



Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
der Technischen Universität München

Untersuchungen zur Gefügeoptimierung beim horizontalen Stranggießen von CuZn37

Stefan Riedel

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. Udo Lindemann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (i.R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert F. Singer
(Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg)
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 28.06.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 09.07.2012 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

Danksagung / Vorwort

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

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

Den Herren Prof. Dr.-Ing. Robert F. Singer, Ordinarius des Lehrstuhls für Werkstoffkunde und Technologie der Metalle der Universität Erlangen-Nürnberg sowie Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann, Ordinarius des Lehrstuhls für Produktentwicklung der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen 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 Dipl.-Ing. Martin Wimmer und Herr Dipl.-Ing. Christoph Nerl genannt.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie sowie meiner Freundin Marion, deren Unterstützung und Rückhalt entscheidend zur Fertigstellung der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

München, im August 2012

Stefan Riedel

Abstract (Deutsch)

Um die im Ausland stark gefragte deutsche Gießereiindustrie weiterhin wettbewerbsfähig zu halten, ist eine Ausweitung der Markpräsenz sowie eine Diversifizierung der Produkte erforderlich. Die Erzeugung von Gussprodukten herausragender Qualität ist dabei so wichtig wie nie zuvor.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Qualitätssteigerung horizontal gegossener Stranggießprodukte liefern. Diese weisen aufgrund einer ungleichmäßigen Wärmeabfuhr während der Erstarrung meist ein unsymmetrisches und inhomogenes Gefüge auf. Dieser verfahrensspezifische Nachteil, der aus Phänomenen wie dem „Strangabheben“ oder dem „Kokillenatmen“ resultiert, kann sich vor allem bei der Weiterverarbeitung der Gussrohlinge nachteilig auf die Qualität auswirken und zu erhöhtem Ausschuss führen.

In der Arbeit werden Lösungsansätze zur Eliminierung dieser Nachteile erarbeitet. Am Beispiel des Werkstoffes CuZn37 werden auf einer Versuchsanlage Untersuchungen zur gezielten Anpassung der Erstarrungsbedingungen im Urformwerkzeug durchgeführt. Auf Basis eines Kokillen-Kühler-Aufbaues, bei dem zur Verhinderung des Kokillenatmens eine Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler zum Einsatz kommt, werden Möglichkeiten zur Beeinflussung der Wärmeabfuhr aus der Schmelze analysiert. Es werden Stränge mit modifizierten Kokillen-Kühler-Aufbauten gegossen, deren Qualität mittels Gefügeaufnahmen sowie Temperaturprofilen der Kokille bewertet wird. Auf Grundlage dieser Bewertungen wird ein konstruktiv optimierter Aufbau entwickelt, der eine symmetrische Wärmeabfuhr aus der Schmelze sicherstellt.

Ausgehend von einem Bandformat wird die Optimierung auf ein Rundformat übertragen. Zusammen mit dem Projektpartner Diehl Metall Messing erfolgt abschließend die Adaption des Lösungsansatzes an industrielle Begebenheiten. Die auf der Versuchsanlage gewonnenen Erkenntnisse können im großtechnischen Maßstab bestätigt werden. Die Qualität der Gussrohlinge wird gegenüber dem Ausgangszustand deutlich gesteigert.

Abstract (Englisch)

The German foundry industry is facing high demand abroad. In order to ensure its competitiveness in the future an expansion of market presence and a diversification of products will be essential. Generating cast components of outstanding quality is therefore more important than ever before.

The present work contributes to an increase in the quality of horizontal continuous casting products. Such products often show an unsymmetrical and inhomogeneous microstructure due to an irregular heat dissipation during solidification. This process-specific disadvantage resulting from effects such as “Kokillenatmen” (air gap between the mould and the cooling plate) or “Strangabheben” (air gap between the strand and the mould) can adversely affect the processing quality and lead to degraded material.

The present work develops approaches to eliminate this disadvantage. With CuZn37 serving as reference material, several studies are conducted at an experimental plant to systematically adapt the solidification conditions in the mould. Possibilities to influence heat dissipation from the melt are analyzed, using a mould-cooling-system in which a layer of liquid metal is applied between the mould and the cooling plate to avoid “Kokillenatmen”. Strands are casted with modified mould-cooling-systems and the quality is evaluated by temperature profiles of the mould and micrographs. Based on this evaluation, a constructively optimized configuration is set up ensuring symmetric heat dissipation from the melt.

Once the optimized configuration has been applied to a tape format it is transferred to a round format. In cooperation (with the partner)Diehl Metall Messing the approach is subsequently adapted to industrial means. The knowledge and results gained at the experimental plant can be confirmed in industrial scale. Compared to the initial state, the quality of cast material can be considerably increased.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Kenntnisse.....	4
2.1	Stranggießen allgemein	4
2.2	Horizontales Stranggießen und auftretende Probleme	5
2.2.1	Strangabheben	5
2.2.2	Kokillenatmen	7
2.3	Erstarrungsablauf beim Stranggießen	9
2.3.1	Langsame Gießgeschwindigkeiten	9
2.3.2	Hohe Gießgeschwindigkeiten	11
2.4	Abziehkinematik.....	13
2.5	Messinglegierungen.....	14
2.5.1	Allgemeines zu Messinglegierungen.....	14
2.5.2	Legierung CuZn37	15
2.6	Ansätze zur Qualitätsverbesserung	16
2.6.1	Abziehbewegung	16
2.6.2	Gießgeschwindigkeit	18
3	Zielsetzung und Aufgabenstellung	19
4	Lösungsansätze.....	21
5	Versuchsgeräte.....	28
5.1	Stranggießanlage	28
5.2	Kokillen-Kühler-Einheiten	29
5.2.1	Bandformat	30
5.2.2	Rundformat	32
5.3	Funkenemissionsspektrometer	32
5.4	Lichtmikroskop.....	33

6	Simulation	34
7	Versuchsdurchführung	45
7.1	Schmelzbetrieb	45
7.2	Legierungsanalyse.....	45
7.3	Stranggießprozess.....	45
7.4	Temperaturerfassung	47
7.5	Metallographische Gefügeanalyse.....	49
8	Versuchsergebnisse Bandformat.....	51
8.1	Konventioneller Aufbau.....	51
8.2	Einfluss Wärmeübergang Kokille Kühler.....	55
8.2.1	Referenzversuch Flüssigmetallkühlung 3 mm, statisch	55
8.2.2	Flüssigmetall statisch (unterschiedliche Schichtdicken).....	60
8.2.3	Flüssigmetall-Umlaufkühlung	64
8.3	Einfluss Wärmeleitfähigkeit Kokille	67
8.3.1	Graphite verschiedener Wärmeleitfähigkeit	67
8.3.2	Werkstoff C/SiC	70
8.4	Einfluss Kühlzonen an der Kokille.....	73
8.5	Kombinationsversuch	78
8.6	Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse Bandformat	81
9	Versuchsergebnisse Rundformat.....	86
9.1	Referenzversuch konventioneller Aufbau	86
9.2	Kokillen-Kühler-Aufbau mit Flüssigmetall	89
9.3	Kokillen-Kühler-Aufbau mit Tasche 20 mm.....	93
9.4	Kokillen-Kühler-Aufbau mit Tasche 40 mm.....	96
9.5	Kokillen-Kühler-Aufbau mit Tasche 60 mm.....	97
9.6	Optimierung des Kokillen-Kühler-Aufbaus	99
9.7	Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse Rundformat.....	102

10 Industrielle Umsetzung	106
11 Zusammenfassung und Ausblick.....	115
12 Verzeichnisse.....	120
12.1 Abbildungsverzeichnis	120
12.2 Literaturverzeichnis.....	124
12.3 Verwendete Normen.....	130
12.4 Verwendete Patente	131

Kurzzzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Fläche
α	$W/m^2 \cdot K$	Wärmeübergang
c_p	J/kgK	spezifische Wärmekapazität
δ	m	Schichtstärke
k	W/m^2K	Wärmewiderstand
L	J/kg	spezifische Erstarrungsenthalpie
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
\dot{Q}	W	Wärmestrom
ρ_{CuZn37}	kg/m^3	Dichte CuZn37
s	m	Dicke
ΔT	K	Temperaturunterschied
T	K	Temperatur
\dot{V}_s	m^3/s	Volumenstrom

1 Einleitung

Schon zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurde aufgrund der zunehmenden Industrialisierung die Notwendigkeit erkannt, große Metallformate wirtschaftlich zu erzeugen. Dazu wurden Versuche durchgeführt, Metall in eine an zwei Seiten geöffnete und gekühlte Form im flüssigen Zustand einzugießen und auf der anderen Seite der Form fest auszubringen. Diese Versuche blieben mehr oder weniger erfolglos. In den darauf folgenden Jahren wurden verschiedene Einzelheiten des Prozesses verändert, um die ersichtlichen Vorteile des sogenannten „Stranggießverfahrens“ zu realisieren. So wurde der Kokille z.B. eine translatorische Bewegung aufgeprägt, um ein Anfrieren des Gießgutes an der Kokille zu verhindern. Aufgrund der unzureichenden Qualität der Gussprodukte konnte das Verfahren jedoch nicht über das Versuchsstadium hinweg umgesetzt werden. [DP 750301]

Erst 1933 gelang Junghans eine industriell umsetzbare Anpassung der Prozesstechnik. Er erkannte, wie wichtig es war, Schmelze kontinuierlich mit konstanter Qualität und Temperatur zuzuführen, um eine gleichbleibende Produktqualität zu erzielen. Darüber hinaus hielt er es für die gewerbliche Verwertbarkeit für erforderlich, eine bestmögliche Oberflächengüte des Gussproduktes zu erzeugen, um kostenintensive Nacharbeit zu vermeiden. [DP 750301]

Zunächst beschränkte sich der Einsatzbereich des Stranggießverfahrens vorwiegend auf das Gießen von Eisen- und Stahllegierungen, bei denen der Abzug des Gussproduktes ausschließlich in vertikaler Richtung erfolgte. Parallel dazu wurde versucht, das Verfahren auf die Erzeugung von Nichteisenmetalle zu übertragen. Diese Entwicklung fand für Kupfer- sowie Aluminiumwerkstoffe in besonderem Maße zwischen den Jahren 1920 und 1935 statt [SCHR87]. Neben der Übertragung des Verfahrens auf verschiedene Werkstoffe wurden ferner Möglichkeiten untersucht, das Metall in horizontaler Richtung aus der Kokille auszubringen. Bereits 1913 versuchte A. H. Pehrson in dem von ihm patentierten Verfahren niedrigschmelzende Metalle horizontal aus einer beweglichen Kokille abzuziehen. Dieses konnte sich

jedoch aufgrund von Abdichtungsschwierigkeiten zwischen Ofen und Kokille, die vor allem bei höher schmelzenden Metallen auftraten, nicht durchsetzen.

Ab ca. 1960 wurde das horizontale Stranggießverfahren laut Krall verstärkt im Bereich der Cu-Basis-Werkstoffe zur Erzeugung von Dünnbandmaterial eingesetzt. Als besonderer Vorteil des horizontalen, ofenabhängigen Aufbaus von Kokille und Kühler, bei dem die Kokille fest mit dem Ofen verbunden ist, erwies sich die vor Oxidation geschützte Zufuhr der Schmelze aus dem Ofen in die Kokille. Weitere Vorteile liegen in den niedrigen Bauhöhen der Anlagen und geringen Fundament-, Gebäude- und Installationskosten. Durch eine Optimierung des Verfahrens sowie der eingesetzten Werkstoffe konnte die Verfahrenstechnik in den darauf folgenden Jahren soweit verbessert werden, dass seit etwa 1970 Bänder bis zu einer Breite von 650 mm fehlerfrei gegossen werden können. [KRAL85]

Heutzutage ist das horizontale Stranggießen von Werkstoffen auf Kupferbasis in Deutschland vor allem durch seine hohe Flexibilität und die geringen Investitionskosten im mittelständischen Bereich angesiedelt. Dieser wurde, ebenso wie die gesamte Gießereibranche, durch die Wirtschaftskrise der Jahre 2008 und 2009 stark getroffen. Explodierende Rohstoffpreise sowie leere Auftragsbücher zwangen viele Betriebe in die Knie. Insbesondere durch ihre Abhängigkeit von der Automobil- und der Maschinenbaubranche meldeten die Unternehmen vor allem zu Beginn 2009 Umsatz- und Produktionsrückgänge um über 35 %. Trotz zahlreicher Rettungsmaßnahmen wurden bis Mitte 2010 insgesamt 36 Insolvenzen in der Branche gezählt. Vor diesem Hintergrund sind in Zeiten eines wieder ansteigenden Wirtschaftswachstums eine Ausweitung der Marktpräsenz sowie eine Diversifizierung der Produkte dringend erforderlich, um die im Ausland stark gefragte deutsche Gießereiindustrie weiterhin wettbewerbsfähig zu halten. Die Erzeugung von Gussprodukten herausragender Qualität ist dabei so wichtig wie nie zuvor. [DÖTH10]

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Qualitätssteigerung horizontal gegossener Stranggießprodukte liefern. Durch die Untersuchungen sollen Möglichkeiten erarbeitet werden, negative Auswirkungen der horizontalen Anordnung von Kokille und Kühler zu eliminieren. Schwierigkeiten bei der Weiterverarbeitung der

Vorprodukte sollen so verhindert werden. Die Untersuchungen werden exemplarisch an der Messinglegierung CuZn37 durchgeführt.

2 Grundlagen und Stand der Kenntnisse

2.1 Stranggießen allgemein

Im Stranggießverfahren werden Vorprodukte und Halbzeuge hergestellt, die anschließend zumeist durch Umformprozesse weiterverarbeitet werden. Durch einen kontinuierlichen Prozess wird mittels einer Dauerform ein theoretisch endloses Produkt aus dem flüssigen Zustand urgeformt. Das formgebende Element, die Kokille, ist an zwei Seiten offen. Während auf der einen Seite der Kokille die Schmelze flüssig zugeführt wird, wird auf der anderen Seite der entstehende Strang abgezogen. Auf dem Weg durch die Kokille muss dem Metall mittels einer Kühlvorrichtung so viel Wärme entzogen werden, dass ein sicherer Abzug des Stranges – ohne die Gefahr des Wiederaufschmelzens – gewährleistet ist. Dazu ist zusätzlich zur Kokillenkühlung oftmals der Einsatz einer Sekundärkühlung am austretenden Strang, im Anschluss an die Kokille erforderlich. Auf diese Art können die unterschiedlichsten Geometrien von Knüppeln, Brammen und Barren über Dünnbänder, Rundprofile und Drähte bis hin zu Sonderformaten als Voll- oder Hohlprofil erzeugt werden.

Bis heute haben sich eine Vielzahl verschiedenster Verfahren und Anlagenkonzepte entwickelt. Die Hauptmerkmale zu deren Gliederung sind:

- die Arbeitsweise der Anlage (kontinuierlich oder diskontinuierlich)
- die Bauform der Anlage (vertikal, horizontal oder Mischformen)
- die Art der Kokille (feststehende Kokillenwände oder bewegte Kokillenwände)
- die Anbindung der Kokille zum Ofen (ofenabhängig oder ofenunabhängig)

Je nach erforderlicher Ausbringung, zu vergießendem Werkstoff und produziertem Format gibt es einen optimalen Anlagentyp, mit dem die geforderte Produktqualität am wirtschaftlichsten erzeugt werden kann. Dabei gilt es, die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Verfahren abzuwägen. Eine horizontale Stranggießanlage benötigt beispielsweise im Vergleich zu einer vertikal arbeitenden Anlage einen wesentlich geringeren Platzbedarf, erfordert deutlich geringere Investitionskosten und bietet eine

sehr hohe Formatflexibilität. Als Nachteile müssen allerdings eine geringere Ausbringung sowie eine geringere Produktqualität in Kauf genommen werden.

Zum Gießen von Kupferwerkstoffen werden sowohl Vertikal- als auch Horizontalanlagen verwendet. Aufgrund der großen Flexibilität bei den Formaten, eines einfachen, schnellen Legierungswechsels sowie den geringeren Investitionskosten hat sich insbesondere im mittelständischen Bereich das horizontale Stranggießen von Kupferlegierungen mit ofenabhängiger Graphit-Gleitkokille etabliert. Auch kleinere Chargen oder Sonderformate können auf diese Weise wirtschaftlich produziert werden. [HAAN77]

2.2 Horizontales Stranggießen und auftretende Probleme

Beim horizontalen Stranggießen mit ofenabhängiger Kokille wird der Strang über angetriebene Rollen in horizontaler Richtung aus der Kokille abgezogen. Ein Umlenken des Stranges wie z.B. beim vertikalen Stranggießen von Stahl ist nicht erforderlich, eine Biegebeanspruchung entfällt. Die Kokille ist meist direkt am Ofen montiert und wird gegen den Ofenauslauf gepresst oder mechanisch verspannt. Durch den Aufbau und die Anordnung von Kokille und Kühler ergeben sich zeit- und temperaturabhängige Effekte, die die Wärmeabfuhr aus der Kokille negativ beeinflussen. Die beiden dabei auftretenden Hauptphänomene sind das Strangabheben und das Kokillenatmen.

2.2.1 Strangabheben

Durch den horizontalen Abzug ergeben sich qualitative Nachteile bei der Gefügebildung. Die meisten metallischen Werkstoffe erfahren während der Erstarrung eine Volumenkontraktion, wodurch ein Luftspalt zwischen der Kokille und dem bereits erstarrten Strang entsteht. Beim Stranggießen wird dies als „Strangabheben“ bezeichnet. Systembedingt bildet sich der Spalt unter dem Einfluss der Schwerkraft verstärkt an der Oberseite der Kokille aus (Abbildung 1). Durch das damit verbundene bessere Anliegen des Stranges an der Unterseite der Kokille kann die Wärmeenergie aus dem Strang dort besser abgeführt werden als an der Oberseite der Kokille [HADD77]. Der Luftspalt wirkt nahezu als Isolator (Wärmeleit-

fähigkeit von Luft $\sim 0,0262 \text{ W/mK}$ bei RT). Die unsymmetrische Wärmeabfuhr aus dem Gussprodukt verursacht eine ungleichmäßige Gefügeausbildung und daraus resultierend unterschiedliche Gussqualitäten. Die Erstarrung verläuft invers zur Wärmeabfuhr und beginnt an den kalten Kokillenwänden. Durch das schnellere Wachstum an der Unterseite treffen die Erstarrungsfronten, die sich von der Unter- und der Oberseite ausgehend aufeinander zubewegen, geometrisch außermittig nach oben verschoben aufeinander.

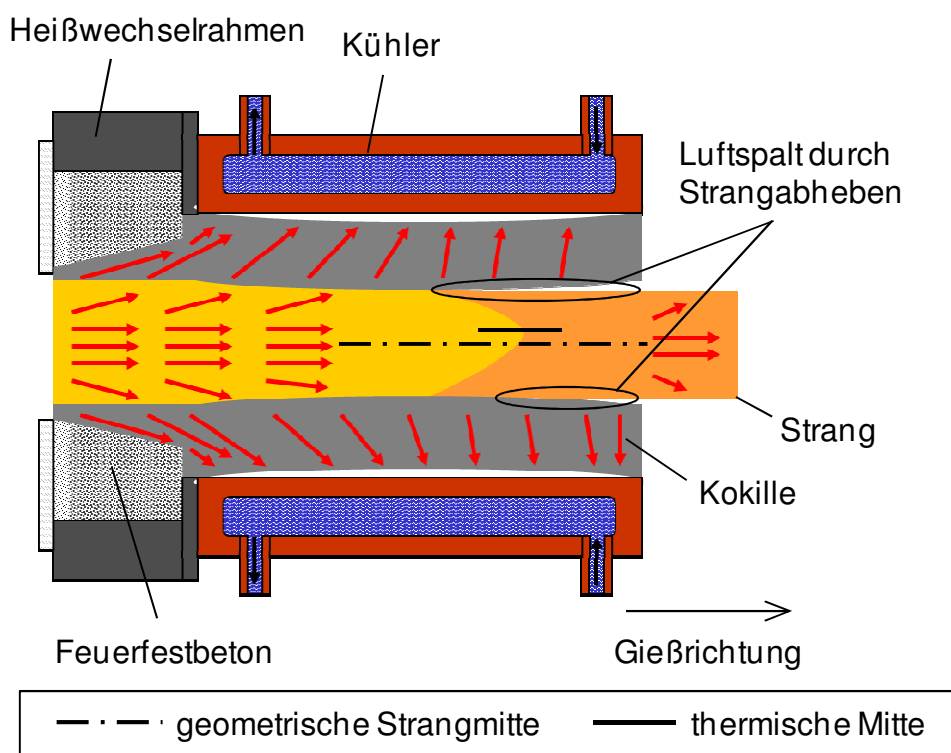


Abbildung 1: Schematischer Längsschnitt durch die Kokillen-Kühler-Baugruppe, konventioneller Aufbau Bandformat [RICK09]

Die bei Bandformaten sogenannte „thermische Mitte“, beziehungsweise der „Erstarrungsmittelpunkt“ bei Rundformaten, welche eine Schwachstelle im Gefüge darstellen, befinden sich nicht in der geometrischen Mitte des Produktes. Dies kann zu Problemen bei der Weiterverarbeitung führen. Ferner ergeben sich durch die unterschiedliche Wärmeabfuhr Auswirkungen auf die sich einstellenden Korngrößen. An der Oberseite der Kokille herrschen sehr instabile Erstarrungsverhältnisse vor. Aufgrund der Erstarrungskontraktion entsteht ein Luftspalt zwischen Strang und

Kokille, der die Kokille bis zum nächsten Ziehschritt (siehe Kapitel 2.4) auskühlen lässt. Die Kokillentemperaturen im Bereich der Erstarrungsfront sind einem ständigen Wechsel unterworfen. Dahingegen liegen an der Unterseite sehr gleichmäßige Wachstumsbedingungen vor. Aufgrund seines Eigengewichtes liegt der Strang besser an der Kokille an, die Temperaturen in der Kokillenwand sind relativ konstant. Bedingt durch diese unterschiedlichen Wärmeabfuhrverhältnisse entsteht nach der Bildung einer feinen Randschale in der unteren Hälfte des Stranges ein relativ grobkörniges, stängeliges Gefüge, das schnell wächst. Aufgrund des großen Anteils der Wärmemenge, die senkrecht zur Gießrichtung abgeführt werden kann, ist das Verhältnis von senkrecht abgeführter zu in Gießrichtung abgeführter Wärmemenge groß. Die Ausbildung der Stängelkristalle wird dadurch unterstützt. Im Gegensatz dazu ist die Oberhälfte nach der sehr feinen Randschale von einem deutlich feineren Gefüge geprägt. Hier ist der Anteil der Wärmemenge, der senkrecht zur Gießrichtung abgeführt wird, im Vergleich zur Unterseite deutlich kleiner. Zusätzlich zu den genannten Aspekten können Fehler in der Randschale, Krustenverwölbungen sowie die Entstehung von Seigerungen auf die Ausbildung des Luftspaltes zurückgeführt werden. [SOMM10, HERZ68, HERZ69]

2.2.2 Kokillenatmen

Ein weiteres Phänomen, das sogenannte Kokillenatmen, ergibt sich durch den konstruktiven Aufbau von Kokille und Kühler. Bei einem konventionellen Aufbau nach dem Stand der Technik ist bei Bandformaten die mehrteilige Kokille (bei Kupferlegierungen zumeist aus Graphit) zwischen zwei Kupferkühlplatten geklemmt. Während die Ober- und die Unterseite der Kokille direkt über die Primärkühlung mit Wasser gekühlt werden, wird die Wärmeenergie an den Seitenflächen zumeist nur durch Konvektion abgeführt.

Im Inneren der Kokille liegt die heiße Schmelze an (bei Messingwerkstoffen mindestens $\sim 870\text{ °C}$). Ober- und Unterplatte der Kokille werden mit dem Kupferkühler gekühlt. An der Kontaktfläche zwischen Kokille und Kühler werden meist nur Temperaturwerte um 150 °C gemessen. Durch diesen ausgeprägten Temperaturgradienten kommt es zum Verzug der Kokillenplatte, da sich die heiße Innenseite

ausdehnt. Zwischen der geraden Kühlerplatte und der gebogenen Kokille entsteht ein Luftspalt (siehe Abbildung 2).

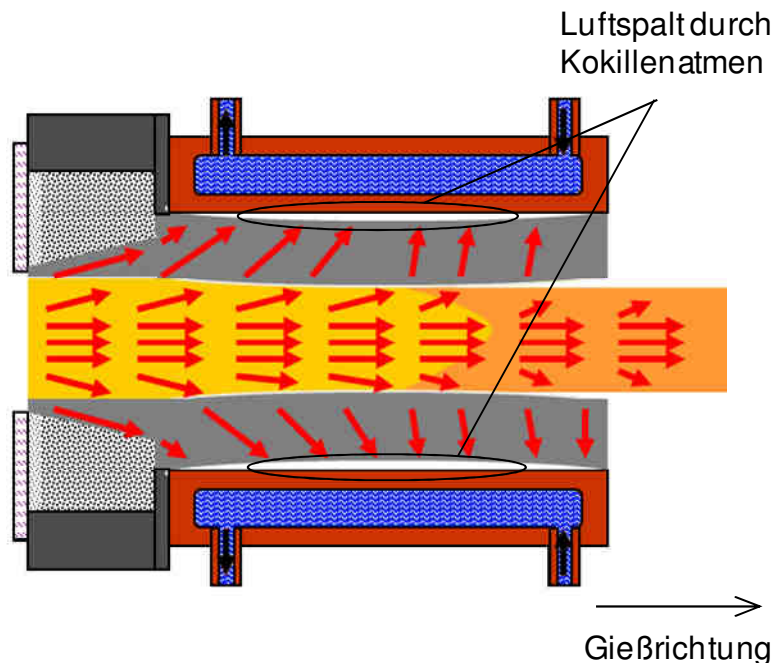


Abbildung 2: Schematischer Längsschnitt durch die Kokillen-Kühler-Baugruppe, konventioneller Aufbau Bandformat [RICK09]

Da sich durch diesen Luftspalt die Wärmeenergie in der Kokille staut und nicht mehr durch das Kühlwasser abgeführt werden kann, erfolgt ein Temperaturausgleich in der Platte. Nachdem sich die Platte wieder „zurückgebogen“ hat, beginnt der zyklische Prozess des sogenannten „Kokillenatmens“ erneut. Durch diesen Effekt, auf den während des Gießvorganges kein Einfluss genommen werden kann, wird die Qualität des Gussproduktes eingeschränkt. Je nach Anliegen bzw. Nichtanliegen des Kühlers an der Kokille kann mehr oder weniger Wärme aus der Schmelze abgeführt werden, was den Erstarrungsprozess beeinflusst. Des Weiteren bildet sich der Verzug der Kokille in der Strangoberfläche ab. [SIGG04_1]

Zusätzlich zu den genannten Aspekten kann das Kokillenatmen unter Umständen die maximal erreichbare Gießgeschwindigkeit limitieren.

2.3 Erstarrungsablauf beim Stranggießen

Im Allgemeinen ist der Erstarrungsvorgang beim Stranggießen anhängig von der Gießgeschwindigkeit.

2.3.1 Langsame Gießgeschwindigkeiten

Bei langsamen Gießgeschwindigkeiten wird der Kokille generell weniger Wärme über die Schmelze zugeführt als bei hohen Gießgeschwindigkeiten. Die Erstarrung beginnt bereits vor der aktiven Kühlzone (die Kühlplatten liegen meist nicht über der gesamten Länge an der Kokille an), bzw. am Anfang der Kühlzone. Die Sumpftiefe¹ ist gering (vgl. Abbildung 3, $ST_{v_{G1}}$).

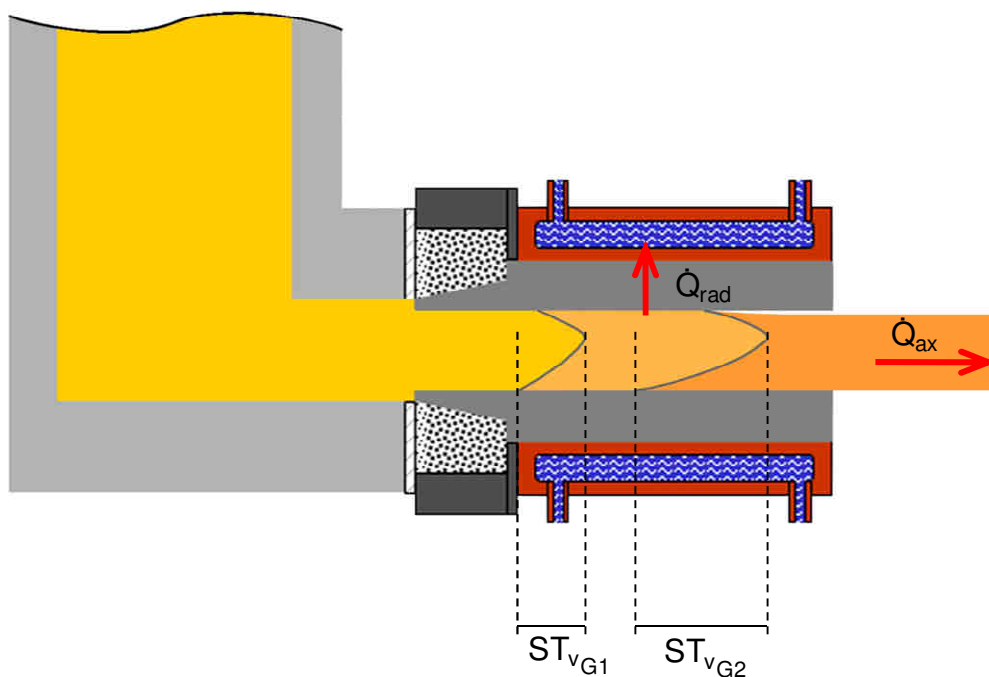


Abbildung 3: Unterschiede der Sumpftiefe ST bei niedrigen (v_{G1}) und hohen Gießgeschwindigkeiten (v_{G2})

¹ Sumpftiefe: Strecke vom Beginn der Randschalenbildung bis zu einem Punkt x , an dem der gesamte Querschnitt vollständig erstarrt ist.

An der Oberseite des Stranges erfolgt die Wärmeabfuhr nur zu Beginn senkrecht zur Gießrichtung. Nach Ausbildung der sehr feinkörnigen Randschale hebt der Strang aufgrund der geringen Sumpftiefe (Randschale erlangt bereits kurz nach der Ausbildung eine hohe Festigkeit) bereits sehr früh von der Kokille ab. Über den Luftspalt kann die Wärme nur noch zu geringen Teilen senkrecht zur Gießrichtung abgeführt werden. Der Großteil der Wärme wird axial in Strangrichtung abgeführt. Der axiale Wärmefluss und die instabile Temperaturschichtung (die Schmelzetemperatur ist in der Mitte des Stranges größer als an der Oberseite) in der Oberhälfte des Stranges begünstigen eine Konvektionsbewegung in der Schmelze. Dadurch können die Temperaturen der Schmelze in der Oberhälfte höher sein als an der Unterseite [TENS88]. Zudem ist die Kokille an der Oberseite aufgrund der luftspaltbedingten geringeren zugeführten Wärmemenge kälter. Durch den Luftspalt kann die Kokille stark abkühlen. Beim nächsten Ziehschritt (Abziehbewegung siehe Kapitel 2.4) trifft die Schmelze auf eine im Vergleich zur Unterseite kältere Kokillenwand. Aus dem größeren Temperaturunterschied zwischen der Schmelze und der Kokille resultiert ein besonders im Randbereich sehr feinkörniges Gefüge, das bis in die Mitte des Stranges weiterhin feinkörnig ausbildet ist.

An der Unterseite der Kokille herrschen deutlich stabilere Erstarrungsbedingungen als an der Oberseite vor. Durch die fehlende Luftspaltbildung kann die Wärme besser und homogener aus dem Strang abgeführt werden. Die Temperaturen der Kokillenunterplatte sind im Vergleich zur Oberseite höher. Durch die geringere Temperaturdifferenz zwischen Schmelze und Kokille sowie die stabileren Wärmeabfuhrbedingungen entsteht eine grobkörnige, stängelige Kornstruktur, die sich bis in die Mitte des Stranges ausbildet.

„Für die Entstehung der stängeligen Struktur wird auch das Verhältnis zwischen dem Wärmegefälle, das senkrecht zu den Kokillenwänden vorhanden ist, und dem, welches parallel dazu besteht als maßgeblich angesehen. Ist dieses Verhältnis groß, so überwiegt die Ausbildung von Stängelkristallen, ist es klein, so entstehen Globuliten. Das einmal in Gang befindliche Stängelkristallwachstum wird durch Änderungen des Wärmeflusses nicht mehr gestört. Das gilt jedoch nur für den Fall, daß keine neuen Keime entstehen.“ [HOLZ85]

Durch das schnelle Stängelkristallwachstum von der Unterseite und das eher globulitisch ausgeprägte Wachstum von der Oberseite treffen die Erstarrungsfronten, die ausgehend von Ober- und Unterplatte der Kokille aufeinander zu wachsen, deutlich außerhalb der geometrischen Mitte, in die Oberhälfte des Stranges verschoben, aufeinander. [HART89, HART92_1, HART92_2]

2.3.2 Hohe Gießgeschwindigkeiten

Bei hohen Gießgeschwindigkeiten wird der Kokille generell mehr Wärme durch die Schmelze zugeführt. Der Bereich der Erstarrung verlagert sich in die aktive Kühlzone². Die Sumpftiefe vergrößert sich bei Erhöhung der Gießgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 3, ST_{VG2}).

An der Oberhälfte des Stranges stabilisieren sich die Wärmeabfuhrbedingungen. Die Wärmeabfuhr erfolgt zunächst wieder senkrecht zur Gießrichtung, nach Ausbilden einer stabilen Randschale anschließend axial über den Strang. Durch die größere Sumpftiefe liegt die Randschale jetzt deutlich länger an der Kokillenwand an. Durch die fehlende Stabilität der Randschale sowie dem metallostatistischen Druck der Schmelze wird die weiche Randschale gegen die Kokille gedrückt. Durch die höherfrequente Abziehbewegung und die damit verbundene Bewegung in der Schmelze kann sich die Konvektionsbewegung nicht mehr so stark ausbilden. Zusätzlich setzt die Luftspaltbildung später ein, so dass sich der Temperaturunterschied zwischen Schmelze und Kokille verkleinert (die Kokille erwärmt sich durch die höhere Wärmezufuhr). Der Korngrößenunterschied zwischen der Randschicht und dem darunter liegenden Bereich bis zur Mitte des Bandes ist nicht mehr so stark ausgeprägt. Die Kornstruktur ist im Band damit insgesamt homogener. Die Verlagerung der thermischen Mitte in die Oberhälfte des Stranges ist ebenfalls nicht

² Anmerkung Aufbau utg: Aufgrund der kurzen Kokillenschnauze ist davon auszugehen, dass die Erstarrung auch bei langsamen Gießgeschwindigkeiten im Bereich der aktiven Kühlzone stattfindet. Dies lässt sich anhand der gemessenen Temperaturwerte in der Kokille bestätigen.

so stark ausgeprägt wie bei niedrigen Ziehgeschwindigkeiten. [HART89, HART92_1, HART92_2]

Die Auswirkungen der beschriebenen Phänomene auf die Gefügeausbildung lassen sich in Abbildung 4 deutlich erkennen. Der Strang aus dem die dargestellten Schliffbilder entnommen sind, wurde mit der Abziehkinematik „Go-Stop-Back“ erzeugt (siehe Kapitel 2.4). Der Parameter W in der Abbildung kennzeichnet dabei die Wartezeit im Ziehzyklus, v_G ist die aus dem Ziehzyklus resultierende Gießgeschwindigkeit. Während die Verschiebung der thermischen Mitte sowie die Korngrößenunterschiede über dem Querschnitt bei langsamer Gießgeschwindigkeit stark ausgeprägt sind, stellt sich durch eine Erhöhung der Gießgeschwindigkeit ein immer gleichmäßigeres Gefüge ein (Abbildung 4).

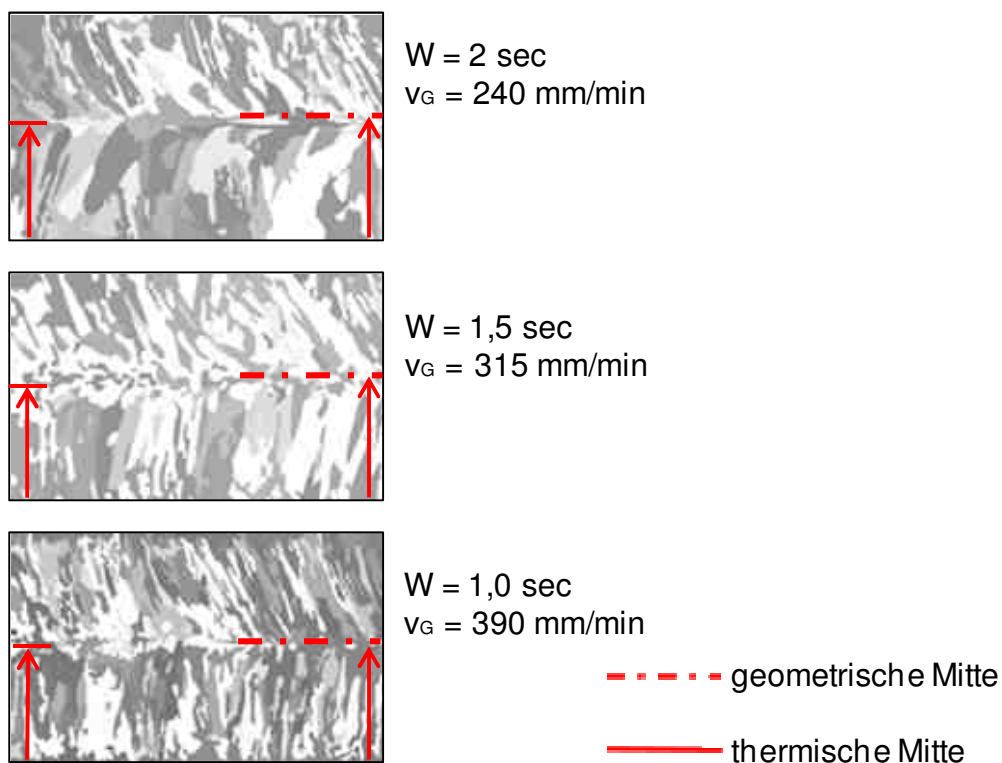


Abbildung 4: Veränderung des Gefüges mit steigender Gießgeschwindigkeit [HART89]

Dabei besteht nach Hartmann jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen der Gießgeschwindigkeit und den sich einstellenden Korngrößen. Neben der Gießge-

schwindigkeit spielen hier die Werkstoffeigenschaften des verwendeten Kokillengraphites sowie die Wärmeleitfähigkeit des zu vergießenden Metalls eine maßgebliche Rolle [HART89].

2.4 Abziehkinematik

Industriell kommen verschiedene Kinematiken zum Einsatz, um den Strang aus der Kokille abzuziehen. Unterschieden wird z.B. zwischen einem kontinuierlichen Abzug, der Go-Stop- oder Go-Stop-Back-Bewegung, oder einer hochzyklischen, oszillierenden Abziehbewegung. Je nach Werkstoff und Stranggießverfahren muss die richtige Abziehbewegung gewählt werden. Im Vordergrund steht dabei immer eine fehlerfreie Ausbildung der sensiblen Randschale, die einen entscheidenden Einfluss auf den weiteren Kristallisationsablauf und die Entstehung von Gießfehlern hat.

Für die nachfolgenden Untersuchungen erfolgt der Abzug des Stranges unter Anwendung der Go-Stop-Back Bewegung (siehe Abbildung 5). Auf eine Hub-Bewegung (a) folgt eine Wartezeit (b), abschließend ein Rückhub (c).

