Demag Technica, Veitshöchheim) zur Verfügung. Die Baugruppen Gießofen, Zieheinrichtung sowie Steuerung wurden in mehreren Schritten modernisiert und erneuert. Mit der aktuellen Steuerung der Firma esa4u GmbH, Würzburg, lassen sich die Prozess- und Gießparameter sehr sensitiv einstellen. Die Betriebsdaten werden in Echtzeit visualisiert sowie aufgezeichnet. Abbildung 4-1 zeigt die gerüstete Stranggießanlage mit den Hauptkomponenten Gießofen, Verbundgießeinheit und Zieheinrichtung.

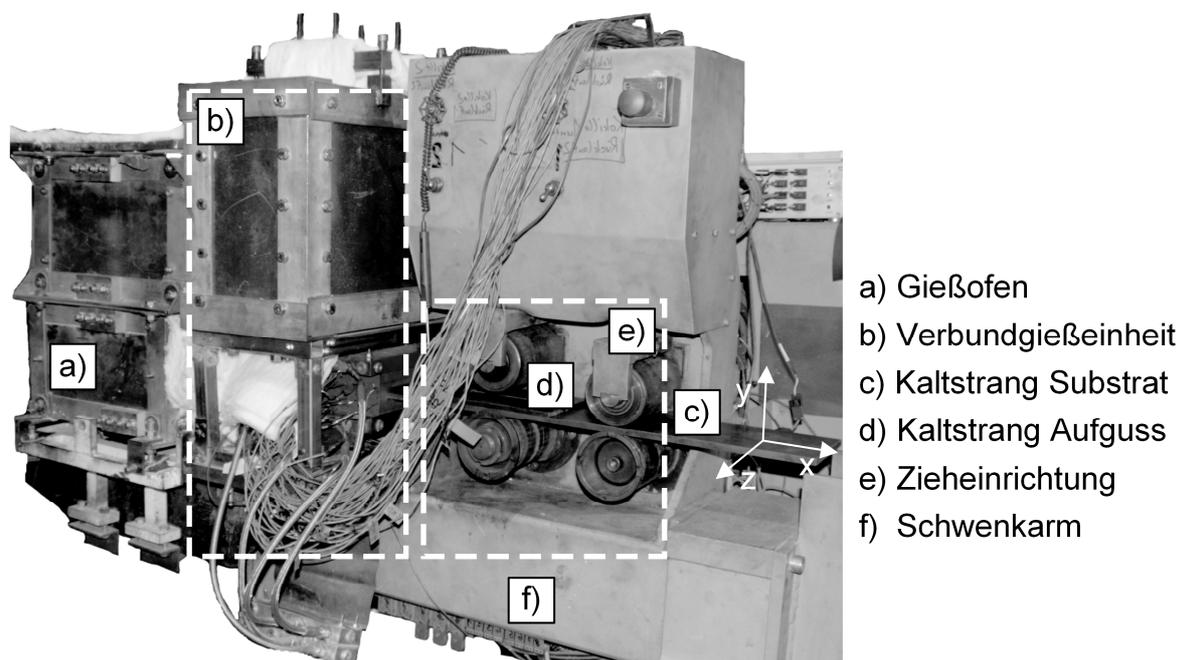


Abbildung 4-1: Stranggießanlage mit Gießofen und Verbundgießeinheit

Die Stranggießanlage wird mit einem Mittelfrequenz-Induktionstiegelofen (Nennleistung 60 kW) betrieben, der sowohl als Schmelzofen wie auch als Vergießofen genutzt wird. Im Gießofen ist ein Tongraphit-Schuhtiegel (Firma Vesuvius GmbH, Großalmerode) mit einem Nutzinhalt von 10 l eingesetzt. Der Ofen ist auf einem in x-Richtung beweglichen Schlitten gelagert. In ofenabhängiger Anordnung wird der Ofen über eine Gewindespindel an die ortsfeste Verbundgießeinheit gepresst. Eine detaillierte Beschreibung der Verbundgießeinheit erfolgt in Kapitel 4.1.2. Zur thermischen Trennung zwischen dem Auslauf des Schuhtiegels und der Verbundgießeinheit wird eine Isolationsplatte aus MONALITE® M1-A (Firma Promat GmbH, Ratingen) der Dicke 19 mm eingesetzt. Die Abdichtung zwischen den Komponenten erfolgt durch Keramikfaser-matten. Die Zieheinrichtung zum Strangabzug besteht aus zwei Walzenpaaren (Walzendurchmesser 100 mm), die sich separat schließen lassen. Der Strang wird mit den oberen Anpresswalzen auf die unteren Antriebswalzen gedrückt. Die erste Antriebswalze (nahe der Verbundgießeinheit) ist spielfrei mit dem Servomotor verbunden. Die zweite Antriebswalze wird über eine Spannkette angetrieben. Die gewünschte Betriebsart der Zieheinrichtung (siehe Kapitel 2.1.2) kann über die Anlagensteuerung eingestellt werden. Zur Kühlung des Urformwerkzeuges verfügt die Anlage über zwei getrennte Wasserkreisläufe, welche mit einem maximalen Druck von 8 bar und einer maximalen Durchflussmenge von je 20 l/min betrieben werden können.

4.1.2 Verbundgießeinheit

Das Anlagenkonzept zum kontinuierlichen Verbundgießen auf Basis der horizontalen Stranggießtechnologie wurde bereits in [WIMM10] und [NERL10] vorgestellt. In [NERL12], [NERL14a] und [NERL14b] wird die simulationsgestützte Auslegung und Konstruktion der einzelnen Komponenten der Verbundgießeinheit ausführlich beschrieben. Die Verbundgießeinheit besteht im Wesentlichen aus dem Verbundgießwerkzeug und der Ofeneinheit.

Funktionsweise

Mit der Verbundgießeinheit werden zweischichtige Verbundstränge in einem kontinuierlichen Stranggießprozess erzeugt. Die Verbundstränge bestehen aus zwei Werkstoffen, die stoffschlüssig miteinander verbunden sind. In dieser Arbeit wird ausschließlich die Werkstoffkombination AlSn6Cu und Al99,5 untersucht. Die Bindezone der Halbzeuge verläuft in der Horizontalen und weist ein definiert eingestelltes Dickenverhältnis der beiden Werkstoffe auf. Das Verbundgießwerkzeug besteht aus zwei Kokillenstufen und einem Aufgießmodul (Abbildung 4-2).

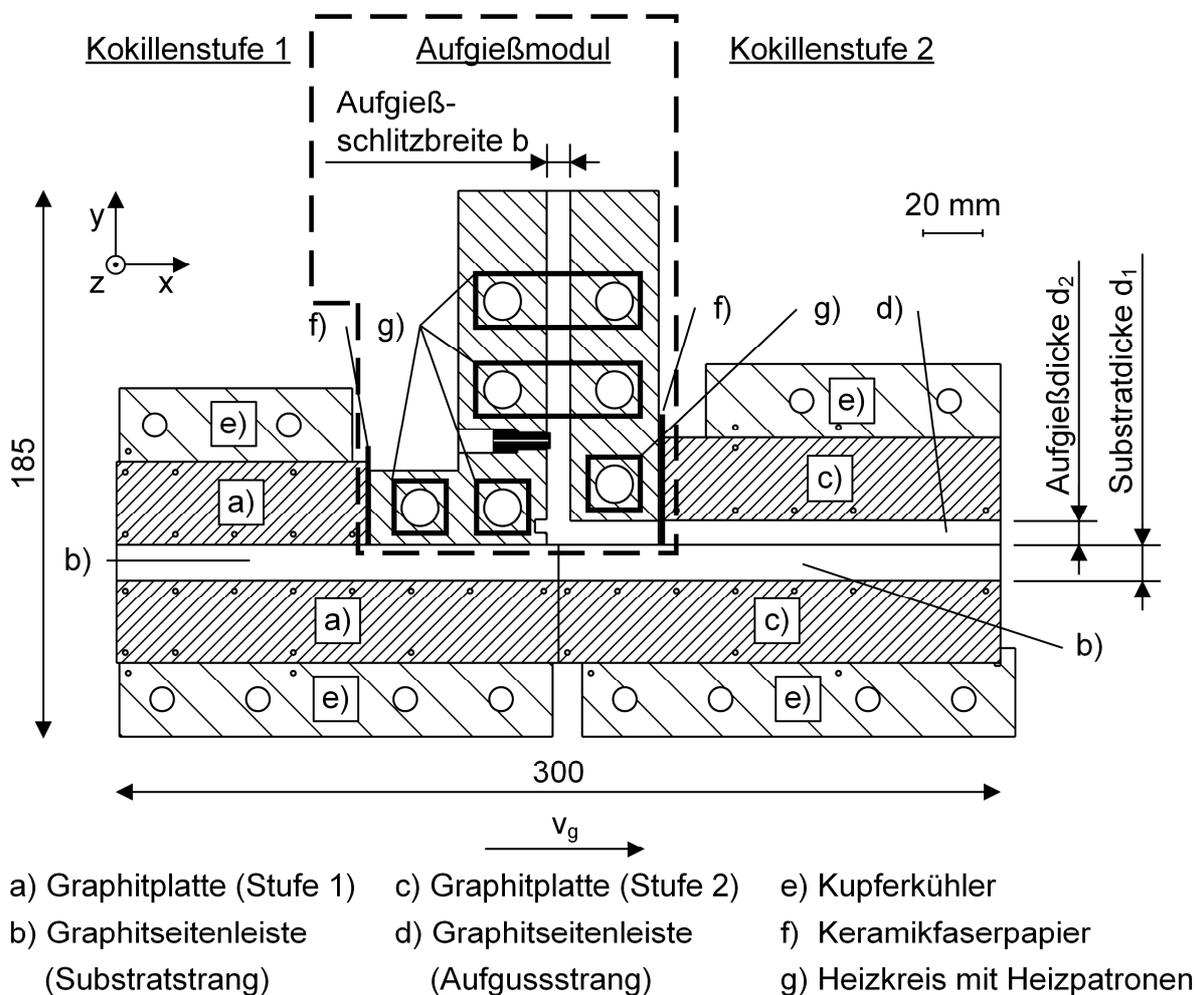


Abbildung 4-2: Längsschnitt durch das Verbundgießwerkzeug nach [NERL 12]

In der Kokillenstufe 1 erfolgt die Urformung des Substratwerkstoffes AlSn6Cu in ofenabhängiger Anordnung. Der Substratstrang wird in positiver x-Richtung abgezogen

und erreicht im erstarrten Zustand das Aufgießmodul. Durch das Aufgießmodul wird der Aufgusswerkstoff Al99,5 über einen vertikalen Schlitz auf die Oberfläche des Substratstranges geführt. In der Kontaktfläche zwischen Substrat- und Aufgusswerkstoff, der sogenannten Verbundgießzone, müssen die nötigen thermischen Verhältnisse für eine stoffschlüssige Verbundbildung eingestellt werden (siehe Kapitel 2.2.3). Der Verbundstrang wird in der sich anschließenden Kokillenstufe 2 abgekühlt. Die Bevorratung und Temperierung des Aufgusswerkstoffes erfolgt in der über dem Verbundgießwerkzeug angeordneten Ofeneinheit.

Verbundgießwerkzeug

Zur Urformung des Substratbandes in der Kokillenstufe 1 wird eine vierteilige Feinkorngraphitkokille (RINGSDORFF® R4550, Firma SGL Carbon GmbH, Bonn) eingesetzt. Sie besteht aus einer Ober- und Unterplatte sowie aus zwei Seitenleisten. Die Kavität hat einen Querschnitt von 150 mm x 12 mm (Substratstrangbreite x Substratstrangdicke). Das Kokillenpaket ist mit Passstiften lagegenau positioniert und zwischen der oberen und unteren Kupferkühlplatte geklemmt. Die Fixierung erfolgt über vier Verschraubungen mit einem Anzugsmoment von je 12 Nm. Die Kühlplatten (AMPCOLOY®, Firma AMPCO METAL S. A., Marly (Schweiz)) sind quer zur Strangabzugsrichtung mit Kühlwasser durchströmt. Die untere Kühlplatte verfügt über vier Kühlkanäle (Durchmesser 8 mm), die obere Kühlplatte über zwei Kühlkanäle (Durchmesser 8 mm). Beide Kühlplatten sind gemeinsam an einem Kühlwasserkreislauf der Stranggießanlage angeschlossen und können mit einem maximalen Kühlwasserdurchfluss von 20 l/min betrieben werden.

Das Aufgießmodul zur Zuführung des Aufgusswerkstoffes sitzt auf den Graphitseitenleisten für den Substratstrang und ist zwischen den Kokillenstufen geklemmt. An den Längsseiten des Aufgießmoduls ist zu den Graphitkokillen Keramikfaserpapier zur Abdichtung eingebracht. Das Aufgießmodul besteht aus zwei Teilen (EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2, Firma Esterer Giesserei GmbH, Altötting), welche über vier Schrauben verspannt sind. Durch den modularen Aufbau lassen sich die Aufgießdicke d_2 und die Aufgießschlitzbreite b (siehe Abbildung 4-2) einstellen. Für die Versuche standen Module für eine Variation der Aufgießdicke d_2 in einem Bereich von 6 – 12 mm und eine

Variation der Aufgießschlitzbreite b in einem Bereich von 3 – 16 mm zur Verfügung. Für die Gießversuche wird das Aufgießmodul zum Schutz vor der Aluminiumschmelze mit Bornitrid (HeBoCoat® 10W, Firma Henze BNP GmbH, Kempten) geschichtet. Das Aufgießmodul kann über sieben Heizpatronen (Typ Hochtemperatur FIREROD®, Firma Watlow GmbH, Kronau), die in fünf separat regelbaren Heizkreisen angeordnet sind, temperiert werden. Die Heizpatronen weisen einen Durchmesser von 12,5 mm und eine beheizte Länge von 200 mm auf. Sie verfügen über eine Heizleistung von je 1200 W und können bis zu einer Maximaltemperatur von 980 °C eingesetzt werden. Die Regelung der Heizkreise erfolgt über ein Heißkanalregelgerät RH08 mit insgesamt sieben Reglereinschüben RD2057 der Firma ESK-Electronic GmbH, Wiesbaden.

Die Abkühlung des Verbundstranges erfolgt in der Kokillenstufe 2. Das Graphitkokillenpaket beinhaltet vier Seitenleisten. Zwei Seitenleisten mit der Dicke des Substratstranges und zwei Seitenleisten mit der Dicke der im Aufgießmodul eingestellten Aufgießdicke d_2 . Die Gesamthöhe des Querschnitts des Formhohlraumes in der Kokillenstufe 2 variiert je nach verwendetem Aufgießmodul von 18 – 24 mm. Der sonstige Aufbau und die verwendeten Werkstoffe entsprechen der Kokillenstufe 1. Abbildung 4-3 zeigt das zusammengesetzte Verbundgießwerkzeug. Das Urformwerkzeug ist über die unteren Kühlerplatten mit der Aufnahme für das Verbundgießwerkzeug fest verschraubt. Die Aufnahme ist ortsfest mit dem Schwenkarm der Stranggießanlage verbunden.

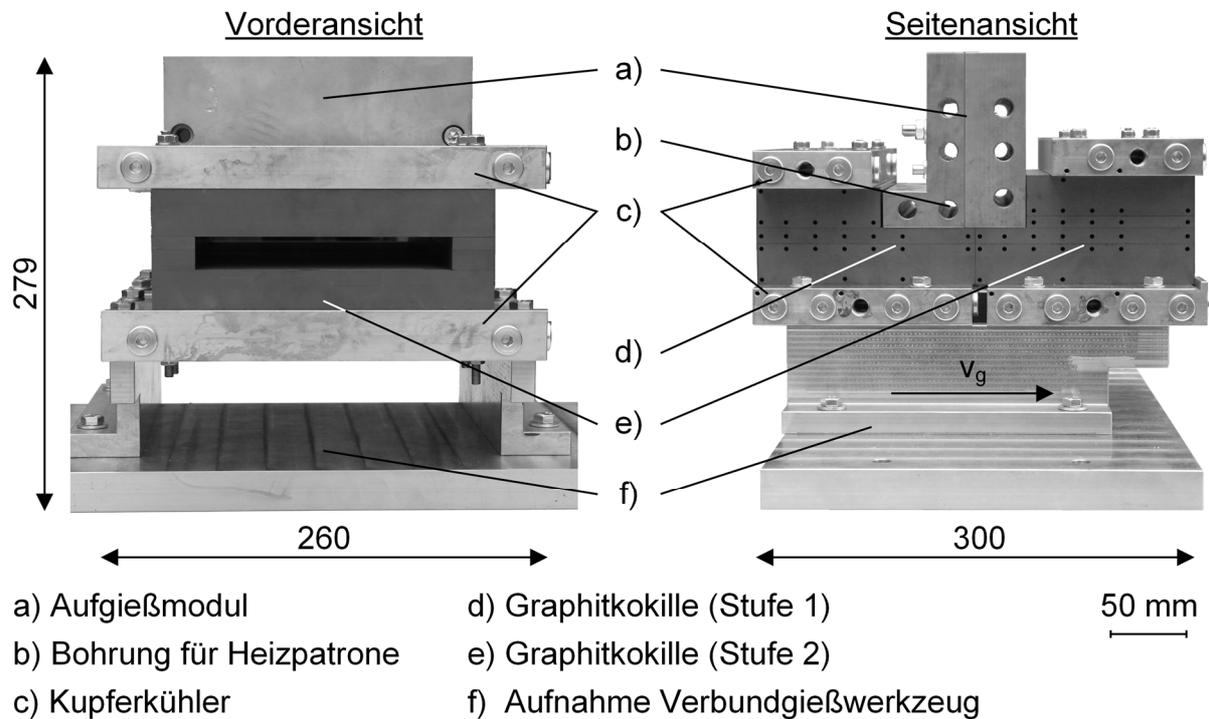


Abbildung 4-3: Vorder- und Seitenansicht des Verbundgießwerkzeuges

Ofeneinheit

Für die Bereitstellung und Temperierung des Aufgusswerkstoffes verfügt die Verbundgießeinheit über eine Ofeneinheit. Der Ofenraum wird durch eine verschraubte Rahmenkonstruktion aus L-Profilen, in welche Isolierplatten (DOTHERM® 800 M, Firma DOTHERM GmbH & Co. KG, Dortmund) eingesetzt sind, dargestellt. Der Ofenboden enthält eine Aussparung, in welche das Aufgießmodul hinein ragt. Auf der Oberseite des Ofens befindet sich eine Öffnung zum Eingießen des flüssigen Aufgusswerkstoffes. Im Ofenraum sind an den beiden Längsseiten plattenförmige Keramikfaserheizelemente (TYP CFH, Firma Watlow GmbH, Kronau) integriert. Die Heizelemente verfügen über eine Maximalleistung von je 1500 W und können bis zu einer Temperatur von 1100 °C betrieben werden. Jedes Heizelement wird in einem separaten Heizkreis mit dem Heißkanalregelgerät RH08 der Firma ESK-Electronic GmbH, Wiesbaden, betrieben. Der Ofen wird über ein Gestell aus verschraubten Vierkantprofilen fest mit der Aufnahme des Verbundgießwerkzeuges verbunden. Zur Aufnahme der Alumi-

niumschmelze kommt ein Tiegel (Sonderanfertigung Firma Aug. Gundlach KG, Grossalmerode) mit einem Nutzinhalt von 4,5 l zum Einsatz. Der Tiegel wird über eine Spannvorrichtung in ofenabhängiger Anordnung auf das Aufgießmodul gepresst. Zwischen dem Aufgießmodul und dem Tiegel wird zur Abdichtung Keramikfaserpapier eingebracht. Eine Zusammenbauzeichnung der kompletten Verbundgießeinheit ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

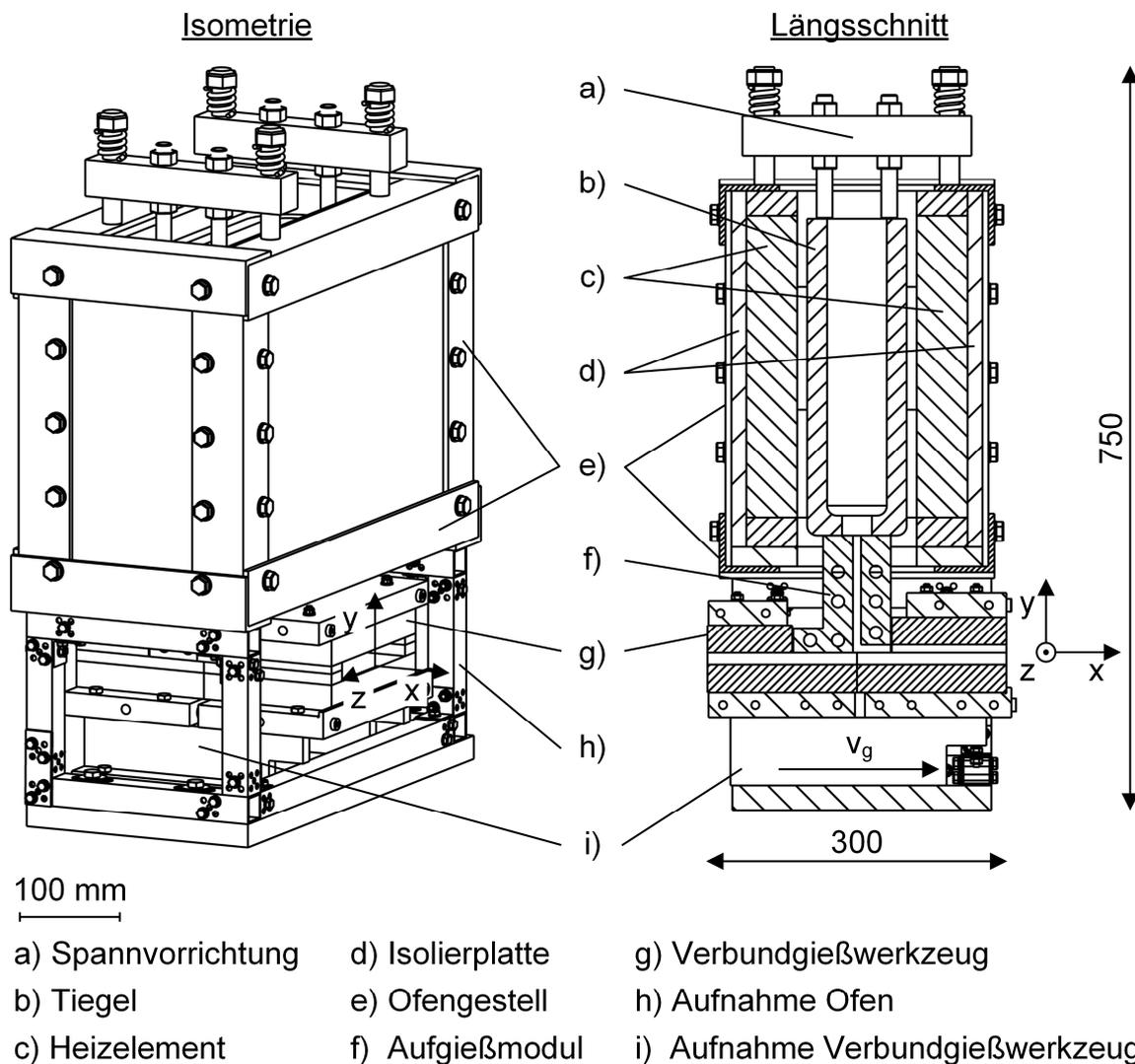


Abbildung 4-4: Isometrie und Längsschnitt der Verbundgießeinheit nach [WIMM10] und [NERL14b]

4.1.3 Laborschmelzofen

Der Aufgusswerkstoff wurde mit einem Laborschmelzofen Modell K 4/10 der Firma Nabertherm GmbH, Lilienthal, erschmolzen. Der widerstandbeheizte Ofenraum kann bis zu einer Temperatur von 1000 °C aufgeheizt werden, wodurch Schmelzetemperaturen von bis zu 900 °C eingestellt werden können. Im Ofen können Iso-Graphittiegel bis zu einem Volumen von 4 l eingesetzt werden. [NABE05]

4.2 Messeinrichtungen

4.2.1 Temperaturmessgerät

Die Messung der Temperaturen im Verbundgießwerkzeug erfolgte über das modulare Temperaturmessgerät TempScan/1100 der Firma IOtech, Inc., Cleveland (USA), sowie der Software ChartView. Bei der Versuchsdurchführung wurden die Temperaturmesswerte mit einer Abtastrate von 1 Hz aufgezeichnet. Das Messsystem zeichnet sich im Temperaturbereich von -100 bis 1372 °C durch eine Messgenauigkeit von $\pm 0,5$ °C aus. Als Temperatursensoren kamen NiCr-Ni Thermoelemente (Typ K) der nach [DIN60584-1] spezifizierten Klasse 1 mit einem Durchmesser von 1,5 mm zum Einsatz, die im verwendeten Messbereich von 20 bis 700 °C eine Messgenauigkeit von $\pm 2,8$ °C aufweisen.

4.2.2 Lichtmikroskop

Die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Verbundproben wurden mit dem Auflichtmikroskop Axioplan II der Firma Carl Zeiss AG, Oberkochen, erstellt. Mit diesem Mikroskop können optische Vergrößerungen von 25:1 bis 2500:1 erreicht werden. Durch die integrierte Mikroskopiekamera AxioCam MRc5 sowie die Auswertungssoftware Axio-Vision4 können die Aufnahmen digitalisiert und weiterverarbeitet werden. Die Kamera bietet eine maximale Auflösung von 2584 x 1936 Bildpunkten. [ZEIS05]

4.2.3 Zug-Druck-Prüfmaschine

Die Versuche zur Ermittlung der Bindefestigkeit wurden mit einer Zug-Druck-Prüfmaschine Typ 1484/DUPS-M der Firma Zwick GmbH & Co., Ulm, durchgeführt. Die Anlage verfügt über zwei separate Prüfräume, welche die Durchführung von Zug- und Druckprüfungen erlauben. Die Prüfräume sind durch eine verfahrbare Traverse getrennt. Der untere Prüfraum ist mit einem Kraftaufnehmer für Zug- und Druckkräfte von bis zu 200 kN ausgestattet. Im oberen Prüfraum ist ein Kraftaufnehmer für einen Messbereich bis zu 20 kN installiert. Die Auflösung der Kraftsensoren beträgt 0,25 % der Nennprüfkraft. Somit entspricht die Prüfmaschine der Klasse 1 und besser für Kraft- und Wegmesseinrichtungen nach [DIN7500-1]. [ZWIC07]

5 Horizontales Stranggießen des Substratbandes

Als Ausgangsbasis für die Verbundgießversuche werden im Vorfeld experimentelle Untersuchungen zum einstufigen Gießen des Substratbandes mit der in Kapitel 4.1.2 vorgestellten Verbundgießeinheit durchgeführt.

5.1 Versuchsdurchführung und -auswertung

5.1.1 Gießen des Substratbandes

Die stückige Vorlegierung des Substratwerkstoffes wird zu Versuchsbeginn im induktionsbeheizten Schuhtiegelofen erschmolzen. Die Kokillenstufe 1 ist mit einem Kaltstrang verschlossen, wodurch ein Einfließen der Schmelze in die Gießkavität während des Aufschmelzens verhindert wird. Auf dem Kaltstrang für das Substratband liegt ein zweiter Kaltstrang zum Verschluss des vertikalen Schlitzes des Aufgießmoduls (siehe Abbildung 4-1). Dieser Kaltstrang ist während des einstufigen Gießens des Substratbandes ständig gegen eine Bewegung in Strangabzugsrichtung gesperrt. Das Aufgießmodul und der Ofenraum des widerstandsbeheizten Aufgießofens werden vor dem Gießbeginn auf die gewünschte Betriebstemperatur gebracht. Beim Start des Substratstranggießprozesses wird der untere Kaltstrang mittels des zweiten Walzenpaares der Zieheinrichtung gemäß der eingestellten Abziehkinematik und Gießgeschwindigkeit aus der Kokille gezogen. Das erste Walzenpaar der Zieheinrichtung ist geöffnet. Die aus dem Schuhtiegel in den Formhohlraum einströmende Schmelze erstarrt und verklammert sich formschlüssig in am Endstück des Kaltstranges eingebrachte Hinterschnitte. Bei Gießbeginn ist das Temperaturfeld im Urformwerkzeug instationär. Mit zunehmender Versuchsdauer erwärmt sich das Werkzeug, bis die eingebrachten und die abgeführten Wärmeströme im Gleichgewicht stehen. Ein stationärer Gießprozess stellt sich nach einer Gießlänge von ca. 0,5 bis 1,0 m ein. Im Gießbetrieb stellen sich bei einer Änderung der Gieß- und Anlagenparameter erneut stationäre Verhältnisse innerhalb des gleichen Zeitraumes ein. Da auf Grund des begrenzten Nutzinhaltes des Schuhtiegels eine maximale Substratstranglänge von 5,5 m gegossen werden kann, können pro Versuch ca. vier verschiedene Konfigurationen untersucht werden.

5.1.2 Gieß- und Anlagenparameter

Mit den einstufigen Substratstranggießversuchen wurde das Prozessfenster für die fehlerfreie und prozesssichere Herstellung von Bändern aus AlSn6Cu erarbeitet. Ein stabiler und robuster Substratstranggießprozess stellt eine Grundvoraussetzung für den Verbundgießprozess dar. Der Fokus der Untersuchungen lag einerseits auf der Ermittlung der maximal möglichen mittleren Gießgeschwindigkeit v_g . Unterschiedliche Gießgeschwindigkeiten werden bei einer konstanten Hubweite H von 7,5 mm durch eine Veränderung der Wartezeit t_w eingestellt. Andererseits wurden Möglichkeiten zur Veränderung der Abziehkinematik im Go-Stop-Betrieb untersucht. Ziel war es, den zeitlichen Anteil der Ziehbewegung während eines Ziehzyklus zu maximieren beziehungsweise die Wartezeit zu minimieren, da eine lange Wartezeit als kritisch für eine gleichmäßige Verbundqualität angesehen wird. Die Parameter Hubweite H und Walzendrehgeschwindigkeit ω wurden ausgehend von Standardwerten nach [HOLZ85] schrittweise reduziert. Die mittlere Gießgeschwindigkeit v_g wurde durch Anpassung der Wartezeit t_w konstant gehalten. Zudem wurde die Möglichkeit eines kontinuierlichen Bandabzugs überprüft. In Tabelle 5-1 sind die einzelnen Versuchsreihen mit den variierten Gieß- und Anlagenparametern dargestellt. Bei allen Versuchen wurde der Kühlwasservolumenstrom durch die Kokillenstufe 1 auf 18 l/min und der durch die Kokillenstufe 2 auf 14 l/min einreguliert. Die Temperatur im Aufgießmodul und in der Ofeneinheit wurde auf 750 ± 15 °C gehalten. Die Gießtemperatur der AlSn6Cu-Schmelze betrug 750 ± 15 °C. Das verwendete Aufgießmodul hat eine Aufgießschlitzbreite b von 4 mm und eine Aufgießdicke d_2 von 8 mm.

Versuchsreihe	Abzugsart	H [mm]		ω [rad/s]		v_g [mm/min]	
		von	bis	von	bis	von	bis
<i>Gießgeschwindigkeit v_g</i>	<i>Go-Stop</i>	7,5	7,5	0,48	0,48	150	400
<i>Hubweite H</i>	<i>Go-Stop</i>	7,5	1,5	0,48	0,48	235	235
<i>Walzendrehgeschwindigkeit ω</i>	<i>Go-Stop</i>	7,5	7,5	0,48	0,05	235	235
<i>Kombination Hubweite H und Walzendrehgeschwindigkeit ω</i>	<i>Go-Stop</i>	7,5	1,5	0,48	0,05	235	235
<i>Kontinuierlicher Abzug</i>	<i>kontinuierlich</i>	-	-	0,07	0,09	200	261

Tabelle 5-1: Gieß- und Anlagenparameter bei den Versuchsreihen zur Bestimmung des Prozessfensters für den Substratbandgießprozess

5.1.3 Temperaturmessung

Zur Beurteilung der thermischen Verhältnisse im Verbundgießwerkzeug bei unterschiedlichen Versuchskonfigurationen wurden die Graphitkokillen mit Thermoelementen bestückt. In Abbildung 5-1 sind die Positionen und die Bezeichnungen der Messstellen im Versuchswerkzeug dargestellt. Die Messstellen liegen in der Symmetrieebene des Urformwerkzeuges und sind 3,5 mm von der Oberfläche der Gießkavität entfernt. Zusätzlich wurde die Bandaustrittstemperatur an der Oberseite des Stranges mit einem Oberflächentaster manuell gemessen. Für die Versuchsauswertung wurden die aufgezeichneten Temperatur-Zeit-Verläufe pro Messposition in je eine Temperatur-Ort-Kurve für die Kokillenunterseite (KU) und die Kokillenoberseite (KO) umgeformt. Hierfür wurden die gemittelten Werte der einzelnen Messpositionen in einem Zeitintervall von 10 s während des stationären Gießbetriebes verwendet.

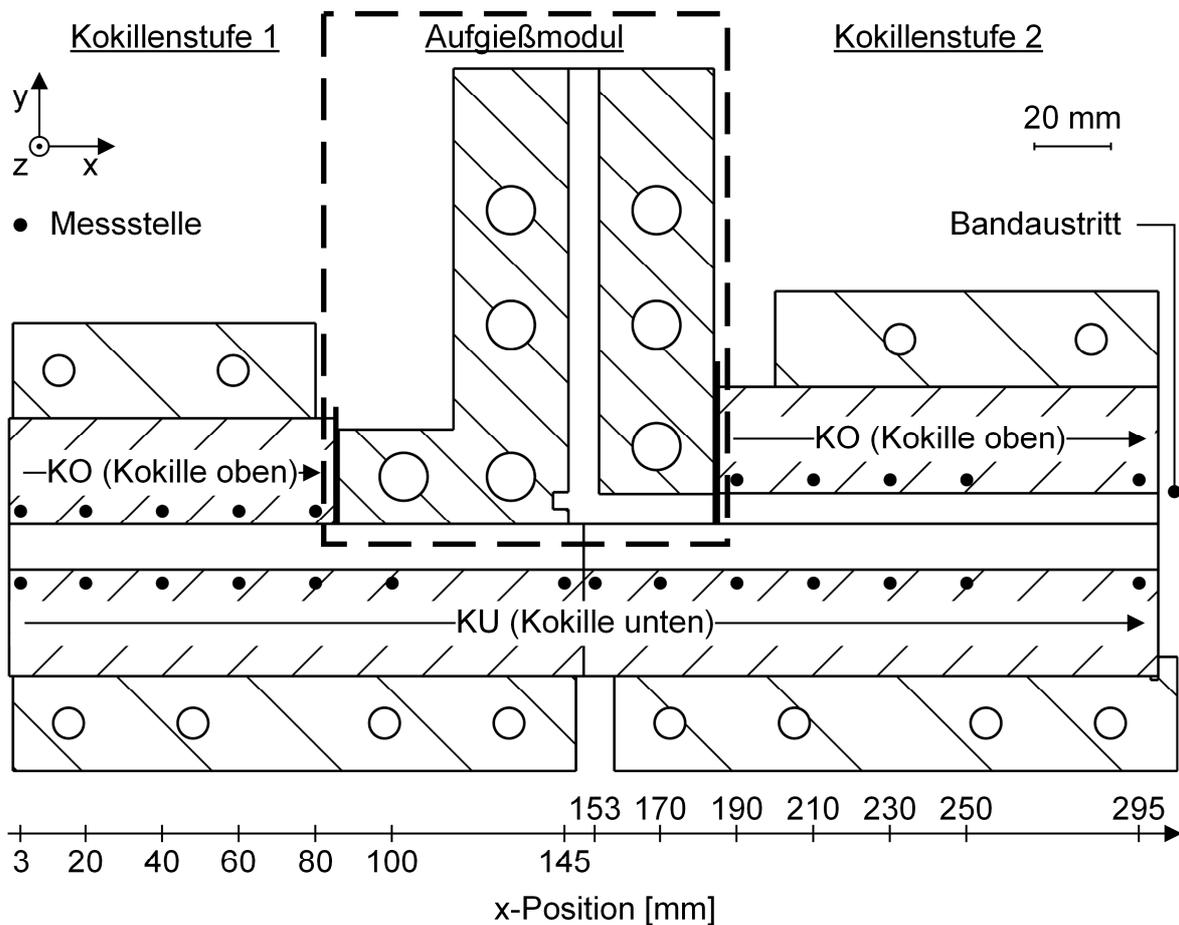


Abbildung 5-1: Position und Bezeichnung der Temperaturmessstellen im Verbundgießwerkzeug nach [NERL14b]

5.2 Versuchsergebnisse

Die Gießversuche dienen zur Ermittlung des Prozessfensters für das Gießen des AlSn6Cu-Substratbandes mit dem neu entwickelten Verbundgießwerkzeug. Ziel der Versuche ist zum einen die Ermittlung der minimal und maximal möglichen Gießgeschwindigkeit. Zum anderen soll bestimmt werden, wie weit die Hubweite und die Walzendrehgeschwindigkeit im intermittierenden Strangabzug bei gleichbleibender Gießgeschwindigkeit reduziert werden können. Zudem soll überprüft werden, ob ein kontinuierlicher Strangabzug möglich ist.

5.2.1 Einfluss der Gießgeschwindigkeit

Im intermittierenden Strangabzug mit einer Hubweite von 7,5 mm und einer Walzendrehgeschwindigkeit von 0,48 rad/s kann ein Substratstrang aus AlSn6Cu in einem Geschwindigkeitsbereich von 185 bis 294 mm/min erzeugt werden. Bei einer Geschwindigkeit unter 185 mm/min beginnt die Erstarrung der Schmelze bereits in der keramischen Isolierplatte zwischen Tiegelschnauze und Urformwerkzeug. Ein Nachfließen der Schmelze in die Gießkavität wird unterbunden und der Strang reißt ab. Bei Gießgeschwindigkeiten über 294 mm/min reißt der Strang ausgehend von der Mitte, da sich in der nur noch kurzen Wartezeit keine ausreichend tragfähige Randschale bilden kann. In Abbildung 5-2 sind die Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten bei unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten dargestellt.

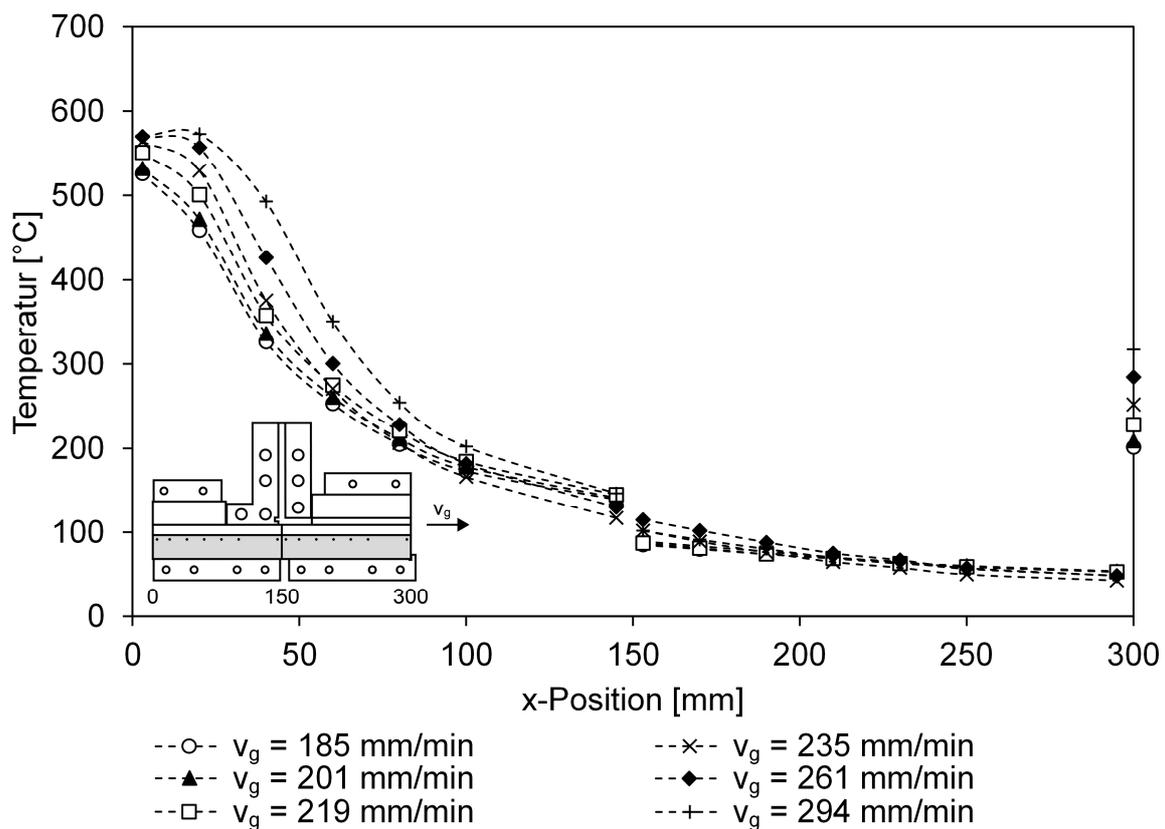


Abbildung 5-2: Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU) bei unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten ($H = 7,5$ mm; $\omega = 0,48$ rad/s)

Die Kurvencharakteristik aller Temperaturverläufe ist ähnlich. Die Kokillentemperatur am Kokilleneinlauf (Position $x = 3$ mm) ist sehr hoch. Die 750 °C heiße AlSn6Cu-Schmelze liegt hier flüssig an der Kokillenwand an und die Wärmeübergangsbedingungen sind nahezu ideal. Im weiteren x -Verlauf sinken die Kokillentemperaturen bis zur Position $x = 20$ mm leicht ab, da der Schmelze über die Kokille fortwährend Wärme entzogen wird. Im Anschluss daran ändert sich die Steigung des Temperaturverlaufes rapide. Der Knick im Temperaturverlauf kennzeichnet das Abheben des Stranges in der Kokille. Durch die Ausbildung einer festen Randschale und der damit einhergehenden Erstarrungskontraktion bildet sich ein Luftspalt zwischen Strang und Kokille. Die Wärmeleitung von Strang zu Kokille verschlechtert sich und erfolgt größtenteils durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung im Luftspalt. Somit reduziert sich der Wärmeeintrag in die Kokille erheblich und das Temperaturniveau in der Kokille sinkt.

Wie aus der Wärmebilanz zu erwarten ist, steigen die Temperaturen in der Kokille mit zunehmender Gießgeschwindigkeit vor allem bis zur Position $x = 80$ mm deutlich an. Zudem wandert der Ort des Strangabhebens und somit die Erstarrungsfront in positive x -Richtung. Bei einer Gießgeschwindigkeit von 185 mm/min liegt die Erstarrungsfront an der Position $x = 3$ mm. Durch eine Erhöhung der Gießgeschwindigkeit auf 294 mm/min verschiebt sich die Erstarrungsfront in den Bereich zwischen den Messstellen Position $x = 40$ mm und $x = 60$ mm. Mit zunehmender Gießgeschwindigkeit steigt die Bandaustrittstemperatur. Bei einer Gießgeschwindigkeit von 185 mm/min liegt diese bei ca. 200 °C. Im Fall einer Gießgeschwindigkeit von 294 mm/min beträgt die Bandaustrittstemperatur ca. 320 °C. Der Anstieg der Bandaustrittstemperatur über die Gießgeschwindigkeit ist nahezu linear und beträgt ca. 1 °C pro mm/min. Bei partiellen Messungen der Substratstrangoberflächentemperatur durch den vertikalen Aufgießschlitz unter Verwendung eines Oberflächentasters werden Werte von ca. 400 °C bei einer Gießgeschwindigkeit von 235 mm/min ermittelt. Die ermittelte Oberflächentemperatur des Substratstranges stimmt gut mit der in [NERL14a] simulierten Substratoberflächentemperatur überein.

Beim intermittierenden Strangabzug entsteht bei jedem Ziehzyklus eine Hubmarke auf der Oberfläche des Gussproduktes. Die Ausprägung der Hubmarke entspricht der Gestalt der Erstarrungsfront. In Abbildung 5-3 ist die Oberseite des Substratbandes bei verschiedenen Gießgeschwindigkeiten dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die über die Bandbreite verlaufenden Hubmarken. Der Abstand der Hubmarken zueinander beträgt gemäß der verwendeten Hubweite 7,5 mm. Auf Grund der Wärmeabfuhr über die Seitenleisten ist die Kühlung des Stranges in den Randbereichen größer als in der Mitte. Dies führt zur charakteristischen Krümmung der Hubmarken. Mit zunehmender Gießgeschwindigkeit nimmt die Krümmung der Hubmarken und somit auch die Sumpftiefe des Stranges deutlich zu. Mit steigender Sumpftiefe wird nach [BRAU94] die Randschale des Stranges dünner und die Gefahr von Rissen bzw. Bandabrissen steigt. Bei den Substratstranggießversuchen zeigen sich bei einer Gießgeschwindigkeit von 261 mm/min sehr vereinzelt leichte Mittenrisse im Band. Bei einer weiteren Erhöhung der Gießgeschwindigkeit tritt dieser Gussfehler gehäuft auf. Gießgeschwindigkeiten über 300 mm/min führen zum sofortigen Strangabriss.

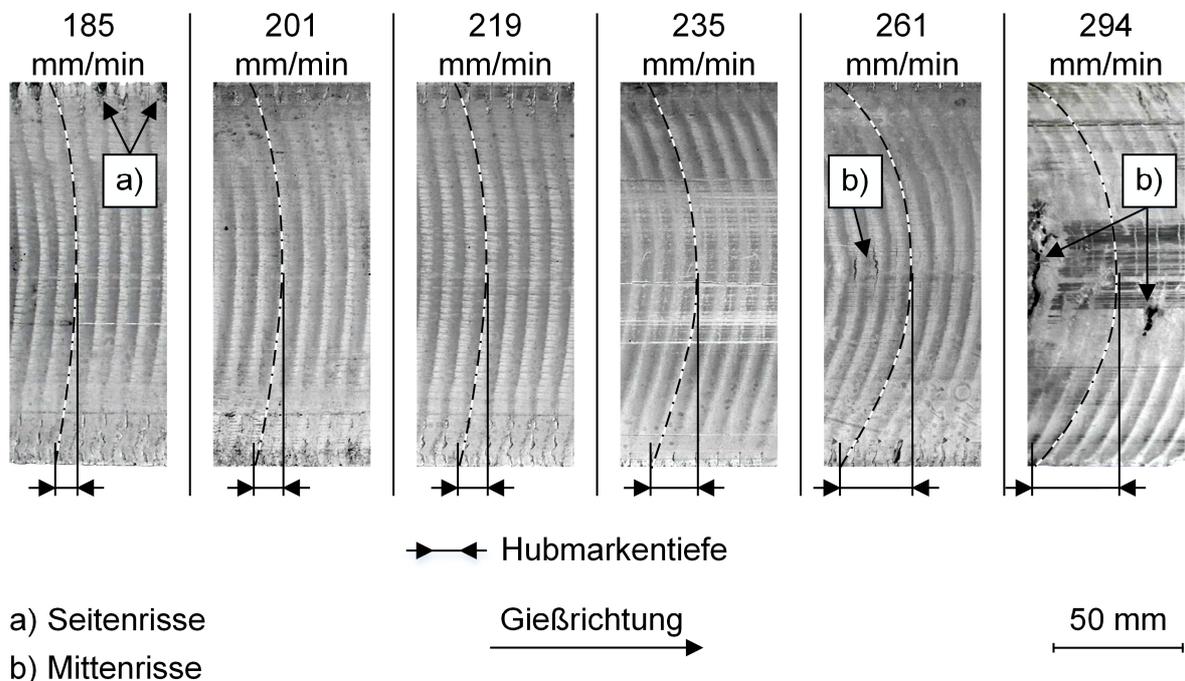


Abbildung 5-3: Ausprägung der Oberfläche der Substratbandoberseite bei unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten ($H = 7,5 \text{ mm}$; $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$)

Seitenrisse treten bei einer Gießgeschwindigkeit von 185 mm/min auf. Bei dieser niedrigen Gießgeschwindigkeit liegt die Erstarrungsfront sehr nahe am Kokilleneinlauf und die Schmelze erstarrt am Rand bereits in der keramischen Isolierplatte.

5.2.2 Einfluss der Strangbewegung (Abziehkinematik)

Reduzierung der Hubweite

Der Substratstrang kann bis zu einer minimalen Hubweite von 2,2 mm bei einer Gießgeschwindigkeit von 235 mm/min prozesssicher hergestellt werden. Im Vergleich zur Standardabziehkinematik verringert sich die Wartezeit von 1,8 auf 0,5 s. Die Walzendrehgeschwindigkeit wird konstant gehalten. Bei einer weiteren Reduzierung der Hubweite und damit auch der Wartezeit wird der Stranggießprozess instabil. Die sehr kurze Wartezeit reicht nicht mehr zur Ausbildung einer tragfähigen Randschale aus und der Strang reißt in Folge dessen ab. Tendenziell nimmt die Neigung zu Prozessinstabilitäten mit der Verkürzung der Hubweite und somit der Wartezeit zu.

Reduzierung der Walzendrehgeschwindigkeit

Zur prozesssicheren Herstellung des Substratstranges kann bei einer Hubweite von 7,5 mm die Walzendrehgeschwindigkeit ausgehend von 0,48 bis auf 0,12 rad/s reduziert werden. Die Gießgeschwindigkeit wird durch die Reduzierung der Wartezeit von 1,8 auf 1,2 s konstant gehalten. Bei einer weiteren Verringerung der Walzendrehgeschwindigkeit lässt sich der Strang nicht mehr urformen. Das Auftreten von Gießstörungen nimmt mit der Verringerung der Walzendrehgeschwindigkeit deutlich zu.

Kombination von reduzierter Hubweite und reduzierter Walzendrehgeschwindigkeit

Ein stabiler Gießprozess stellt sich bei einer gleichzeitigen Verringerung der Hubweite und der Walzendrehgeschwindigkeit bis zu einer Hubweite von 3,1 mm und einer Walzendrehgeschwindigkeit von 0,12 rad/s ein. Die Gießgeschwindigkeit beträgt in diesem Fall 235 mm/min bei einer Wartezeit von 0,5 s. Eine weitere Reduzierung der Hubweite oder der Walzendrehgeschwindigkeit führt zu einem sofortigen Strangabriss.

Kontinuierlicher Strangabzug

Ein Substratstrang aus AlSn6Cu lässt sich mit dem verwendeten Urformwerkzeug nicht mit einem kontinuierlichen Strangabzug herstellen. Der Strang reißt nach einer Gießlänge von ca. 10 cm ab. Nach [BRAU94] ist auf Grund der fehlenden Wartezeit die Lage der Erstarrungsfront undefiniert. Zudem erhöht sich die Sumpftiefe bei einer gleichzeitigen Verringerung der Dicke der Randschale. Die Gefahr einer Rissentstehung wird dadurch stark erhöht und als Folge resultieren Bandabrisse.

In Abbildung 5-4 sind die Temperaturverläufe in den unteren Graphitplatten bei unterschiedlichen Abziehparametern und einer Gießgeschwindigkeit von 235 mm/min dargestellt.

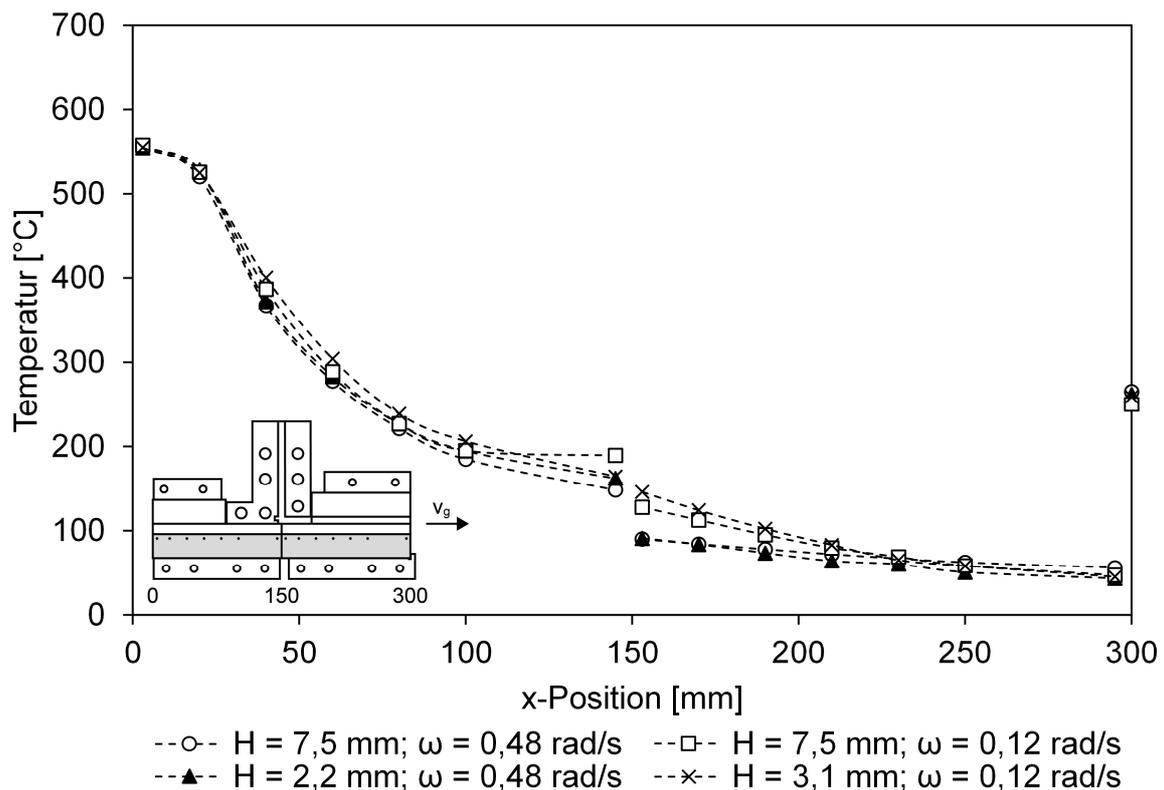


Abbildung 5-4: Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU) bei unterschiedlichen Abziehkinematiken ($v_g = 235$ mm/min) und stationären Gießbedingungen

Deutlich zu erkennen ist, dass weder die Reduzierung der Hubweite noch eine Reduzierung der Walzendrehgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Temperaturen im Urformwerkzeug haben. Auch die Kombination aus reduziertem Hub und reduzierter Walzendrehgeschwindigkeit führt zu keiner Veränderung des Temperaturhaushaltes in der Kokille im Vergleich zu den Standardabziehparametern ($H = 7,5 \text{ mm}$; $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$). Die Bandaustrittstemperaturen auf der Oberseite des Stranges liegen bei den verwendeten Abziehkinematiken ebenfalls auf einem Niveau. Das Temperaturniveau im Strang wird daher im untersuchten Parameterbereich nur durch eine Erhöhung der Gießgeschwindigkeit (siehe Kapitel 5.2.1) beeinflusst.

Abbildung 5-5 zeigt die Oberseite der Substratbänder bei den unterschiedlichen Abziehkinematiken und einer Gießgeschwindigkeit von 235 mm/min . Die Krümmung der Hubmarken ist bei allen dargestellten Abziehkinematiken nahezu identisch. Dies lässt ebenso wie die Temperaturaufzeichnungen auf identische Erstarrungsbedingungen schließen. Die Veränderung der Hubweite ist am Abstand der Hubmarken zueinander zu erkennen.

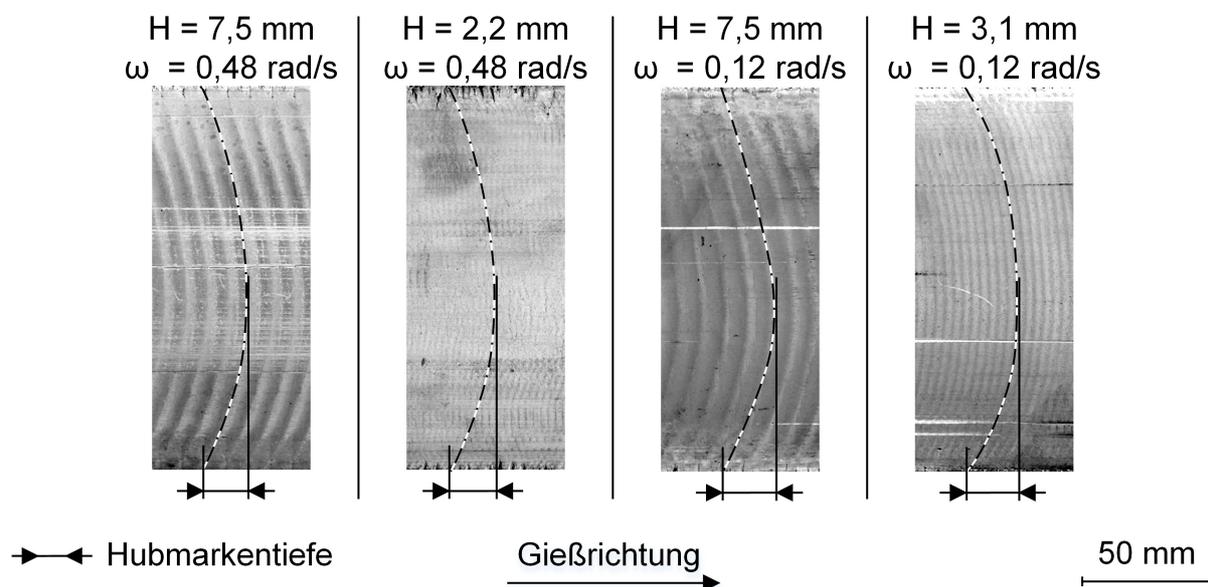


Abbildung 5-5: Ausprägung der Oberfläche der Substratbandoberseite bei unterschiedlichen Abziehkinematiken ($v_g = 235 \text{ mm/min}$)

5.2.3 Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Substratstranggießversuche wurden zur Ermittlung des Prozessfensters für einen möglichst robusten Gießprozess durchgeführt. Zum einen sollten die erreichbaren Gießgeschwindigkeiten ermittelt werden. Zum anderen sollten die Möglichkeiten der Veränderung der Abziehkinematik untersucht werden.

Die Gießversuche zeigen, dass sich der Substratstrang in einem Geschwindigkeitsintervall von 185 bis 294 mm/min prozesssicher gießen lässt. Die Bandaustrittstemperatur und somit auch die Temperatur des Substratstranges beim Eintritt in die Verbundgießzone nehmen mit steigender Gießgeschwindigkeit zu. Für eine gute Verbundbildung scheint eine möglichst hohe Gießgeschwindigkeit daher von Vorteil zu sein. Mit steigender Gießgeschwindigkeit nimmt jedoch die Prozessrobustheit ab.

Die Hubweite und somit auch die Wartezeit kann im Vergleich zur Standardkinematik um den Faktor 3,4 reduziert werden. Zudem ist eine Verringerung der Walzendrehgeschwindigkeit um den Faktor 4 möglich. Beide Veränderungen führen jedoch zu einer deutlichen Verringerung der Prozessrobustheit. Die thermischen Verhältnisse im Gießwerkzeug und im Gussprodukt werden durch die Veränderung der Abziehkinematik nicht signifikant beeinflusst.

Ein stabiler Gießprozess kann mit einem kontinuierlichen Strangabzug nicht erreicht werden. Bereits nach einer Gießlänge von nur wenigen Zentimetern entstehen Instabilitäten im Erstarrungsvorgang, die zu einem Strangabriss führen.

6 Analytische Berechnung des Verbundgießprozesses

Zur Auswahl erfolgversprechender Anlagen- und Gießparameter für den kontinuierlichen Verbundgießprozess soll das Prozessfenster, in dem die nötigen thermischen Verhältnisse für eine stoffschlüssige Verbundbildung in der Verbundzone vorliegen, mit Hilfe von analytischen Berechnungen abgeschätzt werden.

In [WIMM10] und [NERL10] werden Untersuchungen zum diskontinuierlichen Schichtverbundgießen von Aluminiumwerkstoffen vorgestellt. In einer Sandform wird zunächst der Substratwerkstoff in die Gießkavität gefüllt. Nachdem dieser erstarrt ist, wird der Aufgusswerkstoff in den Formhohlraum zugeführt. Durch das Aufgießen der zweiten Schmelze wird das Substrat wieder erwärmt. Bei der Werkstoffkombination AlSn6Cu (Substratwerkstoff) mit Al99,5 (Aufgusswerkstoff) bedarf es zur Ausbildung einer stoffschlüssigen metallischen Verbindung einer Wiedererwärmung der Oberfläche des Substrates auf eine Temperatur von ca. 600 °C. Bei geringeren Temperaturen entsteht keine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Werkstoffen. Sind die Temperaturen höher, so entstehen unerwünschte Vermischungen der beiden Werkstoffe.

Die analytische Betrachtung des Verbundgießprozesses erfolgt unter folgenden Annahmen:

- Der Aufgusswerkstoff wird zum Gießwerkzeug als isoliert betrachtet.
- Der Substratwerkstoff wird zum Gießwerkzeug als isoliert betrachtet.
- Die gesamte vom Aufgusswerkstoff zur Verfügung gestellte Wärmemenge fließt vollständig in das Substratband und erwärmt dieses homogen.

Zunächst wird der Wärmestrom vom Aufgusswerkstoff zum Substratband berechnet, um die Erwärmung des Substratbandes im kontinuierlichen Gießprozess durch das Aufgießen abzuschätzen. Der Aufgussstrang verlässt das in Abbildung 6-1 dargestellte System mit einer Temperatur von 660 °C. Die Systemgrenze wird hier gesetzt, da beim Unterschreiten dieser Temperatur der Verbundpartner Al99,5 im festen Zustand vorliegt und damit die Bedingungen für eine stoffschlüssige Verbundbildung nach Kapitel 2.2.3 nicht mehr gegeben sind.

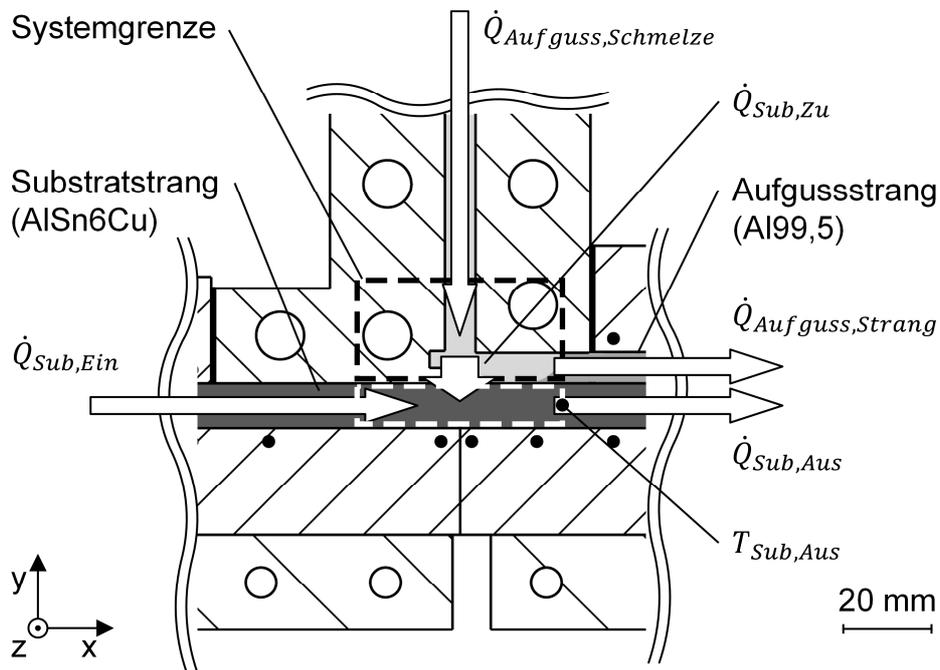


Abbildung 6-1: Schema der zu- und abfließenden Wärmeströme zur Abschätzung des Temperaturhaushaltes im Substratstrang

Der dem Substratband zugeführte Wärmestrom $\dot{Q}_{Sub,Zu}$ kann mit Formel 6.1 berechnet werden.

$$\dot{Q}_{Sub,Zu} = \dot{Q}_{Aufguss,Schmelze} - \dot{Q}_{Aufguss,Strang} + a_2 \cdot d_2 \cdot v_g \cdot \rho_{Aufguss} \cdot h_{Aufguss} \quad (6.1)$$

$\dot{Q}_{Sub,Zu}$	Wärmestrom in Substratband [W]
$\dot{Q}_{Aufguss,Schmelze}$	von Aufgusserschmelze zugeführte Wärmemenge je Zeiteinheit [W]
$\dot{Q}_{Aufguss,Strang}$	von Aufgussstrang abgeführte Wärmemenge je Zeiteinheit [W]
a_2	Breite des Aufgussstranges [m]
d_2	Dicke des Aufgussstranges [m]
v_g	mittlere Gießgeschwindigkeit [m/s]
$\rho_{Aufguss}$	Dichte des Aufgusswerkstoffes [kg/m ³]
$h_{Aufguss}$	spezifische Umwandlungsenthalpie des Aufgusswerkstoffes [J/kg]

Die von der Aufgusserschmelze zugeführte Wärmemenge je Zeiteinheit berechnet sich aus Formel 6.2.

$$\dot{Q}_{\text{Aufguss,Schmelze}} = a_2 \cdot d_2 \cdot v_g \cdot \rho_{\text{Aufguss}} \cdot c_{pL,\text{Aufguss}} \cdot (T_{\text{Aufguss}} - T_{\text{Aufguss,Erstar}}) \quad (6.2)$$

$\dot{Q}_{\text{Aufguss,Schmelze}}$	von Aufgusserschmelze zugeführte Wärmemenge je Zeiteinheit [W]
a_2	Breite des Aufgussstranges [m]
d_2	Dicke des Aufgussstranges [m]
v_g	mittlere Gießgeschwindigkeit [m/s]
ρ_{Aufguss}	Dichte des Aufgusswerkstoffes [kg/m ³]
$c_{pL,\text{Aufguss}}$	spezifische Wärmekapazität des Aufgusswerkstoffes in flüssiger Phase [J/(kgK)]
T_{Aufguss}	Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes [K]
$T_{\text{Aufguss,Erstar}}$	Erstarrungstemperatur des Aufgusswerkstoffes [K]

Die durch den Aufgussstrang abgeführte Wärmemenge je Zeiteinheit ergibt sich aus Formel 6.3.

$$\dot{Q}_{\text{Aufguss,Strang}} = a_2 \cdot d_2 \cdot v_g \cdot \rho_{\text{Aufguss}} \cdot c_{pS,\text{Aufguss}} \cdot T_{\text{Aufguss,Aus}} \quad (6.3)$$

$\dot{Q}_{\text{Aufguss,Strang}}$	von Aufgussstrang abgeführte Wärmemenge je Zeiteinheit [W]
a_2	Breite des Aufgussstranges [m]
d_2	Dicke des Aufgussstranges [m]
v_g	mittlere Gießgeschwindigkeit [m/s]
ρ_{Aufguss}	Dichte des Aufgusswerkstoffes [kg/m ³]
$c_{pS,\text{Aufguss}}$	spezifische Wärmekapazität des Aufgusswerkstoffes in fester Phase [J/(kgK)]
$T_{\text{Aufguss,Aus}}$	Austrittstemperatur des Aufgusswerkstoffes [K]

Der Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{Sub,Zu}}$ wird vollständig vom Substratband aufgenommen. Die zugeführte Energie führt zu einer Erwärmung des Substratbandes. Da die Erwärmung des Substratbandes im Erstarrungsintervall des Werkstoffes AlSn6Cu liegt, wird ein Teil der Wärme zur Phasenumwandlung verwendet. Bei der analytischen Betrachtung wird

angenommen, dass ein proportionaler Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Menge an latenter Wärme und dem Anteil an erstarrter Phase f_s besteht [BOEH87, WEIS86]. Für die Berechnungen wird der in Abbildung 11-1 dargestellte temperaturabhängige Verlauf der aufgenommenen spezifischen Umwandlungsenthalpie während des Aufschmelzens der Legierung AlSn6Cu verwendet. Die Berechnung der Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{Sub,Aus}$ erfolgt unter Verwendung von Formel 6.4.

$$T_{Sub,Aus} = \frac{\frac{\dot{Q}_{Sub,Zu}}{a_1 \cdot d_1 \cdot v_g \cdot \rho_{Sub}} - h_{Sub}(T_{Sub,Aus})}{c_{pS,Sub}} + T_{Sub,Ein} \quad (6.4)$$

$\dot{Q}_{Sub,Zu}$	Wärmestrom in Substratband [W]
a_1	Breite des Substratstranges [m]
d_1	Dicke des Substratstranges [m]
v_g	mittlere Gießgeschwindigkeit [m/s]
ρ_{Sub}	Dichte des Substratwerkstoffes [kg/m ³]
$c_{pS,Sub}$	spezifische Wärmekapazität des Substratwerkstoffes in fester Phase [J/(kgK)]
$T_{Sub,Aus}$	Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes [K]
$T_{Sub,Ein}$	Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes [K]
$h_{Sub}(T_{Sub,Aus})$	temperaturabhängige spezifische Umwandlungsenthalpie des Substratwerkstoffes [J/kg]

Mit Hilfe von Variationsrechnungen wird das Prozessfenster für eine stoffschlüssige Verbundbildung abgeschätzt. Zielgröße ist die Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{Sub,Aus}$ beim Verlassen des Systems. Diese sollte, wie oben beschrieben, in einem Bereich von ca. 600 °C liegen. Variiert werden hierbei folgende Größen:

- Dicke des Aufgussstranges d_2
- Gießtemperatur der Aufgusschmelze $T_{Aufguss}$
- Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{Sub,Ein}$

Durch Variation der Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{Sub,Ein}$ kann der Einfluss der Gießgeschwindigkeit abgebildet werden, da die Gießgeschwindigkeit mit der

Höhe der Bandaustrittstemperaturen korreliert (siehe Kapitel 5.2.1). Die Dicke des Substratstranges d_1 beträgt bei allen Berechnungen 12 mm. In Abbildung 6-2 ist der Einfluss der Dicke des Aufgussstranges d_2 bei unterschiedlichen Eintrittstemperaturen des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Ein}}$ auf die Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Aus}}$ dargestellt. Die Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss} beträgt $800\text{ }^\circ\text{C}$.

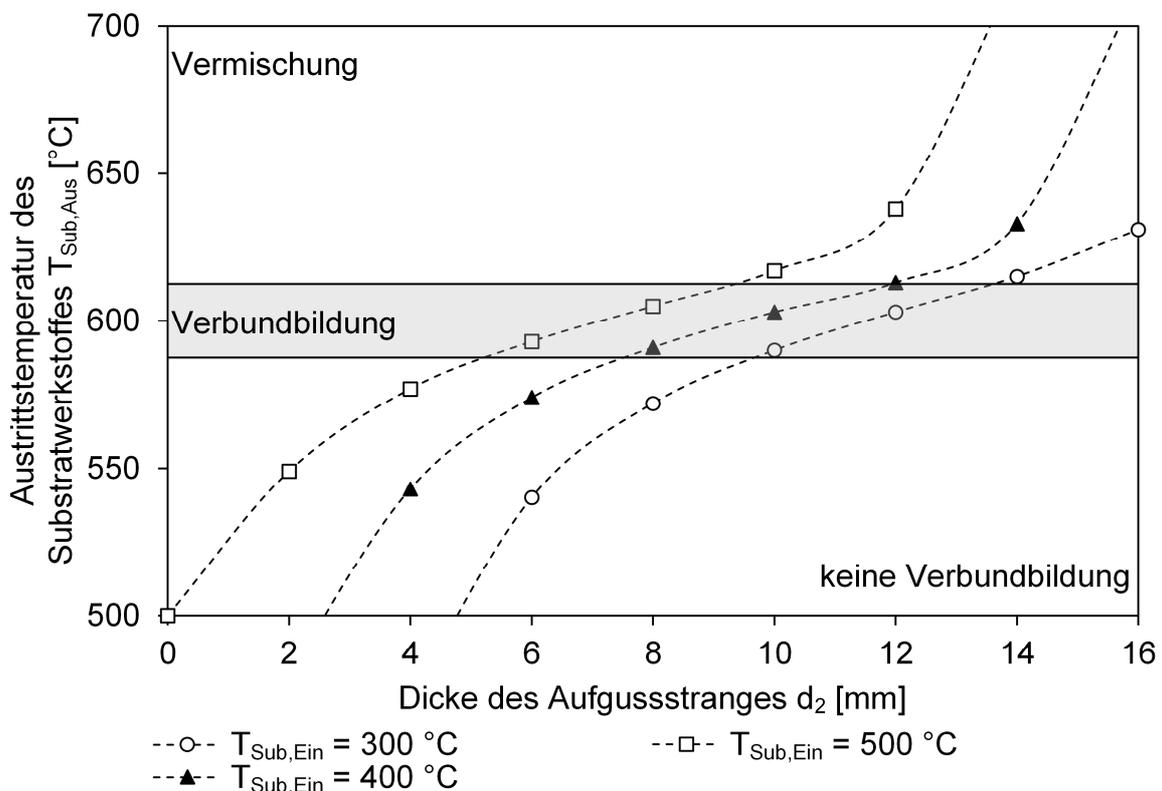


Abbildung 6-2: Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Aus}}$ in Abhängigkeit der Dicke des Aufgussstranges d_2 und der Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Ein}}$ bei einer Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss} von $800\text{ }^\circ\text{C}$

Der charakteristische Verlauf aller drei dargestellten Kurven ist geprägt durch das Aufschmelz- und Erstarrungsverhalten des Substratwerkstoffes AlSn6Cu. Bei niedrigen Temperaturen führt die Erhöhung der Aufgießdicke zu einem sehr starken Anstieg der Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes. Ab einer Temperatur von $550\text{ }^\circ\text{C}$ flachen

die Kurvenverläufe deutlich ab. Ab dieser Temperatur fließt ein Großteil des vom Aufgusswerkstoff zuströmenden Wärmestromes in die Phasenumwandlung des Substratwerkstoffes vom Festen zum Flüssigen (siehe Abbildung 11-2). Die Phasenumwandlung hat daher einen stark dämpfenden Einfluss auf eine weitere Erhöhung der Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes. Der verbleibende Restanteil des Wärmestromes führt zu einer moderaten Anhebung der Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes mit zunehmender Aufgießdicke. Nach dem Abschluss der Phasenumwandlung bei einer Temperatur von ca. 630 °C steigt die Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes wieder mit zunehmender Aufgießdicke sehr stark an.

Bei den Substratstranggießversuchen wurde eine Oberflächentemperatur des Substratwerkstoffes unter dem Aufgießschlitz bei einer Gießgeschwindigkeit von 235 mm/min von ca. 400 °C gemessen (siehe Kapitel 5.2.1). Das für die stoffschlüssige Verbundbildung nötige Temperaturniveau von ca. 600 °C wird den Berechnungen zu Folge bei Aufgießdicken von 8 bis 12 mm bei einer Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes von 400 °C erreicht. Bei Aufgießdicken über 12 mm ist mit dem Durchschmelzen des Substratwerkstoffes in der Verbundgießzone und somit einer Vermischung der beiden Gusswerkstoffe zu rechnen. Keine stoffschlüssige Verbundbildung ist bei Aufgießdicken unter 8 mm und einer Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes kleiner gleich 400 °C zu erwarten. Im Vergleich zu einer Veränderung der Aufgießdicke spielt die Veränderung der Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes eine untergeordnete Rolle auf die Ausprägung der Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes. Eine Erhöhung der Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes ist im realen Prozess vor allem durch eine Erhöhung der Gießgeschwindigkeit möglich. Diese lässt sich jedoch auf Grund der Heißrissempfindlichkeit der AlSn6Cu-Legierung nur in einem relativ kleinen Bereich variieren. Die Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes in die Verbundgießzone kann daher nur in einem kleinen Bereich verändert werden.

Der Einfluss der Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes bei unterschiedlichen Aufgießdicken auf die thermischen Verhältnisse beim Verbundgießen ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Die Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes ist konstant mit 400 °C an-

genommen. Im betrachteten Temperaturintervall der Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes von 700 bis 900 °C steigt die Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes nahezu linear mit der Erhöhung der Gießtemperatur, solange die Austrittstemperatur unter 630 °C liegt und somit die Phasenumwandlung im Substratstrang noch nicht vollständig abgeschlossen ist.

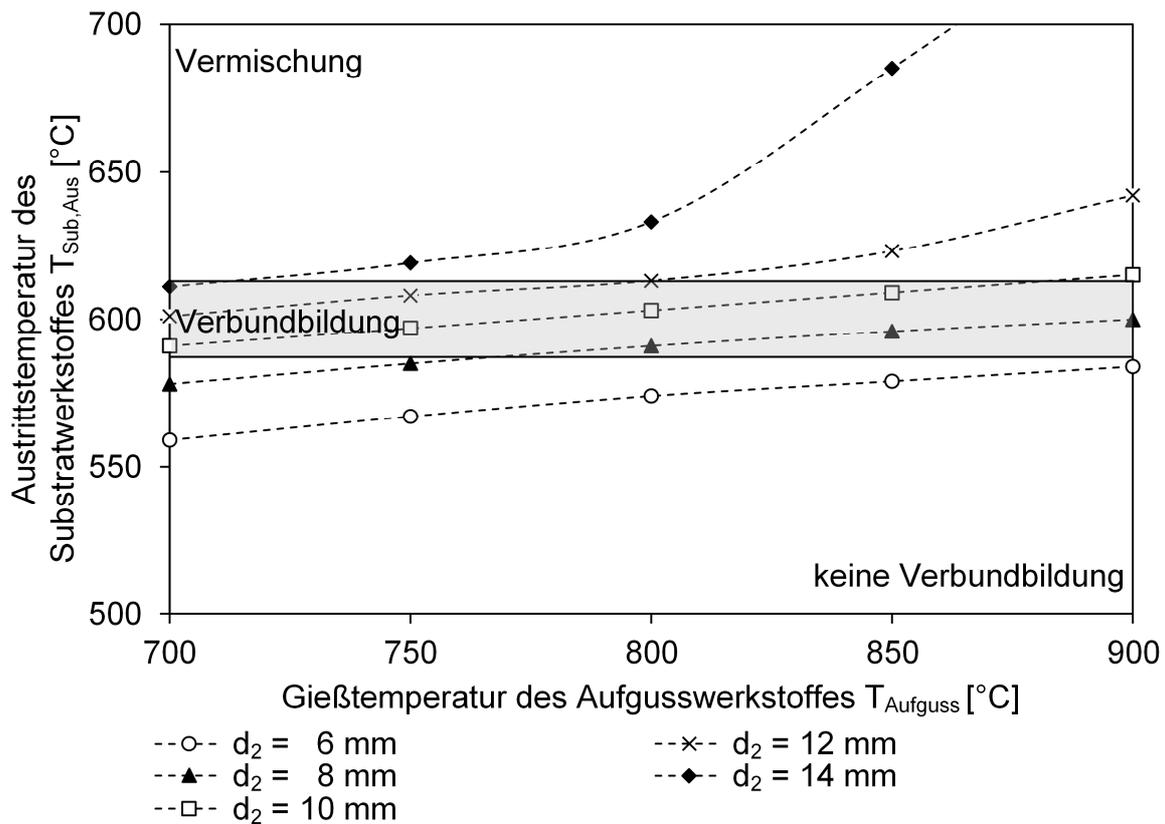


Abbildung 6-3: Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Aus}}$ in Abhängigkeit der Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss} und der Dicke des Aufgussstranges d_2 bei einer Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Ein}}$ von 400 °C

Durch eine Erhöhung der Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes um 100 °C steigt das Temperaturniveau in der Verbundgießzone um ca. 12 °C an. Durch die Wahl einer sehr hohen Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes von 900 °C wird bei einer Aufgießdicke von 6 mm eine für eine stoffschlüssige Verbundbildung hinreichende Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes erreicht. Bei einer zu großen Überhitzung der

Aufgusschmelze steigt jedoch die Gefahr des Auftretens von Gussfehlern, wie Wasserstoffporosität, im Aufgussstrang erheblich. Gießtemperaturen über 800 °C sind daher nach Möglichkeit zu vermeiden. Bei einer Aufgießdicke von 12 mm und einer Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes von 900 °C besteht die Gefahr des vollkommenen Durchschmelzens des Substratwerkstoffes und somit der Vermischung der beiden Verbundpartner. Unerwünschte Vermischungen der Verbundpartner sind bei einer Aufgießdicke über 12 mm auch bei niedrigen Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes zu erwarten.

Zusammenfassend können aus den analytischen Berechnungen zum Temperaturhaushalt in der Verbundgießzone folgende Kernaussagen abgeleitet werden:

- Die Dicke des Aufgussstranges d_2 hat einen maßgeblichen Einfluss auf die sich einstellenden Temperaturen in der Verbundgießzone. Die thermischen Voraussetzungen für eine stoffschlüssige Verbundbildung können in einem Intervall von 6 bis 12 mm erreicht werden.
- Mit der Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub, Ein}}$ und der Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss} lässt sich der Temperaturhaushalt in der Verbundzone nur moderat beeinflussen, da beide Größen im realen Prozess nur in einem relativ schmalen Bereich variiert werden können.
- Bei kleinen Aufgießdicken können die Voraussetzungen für eine stoffschlüssige Verbundbildung durch eine Erhöhung der Gießgeschwindigkeit und eine starke Überhitzung des Aufgusswerkstoffes positiv beeinflusst werden.
- Bei großen Aufgießdicken kann die Gefahr des Durchschmelzens des Substratstranges durch eine Reduzierung der Gießgeschwindigkeit und die Wahl einer niedrigen Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes verringert werden.

7 Horizontales Stranggießen von Aluminium-Verbundbändern

Ziel der Versuche ist die Definition des Prozessfensters für das kontinuierliche Verbundgießen der Werkstoffe AlSn6Cu und Al99,5 mittels der horizontalen Stranggießtechnologie. In mehreren Versuchsreihen wurden die Anlagen- und Gießparameter systematisch variiert. Im Anschluss erfolgte eine Bewertung des Einflusses der Anlagen- und Gießparameter auf den thermischen Haushalt im Verbundgießwerkzeug, der sich einstellenden Ausprägung der Verbundzone, der Bindefestigkeit des Verbundes und die Prozessrobustheit.