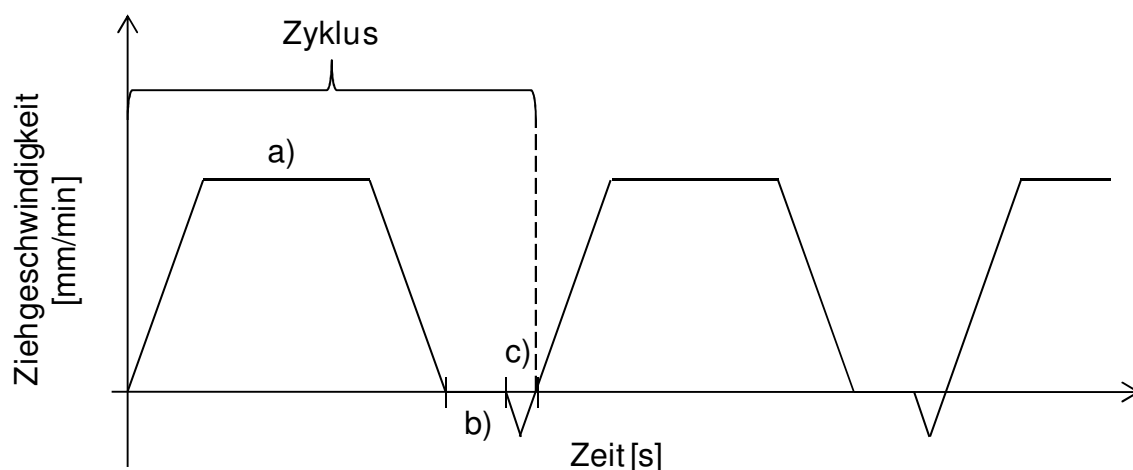


Abbildung 5: Ziehzyklus Go-Stop-Back

Während der Haltephase soll sich eine abziehfähige Randschicht in der Kokille ausbilden. Die Randschale haftet dabei leicht an der Kokillenwand an. Unter der Druckbelastung des Rückstoßes löst sich die sensible Randschale von der Kokille. Der Haftreibungszustand wird überwunden und es setzt Gleitreibung ein. Der Zyklus beginnt von vorne.

2.5 Messinglegierungen

Seit der Hochkonjunktur der Wirtschaft nach der Wiedervereinigung sank die Produktionsleistung von Kupfer und Kupferlegierungen in Deutschland von 95.000 t jährlich auf ca. 77.000 t ab. Der Anteil der verschiedenen Messinglegierungen an der Kupferproduktion beträgt ca. 18 % (Stand 2009). [BAFA11]

2.5.1 Allgemeines zu Messinglegierungen

Circa 90 % der Messingprodukte werden im Kokillenguss-Verfahren hergestellt, nur etwa 0,3 % entfallen auf das Stranggießverfahren (Stand 2009).

Die Hauptanwendungen sind:

- zu ca. 60 % Bauindustrie (Gas-, Wasser-, und Sanitärinstallationen)
- ca. 30 % Gleitwerkstoffe (Gleitlagerbuchsen, Lagerschalen, Gleitleisten)
- 8 - 10 % Konstruktionswerkstoffe und Leitwerkstoffe

Im technischen Bereich werden Kupfer-Zink-Legierungen mit einem Konzentrationsbereich von bis zu 55 % Zink eingesetzt. Grundsätzlich lassen sich hier vier verschiedene Gruppen unterscheiden. Zu den genormten Legierungen (DIN CEN/TS 13388), die sich wiederum in Guss- und Knetlegierungen einteilen lassen, gehören die binären Kupfer-Zink-Legierungen, Kupfer-Zink-Legierungen mit Blei und Kupfer-Zink-Legierungen mit weiteren Legierungselementen wie Al, Sn, Si, Ni, Mn oder Fe. Die Legierungen, die zu ihrer besseren Zerspanbarkeit Blei enthalten, werden auch als Zerspanungs- oder Automatenmessinge bezeichnet. Die vierte, nicht genormte Gruppe umfasst die Sondermessinge.

Aufgrund ihres Gefügebauaufbaus lässt sich die binäre Gruppe in drei weitere Untergruppen unterteilen:

- Legierungen bis ca. 37 % Zink, einphasig erstarrt, α - kfz
- Legierungen zwischen 37 % und 46 % Zink, zweiphasig erstarrt ($\alpha + \beta$ -Phase), α - kfz, β - krz
- Legierungen zwischen 46 % und 50 % Zink, einphasig erstarrt (β -Phase), β - krz

Höhere Zinkgehalte finden in der Praxis keine Anwendung, da hier zusätzlich zu den genannten Phasen die sehr spröde γ -Phase auftritt. [DKIN07, DKIN05, BAFA11]

2.5.2 Legierung CuZn37

Die für die Weiterverarbeitung durch Tiefziehen und Streckziehen am meisten verwendete Legierung CuZn37 liegt aufgrund ihrer Zusammensetzung im Grenzbereich zwischen dem α - und dem α/β -Gebiet (Abbildung 6).

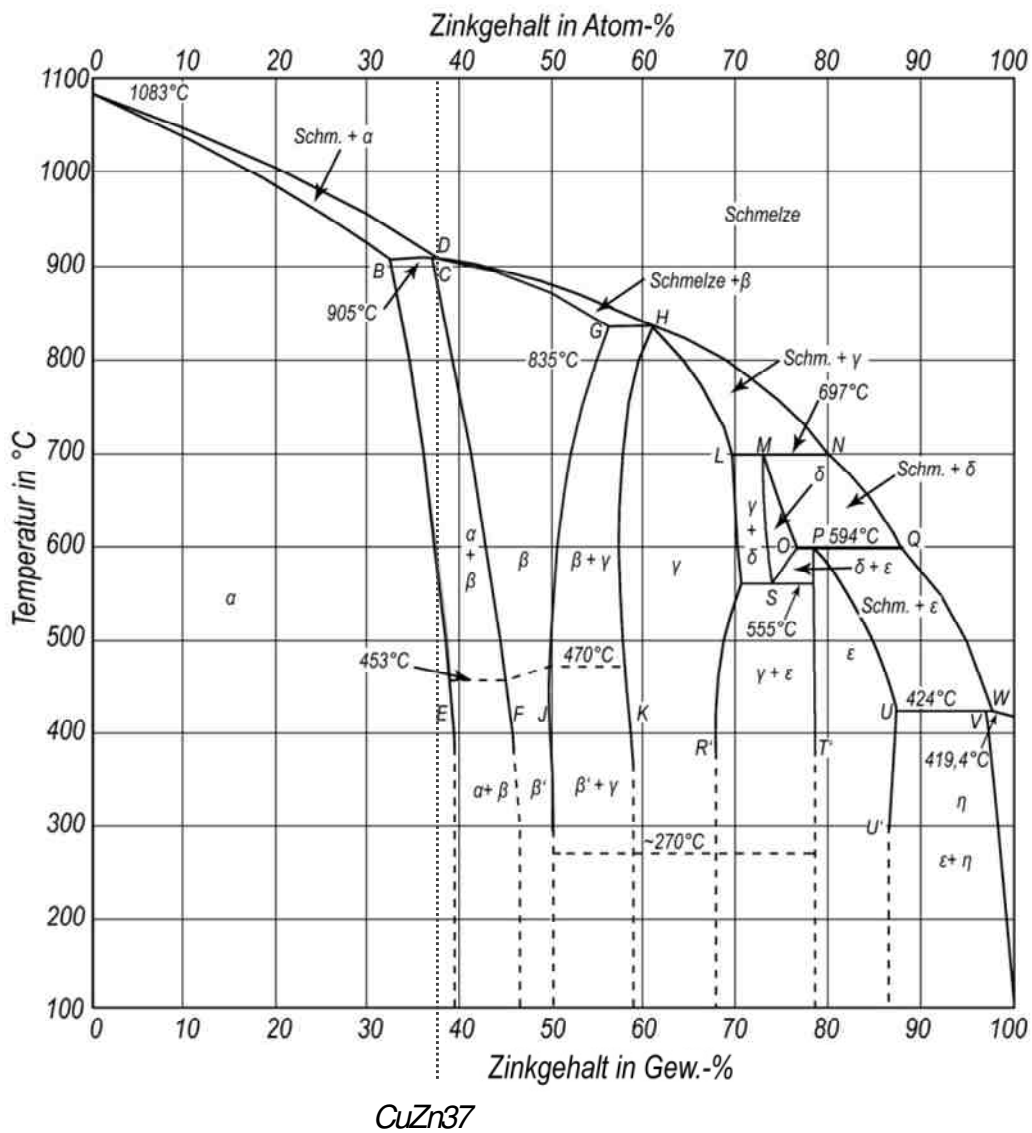


Abbildung 6: Zustandsschaubild Kupfer-Zink [BRUN68]

Aus diesem Grund muss nach dem Abguss oder bei einer Weiterverarbeitung ein besonderes Augenmerk auf die Temperaturführung gelegt werden. Bei einer zu raschen Abkühlung von Temperaturen oberhalb 650 °C verläuft die β - α - Umwandlung nicht vollständig, so dass unterkühlte β - Kristalle im Gefüge zurückbleiben [FISC56, ERGA56]. Diese sind aufgrund ihrer geringeren Korrosionsbeständigkeit sowie der schlechteren Kaltumformigenschaften unerwünscht [SCHU90]. Der Anwendungsbereich von CuZn37 liegt überwiegend im Sanitärbereich (z.B. Sanitärarmaturen) sowie in der Elektroindustrie (z.B. Kontakteile in Steckern, Schaltern oder Lampenfassungen). [DIES67, FISC56, ERGA56, DKIN66]

2.6 Ansätze zur Qualitätsverbesserung

In der Literatur werden verschiedene Ansätze zur Qualitätsverbesserung horizontal gegossener Stranggießprodukte gefunden. Im Vordergrund steht dabei immer der Versuch, den Einfluss der Schwerkraft zu kompensieren. Es wird versucht, die bessere Wärmeabfuhr an der Unterseite der Kokille ebenso wie die Auswirkungen von Konvektion in der Schmelze in der Oberhälfte des Stranges zu verhindern. Ziel ist es, ein symmetrisches, homogenes Gefüge zu erzeugen, bei dem sich die thermische Mitte in der geometrischen Mitte befindet. Einige ausgewählte Ansätze sind im Folgenden beschrieben.

2.6.1 Abziehbewegung

[BAUM00, BRAU94 und SIGG04_1] befassen sich in ihren Arbeiten unter anderem mit dem Einfluss des Ziehzyklus auf die Gefügeausbildung. Anstelle eines konventionellen Ziehzyklus der Art Go-Stop-Back werden die Auswirkungen eines hochzyklischen Abzuges untersucht. Bei dieser Ziehart entfällt die Wartezeit, auf einen Ziehschritt folgt ein sofortiger Rückhub. Die Ziehlängen variieren dabei zwischen 1 und 2 mm, der Rückhub bewegt sich zwischen 0,2 bis 0,8 mm. Durch die kurzen Wege werden Zyklusfrequenzen bis zu 600 Zyklen pro Minute erreicht. Alle drei Arbeiten kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass sich eine hochfrequente Abziehbewegung positiv auf die Wärmeabfuhr des Stranges über die Kokille auswirkt. Bei einer konventionellen Go-Stop-Back Kinematik löst sich das Band innerhalb der Wartezeit von der Kokille, wodurch der Wärmeübergang deutlich

reduziert ist. Dieser Prozess kann durch den hochzyklischen Abzug unterbunden werden. Die Luftspaltbildung tritt dabei erst deutlich später ein, die Kokille kann mehr Wärme aus dem Strang aufnehmen. Aus diesem Grund kann mit der hochzyklischen Bewegung auch deutlich schneller gegossen werden. Die Lage der Erstarrungsfront verschiebt sich mehr in den Bereich der aktiven Kühlzone in der Mitte der Kokille. Im Gefüge ist im Längsschliff ein „Aufrichten“ der Körner (Längsachsen der Körner orientieren sich verstärkt senkrecht zur Bandoberfläche) zu erkennen. Die Wärme wird jetzt verstärkt senkrecht zur Gießrichtung nach außen, in Richtung des Kühlers abgeführt. Die Wärmeabfuhr in axialer Bandrichtung ist kleiner. Aufgrund der sich stabilisierenden Wärmeabfuhrverhältnisse an der Oberseite des Stranges fällt die Korngrößenverteilung über dem Strangquerschnitt deutlich homogener aus. Durch die gesteigerte Wärmeabfuhr ist das Korn feiner [BRAU94, SIGG04_1].

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Gefügequalität sind die Strömungsverhältnisse in der Schmelze beim Einlauf in die Kokille. Bei einem laminaren Eintritt der Schmelze liegt an der Unterseite der Kokille (vom Mittelpunkt der Kokille aus betrachtet) eine stabile Temperaturschichtung vor. Vom heißesten Bereich der Mitte wird die Schmelze in Richtung der unteren Kokillenwand immer kühler. In der Oberhälfte der Kokille sind die Verhältnisse jedoch umgekehrt. Die Temperaturschichtung ist instabil, was eine Konvektionsbewegung in der Schmelze hervorruft. Nach [THOM76] ist dies einer der Gründe für die Verschiebung der thermischen Mitte in die Oberhälfte des Stranges. Durch die konvektionsbedingten höheren Temperaturen der Schmelze in der Oberhälfte setzt die Randschalenbildung im Vergleich zur Unterseite in Gießrichtung später ein. Die zusätzlich bessere Wärmeabfuhr in der Unterhälfte begünstigt dort ein schnelleres Kornwachstum [HART89]. Aus diesem Grund versucht [THOM76] die Strömungsverhältnisse beim Einlauf in die Kokille möglichst turbulent zu gestalten. Die Verwendung einer Blende im Ofenauslauf sorgt für eine bestmögliche Durchmischung der Schmelze in der Kokille. Das Ausbilden einer Konvektionsbewegung, die eine Temperaturschichtung in der Kokille mit sich bringt, soll damit verhindert werden. [HART89, THOM76, TENS95, WEIS95]

2.6.2 Gießgeschwindigkeit

Zahlreiche weitere Arbeiten erörtern den Zusammenhang zwischen der Gießgeschwindigkeit und den sich ausbildenden Kornstrukturen im Produkt. Übereinstimmend wird festgestellt, dass sich die Lage der thermischen Mitte mit steigender Gießgeschwindigkeit der geometrischen Mitte annähert. Der gleiche Zusammenhang ist für die Gleichmäßigkeit der Korngrößen über dem Strangquerschnitt festzustellen. Die Korngrößen in der Ober- und Unterhälfte des Stranges nähern sich einander an, wodurch die Korngrößenverteilung über dem Querschnitt homogener ausfällt. Als Ursache für diese Zusammenhänge werden unterschiedliche Theorien angeführt. Hadden und Indyk gehen in ihren Ausführungen davon aus, dass die durch die erhöhte Gießgeschwindigkeit stärker ausgeprägte Turbulenz der Schmelzeströmung im Kokilleneinlaufbereich für eine bessere Durchmischung und Aufhebung der Temperaturschichtung sorgt [HADD77]. Nach Hartmann ist der durch das längere Anliegen der Randschale an der Kokille deutlich bessere Wärmeübergang für diesen Effekt verantwortlich [HART89]. Die durch den Luftspalt bedingten niedrigeren Temperaturen der oberen Kokillenplatte begünstigen ein stärker ausgeprägtes Kornwachstum senkrecht zur Gießrichtung in der Oberhälfte des Stranges.

Die Verlagerung der thermischen Mitte bei Erhöhung der Gießgeschwindigkeit wird auch in [RICK09] beobachtet. Durch den entwickelten Kokillen-Kühler-Aufbau mit einer zusätzlichen Flüssigmetallkühlung zwischen Kokille und Kühler kann hier die Gießgeschwindigkeit im Vergleich zu einem konventionellen Aufbau um bis zu 130 % gesteigert werden. Positive Auswirkungen auf das Gefüge hinsichtlich der Homogenität der Kornstrukturen werden in der Arbeit aufgezeigt.

Eine vollständige Verschiebung der thermischen in die geometrische Mitte wird jedoch bei allen vorgestellten Lösungsansätzen nicht erreicht.

3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Aus wissenschaftlicher Sicht stehen beim Stranggießen vor allem das Zusammenwirken der einzelnen Kühlsystemkomponenten sowie deren Einfluss auf die Qualität des Stranges im Vordergrund. Die entscheidende Auswirkung auf die Güte des Stranges hat dabei die Art der Erstarrung. Diese wird beim Stranggießen durch die Wärmeabfuhr von der Kokille zum Kühler und weiter ins Kühlwasser beeinflusst. Aufgrund der in Kapitel 2.2.1 und 2.2.2 beschriebenen instationären Phänomene „Strangabheben“ sowie „Kokillenatmen“ ist die Wärmeabfuhr jedoch beschränkt. Da der Strang an seiner Unterseite aufgrund der Schwerkraft einen besseren Kontakt zur Kokille aufweist, ergibt sich im horizontalen System eine über dem Querschnitt des Gussproduktes asymmetrische Wärmeabfuhr. Der Wärmeübergang zwischen Strang und Kokille ist dort im Vergleich zur Oberseite folglich besser.

Bei den wissenschaftlichen Experimenten in der Vergangenheit stellten die entstehenden Luftspalte zwischen Strang und Kokille, sowie zwischen Kokille und Kühler eine schwer zugängliche, aber entscheidende Größen im wärmeabführenden System dar. Durch den Einsatz einer Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler konnte der Einfluss des Kokillenatmens in [RICK09] eliminiert werden.

Aufbauend auf diesen Versuchen, bei denen eine Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler das Auftreten eines Luftspaltes unterbindet, soll als Ziel dieser Arbeit ein Kühlsystem entwickelt werden, das eine symmetrische Wärmeabfuhr über dem Querschnitt des Gussproduktes gewährleistet. Die Auswirkungen des Strangabhebens und der Schwerkraft sollen kompensiert werden. Die Wärmeabfuhr soll über die Gießdauer hinweg konstant gehalten und instationäre Vorgänge unterbunden werden. Durch die Realisierung dieser Forderungen soll die Qualität des auf horizontalen Stranggießanlagen gegossenen Materials gesteigert und die Produktivität der Anlagen erhöht werden. Der Gießprozess könnte dadurch stabilisiert und eine gleichbleibende Qualität des Strangs sichergestellt werden.

Die Studien zur Beeinflussung der Wärmeabfuhr aus dem Strang über die Kokille an den Kühler werden in Anlehnung an [RICK09] zunächst an einem rechteckigen Bandformat durchgeführt. Die Übertragung auf ein Rundformat soll folgen. Die Gießversuche sollen auf der Stranggießanlage des Institutes durchgeführt werden. Dazu ist es nötig, die Anlage umzubauen und an ein Rundformat anzupassen. Die Neukonstruktion eines Kokillen-Kühler-Systems, das industriellen Gegebenheiten entspricht, ist ebenso erforderlich, wie eine Adaption der Abzieheinheit. Um den durch die Flüssigmetallschicht erhöhten Gießgeschwindigkeiten gerecht zu werden, soll die gesamte Steuereinheit der Anlage erneuert und auf aktuellen Stand gebracht werden. Dies beinhaltet den Aufbau einer zeitkonsistenten Erfassung der Temperatur- und Anlagendaten.

Zur Erhöhung der Flexibilität des Kühlsystems wird ein zusätzlicher Flüssigmetall-Kühlkreislauf aufgebaut. Hierbei liegt der Fokus insbesondere auf der Auswahl einer geeigneten Pumpe.

In vorangegangenen Arbeiten wurde in Zusammenarbeit mit dem Simulationssoftwareanbieter RWP ein Modell des Kokillen-Kühler-Systems entwickelt und ein Rechenalgorithmus implementiert. Das Berechnungsmodell soll im Rahmen dieser Arbeit auf den Werkstoff Messing angepasst werden, um in einer Vorstudie generelle Möglichkeiten zur Beeinflussung der Wärmeabfuhr aus dem Kokillen-Kühler-System abschätzen zu können.

4 Lösungsansätze

Um Art und Ausbildung des Gefüges beim Stranggießen beeinflussen zu können, ohne die zu vergießende Legierung selbst zu verändern, ist es notwendig, im Bereich der Erstarrung in das Kokillen-Kühler-System einzugreifen. *Kurz und Fisher* gehen in ihren Ausführungen davon aus, dass das Kornwachstum zu Beginn der Erstarrung von einer festgelegten Anzahl von Keimen ausgeht. Diese Keime entstehen bei der ersten Unterkühlung der Schmelze. Durch die während der Erstarrung frei werdende latente Wärme übersteigt die Temperatur der Schmelze das Keimbildungstemperaturniveau, die Keimbildung ist abgeschlossen. Über den Verlauf der Erstarrung wachsen die Körner ausschließlich an dieser initialen Keimanzahl weiter, vorausgesetzt, dass die Temperaturen in der Schmelze vor der Erstarrungsfront nicht unter das Keimbildungsniveau zurück fallen. Das heißt, dass bereits bei der ersten Kühlung der Schmelze die Ausbildung der späteren Kornstrukturen mit beeinflusst wird. [KURZ92]

Je nach Gießformat und zu vergießender Legierung findet die Erstarrung beim Stranggießen von der ersten Randschalenbildung bis hin zur vollständigen Erstarrung des Gussquerschnittes über eine kleinere oder größere Gießstrecke statt. Die initiale Randschalenbildung erfolgt immer innerhalb der Kokille. Die vollständige Erstarrung findet format- und legierungsabhängig innerhalb oder außerhalb der Kokille statt. Beim Austritt des Stranges aus der Kokille muss die Festigkeit der Schale groß genug sein, so dass Wiederaufschmelzungen und somit ein Durchbruch des Stranges verhindert werden können. Aus diesem Grund folgt im Anschluss an die Kokille oftmals eine Sekundärkühlzone, in der die Strangschale über Kühlwasser oder Druckluft weiter gekühlt wird.

Betrachtet man das ofenabhängige System der utg-Stranggießanlage vom Ofen kommend über den Heißwechselrahmen bis hin zu Kokille und Kühler, so gibt es zahlreiche Einflussfaktoren (Abbildung 7), die den Wärmefluss aus dem Ofen ins Kühlwasser und somit den Erstarrungsvorgang beeinflussen (Abbildung 8):

Einflussfaktoren	Abhängig von
1. Wärmeeintrag in die Kokille durch Schmelze	- Gießgeschwindigkeit - Strömungseigenschaften der Schmelze - Schmelzebewegung im Ofen - Art des Ziehzyklus
2. Wärmeeintrag in die Kokille durch Ofen	- Ofenleistung - Ofenfüllstand - konstruktive Anbindung Ofen - Kokille
3. Wärmeübergang Strang / Kokille	- Luftspaltausprägung zwischen Strang und Kokille - Lage der Erstarrungsfront (Gießgeschwindigkeit, Kühlwassermenge und -temperatur) - Art des Ziehzyklus - Beschaffenheit der Randschale
4. Wärmeleitung durch die Kokille	- Werkstoffeigenschaften
5. Wärmeübergang Kokille / Kühler	- Oberflächenzustand Kokille und Kühler - Planheit von Kokille und Kühler - Vorspannkraft zwischen Kokille und Kühler - Kokillenatmen
6. Wärmeabfuhr Kühlwasser	- Durchflussmenge Kühlwasser - Chemische Zusammensetzung des Kühlwassers - Strömungseigenschaften des Kühlwassers im Kühler - Temperatur Kühlwasser

Abbildung 7: Einflussfaktoren auf den Wärmefluss vom Ofen in den Kühler

Der Wärmeeintrag in die Kokille erfolgt größtenteils über die Wärmeenergie der Schmelze. Diese lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\dot{Q}_S = \dot{V}_S \cdot \rho_{\text{CuZn37}} \cdot (c_{p,S} \cdot \Delta T_S + L) \quad (\text{Formel 1})$$

\dot{Q}_S = der Kokille zugeführter Wärmestrom durch Schmelze bzw. Strang [W]

\dot{V}_S = Volumenstrom Schmelze [m³/s]

ρ_{CuZn37} = Dichte CuZn37 [kg/m³]

$c_{p,s}$ = spezifische Wärmekapazität der Schmelze [J/kgK]

ΔT_s = Schmelzeintrittstemperatur - Bandaustrittstemperatur [K]

L = spezifische Erstarrungsenthalpie [J/kg]

Zusätzlich zu diesem Energieeintrag muss bei einem ofenabhängigen Kokillen-Kühler-System ein Energieeintrag berücksichtigt werden, der über die Anbindung zwischen Ofen und Kokille bzw. direkt über die Kokille, sofern diese in die Schmelze eintaucht, in die Kokille eingebracht wird.

Die Wärmeabfuhr aus der Kokille erfolgt zum Einen senkrecht zur Gießrichtung über die auf die Kokille aufgesetzten wasserdurchströmten Kühlplatten:

$$\dot{Q}_w = \dot{V}_w \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot \Delta T_w \quad (\text{Formel 2})$$

\dot{Q}_w = vom Kühlwasser abgeführter Wärmestrom [W]

\dot{V}_w = Volumenstrom Wasser [m³/s]

ρ_w = Dichte Wasser [kg/m³]

$c_{p,w}$ = spezifische Wärmekapazität Wasser [J/kgK]

ΔT_w = Wasseraustrittstemperatur - Wassereintrittstemperatur [K]

Zum Anderen wird ein Anteil der Wärmeenergie in axialer Richtung über das abgezogene Band abgeführt. Wie hoch die beiden Anteile liegen, hängt dabei von vielen verschiedenen Faktoren ab. Senkrecht zur Gießrichtung sind die Parameter Wärmeübergang zwischen Schmelze bzw. Strang und Kokille (3), Wärmeleitung durch die Kokille (4), Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler (5), Wärmeleitung durch den Kühlerwerkstoff (6) sowie der Wärmeübergang vom Kühler auf das Kühlwasser (7) die entscheidenden Einflussfaktoren für die Leistungsfähigkeit des Kühlsystems (Abbildung 8, Nr. 3 - Nr. 7).

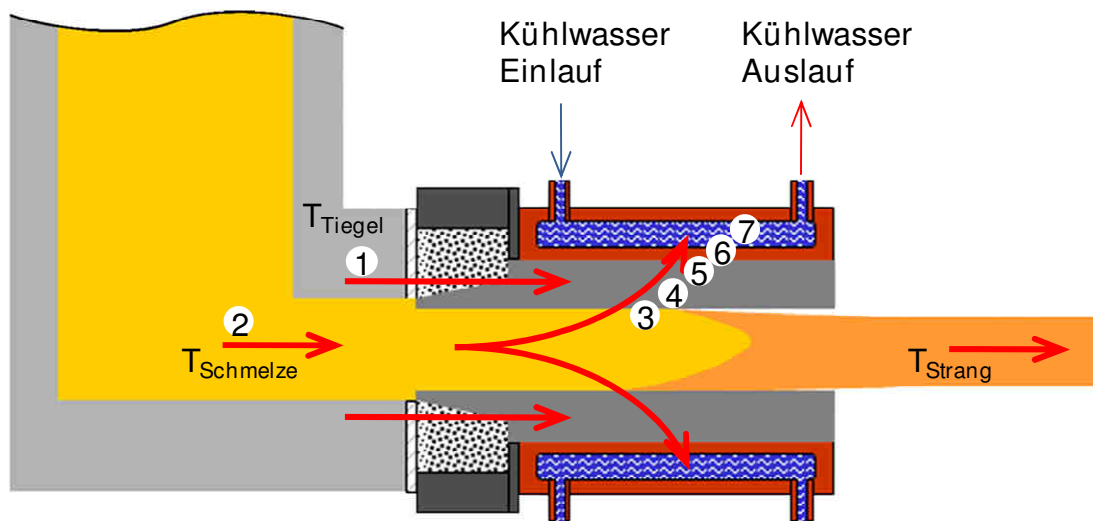


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf die Wärmeabfuhr vom Ofen über die Kokille ins Kühlwasser

Eine direkte Veränderung des Wärmeübergangs zwischen Schmelze bzw. Strang und Kokille kann über die Oberfläche der Kokille und bzw. oder über das Einbringen einer Verjüngung in die Kokille erfolgen. Durch eine geschliffene Oberfläche und bzw. oder eine Verminderung der Luftspaltbildung zwischen Strang und Kokille kann die Wärmeabfuhr verbessert werden. Der im vorliegenden System eingesetzte Kokillengraphit entspricht jedoch einem Standardkokillenwerkstoff, dessen Oberflächenrauigkeit bereits auf den Einsatz in Stranggießkokillen ausgelegt ist. Eine sich verjüngende Kokille kann nur bei einem stationären Gießbetrieb eingesetzt werden. Eine Variation von Gießparametern ist damit nicht möglich, da hier die Gefahr besteht, dass sich der Strang in der Kokille verklemmt.

Die Wärmeleitfähigkeit des Kühlerwerkstoffes ist durch die Zugabe verschiedener Legierungselemente zum Grundwerkstoff Kupfer bereits ausgeschöpft. Der Wärmeübergang vom Kühler auf das Kühlwasser ist durch das Einbringen von Verdrängerstäben, die die Strömung in den Kühlwasserbohrungen maximal turbulent gestalten sollen, im bestehenden System bereits optimiert. Gleiches gilt für den Werkstoff des Kühlers.

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit versucht, in den Erstarrungsvorgang über die Faktoren:

- Wärmeleitung durch die Kokille
- Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler
- Variation der Kühlzonen an der Kokille

eingzugreifen und somit den Wärmestrom von der Schmelze bis zum Kühlwasser zu verändern. Die Wärmeleitung durch die Kokille kann über die Eigenschaften des verwendeten Kokillenwerkstoffes gesteuert werden. Graphit, das als gängiger Kokillenwerkstoff beim Stranggießen von Cu-Legierungen verwendet wird, ist im Handel mit sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften erhältlich. Neben der Wärmeleitfähigkeit müssen weitere Werkstoffkennwerte wie z.B. die Restporosität des Werkstoffes und damit seine Dichte und Festigkeit beachtet werden [KIND95]. Da eine Stranggießkokille bei Bandformaten zumeist aus mehreren Einzelteilen besteht, existiert die Möglichkeit, verschiedene Materialien innerhalb einer Kokille zu kombinieren und eine Hybridkokille aufzubauen. Denkbar ist hier auch der Einsatz eines alternativen Kokillenwerkstoffes.

Durch den Einsatz von Flüssigmetall als Wärmekoppelmedium zwischen Kokille und Kühler kann beim Bandformat der stark qualitätsbestimmende Effekt des Kokillensatmens eliminiert werden. Weiterhin können topologische und montageabhängige Einflüsse wie die Oberflächenrauheit oder die Vorspannkraft, mit der die Kühlerplatten auf die Kokille gepresst werden, nahezu vernachlässigt werden. Der Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler kann über die verwendete Schichtstärke des Flüssigmetalls, sowie über Größe und Lage der Kühlflächen der Kokille beeinflusst werden.

Aus den genannten Aspekten lässt sich folgender Versuchsplan ableiten:

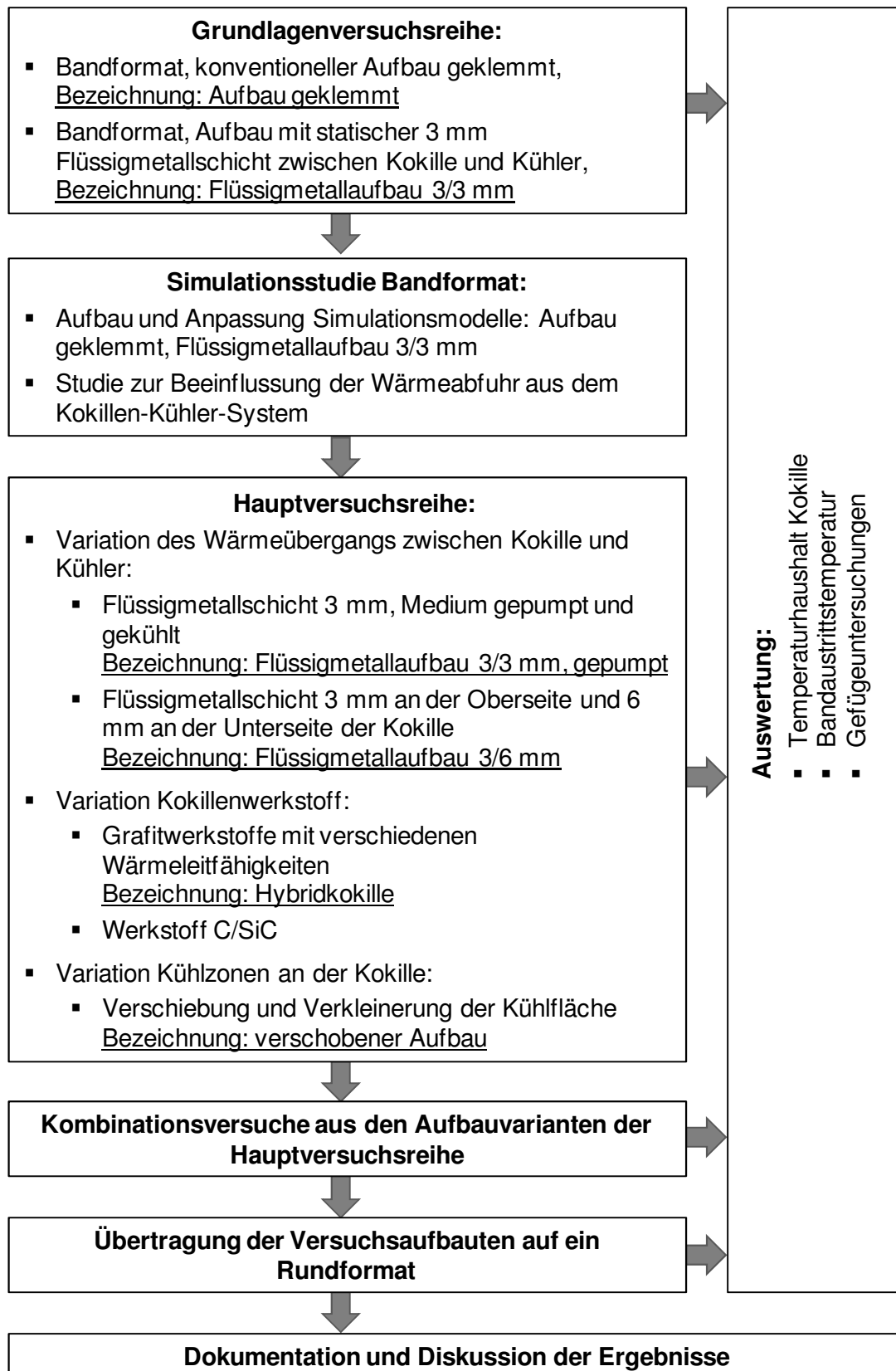


Abbildung 9: Versuchsplan

An die Einzelversuche schließen sich ergebnisabhängig Kombinationsversuche an, um eine bestmögliche Qualität hinsichtlich Homogenität und Symmetrie im Strangguss-Produkt zu erzeugen. Die Versuche werden zunächst am Bandformat durchgeführt. Bei positivem Versuchsergebnis, das heißt dem Verschieben der thermischen in die geometrische Mitte des Stranges, erfolgt eine Übertragung der Aufbauvariante auf ein Rundformat.

5 Versuchsgeräte

5.1 Stranggießanlage

Der Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen verfügt über eine Stranggießanlage der Bauart Demag Technica. Es handelt sich dabei um eine Industrieanlage vom Typ 30/10 D I MCP N, die in mehreren Schritten umgebaut und modernisiert wurde. Einzelne Komponenten, wie der Antrieb der Abzugseinheit, das vorhandene Schmelzaggregat sowie die Steuerung der Anlage wurden über die Laufzeit der Anlage erneuert. Die Anlage ist sowohl für den Betrieb als Horizontal- als auch als Vertikalanlage geeignet. Ursprünglich für das Vergießen von Edelmetallen gedacht, eignet sich die Anlage aufgrund ihrer sehr geringen Baugröße und ihrer sehr großen Flexibilität besonders für Forschungszwecke.

Die Stranggießanlage wird mit einem Tiegelofen (Einsatz aus Tongraphit, Vesuvius Becker & Piscantor Grossalmeroder Schmelztiegelwerke GmbH) betrieben, der sowohl als Vergieß- als auch als Schmelzofen genutzt wird. Der Schuhtiegeleinsatz (Nutzinhalt ca. 10 l) wird dabei induktiv beheizt (Nennleistung 60 kW, Frequenz 4 kHz). Des Weiteren steht ein Induktions-Schmelzofen der Fa. Otto Junker GmbH (MFT AI 85, Nennleistung 75 kW, Frequenz 1 kHz, Nutzinhalt ca. 35 l) zur Verfügung. Die Schmelze wird über eine beheizbare Gießrinne in den Gießofen überführt. Abbildung 10 zeigt den schematischen Aufbau der Anlage im horizontalen Betrieb.

Dem Materialfluss folgend, schließt die feststehende Kokillen-Kühler-Einheit unmittelbar an den Gießofen an. Als thermische Isolierung zwischen der Ofenschnauze (Auslauf des Schuhtiegels) und der Kokille wird ein Heißwechselrahmen eingesetzt. Dieser ist mit einem Feuerfestbeton ausgemauert. Die Abdichtung zwischen Ofenschnauze und Heißwechselrahmen erfolgt durch eine Keramikfasermatte. Der gesamte Aufbau (Ofen, Dichtung und Kokillen-Kühler-Paket) wird über eine Spindel miteinander verspannt.

Da die genannten Komponenten (Ofen und Kokillen-Kühler-Paket) auf dem schwenkbaren Tragarm der Anlage montiert sind, kann die Richtung der Abziehbe-

wegung frei variiert werden. Dies ermöglicht ebenso einen Betrieb als Vertikal-Gießanlage. Hierfür steht ein eigener Induktionsofen zur Verfügung (Nennleistung 60 kW, Frequenz 4 kHz).

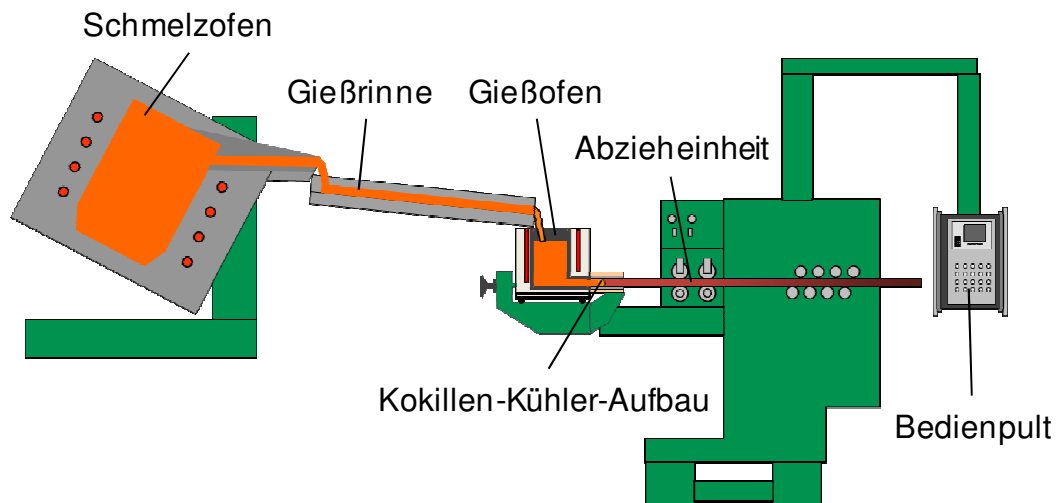


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der utg-Stranggießanlage [OECH99]

Der Abzug des Stranges erfolgt über zwei Walzenpaare. Die beiden unteren Walzen sind mit einem Direktantrieb ausgestattet. Der Servomotor wird über die neu aufgebaute Anlagensteuerung der Fa. esa4u GmbH bedient. Die gewünschte Betriebsart (Ziehzyklus, Geschwindigkeit, Frequenz) kann frei eingestellt werden.

In der Anlagensteuerung werden alle Betriebsdaten der Anlage zusammengeführt und protokolliert. Diese umfassen die Daten der Abziehkinematik, Daten der Ofensteuerung, die Erfassung der Temperaturen in der Kokille, sowie die Daten der Kokillenkühlung (Wasserdruck, Durchflussmenge, Kühlwasser-Vorlauf- und Rücklauftemperaturen).