7.1 Versuchsdurchführung und -auswertung

7.1.1 Gießen des Verbundbandes

Grundvoraussetzung für das Gießen des Verbundstranges ist ein robuster und unter stationären Verhältnissen ablaufender Substratbandgießprozess. Parallel mit dem Aufschmelzen der Substratlegierung im induktionsbeheizten Schuhtiegelofen der Stranggießanlage erfolgt das Erschmelzen des Aufgusswerkstoffes in einem widerstandsbeheizten Tiegelofen. Das Aufgießmodul und der Ofenraum der Verbundgießeinheit werden auf die Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes erwärmt. Zunächst erfolgt das Anfahren des Substratstranges gemäß Kapitel 5.1.1. Nachdem sich im Urformwerkzeug ein stationäres Temperaturfeld ausgebildet hat, wird die abgekrätzte Aufgusschmelze in den Tiegel der Verbundgießeinheit eingegossen. Zeitgleich wird das bis dahin offene erste Walzenpaar der Zieheinrichtung geschlossen und somit der Kaltstrang für den Aufgussstrang mit der Abziehkinematik des Substratstranges abgezogen. Der Aufgusswerkstoff fließt über den vertikalen Schlitz im Aufgießmodul auf das Substratband und verklammert sich in, am Endstück des Aufgussbandkaltstranges eingebrachten, Hinterschneidungen. Die Aufgusschmelze führt dem Substratstrang und dem Urformwerkzeug einen großen Wärmestrom zu. Dadurch steigen die Temperaturen beim Start des Aufgießprozesses vor allem in der Kokillenstufe 2 deutlich an. Nach ca. 0,5 - 1 m stellen sich im Verbundgießwerkzeug wieder stationäre thermische Verhältnisse ein. Abhängig von der Aufgießdicke kann ein Verbundstrang

von 1,5 - 3,0 m erzeugt werden. Somit können pro Versuch zwei bis drei unterschiedliche Versuchskonfigurationen erprobt werden.

7.1.2 Gieß- und Anlagenparameter

Mit den Verbundgießversuchen wurde das Prozessfenster für die Herstellung von AlSn6Cu-Al99,5-Verbundbändern mit der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Verbundgießeinheit erarbeitet. Ziel der Versuche war zum einen die Herstellung von Verbundbändern mit einer fehlerfreien Bindezone in einem robusten Prozess. Zum anderen war angestrebt, dass das Schichtdickenverhältnis d_1/d_2 bei guter Verbundqualität möglichst groß ist, da zum Beispiel bei der umformenden Weiterverarbeitung der Verbundstränge zu Halbzeug für die Herstellung von Gleitlagern ein Schichtdickenverhältnis von 5 zu 1 benötigt wird. In mehreren Versuchsreihen wurden die Gieß- und Anlagenparameter systematisch variiert. Der Einfluss der einzelnen Parameter auf den Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug, die Ausprägung der Verbundzone und die erreichbare Binefestigkeit wird ermittelt. Zudem wird die Auswirkung der Parametervariation auf die Prozessrobustheit qualitativ bewertet. In Abbildung 7-1 ist ein Schnitt durch das Verbundgießwerkzeug mit den veränderbaren Gieß- und Anlagenparametern dargestellt.

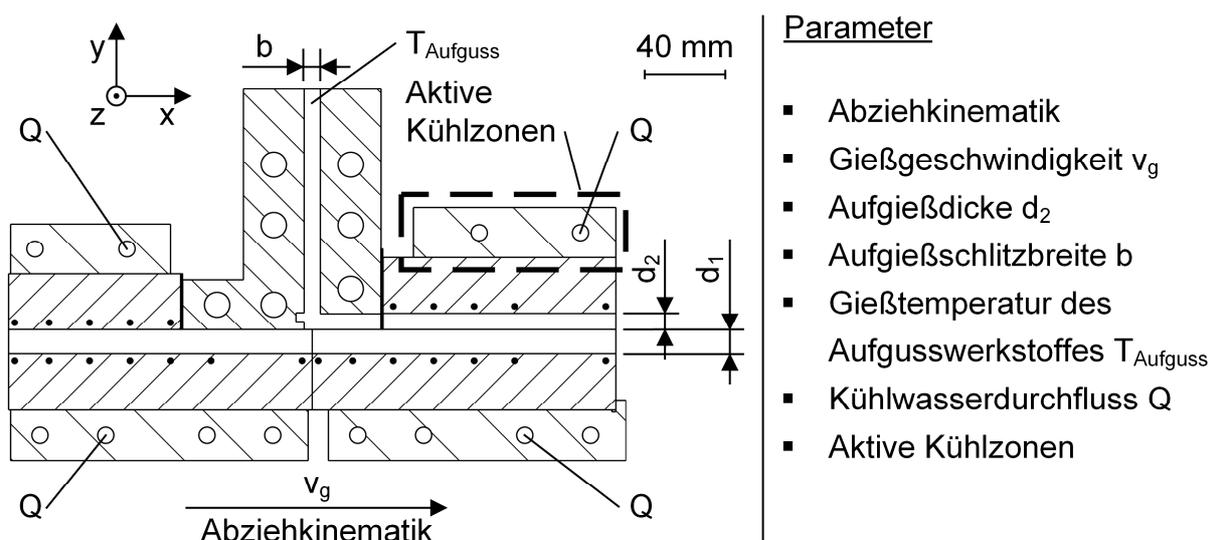


Abbildung 7-1: Variationsparameter beim kontinuierlichen Verbundgießen

Die Variationsparameter lassen sich in drei Kategorien gliedern:

- Strangbewegung
- geometrische Merkmale
- Wärmezufuhr- und Wärmeabfuhrbedingungen

In die Kategorie der Strangbewegung fallen die Abziehkinematik und die Gießgeschwindigkeit. Beide Parameter wurden innerhalb des in Kapitel 5 erarbeiteten Prozessfensters für das Gießen des Substratbandes variiert. Auf Grund des modularen Aufbaus des Verbundgießwerkzeuges können die Aufgießdicke und die Aufgießschlitzbreite variiert werden. Bei den Experimenten wurde die Aufgießdicke den Empfehlungen aus Kapitel 6 folgend in einem Bereich von 6 bis 12 mm verändert. Bei einer konstanten Aufgießdicke wurde zudem der Einfluss der Aufgießschlitzbreite auf den Verbundgießprozess bestimmt. Die Aufgießschlitzbreite wurde schrittweise von 4 bis auf 16 mm erhöht. Die Wärmezufuhr in die Verbundgießzone wird über die Temperierung der Aufgusschmelze gesteuert. Die Temperatur des Aufgusswerkstoffes wurde in einer Versuchsreihe in einem Bereich von 750 bis 900 °C verändert. Hinsichtlich der Wärmeabfuhrbedingungen aus dem Urformwerkzeug wurde der Einfluss des Kühlwasserdurchflusses auf den Verbundgießprozess untersucht. Hierzu wurde die Standardkühlwassermenge von 32 l/min schrittweise auf 8 l/min reduziert. Zudem wurde in einer Versuchsreihe untersucht, ob sich ein robuster Verbundgießprozess beim Wegfall der oberen Kühlung der Kokillenstufe 2 realisieren lässt. Die Substratstrangdicke d_1 wurde bei allen Versuchen auf 12 mm eingestellt. Die Gießtemperatur der AlSn6Cu-Schmelze betrug 750 ± 15 °C. Tabelle 7-1 zeigt eine Übersicht der sieben Versuchsreihen.

Versuchsreihe	Beschreibung
<i>Abziehkinematik</i>	<i>Einstellung unterschiedlicher Abziehkinematiken durch die Veränderung der Hubweite H und der Walzendrehgeschwindigkeit ω bei einer konstanten Gießgeschwindigkeit v_g</i>
<i>Gießgeschwindigkeit v_g</i>	<i>Einstellung unterschiedlicher Gießgeschwindigkeiten v_g im Go-Stop-Betrieb durch die Veränderung der Wartezeit t_w bei einer konstanten Hubweite H</i>
<i>Aufgießdicke d_2</i>	<i>Einstellung unterschiedlicher Aufgießdicken d_2 bei einer Aufgießschlitzbreite $b = 0,5 \cdot d_2$ durch den Einsatz unterschiedlicher Aufgießmodule und Graphitseitenleisten in der Kokillenstufe 2</i>
<i>Aufgießschlitzbreite b</i>	<i>Einstellung unterschiedlicher Aufgießschlitzbreiten b bei einer konstanten Aufgießdicke d_2 durch den Einsatz unterschiedlicher Aufgießmodule</i>
<i>Gießtemperatur des Aufgusswerkstoff T_{Aufguss}</i>	<i>Einstellung unterschiedlicher Gießtemperaturen der Aufgusschmelze T_{Aufguss} im Kipptiegelofen und dementsprechende Temperierung des Warmhalteofens der Verbundgießeinheit und des Aufgießmoduls</i>
<i>Kühlwasserdurchfluss Q</i>	<i>Einstellung unterschiedlicher Wasserdurchflussmengen Q durch die Kupferkühler in den beiden Kokillen-Kühler-Paketen</i>
<i>Aktive Kühlzonen</i>	<i>Substitution der oberen Kupferkühlplatte der Kokillenstufe 2 durch ein Stahlgrobblech</i>

Tabelle 7-1: Versuchsreihen zum kontinuierlichen Verbundgießen

7.1.3 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung bei den Verbundgießversuchen erfolgte analog zu den Substratbandgießversuchen (siehe Kapitel 5.1.3).

7.1.4 Metallographische Analyse der Verbundzone

Für jede Versuchskonfiguration wurden aus dem Verbundstrang Platten der Länge 260 mm für weitergehende Untersuchungen entnommen. Innerhalb der Plattenlänge herrschten stationäre Bedingungen im Gießwerkzeug. Aus den Strangstücken wurden sowohl Längsschliffe für die qualitative Beurteilung des Mikro- und Makrogefüges mit-

tels metallographischer Untersuchungen wie auch Prüfkörper zur quantitativen Beurteilung der Bindefestigkeit (siehe Kapitel 7.1.5) gefertigt. Die Entnahmepositionen der Proben sind in Abbildung 7-2 dargestellt. Die Schliifproben wurden zunächst stufenweise mit SiC-Papier (Körnung 80 – 2400) nass geschliffen. Anschließend erfolgte die Vorpolitur mit einer Diamantsuspension (Partikelgröße 6 μm und 3 μm). Die abschließende Endpolitur wurde mit einer Oxidpolier-Suspension (OP-S, Partikelgröße 0,04 μm) durchgeführt. Nach Bedarf wurde die Gefügestruktur der Verbundproben durch zwei chemische Ätzungen kontrastiert. Die erste Tauchätzung erfolgte in einer Lösung von 100 ml destilliertem Wasser und 2 g Natriumhydroxid. Die Ätzdauer betrug ca. 60 s. Nach einer Trocknung der Schliife wurde eine zweite Tauchätzung in einer Lösung aus 100 ml destilliertem Wasser und 4 g Kaliumpermanganat sowie 1 g Natriumhydroxid, welches nach dem Lösen des Kaliumpermanganats zugegeben wurde, durchgeführt. Die Ätzdauer betrug ca. 15 s bei Raumtemperatur.

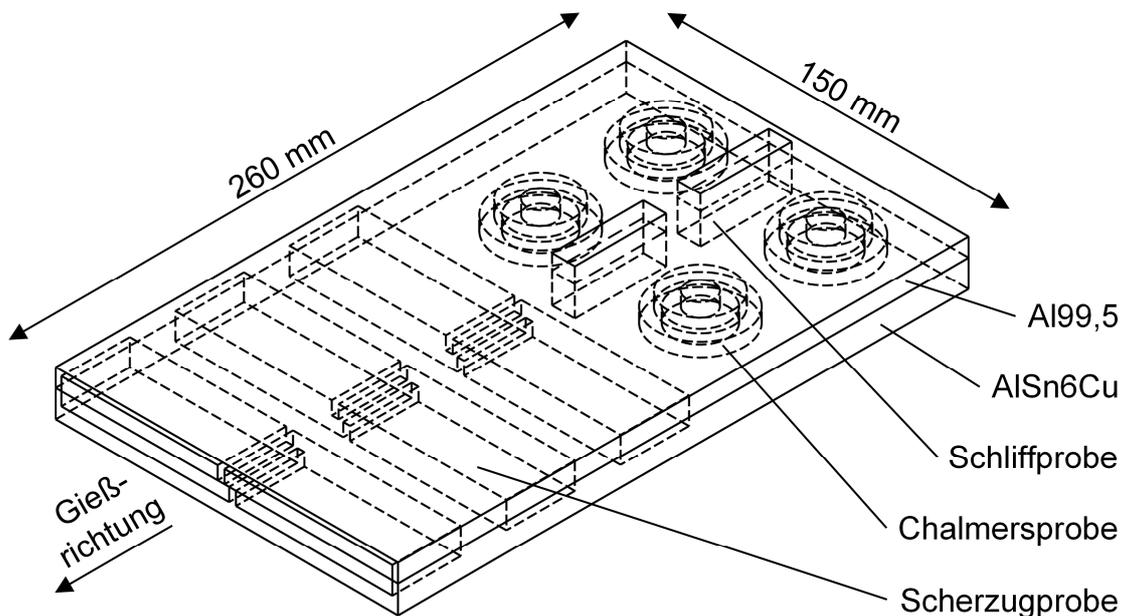


Abbildung 7-2: Entnahmepositionen der Proben für die metallographischen Untersuchungen und Bindefestigkeitsprüfungen

7.1.5 Bindefestigkeitsprüfung

Die Quantifizierung des Einflusses der eingestellten Gieß- und Anlagenparameter auf die sich einstellende Verbundqualität erfolgte mittels zweier Bindefestigkeitsprüfmethoden. Für jede Versuchskonfiguration wurde die Bindefestigkeit anhand von drei Scherzugproben und vier Chalmersproben ermittelt (siehe Abbildung 7-2).

Scherzugprüfung

In Anlehnung an [DIN14869] wurde eine Scherzugprobengeometrie für die Quantifizierung der Verbundqualität entwickelt. Pro Versuchskonfiguration wurden für die Scherzugprüfung drei Prüfkörper erstellt. Die Prüffläche der Probe liegt genau in der Bindezone zwischen dem Substratwerkstoff und dem Aufgusswerkstoff (siehe Abbildung 7-2). In Abbildung 7-3 sind die genauen Abmessungen der Scherzugprobe sowie die Einbaulage in der Prüfmaschine dargestellt.

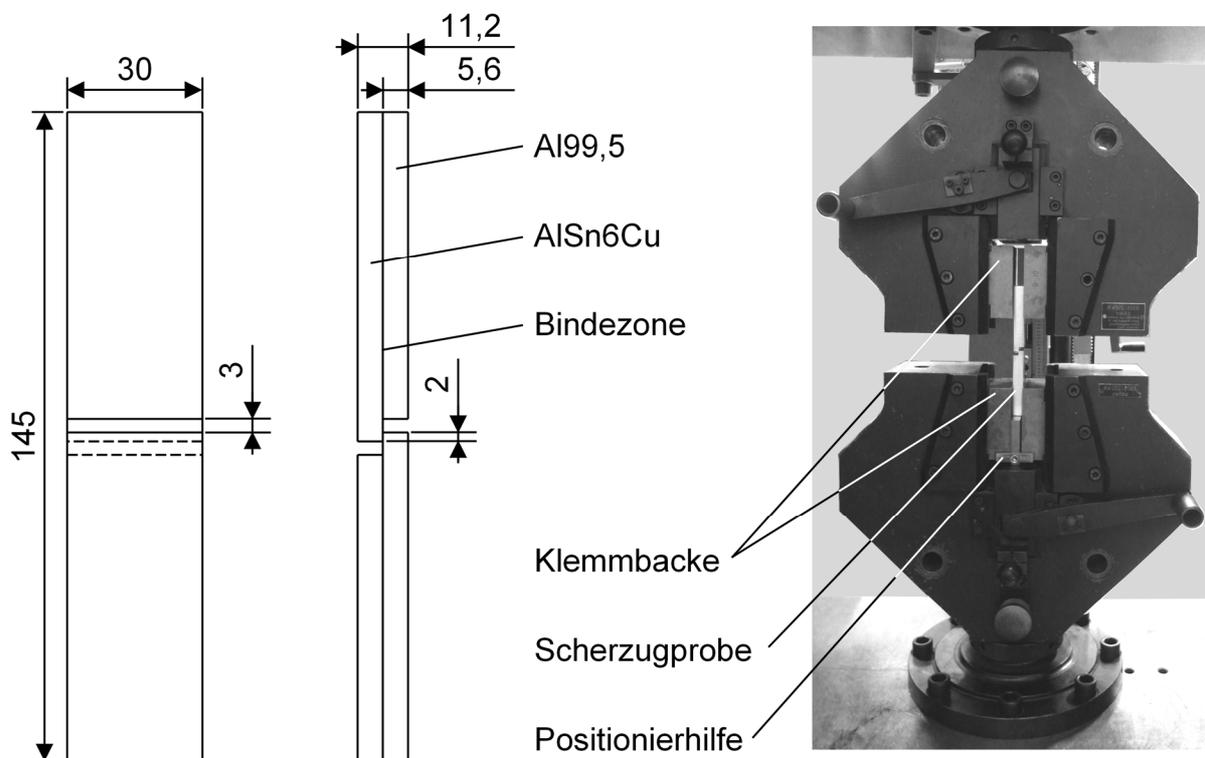


Abbildung 7-3: Scherzugprobengeometrie und Einbaulage in der Prüfmaschine

Die Scherzugversuche wurden mit der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Zug-Druck-Prüfmaschine durchgeführt. Die Proben wurden im unteren Prüfraum der Maschine unter Verwendung einer Positionierhilfe in die Klemmbanken gespannt und anschließend auf Zug belastet. Mit der Positionierhilfe wurde sichergestellt, dass sich die Probe genau in der Zugachse der Prüfmaschine befindet und dass die Spannweiten in der unteren und oberen Klemmbanke identisch waren. Die Traverse wurde bei den Untersuchungen lagegeregelt betrieben und mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min verfahren. Für die Auswertung wurde die Scherfestigkeit aller drei Proben je Versuchskonfiguration gemäß Formel 7.1 berechnet.

$$\tau = \frac{F_{max,Scher}}{l_{Scher} \cdot b_{Scher}} \quad (7.1)$$

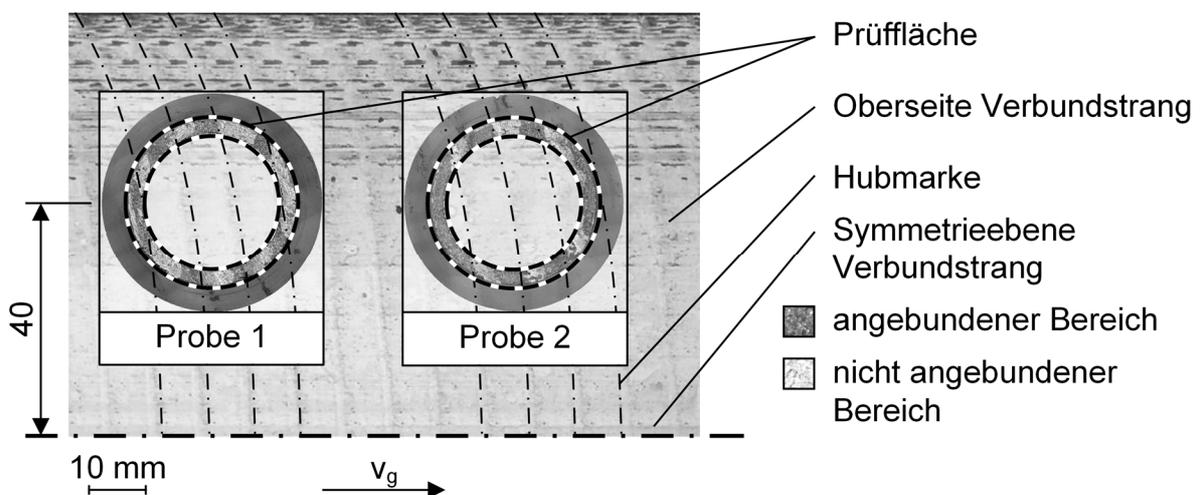
τ	<i>Scherfestigkeit [N/mm²]</i>
$F_{max,Scher}$	<i>Höchstkraft bei der Scherzugprüfung [N]</i>
l_{Scher}	<i>Länge der Prüffläche der Scherzugprobe [mm]</i>
b_{Scher}	<i>Breite der Prüffläche der Scherzugprobe [mm]</i>

Bei der Darstellung der Versuchsergebnisse wird der Mittelwert der drei Proben verwendet und das Streuband mit der minimalen und maximalen Scherfestigkeit angegeben. Zudem wird als Referenz die Scherfestigkeit des schwächeren Verbundpartners angezeigt. Diese wurde aus der mittleren Scherfestigkeit von sechs Einstoffscherzugproben aus Al99,5 ermittelt und beträgt 60 N/mm².

Chalmersprüfung

Die Bindefestigkeit der Verbundstränge wurde zusätzlich mittels Chalmersproben in Anlehnung an [DIN4386] ermittelt. Wie in Abbildung 7-2 dargestellt, wurden aus dem Probestück des Verbundstranges vier Chalmersproben gefertigt. Die Mittelpunkte der Chalmersproben lagen 40 mm von der Symmetrieebene des Verbundstranges entfernt. Abbildung 7-4 zeigt die Probengeometrie und die Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Bindefestigkeit. Die Vorrichtung wurde in den unteren Prüfraum der Zug-Druck-Prüfmaschine (siehe Kapitel 4.2.3) so eingebaut, dass die Druckkraft senkrecht zur

In [NERL14a] wird über das zyklische Auftreten von Fehlstellen beim intermittierenden Strangabzug entlang der Hubmarken des Verbundstranges berichtet. Das Auftreten der Fehlstellen steht in direktem Zusammenhang mit der eingestellten Abziehkinematik. Je nach Lage der einzelnen Chalmersproben einer Probenplatte zu den Hubmarken verändert sich das Verhältnis der gut angebundenen Fläche zur Prüffläche. Dies hat zur Folge, dass die erreichten Maximalkräfte bis zum Bruch und somit die berechneten Bindefestigkeiten trotz gleicher Gießbedingungen stark schwanken können. Die Lage der einzelnen Probe zu den Hubmarken hat einen größeren Einfluss auf die ermittelten Bindefestigkeiten als die eingestellten Anlagen- und Gießparameter. In Abbildung 7-5 sind exemplarisch die Bruchflächen am Substratwerkstoff von zwei Proben einer Prüfplatte dargestellt. Die Proben wurden in unterschiedlichen Lagen zu den Hubmarken entnommen. Die Probe 2 hat einen wesentlich höheren Anteil an gut angebundenen Bereichen (dunkelgraue Färbung der Bruchfläche) als die Probe 1.



	Einheit	Probe 1	Probe 2
Höchstkraft bei Chalmersprüfung $F_{max,Ch}$	N	2548	8579
Bindefestigkeit R_{Ch}	N/mm ²	12,74	42,90

Abbildung 7-5: Einfluss der Lage der Chalmersproben zu den Hubmarken auf Höchstkraft und ermittelte Bindefestigkeit R_{Ch}

Durch die unterschiedliche Lage der Proben zu den Hubmarken verändert sich das Verhältnis der gut angebundenen Fläche zur Prüffläche je Probe erheblich. Dies führt

zu einer markanten Abweichung der ermittelten Bindefestigkeiten der beiden Proben trotz gleicher Gießbedingungen. Für die Versuchsauswertung wurde daher von der Bildung eines Mittelwertes aus den vier Proben einer Probenplatte abgesehen, da die mögliche starke Streuung der Bindefestigkeiten der Einzelproben diesen Wert stark beeinflussen kann. Zum Vergleich einzelner Versuchskonfigurationen werden die jeweils maximal erreichten Bindefestigkeiten gegenübergestellt. Bei diesen Proben kann davon ausgegangen werden, dass diese möglichst optimal zwischen den zyklisch auftretenden Fehlstellen lagen und somit das Verhältnis der gut angebondenen Fläche zur Prüffläche groß ist. Zusätzlich wird als Streuband die minimale und maximale Bindefestigkeit je Probenplatte angegeben. Die Bindefestigkeit des schwächeren Verbundpartners wird als Referenz dargestellt. Diese wurde aus der mittleren Bindefestigkeit von sechs Einstoffchalmersproben aus Al99,5 ermittelt und beträgt 100 N/mm².

7.2 Versuchsergebnisse

7.2.1 Reproduzierbarkeit

In einer Versuchsreihe wurde zunächst die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse bei gleichen Gieß- und Anlagenparametern überprüft. Solide Aussagen über den Einfluss eines einzelnen Parameters können nur getroffen werden, wenn alle Einflussgrößen auf den Gießprozess bekannt sind und konstant gehalten werden. In Tabelle 7-2 sind die gewählten Gieß- und Anlagenparameter für diese Versuchsreihe dargestellt. Mit dieser Versuchskonfiguration lässt sich ein sehr robuster Verbundgießprozess realisieren. Lediglich zu Beginn des Verbundgießprozesses besteht die Gefahr der Rückerstarrung des Aufgusswerkstoffes in den vertikalen Schlitz des Aufgießmoduls. Auf Grund des sehr niedrigen Temperaturniveaus der Kokillenstufe 2 vor dem Start des Verbundgießprozesses wird die einströmende Aufgusschmelze stark abgekühlt (siehe Kapitel 5.2.1). Innerhalb kurzer Zeit erwärmt sich das Urformwerkzeug durch den großen Wärmeeintrag des Aufgusswerkstoffes sehr stark und es stellen sich stationäre Temperaturverhältnisse ein, so dass der Aufgusswerkstoff nicht mehr in den Aufgießschlitz rückerstarren kann.

Parameter	Einheit	Wert
Gießgeschwindigkeit v_g	mm/min	235
Hubweite H	mm	7,5
Walzendrehgeschwindigkeit ω	rad/s	0,48
Aufgießdicke d_2	mm	8
Schlitzbreitenverhältnis b/d_2	-	0,5
Temperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss}	°C	755 ± 10
Kühlwasserdurchfluss Q	l/min	32

Tabelle 7-2: Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Gieß- und Anlagenparameter

Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug

Abbildung 7-6 zeigt die charakteristischen Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten des Urformwerkzeuges von zwei, unter identischen Bedingungen gegossenen, Verbundbändern. Zusätzlich ist der Temperaturverlauf in der unteren Kokillenplatte bei einem Substratbandgießversuch dargestellt (siehe Kapitel 5.2.1). Der Verbundgießprozess hat keinen Einfluss auf den Temperaturverlauf im vorderen Teil der Kokillenstufe 1 und somit auf die Erstarrungsbedingungen des Substratstranges. Ab der Position $x = 80$ mm wird die Auswirkung der Zuführung des Aufgusswerkstoffes in der Kokillenstufe 1 sichtbar. Die örtlichen Temperaturen in der Kokillenplatte steigen ab dieser Position von 260 auf 370 °C bei der Position $x = 145$ mm an. Die Zuführung des Reinaluminiums bringt einen sehr hohen Wärmestrom in die Verbundgießzone ein. Der Wärmehaushalt in der Kokillenstufe 2 wird dadurch maßgeblich geprägt und verändert sich im Vergleich zum Gießen des Substratbandes erheblich. Unter dem vertikalen Schlitz des Aufgießmoduls werden in der Graphitplatte Temperaturen von 440 °C erreicht. Das Temperaturmaximum in der unteren Kokillenplatte beträgt 460 °C und wird bei einer Position $x = 170$ mm erreicht. An dieser Position erstarrt der Aufgusswerkstoff unter Freisetzung der latenten Wärme. Diese wird fast vollständig vom Substratstrang aufgenommen und von diesem in die untere Kokillenplatte eingeleitet. Der Verbundstrang wird über die weitere Kokillenlänge stetig abgekühlt und die Temperaturen im Urformwerkzeug fallen. Durch die Zuführung der Aufgusschmelze steigt

die Bandaustrittstemperatur beim Verbundbandgießprozess im Vergleich zum Substratbandgießprozess um ca. 115 °C an.

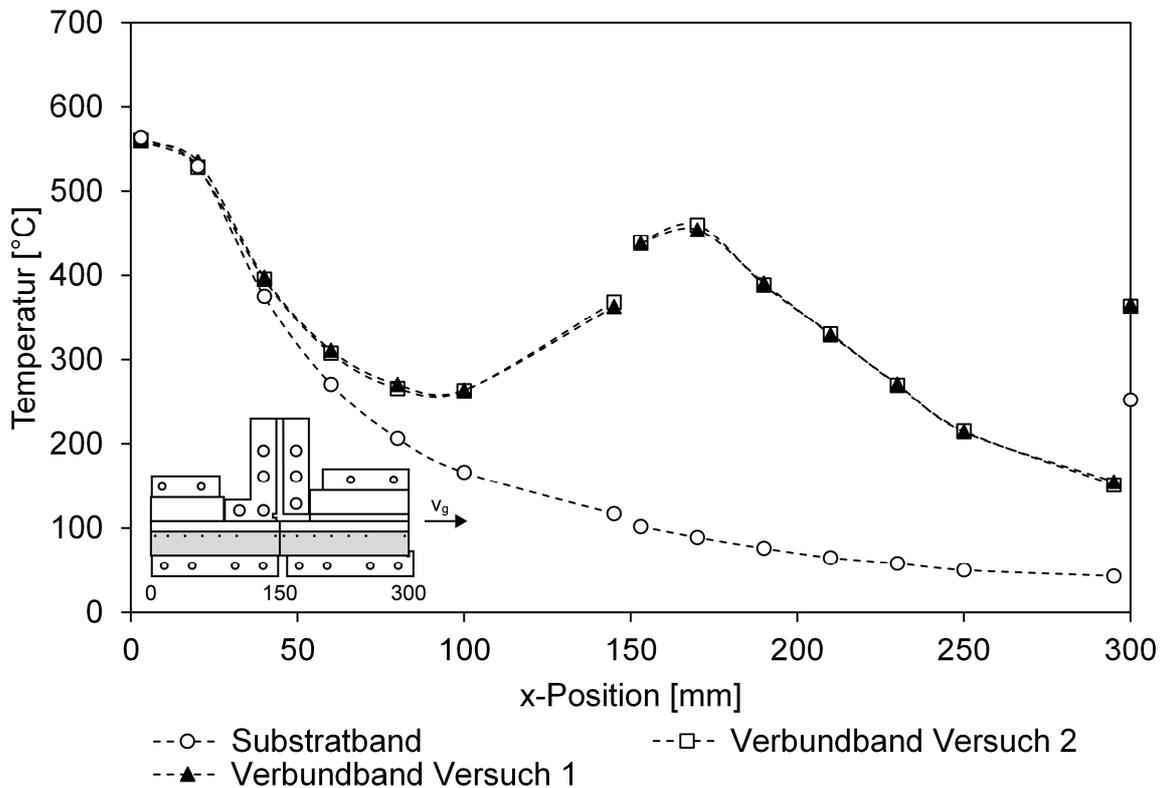


Abbildung 7-6: Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)

Die Temperaturverläufe der beiden Verbundgießversuche liegen nahezu übereinander und die gemessenen Bandaustrittstemperaturen sind auf einem Niveau. Bei gleich eingestellten Gieß- und Anlagenparametern ist die Replikation des Temperaturhaushaltes im Urformwerkzeug gegeben. An der Oberseite des Urformwerkzeuges haben sich bei beiden Versuchen annähernd gleiche Temperaturen eingestellt (siehe Abbildung 7-7). In der Kokillenstufe 1 ist kein signifikanter Einfluss des Aufgießprozesses auf den Temperaturhaushalt zu verzeichnen. Das Temperaturniveau in der Oberseite der Kokillenstufe 2 erhöht sich im Vergleich zu den Substratbanduntersuchungen um ca. 100 °C. An der Position $x = 190$ mm werden Temperaturen von 130 °C erreicht.

Dies deutet darauf hin, dass der Aufgusswerkstoff die obere Kokillenplatte nicht schmelzflüssig erreicht.

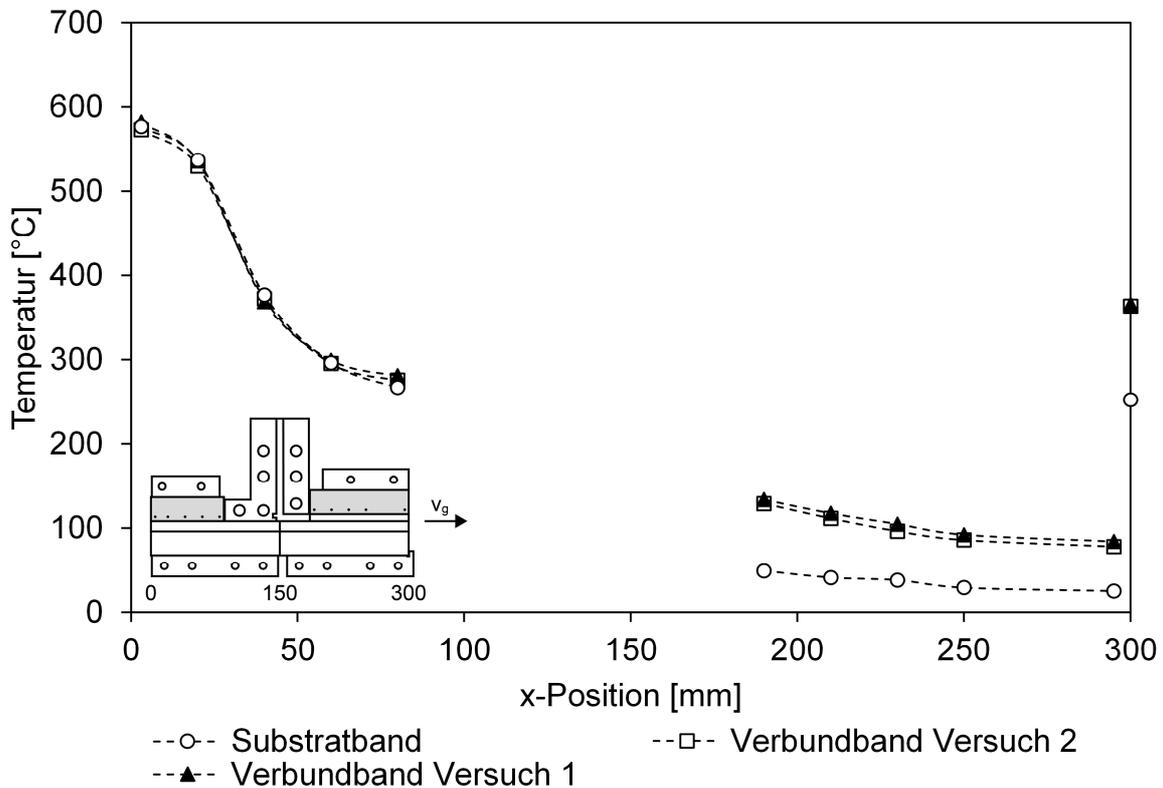


Abbildung 7-7: Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Temperaturverläufe in den oberen Kokillenplatten (KO)

Ausprägung der Verbundzone

Abbildung 7-8 zeigt exemplarisch je eine Übersichtsaufnahme und eine Aufnahme der Mikrostruktur der Verbundzone der beiden erzeugten Verbundstränge. Die Ausprägung der Verbundzone ist in beiden Schlifften nahezu identisch. Das Verbundband besteht aus zwei separaten Schichten, zwischen denen sich eine horizontale Grenzschicht befindet. Eine Durchmischung der beiden Werkstoffe ist nicht ersichtlich. Deutlich zu erkennen ist ein zyklischer Wechsel zwischen stoffschlüssig angebundenen Bereichen und Fehlstellen. Jede Fehlstelle weist eine Länge von ca. 4 mm auf. Zwischen den Fehlstellen befinden sich gut angebundenen Bereiche mit einer Länge von

im Mittel 3 mm. In diesem Bereich findet ein partielles Aufschmelzen der Substratoberfläche statt und es entsteht ein stoffschlüssiger Verbund. Da der Abstand der Ungängen zueinander der Hubweite H entspricht, ist von einem direkten Zusammenhang zwischen der Abziehkinematik und der Ausprägung der Fehlstellen auszugehen. Der Einfluss der Abziehkinematik auf die Verbundbildung wird in Kapitel 7.2.2 ausführlich erläutert.

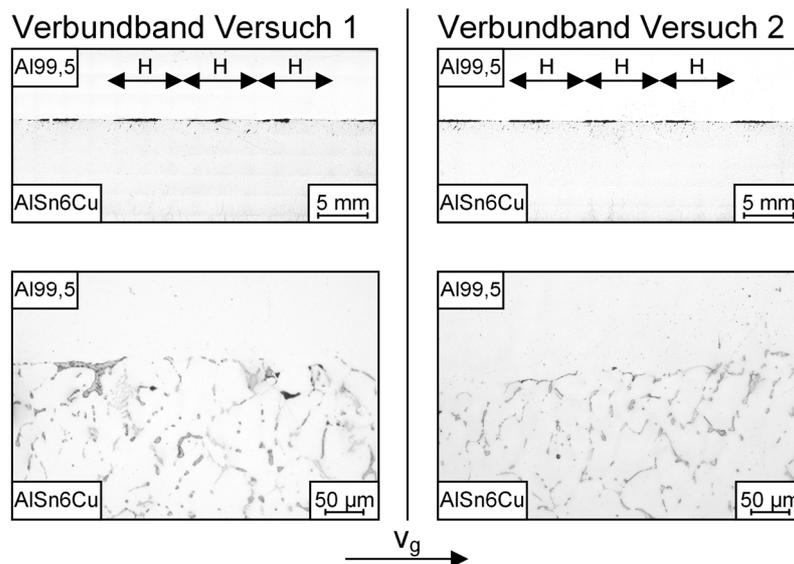


Abbildung 7-8: Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Gefügeausprägung in der Verbundzone (Übersichtsaufnahme und Mikrostruktur)

Festigkeit des Verbundes

Die ermittelte Binefestigkeit der Verbundbänder ist nahezu identisch (siehe Abbildung 7-9). Die Scherzugproben aus beiden Strängen versagen bei Maximalkräften von ca. 1,6 kN. Die Scherfestigkeit liegt im Mittel bei 27 N/mm². Mit den Chalmersproben wurden bei beiden Versuchen maximale Binefestigkeiten R_{Ch} von ca. 45 N/mm² ermittelt. Die erzielten Festigkeiten der Verbunde liegen in beiden Fällen um ca. 50% unter der Festigkeit der Einstoffproben des schwächeren Verbundpartners Al99,5. Dieses Verhältnis entspricht in etwa dem in den Schlibbildern ersichtlichen Quotienten aus der Summe der Länge der gut angebundenen Bereiche zur gesamten Schliblänge.

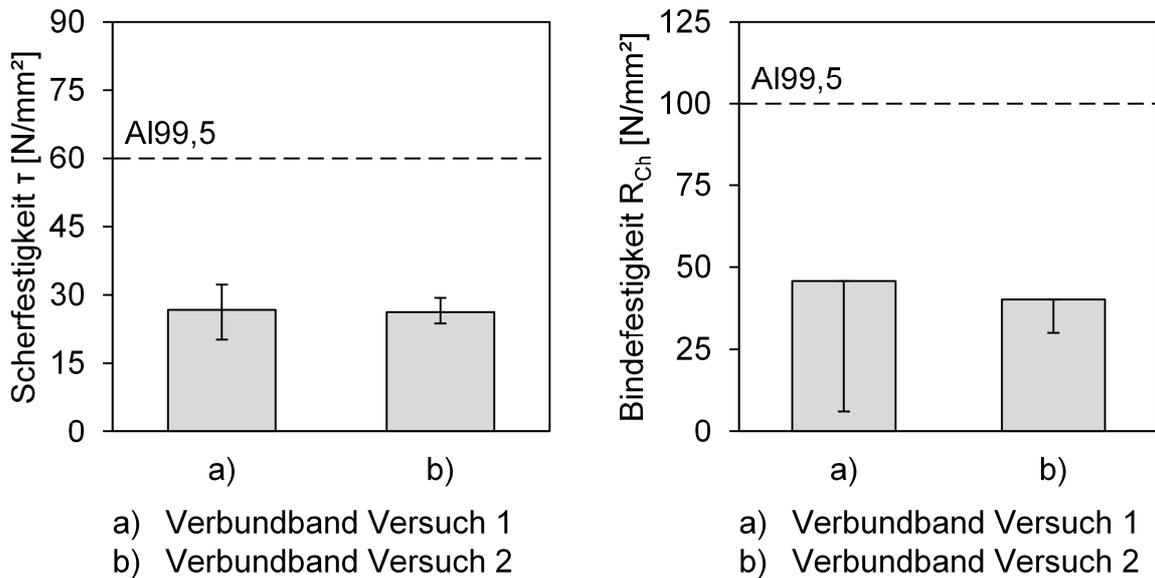


Abbildung 7-9: Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}

In Abbildung 7-10 ist die Bruchfläche einer Scherzugprobe exemplarisch je Verbundband dargestellt. In den Seitenansichten ist deutlich zu erkennen, dass der Bruch in beiden Fällen horizontal genau in der Bindezone zwischen dem Substratwerkstoff AlSn6Cu und dem Aufgusswerkstoff Al99,5 erfolgte. In den beiden Draufsichten ist anhand der Ausprägung der Bruchfläche die zyklische Abfolge zwischen gut angebondenen Bereichen und Fehlstellen zu sehen. In den gut angebondenen Bereichen ist eine deutliche plastische Verformung im Al99,5 festzustellen.