5.2 Kokillen-Kühler-Einheiten

Für das Stranggießen von Kupferlegierungen mit ofenabhängiger Gleitkokille hat sich Feinkorngraphit als Kokillenwerkstoff etabliert. Er zeichnet sich besonders durch seine hohe Wärmeleitfähigkeit, seine geringe Benetzbarkeit durch Schmelze, sowie seine sehr guten Schmier- und Gleiteigenschaften aus [KIND95].

5.2.1 Bandformat

Konventioneller Aufbau

Die Kokille aus dem Werkstoff Graphit (SGL Carbon, $\lambda = 100 \text{ W/mK}$) ist für das Bandformat 4-teilig ausgeführt. Sie besteht aus einer oberen und einer unteren Graphitplatte sowie zwei Seitenleisten. Die Einzelteile sind über Graphitstifte zueinander positioniert. Das auf der Anlage vergossene Standardformat beträgt $150 \times 15 \text{ mm}$. Zur Kühlung der Kokille sind an deren Ober- und Unterseite wasserdurchströmte Kupferkühlplatten aufgesetzt. Diese werden am seitlichen Rand über Gewindestangen zusammengezogen und auf die Kokille gepresst. Durch die geringe Bandbreite ist eine zusätzliche Verschraubung zwischen Kokille und Kühler nicht notwendig. Die Durchflussmenge der Wasserkühlung kann in beiden Kühlerplatten unabhängig voneinander geregelt werden. Der Aufbau der Komponenten ist in Abbildung 11 dargestellt.

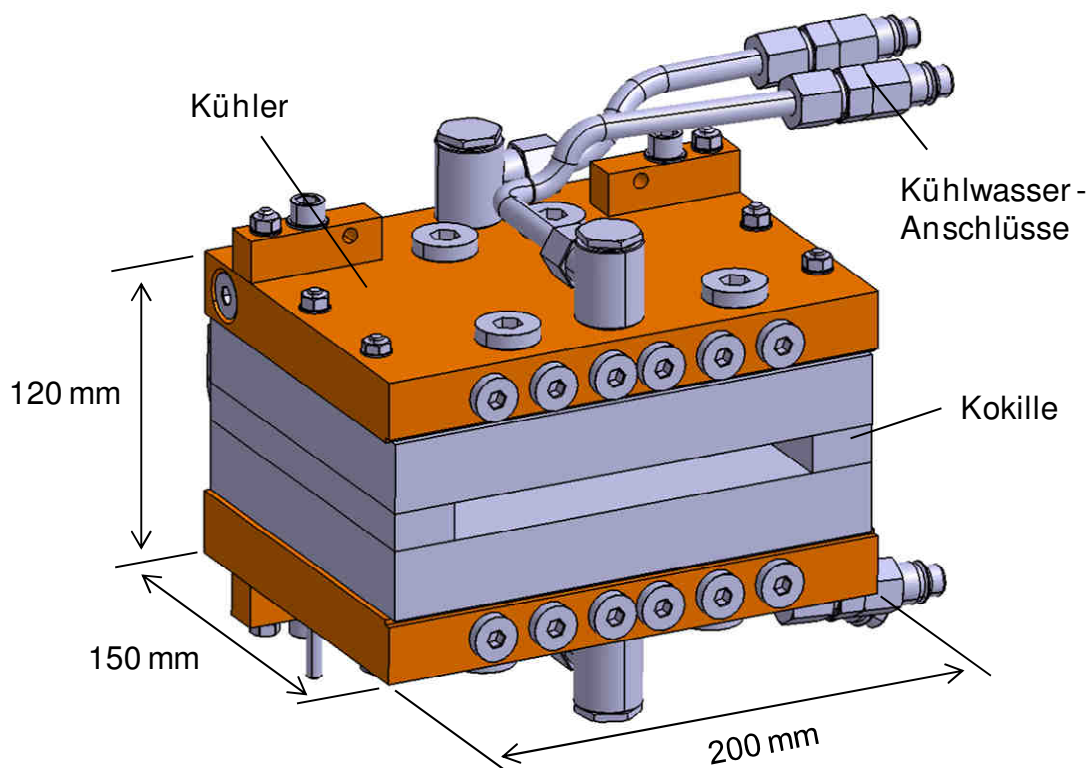


Abbildung 11: Konventioneller Kokillen-Kühler-Aufbau Bandformat [RICK09]

Flüssigmetallaufbau

Bei einem Kokillen-Kühler-Aufbau mit Flüssigmetallschicht nach [RICK09] wird ein Metallrahmen an der Ober- und der Unterseite der Kokille zwischen Kokille und Kühler eingebracht. Zusammen mit zwei Dichtungen aus Graphitpapier bildet ein solcher Rahmen jeweils den Hohlraum, der während des Gießbetriebes mit Flüssigmetall gefüllt ist. Da sich das Flüssigmetall unter Temperatureinfluss ausdehnt, sind die Einfüllöffnungen jeweils mit einem Ausgleichsbehälter versehen, der Volumenänderungen kompensieren kann. Somit ist sichergestellt, dass der Hohlraum zwischen Kokille und Kühler zu jedem Zeitpunkt während des Gießbetriebes gefüllt ist (siehe Abbildung 12).

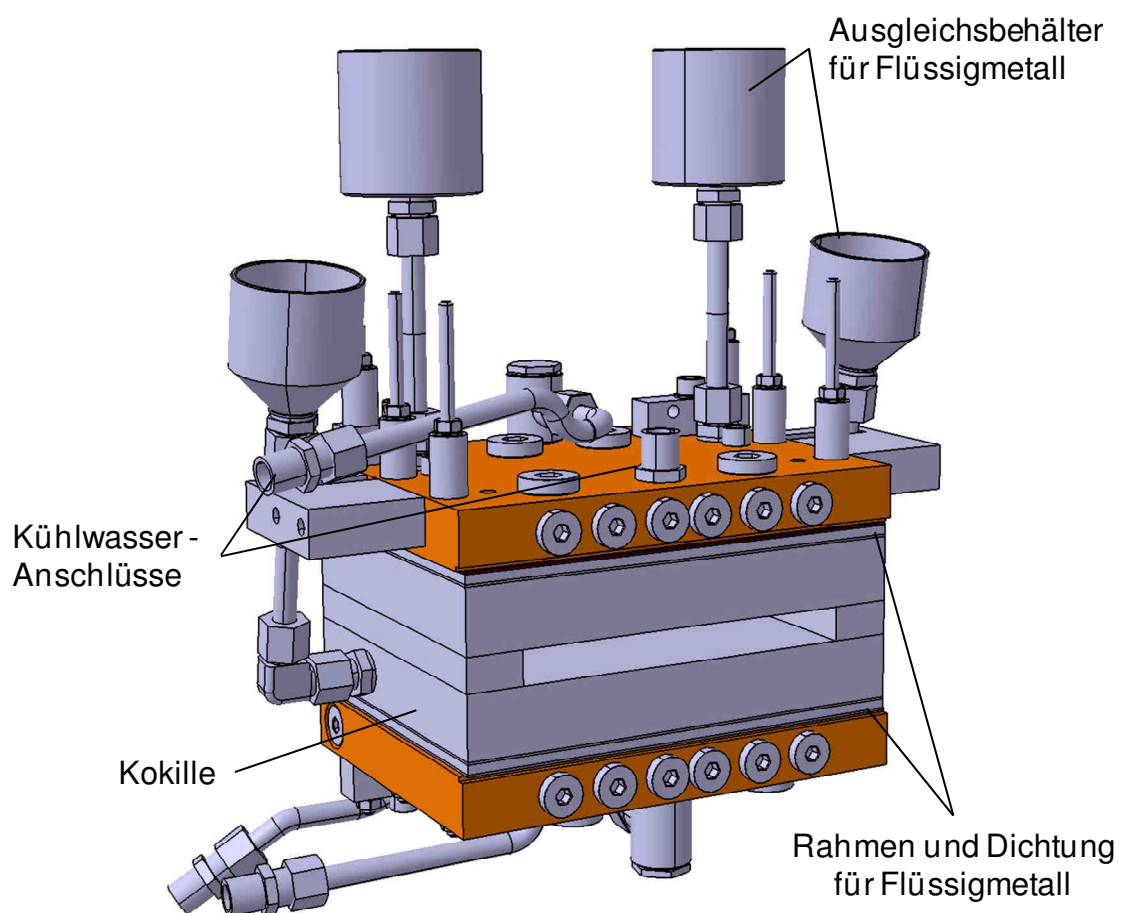


Abbildung 12: Kokillen-Kühler-Aufbau mit zusätzlicher Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler zur Eliminierung des Kokillenatmens

5.2.2 Rundformat

Für das Rundformat (\varnothing 40 mm) kommt eine 1-teilige Graphitkokille zum Einsatz. Diese wird, anders als beim Bandformat, in einen Kupferkühler eingeschumpft (siehe Abbildung 13). Durch diesen Aufbau ist im Vergleich zum Bandformat ein deutlich besserer Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler erreichbar.

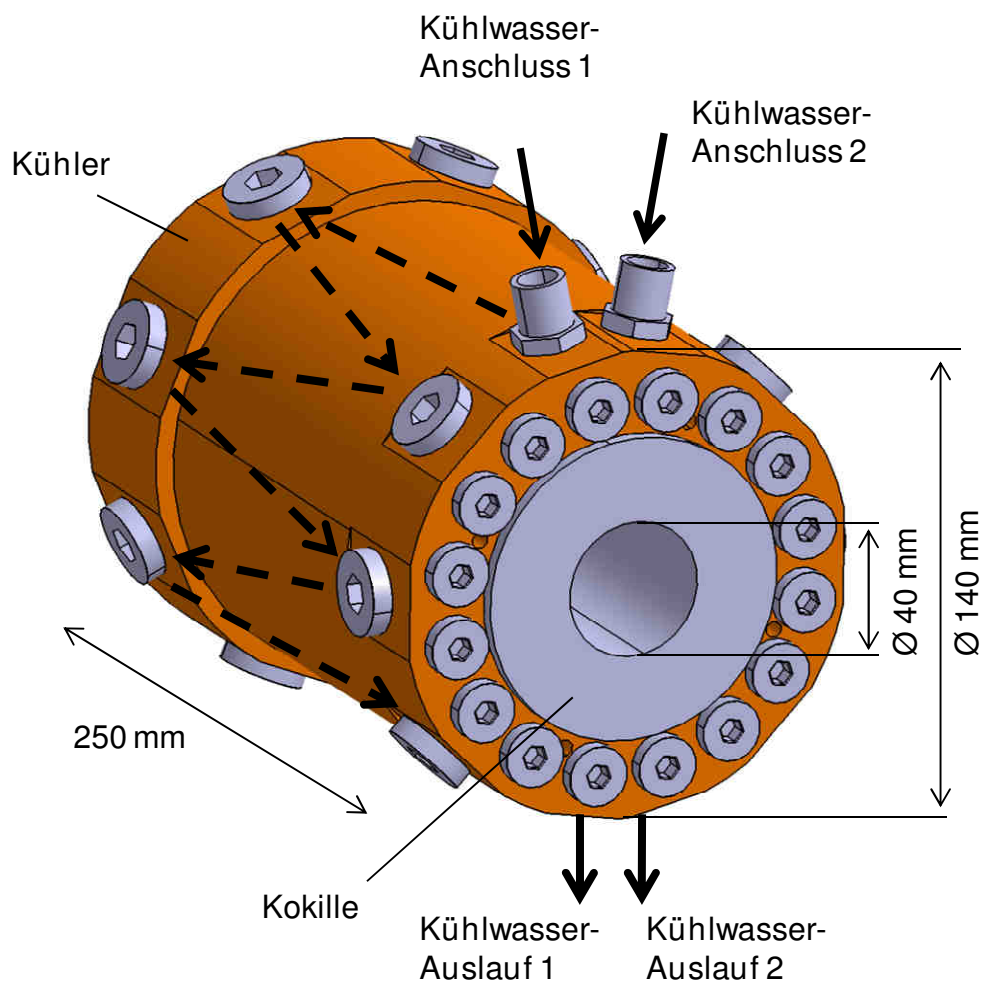


Abbildung 13: Konventioneller Kokillen-Kühler-Aufbau Rundformat

Der Kühlkreislauf ist 2-teilig ausgeführt und beinhaltet jeweils eine Kühlerhälfte.

5.3 Funkenemissionsspektrometer

Die chemische Analyse der Schmelze im Ofen erfolgt mit Hilfe der Funkenemissionsspektrometrie. Hierfür verfügt der Lehrstuhl über ein Analysegerät der

Fa. WAS AG, Uedem. Durch eine Funkenentladung wird ein Teil der Atome des zu analysierenden Materials an der Messstelle auf ein energetisch höher liegendes Niveau gebracht. Beim Zurückfallen in den energetischen Grundzustand wird Strahlung (Energie) emittiert. Über das Plancksche Strahlungsgesetz ist der Zusammenhang zwischen Energie und Wellenlänge gegeben. Da die ermittelten Wellenlängen elementspezifisch sind, und zudem die Intensität der Strahlung proportional zur Anzahl der vorhandenen Atome ist, lassen sich sowohl quantitative als auch qualitative Aussagen über die Zusammensetzung der Probe treffen. [NIED02]

5.4 Lichtmikroskop

Sämtliche in dieser Arbeit enthaltenen Schlibfbilder zur Analyse der Gefügequalität wurden mit dem Lichtmikroskop Axioplan II, Fa. Zeiss erstellt. Über die dazugehörige Software AxioVision (Release 4.7.2), Fa. Zeiss, werden die Einzelbilder zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Korngrößenanalysen sowie Vermessungen des Gefüges werden ebenfalls mit dieser Software durchgeführt.

6 Simulation

Ziel der Simulation ist es, Prozesse bereits in einem frühen Entwicklungsstadium zu optimieren. Dadurch können in den immer kürzeren Entwicklungsprozessen massiv Kosten und Zeit eingespart werden. Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige Abschätzung sind jedoch eine hinreichend genaue Modellierung der realen Umstände sowie verlässliche Werkstoffkennwerte, die oft nur sehr schwer zu ermitteln sind.

Die heute am Markt erhältlichen Softwaresysteme können die sehr komplexen Gegebenheiten des Stranggießprozesses nur eingeschränkt in ausreichender Genauigkeit abbilden. Die Anforderungen an die Simulation sind dabei sehr vielfältig. Neben der thermischen Berechnung muss die Simulation mechanisch gekoppelt erfolgen, um instationäre Vorgänge wie z.B. das Kokillenatmen im Kokillen-Kühler-System oder das Strangabheben mit berücksichtigen zu können. Die nahezu isolierende Wirkung der Luftspalte ist eine die Wärmeabfuhr am maßgeblichsten bestimmende Einflussgröße im realen System. Des Weiteren ist es erforderlich, eine Strömungssimulation mit zu implementieren. Konvektions- sowie Strömungsbewegungen der Schmelze innerhalb der Kokille haben einen entscheidenden Einfluss auf den Temperaturhaushalt des Stranges. Temperaturauswertungen von Versuchen bestätigen lokal und zeitlich sehr unterschiedlich ausgeprägte Wärmeströme aus der Kokille ins Kühlwasser.

Für eine rein qualitative Beurteilung von Möglichkeiten zur Beeinflussung der Wärmeabfuhr aus der Kokille wird die FEM-Software WinCast-Conti der Firma RWP GmbH, Roetgen verwendet. Diese basiert auf dem Gießsimulationsprogramm WinCast und wurde durch den Softwarehersteller zur Simulation des Stranggießprozesses angepasst [RICK09]. Nach dem aktuellen Stand kann der Stranggießprozess sowohl thermisch als auch thermomechanisch gekoppelt berechnet werden. Eine Strömungsberechnung ist derzeit nicht möglich. Um die Komplexität der Studie zur Wärmeabfuhr gering zu halten, werden alle Berechnungen thermisch durchgeführt. Eine thermomechanisch gekoppelte Simulation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht

berücksichtigt, da in den Untersuchungen lediglich die prinzipiellen Auswirkungen von konstruktiven Veränderungen des Kokillen-Kühler-Systems auf den Temperaturhaushalt von Kokille, Kühler und Strang abgeschätzt werden.

Als Grundlage für die Simulation wird das in [RICK09] implementierte Modell des Kokillen-Kühler-Aufbaus mit einer Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler zur Verhinderung der Kokillenatmens verwendet. Die Geometrie wurde anhand der CAD-Daten in WinCast-Conti erstellt und vernetzt. Abbildung 14 veranschaulicht den Aufbau des Kokillen-Kühler-Systems als Simulationsmodell. Dabei ist das Modell als Halbmodell ausgeführt.

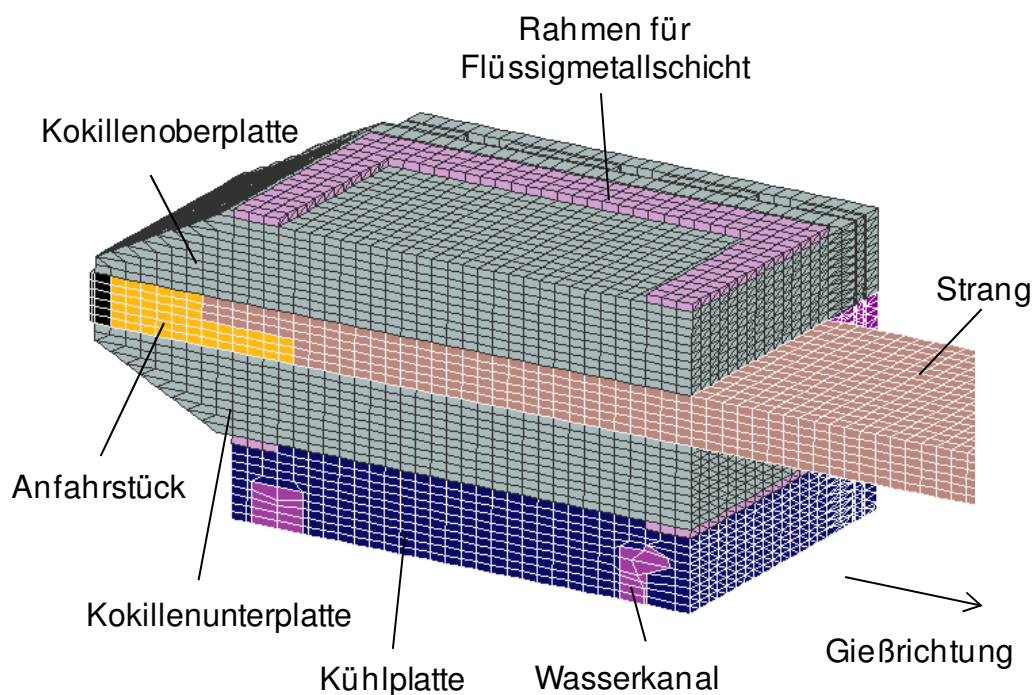


Abbildung 14: Aufbau des Kokillen-Kühler-Systems als FEM-Modell

Da der Aufbau des Kokillen-Kühler-Systems symmetrisch ist, kann die Rechenzeit durch die Berechnung des Teilmodells erheblich reduziert werden. Alle Einzelkomponenten des Systems werden modelliert, so dass dabei kein Genauigkeitsverlust entsteht.

Die eingesetzten Werkstoffkennwerte basieren auf Herstellerangaben und Angaben aus Simulationssoftware-Datenbanken. Die Starttemperaturwerte zu Beginn der Simulation werden anhand von Temperaturmessdaten aus dem Versuch abgeglichen. Die in der Realität vorherrschenden Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Strang und Kokille sowie zwischen Kokille, Flüssigmetall und Kühler sind nicht exakt bekannt. Die in der Simulation verwendeten Werte wurden iterativ angepasst und stützen sich auf Temperaturmessdaten, die in früheren Gießversuchen ermittelt wurden.

Abbildung 15 zeigt den gemessenen sowie den simulierten Temperaturverlauf über der Länge der Kokille für den Flüssigmetallaufbau. Da in der rein thermischen Simulation Verzüge und der Einfluss der Gravitation nicht berücksichtigt wurden, ist in der Simulation entsprechend kein Unterschied in den Temperaturen zwischen Ober- und Unterseite der Kokille festzustellen.

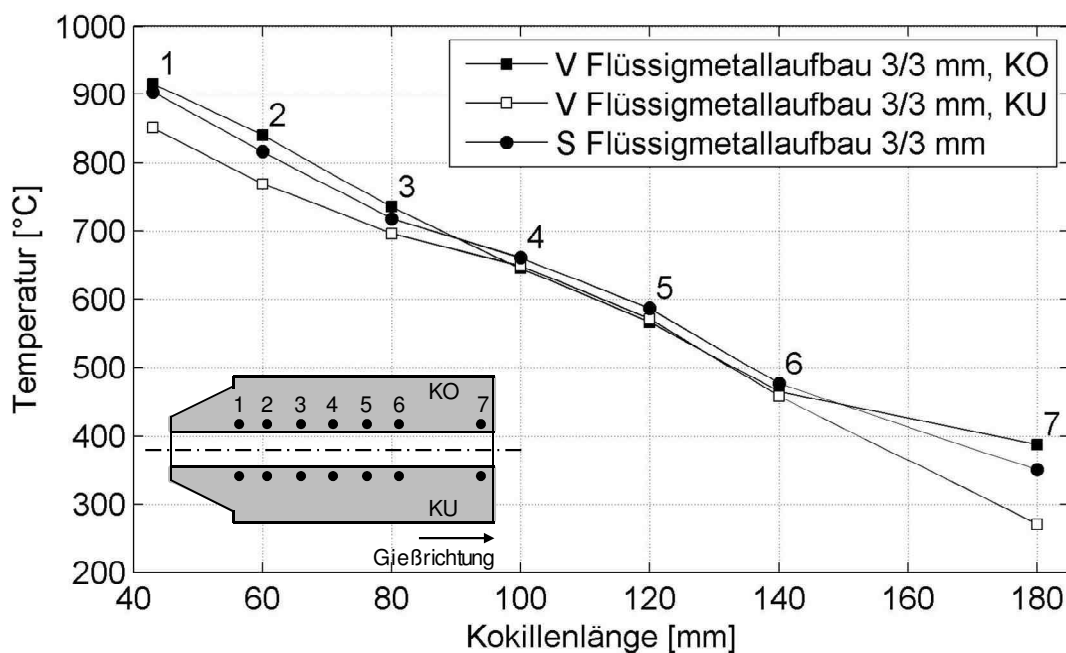


Abbildung 15: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille (KO und KU), Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm Versuch (V) und Simulation (S)

Das simulierte Temperaturprofil liegt sehr gut zwischen den beiden gemessenen Temperaturverläufen von Ober- und Unterseite der Kokille (KO und KU). Die berechnete Bandaustrittstemperatur zeigt mit dem gemittelten Versuchswert ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung.

Anhand dieses Modells werden im Folgenden Möglichkeiten untersucht, die Wärmeabfuhr aus der Kokille zu beeinflussen. Der **erste Ansatz** der Studie beschäftigt sich mit dem Wärmeübergang zwischen Kokille, Flüssigmetall und Kühler. Da die Wärmeabfuhr an der Unterseite der Kokille im Vergleich zur Oberseite deutlich besser ist (vergleiche Kap.: 2.2.1), soll hier in das System eingegriffen und die Wärmeabfuhr an der Unterseite gezielt verschlechtert werden.

Der Wärmewiderstand senkrecht zur Gießrichtung zwischen Schmelze und Kühlwasser setzt sich dabei bei einem konventionellen Kokillen-Kühler-Aufbau aus den einzelnen Komponenten:

- Wärmeübergang zwischen Schmelze und Kokille,
- Wärmeleitung durch die Kokille,
- Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler,
- Wärmeleitung durch den Kühler,
- Wärmeübergang zwischen Kühler und Kühlwasser

zusammen. Somit lässt sich der gesamte Wärmedurchgang k festlegen als:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sk}} + \left(\frac{s_k}{\lambda_k}\right) + \frac{1}{\alpha_{kk}} + \left(\frac{s_{kv}}{\lambda_{kv}}\right) + \frac{1}{\alpha_{kvw}}} \quad (\text{Formel 3})$$

k = Wärmedurchgang zwischen Schmelze und Kühlwasser [W/m²K]

α_{sk} = Wärmeübergang Schmelze Kokille [W/m²K]

s_k = Wanddicke Kokille [m]

λ_k = Wärmeleitfähigkeit Kokille [W/mK]

α_{kk} = Wärmeübergang Kokille Kühler [W/m²K]

s_{kv} = Wanddicke Kühler [m]

λ_{KV} = Wärmeleitfähigkeit Kühler [W/mK]

α_{KVW} = Wärmeübergang Kühler Kühlwasser [W/m²K]

Bei einer Erweiterung eines konventionellen Kokillen-Kühler-Aufbaus mit einer Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler zur Kompensation des Kokillenatmens (siehe Kap.: 5.2.1), setzt sich der Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler α_{KK} zusätzlich aus den Anteilen:

- Wärmeübergang zwischen Kokille und Flüssigmetall,
- Wärmeleitung durch das Flüssigmetall,
- Wärmeübergang zwischen Flüssigmetall und Kühler

zusammen:

$$\alpha_{KK} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{KGa}} + \left(\frac{S_{Ga}}{\lambda_{Ga}}\right) + \frac{1}{\alpha_{GaKV}}} \quad (\text{Formel 4})$$

α_{KK} = Wärmeübergang Kokille Kühler [W/m²K]

α_{KGa} = Wärmeübergang Kokille Flüssigmetall [W/m²K]

S_{Ga} = Wanddicke Flüssigmetall [m]

λ_{Ga} = Wärmeleitfähigkeit Flüssigmetall [W/mK]

α_{GaKV} = Wärmeübergang Flüssigmetall Kühler [W/m²K]

Dieser Wärmeübergang kann durch eine Veränderung der Höhe der eingebrachten Flüssigmetallschicht variiert werden. In der Simulation wird dies durch einen unterschiedlich hohen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Kokille und Kühler implementiert. Ausgehend von $\alpha_{KK} = 5000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ([RICK09]) wird eine Simulation mit einem verschlechterten Wärmeübergang von $\alpha_{KK} = 4000 \text{ W/m}^2\text{K}$ an der Unterseite der Kokille durchgeführt. Bei angenommenen ähnlichen Wärmeübergängen zwischen Kokille und Flüssigmetall und zwischen Flüssigmetall und Kühler entspricht dies im Versuchsaufbau in etwa einer Erhöhung der Flüssigmetallschicht von 3 mm auf 5 mm.

Die Auswertung der Kokillentemperaturen ergibt die beiden in Abbildung 16 dargestellten Verläufe an Kokillenober- und Unterseite.

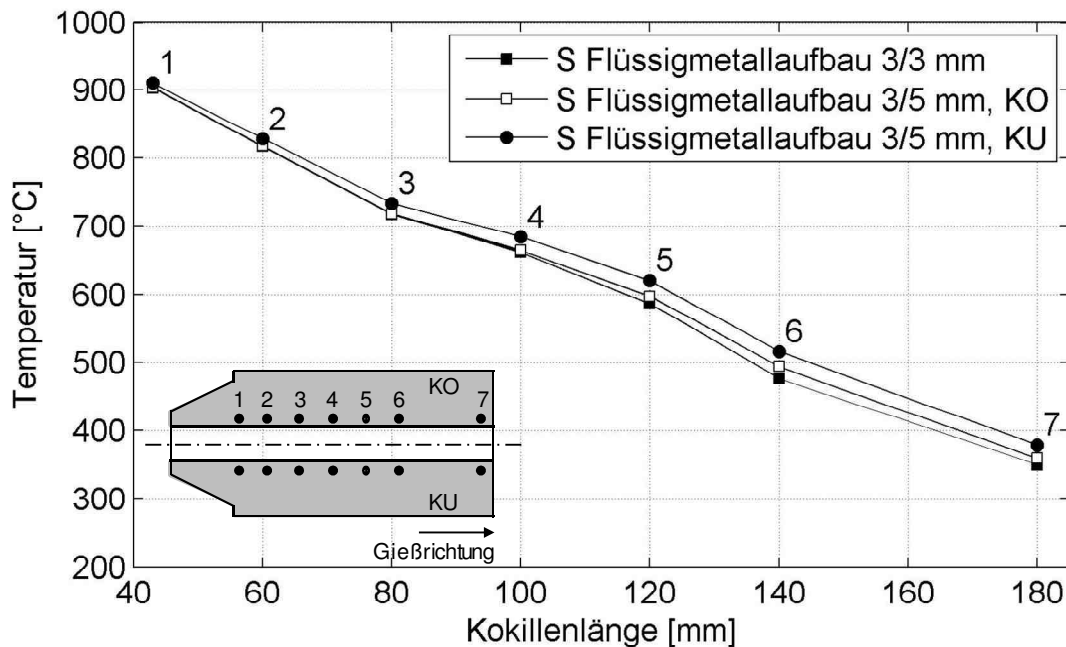


Abbildung 16: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm (Simulation) und Flüssigmetallaufbau 3/5 mm (Simulation)

Der verringerte Wärmeübergang behindert die Wärmeabfuhr aus der Kokille und führt zu einem leichten Wärmestau, so dass die Temperaturen an der Unterseite der Kokille ansteigen. Dabei baut sich zwischen Ober- und Unterseite eine Temperaturdifferenz von max. 45 °C auf. Sie steigt ausgehend von annähernd gleichen Werten im Einlaufbereich in Gießrichtung an und erreicht ihr Maximum in der Mitte der Kokille bei einer Länge von 80 mm. Der Temperaturunterschied bleibt bis zum Auslauf der Kokille erhalten.

Fazit:

Durch den Ansatz, die Flüssigmetall-Schichtstärke zu erhöhen, wird die Wärmeabfuhr aus der Kokille verkleinert. Die sehr geringen Auswirkungen erstrecken sich vor allem auf die Mitte und das Ende der Kokille. Entscheidend für die Keimbildung und

die Randschalenbildung ist jedoch der Anfangsbereich der Kokille. Hier sind keine Veränderungen in den Temperaturwerten festzustellen. Der Einfluss eines solchen Kokillen-Kühler-Aufbaus auf die Gefügeausbildung wird deshalb als gering eingestuft, dennoch im Versuch untersucht.

In einem **zweiten Ansatz** wird der Einfluss der Lage der Kühlzone bzw. der Größe des Kühlers analysiert. Bei der Betrachtung von Erstarrungsmarken seitlich am Band zeigt sich eine Vorseilung des Erstarrungsbeginns an der Unterseite des Stranges. Zusätzlich belegen Temperaturmessungen aus früheren Gießversuchen niedrigere Kokillentemperaturen im Einlaufbereich an der Unterseite, im Vergleich zur Oberseite. Aus diesen Gründen wird die Kühlfläche an der Unterseite der Kokille verkleinert und der Beginn der Kühlfläche in Gießrichtung verschoben. Damit sollen die Temperaturen in der unteren Kokillenplatte im Einlaufbereich erhöht und der Erstarrungsbeginn verzögert werden. Das bestehende Modell des Kokillen-Kühler-Aufbaus wird dazu modifiziert. Zwischen Kokille und Kühler wird an der Unterseite des Aufbaus auf den ersten 30 mm eine Luftschicht eingebracht. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Luft von $\sim 0,0262 \text{ W/mK}$ bei Raumtemperatur entspricht dies in etwa einer Isolierung der Kokille. Im Anschluss an diese Aussparung folgt die Flüssigmetallschicht bis zum Kokillenende. Abbildung 17 veranschaulicht den Aufbau.

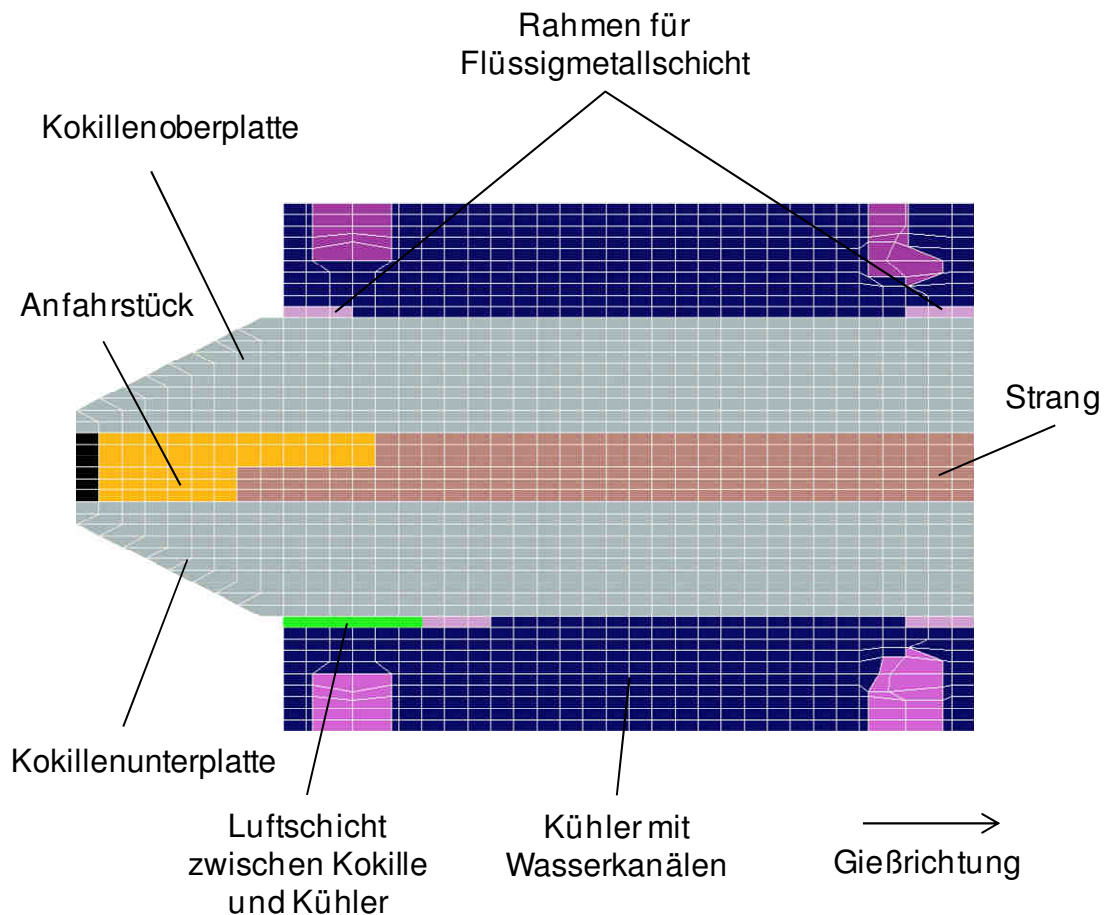


Abbildung 17: Aufbau mit verschobener Kühlzone an der Unterseite der Kokille als FEM-Modell

Durch den verspäteten Kühlbeginn erhöhen sich die Temperaturen der unteren Kokillenplatte, vor allem im Einlaufbereich der Kokille, signifikant. Die maximale Temperaturdifferenz von 120 °C (siehe Abbildung 18) zwischen Oberseite und Unterseite tritt bei einer Kokillenlänge von 60 mm auf. Der Kokille in Gießrichtung weiter folgend schwächt sich der Temperaturunterschied bis zum Auslauf der Kokille ab. Aufgrund der insgesamt verkleinerten Kühlfläche steigt das Temperaturniveau in der gesamten Kokille leicht an. Auch die Oberseite der Kokille erwärmt sich.

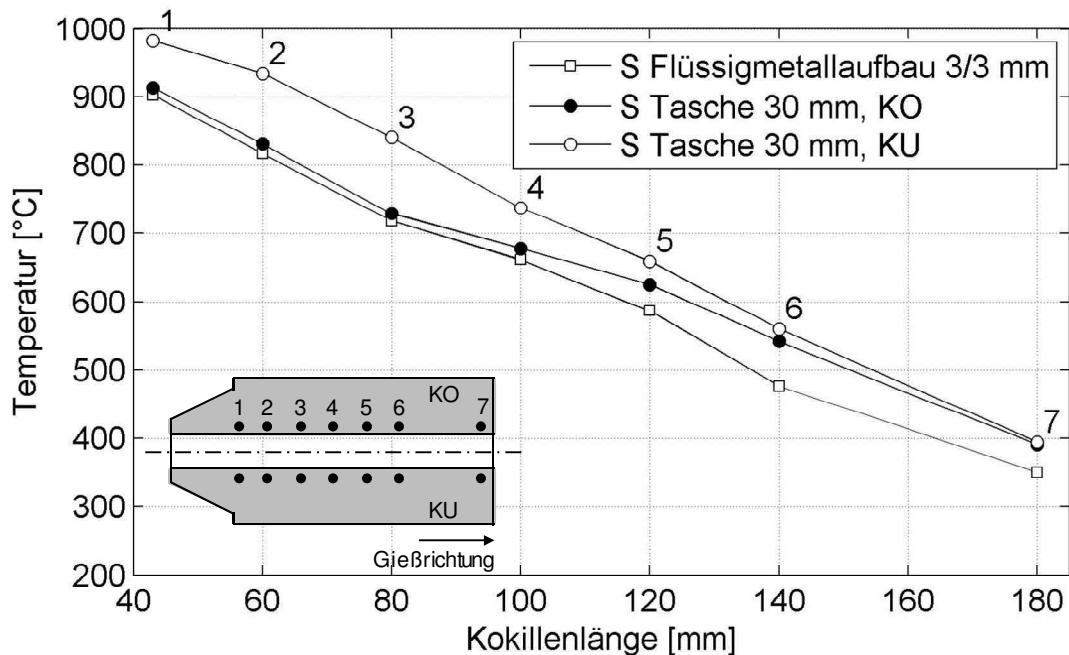


Abbildung 18: Temperaturverläufe (Simulation) an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und verschobener Aufbau 30 mm

Fazit:

Durch den Anstieg der Temperaturen kann möglicherweise der Erstarrungsbeginn an der Unterseite der Kokille verzögert werden. Über die verkleinerte Kühlfläche wird weniger Wärme an der Unterseite abgeführt, was zu symmetrischen Erstarrungsverhältnissen führen kann. Auswirkungen auf die entstehenden Kornstrukturen werden im Experiment untersucht.

Abschließend sind in Abbildung 19 die Isothermenbilder von einem Kokillen-Kühler-Aufbau mit Flüssigmetallschicht 3/3 mm, einem Kokillen-Kühler-Aufbau mit Flüssigmetallschicht 3/5 mm und von einem Aufbau mit verschobener Kühlzone gegenübergestellt. Die eingezeichneten weißen Pfeile kennzeichnen in etwa den Erstarrungsbeginn (Liquidustemperatur CuZn37 ~ 920 °C) der Schmelze am Rand der Kokille. Während beim Aufbau mit Flüssigmetallschicht 3/3 mm die Erstarrung an Ober- und Unterseite des Stranges gleichzeitig einsetzt (rein thermische Berechnung) verschiebt sich der Erstarrungsbeginn an der Unterseite des Stranges bei einem

Aufbau mit Flüssigmetallschicht 3/5 mm (3 mm an der Kokillenoberseite, 5 mm an der Kokillenunterseite) leicht in Gießrichtung. Die Auswirkungen sind jedoch gering.

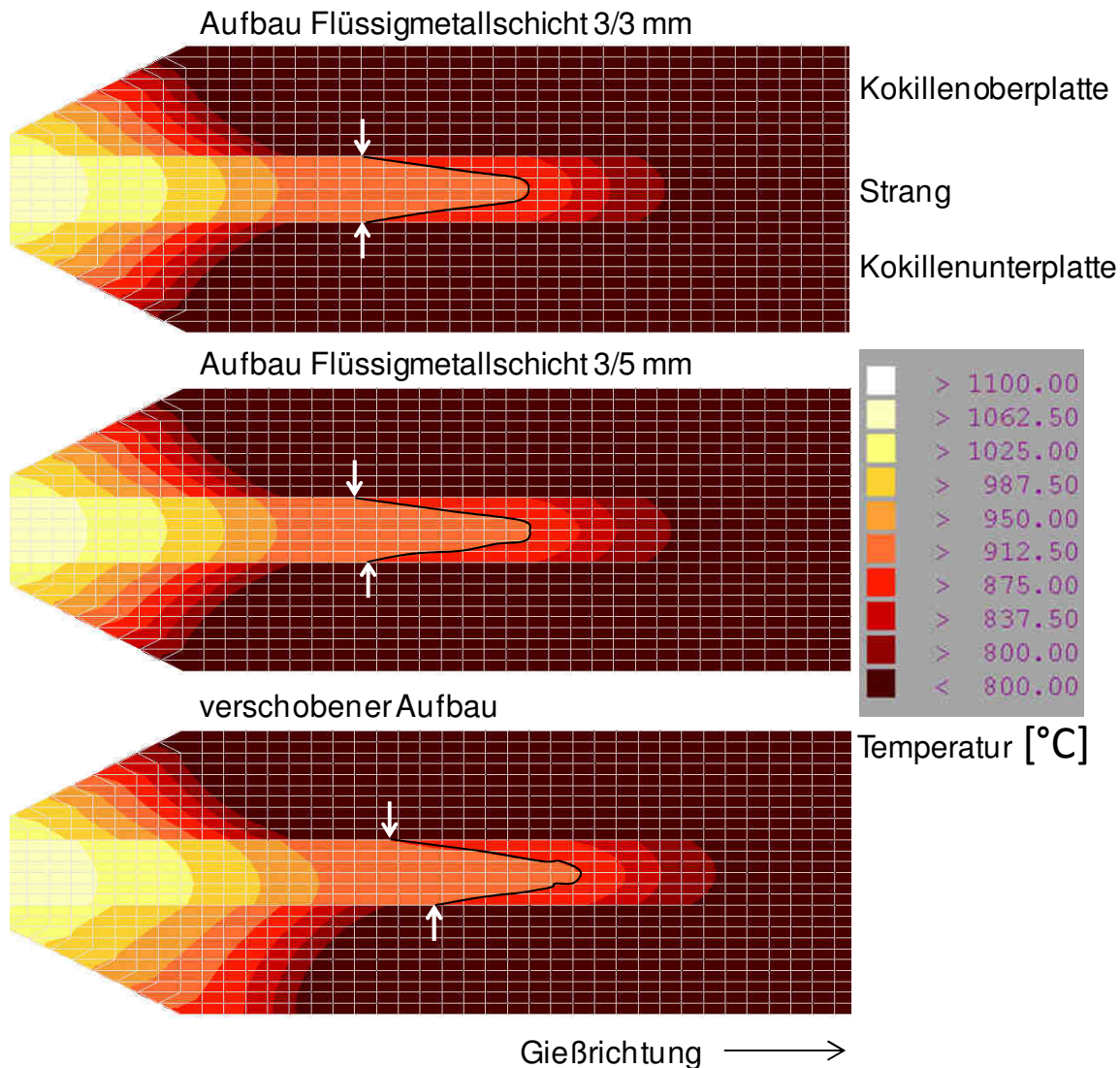


Abbildung 19: Isothermenbilder der Kokillen-Kühler-Aufbauvarianten Flüssigmetallschicht 3/3 mm, Flüssigmetallschicht 3/5 mm und verschobener Aufbau

Durch den Aufbau mit verschobenem Kühler ist hingegen eine ausgeprägte Verschiebung der Temperaturen an der Unterseite der Kokille zu erreichen. Durch die Verkleinerung der Kühlfläche steigt das Temperaturniveau der gesamten Kokille leicht an.

Zusammenfassung Simulationsergebnisse:

Durch die Simulationsstudie erfolgt eine rein qualitative Beurteilung von Möglichkeiten zur Beeinflussung der Wärmeabfuhr aus der Kokille. In einem ersten Ansatz wird der Einsatz unterschiedlich hoher Flüssigmetallschichten zwischen Kokille und Kühler betrachtet. Als zweite Variante wird ein Kokillen-Kühler-Aufbau bewertet, dessen Kühlzone an der Unterseite der Kokille in Gießrichtung verschoben ist. Beide Varianten verfolgen das Ziel, die Temperaturen an der Unterseite der Kokille anzuheben, um eine symmetrische Wärmeabfuhr aus der Schmelze zu gewährleisten. Während der Einsatz der höheren Flüssigmetallschicht an der Unterseite der Kokille vor allem Auswirkungen im mittleren Bereich der Kokille zeigt, lässt sich durch die Verschiebung der Kühlzone hauptsächlich die Einlaufzone der Kokille beeinflussen. Da in diesem Bereich die Erstarrung der Schmelze stattfindet, kann durch einen Anstieg der Temperaturen in der Kokille möglicherweise der Erstarrungsbeginn der Schmelze verzögert werden. Durch Kombination der beiden Einzelmaßnahmen könnte in der Kokille ein Temperaturfeld eingestellt werden, das symmetrische Erstarrungsbedingungen an Ober- und Unterseite der Kokille gewährleistet. Da die Simulationsstudie nur als Grobabschätzung dient, werden die Ergebnisse mittels Versuchen verifiziert.

7 Versuchsdurchführung

7.1 Schmelzbetrieb

Für die Versuche wird der Gießofen der Stranggießanlage als Schmelzofen verwendet. Auf eine Benutzung des Vorschmelzofens mit entsprechender Überführung in den Gießofen wird verzichtet. Als Schmelzgut wird industrieller Schrott der entsprechenden Vorlegierung verwendet. Das zu erschmelzende Material wird vor Versuchsbeginn in stückiger Form in den Gießofen eingesetzt, der Ofen anschließend in Betrieb genommen. Nach Erschmelzen des ersten Materials wird der Ofen allmählich bis zur maximalen Füllstandshöhe nachchargiert.

7.2 Legierungsanalyse

Unmittelbar vor Gießbeginn erfolgt die chemische Analyse der Schmelze im Ofen mit Hilfe der Funkenemissionsspektalanalyse. Dazu ist ein Analysegerät der Fa. WAS AG, Uedem vorhanden. Nach dem Abguss einer Probe werden die fehlenden Legierungselemente entsprechend nachlegiert. Der Gießprozess wird gestartet, nachdem die Elemente in Lösung gegangen sind.

7.3 Stranggießprozess

Beim Stranggießen lassen sich drei unterschiedliche Phasen unterscheiden. Der Anfahrprozess, der stationäre Gießprozess sowie das Gießende.

Der kritischste Prozess ist das **Anfahren der Anlage**. Während des Schmelzbetriebes ist die Kokille über das Anfahrstück und den Kaltstrang verschlossen. Es kann keine Schmelze in die Kokille einlaufen. Über den Kontakt der Ofenschnauze mit dem Heißwechselrahmen erfolgt dennoch eine Wärmezufuhr in das Kokillen-Kühler-Paket. Um eine Überhitzung zu vermeiden, wird der Kühler deshalb mit einer minimalen Menge an Kühlwasser durchströmt. Beim Start des Gießprozesses erfährt die Kokille nun den gesamten Wärmeeintrag aus der Schmelze, abhängig von der gewählten Gießgeschwindigkeit. Gleichzeitig wird die Kühlwasser-Durchflussmenge deutlich gesteigert. Im Normalfall steigen die Temperaturen in der Kokille so lange

an, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen zugeführter und abgeführter Wärmemenge einstellt. Erfolgt die Erhöhung der Kühlwassermenge jedoch zu früh oder ist die Gießgeschwindigkeit zu niedrig gewählt, kann die Schmelze in den Ofen zurück erstarren. Da der Auslaufquerschnitt des Schuhtiegels vor der Kokille größer als der Einlauf der Kokille selbst ist, „verklemmt“ sich der Strang an dieser Stelle. Es kommt zum Abriss des Stranges. Andererseits kann durch eine zu hohe Gießgeschwindigkeit bzw. durch eine zu klein gewählte Kühlwasser-Durchflussmenge ein Strangdurchbruch erfolgen. Die zugeführte Wärmemenge kann nicht mehr über das Kühlwasser abgeführt werden. Beim Austritt des Stranges aus der Kokille hat die Strangschale noch nicht genügend Festigkeit. Durch die im Inneren des Stranges vorhandene Restschmelze kommt es zur Wiederaufschmelzung der Randschale, die im Ofen vorhandene Schmelze kann austreten. Aus diesem Grund wird die Temperatur des Stranges beim Austritt aus der Kokille während des Gießprozesses permanent mit einem Pyrometer und einem zusätzlichen Handfühler überwacht, um bei einem kritischen Temperaturanstieg zeitnah reagieren zu können.

Nach erfolgtem Anfahrprozess stellt sich ein **stationärer Gießprozess** ein. Die durch Schmelze und Ofenschnauze zugeführte und über Kühlwasser und Strang abgeführte Wärmemenge stehen im Gleichgewicht. In der Kokille stellt sich ein stabiles Temperaturfeld ein. Durch den sehr kompakten Aufbau von Kokille und Kühler stellt sich der stationäre Betriebszustand an der utg-Stranggießanlage bereits nach einer Gießlänge von ca. 0,75 m ein. Neben dem Anfahrprozess gilt dies ebenso bei einer Veränderung in der Abziehkinematik. Durch die limitierte Schmelzemenge im Ofen (Ofeninhalt ca. 10 l) können pro Versuch maximal drei verschiedene Gießgeschwindigkeiten untersucht werden.

Sowohl in der Anfahrphase als auch im stationären Gießbetrieb erfolgt der Abzug des Stranges im Go-Stop-Back Verfahren. Bei dieser Betriebsart setzt sich der Zyklus der Abziehbewegung dem Namen entsprechend aus einem Hub, einer anschließenden Wartezeit sowie einem kurzen Rückhub zusammen.

Zur Veränderung der Gießgeschwindigkeit wird ausschließlich die Wartezeit im Zyklus verändert. Hublänge (10 mm) und Rückhub (0,5 mm) werden bei allen Versuchen konstant gehalten.

Das **Gießende** ist erreicht, wenn der Ofen vollständig entleert ist.

7.4 Temperaturerfassung

Alle Kokillenvarianten werden mit Hilfe von NiCr-Ni Thermoelementen instrumentiert. Durch die Erfassung von Temperaturwerten in der Kokille während des Gießvorganges können Aussagen über das Temperaturverhalten des jeweiligen Aufbaus getroffen und verschiedene Aufbauvarianten miteinander verglichen werden. Die Stelle mit dem größten Temperaturgradienten zwischen zwei in Gießrichtung hintereinander liegenden Thermoelementpositionen lässt beispielsweise Rückschlüsse auf die Lage der Erstarrungsfront zu. Weitere markante Stellen, wie der Kokilleneinlauf oder das Ablösen der Strangschale von der Kokille, können so betrachtet bzw. ermittelt werden.

Die verwendeten NiCr-Ni Thermoelemente, Typ K sind nach DIN EN 60584-2 genormt. Für die Messgenauigkeit von der Thermoelementspitze über die Thermoleitung bis einschließlich des Steckers gilt: Messgenauigkeit $< \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$, oder $< (0,4/100) \times T_{\text{Mess}}$, wobei der größere der beiden Werte gilt. Für Temperaturen bis maximal $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ergibt sich damit eine Messgenauigkeit von $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Für das verwendete Temperaturmesssystem TempScan/1100 der Fa. IOtech wird eine Messgenauigkeit von $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ bei Verwendung von Thermoelementen mit Typ K in einem Temperaturmessbereich von $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $1372 \text{ }^\circ\text{C}$ angegeben.

In Abhängigkeit der Genauigkeit der Position eines Thermoelements ergibt sich damit eine maximale Messgenauigkeit von $\pm 4,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Bandformat

Beim Bandformat werden die Thermoelemente in Ober- und Unterplatte der Kokille durch Bohrungen jeweils in der Mitte der Kokille positioniert. Der Abstand zur

Kontaktfläche der Kokille mit der Schmelze beträgt 3 mm. Die Messpositionen an den Seitenleisten gehen ebenfalls bis auf 3 mm an die Berührzone mit der Schmelze heran. Abbildung 20 zeigt die Messpositionen der Thermoelemente für die Band-Kokille.

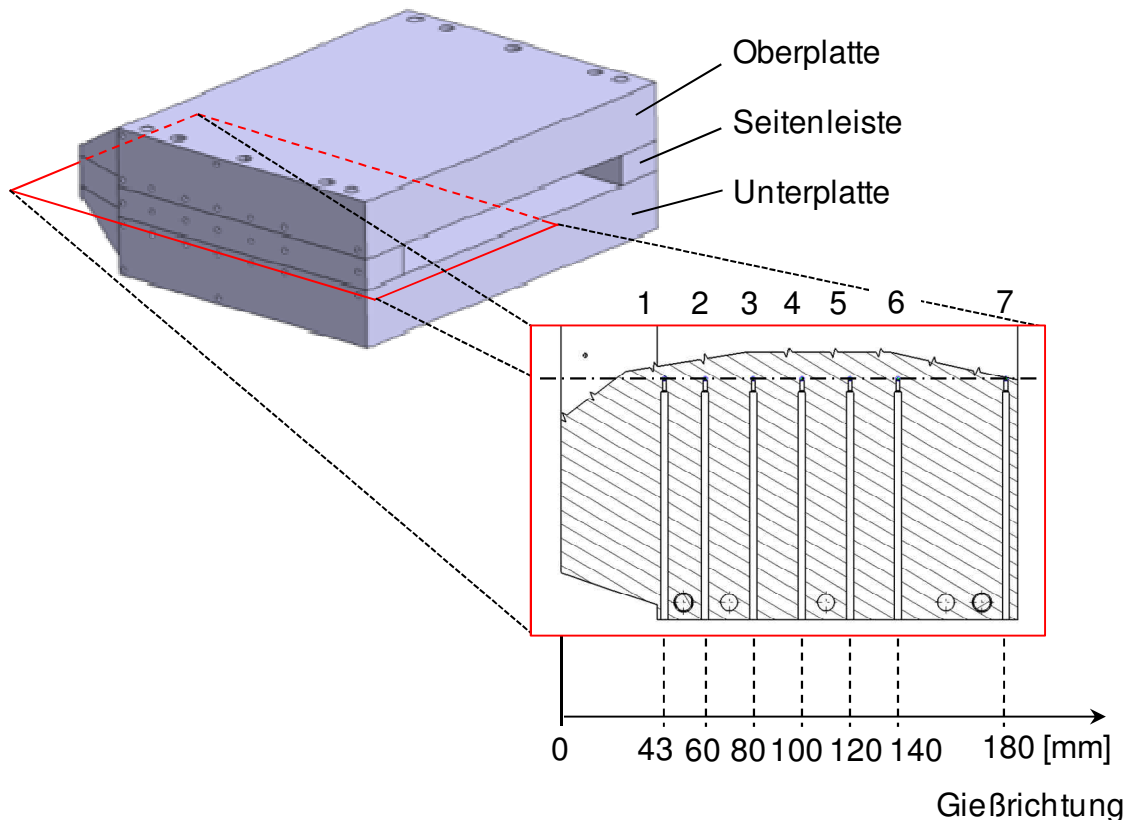


Abbildung 20: Positionen 1 - 7 der Thermoelemente in der Kokille beim Bandformat

Rundformat

Beim Rundformat werden die Thermoelemente in axialer Richtung in der Kokille positioniert. Dazu werden Längsbohrungen in die Stirnseite der Kokille eingebracht. Gemessen wird an der Kokillenober- und der Kokillenunterseite sowie an der Seite der Kokille. Pro Bohrung werden jeweils drei in ihrer Lage zueinander fixierte Thermoelemente eingebracht (siehe Abbildung 21). Aufgrund der großen Bohrtiefe über der Länge der Kokille und eines möglichen Verlaufens des dünnen Bohrers

beträgt der Abstand zwischen dem Bohrungsmittelpunkt und der Kokilleninnenseite aus Sicherheitsgründen 10 mm.

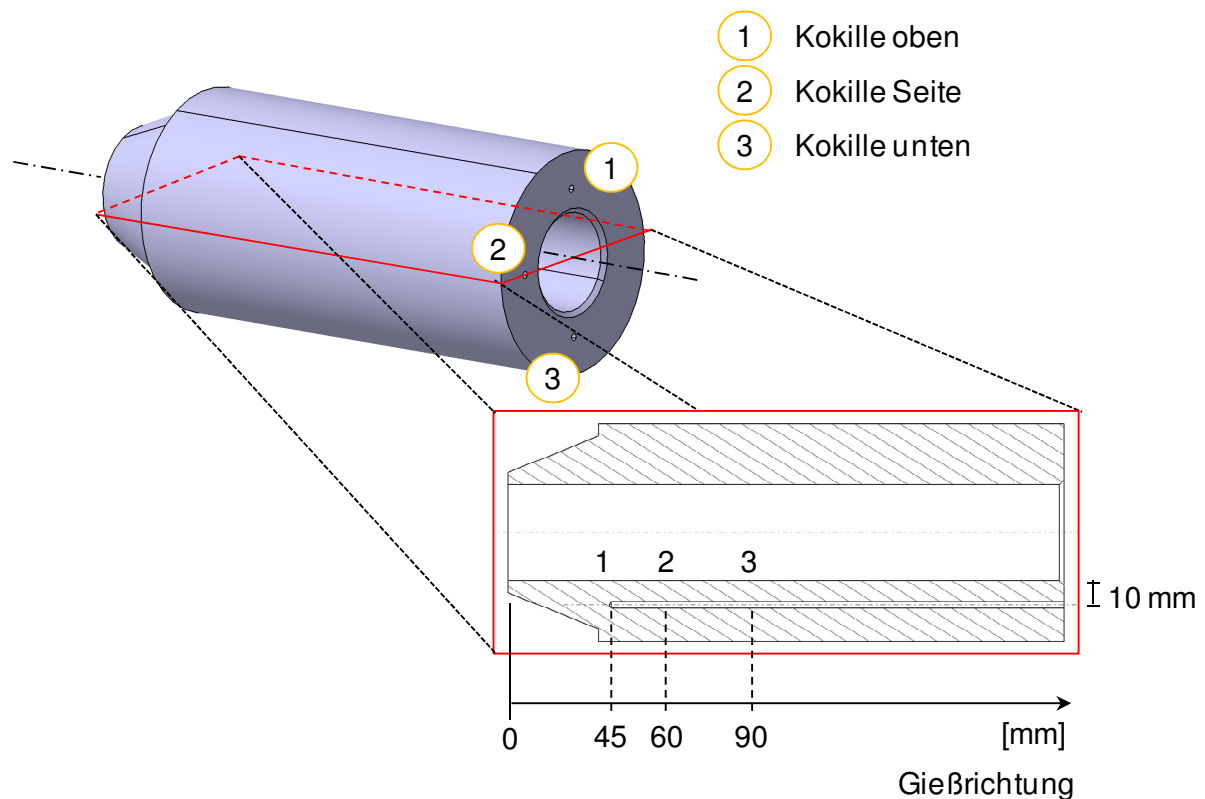


Abbildung 21: Positionen 1 - 3 der Thermoelemente in der Kokille beim Rundformat

Das Einlesen der Temperatursignale erfolgt für alle Thermoelemente über Messumformer, die die gemessene Thermospannung in ein normiertes elektrisches Signal (0 - 10 V) umwandeln. Dadurch ist es möglich, auch bei eingeschaltetem Ofen Messungen durchzuführen, die nicht vom Induktionsfeld des Ofens beeinflusst werden.

7.5 Metallographische Gefügeanalyse

Nach dem Gießversuch werden aus dem gegossenen Strang Proben entnommen, die zur qualitativen Beurteilung des Makro- und Mikrogefüges genutzt werden. Unterschieden werden Quer- und Längsschliffe (siehe Abbildung 22), hier exemplarisch für das Bandformat dargestellt. Da die Kornstrukturen innerhalb des

Gussproduktes in verschiedenste Richtungen gewachsen sind, lässt sich durch die beiden Schliffe ein Überblick über die tatsächliche räumliche Orientierung der Körner schaffen.

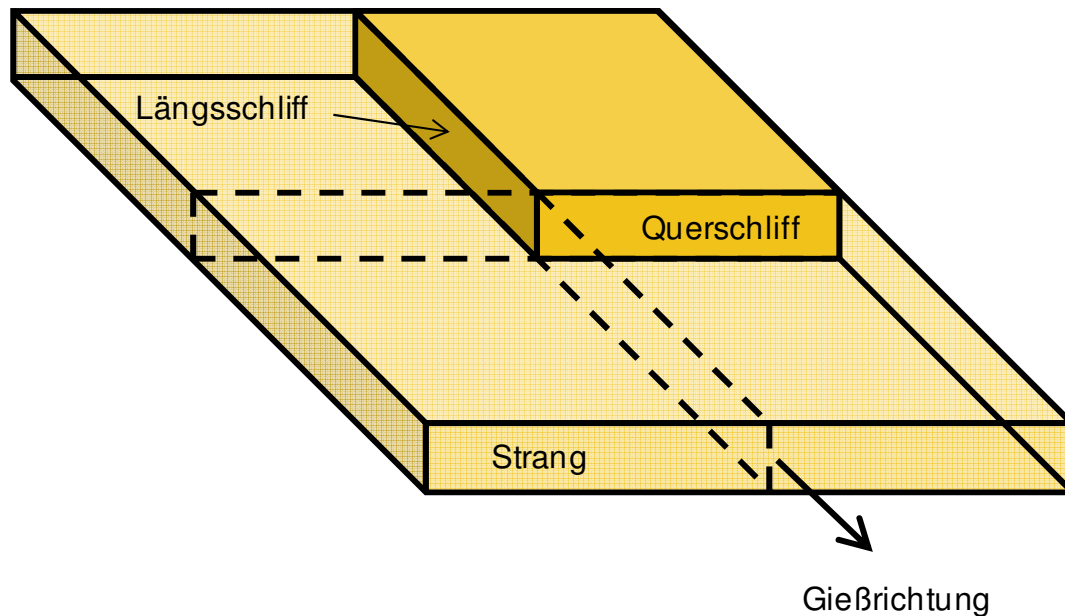


Abbildung 22: Konvention der Probenentnahme Bandformat

Nach der Entnahme werden die Proben für die lichtmikroskopische Beurteilung präpariert. Das Schleifen erfolgt nass mit SiC-Papier verschiedener Körnung (Körnung 500, 800, 1200, 2400). Anschließend werden die Proben mit Diamantpaste (Partikelgrößen 3 μm und 1 μm), einer Oxidpolier-Suspension (OP-S) sowie DP-Lubricant grün, als Schmiermittel, poliert. Die Probenflächen werden mit einer Ammoniumpersulfat Lösung (100 ml destilliertes Wasser, 25 g Ammoniumpersulfat), die besonders die Korngrenzen hervorhebt (Makroätzung), geätzt. In höherer Verdünnung (100 ml destilliertes Wasser, 10 g Ammoniumpersulfat) wird nach [PETZ94] die gleiche Lösung für die Mikroätzung verwendet. Die Digitalaufnahmen der Proben werden mit einem Axioplan II Mikroskop der Fa. Zeiss und der dazugehörigen Software AxioVision erstellt. Das Schliffbild wird hinsichtlich der Homogenität der Korngrößen, der Symmetrie des Gefüges, der Lage der thermischen Mitte sowie der Ausrichtung der Körner beurteilt.

8 Versuchsergebnisse Bandformat

8.1 Konventioneller Aufbau

Um eine Ausgangsbasis für nachfolgende Versuche zu schaffen, werden im Vorfeld des Versuchsprogrammes Versuche mit dem Zielwerkstoff CuZn37 durchgeführt. Mit ihnen werden die optimalen Prozessparameter beim Gießen (z.B. Gießgeschwindigkeit oder Kühlwasser-Durchflussmenge) mit einem konventionellen, geklemmten Aufbau von Kokille und Kühler nach dem Stand der Technik ermittelt. Abbildung 23 zeigt den schematischen Aufbau des Kokillen-Kühler-Systems.

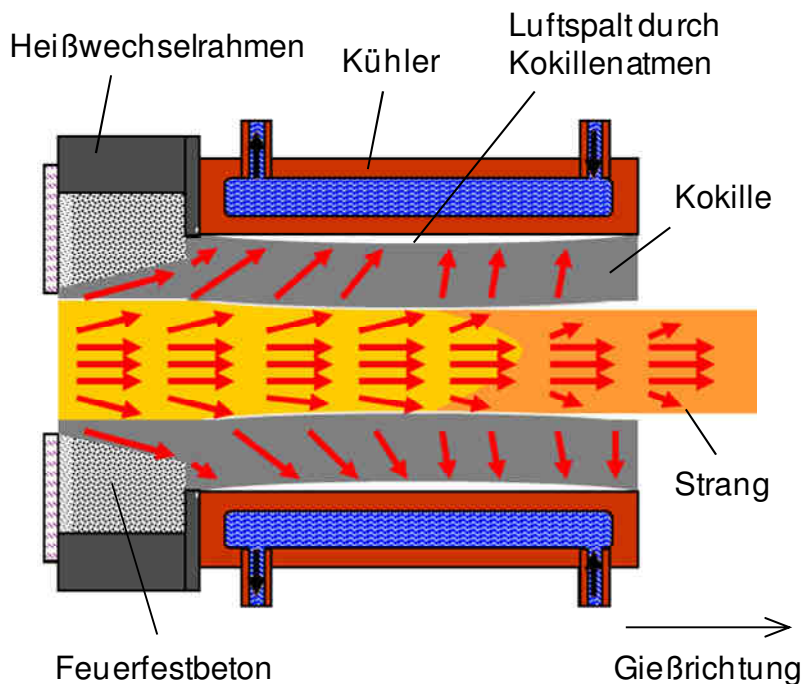


Abbildung 23: Schematischer konventioneller Aufbau Kokillen-Kühler-Einheit Bandformat [RICK09]

Die wichtigste Messgröße für einen sicheren Gießprozess ist dabei wie in Kapitel 7.3 beschrieben die Bandaustrittstemperatur. Für den Versuchswerkstoff CuZn37 (Solidustemperatur 902 °C) wird eine maximal zulässige Bandaustrittstemperatur auf der Mittellinie der Bandoberseite von 700 °C festgelegt. Dieser Abstand zur Solidustemperatur ist auch bei starken Unterkühlungen der Schmelze oder

prozessbedingten Schwankungen in der Wärmeabfuhr ausreichend groß, um einen Ofendurchbruch zu vermeiden. Durch die Limitierung der Bandaustrittstemperatur wird gleichzeitig die maximal zulässige Gießgeschwindigkeit festgelegt. Diese wird im Versuch ermittelt und als 100 % Gießgeschwindigkeit definiert.

Während des Gießversuches werden die Temperaturen innerhalb der Kokille aufgezeichnet. Abbildung 24 zeigt exemplarisch die für den geklemmten Aufbau typischen Temperaturverläufe in der Ober- und Unterplatte der Kokille (Lage der Messstellen siehe Kapitel 7.5) bei einer Gießgeschwindigkeit von 100 %. Bei allen im Folgenden dargestellten Temperaturdiagrammen sind immer die gemittelten Temperaturen innerhalb der Kokille während einer stationären Gießphase abgebildet.

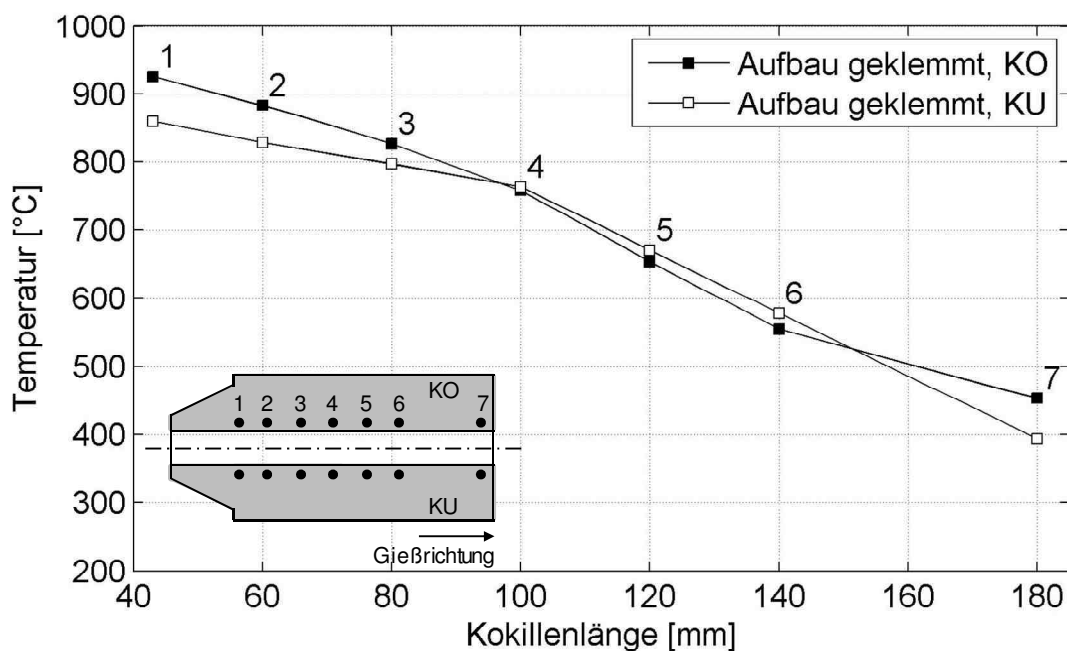


Abbildung 24: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, geklemmter Aufbau, Gießgeschwindigkeit 100 %

Die Temperaturen am Einlauf der Kokille betragen ca. 900 °C. Durch den Wärmeentzug des Kühlers fallen sie bis zum Auslauf aus der Kokille auf rund 420 °C ab. Der „Knick“ im Temperaturverlauf bei einer Kokillenlänge von 100 mm, also die Änderung der Steigung im Temperaturverlauf, kennzeichnet typischerweise das

Abheben des Stranges von der Kokille. Durch die Ausbildung einer soliden Strangschale und der damit verbundenen Erstarrungskontraktion bildet sich ein Luftspalt zwischen Strang und Kokille aus. Eine verschlechterte Wärmeleitung durch die Randschale sowie der Luftspalt führen ab dieser Position zu einer Verschlechterung der Wärmeabfuhrbedingungen aus dem Strang. Bei gleicher Wärmeabfuhr aus der Kokille sinkt der Wärmeeintrag in die Kokille, die Steigung des Temperaturabfalles erhöht sich somit. Da der dargestellte Temperaturverlauf das Temperaturprofil in der Kokille bei maximaler Gießgeschwindigkeit zeigt, findet die Erstarrung nicht wie üblich nahe am Einlauf, sondern erst spät, nach der Mitte der Kokille bei einer Länge von ca. 100 mm statt.

Auffallend ist die Überkreuzung der Temperaturverläufe von Ober- und Unterplatte bei einer Kokillenlänge von 100 mm. Bis zur einsetzenden Erstarrung liegt die flüssige Schmelze durch den metallostatistischen Druck des Ofens gleichmäßig an der Ober- und Unterplatte der Kokille an. Dennoch liegen die Temperaturen am Einlauf der Oberplatte ca. 70 °C über den Temperaturen an der entsprechenden Messstelle an der Unterseite. Verantwortlich dafür ist die instabile Temperaturschichtung der Schmelze. Von der Mitte der Kokille ausgehend nach oben fallen die Temperaturen der Schmelze vom heißesten Punkt in der Mitte, bis hin zum kältesten Punkt, der Kokillenwand. Die damit verbundenen Dichteunterschiede in der Schmelze rufen eine Konvektionsbewegung hervor, die die Schmelze in der Oberhälfte des Stranges ständig durchmischt und heiße Schmelze aus der Mitte an die Kokillenwand leitet. Dadurch stellen sich im Vergleich zur Unterseite deutlich höhere Temperaturen im Einlaufbereich in der Kokillenplatte ein. Bis zur Ausbildung einer stabilen Randschale bei einer Kokillenlänge von ca. 100 mm baut sich dieser Temperaturunterschied wieder ab. Der sich aufgrund der Erstarrungskontraktion sowie der Schwerkraft an der Oberseite stärker ausbildende Luftspalt führt im weiteren Verlauf der Kokille dazu, dass die Temperaturen der Unterplatte über die der Oberplatte ansteigen.

Am Ende der Kokille kehrt sich das Verhältnis der Temperaturen im beispielhaft dargestellten Diagramm zwischen Ober- und Unterseite ein weiteres Mal um. Dies ist vermutlich auf eine ungenaue Ausrichtung der Kokille zur Abzieheinheit zurückzuführen.

ren, durch die die Bandoberseite am Auslauf wieder an der Oberplatte der Kokille anliegen kann.

Zur weiteren Beurteilung der erzeugten Stranggussqualität erfolgt eine metallographische Analyse des Werkstoffes. Aus dem erzeugten Strang werden Längs- sowie Querschliffproben (Definition siehe Kapitel 7.5) entnommen. Diese werden entsprechend präpariert und die entstandene Kornstruktur, die von den Wärmeabfuhrbedingungen aus der Kokille abhängig ist, mit Hilfe eines Mikroskops begutachtet. Abbildung 25 zeigt exemplarisch einen Längs- und einen Querschliff aus einem Bandbereich, der mit 100 % Gießgeschwindigkeit gegossen wurde.

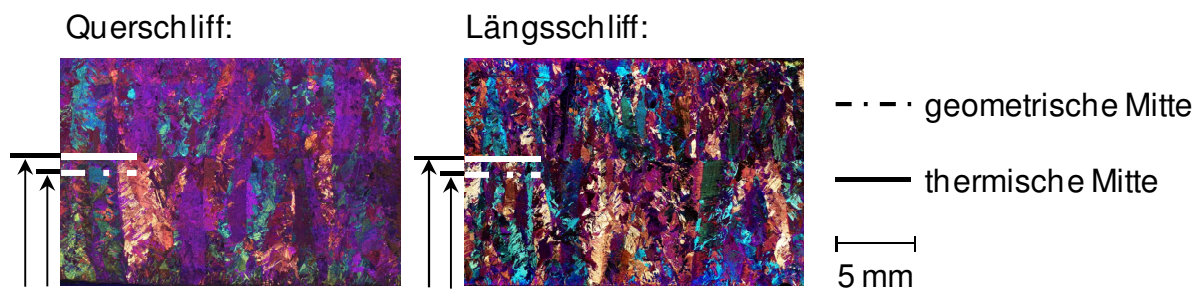


Abbildung 25: Quer- und Längsschliff, konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 100 %

Gut zu erkennen ist die außermittige Lage der thermischen Mitte. Aufgrund der unterschiedlichen Erstarrungsbedingungen in der Ober- bzw. Unterhälfte des Stranges liegt diese etwa 1 mm über der geometrischen Mitte. Durch die höheren Schmelzetemperaturen in der Oberhälfte (Konvektion) setzt die Erstarrung dort zeitlich verzögert, beziehungsweise in Gießrichtung im Vergleich zur Unterseite später ein. Als Resultat dieser asymmetrischen Wärmeabfuhr unterscheiden sich die Kornstrukturen ober- und unterhalb der thermischen Mitte. Wie in Kapitel 2.3 erläutert, bildet sich an der Unterseite der Kokille aufgrund stabiler Wachstumsbedingungen ein grobes, stängeliges Gefüge aus. Bedingt durch instabile Erstarrungsverhältnisse ist die obere Hälfte des Stranges von einem feinkörnigeren Gefüge geprägt. Dieses resultiert aus Temperaturschwankungen in der Kokillenplatte während des Strangabhebens.

8.2 Einfluss Wärmeübergang Kokille Kühler

8.2.1 Referenzversuch Flüssigmetallkühlung 3 mm, statisch

Zur Validierung des konstruktiven Aufbaus mit Flüssigmetallkühlung (Gallium-Indium-Zinn-Legierung) nach [RICK09], bei dem das Flüssigmetall ruhend einen Hohlraum zwischen Kokille und Kühler ausfüllt, sowie zur Beurteilung dessen Eignung für den Werkstoff Messing werden Gießversuche durchgeführt. Da alle weiteren Kokillen-Kühler-Aufbauten des Versuchsprogrammes (siehe Versuchsplan, Kap.: 4) zur Eliminierung des Kokillenatmens mit der zusätzlichen Flüssigmetallkühlung kombiniert werden, dient die Versuchsreihe als Referenz für alle nachfolgenden Versuche. Das Flüssigmetall füllt bei diesem Aufbau statisch einen Hohlraum zwischen Kokille und Kühler aus. Veränderungen der Größe dieses Hohlraumes durch das Kokillenatmen werden durch Ausgleichsbehälter kompensiert. Abbildung 26 veranschaulicht schematisch den Kokillen-Kühler-Aufbau.

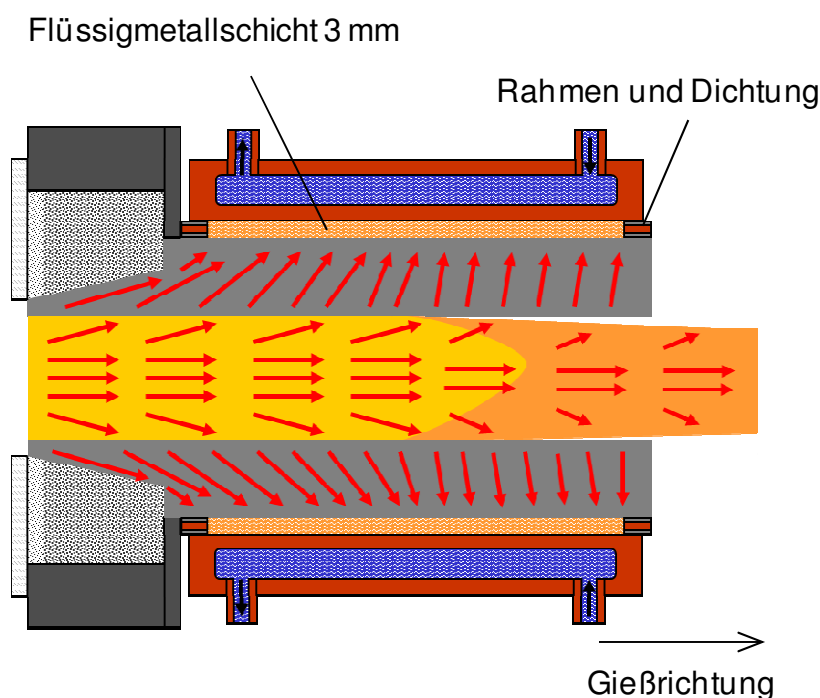


Abbildung 26: Kokillen-Kühler-Aufbau 3 mm Flüssigmetall, Bandformat [RIED08]

Die in Kapitel 2.6.2 beschriebenen Vorteile der zusätzlichen statischen Flüssigmetallkühlung zeigen sich auch bei der Legierung CuZn37. Durch Unterbinden des

Kokillenatmens und einer damit verbundenen Verbesserung des Wärmeüberganges zwischen Kokille und Kühler kann die Gießgeschwindigkeit im Vergleich zum geklemmten Aufbau auf bis zu max. 160 % erhöht werden. Abbildung 27 veranschaulicht die Unterschiede der Kokillentemperaturen zwischen der geklemmten Variante und dem Kokillen-Kühler-Aufbau mit Flüssigmetallkopplung. Die Gießgeschwindigkeit zu den dargestellten Temperaturen beträgt 120 % für den modifizierten Aufbau, sowie 100 % für den geklemmten Aufbau. Die Temperaturverläufe der beiden Aufbauvarianten lassen sich daher nicht direkt miteinander vergleichen.

(Hinweis: Versuche mit 100 % Gießgeschwindigkeit sind bei allen Bandvarianten mit einer zusätzlichen Flüssigmetallkühlung nicht möglich! Durch die effektivere Wärmeabfuhr bleibt die Kokille in einem so niedrigen Temperaturbereich, dass die Gefahr der Rückerstarrung der Schmelze in den Ofen besteht!)