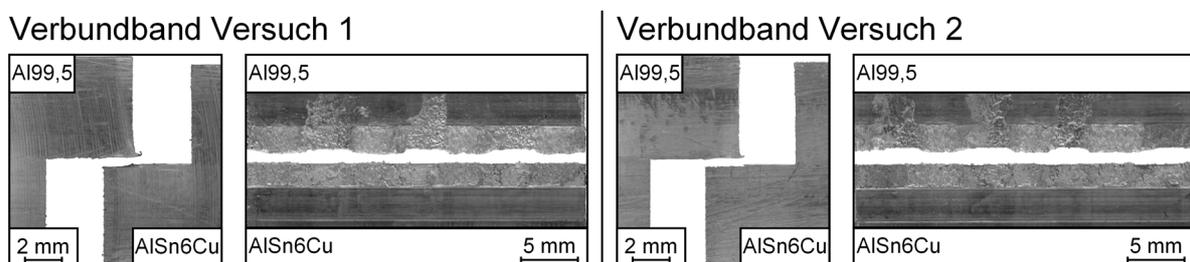


Abbildung 7-10: Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Ausprägung der Bruchfläche (Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts)) bei der Scherzugprüfung

Die dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse bei erneutem Anlagenaufbau möglich ist. Bei gleichen Gieß- und Anlagenparametern sind der Temperaturhaushalt in der Kokille, die Ausprägung der Verbundzone sowie die Bindefestigkeit des Verbundes nahezu identisch.

Neben den Gieß- und Anlagenparametern wurden in der Versuchsreihe folgende Einflussgrößen auf den Prozess identifiziert:

- Zustand der Kokille (bisherige Standzeit, Rauheit und Riefen an der Oberfläche der Gießkavität und an den Kühlflächen, Anlagerungen an der Oberfläche der Gießkavität)
- Zustand der Kühlplatten (Ebenheit der Kühlfläche, Rauheit und Riefen auf Kühlfläche, Oxidationsgrad der Kühlfläche)
- Zustand des Aufgießmoduls (bisherige Standzeit, Schlichteauftrag, Ebenheit der Kontaktflächen zu Substratstrang und Kokille)
- Vorspannkraft beim Zusammenbau Kokille-Kühler-Pakete
- vertikale Vorspannkraft des Aufgießmoduls und des Aufgießtiegels
- Dicke des Keramikfaserpapiers zwischen Aufgießmodul und den beiden Kokillenebenen
- Ausrichtung des Schuhtiegels zum Verbundgießwerkzeug
- Ausrichtung des Verbundgießwerkzeuges zur Zieheinrichtung
- Anpresskraft des Schuhtiegels zum Verbundgießwerkzeug

Diese Störgrößen können den Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug und somit die Verbundqualität deutlich verändern. Bei den weiteren Versuchen wurden diese Störgrößen innerhalb jeder Versuchsreihe möglichst konstant gehalten, sodass die Versuchsergebnisse ausschließlich vom jeweils veränderten Parameter abhängen.

7.2.2 Einfluss der Strangbewegung (Abziehkinematik)

In einer Versuchsreihe wurde der Einfluss der Abziehkinematik auf den Verbundgießprozess untersucht. Hierzu wurde, gemäß den Substratbandgießversuchen, bei einer konstant gehaltenen Gießgeschwindigkeit, ausgehend von der Standardabziehkinematik für den intermittierenden Strangabzug ($H = 7,5 \text{ mm}$; $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$), zum einen die Hubweite reduziert und zum anderen die Walzendrehgeschwindigkeit verringert. Zusätzlich wurden Versuche mit einer Kombination aus reduzierter Hubweite und verringerter Walzendrehgeschwindigkeit sowie Versuche mit kontinuierlichem Strangabzug durchgeführt. Da, wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben, die Robustheit des Stranggießprozesses unter einer Veränderung der Abziehkinematik leidet, wurde versucht, die Belastung des Substratstranges durch den Aufgießprozess möglichst gering zu halten. Die Temperatur des Aufgusswerkstoffes wurde auf ca. 760 °C eingestellt und es wurde eine Aufgießdicke von 8 mm verwendet. Die Untersuchungen wurden mit einer moderaten Gießgeschwindigkeit von 235 mm/min durchgeführt. Die weiteren Gieß- und Anlagenparameter sind Tabelle 7-3 zu entnehmen.

Parameter	Einheit	Wert
Gießgeschwindigkeit v_g	mm/min	235*
Hubweite H	mm	2,2 – 7,5
Walzendrehgeschwindigkeit ω	rad/s	0,09 – 0,48
Aufgießdicke d_2	mm	8
Schlitzbreitenverhältnis b/d_2	-	0,5
Temperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss}	°C	765 ± 5
Kühlwasserdurchfluss Q	l/min	32

* Der Versuch mit kontinuierlichem Strangabzug wurde mit $v_g = 261 \text{ mm/min}$ durchgeführt.

Tabelle 7-3: Einfluss der Abziehkinematik – Gieß- und Anlagenparameter

Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug

In Abbildung 7-11 sind die Temperaturverläufe in den unteren Graphitplatten bei unterschiedlichen Abziehparametern und einer Gießgeschwindigkeit von 235 mm/min dargestellt.

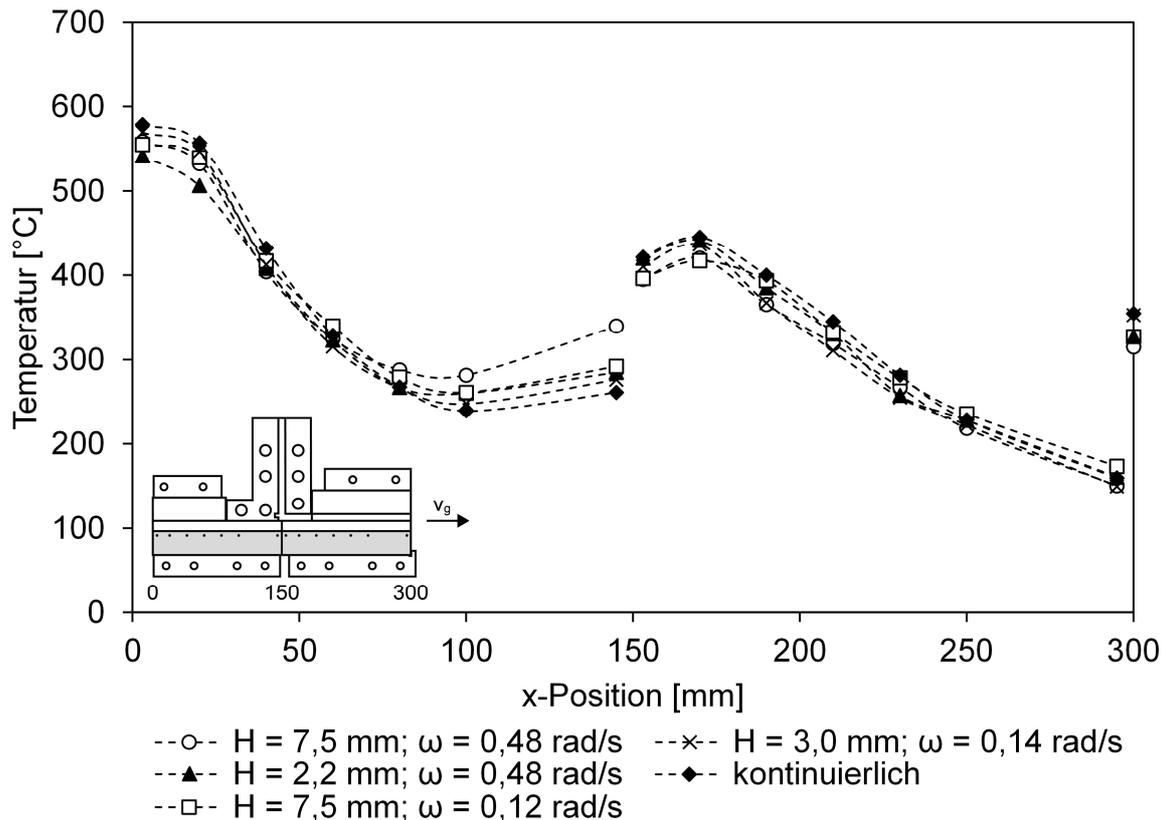


Abbildung 7-11: Einfluss der Abziehkinematik – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)

Weder die Reduzierung der Hubweite noch eine Reduzierung der Walzendrehgeschwindigkeit haben einen signifikanten Einfluss auf den Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug. Auch die Kombination aus reduzierter Hubweite und verringerter Walzendrehgeschwindigkeit führt zu keiner entscheidenden Veränderung der örtlichen Temperaturen in der Kokille. Bei allen Abziehkinematiken wird die maximale Temperatur in der unteren Graphitplatte der Kokillenstufe 2 bei der Position $x = 170 \text{ mm}$ erreicht. Die maximale Temperatur streut in einem Bereich von 417 bis 445 °C. Die

Bandaustrittstemperaturen der Verbundstränge liegen auf einem ähnlichen Niveau von 335 ± 20 °C.

Ausprägung der Verbundzone

In Abbildung 7-12 sind Übersichtsaufnahmen der Längsschliffe aller Verbundbänder der Versuchsreihe dargestellt. Alle Proben bestehen aus zwei separaten Schichten, zwischen denen sich eine horizontal verlaufende Grenzschicht befindet. Demzufolge kam es zu keiner unerwünschten Vermischung zwischen den beiden Verbundmaterialien. Die Ausprägung der Verbundzone ist trotz des annähernd gleichen Temperaturhaushaltes im Urformwerkzeug (siehe Abbildung 7-11) stark abhängig von der eingestellten Abziehkinematik.

Bei der Standardabziehkinematik ($H = 7,5$ mm; $\omega = 0,48$) ist ein zyklischer Wechsel zwischen stoffschlüssig angebunden Bereichen und Fehlstellen festzustellen. In der Farbätzung ist die Verbundzone über einen Go-Stop-Zyklus dargestellt. Die ersten 2,5 mm der Hubweite weisen eine fehlerfreie Verbundzone auf. In diesem Bereich findet ein partielles Aufschmelzen der Substratoberfläche statt und es entsteht ein stoffschlüssiger Verbund. Im weiteren Hubverlauf reihen sich drei ausgeprägte Fehlstellen in der Verbundzone aneinander. Die thermischen Voraussetzungen für eine stoffschlüssige Verbundbildung sind in diesem Bereich nicht gegeben. Die Kornstruktur gibt Auskunft über das Erstarrungsverhalten des Aufgusswerkstoffes während der Wartezeit. Die Wärmeabfuhrverhältnisse am Anfang des Ziehhubes sind geprägt durch einen Wärmeabfluss in horizontaler Richtung hin zum bereits im vorangegangenen Zyklus erstarrten Aufgusswerkstoff und in vertikale Richtung hin zum Substratband. Das Kornwachstum erfolgt in einem Winkel von 45° zur Vertikalen entgegen der Gießrichtung. Im weiteren Verlauf der Hubweite erfolgt die Wärmeabfuhr ausschließlich in vertikaler Richtung. Das Gefüge des Aufgusswerkstoffes ist im Abstand der Hubweite in vertikaler Richtung unterbrochen. Die ca. 2 mm langen Gefügeunterbrechungen verlaufen vertikal und gehen von der Bindezone aus. Sie entstehen durch die Erstarrung des Aufgusswerkstoffes in vertikaler Richtung während der Wartezeit an der Grenze zum Aufgießmodul.

Die Ausprägung der Verbundzone ist bei einer Reduzierung der Hubweite auf 2,2 mm ähnlich zu der der Standardabziehkinematik. Der zyklische Wechsel zwischen gut angebundenen Bereichen und Fehlstellen ist um die Reduzierung der Hubweite skaliert. Die stoffschlüssig verbundenen Bereiche weisen eine Länge von ca. 0,5 mm und die Fehlstellen eine Länge von ca. 1,7 mm auf. Das Verhältnis zwischen stoffschlüssig verbundenen Bereichen und Fehlstellen entspricht dem der Standardabziehkinematik.

Eine Verringerung der Walzendrehgeschwindigkeit beeinflusst die Ausprägung der Verbundzone maßgeblich. Wie aus der Übersichtsaufnahme deutlich zu erkennen ist, reduziert sich die Anzahl der Fehlstellen in der Verbundzone. Die Fehlstellen sind nicht mehr so scharf abgebildet wie bei den Versuchen mit einer hohen Walzendrehgeschwindigkeit. In der Farbätzung ist deutlich erkennbar, dass sich der stoffschlüssig angebundene Bereich vom Anfang bis zur Mitte des Ziehzyklus erstreckt. Im weiteren Verlauf ist keine stoffschlüssige Verbindung vorhanden. Insgesamt erhöht sich der Anteil der stoffschlüssig angebundenen Bereiche.

Bei einer gleichzeitigen Verringerung der Hubweite und der Walzendrehgeschwindigkeit sind in der Übersichtsaufnahme nur noch sehr kleine Fehlstellen in der Verbundzone zu identifizieren. Die Fehlstellen weisen eine maximale Länge von ca. 0,5 mm auf und befinden sich bevorzugt am Ende des Ziehhubes.

Die im kontinuierlichen Abzug produzierte Probe weist nahezu keine Fehlstellen auf. Ein Großteil der Verbundzone ist stoffschlüssig angebunden. Regelmäßig entstehen im Abstand von ca. 0,5 mm kommaförmige Gefügeunterbrechungen im Aufgusswerkstoff, die sich von der Verbundzone ausgehend ca. 0,5 mm in vertikaler Richtung ausbreiten. Vermutlich resultieren diese Unterbrechungen durch ein wiederkehrendes kurzzeitiges Anhaften und Losreißen des erstarrenden Aufgusswerkstoffes am Aufgießmodul.

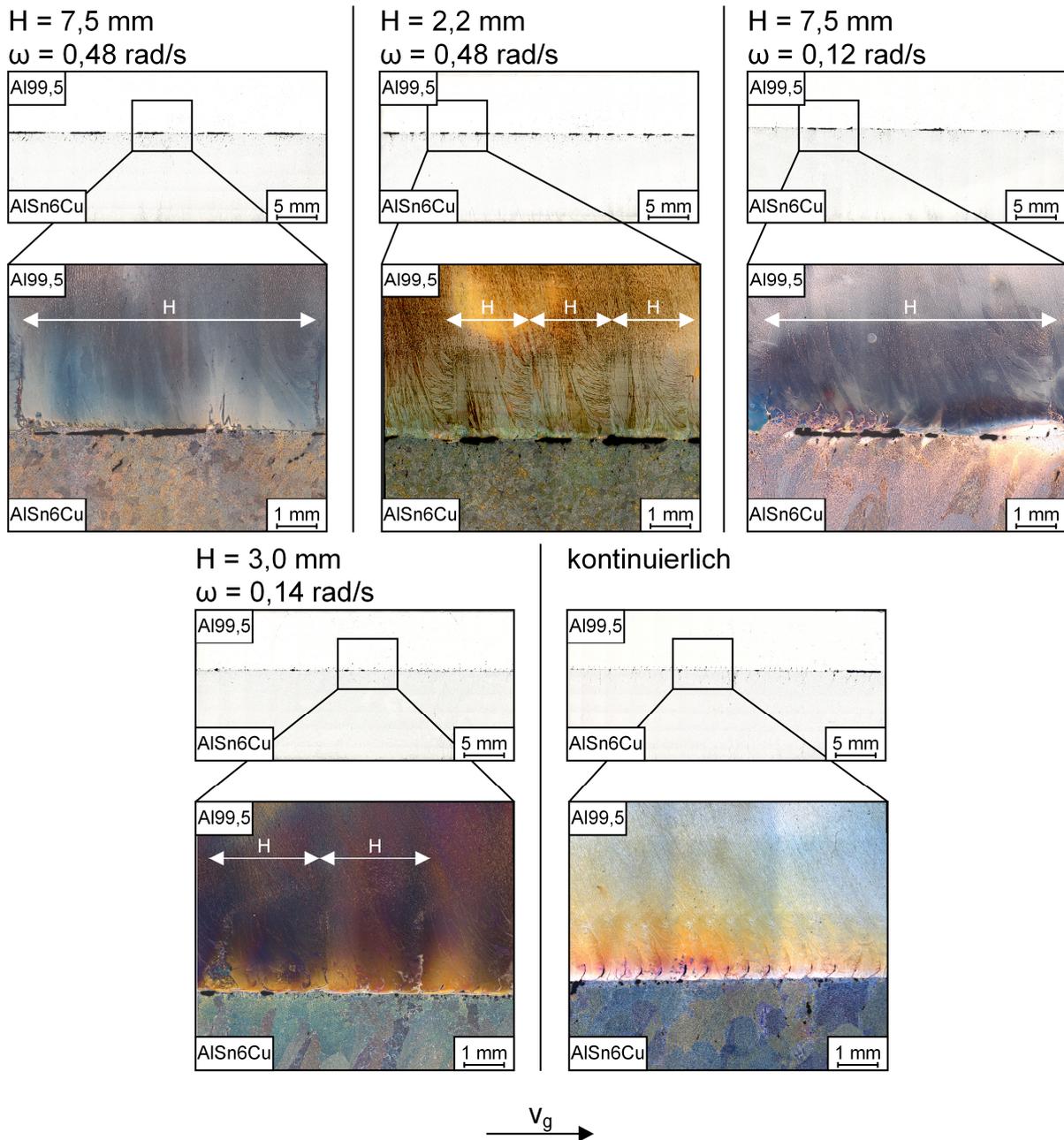


Abbildung 7-12: Einfluss der Abziehkinematik – Gefügeausprägung in der Verbundzone

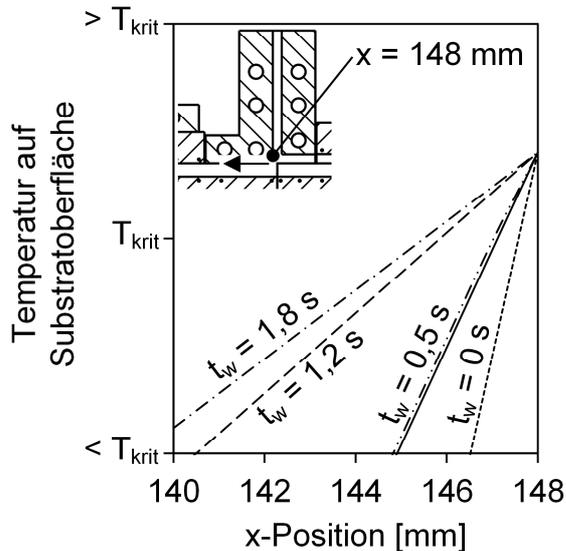
Die Ausprägungen der Verbundzone bei den verschiedenen Abziehkinematiken lassen sich zum einen durch unterschiedliche Verläufe der Oberflächentemperatur des Substratstranges in der Verbundgießzone im Ziehzyklus erklären. Zum anderen wird

bei einer reduzierten Walzendrehgeschwindigkeit die Verwirbelung der Aufgusschmelze beim zyklischen Beschleunigen und Abbremsen des Verbundstranges im intermittierenden Abzug, welche eine negative Auswirkung auf die Verbundbildung im Vergleich zur Standardabziehkinematik hat, minimiert (siehe Kapitel 2.2.3).

Im Substratstrang findet ausgehend von der Verbundgießzone ein Wärmerückfluss entgegen der Gießrichtung statt (siehe Abbildung 7-11). Dies führt zu einer Vorerwärmung des Substratstranges vor dem Eintritt in die Verbundgießzone. Die Strangabzugsbewegung wirkt diesem Wärmefluss entgegen. Beim intermittierenden Strangabzug wird in der Wartezeit der Substratstrang in unmittelbarer Nähe zur Verbundgießzone stark vorerwärmt. Die Vorerwärmung des Substratstranges in der Wartezeit ist qualitativ in Abbildung 7-13 a) dargestellt. Im Ziehzyklus kommt das vorerwärmte Substratband in direkten Kontakt mit der Aufgusschmelze. Über die Hubweite sinkt die sich einstellende Kontakttemperatur an der Grenzfläche zwischen Substrat und Aufgusswerkstoff auf Grund der fallenden Substratoberflächentemperatur. Befindet sich die Temperatur der Substratbandoberfläche beim ersten Kontakt mit der Schmelze über der kritischen Temperatur T_{krit} , kann der Aufgusswerkstoff das Substrat gut benetzen und die in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Verbundbildungsmechanismen laufen ab. Wird T_{krit} unterschritten, so erstarrt die Aufgusschmelze unmittelbar beim Kontakt mit dem Substratband und es kann zu keiner Ausbildung eines stoffschlüssigen Verbundes kommen. Bei einer schnellen Walzendrehgeschwindigkeit von 0,48 rad/s dauert der Ziehzyklus bei einer Hubweite von 2,2 mm nur ca. 0,1 s und bei einer Hubweite von 7,5 mm nur ca. 0,3 s. In dieser kurzen Zeit ändert sich das Temperaturprofil, welches sich in der Wartezeit auf der Substratstrangoberfläche vor der Verbundgießzone eingestellt hat, durch den Kontakt mit dem Aufgusswerkstoff nicht wesentlich (siehe Abbildung 7-13 b)). Die gut vorerwärmten Bereiche des Substratstranges am Anfang des Ziehhubes übersteigen die für die Verbundbildung nötige Oberflächentemperatur des Substratstranges T_{krit} . Im weiteren Verlauf der Hubweite wird T_{krit} unterschritten und die Voraussetzungen für eine stoffschlüssige Verbundbildung sind nicht mehr gegeben. Bei den Abziehkinematiken mit einer reduzierten Walzendrehgeschwindigkeit dauert der Ziehzyklus annähernd so lange wie die Wartezeit. Auf Grund der langsamen

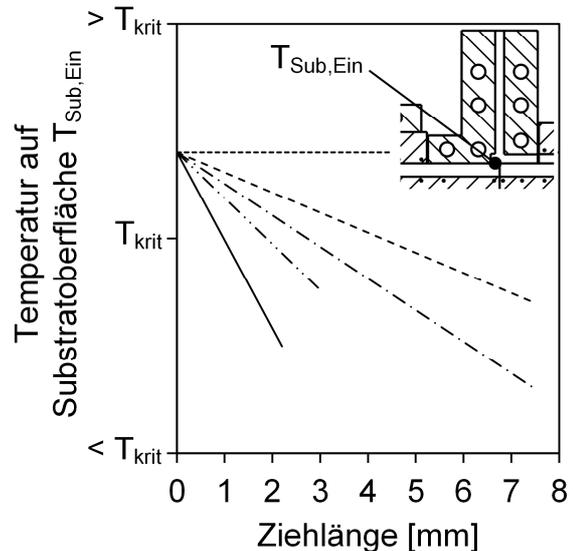
Strangbewegung in positiver x-Richtung und dem direkten Kontakt des Substratstranges mit der frischen, sehr heißen Aufgusschmelze in der Verbundgießzone kommt es zu einem starken Wärmerückfluss im Substratstrang während des Ziehhubes. Dieser führt zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur des Substratstranges vor dem Eintritt in die Verbundgießzone. Dadurch ist der Anteil der Substratoberfläche, die T_{krit} innerhalb der Hubweite übersteigt, im Vergleich zu den Abziehkinematiken mit schneller Walzendrehgeschwindigkeit höher. Bei der kontinuierlichen Betriebsart ist die Ziehgeschwindigkeit so niedrig, dass durch den Wärmerückfluss aus der Verbundgießzone die Oberflächentemperatur des Substratstranges kurz vor dem Eintritt in die Verbundgießzone über T_{krit} ansteigt und somit die Bedingungen für eine stoffschlüssige Verbundbildung permanent gegeben sind.

Oberflächentemperatur des Substratstranges vor der Verbundgießzone am Ende der Wartezeit



--- H = 7,5 mm; $\omega = 0,48$ rad/s
 - · - H = 7,5 mm; $\omega = 0,12$ rad/s
 kontinuierlich

Oberflächentemperatur des Substratstranges beim Eintritt in die Verbundgießzone während des Ziehhubes



— H = 2,2 mm; $\omega = 0,48$ rad/s
 - · - H = 3,0 mm; $\omega = 0,14$ rad/s

Abbildung 7-13: Einfluss der Abziehkinematik – Schematische Temperaturverläufe auf der Oberseite des Substratstranges vor der Verbundgießzone am Ende der Wartezeit (links) und beim Eintritt in die Verbundgießzone während des Ziehhubes (rechts)

Festigkeit des Verbundes

In Abbildung 7-14 sind die Ergebnisse der Bindefestigkeitsuntersuchungen dargestellt. Die erzielten Verbundfestigkeiten korrelieren mit der in den Längsschliffen ermittelten Ausprägung der Verbundzone. Eine Veränderung der Hubweite hat keinen signifikanten Einfluss auf die Scher- und Bindefestigkeit der Verbunde. Durch eine Reduktion der Walzendrehgeschwindigkeit kann die Festigkeit des Verbundes um ca. ein Drittel gesteigert werden. Lediglich die ermittelten Bindefestigkeiten bei der Kombination verminderter Hubweite und Walzendrehgeschwindigkeit bestätigen diese Aussage nicht. In diesem Fall ist, wie in Kapitel 7.1.5 beschrieben, von einer ungünstigen Lage aller vier Proben zwischen den Hubmarken auszugehen. Mit der kontinuierlichen Abzugsart werden hervorragende Scherfestigkeiten des Verbundes erzielt. Die ermittelte Scherfestigkeit liegt auf dem Niveau der Scherfestigkeit des schwächeren Verbundpartners Al99,5.

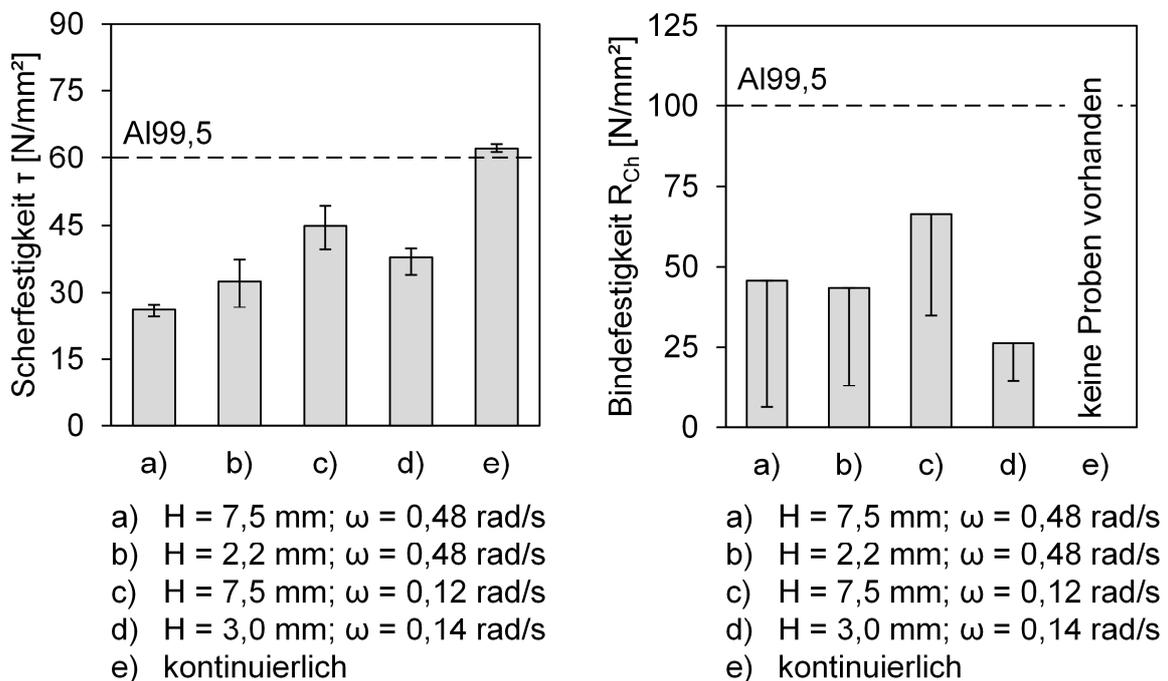


Abbildung 7-14: Einfluss der Abziehkinematik – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}

Abbildung 7-15 zeigt exemplarisch die Bruchflächen einer Scherzugprobe je Abziehkinematik. In allen Proben, die mit intermittierendem Abzug hergestellt wurden, erfolgte der Bruch horizontal genau in der Bindezone zwischen dem Substratwerkstoff AlSn6Cu und dem Aufgusswerkstoff Al99,5. Im Gegensatz dazu versagte die im kontinuierlichen Abzug hergestellte Probe nicht in der Bindezone. Der Bruch verläuft ausgehend von der Ecke der Freistellnut in einem Winkel von ca. 30° durch den Aufgusswerkstoff. Die Festigkeit der Verbundzone ist also höher als die des schwächeren Verbundpartners.

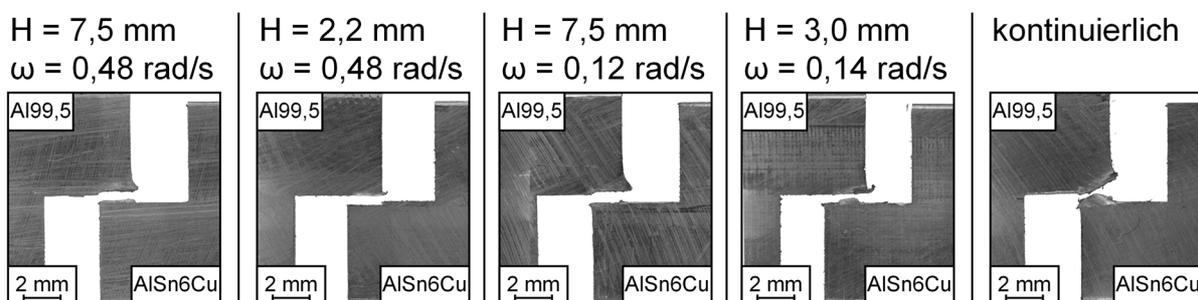


Abbildung 7-15: Einfluss der Abziehkinematik – Ausprägung der Bruchfläche bei der Scherzugprüfung

Prozessfenster und Prozessrobustheit

Die Prozessrobustheit verringert sich bei einer Veränderung der Abziehkinematik analog zu den Substratbandgießversuchen deutlich. Vor allem die Reduzierung der Walzendrehgeschwindigkeit wirkt sich negativ auf die Prozessrobustheit aus. Bei den verwendeten Gieß- und Anlagenparametern kann die Walzendrehgeschwindigkeit, bei einer konstanten Hubweite von 7,5 mm, ausgehend von 0,48 rad/s um den Faktor 4 verringert werden. Eine Reduzierung der Hubweite ist bei einer konstanten Walzendrehgeschwindigkeit von 0,48 rad/s von 7,5 bis auf 2,2 mm möglich. Ein stabiler Gießprozess stellt sich bei einer gleichzeitigen Verringerung der Hubweite und der Walzendrehgeschwindigkeit bis zu einer Hubweite von 3,0 mm und einer Walzendrehgeschwindigkeit von 0,14 rad/s ein. Im kontinuierlichen Strangabzug kann kein stabiler Gießprozess erreicht werden. Nach einer Gießlänge von wenigen Zentimetern reißt der Substratstrang in der Kokillenstufe 1 ab.

Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich, dass die Qualität des Verbundes maßgeblich durch die gewählte Abziehkinematik beeinflusst werden kann. Im intermittierenden Strangabzug kann die Verbundqualität durch eine möglichst geringe Walzendrehgeschwindigkeit erhöht werden. Beste Ergebnisse hinsichtlich der Qualität des Verbundes liefert ein kontinuierlicher Strangabzug.

Bei den weiteren Versuchsreihen wurde die Standardabziehkinematik verwendet, da diese eine sehr hohe Prozessrobustheit aufweist. Die Variationsparameter können bei dieser Kinematik in einem möglichst großen Bereich verändert werden. Zudem kann auf Grund der nur mäßigen Verbundqualität bei der Standardabziehkinematik der Einfluss der untersuchten Parameter deutlicher herausgearbeitet werden.

7.2.3 Einfluss der Gießgeschwindigkeit

Zur Ermittlung des Einflusses der mittleren Gießgeschwindigkeit v_g auf den Verbundgießprozess wurden Untersuchungen mit der Standardabziehkinematik ($H = 7,5 \text{ mm}$; $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$) durchgeführt. Die Gießgeschwindigkeit wurde gemäß des in Kapitel 5.2.1 dargestellten Prozessfensters für das Gießen des Substratbandes in einem Bereich von 180 bis 300 mm/min durch Variation der Wartezeit verändert. Der Einfluss der Gießgeschwindigkeit auf den Verbundgießprozess wird exemplarisch anhand von drei Versuchen dargestellt. Die verwendeten Gieß- und Anlagenparameter sind Tabelle 7-4 zu entnehmen.

Parameter	Einheit	Wert
Gießgeschwindigkeit v_g	mm/min	235 – 294
Hubweite H	mm	7,5
Walzendrehgeschwindigkeit ω	rad/s	0,48
Aufgießdicke d_2	mm	8
Schlitzbreitenverhältnis b/d_2	-	0,5
Temperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss}	°C	800
Kühlwasserdurchfluss Q	l/min	32

Tabelle 7-4: Einfluss der Gießgeschwindigkeit – Gieß- und Anlagenparameter

Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug

In Abbildung 7-16 sind die örtlichen Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten für die Gießgeschwindigkeiten von 235 bis 295 mm/min bei stationären Gießbedingungen dargestellt. Das Temperaturniveau am Anfang der Kokillenstufe 1 steigt mit zunehmender Gießgeschwindigkeit an. Der Kavität wird bei gleichen Kühlbedingungen eine größere Wärmemenge pro Zeit zugeführt. Mit höherer Gießgeschwindigkeit steigt somit auch die Temperatur des Substratbandes beim Eintritt in die Verbundgießzone (siehe Kapitel 5.2.1). Auch in der Kokillenstufe 2 ist mit zunehmender Gießgeschwindigkeit eine Erhöhung der Temperaturen im Urformwerkzeug festzustellen. Das Temperaturfeld verschiebt sich in positive x-Richtung. Grund hierfür ist analog zur Kokillenstufe 1 der mit steigender Gießgeschwindigkeit erhöhte Wärmeeintrag durch die Aufgusschmelze bei gleichbleibenden Kühlbedingungen. Die Erhöhung der Gießgeschwindigkeit von 235 auf 261 mm/min bewirkt einen Anstieg der gemessenen maximalen Temperatur in der Kokille von 380 auf 396 °C bei der Position $x = 170$ mm. Bei einer Gießgeschwindigkeit von 294 mm/min stellt sich an dieser Position eine Temperatur von 450 °C ein. Dieser unverhältnismäßig große Anstieg der Temperaturen im Urformwerkzeug ist bedingt durch das Erweichen des Substratstranges ab einer Temperatur von ca. 400 °C. Oberhalb dieser Temperatur ist die Festigkeit und Steifigkeit des Substratstranges so weit gefallen, dass sich der Substratstrang auf Grund der Gewichtsbelastung des Aufgussstranges und seinem Eigengewicht in der Verbundgießzone plastisch verformt. Der Luftspalt zwischen Substratstrang und unterer Kokillenplatte wird dadurch geschlossen. Der Substratstrang liegt sehr gut an der Kokille an und der Wärmeübergang zwischen Strang und Kokille erhöht sich deutlich. Dadurch erfährt die Kokille in diesem Bereich einen erhöhten Wärmeeintrag und die Temperaturen im Gießwerkzeug steigen in Folge dessen stark an.

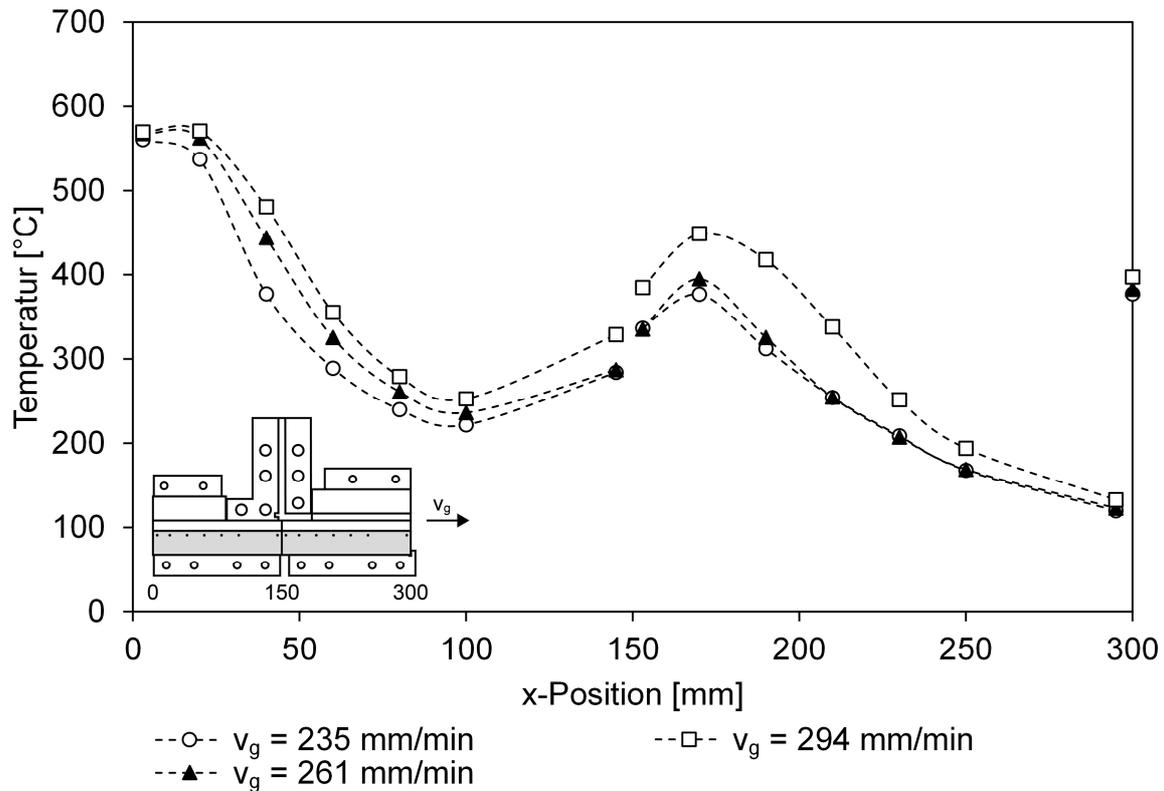


Abbildung 7-16: Einfluss der Gießgeschwindigkeit – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)

Ausprägung der Verbundzone

Die sich einstellende Ausprägung der Verbundzone bei unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten ist in Abbildung 7-17 dargestellt. In den Übersichtsaufnahmen ist zu erkennen, dass der Verbundstrang bei allen drei Gießgeschwindigkeiten aus zwei separaten Schichten besteht, zwischen denen sich eine horizontal verlaufende Grenzschicht befindet. Unerwünschte Vermischungen zwischen den beiden Werkstoffen sind nicht festzustellen.

Bei einer Gießgeschwindigkeit von 235 mm/min ist ein zyklischer Wechsel zwischen stoffschlüssig angebundenen Bereichen und Fehlstellen ersichtlich. Jede Fehlstelle weist eine Länge von ca. 5 mm auf. Zwischen den Fehlstellen befinden sich gut angebundene Bereiche mit einer Länge von ca. 2 mm. Die stoffschlüssig angebundenen Bereiche befinden sich am Anfang der Hubweite.

Die Erhöhung der Gießgeschwindigkeit auf 261 mm/min führt zu einer Verlängerung des gut angebundenen Bereiches je Hubweite. Das Verhältnis zwischen gut angebundenen Bereichen und Fehlstellen nimmt in der Probe erheblich zu.

Bei einer Gießgeschwindigkeit von 294 mm/min sind nahezu keine Fehlstellen in der Verbundzone, welche in Zusammenhang mit der Abziehkinematik bestehen, zu erkennen. Bei den vorhandenen Fehlstellen handelt es sich fast ausschließlich um Gasporositäten. Die Poren weisen einen maximalen Durchmesser von ca. 0,1 mm auf. Die Grenzfläche zwischen Aufgusswerkstoff und Substratwerkstoff hat eine leicht wellige Charakteristik. Dies ist ein deutliches Indiz für die starke Erwärmung des Substratbandes, im Zuge derer die Oberfläche zum Aufgusswerkstoff hin verflüssigt wurde. Im Substratband sind kleine Risse, ausgehend von der Strangunterseite, zu erkennen. Diese Risse sind ein Zeichen dafür, dass der Substratstrang in der Ziehbewegung teilweise über seine Zugfestigkeit belastet wurde und auf Grund dessen eine partielle Werkstofftrennung erfolgte.

Wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben stellt sich in der Substratbandoberfläche unmittelbar vor der Verbundgießzone ein Temperaturgradient in negativer x-Richtung auf Grund des Wärmerückflusses aus der Verbundgießzone ein. Durch die Erhöhung der Gießgeschwindigkeit steigt das globale Temperaturniveau des Substratbandes vor dem Eintritt in die Verbundgießzone (siehe Kapitel 5.2.1). Zusätzlich erhöht sich das Temperaturniveau in der Verbundgießzone durch den vergrößerten Wärmeeintrag pro Zeit bei gleichen Wärmeabfuhrbedingungen erheblich. Diese beiden Faktoren führen zu einem deutlichen Anstieg der Kontakttemperatur zwischen Substratwerkstoff und Aufgusswerkstoff mit steigender Gießgeschwindigkeit. Durch die höhere Kontakttemperatur in der Grenzfläche liegt die Aufgussmelze über einen längeren Zeitraum flüssig vor, was sich positiv auf die Benetzung des Substratbandes und somit auf die Verbundbildung auswirkt. Im Fall einer Gießgeschwindigkeit von 261 mm/min befindet sich im Vergleich zu einer Gießgeschwindigkeit von 235 mm/min eine größere Länge der Hubweite über der für die Verbundbildung nötigen Oberflächentemperatur T_{krit} . Bei einer Gießgeschwindigkeit von 294 mm/min liegt die Oberflächentemperatur des Substratstranges über die gesamte Hubweite über T_{krit} .

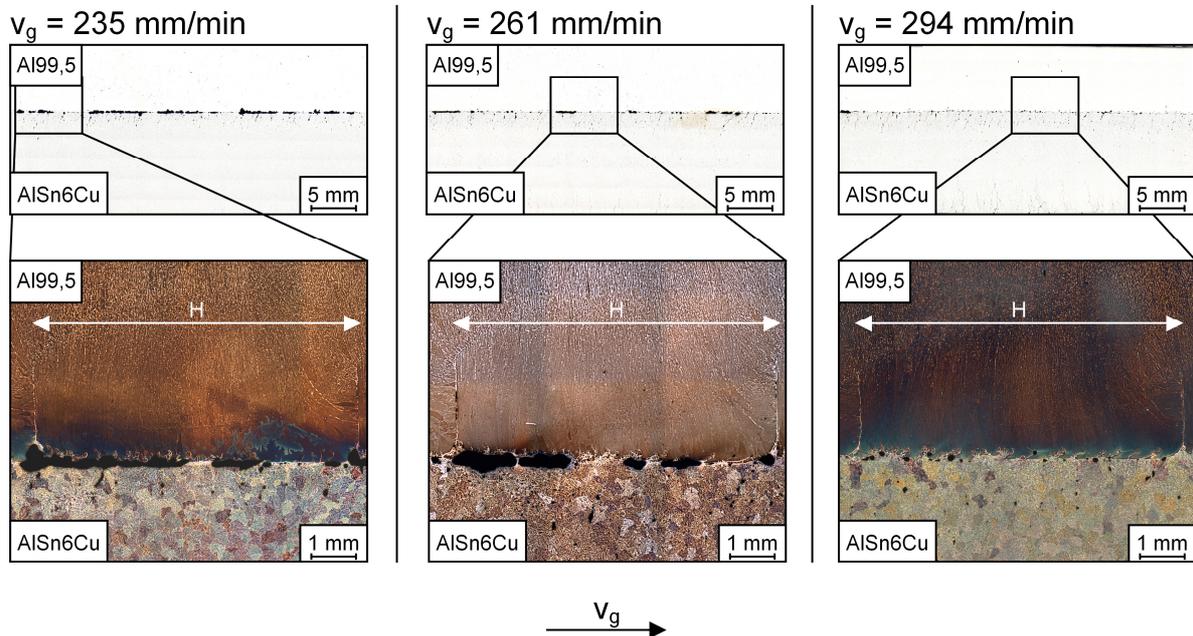


Abbildung 7-17: Einfluss der Gießgeschwindigkeit – Gefügeausprägung in der Verbundzone

Festigkeit des Verbundes

Die bei den metallographischen Untersuchungen festgestellte Verbesserung der Verbundqualität mit zunehmender Gießgeschwindigkeit wird durch die Ergebnisse der Bindefestigkeitsuntersuchungen bestätigt. In Abbildung 7-18 sind die Ergebnisse der Scherzug- und Chalmersprüfungen dargestellt. Die Scherfestigkeit wird durch die Erhöhung der Gießgeschwindigkeit ausgehend von 21 auf bis zu 52 N/mm² gesteigert. Durch die Ausnutzung des gesamten möglichen Gießgeschwindigkeitsbereichs kann die Scherfestigkeit der erzeugten Verbunde um den Faktor 2,5 gesteigert werden. Bei einer Gießgeschwindigkeit von 294 mm/min liegt die Scherfestigkeit des Verbundes nahezu auf dem Niveau der Scherfestigkeit des Aufgusswerkstoffes Al99,5. Die ermittelten Bindefestigkeiten bei der Chalmersprüfung weisen die gleiche Tendenz wie die Ergebnisse der Scherzugprüfungen auf.

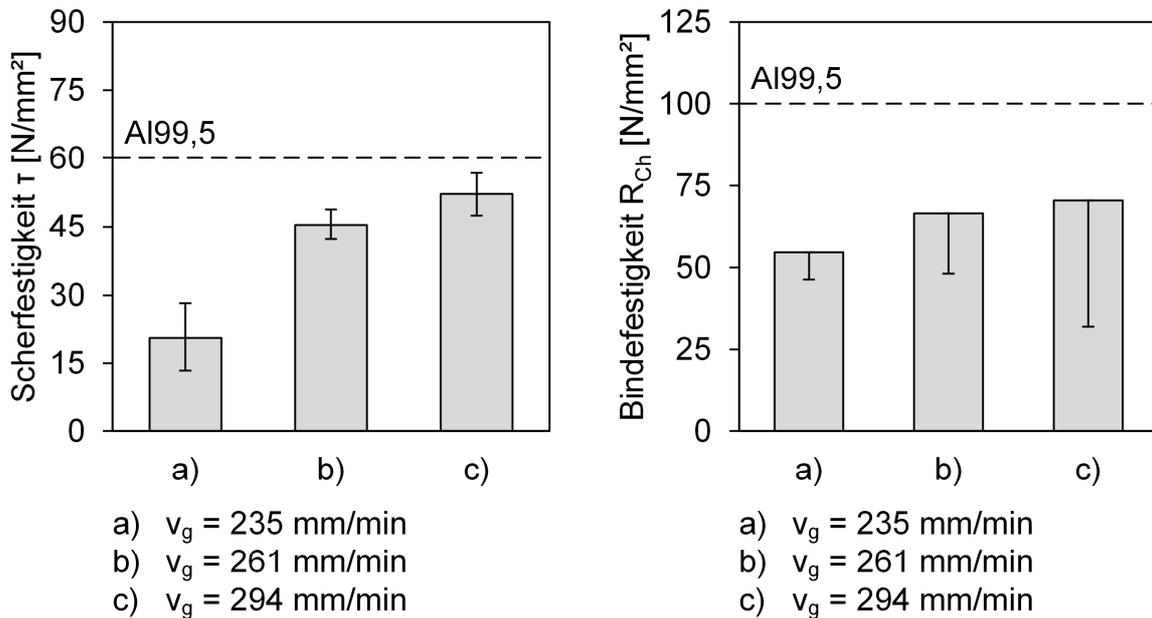


Abbildung 7-18: Einfluss der Gießgeschwindigkeit – Scherfestigkeit τ und maximale Bindfestigkeit R_{Ch}

Prozessfenster und Prozessrobustheit

Ein stabiler Gießprozess kann in einem Geschwindigkeitsbereich von 235 bis 294 mm/min dargestellt werden. Bei kleineren Gießgeschwindigkeiten erstarrt die Aufgusslegierung in der Wartezeit bis in den vertikalen Schlitz des Aufgussmoduls zurück, so dass ein weiterer Strangabzug nicht mehr möglich ist. Bei Gießgeschwindigkeiten über 294 mm/min befindet sich bereits der Substratbandgießprozess in einem instabilen Bereich (siehe Kapitel 5.2.1). Im Verbundgießprozess reißt das Substratband bei diesen Geschwindigkeiten entweder bereits in der Kokillenstufe 1 oder auf Grund des zusätzlichen Wärmeeintrages direkt unter der Verbundgießzone. Ein Verbundstrang kann bei einer Gießgeschwindigkeit von 294 mm/min nur bis zu einer Aufgießdicke von 8 mm und einer Temperatur der Aufgusschmelze von 800 °C prozesssicher hergestellt werden. Bei größeren Aufgießdicken oder einer höheren Temperatur des Aufgusswerkstoffes reißt der Substratstrang bei dieser hohen Gießgeschwindigkeit in Folge der zu hohen Temperaturen unter der Verbundgießzone ab. Mit steigender Gießgeschwindigkeit erhöht sich das Auftreten von Prozessstörungen, wodurch die Prozessrobustheit sinkt.

7.2.4 Einfluss der Aufgießdicke

Wie in Kapitel 6 dargestellt hat die Aufgießdicke d_2 einen großen Einfluss auf die thermischen Bedingungen in der Verbundgießzone. Die Prozessrobustheit und die sich einstellende Verbundqualität werden daher maßgeblich durch die Aufgießdicke bestimmt. Der Einfluss der Aufgießdicke wird exemplarisch anhand von drei Gießversuchen aufgezeigt. Bei diesen Versuchen wurde die Aufgießdicke auf 6, 8 und 12 mm eingestellt. Die übrigen Gieß- und Anlagenparameter sind Tabelle 7-5 zu entnehmen.

Parameter	Einheit	Wert
Gießgeschwindigkeit v_g	mm/min	261
Hubweite H	mm	7,5
Walzendrehgeschwindigkeit ω	rad/s	0,48
Aufgießdicke d_2	mm	6 – 12
Schlitzbreitenverhältnis b/d_2	-	0,5
Temperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss}	°C	885 ± 15
Kühlwasserdurchfluss Q	l/min	32

Tabelle 7-5: Einfluss der Aufgießdicke – Gieß- und Anlagenparameter

Um alle drei Aufgießdicken vergleichen zu können, wurde die Aufgusschmelze auf ca. 900 °C temperiert und eine hohe Gießgeschwindigkeit von 261 mm/min gewählt, da sich bei einer Aufgießdicke von 6 mm nur mit diesen Einstellungen der Verbundgießprozess realisieren lässt. Bei niedrigeren Temperaturen der Aufgusschmelze oder bei niedrigeren Gießgeschwindigkeiten erstarrt der Aufgusswerkstoff in der Wartezeit in den vertikalen Schlitz des Aufgießmoduls zurück.

Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug

Abbildung 7-19 zeigt die örtlichen Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten bei den verschiedenen Aufgießdicken. Der Temperaturhaushalt ist bei allen drei Varianten in der Kokillenstufe 1 ähnlich. In der Kokillenstufe 2 stellen sich auf Grund des veränderten Verhältnisses Aufgießdicke zu Substratdicke unterschiedliche Temperaturverläufe ein. Bei der Aufgießdicke von 6 mm wird in der unteren Kokillenplatte eine

maximale Temperatur von 428 °C an der Position $x = 170$ mm erreicht. Bei einer Aufgießdicke von 8 mm erhöht sich die maximale Temperatur in der Kokillenstufe 2 bedingt durch die erhöhte Massezufuhr und somit Wärmezufuhr durch den Aufgusswerkstoff um 38 °C auf 466 °C. Insgesamt findet eine Verschiebung des sich einstellenden Temperaturfeldes in der Kokille in positive x -Richtung statt. Bei einem Dickenverhältnis Aufgießdicke zu Substratdicke von 1 erhöht sich das Temperaturniveau in der Kokille signifikant im Vergleich zu den Aufgießdicken 6 und 8 mm. Zugleich verlagert sich das Temperaturfeld erheblich in positiver x -Richtung. Die maximale Temperatur in der unteren Kokillenplatte beträgt 538 °C an der Position $x = 190$ mm. Die Erstarrungsfront im Aufgussstrang verschiebt sich mit steigender Aufgießdicke in Gießrichtung. In der oberen Kokillenplatte der Kokillenstufe 2 werden bei einer Aufgießdicke von 12 mm an der Position $x = 190$ mm Temperaturen von 600 °C gemessen. Der Aufgusswerkstoff erreicht diese also noch schmelzflüssig und erstarrt zwischen der Position $x = 190$ mm und der Position $x = 210$ mm. Der überproportionale Anstieg der Kokillentemperaturen bei einer Erhöhung der Aufgießdicke von 8 auf 12 mm im Vergleich zu einer Erhöhung von 6 auf 8 mm ist wie in Kapitel 7.2.3 erläutert, durch die stark sinkende Festigkeit und Steifigkeit des Substratbandes bei hohen Temperaturen zu erklären. Zudem steigt mit erhöhter Aufgießdicke das Gewicht des Aufgussstranges. Dies führt zu einer verstärkten plastischen Verformung des Substratstranges unterhalb der Verbundgießzone und somit zu einem verbesserten Wärmeübergang zwischen der unteren Kokillenplatte und dem Substratstrang.

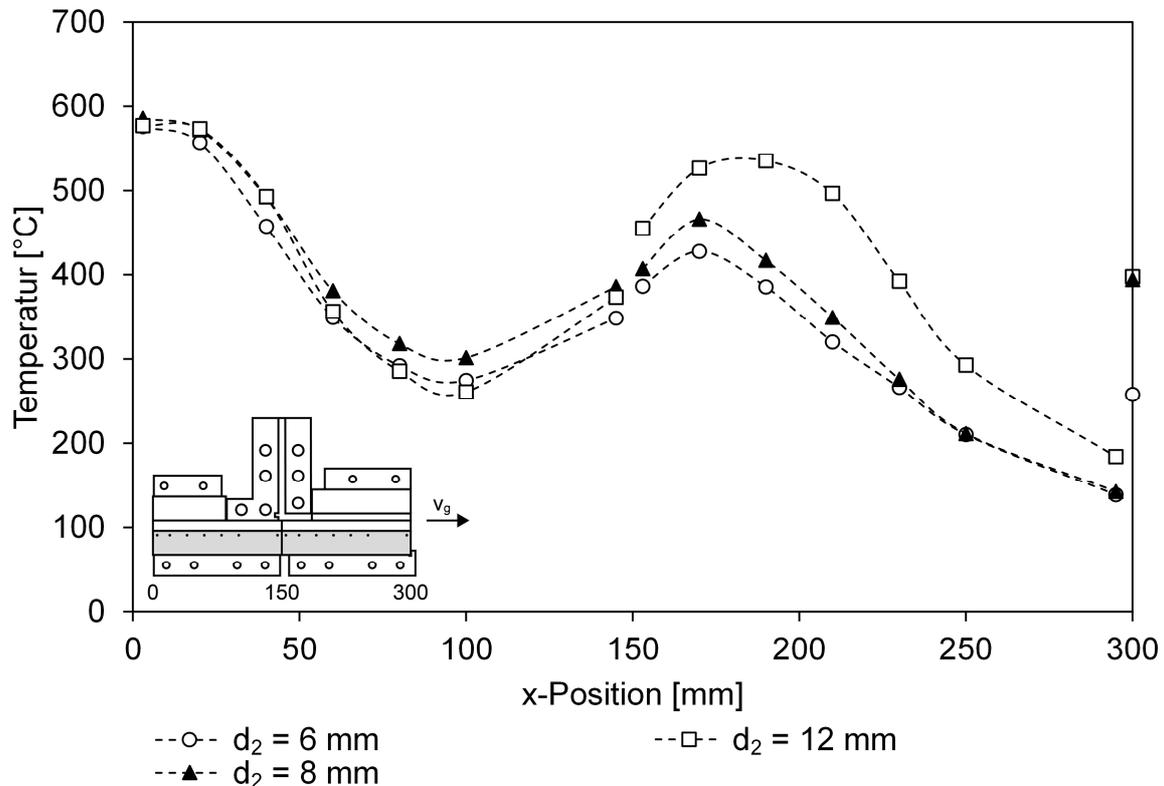


Abbildung 7-19: Einfluss der Aufgießdicke – Temperaturverläufe in den unteren Korkplatten (KU)

Ausprägung der Verbundzone

Abbildung 7-20 zeigt die sich einstellende Ausprägung der Verbundzone bei unterschiedlichen Aufgießdicken. Bei allen Versuchskonfigurationen besteht der Verbundstrang aus zwei separaten Schichten, zwischen denen sich eine horizontal verlaufende Grenzschicht befindet. Unerwünschte großflächige Vermischungen zwischen den beiden Werkstoffen sind nicht festzustellen. In der Verbundzone und im grenzschichtnahen Bereich des Substratwerkstoffes sind vereinzelt Gasporen erkennbar. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um Wasserstoffporosität, deren Ursache in der hohen Temperatur der Aufgusschmelze zu finden ist. In allen drei Fällen sind deutlich kleine Risse im Substratstrang ausgehend von der Strangunterseite zu erkennen. Dies ist ein Indiz dafür, dass das Substratband durch die sehr hohe Temperatur des Aufgusswerkstoffes lokal die Grenze der thermischen Belastbarkeit erreicht.

Bei einer Aufgießdicke von 6 mm ist ein zyklischer Wechsel zwischen stoffschlüssig angebondenen Bereichen und Fehlstellen ersichtlich. Die Fehlstellen weisen eine Länge von bis zu 4 mm auf. Zwischen den Fehlstellen befinden sich stoffschlüssig verbundene Bereiche mit einer Länge von ca. 3 mm. Der Stoffschluss erfolgt vornehmlich am Anfang der Hubweite.

Ab einer Aufgießdicke von 8 mm ist die Verbundzone nahezu fehlerfrei. Lediglich Gasporen mit einem Durchmesser von maximal 0,1 mm sind in der Umgebung der Verbundzone feststellbar. Mit zunehmender Aufgießdicke wird die Charakteristik der Grenzschicht zwischen Aufgusswerkstoff und Substratwerkstoff immer welliger.

Im Fall eines Dickenverhältnisses Aufgießdicke zu Substratdicke von 1, ist in der Farbätzung der einzelne Ziehzyklus nicht mehr ersichtlich. Demnach erstarrt der Aufgusswerkstoff in der Wartezeit nicht mehr bis an die Grenze des Aufgießmoduls zurück. Bei diesem Dickenverhältnis ist deutlich zu erkennen, dass in unregelmäßigen Abständen Zinnfäden ausgehend vom Substratband bis zu 2 mm in den Aufgusswerkstoff hineinragen.

Das Verhältnis $m_{\text{Auf}}/m_{\text{Sub}}$ steigt mit zunehmender Aufgießdicke. Somit fließt während der Erstarrung des Aufgusswerkstoffes mehr Wärme in die Kontaktfläche, wodurch die Ausgleichstemperatur in der Kontaktfläche zunimmt (siehe Kapitel 2.2.4). Zudem wird dem Urformwerkzeug bei gleichen Kühlbedingungen eine erhöhte Wärmemenge durch den Aufgusswerkstoff zugeführt. Dadurch erhöht sich mit steigender Aufgießdicke das globale Temperaturniveau im Urformwerkzeug und somit auch in der Grenzfläche zwischen Aufgusswerkstoff und Substratband. Die Aufgusschmelze liegt über einen längeren Zeitraum flüssig vor, was die Benetzung des Substratbandes und somit die Verbundbildung positiv beeinflusst. Wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben stellt sich in der Substratbandoberfläche unmittelbar vor der Verbundgießzone ein Temperaturgradient in negativer x-Richtung auf Grund des Wärmerückflusses aus der Verbundgießzone ein. Bei größeren Aufgießdicken nimmt der Wärmerückfluss bedingt durch das höhere Temperaturniveau in der Verbundgießzone zu. Im Fall einer Aufgießdicke von 6 mm wird während des Ziehhubes die für die Verbundbildung benötigte Temperatur

in der Kontaktfläche T_{krit} am Ende des Ziehhubes unterschritten und eine stoffschlüssige Verbundbildung kann nicht mehr erfolgen. Bei größeren Aufgießdicken liegt die Temperatur in der Kontaktfläche über den gesamten Ziehhub oberhalb der für die Verbundbildung benötigten Temperatur.

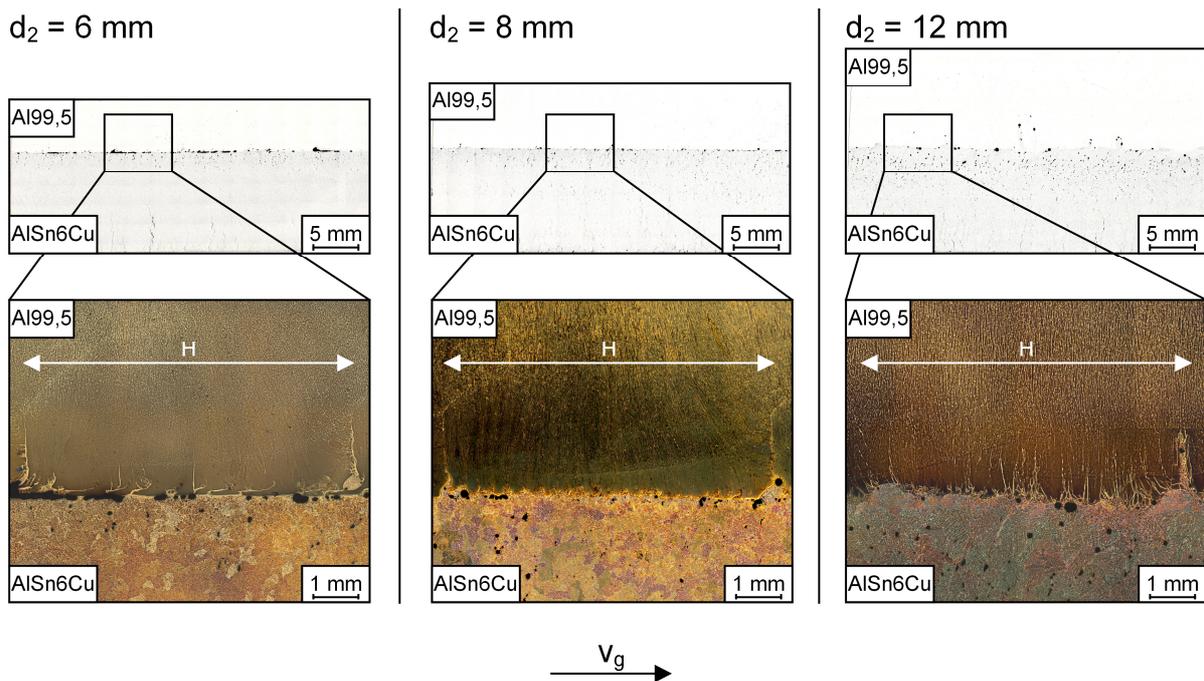


Abbildung 7-20: Einfluss der Aufgießdicke – Gefügeausprägung in der Verbundzone

Festigkeit des Verbundes

Die Ergebnisse der Bindefestigkeitsuntersuchungen korrelieren sehr gut mit der festgestellten Ausprägung der Verbundzone. Mit steigender Aufgießdicke nimmt die Bindefestigkeit der Verbunde zu (siehe Abbildung 7-21). Bereits bei einer Aufgießdicke von 8 mm werden Scherfestigkeiten auf dem Niveau der Festigkeit des schwächeren Verbundpartners ermittelt. Bei einer weiteren Erhöhung der Aufgießdicke steigt die Scherfestigkeit des Verbundes sogar über die der Referenzproben aus Al99,5. Dies ist durch ein partielles Auflegieren des Aufgusswerkstoffes im Bereich der Verbundzone mit den im AlSn6Cu zur Festigkeitssteigerung eingebrachten Elementen (Cu, Ni und Si; siehe Kapitel 2.3.2) zu erklären. Gleiche Tendenzen zeigen die Ergebnisse der Chalmersprüfung.

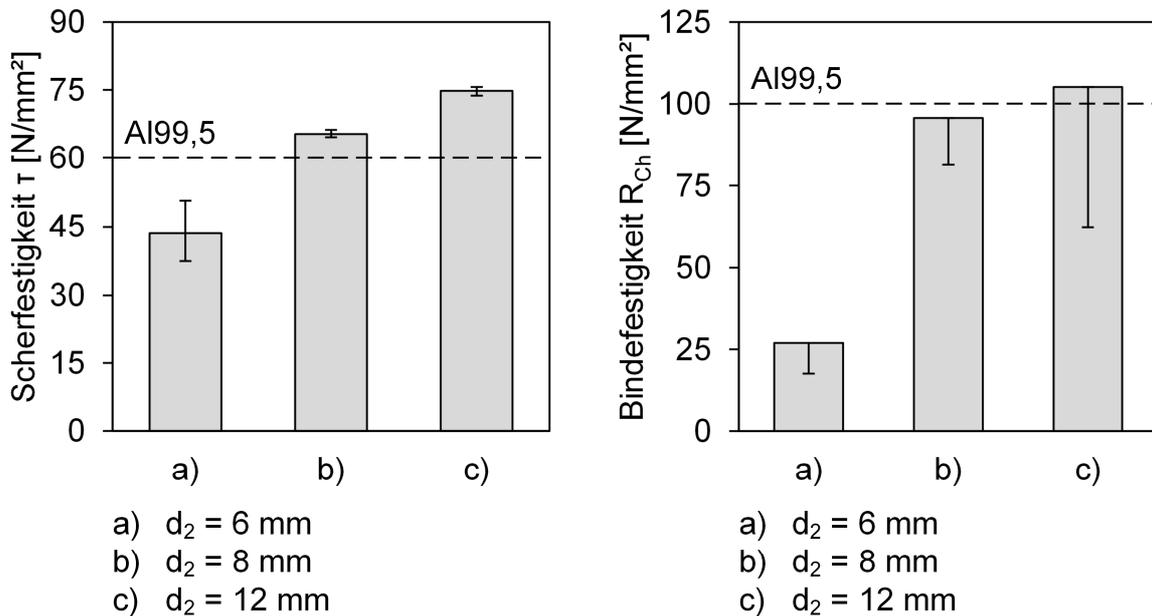


Abbildung 7-21: Einfluss der Aufgießdicke – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}

Prozessfenster und Prozessrobustheit

Mit dem Verbundgießwerkzeug können Stränge mit einer Aufgießdicke von 6 bis 12 mm prozesssicher hergestellt werden. Für eine hohe Prozessrobustheit müssen die Gießparameter Temperatur der Aufgusschmelze und Gießgeschwindigkeit an die jeweilige Aufgießdicke angepasst werden. Dieses Ergebnis bestätigt die analytischen Berechnungen aus Kapitel 6. Bei der minimalen Aufgießdicke von 6 mm muss die Temperatur der Aufgusschmelze ca. 900 °C betragen und der Strang mit einer hohen Gießgeschwindigkeit von 261 mm/min abgezogen werden. Bei niedrigeren Werten dieser Gießparameter erstarrt der Aufgusswerkstoff während der Wartezeit in den vertikalen Schlitz des Aufgießmoduls zurück. Bei höheren Aufgießdicken kann der Verbundgießprozess mit niedrigeren Temperaturen der Aufgusschmelze und langsameren Gießgeschwindigkeiten durchgeführt werden. Dies führt zu einer Verbesserung der Prozessrobustheit. Fehlerfreie Verbunde können bei einer Aufgießdicke von 8 mm ab einer Temperatur der Aufgusschmelze von 870 °C und einer Gießgeschwindigkeit von 261 mm/min erzeugt werden. Bei einer Aufgießdicke von 12 mm stellt sich bei

dieser Gießgeschwindigkeit bereits bei einer Temperatur der Aufgusschmelze von 750 °C ein sehr guter Verbund ein.

Bei den voran dargestellten Gieß- und Anlagenparametern wird die größte Prozessrobustheit bei einer Aufgießdicke von 8 mm erreicht. Eine Erhöhung der Aufgießdicke verringert die Prozessrobustheit auf Grund der stark zunehmenden thermischen Belastung des Substratstranges unterhalb der Verbundgießzone. Eine kleine Aufgießdicke erhöht die Gefahr der Rückerstarrung des Aufgusswerkstoffes in den vertikalen Schlitz des Aufgießmoduls während der Wartezeit.

7.2.5 Einfluss der Aufgießschlitzbreite

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss des zweiten geometrischen Parameters, der Aufgießschlitzbreite b , auf den Verbundgießprozess untersucht. Hierzu wurden Versuche mit drei unterschiedlichen Aufgießschlitzbreiten durchgeführt. Bei den Experimenten wurde die Breite des vertikalen Schlitzes im Aufgießmodul schrittweise auf 4, 8 und 16 mm bei einer konstanten Aufgießdicke von 8 mm verändert. Die übrigen Gieß- und Anlagenparameter sind Tabelle 7-6 zu entnehmen.

Parameter	Einheit	Wert
Gießgeschwindigkeit v_g	mm/min	235
Hubweite H	mm	7,5
Walzendrehgeschwindigkeit ω	rad/s	0,48
Aufgießdicke d_2	mm	8
Schlitzbreitenverhältnis b/d_2	-	0,5 – 2
Temperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss}	°C	855 ± 5
Kühlwasserdurchfluss Q	l/min	32

Tabelle 7-6: Einfluss der Aufgießschlitzbreite – Gieß- und Anlagenparameter

Um die drei Aufgießschlitzbreiten vergleichen zu können wurde die Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes auf ca. 850 °C eingestellt, da bei einer Aufgießschlitzbreite

von 16 mm bei niedrigeren Temperaturen der Aufgusschmelze die Gefahr der Rückerstarrung des Aufgusswerkstoffes während der Wartezeit in den vertikalen Schlitz des Aufgießmoduls besteht.

Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug

In Abbildung 7-22 sind die Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten bei den verschiedenen Aufgießschlitzbreiten dargestellt. Durch eine Variation der Aufgießschlitzbreite wird der Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug nur moderat beeinflusst. Der Wärmeeintrag in die Verbundgießzone bleibt bei einer Veränderung der Aufgießschlitzbreite konstant. Auch das Massenverhältnis $m_{\text{Auf}}/m_{\text{Sub}}$ wird nicht beeinflusst. Durch eine Erhöhung der Aufgießschlitzbreite verkleinert sich das Verhältnis $m_{\text{Auf}}/A_{\text{KF}}$. In Folge dessen sinkt die Temperatur in der Grenzfläche zwischen Aufgusswerkstoff und Substratwerkstoff leicht. Bei einer Aufgießschlitzbreite von 4 mm werden durch die Fokussierung der Aufgusschmelze die höchsten Maximaltemperaturen in der unteren Kokillenplatte erreicht. Durch eine Vergrößerung der Aufgießschlitzbreite nehmen die erreichten Maximaltemperaturen leicht ab. Zudem verschiebt sich die x-Position, an der die Maximaltemperaturen gemessen werden, mit steigender Aufgießschlitzbreite geringfügig in positive x-Richtung.

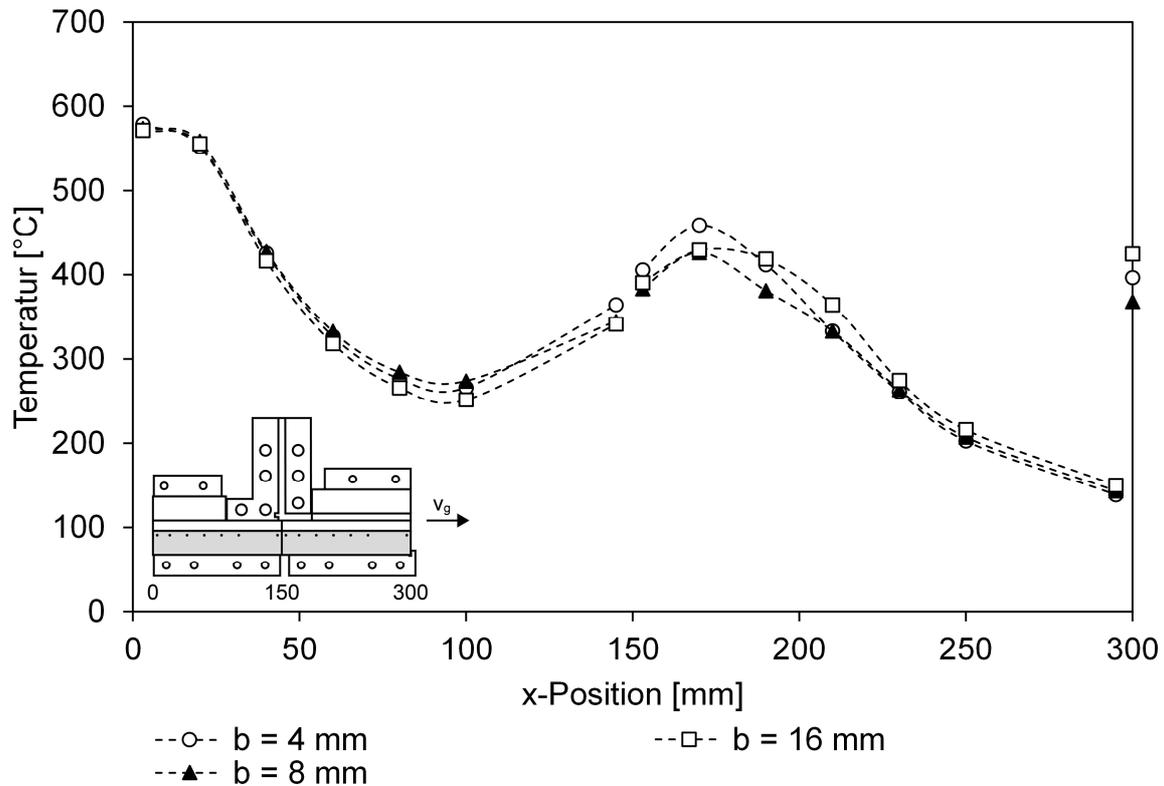


Abbildung 7-22: Einfluss der Aufgießschlitzbreite – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)

Ausprägung der Verbundzone

Die Ausprägung der Verbundzone wird durch eine Veränderung der Aufgießschlitzbreite nicht maßgeblich beeinflusst. In allen drei Konfigurationen besteht der Verbundstrang aus zwei separaten Schichten, zwischen denen sich eine horizontal verlaufende Grenzschicht befindet. Unerwünschte Vermischungen zwischen den beiden Werkstoffen sind nicht festzustellen. In unregelmäßigen Abständen treten bei den verschiedenen Schlitzbreiten längliche Fehlstellen bis zu einer maximalen Länge von ca. 5 mm auf. Aus den Farbätzungen wird deutlich, dass sich die Fehlstellen vorwiegend am Ende der Hubweite befinden. In der Verbundzone und im grenzschichtnahen Bereich des Substratwerkstoffes sind vereinzelt Gasporen feststellbar. Abbildung 7-23 zeigt die Ausprägung der Verbundzone bei unterschiedlichen Aufgießschlitzbreiten.

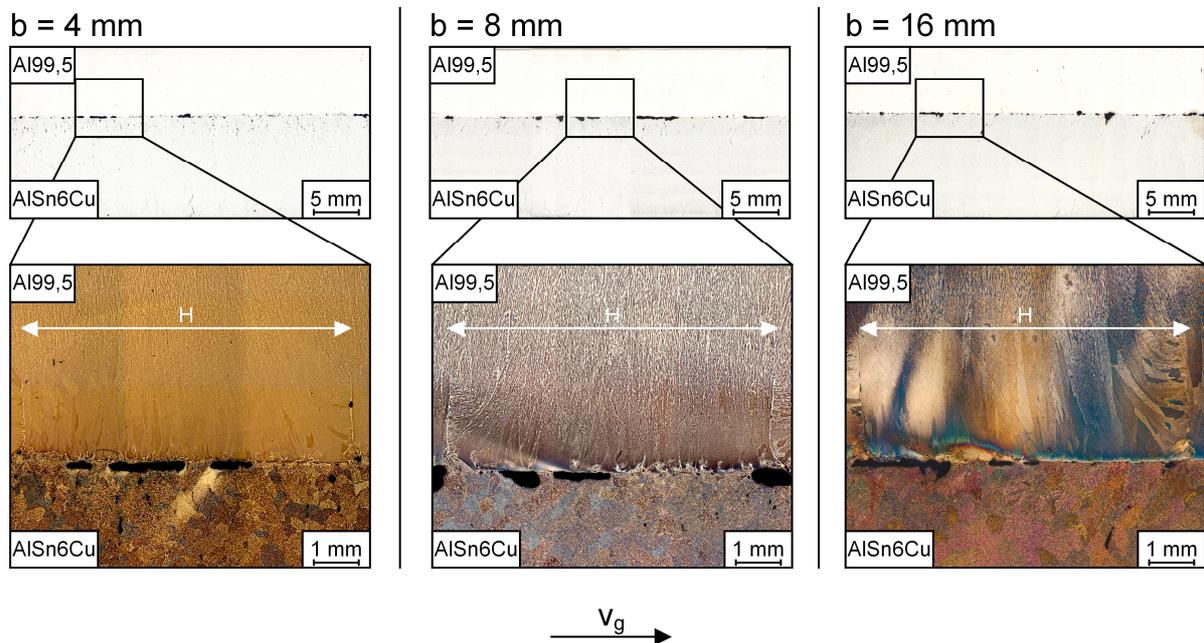


Abbildung 7-23: Einfluss der Aufgießschlitzbreite – Gefügeausprägung in der Verbundzone

Festigkeit des Verbundes

Die Ergebnisse der Bindefestigkeitsprüfung bestätigen, dass die Aufgießschlitzbreite keinen signifikanten Einfluss auf die Verbundqualität hat (siehe Abbildung 7-24). Mit allen drei Aufgießschlitzbreiten werden bei den Untersuchungen mittlere Scherfestigkeiten von ca. 50 N/mm² erreicht. Die ermittelten Bindefestigkeiten nach Chalmers reduzieren sich bei einer Erhöhung der Schlitzbreite geringfügig.

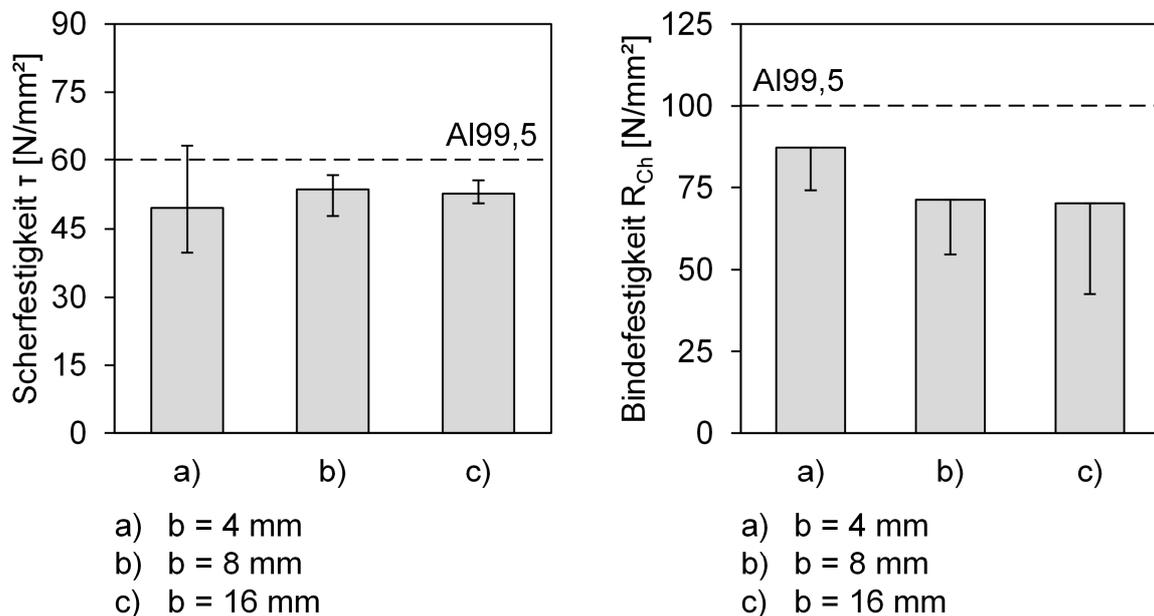


Abbildung 7-24: Einfluss der Aufgießschlitzbreite – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}

Prozessfenster und Prozessrobustheit

Die Breite des Aufgießschlitzes im Aufgießmodul kann bei einer Aufgießdicke von 8 mm in einem Bereich von 4 bis 16 mm variiert werden. Mit zunehmender Aufgießschlitzbreite nimmt die Prozessrobustheit ab. Eine Vergrößerung der Schlitzbreite erhöht die Gefahr des Rückerstarrens des Aufgusswerkstoffes erheblich. Direkt proportional zu einer steigenden Schlitzbreite sinkt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Aufgusschmelze im Aufgießmodul. Die überhitzte Schmelze benötigt mehr Zeit um vom Tiegel zur Verbundgießzone zu fließen. Der Aufgusschmelze wird daher innerhalb des Aufgießmoduls durch Wärmeleitung mehr Wärme entzogen. Der gesteigerte Wärmeentzug im Aufgießmodul kann nur durch eine Erhöhung der Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes kompensiert werden. Zur Realisierung eines möglichst robusten Gießprozesses ist eine kleine Schlitzbreite zu empfehlen.

7.2.6 Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze

In der Versuchsreihe wurden bei ansonsten konstant gehaltenen Prozessparametern Versuche mit unterschiedlichen Gießtemperaturen des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss} durchgeführt. Der Warmhalteofen und das Aufgießmodul wurden auf die jeweilige Temperatur der Aufgusschmelze beheizt. Der Einfluss der Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes wird exemplarisch anhand von zwei Versuchen dargestellt. Die Temperatur der Aufgusschmelze betrug in einem Fall 760 °C, im anderen Fall 860 °C. Die übrigen Gieß- und Anlagenparameter wurden konstant gehalten und sind Tabelle 7-7 zu entnehmen.

Parameter	Einheit	Wert
Gießgeschwindigkeit v_g	mm/min	235
Hubweite H	mm	7,5
Walzendrehgeschwindigkeit ω	rad/s	0,48
Aufgießdicke d_2	mm	8
Schlitzbreitenverhältnis b/d_2	-	0,5
Temperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss}	°C	760 – 860
Kühlwasserdurchfluss Q	l/min	32

Tabelle 7-7: Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze – Gieß- und Anlagenparameter

Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug

Abbildung 7-25 zeigt die örtlichen Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten bei zwei unterschiedlichen Aufgießtemperaturen. Die Veränderung der Aufgießtemperatur hat keinen Einfluss auf das Temperaturfeld in der unteren Kokillenplatte der Kokillenstufe 1. Durch eine Erhöhung der Temperatur des Aufgusswerkstoffes von 760 auf 860 °C wird der in die Kokillenstufe 2 zugeführte Wärmestrom um ca. 20 % erhöht (siehe Kapitel 6). Dies verursacht einen Anstieg der Maximaltemperatur in der unteren Kokillenplatte um 45 °C und eine Verschiebung der Erstarrungsfront des Aufgusswerkstoffes in positiver x-Richtung. Zudem stellt sich in der unteren Graphitplatte bis zu

einer Position $x = 210$ mm ein höheres Temperaturniveau ein. Auch die Bandaustritts-temperatur des Verbundstranges steigt durch die Erhöhung der Aufgusschmelztemperatur um ca. 100 °C an. Durch eine hohe Temperatur des Aufgusswerkstoffes wird die Verbundbildung positiv beeinflusst. Mit steigenden Temperaturen sinkt sowohl die Oberflächenspannung wie auch die Viskosität des Al99,5. Das Formfüllungs- und das Fließvermögen der Reinaluminiumschmelze erhöhen sich (siehe Kapitel 2.3.1). Dies führt zu einer besseren Benetzung des Substratstranges. Zudem steigt durch den höheren zugeführten Wärmestrom das Temperaturniveau in der Verbundgießzone (siehe Kapitel 2.2.4), sodass ein partielles Aufschmelzen des Substratstranges an der Oberseite erleichtert wird.