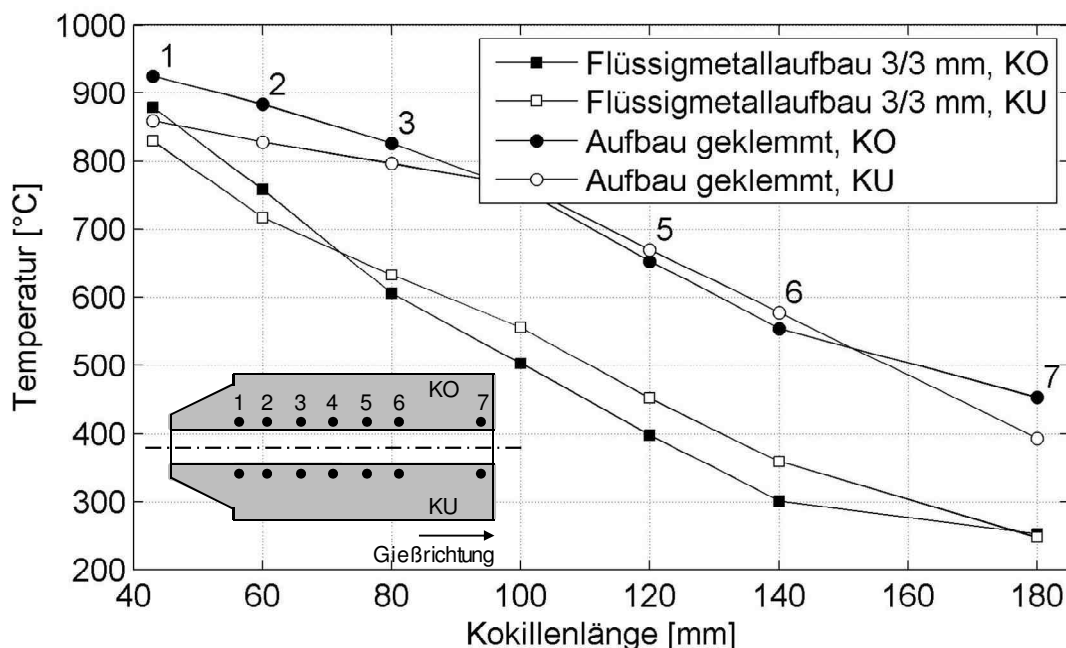


Abbildung 27: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm (Gießgeschwindigkeit 120 %) und geklemmter Aufbau (Gießgeschwindigkeit 100 %)

Dennoch lassen sich markante Unterschiede zwischen den beiden Varianten erkennen. Der Temperaturabfall in der Kokille erfolgt von ca. 850 °C im Einlauf auf

ca. 250 °C im Auslauf und ist damit im Vergleich vor allem im Anfangsbereich der Kokille deutlich steiler. Bereits bei einer Kokillenlänge von 60 mm liegt die Flüssigmetallvariante bei den Temperaturen trotz einer 20 % höheren Gießgeschwindigkeit im Vergleich zum geklemmten Aufbau um mehr als 100 °C niedriger. Dieser Unterschied vergrößert sich ab einer Kokillenlänge von 100 mm auf über 200 °C. Dies verdeutlicht den immensen Wärmestau in der Kokille, der durch das Kokillenatmen und den damit schlechteren Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler verursacht wird.

Am Einlauf der Kokille liegen die Temperaturen beim Flüssigmetallaufbau in der oberen Kokillenplatte ca. 45 °C höher als in der unteren Platte. Die Umkehr des Temperaturverhältnisses erfolgt bereits bei einer Kokillenlänge von 70 mm, was auf einen deutlich früheren Erstarrungsbeginn schließen lässt.

Im weiteren Verlauf der Kokille entsteht ein größerer Temperaturunterschied zwischen Ober- und Unterplatte, der sich durch ein deutlich früheres Strangabheben erklären lässt. Durch die schnellere Abkühlung mit einer Flüssigmetallschicht bildet sich eine stabile, schrumpffähige Randschale bereits frühzeitig aus. Der Luftspalt zwischen Strang und Kokille, der schwerkraftbedingt an der Oberseite ausgeprägter auftritt, behindert dort die Wärmeabfuhr aus dem Strang. Der oberen Kokillenplatte wird also insgesamt weniger Wärme zugeführt, wodurch sich die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite stärker ausbilden kann. Das frühere Strangabheben äußert sich auch in der Bandaustrittstemperatur. Trotz einer bis zu 200 °C kälteren Kokille liegt die Bandaustrittstemperatur mit ca. 620 °C nur rund 45 °C unter der geklemmten Variante. Die Leistungsfähigkeit des Flüssigmetallaufbaus zeigt sich erst bei höheren Gießgeschwindigkeiten. Abbildung 28 zeigt einen Vergleich der Temperaturprofile bei 120 % sowie bei 160 % Gießgeschwindigkeit.

Trotz der deutlichen Steigerung der Temperaturen im Mittelbereich an der Unterseite der Kokille von ca. 100 °C steigt die Bandaustrittstemperatur nur um 10 °C an. Durch den schnelleren Gießbetrieb steigt die der Kokille zugeführte Wärmemenge an.

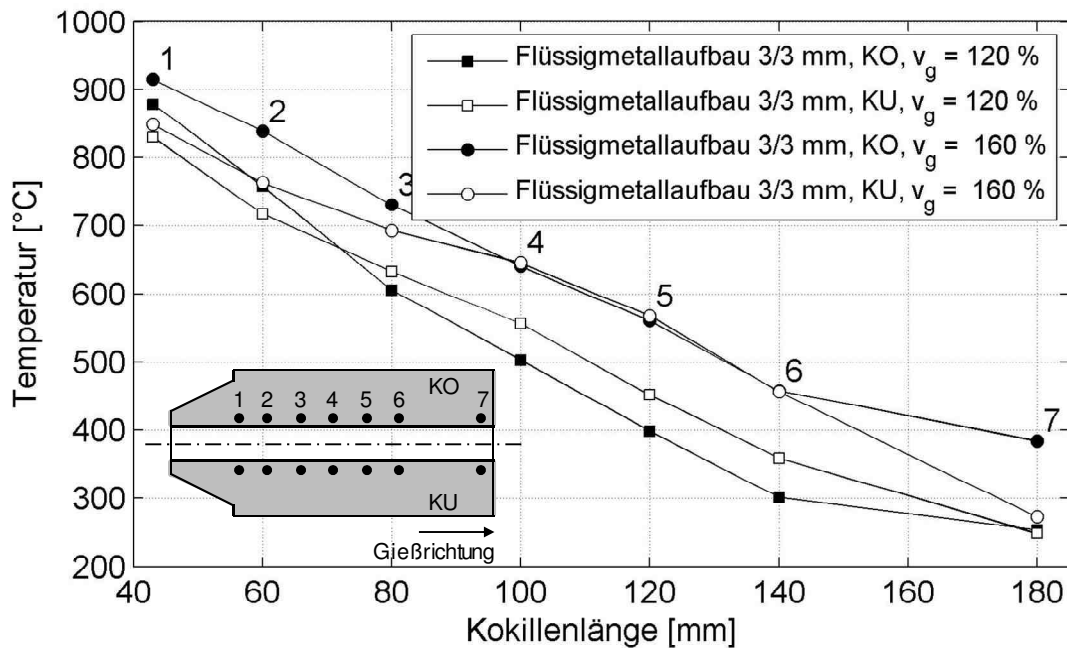


Abbildung 28: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm, Gießgeschwindigkeit 120 % und 160 %

Randschalen- bzw. Erstarrungsbeginn verschieben sich in Gießrichtung und finden nicht mehr im Einlaufbereich der Kokille statt. Zusätzlich erhöht sich die Sumpftiefe. Durch die genannten Aspekte liegt der Strang im Vergleich zu niedrigen Gießgeschwindigkeiten deutlich länger an der Kokille an. Durch die verspätete Luftspaltbildung herrscht bei erhöhter Gießgeschwindigkeit über eine längere Wegstrecke ein besserer Wärmeübergang zwischen Strang und Kokille, in Summe wird eine größere Wärmemenge aus dem Strang abgeführt.

Ferner lässt sich der in [RICK09] beschriebene Zusammenhang zwischen der Gießgeschwindigkeit und der Lage der thermischen Mitte bestätigen. Je schneller ein Strang gegossen wird, desto mehr nähert sich die Lage der thermischen Mitte der geometrischen Mitte an. Dies ist vor allem auf eine stabilere Wärmeabfuhr an der Oberseite der Kokille zurückzuführen. Die Wärmeabfuhr aus der Schmelze erfolgt analog zur niedrigen Gießgeschwindigkeit zunächst senkrecht zur Gießrichtung nach außen in Richtung des Kühlers, nach Ausbilden einer stabilen Randschale

anschließend hauptsächlich axial über den Strang. Aufgrund der höheren Gießgeschwindigkeiten, durch die insgesamt mehr Wärmenergie in die Kokille eingebracht wird, findet die Randschalenbildung in Gießrichtung in der Kokille deutlich später statt. Die Sumpftiefe im Strang erhöht sich, wodurch die Randschale im Vergleich zu niedrigen Gießgeschwindigkeiten deutlich länger an der Kokillenkantenwand anliegt (geringe Stabilität der Randschale sowie metallostatistischer Druck der Schmelze). Die Wärmeabfuhr erfolgt also ähnlich wie an der Unterseite über eine längere Strecke senkrecht zur Gießrichtung nach außen.

Allgemein nähern sich damit die Erstarrungsbedingungen an der Ober- und Unterseite einander an. Die Verlagerung der thermischen Mitte in die Oberhälfte des Stranges ist weniger stark ausgebildet. Die geometrische Mitte wird dabei jedoch nicht erreicht. Durch die später einsetzende Luftspaltbildung verringert sich außerdem der Temperaturunterschied zwischen Schmelze und Kokille in der Oberhälfte (die Kokille wird durch die höhere Wärmezufuhr heißer).

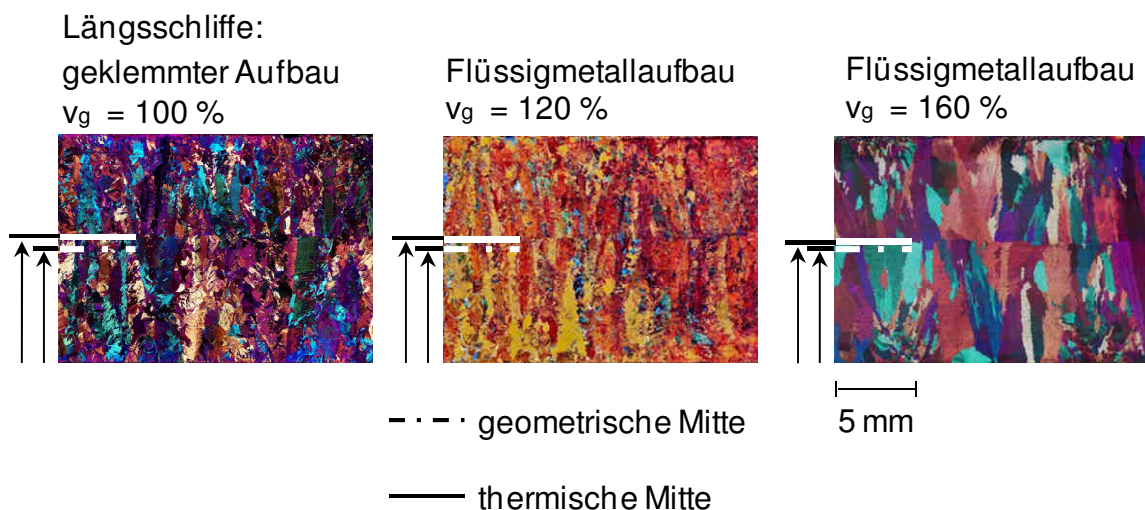


Abbildung 29: Längsschliffe: links: geklemmte Kokille; Mitte: Kokille mit Flüssigmetallschicht 3 mm, Gießgeschwindigkeit 120 %; rechts: Kokille mit Flüssigmetallschicht 3 mm, Gießgeschwindigkeit 160 %

Der Korngrößenunterschied zwischen der Randschicht und dem darunterliegenden Bereich bis zur Mitte des Bandes ist nicht mehr so stark ausgeprägt. Die Kornstruktur im Band ist damit insgesamt homogener.

In Abbildung 29 sind die Auswirkungen des beschriebenen Flüssigmetallaufbaus auf das Gefüge deutlich zu erkennen. Im linken Bild ist ein Längsschliff (in Gießrichtung) eines konventionell gegossenen Bandes dargestellt. Zum Vergleich sind in der Mitte sowie in der rechten Hälfte Schliffbilder von Bändern abgebildet, die mit Flüssigmetallkühlung produziert wurden. Die Gießgeschwindigkeiten betragen 120 % beim mittleren und 160 % beim rechten Schliffbild. Gut zu erkennen ist die Verlagerung der thermischen Mitte in Richtung der geometrischen Mitte mit wachsender Gießgeschwindigkeit. Ebenso verändern sich die durchschnittlichen Korngrößen, deren Homogenität bei den schneller gegossenen Bändern steigt. Es wird jedoch kein vollständig symmetrisches, homogenes Gefüge erreicht.

Aus den oben genannten Gründen ermöglicht der Einsatz der Flüssigmetallkühlung eine Verbesserung der Qualität des Stranggussgefüges im Vergleich zum Ausgangszustand. Die Auswirkungen sind allerdings nicht zufriedenstellend und bedürfen einer weiteren Verbesserung.

8.2.2 Flüssigmetall statisch (unterschiedliche Schichtdicken)

Durch den Einfluss der Schwerkraft kann die Wärme beim Stranggießen auf einer horizontalen Anlage an der Unterseite besser abgeführt werden. Aufgrund des Eigengewichts liegt der entstehende Strang an der Unterseite auf der Kokillenplatte auf. An der Oberseite bildet sich durch die Erstarrungskontraktion der Schmelze ein Luftspalt aus, der die Wärmeabfuhr aus der Kokille behindert. Um die Auswirkungen auf den Erstarrungsvorgang zu kompensieren, wird in diesem Versuchsaufbau die Wärmeabfuhr aus der Kokille an der Unterseite vermindert. Mit Hilfe der Flüssigmetallschicht soll die Wärmeabfuhr an Ober- und Unterseite des Stranges gezielt dahingehend verändert werden, dass auf beiden Seiten identische Bedingungen vorliegen (Abbildung 30).

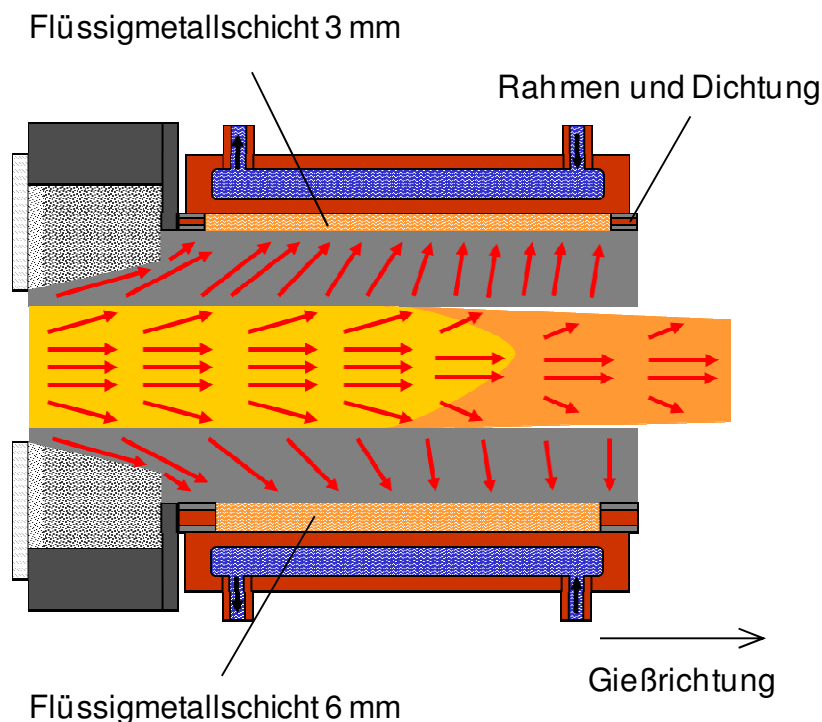


Abbildung 30: Kokillen-Kühler-Aufbau 3/6 mm Flüssigmetall, Bandformat
[RIED08_1]

Durch eine wärmere Unterplatte soll der Erstarrungsbeginn an der Unterseite der Kokille in Gießrichtung verschoben werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wird die Wärmeabfuhr an der Unterseite der Kokille verschlechtert. Es wird eine Kokille mit unterschiedlich starken Flüssigmetallschichten aufgebaut.

Da der Wärmestrom durch ein Material dem Gesetz:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (\text{Formel 5})$$

\dot{Q} = Wärmestrom [W]

λ = Wärmeleitfähigkeit in [W/m*K]

δ = Schichtstärke [m]

A = Fläche [m²]

T_w = Wandtemperatur [K]

folgt, wird für den Versuch an der Unterseite der Kokille eine 6 mm und an der Oberseite eine 3 mm starke Flüssigmetallschicht gewählt.

Verglichen mit den zuvor durchgeführten Versuchen mit einer 3 mm hohen Flüssigmetallschicht an Ober- und Unterseite verändert sich das Temperaturfeld der Kokille. Vor allem im Mittelbereich der Kokille ist ein Anstieg der Temperaturen an der Unterseite festzustellen. Dort liegen die Temperaturen ca. 50 - 70 °C über den Werten des vorangegangenen Versuches. Durch die Erhöhung der Flüssigmetallschicht wird die Wärme in der Kokille angestaut (siehe Abbildung 31).

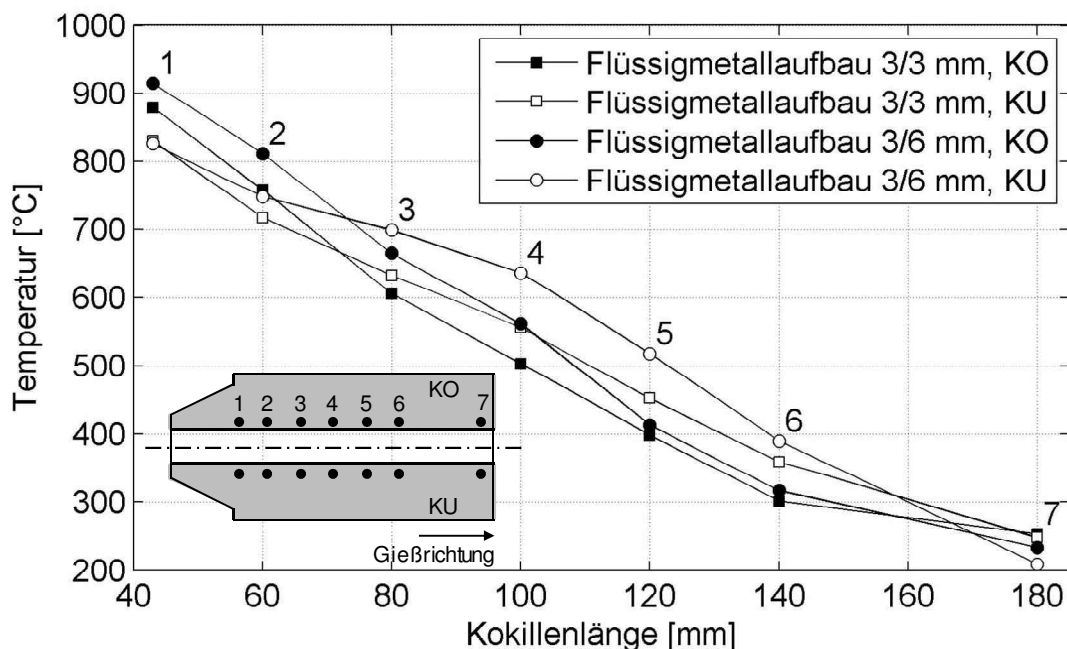


Abbildung 31: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und Flüssigmetallaufbau 3/6 mm, Gießgeschwindigkeit 120 %

Dieser Wärmestau wirkt sich jedoch auch an der Oberseite der Kokille aus, so dass die Temperaturwerte dort ebenfalls leicht (ca. 65 °C bei Kokillenlänge 100 mm) mit ansteigen und hauptsächlich vom Einlauf bis zur Mitte der Kokille über denen des vorausgegangenen Versuches liegen.

Die oben beschriebenen Temperaturverläufe spiegeln sich in den entstandenen Kornstrukturen wider (Abbildung 32). Die Lage der thermischen Mitte lässt sich durch den Versuchsaufbau nicht verschieben.

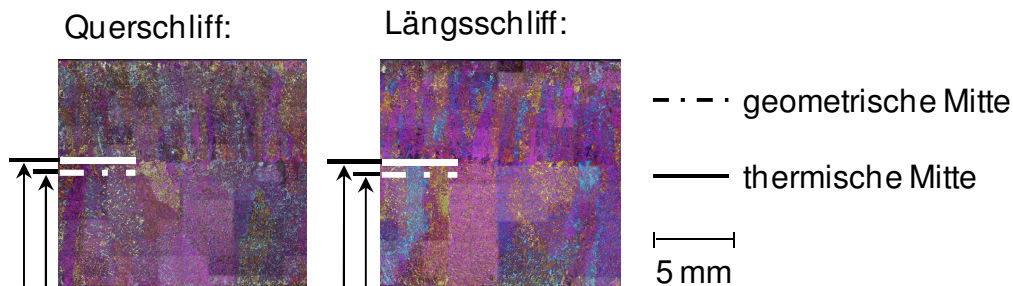


Abbildung 32: Längsschliff, Gießgeschwindigkeit 120 %

Bedingt durch die im Einlaufbereich angestiegenen Temperaturen an der Oberseite fällt der Unterschied zu den Temperaturen an der Unterseite der Kokille jedoch größer aus. Als Resultat stellt sich ein unterschiedliches Gefüge unter- bzw. oberhalb der thermischen Mitte ein. Durch die im Kokilleneinlaufbereich erhöhten Temperaturen an der Oberseite der Kokille ist die Unterkühlung der Schmelze beim Auftreffen auf die Kokillenwand schwächer ausgeprägt. Die initiale Keimbildung ist vermindert. Dementsprechend bilden sich in der oberen Hälfte des Stranges verglichen mit dem Referenzversuch (Abbildung 29, Mitte) gröbere Strukturen aus. An der Unterseite der Kokille erhöhen sich die Temperaturen gegenüber der Referenz erst bei einer Kokillenlänge von ca. 60 mm. Es ist davon auszugehen, dass die Randschalenbildung zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen ist. Die im weiteren Verlauf der Kokille ansteigenden Temperaturen (ca. 100 °C bei Kokillenlänge 100 mm) verlangsamen den Wachstumsprozess an der Unterseite, so dass sich bis zur thermischen Mitte ein grobkörniges, stängeliges Gefüge einstellt. Dieses ist gegenüber dem Referenzversuch (Abbildung 29, Mitte) entsprechend grobkörniger ausgebildet.

Über dem Querschnitt betrachtet erhöhen sich damit die Korngrößenunterschiede ober- und unterhalb der thermischen Mitte. Darüber hinaus kann die Lage der thermischen Mitte durch die konstruktiven Veränderungen nicht beeinflusst werden.

Im Hinblick auf spätere Verarbeitungsstufen ist die Qualität des Gefüges damit schlechter, der Aufbau folglich insgesamt als ungeeignet einzustufen.

8.2.3 Flüssigmetall-Umlaufkühlung

Neben der Qualität des Strangussgefüges soll die Ausbringung von Stranggießanlagen gesteigert werden. Dazu wird das Potenzial der Flüssigmetallkühlung weiter untersucht. Im Gegensatz zum bisherigen statischen Einsatz wird das Flüssigmetall in diesem Versuch mittels einer Pumpe durch einen Kreislauf geführt und in einem weiteren Wärmetauscher abgekühlt. Abbildung 33 veranschaulicht schematisch den Aufbau.

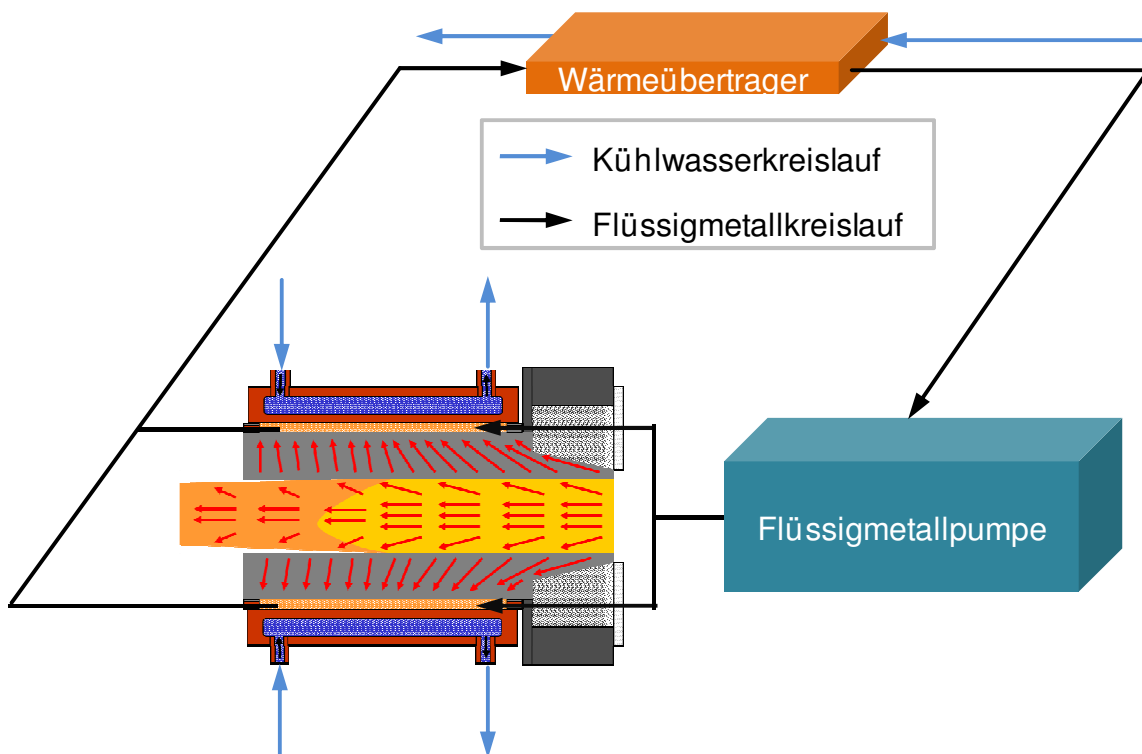


Abbildung 33: Schematischer Kreislauf der Flüssigmetall-Umlaufkühlung

Statisch eingesetzt erreicht das Flüssigmetall im Gießbetrieb mittlere Temperaturen um 220 °C an der Unterseite der Kokille, sowie etwa 120 °C an der Oberseite der Kokille. Durch eine Kühlung des Flüssigmetalls soll eine erhöhte Wärmeabfuhr aus

der Kokille und somit eine weitere Steigerung der Gießgeschwindigkeit ermöglicht werden.

Die Annahmen über die Auswirkungen einer Flüssigmetall-Umlaufkühlung auf das Temperaturverhalten des Kokillen-Kühler-Aufbaus können im Versuch nicht bestätigt werden. Auf der einen Seite kann die Temperatur des Flüssigmetalls während des Gießbetriebes durch den Einsatz der Umlaufkühlung an der Ober- und Unterseite der Kokille konstant auf 120 °C gehalten werden, im Gegensatz zu 220 °C an der Unterseite der Kokille in der statischen Anwendung. Auf der anderen Seite steigen die Temperaturen an der Unterseite der Kokille trotz des circa 100 °C kälteren Flüssigmetalls stark an und liegen bis zu 130 °C über den Werten des statischen Aufbaus. Abbildung 34 veranschaulicht die Temperaturprofile der Kokillen für den statischen Einsatz und die Umlaufkühlung bei einer Gießgeschwindigkeit von 120 %.

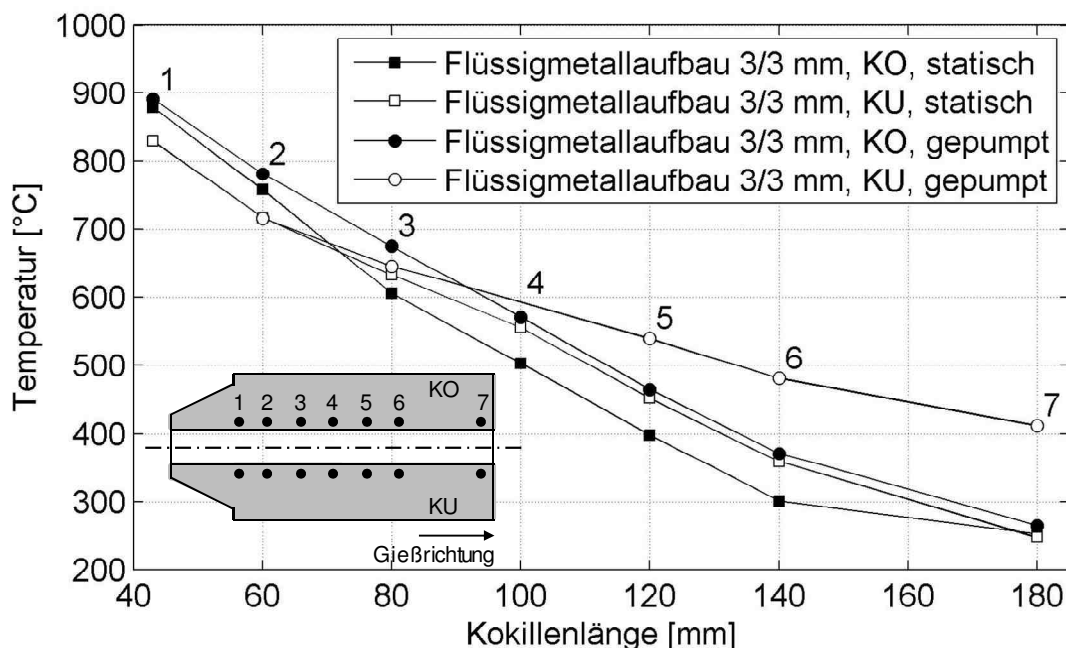


Abbildung 34: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm statisch und gepumpt, Gießgeschwindigkeit 120 %

Die Temperaturen an der Oberseite der Kokille steigen ebenfalls mit an und liegen bis zu 70 °C über denen des Referenzversuches. Aufgrund dieser widersprüchlichen

Temperaturwerte ist davon auszugehen, dass der Hohlraum zwischen Kokille und Kühler während des Gießbetriebes möglicherweise nicht permanent mit Flüssigmetall gefüllt war.

Eine Analyse des Gefüges (Abbildung 35) bestätigt die stark angestiegenen Temperaturen im Vergleich zum Referenzversuch. Die Kornstrukturen sind deutlich grobkörniger ausgeprägt. Die Lage der thermischen Mitte kann nicht beeinflusst werden.

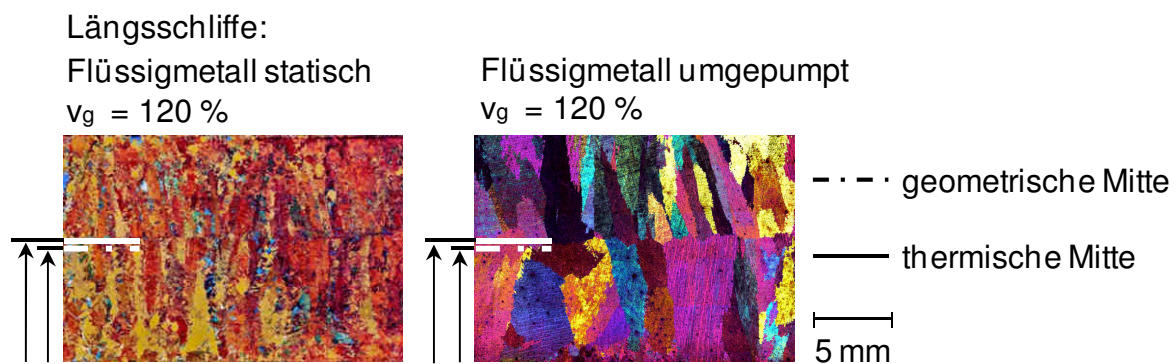


Abbildung 35: Längsschliffe Bandformat, Gießgeschwindigkeit 120 %, links FM statisch, rechts FM gepumpt

Bewertung der zusätzlichen Flüssigmetall-Umlaufkühlung:

Der Einsatz einer Flüssigmetall-Umlaufkühlung erfordert einen sehr hohen technischen Aufwand. Da die Gallium-Indium-Zinn-Legierung nahezu alle anderen Metalle oberflächlich legiert, ergeben sich Schwierigkeiten bei der Auswahl eines geeigneten Werkstoffes zum Aufbau eines Kreislaufsystems. Der eingesetzte Edelstahlwerkstoff zeigt dabei die besten Ergebnisse. Die hohen Temperaturen während des Gießbetriebes erfordern den Einsatz einer geeigneten Pumpe. Die meisten Vorteile bietet hier ein magnetohydrodynamisches System, bei dem keine bewegten Teile in Kontakt mit dem Flüssigmetall treten. Des Weiteren ergeben sich große Schwierigkeiten bei der Abdichtung des Flüssigmetallkreislaufes an der Graphitkokille. Derzeit gibt es am Markt nur sehr wenige Anbieter von Flüssigmetall-

legierungen. Durch die teuren Legierungsbestandteile liegt der aktuelle Preis bei ca. 800 € pro Kilogramm Flüssigmetall (Dichte = $6,4 \text{ g/cm}^3$) [MCPH08].

Da der technische Aufwand aus den genannten Gründen immens hoch ist und die Versuchsergebnisse den Einsatz in keinem Fall rechtfertigen, wird der Ansatz der Flüssigmetall-Umlaufkühlung nicht weiter verfolgt.

8.3 Einfluss Wärmeleitfähigkeit Kokille

8.3.1 Graphite verschiedener Wärmeleitfähigkeit

Um den Einfluss der Schwerkraft und die Auswirkungen auf den Erstarrungsvorgang zu kompensieren wird in dieser Versuchsreihe die Wärmeabfuhr aus der Kokille an der Unterseite vermindert. Neben den Wärmeübergängen zwischen Strang und Kokille sowie Kokille und Kühler hat die Wärmeleitfähigkeit des Kokillenwerkstoffes auf die Wärmeabfuhr einen entscheidenden Einfluss. Da Stranggießkokillen für ein Bandformat meist mehrteilig aufgebaut sind, können einzelne Komponenten sehr einfach ausgetauscht und unterschiedliche Materialien innerhalb einer Kokille kombiniert werden. Für den Versuch wird eine Hybridkokille aufgebaut, die aus Graphitwerkstoffen mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit besteht (siehe Abbildung 36). Als Oberplatte der Kokille kommt ein Material mit einer Wärmeleitfähigkeit von 100 W/mK zum Einsatz (Standard-Kokillenwerkstoff), an der Unterseite wird ein Werkstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von 45 W/mK gewählt. Die angegebenen Werte gelten bei Raumtemperatur. Bei höheren Temperaturen, wie sie während des Gießprozesses vorliegen, fällt die Wärmeleitfähigkeit bei beiden Werkstoffvarianten exponentiell in etwa gleichem Maße ab. Sie beträgt bei 800 °C noch etwa 60 W/mK für den Normalgraphit, bzw. 25 W/mK für den Werkstoff mit der schlechteren Wärmeleitfähigkeit [WOLB09_1].

Ziel dieser Aufbauvariante ist ein langsames Wachstum der Kornstrukturen von der Unterseite der Kokille in die Mitte des Stranges. Die Erstarrungsfronten, die von der Keimbildung am Rand des Stranges ausgehend in dessen Mitte wandern, sollen dadurch in der geometrischen Mitte des Stranges aufeinander treffen.

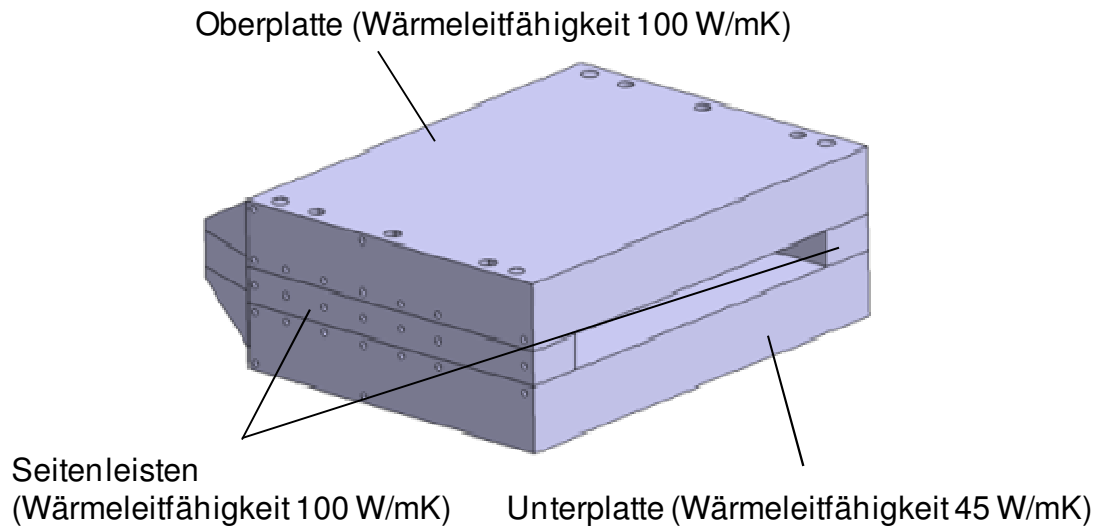


Abbildung 36: Hybridkokille aus Graphitwerkstoffen mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten

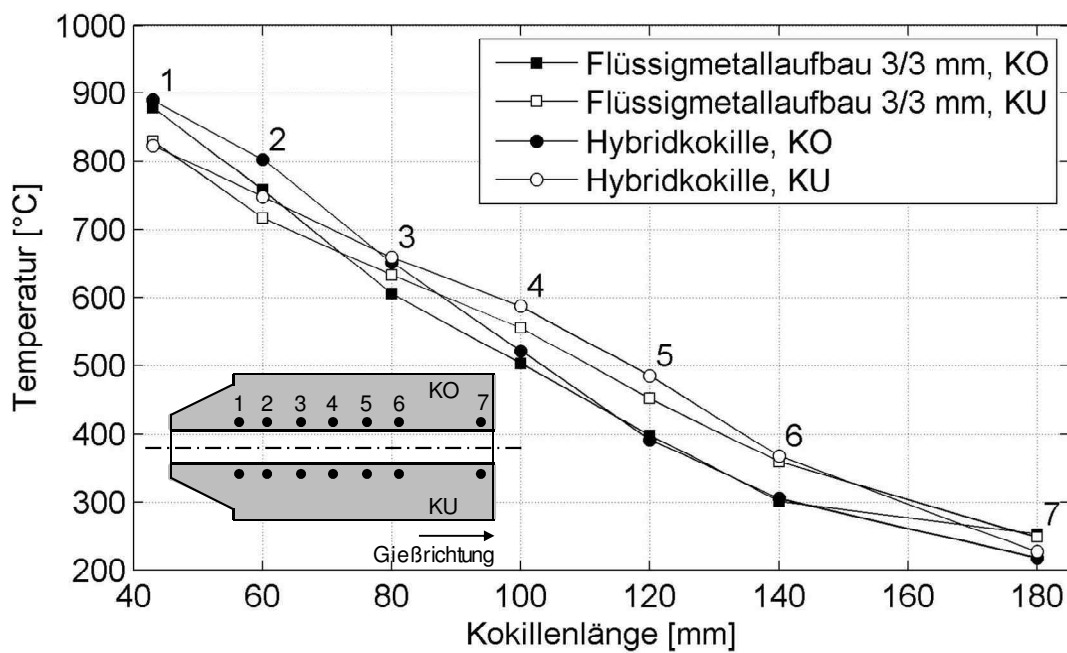


Abbildung 37: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und Hybridkokille, Gießgeschwindigkeit 120 %

Die in der Mitte der Kokille veränderten Kühlbedingungen an der Unterseite des Bandes beeinträchtigen nach der Randschalenbildung die Wärmeabfuhr aus dem Strang, wodurch das Kornwachstum verlangsamt ist. An der Oberseite der Kokille ist der Keimbildungsprozess durch höhere Temperaturen abgeschwächt. Die größere Temperaturspanne zwischen der Ober- und der Unterseite der Kokille führt zu ungleichmäßigen Erstarrungsbedingungen über dem Querschnitt des Bandes.

Insgesamt entsteht über die Banddicke eine im Vergleich zum Referenzaufbau leicht inhomogenere Kornstruktur. Die Qualität des Gussproduktes verschlechtert sich.

8.3.2 Werkstoff C/SiC

Neben dem Einsatz verschiedener Graphitsorten mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten ist auch eine Verwendung gänzlich anderer, neuer Materialien als Kokillenwerkstoff denkbar, um die Wärmeabfuhr aus der Kokille zu verändern. Durch den mehrteiligen Aufbau von Bandkokillen lassen sich sehr einfach einzelne Elemente austauschen und eine Hybridkokille aufbauen.

Zusammen mit dem Projektpartner SGL CARBON wird der Versuchswerkstoff C/SiC (Faserverbundwerkstoff) als möglicher neuer Kokillenwerkstoff ausgewählt. Über die Orientierung der Fasern in der Matrix könnte eine Anisotropie in der Wärmeleitfähigkeit eingestellt und so gezielt die Wärme während des Gießprozesses abgeführt werden. Zusätzlich zeichnet sich der Werkstoff vor allem durch seine hohe Härte aus. Dadurch werden eine hohe Verschleißfestigkeit und somit längere Standzeiten der Kokille erwartet.

Vorversuch

Entsprechend der bisherigen Geometrie des Bandformates wird eine Stranggießkokille aus C/SiC gefertigt (geklemmter, konventioneller Aufbau). Ein Versuch zur Untersuchung der generellen Eignung des Werkstoffes zum Stranggießen wird durchgeführt. Die Versuchs-Randbedingungen wie z.B. die Kühlwasserdurchflussmenge oder die Schmelztemperatur entsprechen denen der bisherigen Versuche. Der Werkstoff hat eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 40 W/mK bei Raumtemperatur. Diese fällt auf ca. 25 W/mK bei 800 °C ab [HOFF10_1]. Die Werte entsprechen in

etwa den Werkstoffkenndaten des Normal-Graphites mit der schlechteren Wärmeleitfähigkeit aus dem zuvor beschriebenen Versuch.

Nach einem stabilen Angießvorgang muss das Experiment abgebrochen werden, da der Schmelze in der Kokille während des Gießens nur unzureichend Wärme entzogen werden kann. Die damit verbundenen hohen Bandaustrittstemperaturen führen zu einem Anreißen der empfindlichen Strangschale und damit zum Abriss des Bandes.

Da die Randbedingungen Wärmeeintrag in die Kokille aus der Schmelze, Wärmeleitung durch die Kokille sowie die Wärmeabfuhr über den Kühler ins Kühlwasser analog zu den vorangegangenen Versuchen sind, wird die unzureichende Wärmeabfuhr auf den Wärmeübergangswiderstand zwischen Kokille und Kühler zurückgeführt. Es wird angenommen, dass eine zu raue Oberfläche der Kokillenaußenseite den Wärmeübergangswiderstand stark erhöht.

Versuch mit optimierter Kokille

Da die Wärme beim Vorversuch mit der C/SiC-Kokille nur unzureichend abgeführt werden konnte, wird die Kokille für den zweiten Versuch neu präpariert. Um den Kontakt zwischen Kühler und Kokille zu verbessern und damit den Wärmeübergangswiderstand zu verkleinern, werden die Kokillenplatten für den zweiten Versuch an der Außenseite überschliffen. Zudem wird die Geometrie der Kokille an den Flüssigmetallaufbau, mit dem eine deutlich höhere Wärmeabfuhr möglich ist, angepasst.

Der zweite Gießversuch muss ebenfalls aufgrund eines Strangabrisses abgebrochen werden. Die Wärmeabfuhr aus der Kokille kann durch die getroffenen Maßnahmen gesteigert werden. Dies zeigt sich in niedrigeren Kokillentemperaturen im Vergleich zum Vorversuch. Dennoch erreicht die Kokille beim Angießvorgang ein deutlich höheres Temperaturniveau im Vergleich zu einer konventionellen Graphitkokille. Eine mögliche Ursache liegt dabei in der Ankopplung des Materials im Induktionsfeld des Ofens.

Bei einer anschließenden Untersuchung der Kokille wird festgestellt, dass die Kokilleninnenseite vor allem im Bereich der vermuteten Erstarrungszone oberflächliche, mit bloßem Auge erkennbare Löcher aufweist. Genauere Analysen ergeben, dass das im Werkstoff enthaltene freie Restsilizium durch die Schmelze aus der Randschicht herausgelöst wurde.

Weitere Versuche an unterschiedlichen Tauchproben (C/SiC-Keramiken auf Basis von Filz, Gewebe und CC3), die jeweils etwa 15 min in Messing- als auch in Bronzeschmelze getaucht wurden, zeigen dasselbe Oberflächenbild. In die entstandenen Hohlräume dringt Schmelze in das Material ein (siehe Abbildung 39).

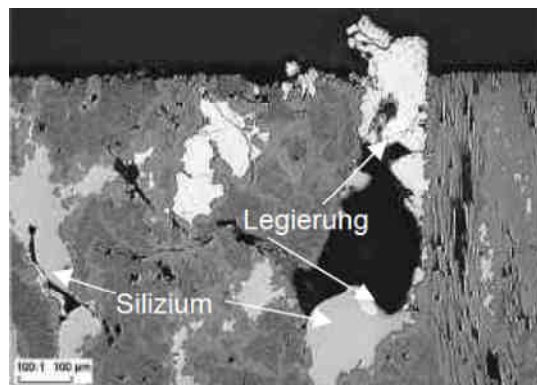


Abbildung 39: Schliffbild C/SiC-Kokille [WOLB08]

Unabhängig von der Legierung und der Kohlenstoffbasis des C/SiC wird Silizium aus der Randschicht herausgelöst. Ein Angriff auf den Kohlenstoff oder das SiC selbst ist nicht zu erkennen. Während eines Stranggießversuches erhöht sich durch das Eindringen der Messingschmelze in die Kokillenplatte die Reibung zwischen Kokille und Strang stark. Die empfindliche Strangschale reißt ein, was zu den beschriebenen Strangabrissen führt.

Um dieses Problem zu umgehen, werden in einem nächsten Schritt Tauchproben untersucht, die an der Oberfläche mit SiC beschichtet sind. Die Tauchproben werden mit drei verschiedenen SiC-Coatings beschichtet. Dazu werden Schichten feiner Fasern und silizierende C-Folien auf C/SiC Platten aufgeklebt. In dieser Beschichtung ist der SiC-Anteil stark erhöht, der Anteil des freien Restsiliziums erniedrigt.

Durch die unterschiedliche thermische Ausdehnung von Beschichtung und C/SiC-Platte entstehen bei allen drei Proben bereits während der Fertigung Risse in der Oberfläche der Beschichtung. Über diese Risse dringt die Schmelze im Tauchversuch nach wie vor in die Platten ein. Ein Angriff auf das Silizium kann damit nicht wirksam verhindert werden.

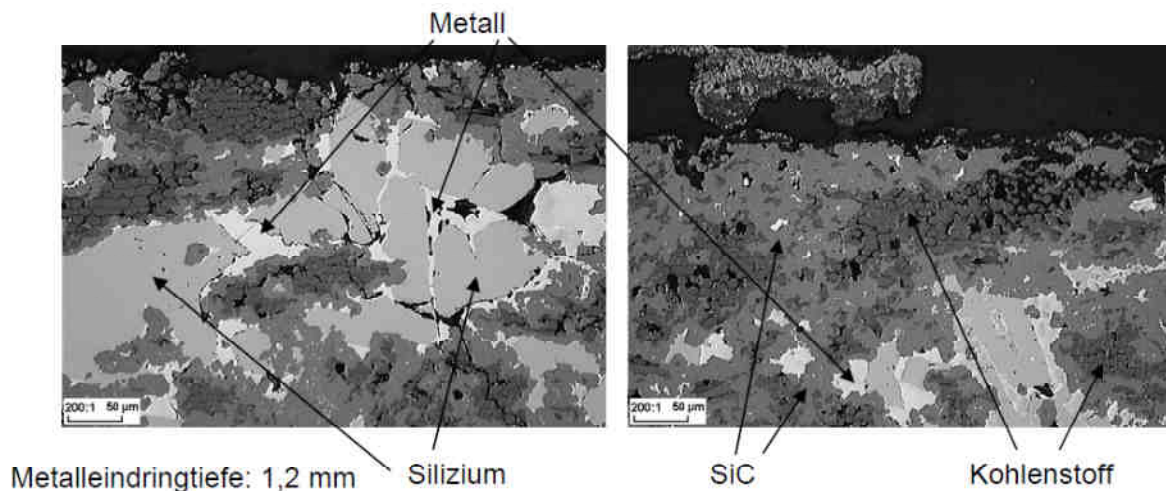


Abbildung 40: Schliffbild beschichtete C/SiC-Tauchproben [WOLB09]

In den Mikroskopaufnahmen (Abbildung 40) ist das eingedrungene Metall deutlich zu erkennen. Dabei zeigt sich erneut, dass weder der Kohlenstoff noch das SiC angegriffen werden.

Da auch mit verschiedenen Beschichtungen ein Angriff auf die Oberfläche des C/SiC-Werkstoffes nicht wirksam verhindert werden kann, wird auf weitere Versuche verzichtet. Das Material ist als Kokillenwerkstoff als ungeeignet einzustufen. Versuche mit einem Aufbau einer Hybridkokille aus Graphit und C/SiC werden aus diesem Grund nicht durchgeführt.

8.4 Einfluss Kühlzonen an der Kokille

Verschobener Kühler, 40 mm

Ein neuartiger Lösungsansatz zur Beeinflussung der Lage der thermischen Mitte ist eine Verschiebung der Kühlzonen der Kokille in Gießrichtung. Der Grundgedanke für

diesen Aufbau wird in Abbildung 41 veranschaulicht. Die eingezeichnete durchgehende, orangefarbene Linie über dem Bandquerschnitt (Abbildung 41, Teil 1) stellt vereinfacht die Form der Erstarrungsfront innerhalb eines Bandes beim Erstarren des Metalls in der Kokille dar (Längsschnitt in Gießrichtung).

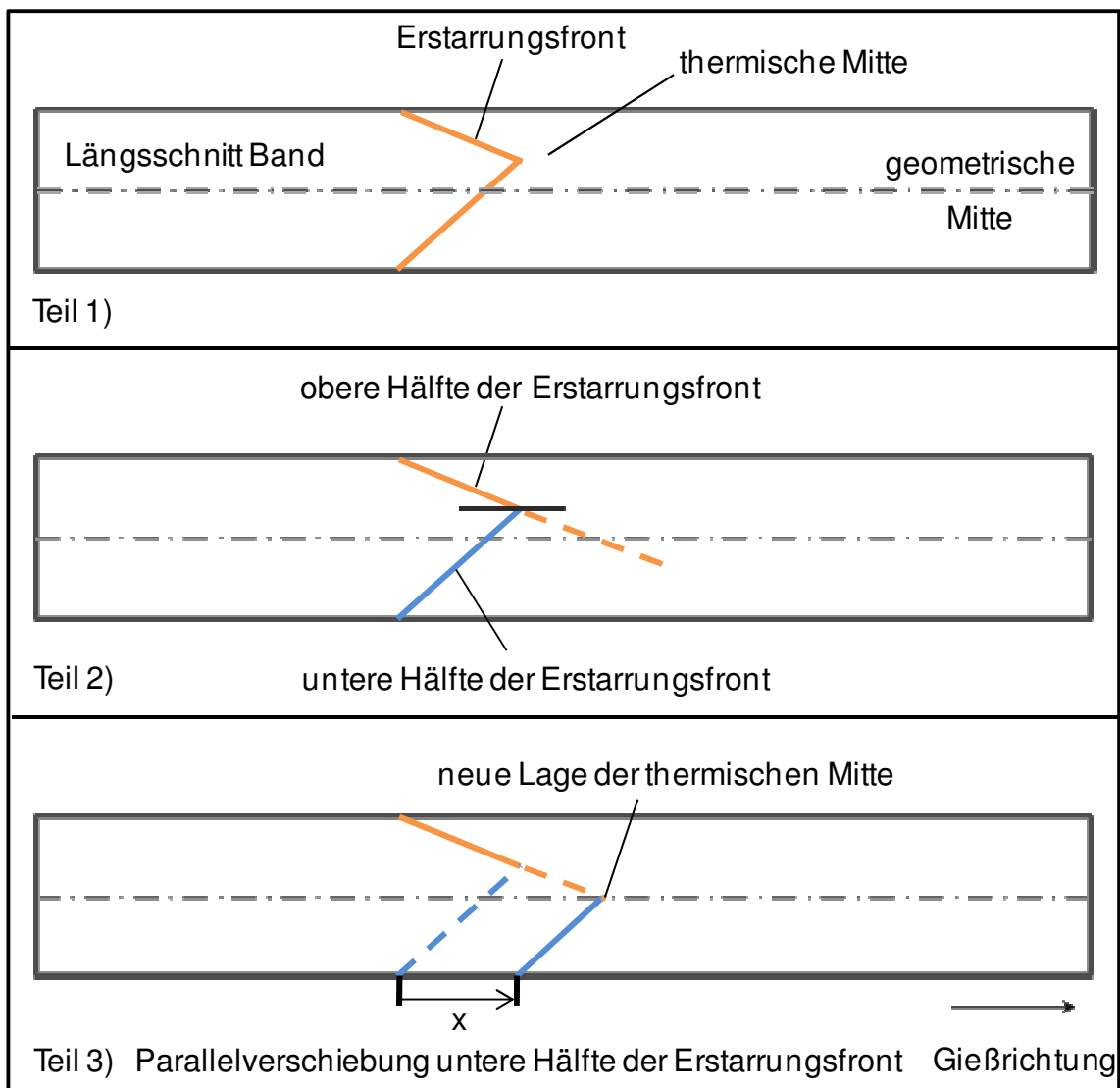


Abbildung 41: Verschiebung der Erstarrungsfront, Bandformat [RIED08_1]

Die orangefarbene Linie wird an der thermischen Mitte (Abbildung 41, Teil 2) in zwei Teillinien, die „obere Hälfte der Erstarrungsfront“ (orange) und die „untere Hälfte der Erstarrungsfront“ (blau) geteilt. Die „obere Hälfte der Erstarrungsfront“ wird verlängert (orange gestrichelt). Damit sich die beiden einzelnen Teillinien in ihrer Verlängerung

auf Höhe der geometrischen Mitte schneiden, kann z.B. die Position der unteren Linie (blau) parallel um die Strecke x weiter nach rechts verschoben werden (Abbildung 41, Teil 3). Die Lage der thermischen Mitte verschiebt sich dadurch in die geometrische Mitte des Bandes.

Dieser Ansatz zur Verschiebung der Kühlzone ergibt sich aus der Auswertung der Messdaten der vorangegangenen Versuche. Bei allen bisherigen Temperaturverläufen ist die untere Kokillenplatte im Einlaufbereich deutlich kälter als die entsprechende Messstelle an der Oberseite der Kokille. Daraus lässt sich folgern, dass die Erstarrung an der Unterseite der Kokille im Vergleich zur Oberseite in Gießrichtung früher einsetzt. Darüber hinaus kann aufgrund des besseren Anliegens des Stranges mehr Wärme an die Kokille übertragen werden, wodurch sich die Lage der thermischen Mitte in die Oberhälfte des Stranges verschiebt. Durch eine verspätet einsetzende Kühlung soll nun bewirkt werden, dass die Randschalenbildung an der Unterseite in Gießrichtung später beginnt.

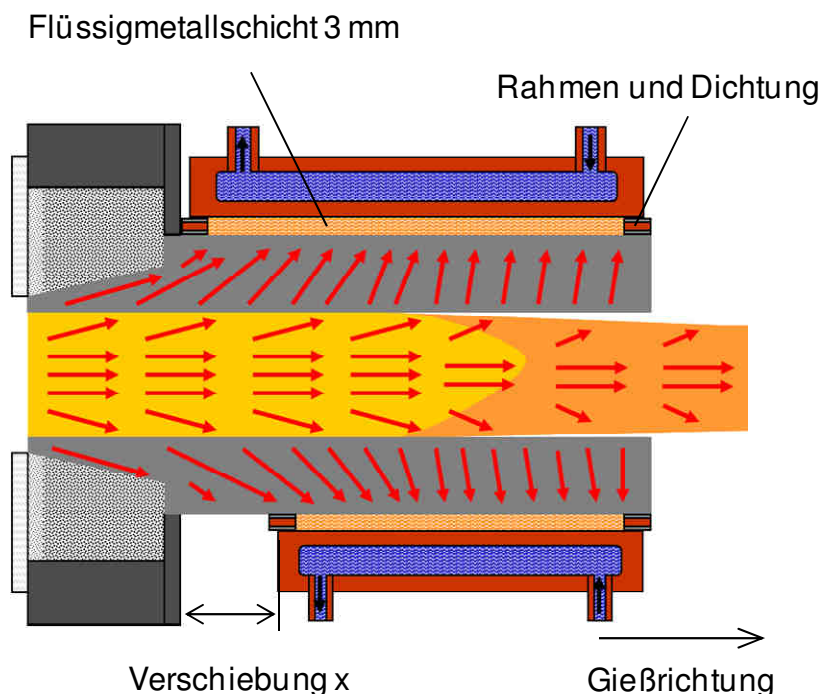


Abbildung 42: Kokillen-Kühler-Aufbau mit verkürzter Kühlzone, Bandformat
[RIED08_1]

Für einen Versuchsaufbau muss die untere Kühlzone folglich, wie in Abbildung 42 dargestellt, in Gießrichtung vom Ofen weg verschoben werden. Aus konstruktiven Gründen wird der Kühler auf der Unterseite der Kokille verkürzt, die Kühlung setzt damit in Gießrichtung später ein. Des Weiteren wird der Versuchsaufbau zur Eliminierung des Kokillenatmens wiederum mit einer 3 mm hohen Flüssigmetallschicht an Ober- und Unterseite der Kokille ergänzt.

Die Temperaturverläufe der Versuche sind in Abbildung 43 dargestellt.

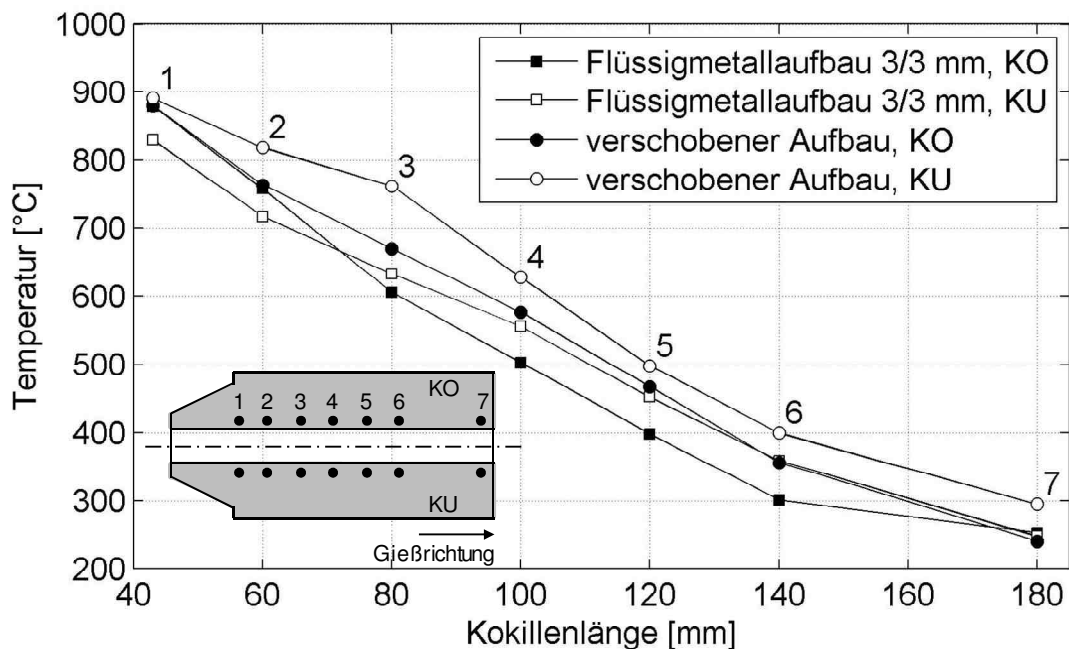


Abbildung 43: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und verschobener Aufbau, Gießgeschwindigkeit 120 %

Verglichen mit dem Referenzversuch lässt sich eine signifikante Veränderung im Temperaturverlauf feststellen. Durch die fehlende Kühlwirkung an der Unterseite der Kokille im Einlaufbereich können die Temperaturen wie erwartet angehoben werden. Die Messstellen bei Kokillenlänge 43 mm weisen sowohl an der Unter- als auch an der Oberseite nahezu den gleichen Temperaturwert von 890 °C auf. Bis zu einer Länge von 80 mm baut sich im weiteren Verlauf der Kokille ein Temperaturunterschied von ca. 100 °C zwischen Ober- und Unterseite auf. Über die verbleibende

Länge der Unterseite liegen die Temperaturen anschließend ca. 30 °C - 50 °C über dem Temperaturniveau der Oberseite. Die bisher bei allen Aufbauvarianten auftretende Überkreuzung der Temperaturverläufe von Ober- und Unterseite tritt bei diesem Versuchsaufbau nicht auf.

Durch die Verschiebung der Kühlzone kann das Temperaturniveau der Unterseite vor allem im Anfangsbereich der Kokille auf das der Oberseite angehoben werden. Durch die damit einhergehende Verkleinerung der Kühlfläche steigen die Temperaturen der Unterplatte jedoch über der gesamten Länge der Kokille über das Temperaturniveau der Oberplatte. Durch die insgesamt verkleinerte Kühlfläche steigen die Temperaturen an der Oberseite der Kokille im Vergleich zum Referenzversuch ebenfalls an.

Die Auswirkungen dieses Temperaturhaushaltes auf das Gefüge sind exemplarisch in Abbildung 44 dargestellt.

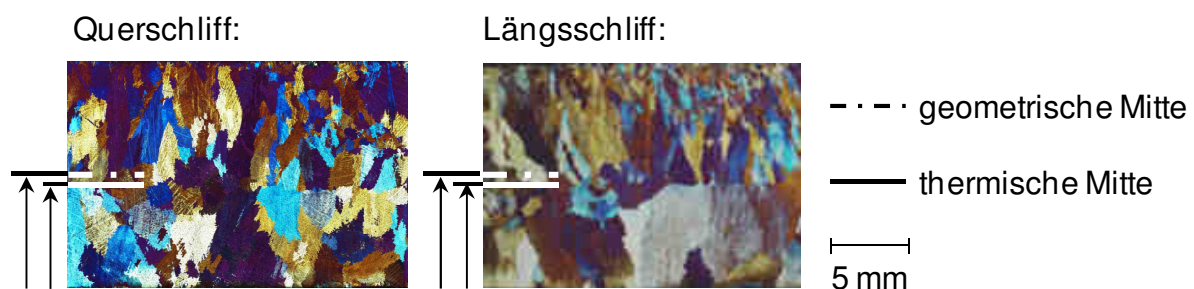


Abbildung 44: *Quer- und Längsschliff, Aufbau mit verschobenem Kühler, 120 % Gießgeschwindigkeit*

Die Lage der thermischen Mitte hat sich im Vergleich zu allen bisherigen Aufbauvarianten gravierend verändert und liegt mit der gewählten Verschiebung leicht unterhalb der geometrischen Mitte. Durch das Verschieben der Kühlzone an der Unterseite der Kokille setzt die Erstarrung der Schmelze dort später ein.

Ein Nebeneffekt dieser Aufbauvariante ist die Beeinflussung der Kornstrukturen über dem Querschnitt des Stranges. Durch eine schwächere Unterkühlung sowie eine erniedrigte Wachstumsgeschwindigkeit entsteht in der unteren Hälfte des Stranges

eine sehr grobkörnige Gefügestruktur. Durch erhöhte Temperaturen in der oberen Kokillenplatte verändern sich die Wachstumsbedingungen in der oberen Hälfte des Stranges ebenfalls. Die Korngrößenunterschiede sind über dem Querschnitt des Bandes damit insgesamt groß, weshalb der Ansatz im folgenden Versuchsaufbau optimiert wird.

8.5 Kombinationsversuch

Verschobener Kühler, 40 mm, optimiert

Durch den vorausgegangenen Versuchsaufbau kann die Lage der thermischen Mitte in die geometrische Mitte des Stranges verschoben werden. Dabei ergeben sich jedoch negative Auswirkungen auf die sich ausbildenden Kornstrukturen. Durch die erhöhten Temperaturen an der Unterseite der Kokille stellt sich in der unteren Hälfte des Stranges ein im Vergleich zur Oberseite sehr grobkörniges Gefüge ein. Die Korngrößenunterschiede über dem Querschnitt sind damit sehr ausgeprägt. Um das Gefüge zu homogenisieren, wird im nächsten Versuchsaufbau die Verschiebung der Kühlzone mit einem Aufbau mit unterschiedlich hohen Flüssigmetallschichten kombiniert. Die Höhe der Flüssigmetallschicht an der Oberseite der Kokille beträgt 6 mm, an der Unterseite wird eine 3 mm hohe Schicht gewählt. Ähnlich der Aufbauvariante Flüssigmetallaufbau 3/6 mm (siehe Kapitel 8.2.2) sollen so die Temperaturen an der Oberseite der Kokille vor allem im mittleren Teil angehoben werden.

Beim konventionellen, geklemmten Versuchsaufbau steigt die Temperatur der Unterplatte nach der Überkreuzung der Temperaturverläufe oben / unten auf ca. 30 °C über die Temperaturwerte der Oberplatte an (bei max. Gießgeschwindigkeit). Ursache dafür ist die Luftspaltbildung an der Oberseite des Stranges. Bei allen Versuchen mit verändertem Kokillen-Kühler-Aufbau steigert sich diese Differenz auf min. 50 °C, bedingt durch den Einsatz der zusätzlichen Flüssigmetallkühlung, die ein früheres Strangabheben bewirkt. Durch die verkleinerte Kühlfläche an der Unterseite der Kokille im vorangehenden Versuch stellt sich ein noch stärkerer Temperaturunterschied von knapp 100 °C ein. Diese Differenz muss für eine symmetrische Wärmeabfuhr an Ober- und Unterseite eliminiert werden. Durch die Erhöhung der

Flüssigmetall-Schichtstärke an der Oberseite soll die Wärmeabfuhr aus der Kokille dort vermindert und die Temperaturen angehoben werden. Abbildung 45 veranschaulicht schematisch den optimierten Aufbau.

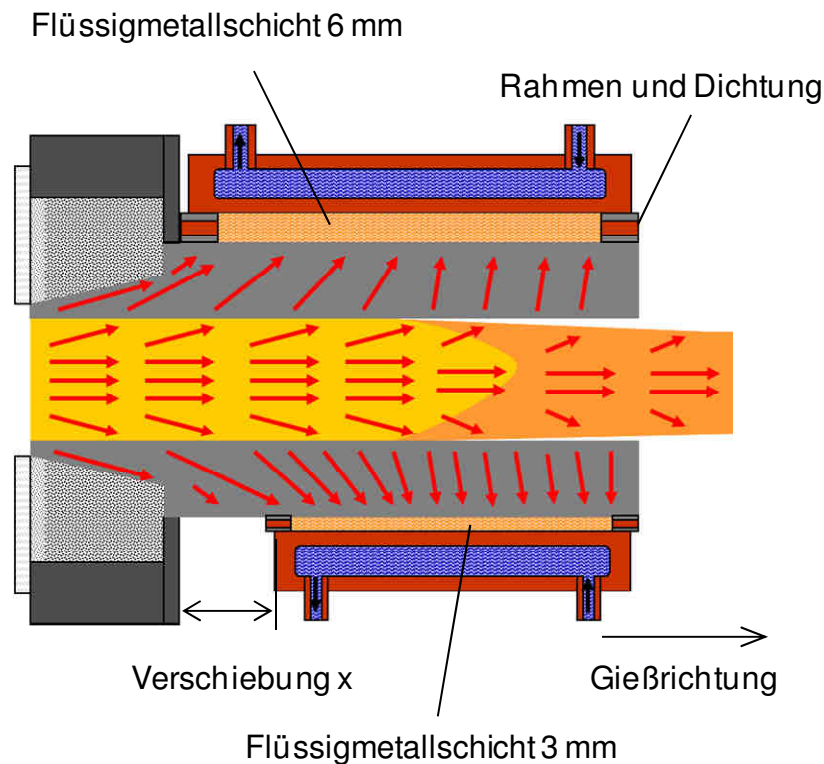


Abbildung 45: Kokillen-Kühler-Aufbau mit verkürzter Kühlzone, optimiert [HOFF10]

Die Versuchsergebnisse bestätigen den gewählten Ansatz. Die Temperaturverhältnisse an Ober- und Unterseite können einander angepasst werden (vgl. Abbildung 46). Durch die verminderte Wärmeabfuhr fallen die Temperaturen über der Länge der Kokille trotz Einsatz des Flüssigmetalles nicht mehr ganz so steil von ca. 935 °C im Einlauf auf ca. 330 °C im Auslauf ab. Im Einlauf steigen die Temperaturen der Oberplatte bei dieser Variante wieder leicht über die der Unterplatte, der geringe Unterschied von max. 20 °C hat jedoch keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Gefügebildung bzw. den Erstarrungsbeginn. Im weiteren Verlauf der Kokille sind die Werte an Ober- und Unterseite nahezu identisch, es ergeben sich maximale

Abweichungen von rund 30 °C bei einer Kokillenlänge von 140 mm, bei der kein Einfluss mehr auf die Gefügebildung besteht.

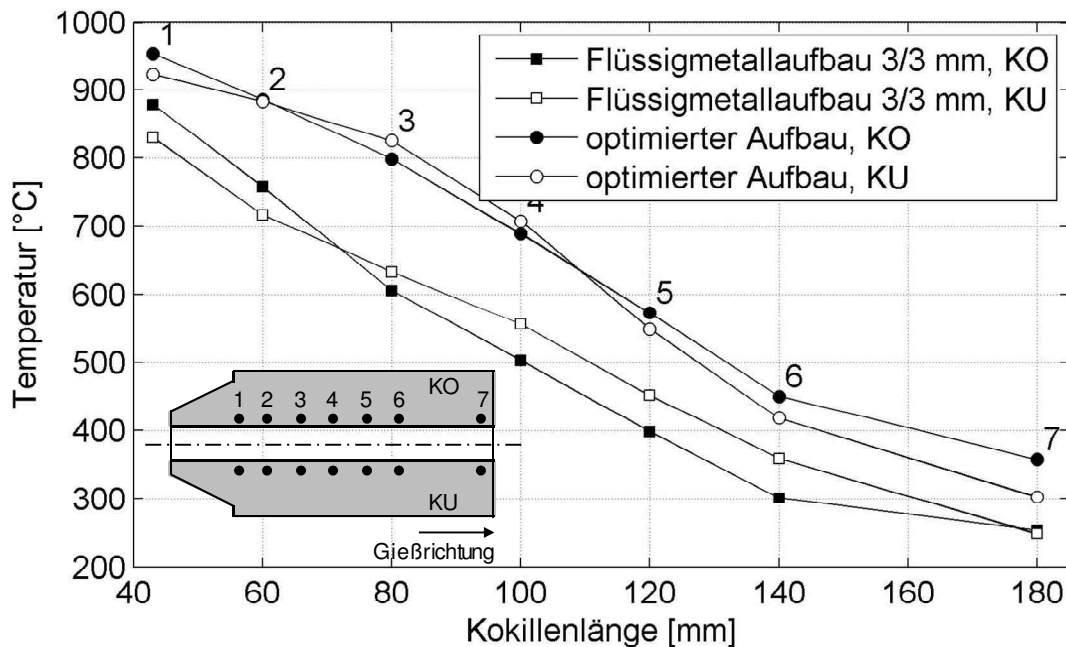


Abbildung 46: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und optimierter Aufbau, Gießgeschwindigkeit 120 %

Das veränderte Temperaturprofil der Kokille hat entsprechende Auswirkungen auf den Erstarrungsvorgang. Da sich die Temperaturverläufe an der Ober- und Unterseite der Kokille annähern, setzt die Erstarrung von der Oberseite und der Unterseite der Kokille zeitgleich ein. Unterschiedlich starke Flüssigmetallschichten sorgen zudem dafür, dass die Wärmeabfuhrbedingungen über der gesamten Kokillenlänge oben und unten in etwa gleich bleiben. Abbildung 47 zeigt exemplarisch einen Quer- sowie einen Längsschliff aus dem Strang. Durch den gleichzeitigen Erstarrungsbeginn an der Ober- und Unterseite sowie ähnlichen Wachstumsbedingungen treffen sich die Erstarrungsfronten auf Höhe der geometrischen Mitte des Bandes.

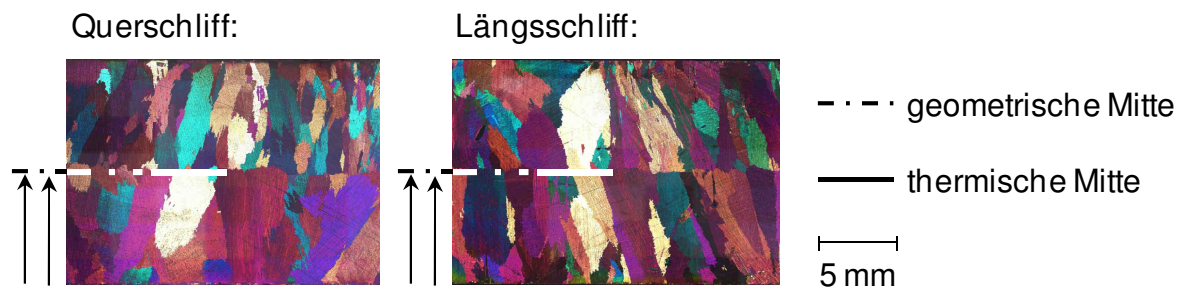


Abbildung 47: Quer- und Längsschliff, Aufbau mit verschobenem Kühler, optimiert, 120 % Gießgeschwindigkeit

Des Weiteren stellt sich eine homogene Kornstruktur über dem gesamten Querschnitt ein.

8.6 Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse Bandformat

Zu Beginn wurden Gießversuche mit dem konventionellen, geklemmten Aufbau durchgeführt. Die Auswertung der Kokillentemperaturen ergibt im Einlaufbereich der Kokille an der Oberseite 70 °C höhere Temperaturen als an den entsprechenden Messstellen in der unteren Platte. Als Ursache dafür wird eine Konvektionsbewegung angenommen, die aus einer instabilen Temperaturschichtung der Schmelze in der Kokille resultiert und permanent heiße Schmelze an die Kokillenwand leitet. Der Kokille in Gießrichtung folgend schwächt sich dieser Temperaturunterschied bis auf null Grad ab. Es folgt ein Schnitt der Temperaturverläufe oben / unten. Am Punkt der Überkreuzung ist davon auszugehen, dass die Randschalenbildung vollständig stattgefunden und die Randschale von der Kokillenwand abgehoben hat. Der sich ausbildende Luftspalt zwischen Strang und Kokille entsteht schwerkraftbedingt vor allem an der Oberseite des Stranges. Aus diesem Grund bleibt die untere Kokillenplatte bis zum Ende der Kokille im Vergleich zur Oberseite wärmer. Durch die im Einlaufbereich an der Unterseite kältere Kokille setzt der Erstarrungsvorgang dort in Gießrichtung früher ein als in der Oberhälfte. Die stabilen Wachstumsbedingungen durch das bessere Anliegen des Stranges und die damit verbundene bessere Wärmeabfuhr senkrecht zur Gießrichtung sorgen dafür, dass sich in der Unterhälfte des Stranges ein grobkörniges, stängeliges Gefüge ausbildet. An der Oberseite sind

die Wachstumsbedingungen durch die Luftspaltbildung deutlich instabiler. Durch den Luftspalt kann kalte Umgebungsluft in die Kokille gelangen, die Kokille kühlt temporär aus. Die Wärmeabfuhr erfolgt verstärkt in Gießrichtung über den bereits erstarrten Strang. Das sich einstellende Gefüge ist dadurch deutlich feinkörniger. Durch den früheren Wachstumsbeginn an der Unterseite treffen die Erstarrungsfronten von oben und unten geometrisch außermittig nach oben verschoben aufeinander.

Durch den Einsatz der Flüssigmetall-Wärmekoppelschicht zwischen Kokille und Kühler verläuft die Wärmeabfuhr aus der Schmelze deutlich stabiler. Instationäre Vorgänge wie das Kokillenanmen können unterbunden werden, da der temperaturbedingte Verzug der Kokille durch das flüssige Metall zu jeder Zeit des Gießvorganges ausgeglichen wird. Es kann sich kein isolierender Luftspalt zwischen der Kokille und der aufgesetzten Kühlerplatte ausbilden. Durch die Verhinderung eines Wärmestaus verläuft das Temperaturprofil der Kokille mit diesem Aufbau vom Einlauf bis zum Auslauf deutlich steiler, das heißt, dass sehr viel mehr Wärme aus der Kokille abgeführt werden kann. Der Wärmewiderstand zwischen Schmelze und Kühlwasser sinkt. Die Auslauf- und vor allem die Bandaustrittstemperaturen sind dabei signifikant niedriger als beim geklemmten Aufbau, so dass die Gießgeschwindigkeit gesteigert werden kann.

Bei steigender Gießgeschwindigkeit stabilisieren sich bei allen Aufbauvarianten die Wärmeabfuhrverhältnisse vor allem an der Oberseite der Kokille. Ein deutlich längeres Anliegen der Strangschale an der Kokille gleicht die Temperaturen der Oberseite etwas an die der Unterseite an. Die Verlagerung der thermischen Mitte sowie die Korngrößenunterschiede sind damit nicht mehr ganz so stark ausgeprägt.

Durch den Einsatz einer Flüssigmetall-Umlaufkühlung wurde eine weitere Steigerung der Gießgeschwindigkeit, sowie eine Verbesserung der Gefügequalität durch sich stabilisierende Wärmeabfuhrverhältnisse erwartet. Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch, dass sich die Temperaturverhältnisse innerhalb der Kokille durch eine gekühlte Flüssigmetallschicht kaum beeinflussen lassen.

Um die höhere Wärmeabfuhr an der Unterseite der Kokille im Vergleich zur Oberseite gezielt zu reduzieren, werden die Auswirkungen eines Kokillen-Kühler-Aufbaus mit einer Kokillenplatte mit niedrigerer Wärmeleitfähigkeit an der Unterseite der Kokille untersucht. Das Temperaturniveau der Unterplatte soll dadurch angehoben werden. Die Auswirkungen erstrecken sich jedoch vor allem auf den mittleren Teil der Kokille. Da dort Keimbildung und Randschalenbildung bereits abgeschlossen sind, kann durch diese Aufbauvariante die Lage der thermischen Mitte nicht verändert werden.

Dasselbe Bild ergibt sich durch den Einsatz eines Kokillen-Kühler-Aufbaus bei dem die Flüssigmetall-Schichtstärke an der Unterseite im Vergleich zur Oberseite erhöht ist. Hiermit sollen ebenfalls die Temperaturen an der Unterseite der Kokille angehoben werden. Durch die Veränderung des Aufbaus kann jedoch ebenfalls nur der Mittelbereich der Kokille beeinflusst werden.

Durch einen neuartigen Ansatz gelingt es, die Lage der thermischen Mitte zu verschieben. Bei allen vorausgegangenen Versuchen ergibt die Auswertung der Kokillentemperaturen im Einlaufbereich deutlich höhere Temperaturen an der Oberseite der Kokille. Diese Auswirkung einer Konvektionsbewegung in der Schmelze soll ausgeglichen und die Kokillentemperaturen von Ober- und Unterseite einander angenähert werden. Im Versuchsaufbau wird dazu die untere Kühlfläche an der Kokille verkleinert und der Kühler in Gießrichtung verschoben. Wie erwartet steigen durch diese Maßnahme die Kokillentemperaturen an der Unterseite der Kokille deutlich an. Die damit verbundene Verschiebung des Erstarrungsbeginns ermöglicht eine Verlagerung der thermischen in die geometrische Mitte. Als unerwünschter Nebeneffekt verändern sich jedoch die Korngrößen unterhalb der thermischen Mitte.