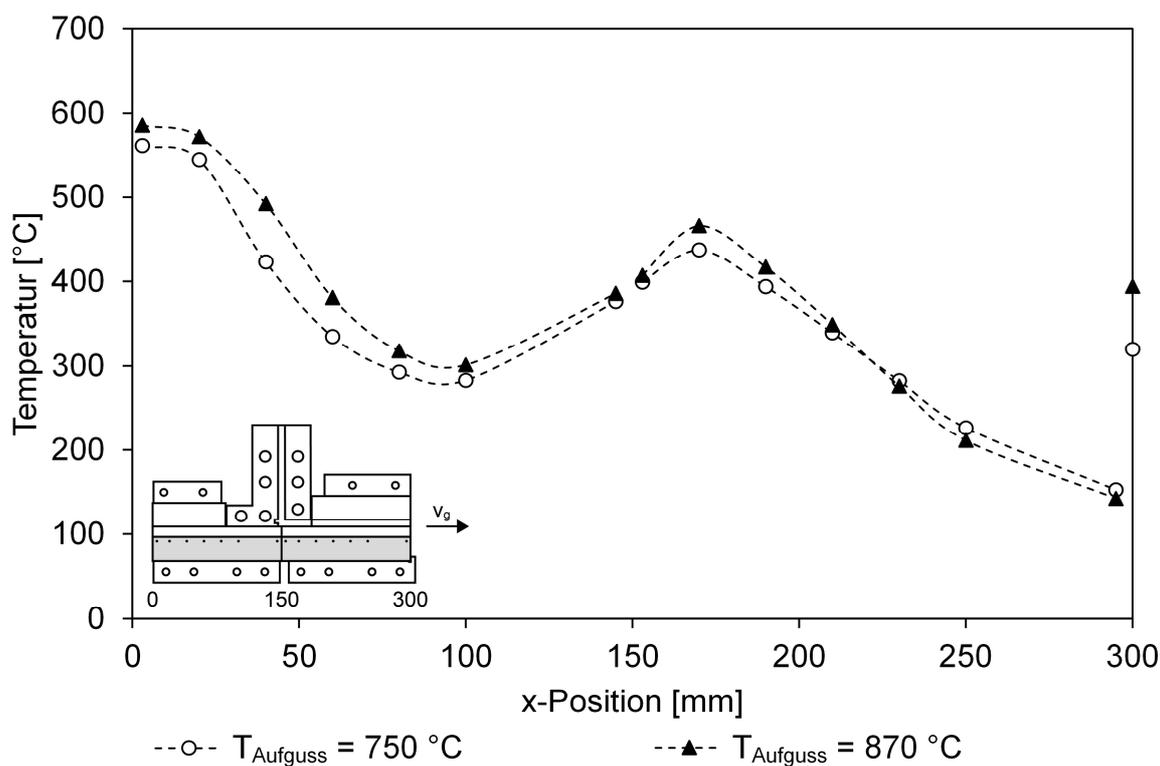


Abbildung 7-25: Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)

Ausprägung der Verbundzone

In Abbildung 7-26 ist der Einfluss der Aufgießtemperatur auf die Ausprägung der Verbundzone dargestellt. Beide Verbundproben bestehen aus zwei separaten Schichten, zwischen denen sich eine horizontal verlaufende Grenzschicht befindet. In beiden Fällen kam es zu keiner unerwünschten Vermischung zwischen den beiden Verbundmaterialien. Bei einer niedrigen Aufgießtemperatur liegt in der Bindezone ein zyklischer Wechsel zwischen stoffschlüssig verbundenen Bereichen und Fehlstellen vor. Die Fehlstellen entstehen am Ende eines Ziehzyklus und weisen eine Länge von ca. 5 mm auf (siehe Kapitel 7.2.1 und Kapitel 7.2.2). Durch eine Erhöhung der Aufgusschmelztemperatur wird das Auftreten von Fehlstellen deutlich reduziert. Zudem treten die Fehlstellen nicht mehr zyklisch bei jedem Hub auf. Aus den Farbätzungen wird deutlich, dass bei einer hohen Aufgusschmelztemperatur der Aufgusswerkstoff an der Grenze zum Aufgießmodul am Ende der Wartezeit wesentlich weniger hoch erstarrt. Dies ist ein deutliches Indiz für die höheren Temperaturen in der Verbundgießzone.

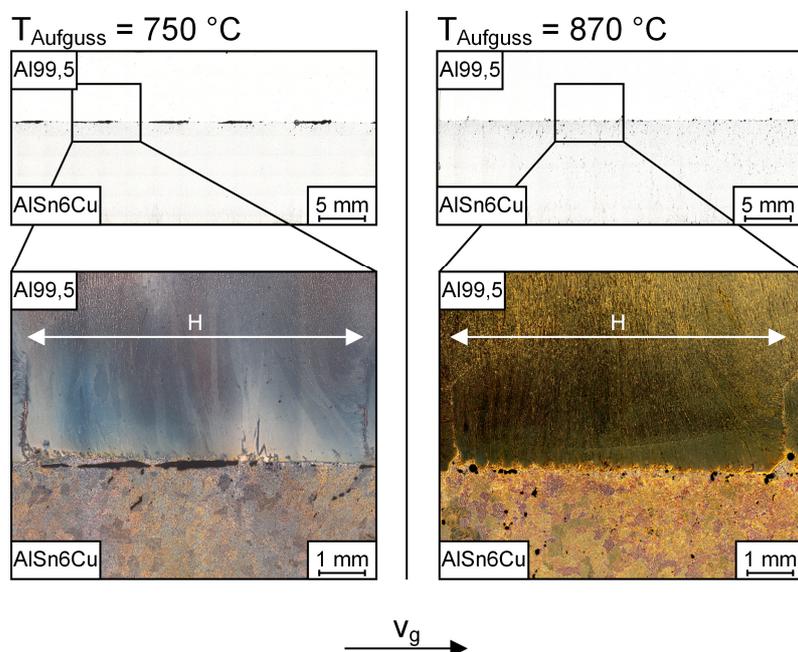


Abbildung 7-26: Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze – Gefügeausprägung in der Verbundzone

Festigkeit des Verbundes

Die Ergebnisse der Bindefestigkeitsuntersuchungen korrespondieren gut mit der Ausprägung der Verbundzone (siehe Abbildung 7-27). Durch eine Erhöhung der Temperatur des Aufgusswerkstoffes um 100 °C verdoppeln sich sowohl die Scherfestigkeit als auch die Bindefestigkeit. Bei einer Temperatur des Aufgusswerkstoffes von 860 °C werden somit fast die Festigkeiten der Referenzproben aus Al99,5 erreicht.

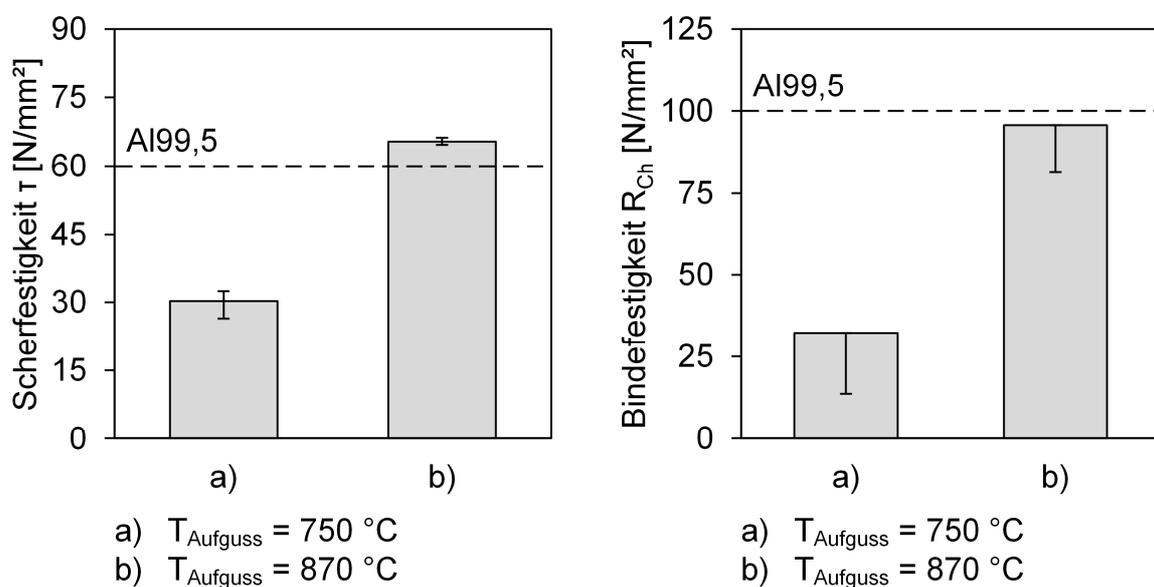


Abbildung 7-27: Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}

Prozessfenster und Prozessrobustheit

Das Prozessfenster für die Temperatur des Aufgusswerkstoffes ist abhängig von der verwendeten Aufgießdicke und der Gießgeschwindigkeit. Ein stabiler Verbundgießprozess lässt sich bei einer Aufgießdicke von 6 mm nur mit einer Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes von 900 °C und einer Gießgeschwindigkeit im Bereich von 261 bis 294 mm/min darstellen. Bei einer Aufgießdicke von 8 mm und einer Gießgeschwindigkeit im Bereich von 235 bis 294 mm/min kann die Aufgießtemperatur zwischen 750 und 900 °C variiert werden. Wird eine Aufgießdicke von 12 mm verwendet und befindet sich die Gießgeschwindigkeit in einem Intervall von 235 bis 261 mm/min, so

kann die Temperatur der Aufgussschmelze von 750 bis 900 °C verändert werden. Liegt die Temperatur des Aufgusswerkstoffes unterhalb der oben dargestellten Bereiche, so erstarrt der Aufgusswerkstoff in der Wartezeit in den vertikalen Schlitz des Aufgießmoduls zurück. Ist die Temperatur der Aufgussschmelze oberhalb der dargestellten Intervalle, reißt der Substratstrang in Folge der hohen thermischen Belastung unterhalb der Verbundgießzone ab. Innerhalb der oben dargestellten Grenzen führt eine Erhöhung der Temperatur des Aufgusswerkstoffes nur zu einer moderaten Verringerung der Prozessrobustheit.

7.2.7 Einfluss des Kühlwasserdurchflusses

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss des Kühlwasserdurchflusses Q auf den Verbundgießprozess untersucht. Ziel war es, auch bei einer geringen Aufgießdicke und einer moderaten Temperatur des Aufgusswerkstoffes einen sehr guten Verbund zu erzeugen. In einer Vorversuchsreihe stellte sich heraus, dass eine Halbierung des Kühlwasserdurchflusses von 32 auf 16 l/min nur zu einer geringen Erhöhung des Temperaturhaushaltes im Urformwerkzeug um ca. 30 °C führt und in Folge dessen die Verbundqualität nur moderat ansteigt. In der Hauptversuchsreihe wurde daher der Wasserdurchfluss durch die Kühler so weit gedrosselt, dass das Kühlwasser bereits in den Kühlbohrungen der Kupferkühlplatten größtenteils verdampft. Dieser Zustand wurde bei einem Kühlwasserdurchfluss von 8 l/min erreicht. Die weiteren Gieß- und Anlagenparameter sind in Tabelle 7-8 dargestellt.

Parameter	Einheit	Wert
Gießgeschwindigkeit v_g	mm/min	261
Hubweite H	mm	7,5
Walzendrehgeschwindigkeit ω	rad/s	0,48
Aufgießdicke d_2	mm	8
Schlitzbreitenverhältnis b/d_2	-	0,5
Temperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss}	°C	815
Kühlwasserdurchfluss Q	l/min	8 – 32

Tabelle 7-8: Einfluss des Kühlwasserdurchflusses – Gieß- und Anlagenparameter

Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug

Abbildung 7-28 zeigt die örtlichen Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten des Urformwerkzeuges bei einem globalen Kühlwasserdurchfluss von 32 und 8 l/min. Durch die Reduzierung des Kühlwasserdurchflusses steigt das Temperaturniveau im Urformwerkzeug erheblich an. In der Kokillenstufe 1 erhöhen sich die Temperaturen im Mittel um ca. 100 °C. Die Temperaturen der Kupferkühlplatte unter der Verbundgießzone erhöhen sich durch die Reduzierung des Kühlwasserdurchflusses von 100 auf 400 °C. In Folge des Wärmestaus in der Graphitkokille steigen die Temperaturen dort um ca. 150 °C an. Die Bandaustrittstemperatur des Verbundstranges erhöht sich um ca. 60 °C. An der Oberseite des Urformwerkzeuges sind die Auswirkungen der Kühlwasserreduzierung auf Grund des hier global geringeren abgeführten Wärmestromes schwächer. Das Temperaturniveau steigt hier gemittelt um ca. 70 °C an. Die Voraussetzungen für die Ausbildung eines stoffschlüssigen Verbundes steigen durch die Kühlwasserreduzierung erheblich. Durch das wesentlich höhere Temperaturniveau in der Kokillenstufe 1 erreicht der Substratstrang die Verbundgießzone wesentlich wärmer. Zudem wird dem Verbundstrang in der Kokillenstufe 2 weniger Wärme entzogen und die Abkühlgeschwindigkeit im Strang wird deutlich reduziert. Die sich einstellende Kontakttemperatur in der Grenzfläche zwischen Aufgusswerkstoff und Substratwerkstoff wird dadurch erheblich erhöht. Die Aufgusschmelze liegt län-

ger im flüssigen Zustand vor und der Substratstrang kann besser benetzt werden. Zudem wird das partielle, oberflächliche Aufschmelzen des Substratstranges durch das höhere Temperaturniveau begünstigt.

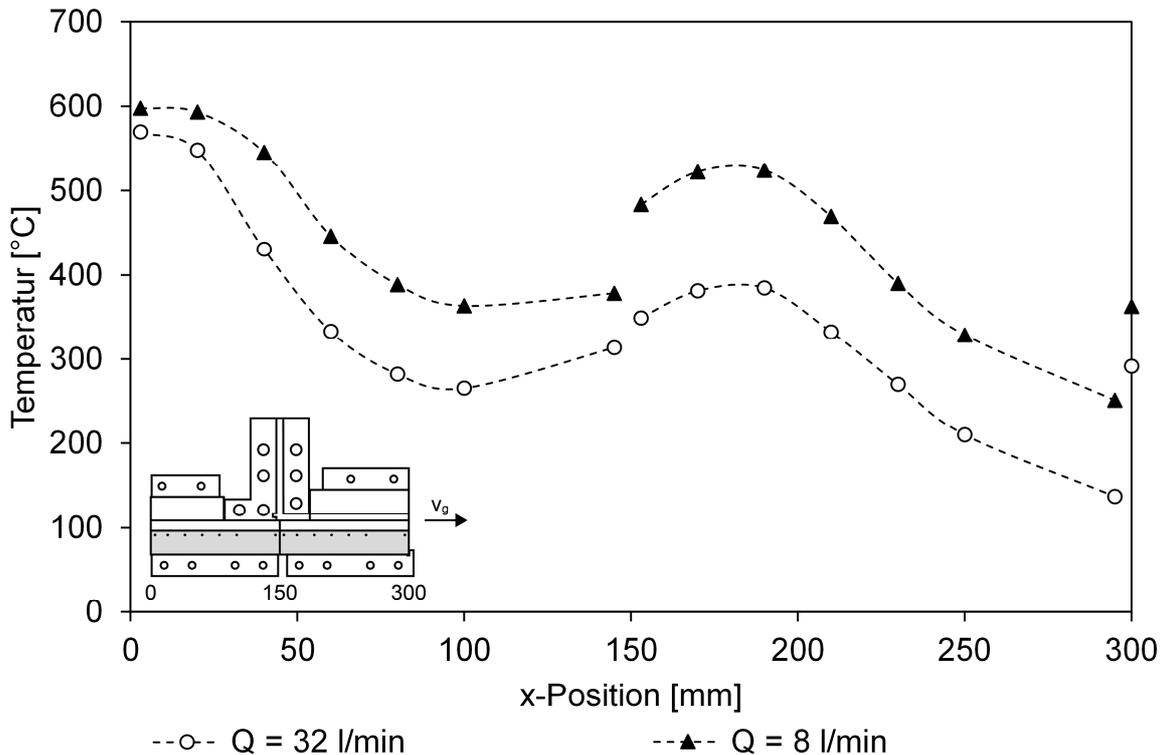


Abbildung 7-28: Einfluss des Kühlwasserdurchflusses – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)

Ausprägung der Verbundzone

Bei den metallographischen Untersuchungen der Verbundzone zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Verbundqualität durch die Reduzierung des Kühlwasserdurchflusses. Beim hohen Kühlwasserdurchfluss liegt in der Bindezone ein zyklischer Wechsel zwischen stoffschlüssig verbundenen Bereichen und Fehlstellen vor. Die Fehlstellen entstehen am Ende eines Ziehzyklus und weisen eine Länge bis zu 5 mm auf. Durch die Reduzierung des Kühlwasserdurchflusses sind keine zyklischen Fehlstellen in der Verbundzone entstanden. Die Verbundzone ist nahezu fehlerfrei und die Grenzschicht zwischen dem Aufgusswerkstoff und dem Substratwerkstoff weist einen stark welligen

Charakter auf. Dies ist ein Indiz für ein ausgeprägtes Aufschmelzen der Oberfläche des Substratstranges. Dennoch entstehen keine unerwünschten Vermischungen zwischen den beiden Werkstoffen. Im Substratstrang sind ausgeprägte Risse ausgehend von der Unterseite im Abstand der Hubweite zu erkennen. Durch die extrem reduzierten Abkühlgeschwindigkeiten bildet sich in der Wartezeit nur noch eine wenig tragfähige Randschale aus und der Strang reißt beim folgenden Ziehzyklus ein. Abbildung 7-29 zeigt die Gefügeausprägung in der Verbundzone bei unterschiedlichem Kühlwasserdurchfluss durch die Kupferkühlplatten.

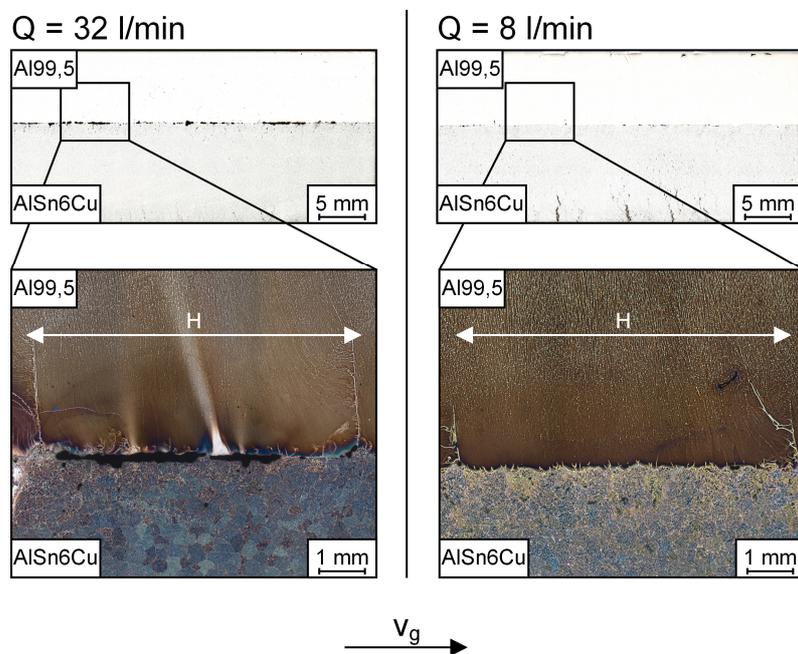


Abbildung 7-29: Einfluss des Kühlwasserdurchflusses – Gefügeausprägung in der Verbundzone

Festigkeit des Verbundes

Die Bindefestigkeitsuntersuchungen bestätigen die deutlich gesteigerte Qualität der Verbundzone durch die Reduzierung des Kühlwasserdurchflusses. Sowohl bei den Scherzugprüfungen wie auch bei der Prüfung nach Chalmers liegen die Festigkeiten der Verbundproben, welche mit einem reduzierten Kühlwasserdurchfluss erzeugt wurden, auf dem Niveau der Festigkeiten des schwächeren Verbundpartners Al99,5 (siehe Abbildung 7-30).

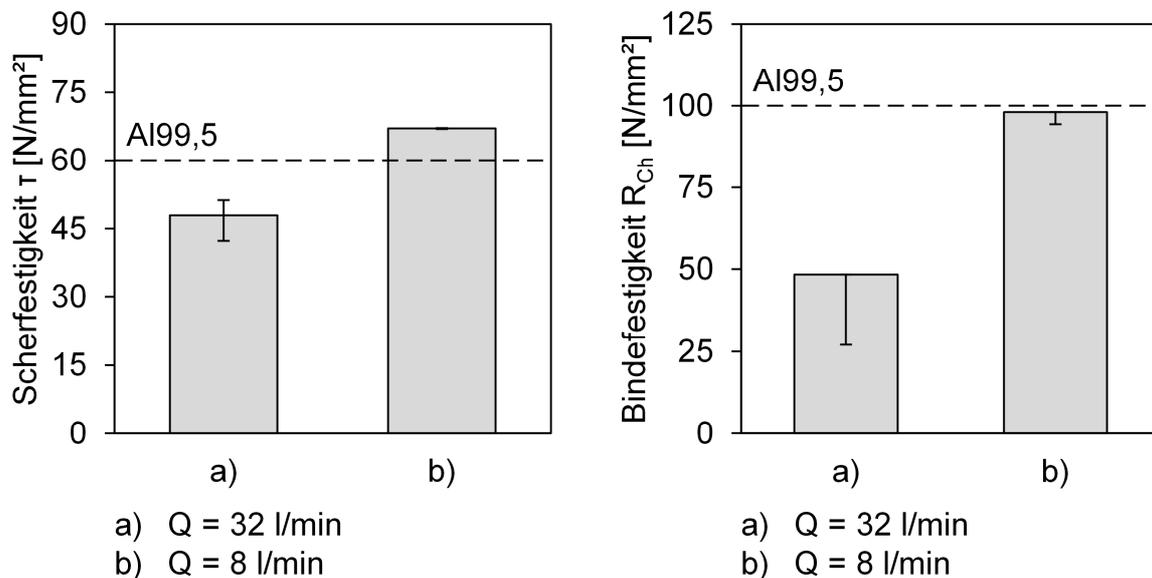


Abbildung 7-30: Einfluss des Kühlwasserdurchflusses – Scherfestigkeit τ und maximale Bindfestigkeit R_{Ch}

Prozessfenster und Prozessrobustheit

Bei einer Aufgießdicke von 8 mm und einer Gießgeschwindigkeit von 261 mm/min stellt sich ein robuster Verbundgießprozess bei einem Kühlwasserdurchfluss von 12 bis 32 l/min ein. Eine Veränderung des Kühlwasserdurchflusses in diesem Intervall hat einen geringen Einfluss auf die Prozessrobustheit, den Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug und die Verbundqualität, da sich die Kühlleistung des Urformwerkzeuges nur moderat verändert. Liegt der Kühlwasserdurchfluss unterhalb 12 l/min, verdampft ein Großteil des Kühlwassers bereits in den Bohrungen der Kühlplatten. Unter diesen Bedingungen ist der Verbundgießprozess absolut im Grenzbereich und eine prozesssichere Herstellung des Verbundbandes ist nur noch eingeschränkt möglich, da bei einer vollständigen Verdampfung des Kühlmittels die Kühlleistung schlagartig abfällt und somit ein Schmelzedurchbruch provoziert wird. Ein robuster Prozess mit einem ähnlichen Temperaturniveau im Urformwerkzeug lässt sich aller Voraussicht nach durch die Verwendung alternativer Kühlmedien wie zum Beispiel Öl einstellen.

7.2.8 Einfluss der aktiven Kühlzonen

Zur Verbesserung der Verbundqualität vor allem bei dünnen Aufgießdicken wurde untersucht, ob die obere Kupferkühlplatte der Kokillenstufe 2 durch eine ungekühlte Stahlplatte ersetzt werden kann. Dadurch soll das Temperaturniveau in der Verbundgießzone erhöht werden. Ein stabiler Prozess stellt sich bei einer Aufgießdicke von 6 mm ein. Bei größeren Aufgießdicken kann auf Grund des erhöhten Wärmeeintrages in die Kokille kein stabiler Prozess erreicht werden. Nach wenigen Millimetern Verbundstranglänge schmilzt der Substratstrang auf Grund des hohen Wärmeeintrages und der stark reduzierten Wärmeabfuhr durch. Der Einfluss der Reduzierung der aktiven Kühlzonen wird anhand von zwei Gießversuchen mit einer Aufgießdicke von 6 mm dargestellt. Die verwendeten Gieß- und Anlagenparameter können Tabelle 7-9 entnommen werden.

Parameter	Einheit	Wert
Gießgeschwindigkeit v_g	mm/min	261
Hubweite H	mm	7,5
Walzendrehgeschwindigkeit ω	rad/s	0,48
Aufgießdicke d_2	mm	6
Schlitzbreitenverhältnis b/d_2	-	0,5
Temperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss}	°C	900
Kühlwasserdurchfluss Q	l/min	32
Anzahl der aktiven Kühlzonen		3 – 4

Tabelle 7-9: Einfluss der aktiven Kühlzonen – Gieß- und Anlagenparameter

Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug

In Abbildung 7-31 sind die örtlichen Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten bei den Versuchen zur Ermittlung des Einflusses der aktiven Kühlzonen dargestellt. Durch den Wegfall der oberen Kühlung in der Kokillenstufe 2 muss die untere Kühlplatte den gesamten durch den Aufgusswerkstoff zugeführten Wärmestrom abführen. Dies führt zu einer geringfügigen Erhöhung des Temperaturniveaus in der zweiten Kokillenstufe. Die Maximaltemperatur steigt um 20 °C an. Im weiteren Verlauf erhöht sich

die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Versuchskonfigurationen leicht. Die gemessene Bandaustrittstemperatur steigt um 90 °C an. Der Verbundstrang beinhaltet daher beim Verlassen der Kokille noch eine wesentlich größere Wärmemenge.

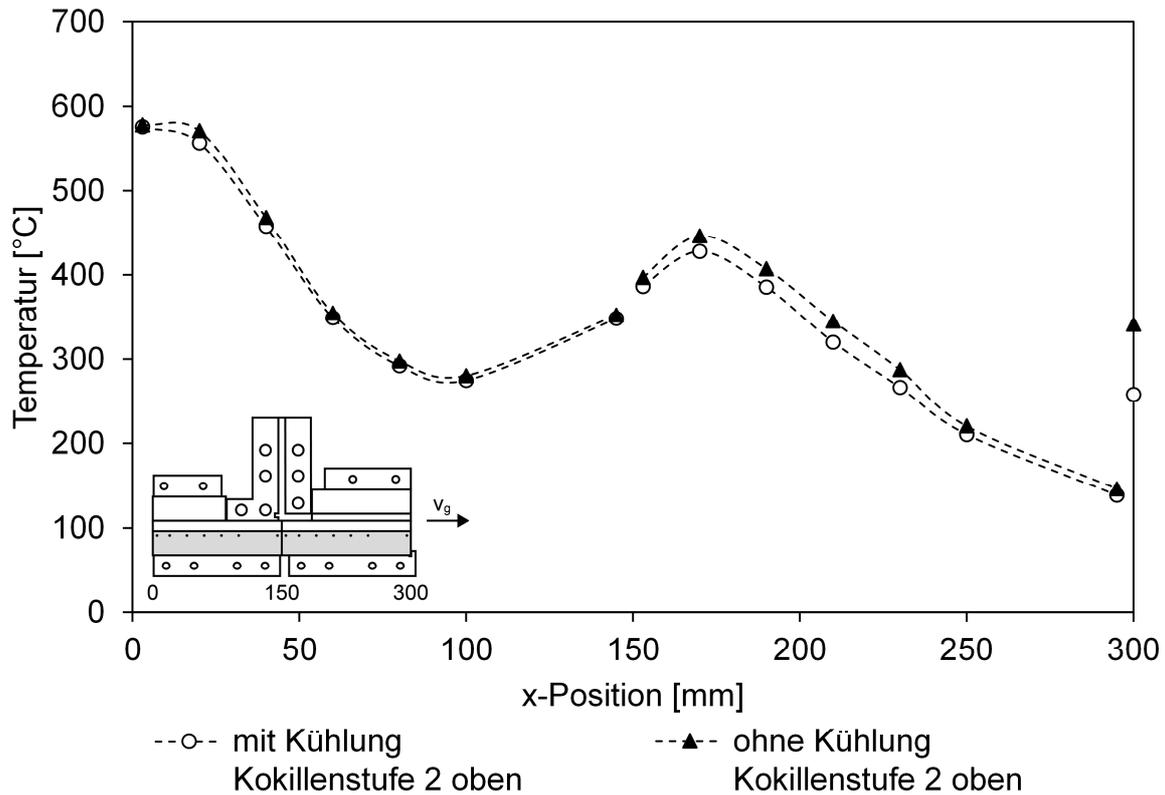


Abbildung 7-31: Einfluss der aktiven Kühlzonen – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)

Die Temperaturverläufe in den oberen Kokillenplatten sind in Abbildung 7-32 dargestellt. Der Temperaturhaushalt in der ersten Kokillenstufe wird durch die Veränderung der aktiven Kühlzonen nicht beeinflusst. Die Temperaturen in der oberen Kokillenplatte der Kokillenstufe 2 steigen erheblich, im Mittel um ca. 200 °C, an. Ohne Kühlung der Oberseite der Kokillenstufe 2 wird eine Maximaltemperatur an der Position $x = 190$ mm von 400 °C erreicht. Dies ist ein deutliches Indiz, dass trotz des Wegfalls der Kühlung der Aufgusswerkstoff die Kokille nicht schmelzflüssig erreicht.

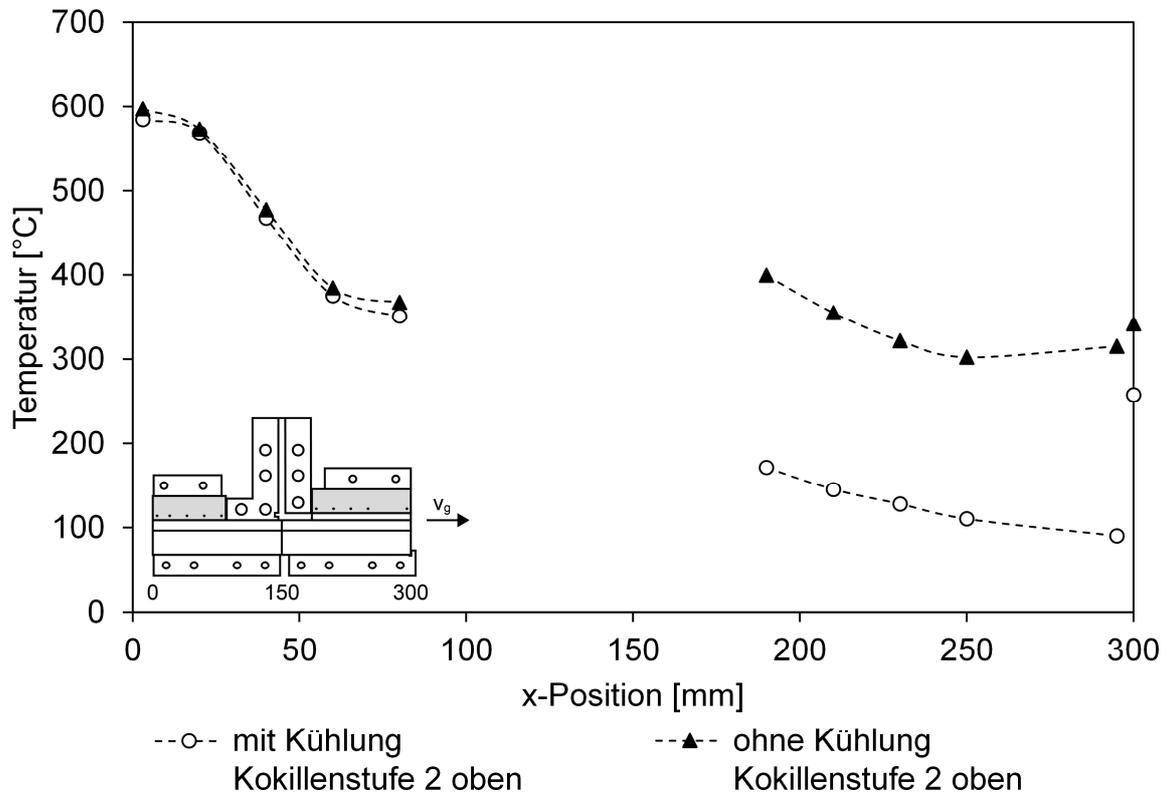


Abbildung 7-32: Einfluss der aktiven Kühlzonen – Temperaturverläufe in den oberen Kokillenplatten (KO)

Ausprägung der Verbundzone

In Abbildung 7-33 ist die Ausprägung der Verbundzone bei den Versuchen mit und ohne Kühlung der Oberseite der Kokillenstufe 2 gezeigt. Wie bereits in Kapitel 7.2.4 dargestellt, weist die Verbundzone im Fall der vollen Kühlung des Urformwerkzeuges zyklisch auftretende Ungängen auf. Die Fehlstellen sind ca. 4 mm lang. Zwischen den Fehlstellen befinden sich stoffschlüssig verbundene Bereiche mit einer Länge von ca. 3 mm. Der Stoffschluss erfolgt vornehmlich am Anfang der Hubweite. Der Wegfall der oberen Kühlung der Kokillenstufe 2 verbessert die Ausprägung der Verbundzone erheblich. In der Übersichtsaufnahme sind keine zyklischen Fehlstellen mehr ersichtlich. Lediglich kleine Gasporen bis zu einem maximalen Durchmesser von 0,1 mm sind verbundzonennah zu erkennen. Diese sind durch die sehr starke Überhitzung der Aufgusschmelze bedingt. Die Grenzschicht zwischen den beiden Werkstoffen ist leicht

wellig ausgeprägt, was auf ein partielles Aufschmelzen der Oberfläche des Substratstranges in der Verbundgießzone schließen lässt.

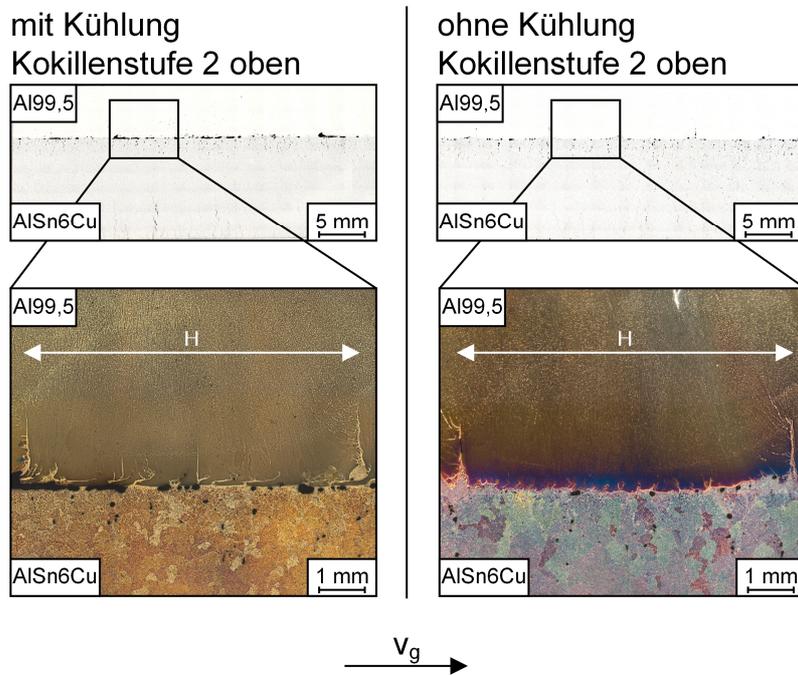


Abbildung 7-33: Einfluss der aktiven Kühlzonen – Gefügeausprägung in der Verbundzone

Festigkeit des Verbundes

Die Ergebnisse der Bindefestigkeitsprüfung sind in Abbildung 7-34 dargestellt. Sie bestätigen die Aussagen der metallographischen Untersuchungen zur Qualität der Verbundzone. Durch die Reduzierung der aktiven Kühlzonen steigt die Scherfestigkeit des Verbundes auf einen Wert von 65 N/mm^2 an. Sie übersteigt somit die Scherfestigkeit der Referenzproben aus Al99,5. Die ermittelten Bindefestigkeiten nach Chalmers zeigen die gleiche Tendenz.

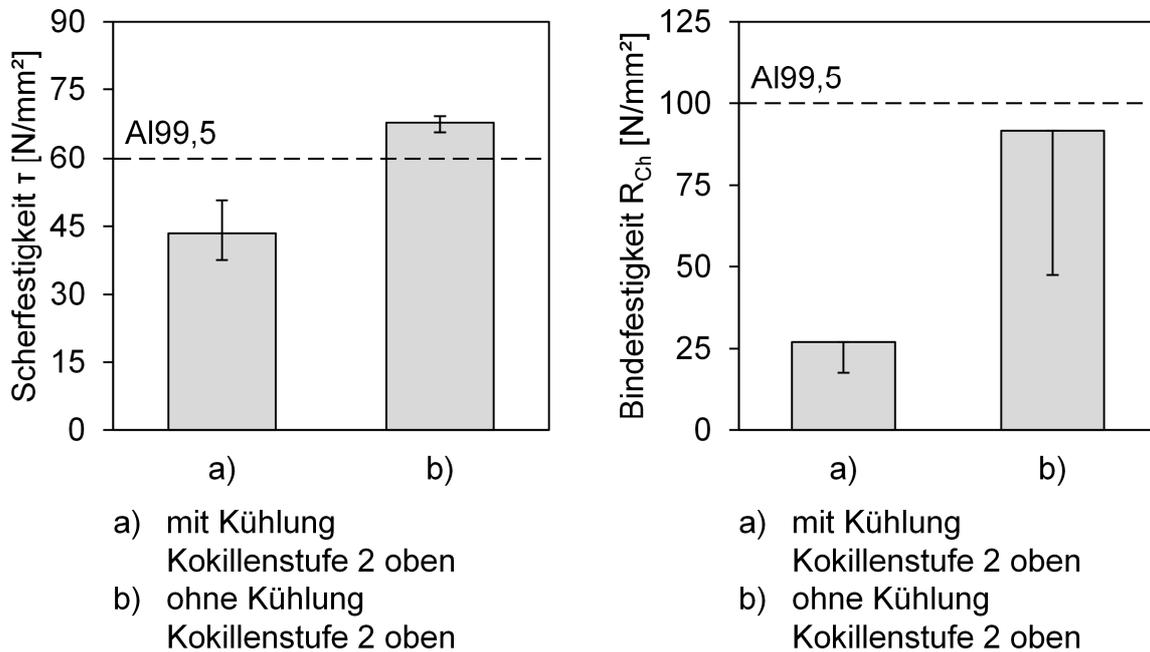


Abbildung 7-34: Einfluss der aktiven Kühlzonen – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}

Prozessfenster und Prozessrobustheit

Die Substitution der oberen Kupferkühlplatte durch ein Stahlgrobblech ist nur bei einer Aufgießdicke von 6 mm möglich. Die Prozessrobustheit sinkt durch die Reduzierung der aktiven Kühlzonen erheblich, da der gesamte Wärmeinhalt des Aufgusswerkstoffes in den Substratstrang abgeführt wird und somit die thermische Belastung des Substratstranges in der Kokillenstufe 2 stark zunimmt.

7.2.9 Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse

Mit den durchgeführten Versuchsreihen wurde das Prozessfenster für das Verbundbandgießen der Werkstoffe AlSn6Cu und Al99,5 systematisch erarbeitet. Der Einfluss der Gieß- und Anlagenparameter auf die Verbundqualität konnte sowohl qualitativ mittels metallographischer Untersuchungen wie auch quantitativ durch Bindefestigkeitsprüfungen ermittelt werden. Für die einzelnen Gieß- und Anlagenparameter wurden die oberen und unteren Prozessgrenzen definiert. Diese einzelnen Grenzen sind ab-

hängig von den anderen Prozessparametern. In Tabelle 7-10 sind die Ober- und Untergrenzen für die Parameter Gießgeschwindigkeit, Aufgießdicke, Schlitzbreitenverhältnis, Temperatur des Aufgusswerkstoffes und Kühlwasserdurchfluss im intermittierenden Strangabzug dargestellt. Für die jeweilige Grenze ist die nötige Ausprägung der anderen Parameter angegeben.