Erst durch den Aufbau mit verschobener Kühlzone, kombiniert mit unterschiedlich starken Flüssigmetallschichten, ist es möglich, die Temperaturen an Ober- und Unterseite im Einlaufbereich aneinander anzupassen. Durch das spätere Einsetzen der Kühlwirkung an der Unterseite und die ähnlichen Wärmeabfuhrverhältnisse oben und unten lässt sich die thermische Mitte in die geometrische Mitte des Bandes

verschieben. Zudem können bei diesem Versuchsaufbau die Korngrößenunterschiede zwischen der Ober- und Unterhälfte deutlich verringert werden. Durch diese Maßnahmen wird die Qualität des Vorproduktes wesentlich verbessert. Schwierigkeiten in den weiterverarbeitenden Stufen sowie Ausschuss durch Materialversagen aufgrund schlechter Vormaterialqualität können verringert werden.

Abbildung 48 zeigt abschließend die Temperaturprofile aller unterschiedlichen Aufbauvarianten in der unteren Kokillenplatte. Die dargestellten Temperaturmesswerte sind die stationären Werte aus allen Versuchen bei einer Gießgeschwindigkeit von 120 %.

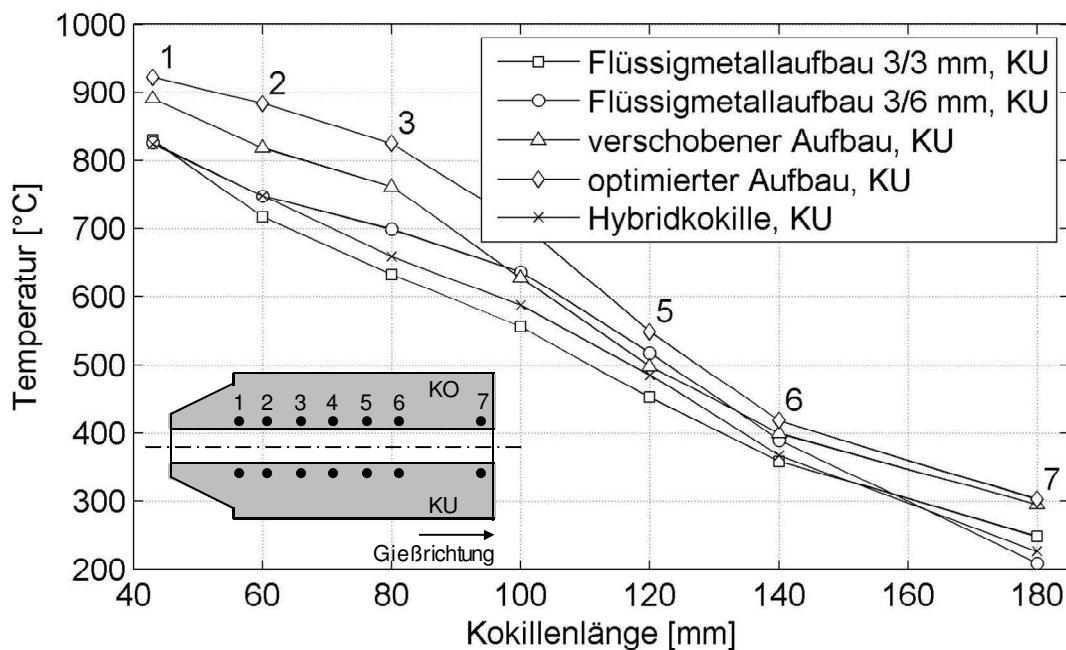


Abbildung 48: Temperaturverläufe an der Unterseite der Kokille, alle Aufbauvarianten, Bandformat, Gießgeschwindigkeit 120 %

Das Diagramm zeigt, dass die Temperaturen an der Unterseite der Kokille ausgehend vom Referenzversuch mit ruhendem Flüssigmetall 3/3 mm bei allen Aufbauvarianten ansteigen.

Durch eine Verschlechterung der Wärmeabfuhr aus der Kokille an der Unterseite (siehe Hybridkokille, KU und Flüssigmetallaufbau 3/6 mm, KU) erhöht sich das

Temperaturniveau. Die beiden Versuchsaufbauten verhalten sich jedoch unterschiedlich. Durch die Erhöhung der Flüssigmetall-Schichtstärke wird mehr Wärme in der Kokille gestaut als durch den Einsatz des Kokillenmaterials mit verminderter Wärmeleitfähigkeit.

Durch den konstruktiven Aufbau mit verschobenem Kühler steigen die Temperaturen an der Unterseite im Einlaufbereich sehr stark an. Im Falle des verschobenen optimierten Aufbaus liegen die Temperaturen in den ersten 80 mm der Kokille maximal ca. 200 °C über den Werten des reinen Flüssigmetallaufbaus. Anschließend ist auch hier aufgrund des Einsatzes von Flüssigmetall ein sehr großer Wärmeentzug aus der Kokille möglich.

9 Versuchsergebnisse Rundformat

In mittelständischen Betrieben hat sich das horizontale Stranggießen von Kupferwerkstoffen vor allem aufgrund seiner hohen Flexibilität bezüglich verschiedener Legierungen sowie unzähliger Formate etabliert. Basisformate sind dabei das Band- und das Rundformat. Aus diesem Grund beschäftigt sich die zweite Hauptversuchsreihe nach den Versuchen zum Bandformat mit einem Rundformat als Vollstange (Durchmesser 40 mm).

Die Versuchsdurchführung erfolgt analog zum Bandformat auf der utg-Stranggießanlage. Da auf der Anlage in der Vergangenheit überwiegend Versuche mit Bandformat durchgeführt wurden, musste die Anlage für die Versuche mit dem Rundprofil umgebaut werden. Die Konzipierung, Konstruktion und Fertigung der notwendigen Komponenten zur Anpassung der Anlage erfolgte vor den Versuchsreihen in Zusammenarbeit mit Industriepartnern. Die Steuerung der Stranggießanlage sowie die Abzieheinheit wurden auf das Rundformat adaptiert.

9.1 Referenzversuch konventioneller Aufbau

Um grundlegende Erfahrungen zu sammeln und eine Referenz für nachfolgende Versuche zu bilden, wird zunächst, dem Bandformat entsprechend, ein konventioneller Versuchsaufbau gewählt. Gemäß dem industriellen Stand der Technik wird die Kokille dabei in den Kühler eingeschrumpft. Die Schrumpftemperatur sowie das nötige Übermaß der Kokille wurden seitens der Industriepartner berechnet und auf Grundlage industrieller Erfahrungen ausgelegt.

Im Versuch selbst werden die optimalen Prozessparameter ermittelt, die für einen sicheren, stabilen Gießprozess erforderlich sind. Das Hauptaugenmerk liegt auch hier auf der Bandaustrittstemperatur, die die maximal erzielbare Gießgeschwindigkeit vorwiegend bestimmt. Für die weiteren Versuche wird für das Rundformat die mit dem konventionellen Aufbau maximal erreichbare Gießgeschwindigkeit zu 100 % Gießgeschwindigkeit festgelegt.

Zur Analyse des Wärmehaushaltes wird die Kokille mit Thermoelementen instrumentiert. Diese werden an der Oberseite, der Unterseite sowie seitlich an der Kokille angebracht. Die Positionierung erfolgt durch axiale Bohrungen in der Kokille (siehe Kapitel 7.4). Aufgrund der großen Bohrtiefe über der Länge der Kokille und eines möglichen Verlaufs des dünnen Bohrers beträgt der Abstand zwischen dem Bohrungsmittelpunkt und der Kokilleninnenseite aus Sicherheitsgründen 10 mm.

Der in Gießrichtung erste Temperaturmesspunkt liegt 45 mm nach dem Einlauf der Kokille und damit 5 mm hinter Beginn der aktiven Kühlzone. Im Abstand von 15 und 45 mm folgen pro Bohrung zwei weitere Messstellen. Abbildung 49 zeigt beispielhaft ein Temperaturprofil über der Länge der Kokille im stationären Gießbetrieb. Dargestellt sind die Temperaturen an Ober- und Unterseite eines konventionellen Aufbaus bei 73 % der maximalen Gießgeschwindigkeit. Die Temperaturbewertung aller nachfolgenden Kokillen-Kühler-Aufbauvarianten erfolgt ebenfalls bei 73 % Gießgeschwindigkeit, da die beim konventionellen Aufbau definierte Gießgeschwindigkeit von 100 % nicht bei allen Varianten des Rundformats erreicht werden kann.)

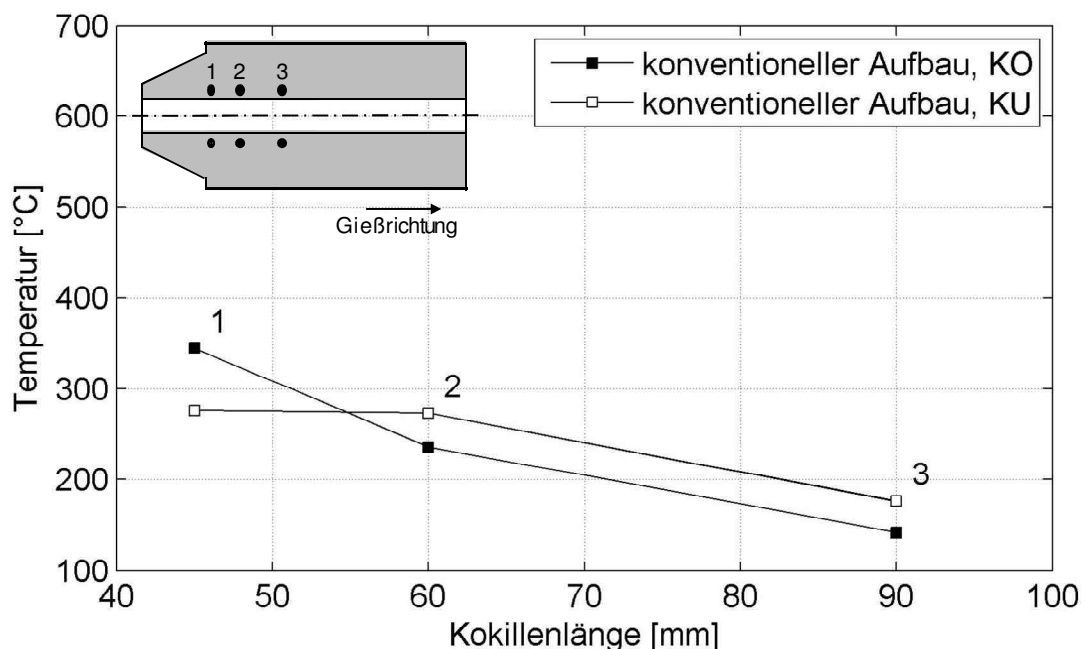


Abbildung 49: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %

Die Temperaturen liegen 45 mm hinter dem Einlauf bei ca. 310 °C und fallen bei einer Kokillenlänge von 90 mm auf Werte um 160 °C ab. Die Messwerte des Rundformates liegen aufgrund des wesentlich größeren Abstandes der Messpunkte zur Schmelze sowie des deutlich kleineren Strangquerschnittes (weniger zugeführte Wärmeenergie) signifikant unter denen des Bandformates. Abgesehen von der Höhe der Werte ergibt sich beim Rundformat bei der Temperaturverteilung innerhalb der Kokille ein ähnliches Bild wie beim Bandformat. Bedingt durch Konvektionsvorgänge innerhalb der Schmelze aufgrund der instabilen Temperaturschichtung in der Oberhälfte der Kokille (vgl. Bandformat), stellen sich an der Oberseite der Kokille höhere Temperaturen im Vergleich zur Unterseite ein. Die Erstarrung wird dort im Einlaufbereich verzögert. Bis zu einer Kokillenlänge von 55 mm baut sich die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite wieder ab und die Temperaturprofile von Ober- und Unterseite überkreuzen sich. An diesem Punkt der Kokille ist davon auszugehen, dass die Randschalenbildung abgeschlossen ist. Aufgrund der Erstarrungskontraktion hat sich die Randschale des Stranges von der Kokille abgelöst. Der dabei entstehende Luftspalt zwischen Strang und Kokille tritt, entsprechend der Schwerkraft, verstärkt an der Oberseite der Kokille auf. Nach der Bildung des Luftspaltes wird die Wärmeabfuhr aus dem Strang an der Oberseite reduziert. An der Unterseite stellen sich im Vergleich höhere Temperaturen ein.

Zur Beurteilung der Stranggussqualität werden Schliffproben gemäß Kapitel 7.5 aus dem Strang entnommen. Abbildung 50 zeigt exemplarisch einen Querschliff des gegossenen Rundbolzens. Ein im Vergleich zur Oberseite in Gießrichtung früher einsetzender Erstarrungsbeginn sowie die verstärkte Wärmeabfuhr an der Unterseite sorgen für eine deutliche Verschiebung der thermischen Mitte in die Oberhälfte des Stranges. Diese beträgt bei einem Strangdurchmesser von 38,2 mm durchschnittlich 3,1 mm.

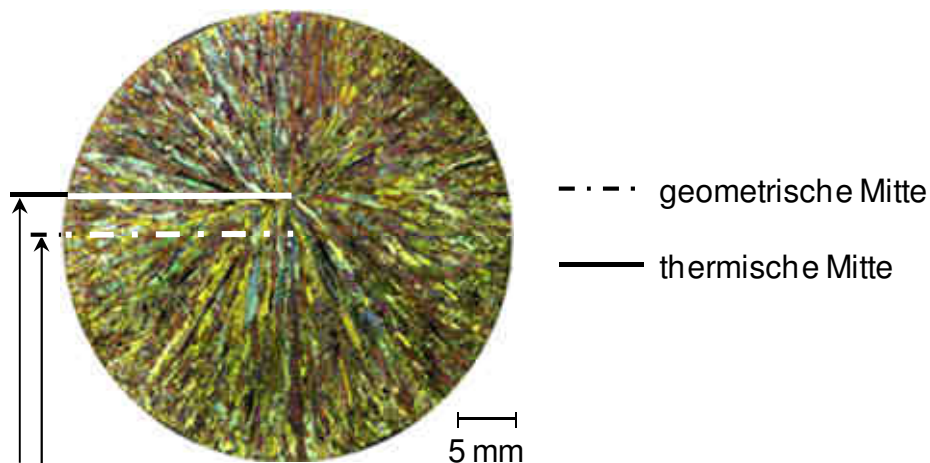


Abbildung 50: Querschliff, Aufbau konventionell, Gießgeschwindigkeit 73 %

Die Korngrößenverteilung gestaltet sich dementsprechend über dem Querschnitt. Außen bildet sich zunächst eine sehr feine Randschale aus. Sie resultiert aus der initialen starken Unterkühlung beim Auftreffen der Schmelze auf die kalte Kokillwand. Nach Ausbildung dieser Randschale ist die Wärmeabfuhr in radialer Richtung behindert. Der Effekt verstärkt sich zusätzlich, wenn die Randschale genügend Stabilität ausgebildet hat, um entgegen des metallostatistischen Druckes von der Kokille abzuschumpfen. Auf die feine Randschale folgt in der unteren Hälfte des Schliffbildes ein relativ grobes, stängeliges Gefüge bis zur thermischen Mitte des Stranges. Aufgrund der instabileren Erstarrungsverhältnisse sowie der Konvektion der Schmelze bilden sich in der oberen Hälfte analog zum Bandformat feinkörnigere Strukturen aus.

9.2 Kokillen-Kühler-Aufbau mit Flüssigmetall

Im Folgenden werden die Einsatzmöglichkeiten des Flüssigmetall-Konzepts beim Rundformat untersucht.

Aufgrund der Schrumpfpassung zwischen Kokille und Kühler bei einem konventionellen Aufbau ist der Wärmeübergang beim Rundformat im Vergleich zum geklemmten Aufbau des Bandformates deutlich größer, die Wärmeabfuhr damit besser. Aus Gesprächen mit Experten ging jedoch hervor, dass auch hier instationäre Vorgänge wie z.B. das Kokillatmen zu erwarten sind, die den Wärmeübergang während des

Gießprozesses verändern bzw. beeinträchtigen. Durch das Einbringen der Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler könnten mögliche Relativbewegungen sowie das Auftreten eines Luftspaltes unterbunden bzw. kompensiert werden. Es wird erwartet, dass sich die Gießgeschwindigkeit analog zum Bandformat durch eine gesteigerte Wärmeabfuhr erhöhen lässt.

Um einen Hohlraum für das Flüssigmetall zwischen Kokille und Kühler zu schaffen, wird in die Kokille eine Tasche gedreht. Die Schrumpfpassung und Abdichtung erfolgt jeweils über einen Steg am Anfang und am Ende der Kokille (siehe Abbildung 51). Der dazwischen liegende Hohlraum ist während des Gießbetriebes mit Flüssigmetall gefüllt. Die Höhe der Schicht beträgt 6 mm. Ausgleichsbehälter (nicht dargestellt) sorgen für eine optimale Füllung der Tasche.

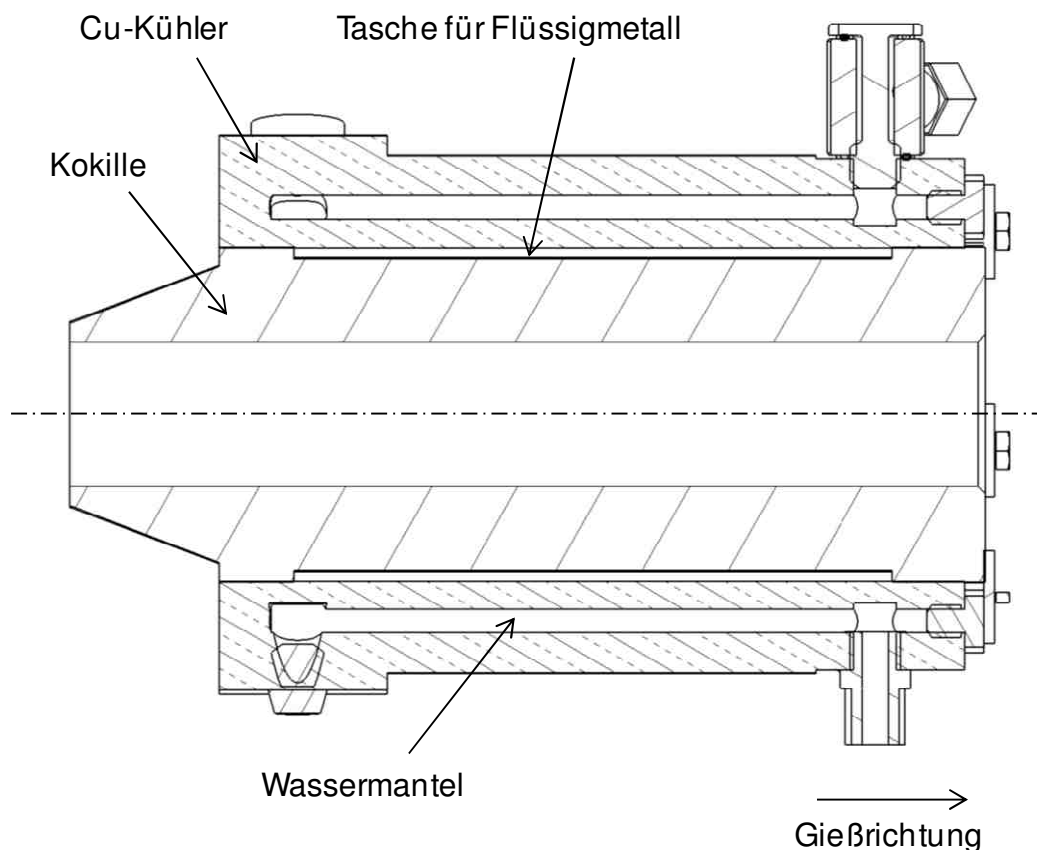


Abbildung 51: Schnittbild des Kokillen-Kühler-Aufbaus mit Flüssigmetallschicht, Rundformat

Die Versuchsdurchführung zeigt, dass der Einsatz der Flüssigmetallkühlung beim Rundformat keine Steigerung der Produktivität ermöglicht. Im Vergleich zum konventionellen Aufbau mit einer eingeschrumpften Kokille muss die Gießgeschwindigkeit sogar reduziert werden.

Anhand der Temperaturmessdaten aus der Kokille lässt sich dies wie folgt erklären:

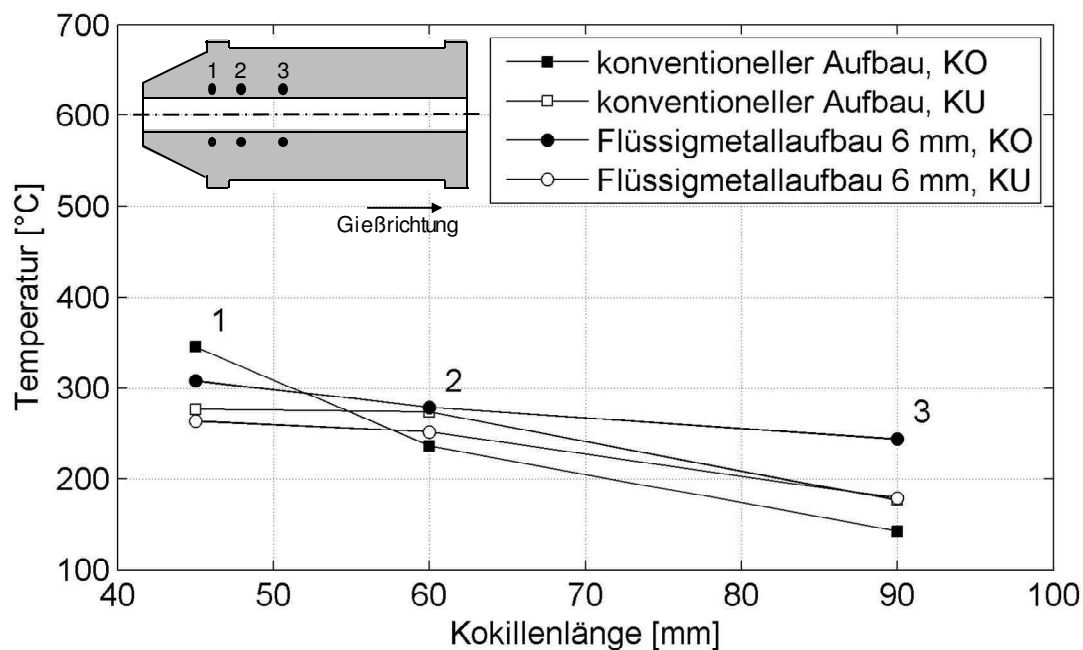


Abbildung 52: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 6 mm und konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %

Beim Kokillen-Kühler-Aufbau für das Bandformat äußerte sich der Einsatz der zusätzlichen Flüssigmetallkühlung in einem im Vergleich zum konventionellen Aufbau deutlich steileren Abfall der Temperaturen über der Länge der Kokille. Zusätzlich lagen die Temperaturprofile von Ober- und Unterplatte bei Verwendung des Flüssigmetalls, abgesehen von den ersten 80 mm, über der gesamten Länge der Kokille um durchgehend 200 °C niedriger.

Bei Betrachtung des Diagrammes (Abbildung 52) zeigt sich ein anderes Bild. Die Kokilleneinlauftemperaturen liegen zwar auf der einen Seite etwa auf dem Niveau

des konventionellen Aufbaus. Über der Länge der Kokille verläuft die Steigung der Temperaturprofile an Ober- und Unterseite allerdings flacher, was eine insgesamt schlechtere Kühlung der Kokille bedeutet. Bei einer Kokillenlänge von 90 mm liegen die Temperaturen an der Oberseite der Kokille bereits 110 °C über denen des konventionellen Aufbaus. Dies bestätigen die Bandaustrittstemperaturen, die bei gleicher Gießgeschwindigkeit mit im Mittel 590 °C rund 100 °C über denen des konventionellen Aufbaus liegen. Darüber hinaus können die 100 % Gießgeschwindigkeit des konventionellen Aufbaus aufgrund der hohen Bandaustrittstemperaturen nicht erreicht werden.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass die gemessenen Temperaturen an der Oberseite an allen Messstellen mit zusätzlicher Flüssigmetallschicht mindestens 30 °C über denen der Unterseite liegen, und nicht wie beim konventionellen Aufbau nur an der in Gießrichtung ersten Messstelle. Als Ursache dafür wird eine Konvektionsbewegung in der Flüssigmetallschicht vermutet, die das wärmere Flüssigmetall der Unterseite in der gesamten Tasche in die obere Hälfte leitet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler beim konventionellen Aufbau des Rundformates im Vergleich zum Bandformat deutlich besser ist. Während der Kühler beim Bandformat nur über eine Schraubverbindung auf die Kokille gespannt wird, steigert die Schrumpfpassung des Rundformates den Wärmestrom an den Kühler deutlich. Während des Gießbetriebes verbessert sich die Passung zusätzlich, da der Graphit eine höhere Wärmedehnung im Vergleich zum Kupferkühler aufweist.

Im Schliffbild (Abbildung 53) ist, ähnlich wie beim Referenzversuch, eine sehr feinkörnige Randzone zu erkennen. Diese resultiert aus ähnlichen Kokilleneinlauf-temperaturen. Ab einer Kokillenlänge von 60 mm übersteigen die Temperaturwerte des Flüssigmetallaufbaus jedoch das Niveau des konventionellen Aufbaus. Durch diese verminderte Wärmeabfuhr bilden sich im Inneren des Strangs deutlich grobkörnigere Gefügestrukturen aus.

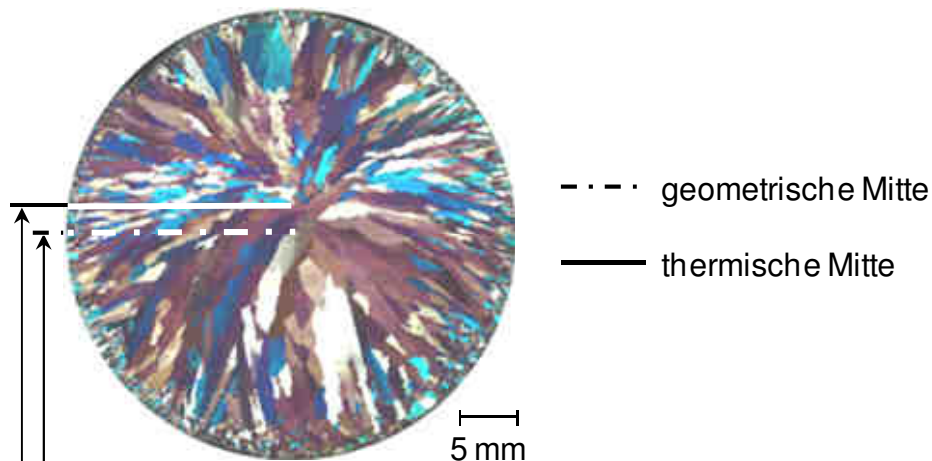


Abbildung 53: Querschliff, Aufbau mit Flüssigmetall, Gießgeschwindigkeit 73 %

Ferner ist durch den Flüssigmetallaufbau eine Einflussnahme auf die Lage der thermischen Mitte nicht möglich. Diese ist in die obere Hälfte des Stranges verschoben. Weiterhin ist wie beim Bandformat eine ausgeprägte Inhomogenität der Korngrößen zwischen der oberen und der unteren Hälfte des Gussproduktes festzustellen.

9.3 Kokillen-Kühler-Aufbau mit Tasche 20 mm

Um die Lage der thermischen Mitte zu verschieben, wird der gleiche Ansatz wie beim Bandformat verfolgt.

Bei einem konventionellen Aufbau zeigen die Temperaturprofile sowohl beim Band- als auch beim Rundformat im Kokilleneinlaufbereich an der Oberseite der Kokille höhere Temperaturen. Diese Auswirkung der Schmelzekonvektion führt dazu, dass die Schmelze in der unteren Hälfte der Kokille in Gießrichtung früher erstarrt als in der Oberhälfte. Durch eine in Gießrichtung später einsetzende Wärmeabfuhr aus der Kokille konnten beim Bandformat die Wärmeabfuhrbedingungen der Unterseite an die der Oberseite angenähert werden. Dadurch war es möglich, die Lage der thermischen Mitte in die geometrische Mitte des Stranges zu verschieben.

Um beim Rundformat den Beginn der Kühlwirkung an der Unterseite der Kokille in Gießrichtung zu verschieben, wird eine Tasche ausgespart (Abbildung 54). In einem

ersten Versuch umfasst der Öffnungswinkel 120° , die Länge der Tasche beträgt 20 mm und die Tiefe 1 mm.

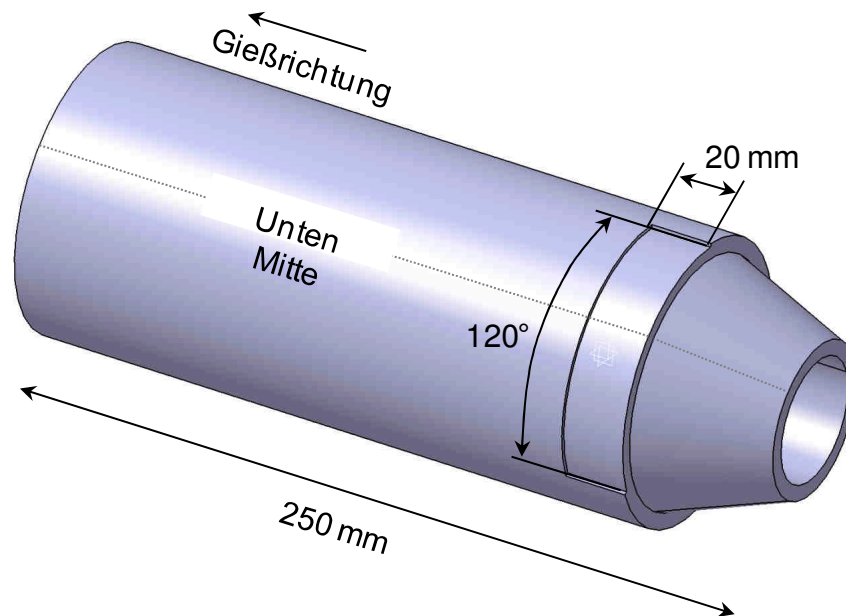


Abbildung 54: Rundkokille mit ausgefräster Tasche

Durch den entstehenden Luftspalt zwischen Kokille und Kühler wird der Wärmeübergang so stark verkleinert, dass die Wärmeabfuhr im Bereich der Tasche nicht radial nach außen in Richtung des Kühlwassers erfolgen kann. Radial kann die Wärmeabfuhr in Gießrichtung erst nach der Tasche einsetzen. Da die Kühlfläche der Kokille insgesamt verkleinert wird, werden gegenüber dem konventionellen Aufbau vor allem an der Unterseite deutlich höhere Temperaturen erwartet.

Im Versuchsbetrieb ergeben sich keine Auswirkungen auf die Prozessstabilität, eine Reduktion der maximalen Gießgeschwindigkeit ist trotz der kleineren Kühlfläche nicht erforderlich. Bei der Betrachtung der Temperaturprofile nach dem Versuch ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 55):

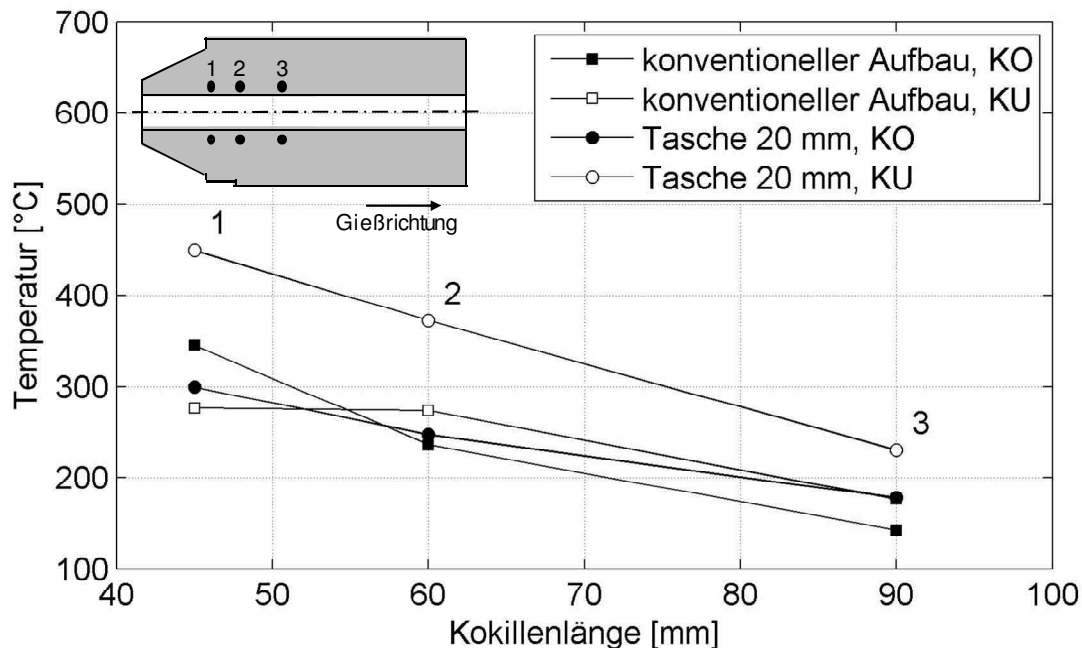


Abbildung 55: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Tasche 20 mm und konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %

Durch die Tasche steigen die Temperaturen der Kokille vor allem im unteren Einlaufbereich stark an und liegen mit 445 °C ca. 170 °C über denen des klassischen Aufbaus. Über der Länge der Kokille bleibt eine ausgeprägte Temperaturdifferenz erhalten.

Durch die Verschiebung des unteren Erstarrungsbeginnes in Gießrichtung ist es wie beim Bandformat möglich, Einfluss auf die Lage der thermischen Mitte zu nehmen und diese in Richtung der geometrischen Mitte zu verschieben. Bei einem Strangdurchmesser von 38,2 mm liegt sie mit der gewählten Taschengröße durchschnittlich etwa 0,6 mm außermittig nach oben verschoben.

Gleichzeitig wird jedoch deutlich, dass die Temperaturunterschiede zwischen Ober- und Unterseite an der in Gießrichtung ersten Messstelle Auswirkungen auf die Gefügebildung haben (siehe Abbildung 56).

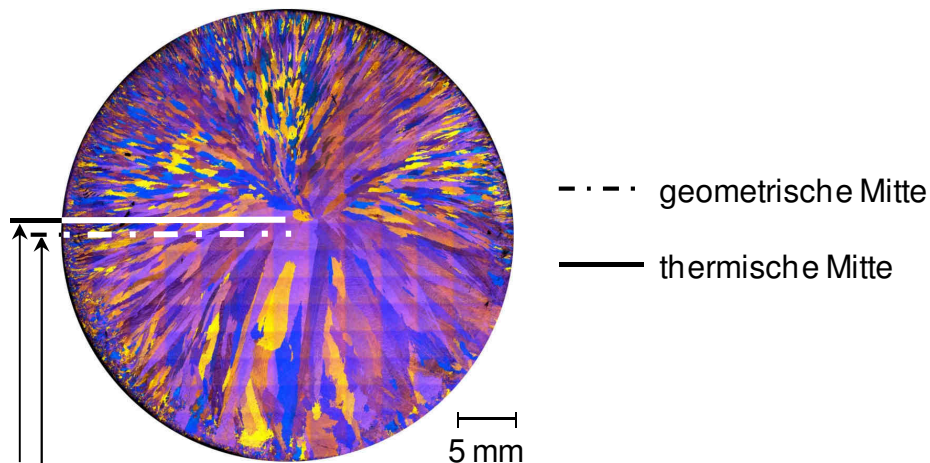


Abbildung 56: Querschliff, Aufbau mit 20 mm Tasche, Gießgeschwindigkeit 73 %

Durch die verschiedenen Kühlbedingungen entsteht ein stark unterschiedliches Gefüge ober- und unterhalb der thermischen Mitte. Die untere Hälfte des Stranges ist durch die verminderte Kühlwirkung im Vergleich zum konventionellen Aufbau deutlich grobkörniger ausgeprägt. Die obere Hälfte ist bedingt durch niedrige Kokillentemperaturen von einem feineren Korn durchzogen.

9.4 Kokillen-Kühler-Aufbau mit Tasche 40 mm

Um den Erstarrungsmittelpunkt der geometrischen Mitte des Bolzens anzunähern, werden die Auswirkungen einer vergrößerten Tasche untersucht. Dazu wird in der nächsten Versuchsreihe die Tasche auf eine Länge von 40 mm erweitert. Durch die Verlängerung sollen die höheren Einlauftemperaturen an der Unterseite der Kokille in Gießrichtung tiefer in die Kokille gezogen werden, um den Erstarrungsbeginn weiter zu verzögern. Abbildung 57 lässt erkennen, dass die Temperaturen an der Unterseite der Kokille bei dieser Aufbauvariante deutlich über das Niveau des konventionellen Aufbaus ansteigen. Das Maximum der Temperaturdifferenz von ca. 330 °C wird an der Einlaufmessstelle bei 45 mm Kokillenlänge erreicht. Im weiteren Verlauf der Kokille schwächt sich der Temperaturunterschied ab. Die Oberseite der Kokille wird durch die konstruktive Veränderung des Kokillen-Kühler-Aufbaus ebenfalls mit beeinflusst, die Temperaturen der Kokille steigen an.

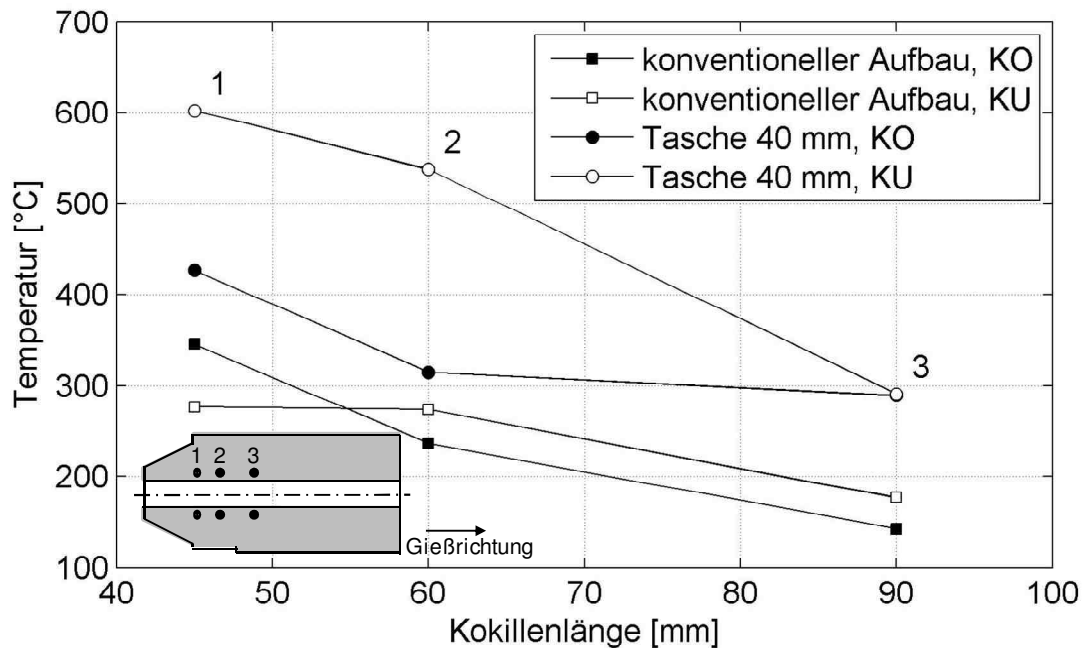


Abbildung 57: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Tasche 40 mm und konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %

Die unterschiedlichen Temperaturprofile der Aufbauvarianten wirken sich auf die Gefügeausbildung aus. Trotz der längeren Tasche kann die Position der geometrischen Mitte mit dieser Aufbauvariante nicht vollständig erreicht werden. Der Erstarrungsmittelpunkt liegt immer noch rund 0,4 mm außermittig. Des Weiteren lässt sich ein ausgeprägter Korngrößenunterschied oberhalb und unterhalb der Mitte feststellen, dessen Ursache in den stark unterschiedlichen Temperaturen der Kokille zu finden ist.