Parameter	Prozessfenster	
	Untergrenze	Obergrenze
Gießgeschwindigkeit v_g [mm/min]	235 $d_2 \uparrow; b \downarrow; T_{Aufguss} \uparrow; Q \downarrow$	294 $d_2 \downarrow; b \downarrow; T_{Aufguss} \downarrow; Q \uparrow$
Aufgießdicke d_2 [mm]	6 $v_g \uparrow; b \downarrow; T_{Aufguss} \uparrow; Q \downarrow$	12 $v_g \downarrow; b \downarrow; T_{Aufguss} \downarrow; Q \uparrow$
Schlitzbreitenverhältnis b/d_2 [-]	0,5 $v_g \uparrow \downarrow; T_{Aufguss} \uparrow \downarrow; Q \uparrow \downarrow$	2 $v_g \uparrow \downarrow; T_{Aufguss} \uparrow; Q \uparrow \downarrow$
Temperatur des Aufgusswerkstoffes $T_{Aufguss}$ [°C]	750 $v_g \uparrow; d_2 \uparrow; b \downarrow; Q \downarrow$	900 $v_g \downarrow; d_2 \downarrow; b \downarrow; Q \uparrow$
Kühlwasserdurchfluss Q [l/min]	12 $v_g \uparrow \downarrow; d_2 \uparrow \downarrow; b \downarrow; T_{Aufguss} \uparrow \downarrow$	32 $v_g \uparrow \downarrow; d_2 \uparrow \downarrow; b \downarrow; T_{Aufguss} \uparrow \downarrow$

\uparrow = möglichst groß \downarrow = möglichst klein $\uparrow \downarrow$ = indifferent

Tabelle 7-10: Prozessfenster für das kontinuierliche Verbundgießen von AlSn6Cu und Al99,5 im intermittierenden Strangabzug ($H = 7,5$ mm; $\omega = 0,48$ rad/s)

Die experimentell ermittelten Prozessgrenzen für das kontinuierliche Verbundgießen stimmen sehr gut mit den Ergebnissen aus den analytischen Berechnungen des Verbundgießprozesses aus Kapitel 6 überein. Das entwickelte Modell stellt somit ein geeignetes Werkzeug zur schnellen und einfachen Prognose des Prozessfensters für das Verbundgießen unterschiedlicher Werkstoffpaarungen dar.

Das Prozessfenster zum kontinuierlichen Verbundgießen ist sehr klein und die einzelnen Parameter können nur in einem sehr schmalen Band verändert werden. Die Prozessgrenzen werden maßgeblich durch die schwer gießbare Substratbandlegierung AlSn6Cu eingeschränkt [HERR80, BRAU94]. Auf Grund der ausgeprägten Heißrissempfindlichkeit darf das Substratband in der Verbundgießzone nur in sehr engen Grenzen thermisch belastet werden. Um bis an die Grenze eines Parameters zu gelangen, sind die anderen Gieß- und Anlagenparameter auf diesen abzustimmen. So ist zum Beispiel eine geringe Aufgießdicke von 6 mm nur zu realisieren, wenn die Gießgeschwindigkeit und die Temperatur des Aufgusswerkstoffes maximal hoch gewählt werden.

Die Ausprägung der Gefügestruktur in der Verbundzone und somit die erreichbare Bindefestigkeit ist abhängig von der Abziehkinematik und von den thermischen Verhältnissen in der Verbundzone. Im untersuchten Bereich verändert die Abziehkinematik den thermischen Haushalt im Urformwerkzeug nicht signifikant. Der intermittierende Strangabzug mit den Standardeinstellungen ($H = 7,5 \text{ mm}$; $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$) führt bei einem geringen Temperaturniveau im Gießwerkzeug zu einer über die Stranglänge ungleichmäßigen Ausprägung der Verbundzone. In der Verbundzone ist ein zyklischer Wechsel zwischen Ungängen und stoffschlüssig verbundenen Bereichen feststellbar. Dies ist zum einen bedingt durch einen sich in der Wartezeit einstellenden Temperaturgradienten an der Oberfläche des Substratstranges unmittelbar vor der Verbundgießzone. Zum anderen führt das ständige abrupte Beschleunigen und Abbremsen im intermittierenden Strangabzug zu sich auf die Verbundbildung negativ auswirkenden Strömungsphänomenen, wie lokalen Verwirbelungen in der Aufgusschmelze. Eine Reduktion der Walzendrehgeschwindigkeit, womit eine Erhöhung der Ziehzeit und Reduzierung der Wartezeit einhergeht, wirkt sich positiv auf die Verbundqualität aus. Die Prozessrobustheit sinkt dadurch jedoch deutlich. Eine hervorragende Verbundqualität mit Bindefestigkeiten auf dem Niveau des schwächeren Verbundpartners Al99,5 kann durch einen kontinuierlichen Strangabzug auch bei einem niedrigen Temperaturniveau im Urformwerkzeug erreicht werden. Durch den kontinuierlichen Strangabzug läuft der Substratstrang mit einer gleichmäßig hohen Temperatur in die Ver-

bundgießzone ein und zusätzlich wird das Auftreten ungünstiger Strömungsverhältnisse durch den Wegfall der Beschleunigungsphasen verhindert. Wie bereits in Kapitel 5.2.2 erläutert, kann im kontinuierlichen Strangabzug in der ersten Kokillenstufe auf Grund des Fehlens der Wartezeit kein stabiler Substratbandgießprozess realisiert werden. Im kontinuierlichen Strangabzug ist daher die prozesssichere Herstellung von Verbundbändern nicht möglich.

Im intermittierenden Strangabzug mit den Standardeinstellungen ($H = 7,5 \text{ mm}$; $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$) kann die Verbundqualität durch eine Erhöhung des Temperaturniveaus in der Verbundzone gesteigert werden. Die Aufgusschmelze erreicht dadurch den Substratstrang mit höheren Temperaturen. Die Oberflächenspannung und die Viskosität der Reinaluminiumschmelze sinken mit steigender Temperatur und somit steigt das Fließ- und Formfüllungsvermögen. Die Benetzung des Substratstranges wird verbessert und der Aufgusswerkstoff liegt länger in flüssiger Phase vor. Zudem verschiebt sich die Erstarrungsfront in Gießrichtung und ist somit weiter vom vertikalen Schlitz des Aufgießmoduls entfernt. Dies beeinflusst die Verbundbildung positiv. Durch den größeren Wärmeinhalt in der Verbundgießzone wird das partielle Aufschmelzen der Oberfläche des Substratstranges verbessert. Da in der ganzen Kokillenstufe 2 das Temperaturniveau steigt, wird auch die Geschwindigkeit von diffusionsgetriebenen Verbundbildungsmechanismen erhöht. Bei Aufgießdicken zwischen 6 und 12 mm ist es durch die richtige Einstellung der übrigen Gieß- und Anlagenparameter möglich, einen nahezu fehlerfreien Verbund zwischen dem Substrat- und dem Aufgusswerkstoff ohne eine Vermischung der beiden Materialien zu erzielen. Die Bindefestigkeit der Verbunde erreicht die Festigkeit des schwächeren Verbundpartners Al99,5. Durch das benötigte hohe Temperaturniveau im Gießwerkzeug sinkt jedoch die Prozessrobustheit. Die Einstellung eines fehlerfreien Verbundes und eine hohe Prozessrobustheit verhalten sich konträr zueinander. Der Wärmeeintrag in die Kokille kann durch die Erhöhung der Aufgießdicke, der Gießgeschwindigkeit und der Temperatur des Aufgusswerkstoffes gesteigert werden. Die Wärmeabfuhr aus dem Gießwerkzeug kann durch die Reduzierung des Kühlwasserdurchflusses und der aktiven Kühlzonen gedrosselt werden. Die Veränderung der einzelnen Parameter hat eine unterschiedlich starke

Auswirkung auf die Qualität des Verbundes und auf die Prozessrobustheit. In Tabelle 7-11 wird der Einfluss der einzelnen Gieß- und Anlagenparameter auf die Verbundbildung und die Prozessrobustheit qualitativ bewertet. Zur Anhebung der Verbundqualität sind bevorzugt die Parameter Aufgießdicke, Gießgeschwindigkeit und Temperatur des Aufgusswerkstoffes anzupassen und aufeinander abzustimmen, da diese das beste Verhältnis aus Steigerung der Verbundqualität zu Verringerung der Prozessrobustheit aufweisen.

Zur Einstellung einer hervorragenden Verbundqualität ($\tau \approx 60\text{N/mm}^2$; $R_{\text{Ch}} \approx 100\text{N/mm}^2$) bei größtmöglicher Prozessrobustheit können folgende Gieß- und Anlagenparameter empfohlen werden:

- Intermittierender Strangabzug ($H = 7,5 \text{ mm}$; $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$)
- Gießgeschwindigkeit $v_g = 261 \text{ mm/min}$
- Substratstrangdicke $d_1 = 12 \text{ mm}$
- Aufgießdicke $d_2 = 12 \text{ mm}$
- Aufgießschlitzbreite $b = 6 \text{ mm}$
- Temperatur des Aufgusswerkstoffes $T_{\text{Aufguss}} = 750 \text{ °C}$
- Kühlwasserdurchfluss $Q = 16 \text{ l/min}$

			Qualität des Verbundes	Prozessrobustheit	Referenz
Strangbewegung	Intermittierender Abzug	Reduzierung der Hubweite H	o	-	$H = 7,5 \text{ mm}$ $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$ $v_g = 235 \text{ mm/min}$
		Reduzierung der Walzendrehgeschwindigkeit ω	+	--	
		Reduzierung der Hubweite H und der Walzendrehgeschwindigkeit ω	+	--	
		Erhöhung der Gießgeschwindigkeit v_g	++	-	
	Kontinuierlicher Abzug		+++	--	$H = 7,5 \text{ mm}$ $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$ $v_g = 235 \text{ mm/min}$
Geometrische Merkmale	Intermittierender Abzug	Reduzierung der Aufgießdicke d_2	--	-	$d_2 = 8 \text{ mm}$
		Erhöhung der Aufgießdicke d_2	+++	-	
		Erhöhung des Schlitzbreitenverhältnis b/d_2	o	-	
Wärmezufuhr und -abfuhr	Intermittierender Abzug	Erhöhung der Temperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss}	++	-	$T_{\text{Aufguss}} = 750^\circ\text{C}$
		Reduzierung des Kühlwasserdurchflusses Q	+	-	$Q = 32 \text{ l/min}$
		Reduzierung der aktiven Kühlzonen	+	--	bei $d_2 = 6 \text{ mm}$ möglich

-- -- - o + ++ +++

Verminderung

kein Einfluss

Verbesserung

Tabelle 7-11: Qualitative Bewertung des Einflusses der Gieß- und Anlagenparameter auf die Qualität des Verbundes und die Prozessrobustheit

8 Thermomechanische Weiterverarbeitung der Aluminium-Verbundbänder

Abschließend wird die thermomechanische Weiterverarbeitbarkeit der erzeugten Verbunde exemplarisch bei ausgewählten Verbundsträngen überprüft. Die erzeugten Verbundbleche werden anschließend qualitativ anhand ihrer Oberfläche und durch Schliifproben bewertet.

Die thermomechanische Weiterverarbeitung der Verbundstränge erfolgte beim Projektpartner Miba Gleitlager GmbH, Laakirchen (Österreich). Ziel war es, einen fehlerfreien AlSn6Cu-Al99,5-Werkstoffverbund, wie er zur Fertigung von zweischichtigen Aluminiumgleitlagern benötigt wird, zu erzeugen. Der Werkstoffverbund soll zur Herstellung von Gleitlagern eine Dicke von 1,2 mm aufweisen und auf ein Dickenverhältnis AlSn6Cu zu Al99,5 von 5 zu 1 eingestellt sein. Verbundstränge mit einem möglichst großen Schichtdickenverhältnis d_1/d_2 sind für die Weiterverarbeitung daher von Vorteil.

In Tabelle 8-1 sind die Gieß- und Anlagenparameter sowie die ermittelten Bindefestigkeiten der zur thermomechanischen Weiterverarbeitung ausgewählten Verbundstränge zusammengefasst. Alle Verbundbänder wurden im intermittierenden Strangabzug mit Standardparametern ($H = 7,5$ mm; $\omega = 0,48$ rad/s) hergestellt und weisen eine Substratstrangdicke d_1 von 12 mm auf.

Nummer	v_g [mm/min]	d_2 [mm]	b [mm]	T_{Aufguss} [°C]	Aktive Kühlzonen	τ [N/mm²]	R_{Ch} [N/mm²]
VB1	235	8	4	800	alle	21	56
VB2	235	6	3	900	alle	44	27
VB3	261	6	3	900	ohne Kühlung Kokillenstufe 2 oben	68	92
VB4	261	8	4	870	alle	65	96
VB5	235	12	6	860	alle	74	99

Tabelle 8-1: Gieß- und Anlagenparameter beim Verbundgießprozess sowie ermittelte Bindefestigkeiten im Gusszustand der zur thermomechanischen Weiterverarbeitung verwendeten Verbundbänder (VB)

Als Referenz dient das Verbundband VB1, welches ein Schichtdickenverhältnis d_1/d_2 von 1,5 aufweist und mit einer geringen Gießgeschwindigkeit und einer vergleichsweise niedrigen Temperatur des Aufgusswerkstoffes hergestellt wurde. Der eingestellte Verbund weist deutliche zyklische Ungängen auf. Die Scherfestigkeit des Verbundes ist mäßig und liegt bei nur 21 N/mm². Das Verbundband VB2 wurde mit einer Aufgießdicke von 6 mm hergestellt. Durch die hohe Gießgeschwindigkeit und die hohe Temperatur des Aufgusswerkstoffes stellt sich im Vergleich zum Verbundband VB1 ein bessere Verbundqualität ein. In der Bindezone sind allerdings noch Fehlstellen bis zu einer Länge von 4 mm angesiedelt. Die Verbundbänder VB3, VB4 und VB5 wurden mit unterschiedlichen Aufgießdicken von 6 bis 12 mm hergestellt. Sie verfügen über eine hervorragende Bindefestigkeit und weisen in der Bindezone nahezu keine Fehlstellen auf. Lediglich kleine Gasporen mit einem maximalen Durchmesser von 0,1 mm sind bindezonennah feststellbar. Übersichtsaufnahmen mit der Gefügearprägung in der Verbundzone für die Verbundbänder VB1 bis VB5 sind in Abbildung 8-1 dargestellt.

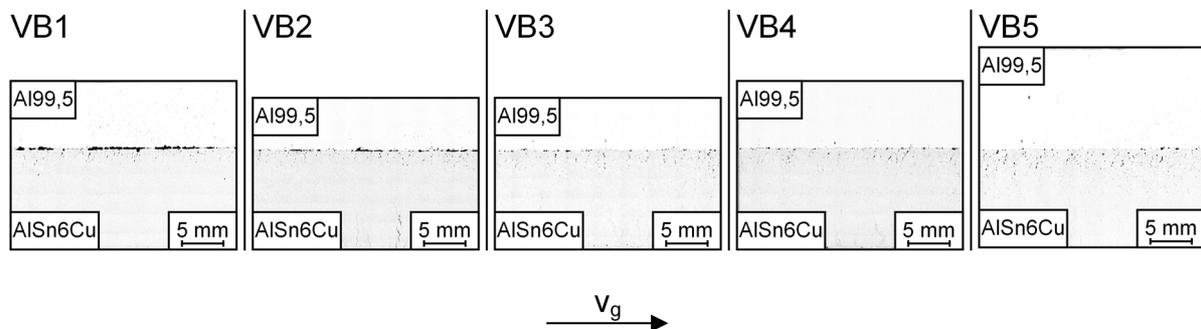


Abbildung 8-1: Gefügearprägung im Gusszustand der Verbundbänder für die thermomechanische Weiterverarbeitung

Vor der umformenden Weiterverarbeitung wurde in allen Verbundsträngen durch spanende Bearbeitung eine Schichtdicke des Al99,5 von 2,5 mm eingestellt. Somit verfügten die Verbundstränge über ein Schichtdickenverhältnis AlSn6Cu zu Al99,5 von 5 zu 1. Die Walzoperationen wurden auf einem Duo-Walzgerüst der Firma Mino S.p.A., S. Michele (Italien) durchgeführt. Das Walzgerüst verfügt über eine maximale

Walzkraft von 400 t. Die Walzen haben einen Durchmesser von 500 mm. Die Verbundstränge wurden in drei Umformschritten mit mehreren Stichen und zwischengeschalteten Wärmebehandlungen bis zu einer Dicke von 1,2 mm abgewalzt. Die thermomechanische Verfahrensroutenroute ist Tabelle 8-2 zu entnehmen.

Prozess	Parameter	
<i>Kaltwalzen</i>	<i>Eingangsdicke: 14,50 mm Stichanzahl: 5 Walztemperatur: 25 °C</i>	<i>Ausgangsdicke: 7,25 mm Walzgeschwindigkeit: 3 m/min</i>
<i>Zwischenglühen</i>	<i>Temperatur: 350 °C</i>	<i>Dauer: 3 h</i>
<i>Kaltwalzen</i>	<i>Eingangsdicke: 7,25 mm Stichanzahl: 3 Walztemperatur: 25 °C</i>	<i>Ausgangsdicke: 3,85 mm Walzgeschwindigkeit: 3 m/min</i>
<i>Zwischenglühen</i>	<i>Temperatur: 350 °C</i>	<i>Dauer: 3 h</i>
<i>Kaltwalzen</i>	<i>Eingangsdicke: 3,85 mm Stichanzahl: 3 Walztemperatur: 25 °C</i>	<i>Ausgangsdicke: 1,20 mm Walzgeschwindigkeit: 8 m/min</i>
<i>Abschlusswärmebehandlung</i>	<i>Temperatur: 350 °C</i>	<i>Dauer: 3 h</i>

Tabelle 8-2: Thermomechanische Verfahrensroutenroute bei der Weiterverarbeitung der Verbundstränge

Die Verarbeitbarkeit aller Verbundstränge ist sehr gut. Auf Grund der erhöhten Stichanzahl in der ersten Walzumformung treten nur sehr geringe Randrissigkeiten beim Kaltwalzen der Verbundstränge im Gusszustand auf. Die makroskopische Ausprägung der Oberfläche der Verbundbleche im fertiggewalzten Zustand ist in Abbildung 8-2 dargestellt. Die Verbundstränge VB1 und VB2 weisen nach der Abschlusswärmebehandlung Fehler in Form von Blasen auf der Al99,5-Seite auf. In den vorangegangenen Verarbeitungsstufen sind diese Fehler noch nicht ersichtlich. Beim Verbundstrang VB1 sind die Blasen recht groß und haben einen Durchmesser von bis zu 10 mm. Der Abstand der Blasen in Gießrichtung zueinander beträgt ca. 75 mm. Die Blasen des Verbundstranges VB2 sind wesentlich kleiner ausgeprägt und treten in Gruppen auf. Die Gruppen sind in Gießrichtung ca. 75 mm voneinander entfernt. Die weiteren Verbundstränge sind auf der Oberfläche der Al99,5-Seite fehlerfrei.

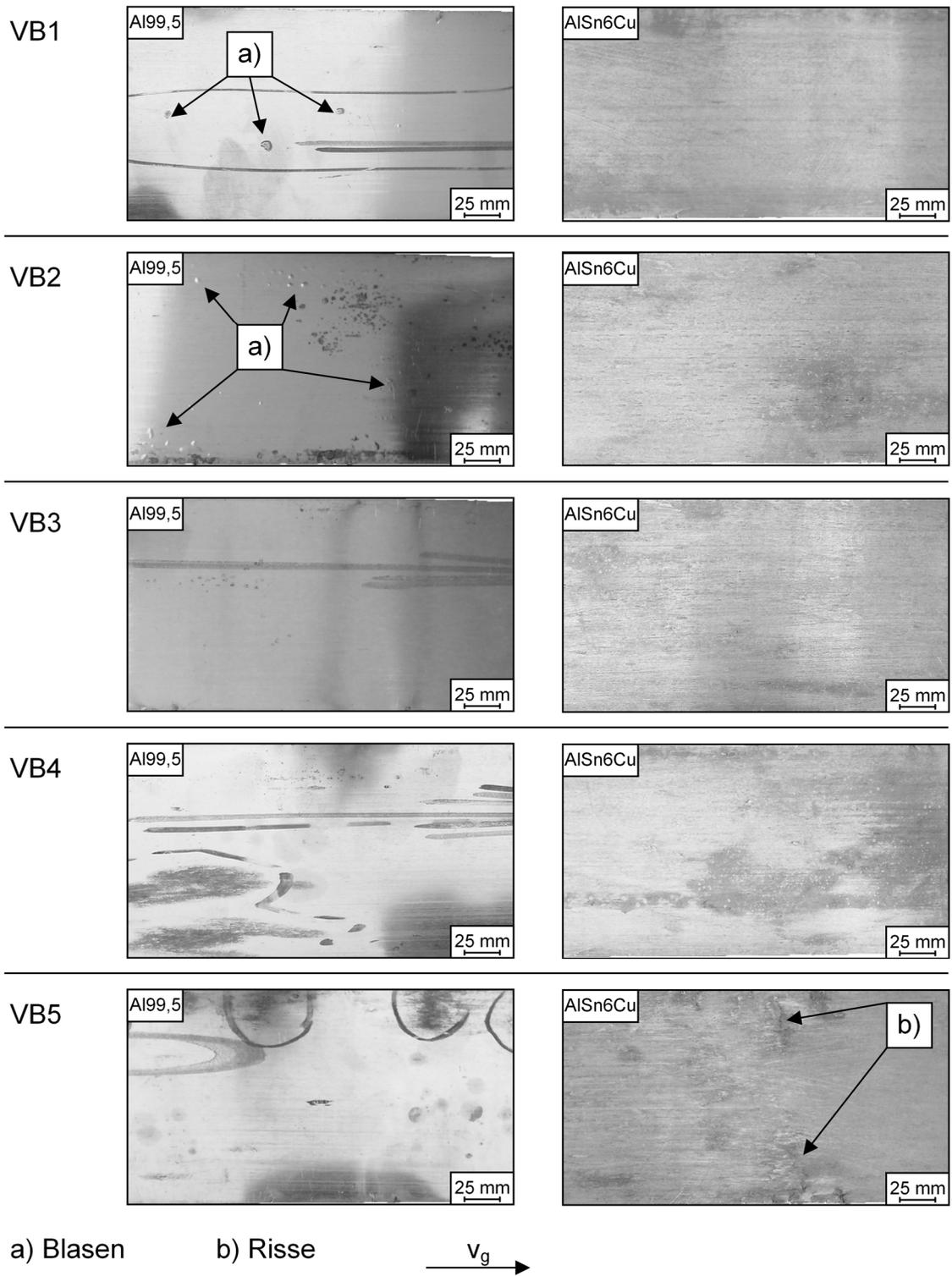


Abbildung 8-2: Oberfläche der Verbundstränge nach der thermomechanischen Weiterverarbeitung

Die Blasenbildung ist höchstwahrscheinlich auf die zyklischen Fehlstellen, welche bereits im Gusszustand vorhanden waren, zurückzuführen. In diesen Bereichen liegt keine stoffschlüssige Bindung zwischen dem Aufgusswerkstoff und dem Substratwerkstoff vor. Auch bei der umformenden Weiterverarbeitung verbinden sich diese Fehlstellen nicht stoffschlüssig. Bei der abschließenden Wärmebehandlung expandiert das in den Fehlstellen eingeschlossene Gas und führt in der nun nur noch 0,2 mm dicken Al99,5-Schicht zu einer plastischen Verformung. Bei den vorangegangenen Wärmebehandlungen tritt dieser Effekt nicht auf, da hier die Schichtdicke des Al99,5 noch zu groß ist. Auf der AlSn6Cu-Seite sind lediglich beim Verbundstrang VB5 leichte Risse senkrecht zur Gießrichtung erkennbar. Diese Risse sind bereits im Gussprodukt ersichtlich und sind eine Folge der starken thermischen Belastung des Substratstranges in der Verbundgießzone auf Grund der gewählten Gieß- und Anlagenparameter (siehe Kapitel 7.2.4).

Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchung der Verbundbleche sind in Abbildung 8-3 zusammengefasst. Bei allen Verbundblechen liegt abseits der makroskopischen Fehler ein sehr guter stoffschlüssiger Verbund vor. Die gewünschte Schichtdicke des Al99,5 von 0,2 mm und des AlSn6Cu von 1,0 mm wird bei allen Verbundbändern erreicht. Die Grenzfläche zwischen den beiden Verbundpartnern verläuft gerade in horizontaler Richtung. In der Reinaluminiumschicht sind keine Verunreinigungen zu finden. Eine Ausnahme stellt der Querschliff des Verbundbandes VB5 dar. In der Reinaluminiumschicht ist deutlich ein fein verästeltes Zinnnetzwerk zu erkennen. Im Verbundgießprozess kam es auf Grund des sehr hohen Temperaturniveaus in der Verbundzone zu partiellen Vermischungen des Aufgusswerkstoffes mit dem Substratwerkstoff (vergleichbar zu Abbildung 7-20). Auch ist hier die Grenzfläche im Werkstoffverbund leicht wellig, was ebenfalls auf das ausgeprägte Aufschmelzen des Substratwerkstoffes in der Verbundgießzone schließen lässt. Die makroskopisch festgestellten Risse auf der AlSn6Cu-Seite reichen lediglich bis zu einer maximalen Tiefe von 0,15 mm in das Verbundblech hinein. Bei der weiteren Verarbeitung zum Gleitlager sind Risse bis in diese Tiefe nicht kritisch, da die AlSn6Cu-Seite noch spanend bearbeitet wird. In allen Schliffen sind keine Gefügeunterbrechungen durch die im Gusszustand vorhandenen Poren zu finden. Diese werden durch die Walzumformung vollständig

beseitigt. Die Schliffe durch die makroskopischen Fehlstellen in den Verbundblechen VB1 und VB2 zeigen sowohl auf der AlSn6Cu-Seite wie auch auf der Al99,5-Seite eine sehr glatte Oberfläche. In diesem Bereich hat keine Verbundbildung stattgefunden.

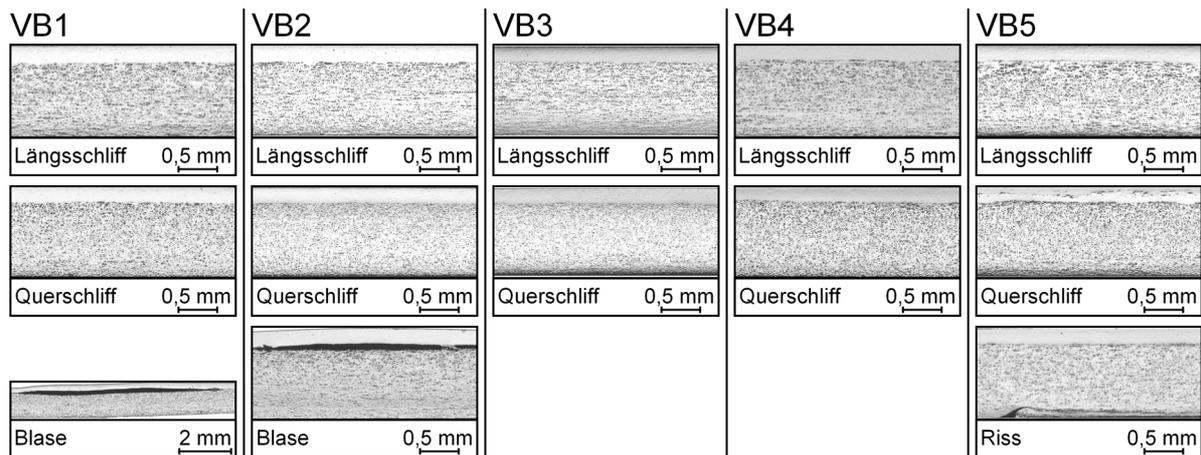


Abbildung 8-3: Übersichtsaufnahmen des Gefüges der thermomechanisch weiterverarbeiteten Verbundbänder

Die Machbarkeit der thermomechanischen Weiterverarbeitung der Verbundstränge konnte nachgewiesen werden. Kleine Fehlstellen im Gussgefüge in der Größenordnung von wenigen Zehntelmillimetern werden durch die Walzumformung eliminiert. Größere Ungängen führen zur Blasenbildung auf der Al99,5-Seite des Verbundblechs. Fehlerfreie Verbundbleche für die Herstellung von zweischichtigen Aluminiumgleitlagern können mit Verbundsträngen der Aufgießdicke 6, 8 und 12 mm prozesssicher erzeugt werden. Für die Weiterverarbeitung sind Verbundstränge mit einem Schichtdickenverhältnis d_1/d_2 von 2 zu bevorzugen, da in der vorgeschalteten spanenden Bearbeitung weniger Spanvolumen anfällt und somit der gesamte Materialausnutzungsgrad steigt. Dementgegen steht die verringerte Prozessrobustheit beim Gießprozess im Vergleich zu einem Gießprozess mit größeren Aufgießdicken.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein neu entwickeltes Verbundgießverfahren auf Basis der horizontalen Stranggießtechnologie zur kontinuierlichen Erzeugung von zweischichtigen Aluminiumverbundsträngen experimentell am Beispiel der Werkstoffkombination AlSn6Cu und Al99,5 untersucht. Das Verfahrensprinzip beruht auf dem Aufgießen von schmelzflüssigem Reinaluminium auf ein erstarrtes AlSn6Cu-Substratband. Ziel war es dabei, das Prozessfenster für die Erzeugung eines stoffschlüssigen Verbundes zwischen den beiden Werkstoffen durch eine systematische Variation der Gieß- und Anlagenparameter zu erarbeiten. Innerhalb der Prozessgrenzen sollten die Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessparametern und dem Temperaturhaushalt im Umformwerkzeug, der sich einstellenden Verbundqualität sowie der Prozessrobustheit ermittelt werden. Zudem sollte die umformtechnische Weiterverarbeitbarkeit der Verbundstränge überprüft werden.

Ein stabiler und robuster Substratbandgießprozess ist eine Grundvoraussetzung für das kontinuierliche Verbundgießen. In einer Basisversuchsreihe wurde zunächst der Substratstranggießprozess der AlSn6Cu-Legierung untersucht. Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Ermittlung der realisierbaren Abziehkinematiken und der möglichen Gießgeschwindigkeiten. Eine sehr stabile Prozessführung kann in einem Gießgeschwindigkeitsbereich von 201 bis 261 mm/min bei der Verwendung einer Go-Stop Abzugsbewegung mit einer Hubweite von 7,5 mm und einer Walzendrehgeschwindigkeit von 0,48 rad/s erreicht werden. Eine Reduzierung der Hubweite oder der Walzendrehgeschwindigkeit wirkt sich negativ auf die Prozessrobustheit aus. Bei der Verwendung einer kontinuierlichen Abzugsbewegung lässt sich kein stabiler Prozess darstellen.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Grundlagenversuchsreihe flossen in die anschließende thermische Analyse des Verbundgießprozesses ein. Mittels analytischer Berechnungen konnten erfolgversprechende Versuchskonfigurationen und sensitive Parameter für den Verbundgießprozess ermittelt werden. Hierbei stellte sich heraus, dass die Aufgießdicke im Vergleich zur Temperatur des Aufgusswerkstoffes und der Gießgeschwindigkeit einen dominierenden Einfluss auf das Temperaturniveau in der

Verbundgießzone hat. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die für eine stoffschlüssige Verbundbildung benötigten thermischen Verhältnisse in der Verbundgießzone im Fall einer Substratstrangdicke von 12 mm mit Aufgießdicken in einem Intervall von 6 bis 12 mm erreicht werden können. Hierzu müssen die Temperatur des Aufgusswerkstoffes und die Gießgeschwindigkeit auf die Aufgießdicke abgestimmt werden.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Grundlagenversuchsreihe und der analytischen Berechnungen wurde im Anschluss der kontinuierliche Verbundgießprozess systematisch untersucht. Hierbei wurden der Einfluss der Abziehkinematik, der Gießgeschwindigkeit, der Aufgießdicke, der Aufgießschlitzbreite, der Temperatur der Aufgusschmelze, des Kühlwasserdurchflusses und der aktiven Kühlzonen auf die thermischen Verhältnisse im Urformwerkzeug, die Ausprägung der Verbundzone, die Bindefestigkeit des Verbundes sowie die Prozessrobustheit analysiert und die Prozessgrenzen der einzelnen Variationsparameter ermittelt. Die Ausprägung der Verbundzone und somit die erreichbare Bindefestigkeit wird maßgeblich von der Abziehkine- matik und den thermischen Verhältnissen in der Verbundgießzone beeinflusst. Ein niedriges Temperaturniveau in der Verbundgießzone führt beim intermittierenden Strangabzug zu zyklisch auftretenden Fehlstellen in der Verbundzone und in Folge dessen zu unzureichenden Bindefestigkeiten. Bei der Verwendung eines kontinuierlichen Strangabzuges wird ein nahezu fehlerfreier Verbund mit Bindefestigkeiten über der Festigkeit des schwächeren Verbundpartners erreicht. Diese Abzugsart kann bei einer horizontalen Stranggießanlage mit Gleitkokille jedoch nicht prozesssicher realisiert werden. Bei der Verwendung des intermittierenden Strangabzuges kann die Verbundqualität durch eine Steigerung des Temperaturniveaus in der Verbundgießzone deutlich verbessert werden. Durch den Anstieg der Temperaturen im Gießwerkzeug sinkt jedoch die Prozessrobustheit. Die Realisierung einer hohen Prozessrobustheit und die Einstellung einer hohen Verbundqualität verhalten sich konträr zueinander. Der Wärmeeintrag in die Kokille kann durch die Erhöhung der Aufgießdicke, der Gießgeschwindigkeit und der Temperatur des Aufgusswerkstoffes gesteigert werden. Die Wärmeabfuhr kann durch die Reduzierung des Kühlwasserdurchflusses und der aktiven Kühlzonen gedrosselt werden. Durch die richtige Abstimmung der einzelnen Prozessparameter aufeinander ist es möglich, nahezu fehlerfreie Verbunde mit einem

Schichtdickenverhältnis Al99,5 zu AlSn6Cu von 0,5 bis 1 in einem hinreichend robusten Prozess herzustellen. Bei einem kleineren Schichtdickenverhältnis erstarrt der Aufgusswerkstoff in den vertikalen Aufgießschlitz zurück, bei einem größeren Schichtdickenverhältnis schmilzt der Substratstrang auf Grund der hohen thermischen Belastung durch.

Abschließend wurde die Machbarkeit der industriellen thermomechanischen Weiterverarbeitung zu Verbundblechen, welche zum Beispiel für die Herstellung von Aluminiumgleitlagern verwendet werden, anhand ausgewählter Verbundbänder nachgewiesen. Die Untersuchungen zeigen, dass sich Verbundstränge mit einer hohen Verbundqualität unabhängig vom verwendeten Schichtdickenverhältnis problemlos weiterverarbeiten lassen. Bei der Verarbeitung von Verbundsträngen mit einer niedrigen Verbundqualität, die Ungängen im Bereich der Verbundzone in der Größenordnung von mehreren Quadratmillimetern aufweisen, bilden sich bei der abschließenden Wärmebehandlung allerdings nicht tolerierbare Blasen auf der Reinaluminiumseite des Verbundbleches.

In der vorliegenden Arbeit wurden das neuentwickelte Verbundgießverfahren für die Werkstoffkombination AlSn6Cu mit Al99,5 qualifiziert und die Wirkzusammenhänge zwischen den Gieß- und Anlagenparametern und der Verbundqualität ermittelt. Auf Basis dieser Erkenntnisse sollte das Verfahren konsequent weiterentwickelt und für den industriellen Einsatz ertüchtigt werden.

Die Prozessgrenzen des bestehenden Verfahrens könnten durch die Substitution des Kühlmediums Wasser mit Öl und der Integration eines Temperiergerätes erweitert werden. Dadurch könnte der Temperaturhaushalt im Urformwerkzeug prozesssicher in einem weiteren Bereich variiert und sensitiver eingestellt werden. Dies eröffnet die Möglichkeit Verbundstränge mit einem kleineren Schichtdickenverhältnis herzustellen und zugleich die Temperatur der Aufgusschmelze auf ein moderates Niveau unter 775 °C zu senken.

Im Zuge der industriellen Umsetzung des Verbundgießverfahrens sollte das verwendete Verbundgießprinzip auf ein Stranggießverfahren mit mitlaufenden Kokillenwänden, wie zum Beispiel das Belt-Caster-Verfahren, übertragen werden. Damit wäre es möglich, die positiven Auswirkungen der kontinuierlichen Abziehkinematik auf die Verbundqualität in einem robusten Prozess zu nutzen.

Im Rahmen weiterführender Untersuchungen könnte das Verbundgießverfahren durch die Anpassung der Anlagentechnik für andere Werkstoffpaarungen und Formaten erüchtigt werden. Hinsichtlich der Werkstoffpaarung sind zum Beispiel Cu-Cu oder Cu-Al Verbundhalbzeuge von großer industrieller Bedeutung. Typische Anwendungsgebiete ergeben sich hierbei in der Elektro- und Elektronikindustrie, wo diese Werkstoffverbunde als Leiter- und Trägerwerkstoffe für die Fertigung von Schaltern, Kontakten und Steckverbindern eingesetzt werden. Bezüglich der Formate der Verbundhalbzeuge ist die Herstellung von ummantelten Rundbolzen oder von Verbundrohren denkbar.

10 Verzeichnisse

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Schematische Darstellung des Stranggießens	3
Abbildung 2-2:	Schematische Darstellung des horizontalen Stranggießens mit ofenabhängiger Gleitkokille	6
Abbildung 2-3:	Schematische Darstellung des Wärmehaushaltes in einer ofenabhängigen Gleitkokille	8
Abbildung 2-4:	Schematische Darstellung verschiedener Abzugsarten	12
Abbildung 2-5:	Einordnung des Verbundgießens in die Gießtechniken zur Fertigung von Verbundwerkstoffen nach [BUCH10, LANG99]	13
Abbildung 2-6:	Einteilung der Verbundgießverfahren nach [LANG99]	14
Abbildung 2-7:	Prinzipskizzen der Verfahrensvarianten des Schwerkraftverbundgießens nach [GUEN00, ISSL95a, LANG99]	16
Abbildung 2-8:	Grenzflächenspannungen bei der Benetzung eines festen Werkstoffes durch eine flüssige Schmelze nach [CHAN06]	18
Abbildung 2-9:	Einflussfaktoren auf die Morphologie der Verbundschicht nach [ISSL95b]	21
Abbildung 2-10:	Kontakttemperatur T_{KF} an der Grenzfläche bei unterschiedlichen Ausgangstemperaturen des Aufgusswerkstoffes T_2 (Al99,5) und des Substrates T_1 (AlSn6Cu) nach Formel 2.2	23
Abbildung 2-11:	Zeitlicher Verlauf der Ausgleichstemperatur an der Kontaktfläche T_{KF} für unterschiedliche Massenverhältnisse zwischen Substrat- und Aufgusswerkstoff in einem geschlossenen System nach [LANG99]	24
Abbildung 2-12:	Erstarrungsablauf beim Verbundgießen für a) das Aufgießen des niedrighschmelzenden Werkstoffes auf den höherschmelzenden und b) umgekehrt nach [ISSL95b, LANG99]	26
Abbildung 2-13:	Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung und der dynamischen Viskosität einer Reinaluminiumschmelze Al99,9 nach [ENGL74a, MEER89]	27

Abbildung 2-14:	Fließ- und Formfüllungsvermögen von Reinaluminium in Abhängigkeit der Gießtemperatur ermittelt mit Gießspirale und Bolzenprobe nach [ENGL74b, KOEL81, LANG72, LANG73]	28
Abbildung 2-15:	Gefüge der Legierung AlSn6Cu im Gusszustand a) und nach der thermomechanischen Weiterverarbeitung b)	29
Abbildung 2-16:	Binäres Phasendiagramm des Systems Al-Sn nach [MCAL83]	30
Abbildung 3-1:	Vorgehensweise	34
Abbildung 4-1:	Stranggießanlage mit Gießofen und Verbundgießeinheit ...	35
Abbildung 4-2:	Längsschnitt durch das Verbundgießwerkzeug nach [NERL12]	37
Abbildung 4-3:	Vorder- und Seitenansicht des Verbundgießwerkzeuges ...	40
Abbildung 4-4:	Isometrie und Längsschnitt der Verbundgießeinheit nach [WIMM10] und [NERL14b]	41
Abbildung 5-1:	Position und Bezeichnung der Temperaturmessstellen im Verbundgießwerkzeug nach [NERL14b]	47
Abbildung 5-2:	Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU) bei unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten (H = 7,5 mm; $\omega = 0,48$ rad/s)	48
Abbildung 5-3:	Ausprägung der Oberfläche der Substratbandoberseite bei unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten (H = 7,5 mm; $\omega = 0,48$ rad/s)	50
Abbildung 5-4:	Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU) bei unterschiedlichen Abziehkinematiken ($v_g = 235$ mm/min) und stationären Gießbedingungen	52
Abbildung 5-5:	Ausprägung der Oberfläche der Substratbandoberseite bei unterschiedlichen Abziehkinematiken ($v_g = 235$ mm/min)	53
Abbildung 6-1:	Schema der zu- und abfließenden Wärmeströme zur Abschätzung des Temperaturhaushaltes im Substratstrang	56

Abbildung 6-2:	Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Aus}}$ in Abhängigkeit der Dicke des Aufgusstranges d_2 und der Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Ein}}$ bei einer Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss} von 800 °C	59
Abbildung 6-3:	Austrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Aus}}$ in Abhängigkeit der Gießtemperatur des Aufgusswerkstoffes T_{Aufguss} und der Dicke des Aufgusstranges d_2 bei einer Eintrittstemperatur des Substratwerkstoffes $T_{\text{Sub,Ein}}$ von 400 °C	61
Abbildung 7-1:	Variationsparameter beim kontinuierlichen Verbundgießen	64
Abbildung 7-2:	Entnahmepositionen der Proben für die metallographischen Untersuchungen und Bindefestigkeitsprüfungen	67
Abbildung 7-3:	Scherzugprobengeometrie und Einbaulage in der Prüfmaschine	68
Abbildung 7-4:	Chalmersprobe und Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Bindefestigkeit in Anlehnung an [DIN4386]	70
Abbildung 7-5:	Einfluss der Lage der Chalmersproben zu den Hubmarken auf Höchstkraft und ermittelte Bindefestigkeit R_{Ch} ..	71
Abbildung 7-6:	Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)	74
Abbildung 7-7:	Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Temperaturverläufe in den oberen Kokillenplatten (KO)	75
Abbildung 7-8:	Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Gefügeausprägung in der Verbundzone (Übersichtsaufnahme und Mikrostruktur)	76
Abbildung 7-9:	Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}	77
Abbildung 7-10:	Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Ausprägung der Bruchfläche (Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts)) bei der Scherzugprüfung	77
Abbildung 7-11:	Einfluss der Abziehkinematik – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)	80
Abbildung 7-12:	Einfluss der Abziehkinematik – Gefügeausprägung in der Verbundzone	83

Abbildung 7-13:	Einfluss der Abziehkinematik – Schematische Temperaturverläufe auf der Oberseite des Substratstranges vor der Verbundgießzone am Ende der Wartezeit (links) und beim Eintritt in die Verbundgießzone während des Ziehhubes (rechts).....	85
Abbildung 7-14:	Einfluss der Abziehkinematik – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}	86
Abbildung 7-15:	Einfluss der Abziehkinematik – Ausprägung der Bruchfläche bei der Scherzugprüfung	87
Abbildung 7-16:	Einfluss der Gießgeschwindigkeit – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)	90
Abbildung 7-17:	Einfluss der Gießgeschwindigkeit – Gefügeausprägung in der Verbundzone	92
Abbildung 7-18:	Einfluss der Gießgeschwindigkeit – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}	93
Abbildung 7-19:	Einfluss der Aufgießdicke – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)	96
Abbildung 7-20:	Einfluss der Aufgießdicke – Gefügeausprägung in der Verbundzone.....	98
Abbildung 7-21:	Einfluss der Aufgießdicke – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}	99
Abbildung 7-22:	Einfluss der Aufgießschlitzbreite – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)	102
Abbildung 7-23:	Einfluss der Aufgießschlitzbreite – Gefügeausprägung in der Verbundzone.....	103
Abbildung 7-24:	Einfluss der Aufgießschlitzbreite – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}	104
Abbildung 7-25:	Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU) ..	106
Abbildung 7-26:	Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze – Gefügeausprägung in der Verbundzone	107
Abbildung 7-27:	Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}	108

Abbildung 7-28:	Einfluss des Kühlwasserdurchflusses – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU).....	111
Abbildung 7-29:	Einfluss des Kühlwasserdurchflusses – Gefügeausprägung in der Verbundzone.....	112
Abbildung 7-30:	Einfluss des Kühlwasserdurchflusses – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}	113
Abbildung 7-31:	Einfluss der aktiven Kühlzonen – Temperaturverläufe in den unteren Kokillenplatten (KU)	115
Abbildung 7-32:	Einfluss der aktiven Kühlzonen – Temperaturverläufe in den oberen Kokillenplatten (KO).....	116
Abbildung 7-33:	Einfluss der aktiven Kühlzonen – Gefügeausprägung in der Verbundzone	117
Abbildung 7-34:	Einfluss der aktiven Kühlzonen – Scherfestigkeit τ und maximale Bindefestigkeit R_{Ch}	118
Abbildung 8-1:	Gefügeausprägung im Gusszustand der Verbundbänder für die thermomechanische Weiterverarbeitung.....	125
Abbildung 8-2:	Oberfläche der Verbundstränge nach der thermomechanischen Weiterverarbeitung.....	127
Abbildung 8-3:	Übersichtsaufnahmen des Gefüges der thermomechanisch weiterverarbeiteten Verbundbänder.....	129
Abbildung 11-1:	Verlauf der aufgenommenen Umwandlungsenthalpie während dem Aufschmelzen der Legierung AlSn6Cu.....	157
Abbildung 11-2:	Verlauf des Festphasenanteils während der Erstarrung der Legierung AlSn6Cu nach [KASC01]	158

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Gliederung der Stranggießverfahren nach [BRAU94, KRAL78, NERL14b, RICK08, SCHW57].....	4
Tabelle 2-2:	Einflussgrößen auf die Wärmeleitung vom Strang zum Kühlmedium nach [RIED12].....	10
Tabelle 2-3:	Chemische Zusammensetzung von Reinaluminium Al99,5 in Massenprozent nach [DIN573].....	26
Tabelle 2-4:	Chemische Zusammensetzung der Legierung AlSn6Cu in Massenprozent nach [DIN4383].....	30
Tabelle 5-1:	Gieß- und Anlagenparameter bei den Versuchsreihen zur Bestimmung des Prozessfensters für den Substratbandgießprozess	46
Tabelle 7-1:	Versuchsreihen zum kontinuierlichen Verbundgießen	66
Tabelle 7-2:	Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse – Gieß- und Anlagenparameter	73
Tabelle 7-3:	Einfluss der Abziehkinematik – Gieß- und Anlagenparameter	79
Tabelle 7-4:	Einfluss der Gießgeschwindigkeit – Gieß- und Anlagenparameter	88
Tabelle 7-5:	Einfluss der Aufgießdicke – Gieß- und Anlagenparameter.....	94
Tabelle 7-6:	Einfluss der Aufgießschlitzbreite – Gieß- und Anlagenparameter	100
Tabelle 7-7:	Einfluss der Temperatur der Aufgusschmelze – Gieß- und Anlagenparameter.....	105
Tabelle 7-8:	Einfluss des Kühlwasserdurchflusses – Gieß- und Anlagenparameter	110
Tabelle 7-9:	Einfluss der aktiven Kühlzonen – Gieß- und Anlagenparameter	114
Tabelle 7-10:	Prozessfenster für das kontinuierliche Verbundgießen von AlSn6Cu und Al99,5 im intermittierenden Strangabzug ($H = 7,5 \text{ mm}$; $\omega = 0,48 \text{ rad/s}$)	119

Tabelle 7-11:	Qualitative Bewertung des Einflusses der Gieß- und Anlagenparameter auf die Qualität des Verbundes und die Prozessrobustheit.....	123
Tabelle 8-1:	Gieß- und Anlagenparameter beim Verbundgießprozess sowie ermittelte Bindefestigkeiten im Gusszustand der zur thermomechanischen Weiterverarbeitung verwendeten Verbundbänder (VB).....	124
Tabelle 8-2:	Thermomechanische Verfahrensrouten bei der Weiterverarbeitung der Verbundstränge	126
Tabelle 11-1:	Temperaturabhängige thermophysikalische Daten von Reinaluminium nach [KAMM02, NERL14b, PEHL82]	155
Tabelle 11-2:	Temperaturabhängige thermophysikalische Daten der Legierung AlSn6Cu nach [KASC01]	156

10.3 Literaturverzeichnis

- [AFFE96] Affenzeller, J.; Gläser, H.:
Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren.
Springer, Wien, ISBN 3-211-82577-0, 1996.
- [BACK09] Backhaus, R.:
Trends in der Antriebstechnik.
In: MTZ – Motortechnische Zeitschrift 70 (9), S. 618–625, 2009.
- [BAUM00] Baumgartner, R.:
Bandgießen von Kupfer-Zinn-Knetlegierungen mit thermisch isolierter Kokille.
Dissertation, Technische Universität München, 2000.
- [BAY85] Bay, N.:
Friction and Adhesion in Metal Forming and Cold Welding.
Dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1985.
- [BERG01] Bergmann, W.:
Werkstofftechnik 2.
Carl Hanser, München, 3. Auflage, ISBN 3-446-21639-1, 2001.
- [BERG03] Bergmann, W.:
Werkstofftechnik 1.
Carl Hanser, München, 5. Auflage, ISBN 3-446-22576-5, 2003.
- [BOBZ13] Bobzin, K.:
Oberflächentechnik für den Maschinenbau.
Wiley-VCH, Weinheim, ISBN 978-3-527-33018-8, 2013.
- [BOEH87] Böhmer, J. R.:
Mathematisches Modell für das System Strang-Strangkühlung beim Strangguß von Metallen.
Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, 1987.
- [BRAU94] Braun, P.:
Bandgießen von Zinnbronze mit einer Horizontal-Stranggießmaschine.
Dissertation, RWTH Aachen, 1994.
- [BUCH10] Buchmayr, B.; Weligoschek, T.:
Untersuchungen zum Verbundgießen warmfester Legierungen.
In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 155 (7), S. 318–324, 2010.

- [BUNG72] Bungardt, K.; Schürmann, E.; Preisendanz, H.; Schüler, P.; Erckes, H. W.; Fuchs, D.:
Beitrag zur Ermittlung des instationären Temperaturverlaufes in Guß und Kokille bei der Herstellung von Verbundrohren nach dem Schleudergießverfahren.
In: Gießerei-Forschung 24 (4), S. 165–169, 1972.
- [CHAN06] Chan, C.; Venkatraman, S.:
Coating Rheology.
In: Tracton, A. (Hrsg.): Coatings Technology Handbook. CRC Press, Boca Raton, ISBN 978-1-57444-649-4, S. 2-1–2-14, 2006.
- [DAHM80] Dahmen, G.:
Über die Wirkung des variierten intermittierenden Abzugs und des Ultraschalls beim horizontalen Stranggießen unter Beachtung der Abzugskräfte.
Dissertation, Technische Universität München, 1980.
- [DAMM09] Damm, K.; Höne, W.; Reinicke, R.; Skiadas, A.:
Gleitlager im Automobil.
Verlag Moderne Industrie, Landsberg, ISBN 978-3-937889-93-1, 2009.
- [DAVI93] Davis, J. R.:
Aluminum and Aluminum Alloys.
ASM International, Materials Park, USA, ISBN 0-87170-496-X, 1993.
- [DEIC02] Deicke, K.; Matucha, H.; Schubert, W.; Steffens, T.:
KS R41B – Ein Stahl-Aluminium-Verbundwerkstoff für hohe Belastungen.
In: MTZ – Motortechnische Zeitschrift 63 (7), S. 632–635, 2002.
- [ENGL74a] Engler, S.; Ellerbrok, R.:
Messung der Oberflächenspannung flüssiger Aluminiumlegierungen.
In: Gießerei-Forschung 26 (2), S. 43–48, 1974.
- [ENGL74b] Engler, S.; Ellerbrok, R.:
Über das Formfüllungsvermögen flüssiger Metalle.
In: Gießerei-Forschung 26 (2), S. 50–62, 1974.
- [ENGL81] Engler, S.:
Eigenschaften des fließenden und erstarrenden Metalls.
In: Erstarrung metallischer Schmelzen – Vorträge des Symposiums der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde, Oberursel, ISBN 3-88355-052-3, S. 7–29, 1981.
- [FRAG08] Fagner, W.; Papis, K.; Uggowitz, P.; Wosik, J.:
Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten bei der Herstellung von Verbundgussbauteilen.
In: Gießerei-Praxis, Heft 1–2, S. 243–248, 2008.

- [GOLL05] Golloch, R.:
Downsizing bei Verbrennungsmotoren – Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung.
Springer, Berlin, ISBN 978-3-540-23883-6, 2005.
- [GRIT11] Grittner, N.; von Senden genannt Haverkamp, H.; Stelling, O.; Striewe, B.; Bormann, D.; Schimanski, K.; Nikolaus, M.; von Hehl, A.; Bach, Fr.-W.; Zoch, H.-W.:
Verbundstrangpressen von Titan-Aluminium-Verbindungen.
In: Wielage, B. (Hrsg.): Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde – 18. Symposium: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde in Chemnitz 2011. Eigenverlag, Chemnitz, ISBN 978-3-00-033801-4, S. 405–412, 2011.
- [GROC14] Groche, P.; Wohletz, S.; Brenneis, M.; Pabst, C.; Resch, F.:
Joining by forming – A review on joint mechanisms, applications and future trends.
In: Journal of Materials Processing Technology 214, S. 1972–1994, 2014.
- [GUEN00] Günter, A.:
Gießtechnisch gradierte Werkstoffverbunde.
Dissertation, RWTH Aachen, 2000.
- [GZOV10] Gzovskyy, K.; Tonn, B.; Schwarze, H.:
Entwicklung innovativer Gleitlagerwerkstoffe auf Al-Bi-Basis.
In: VDI Berichte 2109, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel – Innovative Systeme im Vergleich, VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN 978-3-18-092109-9, S. 69–78, 2010.
- [HADD77] Hadden, R.; Indyk, B.:
Heat-transfer characteristics in closed head horizontal continuous casting.
In: Proceedings of the International Conference on Solidification, Sheffield, UK, S. 250–255, 1977.
- [HAGA00] Haga, T.; Suzuki, S.:
Casting of clad strip using a twin roll caster.
In: Hayhurst, D. R. (Hrsg.): Proceedings of the 33rd International Matador Conference. Springer, London, ISBN 978-1-4471-1200-6, S. 295–300, 2000.
- [HAGA03] Haga, T.; Suzuki, S.:
A twin-roll caster to cast clad Strip.
In: Journal of Materials Processing Technology 138, S. 366–371, 2003.
- [HAGA09] Haga, T.; Nakamura, R.; Kumai, S.; Watari, H.:
Clad strip casting by a twin roll caster.
In: Archives of Materials Science and Engineering 37, S. 117–124, 2009.

- [HARN65] Harnisch, A.; Buchholz, F.; Hillebrand, F.:
Ein neu entwickelter Verbundgussstahl für auf Verschleiß beanspruchte Anlagen.
In: Werkstoffe und Korrosion, Heft 3, S. 185–189, 1965.
- [HART89] Hartmann, D.:
Erstarrung binärer Kupferlegierungen beim horizontalen Stranggießen in Graphitkokille.
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, Nr. 158, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-18-145805-8, 1989.
- [HART92a] Hartmann, D.; Engler, S.:
Erstarrungsverhalten von Cu-Legierungen beim horizontalen Stranggießen, Teil I.
In: Metall 46 (2), S. 139–144, 1992.
- [HART92b] Hartmann, D.; Engler, S.:
Erstarrungsverhalten von Cu-Legierungen beim horizontalen Stranggießen, Teil II.
In: Metall 46 (4), S. 333–340, 1992.
- [HASS07] Hasse, S.:
Giesserei-Lexikon.
Schiele & Schön, Berlin, 19. Auflage, ISBN 3-7949-0753-1, 2007.
- [HERF07] Herfurth, K.:
Urformen.
In: Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer, Berlin, 22. Auflage, ISBN 978-3-540-49714-1, S. 1139–1155, 2007.
- [HERR58] Herrmann, E.:
Handbuch des Stranggießens.
Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1958.
- [HERR80] Herrmann, E.; Hoffmann, D.:
Handbook on Continuous Casting.
Aluminium-Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-87017-134-0, 1980.
- [HERZ68] Herzog, U.; Rönigk, B.; Voßkühler, H.:
Probleme der Wärmeabfuhr beim Stranggießen von Kupfer.
In: Zeitung Metallkunde, Band 59, Heft 2, 1968.
- [HERZ69] Herzog, U.; Rönigk, B.; Voßkühler, H.:
Untersuchungen über den Spalt beim Stranggießen von Kupfer.
In: Zeitung Metallkunde, Band 60, Heft 7, 1969.
- [HOFM04] Hofmann, H.; Spindler, J.:
Verfahren der Oberflächentechnik.
Carl Hanser, München, ISBN 3-446-22228-6, 2004.

- [HOFM92] Hofmann, M.:
Gekoppeltes mathematisches Modell für das Stranggießen von NE-Metall-Rechteckformaten.
Dissertation, Universität Siegen, 1992.
- [HOLL83] Holleis, G.; Haissing, M.; Stadler, P.:
Horizontalstranggießtechnik.
In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 128 (3), S. 65–71, 1983.
- [HOLZ85] Holz, H.-T.:
Konstruktion einer ofenabhängigen Metallkokille für endabmessungsnahe Gießen von Aluminium-Bändern.
Dissertation, Technische Universität München, 1985.
- [ISSL95a] Ißleib, A.; Friedel, A.; Lubojanski, I.:
Verbundgießen von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen – grundlegende metallurgische Reaktionen an der Grenzfläche – Teil I.
In: Gießerei-Praxis 15/16, S. 286–289, 1995.
- [ISSL95b] Ißleib, A.; Friedel, A.; Lubojanski, I.:
Verbundgießen von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen – grundlegende metallurgische Reaktionen an der Grenzfläche – Teil II.
In: Gießerei-Praxis 23/24, S. 442–447, 1995.
- [KAME65] Kamensky, R.; Stepanek, R.:
Herstellung von legierten Verbund-Hartgußwalzen für Bandwalzstraßen.
In: Gießereitechnik, Jahrgang 11, Heft 8, S. 239–244, 1965.
- [KAMM02] Kammer, C.:
Aluminium-Taschenbuch. Bd. 1: Grundlagen und Werkstoffe.
Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 16. Auflage, ISBN 3-87017-274-6, 2002.
- [KASC02] Kaschnitz, E.; Romansky, M.; Mergen, R.:
Numerical simulation of the temperature distribution in a continuous casting process for the production of AlSn(Cu) alloys.
In: High Temperatures – High Pressures 34, S. 699–704, 2002.
- [KAWA01] Kawalla, R.; Spittel, M.; Schmidtchen, M.:
Übersicht über Plattiervorgänge und Möglichkeiten der Eigenschaftsgestaltung.
In: Hirsch, J. (Hrsg.): Walzen von Flachprodukten. WILEY-VCH, Weinheim, ISBN 3-527-30322-7, S. 8–17, 2001.
- [KIND95] Kindler, A.:
Feinkorngraphite.
Verlag Moderne Industrie, Landsberg, ISBN 3-478-93140-1, 1995.
- [KNAU78] Knauscher, A.:
Oberflächenveredeln und Plattieren von Metallen.
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978.

- [KOEL81] Kölling, M.; Straub, J.; Grigull, U.:
Das Fließ- und Formfüllungsvermögen reiner Metalle – Modellvorstellung und quantitative Beschreibung.
In: Metall 35 (1), S. 30–37, 1981.
- [KRAL78] Krall, H. A.; Koch H. A.:
Konstruktionsmerkmale horizontaler Stranggießanlagen.
In: Stranggießen. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, Oberursel, S. 217–230, 1978.
- [LANG10] Langbein, F.; Mergen, R.:
Neue Materialien für ein ganzheitliches Gleitlagerkonzept für Hochleistungsmotore.
In: VDI Berichte 2109, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel – Innovative Systeme im Vergleich, VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN 978-3-18-092109-9, S. 57–68, 2010.
- [LANG14] Langbein, F.; Anders, K.; Mittler, T.; Pintore, M.; Wimmer, M.; Heugenhauser, S.; Kaschnitz, E.:
Aluminium Gleitlager der Zukunft – Innovation durch einen neuen Halbzeug Fertigungsprozess.
In: Chimani, C. M.; Kraly, A.; Uggowitz, P. J. (Hrsg.): 8. Ranshofener Leichtmetalltage – Leichtmetalle - Prozesse - Anwendungen: Zukunftstechnologien als Basis für neue Mobilitätskonzepte. Aumayer Druck und Verlagsges.m.b.H. & Co KG, Munderfing, ISBN 978-3-902092-08-3, S. 60–73, 2014.
- [LANG72] Lang, G.:
Gießereigenschaften und Oberflächenspannung von Aluminium und binären Aluminiumlegierungen – Teil I: Fließvermögen.
In: Aluminium 48, S. 664–672, 1972.
- [LANG73] Lang, G.:
Gießereigenschaften und Oberflächenspannung von Aluminium und binären Aluminiumlegierungen – Teil II: Formfüllungsvermögen.
In: Aluminium 49, S. 170–174, 1973.
- [LANG88] Lange, K.; Gebur, W.:
Schichtgießtechnik zur ökonomischen Herstellung von extrem hochbeanspruchten Maschinen und Verschleißteilen.
In: Gießereitechnik, Jahrgang 34, Heft 3, S. 81–85, 1988.
- [LANG89] Lange, K.:
Werkstoffkombinationen – Einsatzmöglichkeiten durch Verbundgießtechnik.
In: Gießereitechnik, Jahrgang 35, Heft 11, S. 355–361, 1989.

- [LANG97] Lange, A.; Ißleib, A.:
Verbundgießen – Weg zur optimalen Werkstoffanpassung an den Verwendungszweck.
In: VDI Berichte 1324, Fortschritt in Gusskonstruktion '97, VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-18-091324-X, S. 133–152, 1997.
- [LANG99] Lange, A.:
Verbundgießen für Anwendungen in der Verschleißtechnik.
Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1999.
- [LEHN09] Lehnert, W.:
Umformen von Aluminium-Werkstoffen.
In: Aluminium-Zentrale (Hrsg.): Aluminium-Taschenbuch. Bd. 2: Umformen von Aluminium-Werkstoffen, Gießen von Aluminium-Teilen, Oberflächenbehandlung von Aluminium, Recycling und Ökologie.
Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 16. Auflage, ISBN 978-3-87017-293-0, S. 1–219, 2009.
- [LENA07] Lenard, J. G.:
Primer on Flat Rolling.
Elsevier, Oxford, UK, ISBN 978-0-08-045319-4, 2007.
- [LIU14] Liu, N.; Jie, J.; Lu, Y.; Wu, L.; Fu, Y.; Li, T.:
Characteristics of clad aluminium hollow billet prepared by horizontal continuous casting.
In: Journal of Materials Processing Technology 214, S. 60–66, 2014.
- [MADA02] Madaah-Hosseini, H. R.; Kokabi, A. H.:
Cold roll bonding of 5754-aluminum strips.
In: Materials Science and Engineering A 335, S. 186–190, 2002.
- [MANN77] Mann, G.:
Herstellung und Weiterverarbeitung stranggegossener Aluminium/Zinn Bänder für Gleitlager.
In: Metall 31 (7), S. 723–725, 1977.
- [MANN78] Mann, G.:
Herstellen von Bändern aus Aluminium/Zinn-Lagerwerkstoffen im horizontalen Stranggießverfahren.
In: Stranggießen. Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel, S. 245–250, 1978.
- [MARU06] Marukovich, E. I.; Branovitsky, A. M.; Na, Y.-S.; Lee, J.-H.; Choi, K.-Y.:
Study on the possibility of continuous-casting of bimetallic components in condition of direct connection of metals in a liquid state.
In: Materials and Design 27, S. 1016–1026, 2006.

- [MASS90] Massalski, T. B.; Okamoto, H.; Subramanian, P. R.; Kacprzak, L.:
Binary Alloy Phase Diagrams, Vol. 1.
ASM International, Materials Park, USA, 2nd Edition, ISBN 0-87170-404-8, S. 215–216, 1990.
- [MCAL83] McAlister, A.J.; Kahan, D.J.:
The Al-Sn (Aluminum-Tin) System.
In: Bulletin of Alloy Phase Diagrams, Vol. 4, Issue 4, S. 410–414, 1983.
- [MEER89] Meelender, G.:
Viskosität.
In: Blanke, W. (Hrsg.): Thermophysikalische Stoffgrößen. Springer, Berlin, ISBN 3-540-18495-3, S. 137–150, 1989.
- [NERL10] Nerl, C.; Wimmer, M.; Riedel, S.; Hoffmann, H.; Hofer, P.:
Simulationsgestützte Verfahrensentwicklung zum Verbundgießen von Aluminiumwerkstoffen.
In: Müller, H. R. (Hrsg.): Stranggießen: Vortragstexte des Symposiums Stranggießen. Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt, ISBN 978-3-88355-384-9, S. 93–98, 2010.
- [NERL12] Nerl, C.; Wimmer, M.; Hofer, P.; Kaschnitz, E.:
Design of a Mould System for Horizontal Continuous Casting of Bilayer Aluminium Strips.
In: Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 68, Paris, France, eISSN 2010-3778, S. 1562–1567, 2012.
- [NERL14a] Nerl, C.; Wimmer, M.; Hoffmann, H.; Kaschnitz, E.; Langbein, F.; Volk, W.:
Development of a continuous composite casting process for the production of bilayer aluminium strips.
In: Journal of Materials Processing Technology 214, S. 1445–1455, 2014.
- [NERL14b] Nerl, C.:
Simulationsgestützte Verfahrensentwicklung zum kontinuierlichen Verbundgießen von Aluminiumhalbzeugen.
Dissertation, Technische Universität München, 2014.
- [OECH99] Oechsle, M.:
Langfaserverstärkte Keramiken für Bauteilkomponenten in NE-Metallgießereien.
Dissertation, Technische Universität München, 1999.
- [PAPI08] Papis, K.; Hallstedt, B.; Löffler, J.; Uggowitzer, P.:
Interface formation in aluminium-aluminium compound casting.
In: ActaMaterialia 56, S. 3036–3043, 2008.

- [PEHL82] Pehlke, R. D.; Jeyarajan, A.; Wada, H.:
Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials.
University of Michigan, Ann Arbor, USA, 1982.
- [PELZ00] Pelz, C.:
Verbundgußverfahren zur Herstellung belastungsangepaßter Werkzeuge am Beispiel des Gesenkschmiedens.
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 557, VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-18-355702-9, 2000.
- [PETZ94] Petzow, G.:
Metallographisches, keramographisches, plastographisches Ätzen.
Bornträger, Berlin, 6. Auflage, ISBN 3-443-23014-8, 1994.
- [PREN00] Prenger, F.:
Beitrag zum horizontalen ein- und zweischaligen Dünnbandgießen von Kupfer und Kupferbasislegierungen.
Dissertation, RWTH Aachen, 2000.
- [RICK08] Ricken, H. F.:
Stranggießen mit Flüssigmetall als Wärmekopplung zwischen Kokille und Kühler.
Dissertation, Technische Universität München, 2008.
- [RIED12] Riedel, S.:
Untersuchungen zur Gefügeoptimierung beim horizontalen Stranggießen von CuZn37.
Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [SCHM04a] Schmidtchen, M.:
Walzplattieren von flächigen Mehrlagenverbunden – Experiment und Theorie.
In: Kawalla, R. (Hrsg.): MEFORM 2004: Technologie der Werkstoffverbundherstellung durch Umformen. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, ISBN 3-86012-221-5, S. 29–35, 2004.
- [SCHM04b] Schmidtchen, M.:
Die Haftfestigkeit von Walzplattierungen, deren Bestimmung und Simulation.
In: Kawalla, R. (Hrsg.): MEFORM 2004: Technologie der Werkstoffverbundherstellung durch Umformen. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, ISBN 3-86012-221-5, S. 81–110, 2004.
- [SCHM96] Schmidt, W.:
Entwicklung und Erprobung einer neuartigen Kokille für das horizontale Stranggießen von Aluminium.
Dissertation, Technische Universität München, 1996.

-
- [SCHU01] Schüler, H.:
Simulation von Lötprozessen beim Metall-Keramik-Löten.
Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2001.
- [SCHW57] Schwarzmaier, W.:
Stranggießen – Entwicklung und Anwendung.
Berliner Union GmbH, Stuttgart, 1957.
- [SEIF76] Seifert, J.:
Über den Einfluss der Ultraschall-Erregung einer horizontalen
Stranggießkokille auf Gießbedingungen und Eigenschaften der ge-
gossenen Stränge bei differenzierten Abzugsverhältnissen.
Dissertation, Technische Universität München, 1976.
- [SIGG03] Siggenauer, T. K.:
Simulationsgestützte Prozessoptimierung beim horizontalen Strang-
gießen von Kupfer-Zinn-Legierungen.
Dissertation, Technische Universität München, 2003.
- [SIMS09] Simsir, M.; Kumruoglu, L. C.; Özer; A.:
An investigation into stainless-steel/structural alloy-steel bimetal
produced by shell mould casting.
In: Materials and Design 30, S. 264–270, 2009.
- [SOMM10] Sommerhofer, H.; Sommerhofer P.:
Wasserkühlung beim Stranggießen – Ein Muss?.
In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 155 (1), S. 12–16,
2010.
- [TONN08] Tonn, B.; Gzovskyy, K.; Schwarze, H.; Swoboda, S.; Palkowski, H.;
Rudolph, K.:
Entwicklung innovativer Gleitlagerwerkstoffe auf Al-Bi-Basis (Teil1).
In: Tribologie und Schmierungstechnik 55 (6), S. 5–8, 2008.
- [WAGS06] Wagstaff, R. B.; Lloyd, D. J.; Bischoff, T.F.:
Direct Chill Casting of CLAD Ingot.
In: Materials Science Forum 519–521, S. 1809–1814, 2006.
- [WEBE83] Weber, J.:
Über den Einfluss der beim horizontalen Stranggießen von
NE-Metallen wirksamen Parameter und deren Optimierung.
Dissertation, Technische Universität München, 1983.
- [WEIS86] Weiß, K.:
Temperaturfeldberechnung bei Erstarrungsvorgängen unter Be-
rücksichtigung des Einfüllvorganges.
Dissertation, RWTH Aachen, 1986.

- [WILH04] Wilhelm, M.; Neuhaus, P.:
Anwendung von metallischen Werkstoffverbunden der Firma Federal-Mogul im Fahrzeugbau.
In: Kawalla, R. (Hrsg.): MEFORM 2004: Technologie der Werkstoffverbundherstellung durch Umformen. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, ISBN 3-86012-221-5, S. 11–22, 2004.
- [WIMM10] Wimmer, M.; Nerl, C.; Riedel, S.; Hoffmann, H.:
Herstellung von Aluminium-Verbundwerkstoffen im horizontalen Strangguss.
In: Müller, H. R. (Hrsg.): Stranggießen: Vortragstexte des Symposiums Stranggießen. Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt, ISBN 978-3-88355-384-9, S. 39–44, 2010.
- [WOLF92] Wolf, M. M.:
Erstarrungsgeschwindigkeit beim Strangguß.
In: Schwerdtfeger, K. (Hrsg.): Metallurgie des Stranggießens. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, ISBN 3-514-00350-5, S. 256–300, 1992.
- [YAN04] Yan, H.; Lenard, J. G.:
A study of warm and cold roll-bonding of an aluminium alloy.
In: Materials Science and Engineering A 385, S. 419–428, 2004.
- [ZEUN98] Zeuner, T.; Sahm, P. R.:
Entwicklung gegossener lokal verstärkter Leichtbaubremsscheiben für den schnellfahrenden Schienenverkehr (Teil 1. Verfahrensbeschreibung).
In: Giesserei 85 (2), S. 39–47, 1998.
- [ZHAN09] Zhang, W.; Gao, J.; Rohatgi, P.; Zhao, H.; Li, Y.:
Effect of the depth of the submerged entry nozzle in the mold on heat, flow and solution transport in double-stream-pouring casting.
In: Journal of Materials Processing Technology 209, S. 5536–5544, 2009.
- [ZHAN98] Zhang, W.; Zhu, C.; Wie, X.; Meng, J.; Yuan, S.; Yu, G.:
Double-stream-pouring technique for production of gradient materials by continuous casting.
In: Chinese Science Bulletin 43, S. 911–914, 1998.

10.4 Normen und Richtlinien

- [DIN14869] DIN EN 14869-2
Strukturklebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen – Teil 2: Scherprüfung für dicke Füge­teile.
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 07/2011.
- [DIN4383] DIN ISO 4383
Gleitlager – Verbundwerkstoffe für dünnwandige Gleitlager.
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 02/2001.
- [DIN4386] DIN ISO 4386-2
Metallische Verbundgleitlager – Zerstörende Prüfung der Bindung für Lagermetall-Schichtdicken ≥ 2 mm.
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 10/1982.
- [DIN573] DIN EN 573-3
Aluminium und Aluminiumlegierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug – Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen.
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 12/2013.
- [DIN60584-1] DIN EN 60584-1
Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen.
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 07/2014.
- [DIN7500-1] DIN EN ISO 7500-1
Metallische Werkstoffe – Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen – Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen – Prüfung und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung.
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 05/2014.
- [DIN8580] DIN 8580
Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 09/2003.
- [DIN8593] DIN 8593
Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 12/1967.

10.5 Sonstige Quellen

- [KASC01] Kaschnitz, E.:
Projektbericht 41.300/1. Österreichisches Gießerei-Institut, Leoben,
Österreich, 2001.
- [NABE05] N.N.:
Gebrauchsanleitung Labor-Kipptiegelöfen K 1/10 – K 4/13.
Nabertherm GmbH, Lilienthal, 2005.
- [ZEIS05] N.N.:
AxioCam HR – Die High Resolution-Kamera für digitale Dokumen-
tation.
Carl Zeiss Lichtmikroskopie, Göttingen, 2005.
- [ZWIC07] N.N.:
Betriebsanleitung Zwick DUPS.
Zwick Materialprüfung GmbH, Ulm, 2007.

10.6 Studienarbeiten

Die nachfolgend aufgelisteten Studienarbeiten wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München angefertigt. Die Bearbeitung und Aufgabenstellung sowie die Auswertung, Interpretation und Darstellung von Ergebnissen, die zum Teil in die vorliegende Dissertation einfließen, erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung des Betreuers Martin Wimmer.

- Herreiner, D.: Experimentelle Untersuchungen zum Verbundgießen von Aluminiumwerkstoffen. Semesterarbeit, Technische Universität München, 2010.
- Kramer, M.: Bindefestigkeitsprüfmethoden für Aluminiumverbundgussproben. Semesterarbeit, Technische Universität München, 2013.
- Mittler, T.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung eines Aufgießkonzepts für das kontinuierliche Verbundgießen auf einer Bandgießanlage. Masterarbeit, Technische Universität München, 2014.

11 Anhang

11.1 Thermophysikalische Daten von Reinaluminium Al99,5

<i>Temperatur</i> [°C]	<i>Dichte ρ</i> [kg/m ³]	<i>spez. Wärmekapazität c_p</i> [J/(kgK)]	<i>Wärmeleitfähigkeit λ</i> [W/(mK)]
20	2699	890	236
100	2684	938	239
200	2664	985	238
300	2642	1031	233
400	2619	1070	228
500	2595	1123	222
600	2569	1169	215
660	2550	1240	211
661	2370	1040	91
700	2364	1040	92
800	2333	1060	95

Tabelle 11-1: Temperaturabhängige thermophysikalische Daten von Reinaluminium nach [KAMM02, NERL14b, PEHL82]

Reinaluminium erstarrt bei einer Temperatur von 660,2 °C. Bei der Erstarrung wird eine spezifische Phasenumwandlungsenthalpie von 397,5 kJ/kg freigesetzt. [ENGL81, PEHL82]

11.2 Thermophysikalische Daten der Legierung AlSn6Cu

<i>Temperatur</i> [°C]	<i>Dichte ρ</i> [kg/m ³]	<i>spez. Wärmekapazität c_p</i> [J/(kgK)]	<i>Wärmeleitfähigkeit λ</i> [W/(mK)]
25	2804	856	201
100	2790	884	202
200	2769	923	200
300	2747	963	197
400	2724	1007	196
500	2699	1060	195
600	2563	1101	160
638	2511	1117	90
800	2452	1117	90

Tabelle 11-2: Temperaturabhängige thermophysikalische Daten der Legierung AlSn6Cu nach [KASC01]

Das Erstarrungsintervall der Legierung AlSn6Cu erstreckt sich von 638 bis 227 °C. Bei der Erstarrung wird eine spezifische Phasenumwandlungsenthalpie von 364,8 kJ/kg freigesetzt. [KASC01]

11.3 Verlauf des Festphasenanteils der Legierung AlSn6Cu

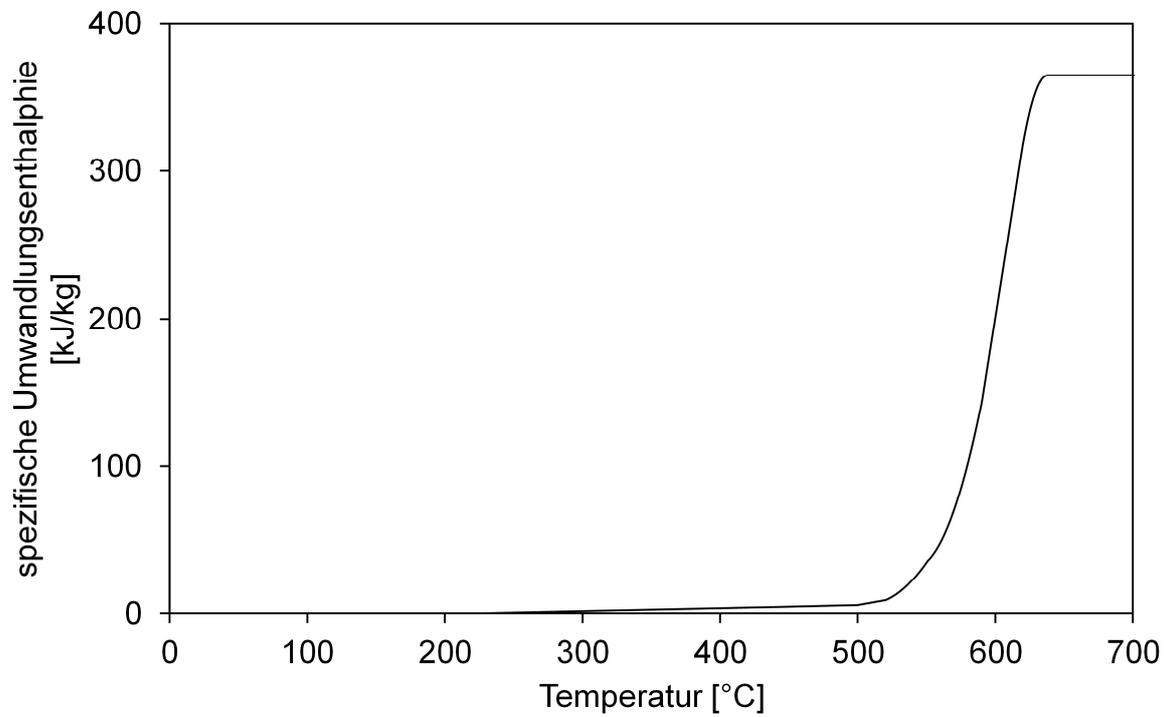


Abbildung 11-1: Verlauf der aufgenommenen Umwandlungsenthalpie während dem Aufschmelzen der Legierung AlSn6Cu

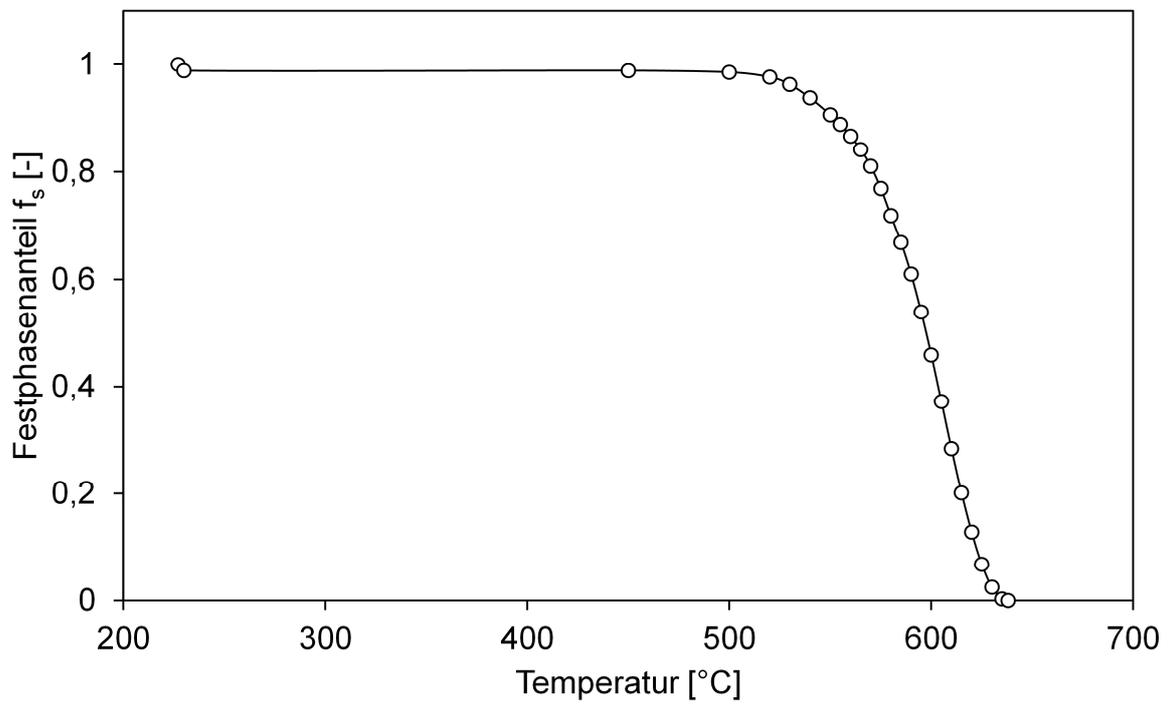


Abbildung 11-2: Verlauf des Festphasenanteils während der Erstarrung der Legierung AlSn6Cu nach [KASC01]