9.5 Kokillen-Kühler-Aufbau mit Tasche 60 mm

Da die thermische Mitte mit der gewählten Taschengröße nicht exakt in die geometrische Mitte verschoben werden konnte, wird ein Versuchsaufbau mit einer deutlich größeren Tasche von 60 mm Länge aufgebaut. Der Öffnungswinkel sowie die Tiefe der Tasche werden von den Vorversuchen übernommen.

Die Auswertung der Temperaturen des Gießversuches zeigt, dass die Werte an der Unterseite über der gesamten Länge der Kokille deutlich ansteigen. Dies ist auf die stark verkleinerte Kühlfläche auf der Unterseite der Kokille zurückzuführen. Die Temperaturen fallen von ca. 650 °C bei der in Gießrichtung ersten Messstelle der Kokille auf 450 °C bei einer Kokillenlänge von 90 mm ab.

Die Temperaturen an der Oberseite steigen ebenfalls stark an. An der Einlauftemperaturmessstelle liegen die Werte mit ca. 430 °C auf einem ähnlichen Niveau wie im vorangegangenen Versuche mit einer 40 mm langen Tasche.

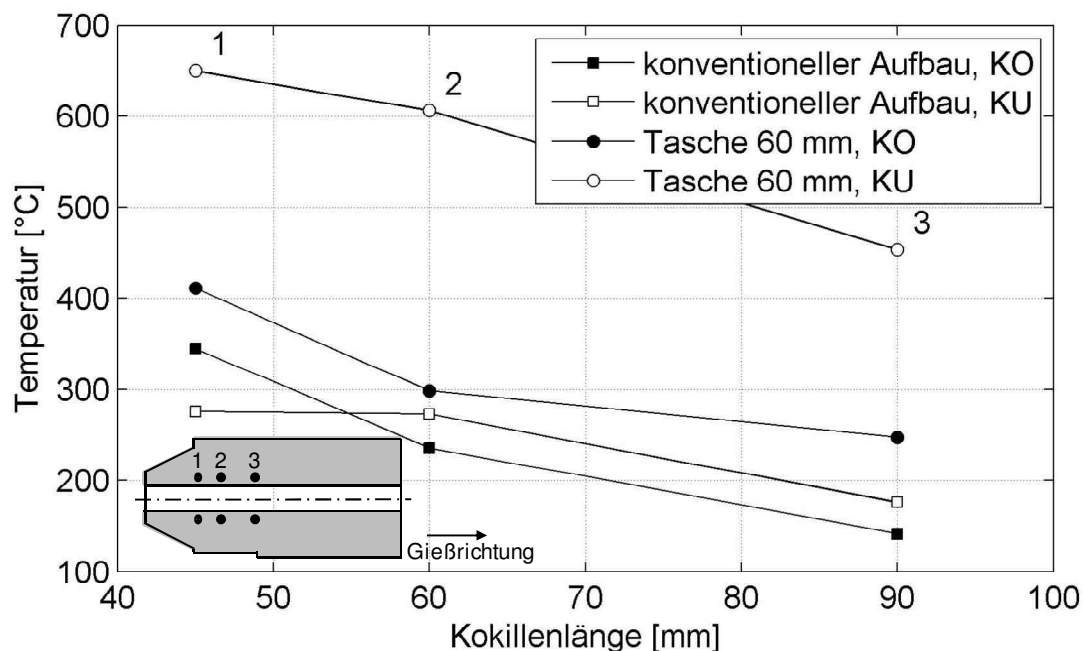


Abbildung 58: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Tasche 60 mm und konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %

Bei der Auswertung der Schliffbilder zeigt sich, dass der Erstarrungsmittelpunkt durch die konstruktive Veränderung des Kokillen-Kühler-Systems weiter beeinflusst werden kann (Abbildung 59). Er befindet sich exakt in der geometrischen Mitte des Rundbolzens. Die durch den konstruktiven Aufbau bedingte, sehr groß ausfallende Temperaturspanne zwischen Ober- und Unterseite der Kokille wirkt sich dabei jedoch negativ auf die Homogenität des Gefüges aus. Während sich die Körnigkeit des

Gefüges an der Oberseite aufgrund ähnlicher Temperaturen verglichen mit den vorangehenden Versuchen kaum verändert hat, ergibt sich in der unteren Hälfte des Stranges mit diesem Aufbau ein nochmals vergrößertes, stängeliges Gefüge, das sich bis in die Mitte des Stranges erstreckt.

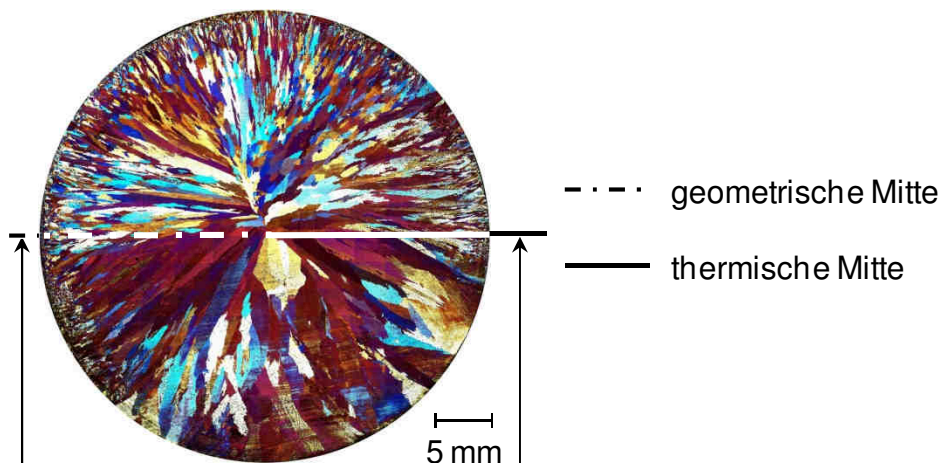


Abbildung 59: Querschliff, Aufbau mit 60 mm Tasche, Gießgeschwindigkeit 73 %

Über dem gesamten Querschnitt des Bolzens betrachtet steigen die Korngrößen also besonders in der unteren Hälfte an. Die Inhomogenität wächst, was eine Weiterverarbeitung erschwert. Trotz einer Reduzierung der Exzentrizität, das heißt dem Verhältnis der Lage der thermischen zur geometrischen Mitte, verschlechtert sich insgesamt die Qualität des Bolzens.

9.6 Optimierung des Kokillen-Kühler-Aufbaus

Aus den vorangegangenen Versuchen lässt sich folgern, dass beim Rundformat ein Kompromiss zwischen der Gleichmäßigkeit der Korngrößen sowie der Lage der thermischen Mitte gewählt werden muss. Während bei einer kleinen Tasche zur Verschiebung der Randschalenbildung die Position der geometrischen Mitte nicht vollständig erreicht wird, ist durch eine große Tasche die initiale Unterkühlung an der Unterseite stark vermindert. Einerseits kann der Erstarrungsmittelpunkt dadurch in die geometrische Mitte verschoben werden, andererseits werden die Korngrößenunterschiede im Bolzen jedoch zu groß für ein qualitativ hochwertiges Produkt. Aus diesem Grund wird im nächsten Versuchsaufbau wieder eine Kokille mit einer 20 mm

langen Aussparung an der Unterseite verbaut. Um die Korngrößenunterschiede innerhalb des Bolzens zu verkleinern, wird versucht, die Temperaturen an der Oberseite der Kokille zu erhöhen. Zahlreiche Versuche, die Kühlleistung an der Unterseite so zu verändern, dass sich ein symmetrisches Gefüge über dem Strangquerschnitt einstellt, das Gefüge an der Unterseite also feiner wird, waren nicht erfolgreich. Deshalb wird im nächsten Schritt versucht, den Wärmeübergang an der Oberseite der Kokille anzupassen, um ein insgesamt etwas gröberes, aber gleichmäßiges Gefüge zu erreichen.

Im vorliegenden Versuchsaufbau wird dazu die Oberfläche der Kokille an der oberen Außenseite mechanisch bearbeitet. Durch die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit verschlechtert sich der Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler. Während des Gießprozesses kann dadurch weniger Wärmeenergie aus der Kokille abgeführt werden. Die Temperaturen der Kokillenoberseite steigen an.

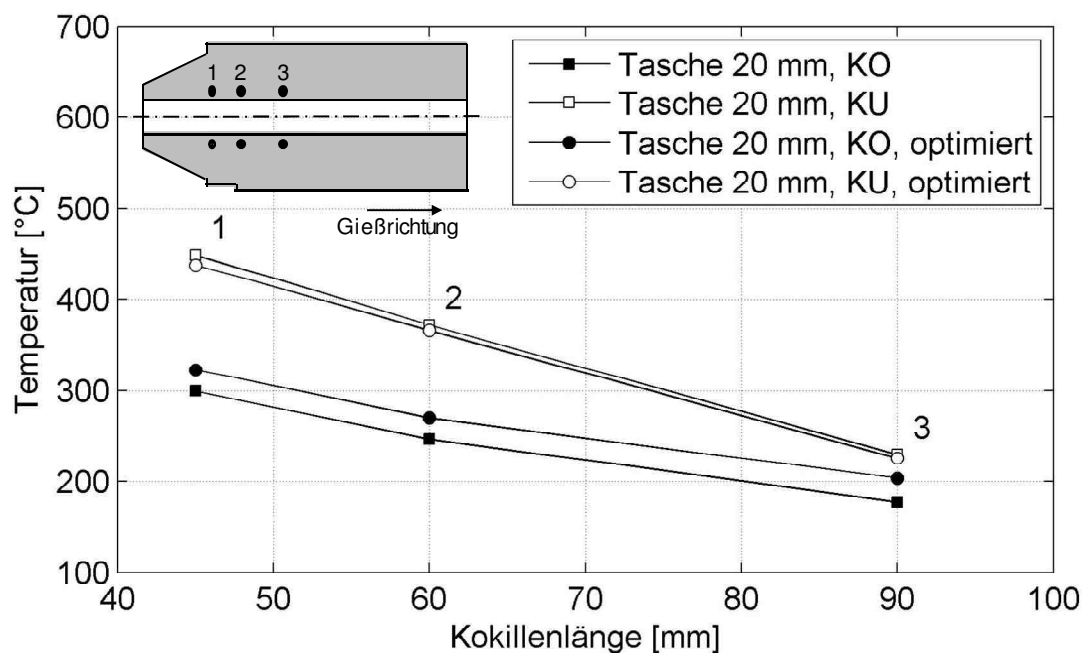


Abbildung 60: Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Tasche 20 mm und Tasche 20 mm, optimiert, Gießgeschwindigkeit 73 %

Wie aus Abbildung 60 hervorgeht, bewirkt die Modifikation des Aufbaus eine Erhöhung der Temperaturen an der Oberseite der Kokille. Im Schnitt liegt das Temperaturprofil etwa 30 °C über den Werten der ersten Versuchsreihe mit einer 20 mm Tasche. An der Unterseite der Kokille verändern sich die Temperaturen hingegen nicht. Sie liegen bei beiden Versuchen auf einem nahezu identischen Niveau.

Durch die Erhöhung der Temperaturen an der Oberseite gleichen sich die Temperaturen von Ober- und Unterseite leicht an. Unter den vorliegenden Bedingungen ist es in diesem Fall möglich, ein sehr gleichmäßiges Gefüge zu erzeugen (siehe Abbildung 61).

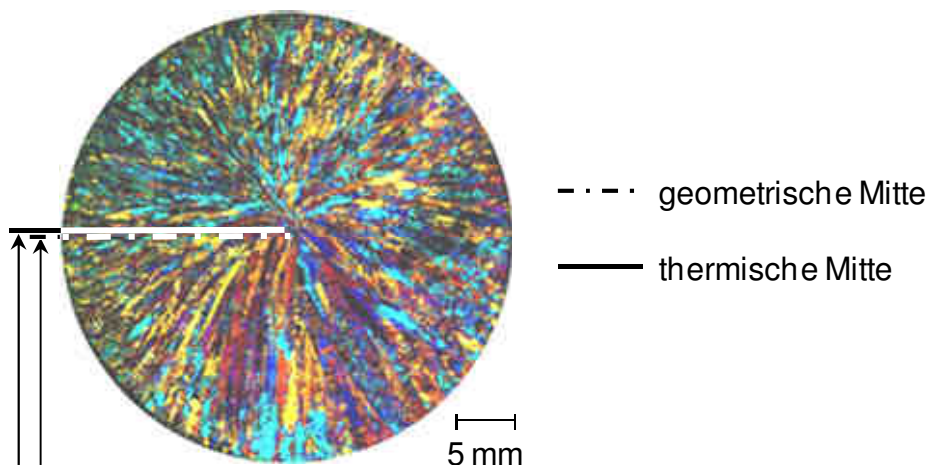


Abbildung 61: Querschliff, Aufbau mit 20 mm Tasche, optimiert, Gießgeschwindigkeit 73 %

Durch den gewählten Aufbau wird das Projektziel erreicht. Wie aus Abbildung 61 hervorgeht, liegt der Erstarrungsmittelpunkt nahezu in der geometrischen Mitte des Bolzens. Im Vergleich zum Ausgangszustand kann die Symmetrie und Homogenität des Gefüges deutlich gesteigert werden.

Es stellt sich heraus, dass es im Falle des Rundformates nicht wie beim Bandformat ausreichend ist, die Temperaturen von Ober- und Unterseite aneinander anzugleichen. Durch den größeren Querschnitt und die damit stärker ausgeprägte Konvektionsbewegung ist es für die vorliegende Geometrie erforderlich, die

Temperaturen an der Unterseite um ca. 115 °C über das Niveau der Oberseite anzuheben.

9.7 Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse Rundformat

In einem Referenzversuch wurde die nach dem Stand der Technik erzeugbare Qualität eines Rundbolzens hinsichtlich der Lage des Erstarrungsmittelpunktes sowie der Korngrößenverteilung über dem Querschnitt ermittelt. Die optimalen Prozessparameter wie z.B. Gießgeschwindigkeit, Daten des Ziehzyklus oder Kühlwasser-Durchflussmengen wurden während des Versuches festgelegt. Die mit diesem konventionellen Aufbau maximal erreichbare Gießgeschwindigkeit wurde zu 100 % Gießgeschwindigkeit für das Rundformat definiert. Die ermittelten Werte werden bei allen nachfolgenden Versuchen konstant gehalten, nur der Parameter Gießgeschwindigkeit wird variiert. Für die Temperatureauswertungen wird eine Gießgeschwindigkeit von 73 % gewählt, da 100 % Gießgeschwindigkeit nicht mit allen Aufbauvarianten erreicht werden kann.

In einer Versuchsreihe werden analog zum Bandformat die Einsatzmöglichkeiten einer zusätzlichen Flüssigmetallkühlung untersucht. Dazu wird an der Außenfläche der Kokille eine Tasche ausgedreht, die als Hohlraum für das Flüssigmetall zwischen Kokille und Kühler dient. Die Dichtung erfolgt über zwei Stege am Anfang und am Ende der Kokille. Über diese Stege wird die Kokille weiterhin in den Kühler eingeschrumpft. Dabei zeigt sich, dass der Einsatz der Flüssigmetallkühlung beim Rundformat nicht zielführend ist. Der Temperaturabfall über der Länge der Kokille ist im Vergleich zum konventionellen Aufbau des Kokillen-Kühler-Paketes deutlich geringer ausgeprägt. Ansteigende Bandaustrittstemperaturen sowie geringere mögliche Gießgeschwindigkeiten deuten auf eine abgeschwächte Wärmeabfuhr aus der Kokille hin. Als Ursache dafür wird der Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler ermittelt. Dieser ist aufgrund der Schrumpfpassung zwischen Kokille und Kühler beim konventionellen Aufbau, im Vergleich zu einer Klemmpassung beim Bandformat, signifikant kleiner. Instationäre Vorgänge wie das Kokillenatmen treten aus diesem Grund beim Rundformat nur beschränkt auf. Aus den genannten

Gründen wird auf weitere Untersuchungen, wie den Einsatz einer Flüssigmetall-Umlaufkühlung, verzichtet.

Zur qualitativen Verbesserung des Gefüges wird der gleiche Ansatz wie beim Bandformat verfolgt. Temperaturmessungen im Referenzversuch zeigen auf, dass am Einlauf der Kokille, ebenso wie beim Bandformat, höhere Temperaturen an der Oberseite der Kokille vorliegen. Es wird angenommen, dass diese zu einem verspäteten Erstarrungsbeginn in der Oberhälfte der Kokille führen. Die zusätzlich durch das bessere Anliegen des Stranges erhöhte Wärmeabfuhr an der Unterseite der Kokille führt zusammen mit dem verfrühten Erstarrungsbeginn zu einem groben, stängeligen Gefüge. Dieses setzt sich bis über die geometrische Mitte des Bolzens zum Erstarrungsmittelpunkt fort.

Um die Lage des Erstarrungsmittelpunktes zu beeinflussen, wird der Erstarrungsbeginn an der Unterseite der Kokille in Gießrichtung verschoben. Zur Erhöhung der Temperaturen der Kokille im Einlaufbereich der Unterseite werden Versuche mit Taschen in der Kokille durchgeführt. Im Bereich dieser Taschen liegt die Kokille nicht am Kühler an. Temperaturmessungen belegen, dass die Temperaturen an der Unterseite durch diese Maßnahme deutlich gesteigert werden können. Durch die Auswertung aus den erzeugten Strängen entnommener Schliffproben kann eine für den vorliegenden konstruktiven Aufbau optimale Taschengröße ermittelt werden. Es zeigt sich jedoch, dass es nicht wie beim Bandformat ausreichend ist, die Temperaturprofile der Kokillober- und Unterseite aneinander anzupassen. Aufgrund der deutlich größeren Höhe des Stranges und einer damit verstärkten Konvektionsbewegung der Schmelze ist es im Falle des Rundformates nötig, die Temperaturen der Unterseite bis zu 240 °C über die der Oberseite anzuheben, um die Lage der thermischen Mitte exakt in die geometrische Mitte zu verschieben. Durch die hohe Temperaturdifferenz ergeben sich jedoch negative Auswirkungen auf die Ausbildung der Kornstrukturen. Die obere Hälfte des Bolzens weist ein sehr feinkörniges Gefüge auf. Unterhalb des Erstarrungsmittelpunktes bilden sich durch die Taschen jedoch sehr grobe, stängelige Strukturen aus, die Schwierigkeiten bei der Weiterverarbeitung mit sich bringen. Die Kornstrukturen fallen dabei mit steigender Taschengröße zunehmend gröber aus. Um ein symmetrisches und

ausreichend feinkörniges Gefüge mit nur geringen Korngrößenunterschieden zu erreichen, ist ein Kompromiss aus der Position der thermischen Mitte und den Korngrößenunterschieden zu wählen. In den Versuchen erweist sich für den vorliegenden Aufbau eine Taschenlänge von 20 mm für einen nahezu mittigen Erstarrungsmittelpunkt als optimal. Alle Maßnahmen, das Gefüge bei dieser Aufbauvariante unterhalb der thermischen Mitte zu verfeinern, sind nicht erfolgreich, weshalb versucht wird, die Kornstrukturen an der Oberseite des Stranges etwas zu vergrößern. Durch einen leichten Gesamtanstieg der Korngrößen kann so ein sehr gleichmäßiges Gefüge erreicht werden. Durch eine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Kokille wird die Schrumpfpassung an der Oberseite der Kokille aus diesem Grund gezielt verschlechtert. Der damit verbundene höhere Wärmeübergangswiderstand zwischen Kokille und Kühler führt zu höheren Temperaturen an der Oberseite. Durch den gewählten Versuchsaufbau ist es ebenso wie beim Bandformat möglich, ein nahezu symmetrisches, homogenes Gefüge über dem gesamten Querschnitt des Bolzens zu erreichen. Dies ermöglicht eine leichtere Weiterverarbeitung der so produzierten Halbzeuge. Der Erstarrungsmittelpunkt als Gefügeschwachstelle befindet sich jetzt in der geometrischen Mitte des Querschnittes. Hier liegt bei weiterverarbeitenden Prozessschritten wie z.B. Biegevorgängen meist die so genannte „Neutrale Faser“, in der keine Kräfte auf den Werkstoff wirken. Der Gefahr von Rissen oder ähnlichen Versagensmechanismen kann so begegnet werden.

Abbildung 62 zeigt abschließend die Temperaturprofile aller vorgestellten Aufbauvarianten an der Unterseite der Kokille. Die dargestellten Temperaturmesswerte sind bei allen Versuchen stationäre Werte bei 73 % Gießgeschwindigkeit.

Dabei lässt sich deutlich erkennen, dass die Temperaturen, ausgehend vom konventionellen Aufbau, an der Unterseite der Kokille mit zunehmender Taschengröße deutlich ansteigen. Dies ermöglicht die beschriebene Verschiebung des Erstarrungsmittelpunktes in die geometrische Mitte.

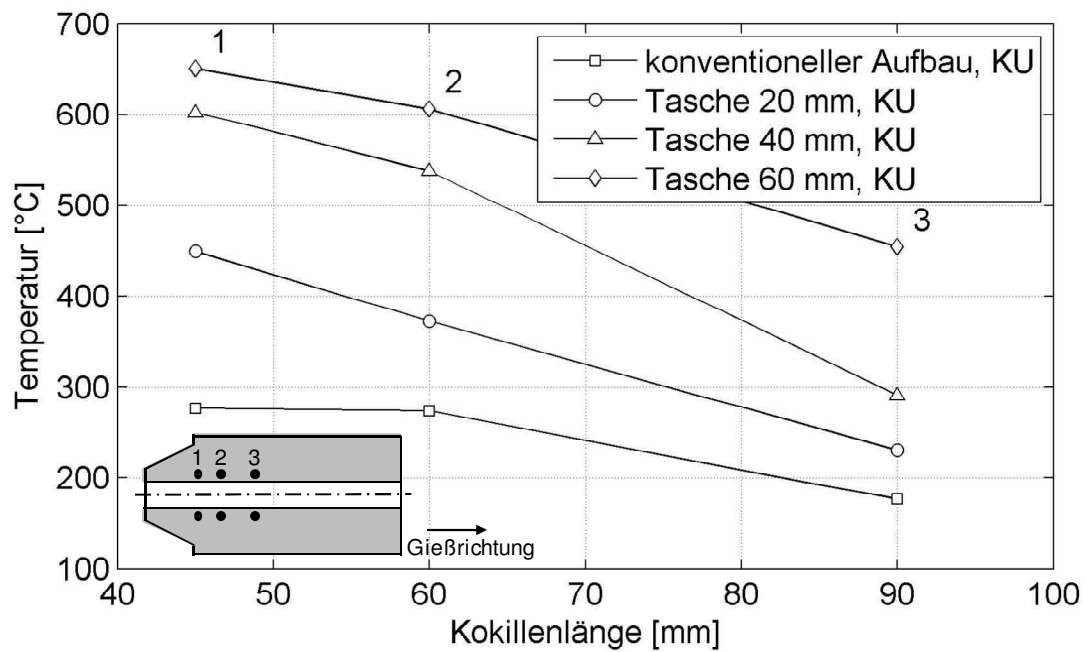


Abbildung 62: Temperaturverläufe an der Unterseite der Kokille, alle Aufbauvarianten, Rundformat, Gießgeschwindigkeit 73 %

10 Industrielle Umsetzung

Nach der erfolgreichen Durchführung der Gießversuche auf der utg-Stranggießanlage wurden Gießversuche im industriellen Maßstab durchgeführt. Die Versuche fanden beim Projektpartner Diehl Metall Messing in Röthenbach statt.

An den Stranggießanlagen bei Diehl Metall werden hauptsächlich Rundformate mit Durchmessern von 280 mm gegossen. Das Legierungsspektrum ist kundenspezifisch breit aufgestellt. Die Weiterverarbeitung erfolgt zumeist durch Strangpressen. Der prinzipielle Aufbau der Gießanlagen ist analog zur Versuchsanlage des utg. Die Kokillen werden mit einem Presssitz in den zylindrischen, wasserdurchströmten Kühler eingesetzt, über den die Wärmeabfuhr aus der Schmelze erfolgt. Das Kokillen-Kühler-System ist an der horizontalen Anlage ofenabhängig verbaut.

Der Übergang vom Stangenformat 40 mm auf 280 mm bedeutet eine Verfünfzigfachung des Gießquerschnittes. Die Herausforderung liegt in der Beherrschung der Konvektion in der Schmelze sowie der Wärmeleitung im Strang, die bei dieser Dimension eine viel stärkere Bedeutung haben als beim kleinen Gießformat. Hinzu kommt, dass für die Abkühlung der Schmelze das Verhältnis von Wärme übertragender Fläche zum Volumen von entscheidender Bedeutung ist. Das Verhältnis von Strangoberfläche zu Strangquerschnitt wird beim großen Querschnitt um den Faktor 7 ungünstiger als beim kleinen Querschnitt. Im Falle eines Gießfehlers können mehrere Tonnen Schmelze auslaufen. Aus diesem Grund wurden die Gießversuche am kleinsten industriellen Gießformat mit einem Durchmesser von 180 mm durchgeführt.

Durch den horizontalen Aufbau von Kokille und Kühler befindet sich die Lage der thermischen Mitte im Gussprodukt nach dem derzeitigen Stand legierungsabhängig stärker oder schwächer ausgeprägt, außermittig nach oben verschoben. Dies führt bei der weiteren Verarbeitung zu Qualitätsverlusten und höheren Ausschussraten.

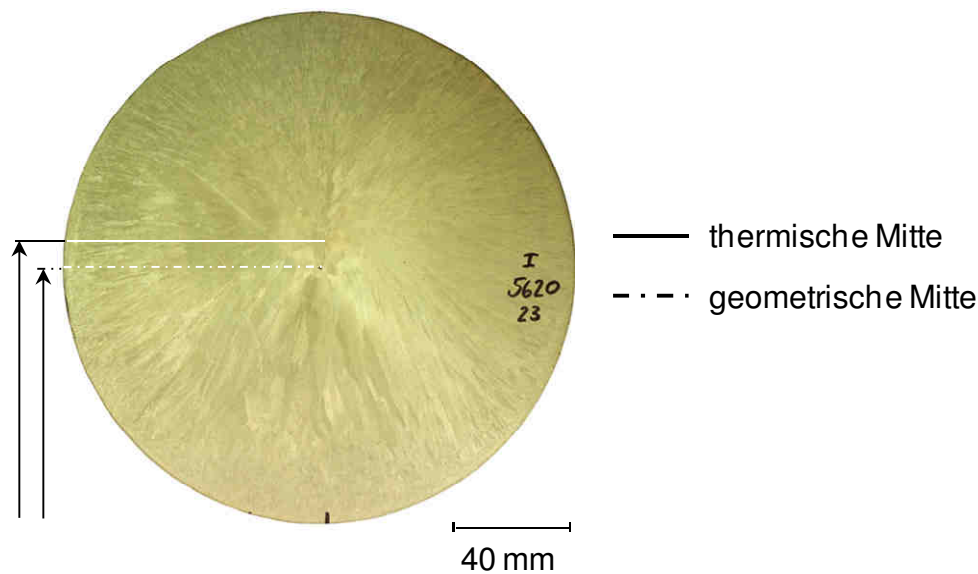


Abbildung 63: Querschliff eines industriellen, horizontal gegossenen Bolzens

Gut zu erkennen ist die außermittige Lage des Erstarrungsmittelpunktes in Abbildung 63. Diese ist über der Länge des Bolzens nicht konstant und verändert sich entsprechend der Erstarrungsbedingungen leicht. Die mittlere Abweichung für den Werkstoff CuZn37 aus dem Referenzversuch aus Versuchskampagne 2 wird zu 100 % Abweichung definiert. Die Kornstrukturen sind analog zum kleinen Gussquerschnitt ausgebildet. Nach einer feinkörnigen Randschicht liegt in der unteren Hälfte des Bolzens ein grobkörniges Gefüge in Form von Stängelkristallen vor. Die obere Hälfte des Querschliffes ist nach der Randschale von deutlich feinkörnigeren Stängelkristallen geprägt.

Versuchskampagne 1:

An der Anlage wird dreisträngig abgezogen. Neben einer konventionellen Kokille, die als Referenz dient, werden die beiden anderen Kokillenaufbauten für die Gießversuche modifiziert. Aufgrund der unbekanntem Erstarrungsverhältnisse beim großen Gießformat fällt die Übertragung der Taschengometrie von der Versuchs- auf die Industrieanlage entsprechend vorsichtig aus.

Die ausgefrästen Taschen, die die Wärmeabfuhr in den Kühler unterbrechen, besitzen beide einen Öffnungswinkel von 60° . Die Länge der ersten Tasche beträgt 30 mm, die der zweiten 60 mm (siehe Abbildung 64).

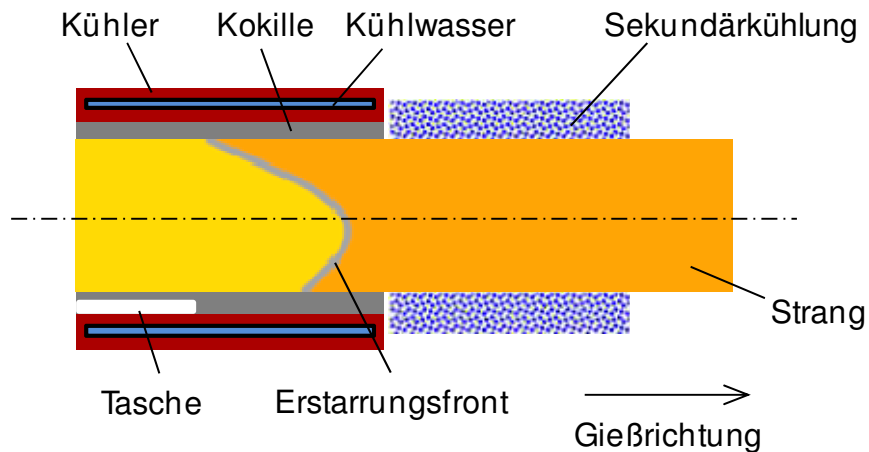


Abbildung 64: Schematischer modifizierter Kokillen-Kühler-Aufbau bei Diehl Metall Messing [RICK11]

Während des Versuchsbetriebs ergeben sich keine Auffälligkeiten. Die Kokillen werden mit verschiedenen Messinglegierungen betrieben. Trotz der verkleinerten Kühlfläche ist keine Reduktion der Gießgeschwindigkeit im Vergleich zum konventionellen Aufbau nötig. Das äußere Erscheinungsbild des Stranges bzw. die Strangoberfläche und die Hubmarken verändern sich ebenfalls nicht.

Nach dem Versuch werden aus den gegossenen Strängen Querschleifproben entnommen. Diese werden metallographisch präpariert, um Veränderungen des Gefüges sowie die Lage des Erstarrungsmittelpunktes zu bestimmen. Die Weiterverarbeitung der Bolzen erfolgt auf der Strangpressanlage der Fa. Diehl. Ausschussraten sowie automatische Vermessungen der Exzentrizität werden im laufenden Betrieb mit dokumentiert und ausgewertet.

Bei der Bewertung der Gefügeeigenschaften lassen sich bei beiden Varianten und allen vergossenen Legierungen keine Veränderungen der Kornstrukturen gegenüber dem Referenzstrang feststellen. Die Position des Erstarrungsmittelpunktes liegt unverändert innerhalb des Toleranzbandes des konventionellen Aufbaus. Auch bei

den Korngrößen ergeben sich durch den modifizierten Aufbau keine Auswirkungen. Es wird vermutet, dass die Taschengröße bei beiden Varianten zu klein ist, um die Wärmeabfuhr aus der Kokille signifikant zu beeinflussen. Aufgrund des großen Querschnittes sind Schmelzeströmungsvorgänge, die Sumpftiefe und der Einfluss der Gravitation beim großen Format deutlich stärker ausgeprägt. Insbesondere der große Querschnitt macht eine deutlich größere Verschiebung der Lage der unteren Hälfte der Erstarrungsfront erforderlich (siehe Kap.: 8.4, Grundgedanke verschobener Aufbau).

Da der Gießbetrieb durch die konstruktiven Veränderungen nicht gestört wurde, wird im nächsten Versuch eine Kokille mit einer deutlich größeren Tasche versehen.

Versuchskampagne 2:

Die Konfiguration der Taschen in den Kokillen beträgt bei der zweiten Versuchsreihe $120^\circ \times 30$ mm sowie $60^\circ \times 200$ mm. Analog zur ersten Versuchsreihe bleibt an einem Strang der Gießanlage der konventionelle Kokillen-Kühler-Aufbau als Referenz bestehen. In den Kokillen werden wiederholt verschiedene Messinglegierungen abgegossen, um ein möglichst breites Spektrum an Versuchen zu erhalten. Während des Gießbetriebes selbst lassen sich keine Veränderungen bzw. Auswirkungen der Taschen erkennen. Auch durch die Tasche mit der großen Länge kann die Gießgeschwindigkeit des konventionellen Aufbaus beibehalten werden, Veränderungen an der Gushaut sind nicht zu erkennen.

Bei der Bewertung der mit der kleinen Tasche gegossenen Stränge wird keine Veränderung in den Kornstrukturen festgestellt. Die Lage der thermischen Mitte sowie die Korngrößen zeigen sich im Vergleich zum normalen Aufbau unverändert. Die Veränderung des Öffnungswinkels von 60° auf 120° zeigt keine Auswirkungen, da die Länge der Tasche zu klein ist.

Die Kokillenvariante mit der langen Tasche zeigt jedoch deutliche Effekte auf den Erstarrungsvorgang. Analog zum kleinen Versuchsformat der utg-Stranggießanlage lässt sich durch die Unterbrechung der Wärmeabfuhr von der Schmelze ins Kühlwasser die Position der thermischen Mitte im Gussprodukt beeinflussen. Durch

das Einfügen der Tasche erhöhen sich die Temperaturen an der Unterseite der Kokille lokal. Der Erstarrungsbeginn wird durch diese Maßnahme in Gießrichtung verschoben. Durch den späteren Beginn der Randschalenbildung und durch die verkleinerte Wärmeübertragungsfläche treffen die Erstarrungsfronten von Ober- und Unterseite des Kokillenrandes bei richtiger Wahl der Taschengröße in der geometrischen Mitte des Bolzens aufeinander (Abbildung 65).

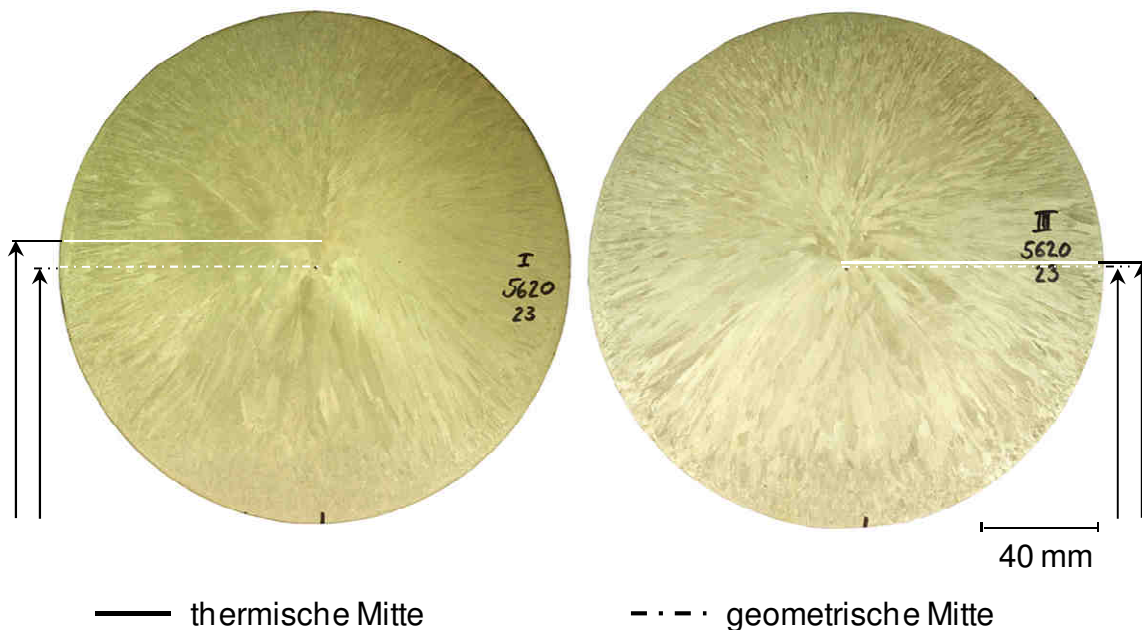


Abbildung 65: Unterschiedliche Lage des Erstarrungsmittelpunktes, links: konventioneller Aufbau von Kokille und Kühler, rechts: modifizierter Aufbau mit Tasche 60° x 200 mm

Bei den durchgeführten Versuchen mit dem Werkstoff CuZn37 verbessert sich die mittlere Abweichung des Erstarrungsmittelpunktes von der geometrischen Mitte um 80 % gegenüber dem Referenzaufbau. Bei der Vermessung der Korngrößen ergeben sich im Gegensatz zu den Versuchen auf der utg-Stranggießanlage keine signifikanten Unterschiede zwischen konventionellem und modifiziertem Aufbau. Da die Wärmeabfuhraten aus der Kokille beim großen Querschnitt deutlich geringer als beim kleinen Format sind, entstehen während der Erstarrung dementsprechend insgesamt deutlich gröber ausgeprägte Strukturen. Bereits beim Referenzversuch mit konventionellem Aufbau unterscheiden sich die Korngrößen ober- und unterhalb des

Erstarrungsmittelpunktes deshalb stark. Während an der Oberseite feinere, stängelige Strukturen entstehen, bilden sich in der unteren Hälfte des Stranges grobkörnige, stängelige Strukturen aus.

Das Ziel, die Lage der thermischen Mitte in die geometrische Mitte zu verschieben, ist damit nahezu erreicht. In anschließenden Untersuchungen werden die Auswirkungen des veränderten Gefüges auf die Weiterverarbeitung ermittelt.

Weiterverarbeitung des Materials:

Die Weiterverarbeitung der gegossenen Bolzen erfolgt auf einer 16 MN-Rohrpresse durch Strangpressen. Nach dem Erwärmen und Laden des Pressbolzens in den Aufnehmer wird der Bolzen über den Pressstempel im Rezipienten aufgestaucht und von einem Rohrdorn gelocht. Im Anschluss erfolgt das Auspressen des Rohres unter Eindringen des Pressstempels in den Rezipienten. Pressrest und Schale werden nach dem Pressen entfernt. [RICK11]

Nach dem Stand der Technik entsteht bei diesem Prozess ein hoher Ausschussanteil durch exzentrische Rohre. Als Ursache für die Exzentrizität wird die außermittige Lage der thermischen Mitte im Pressbolzen diskutiert. Da diese eine Schwachstelle im Gefüge darstellt, ist anzunehmen, dass sich der Rohrdorn während des Lochens des Bolzens am Verlauf der thermischen Mitte über der Länge des Bolzens orientiert. Die Folge ist ein ungleichmäßiges Fließen des Materials.

Nach dem Pressvorgang werden die erzeugten Rohre deshalb mittels eines optischen Systems auf ihre Exzentrizität vermessen. Das Schnittbild der bereits in Einzelteillängen gesägten Rohre wird mittels einer Kamera erfasst und über eine Computersoftware ausgewertet. Neben dem Außen- und dem Innendurchmesser der Rohre wird hierbei auch die lokale Abweichung des Innendurchmessers von der Rohrmitte ermittelt. Zusätzlich zur automatischen Vermessung erfolgt eine manuelle Vermessung der Rohre an den Pressenden, da diese vom automatischen System nicht erfasst werden können.

In der nachfolgenden Abbildung ist der relative Ausschussanteil der Rohre aufgrund von Exzentrizität am Pressende dargestellt (manuelle Vermessung). Die Referenz

stellt dabei immer der Ausschussanteil durch den konventionellen Aufbau dar. Dieser wird zu 100 % definiert.

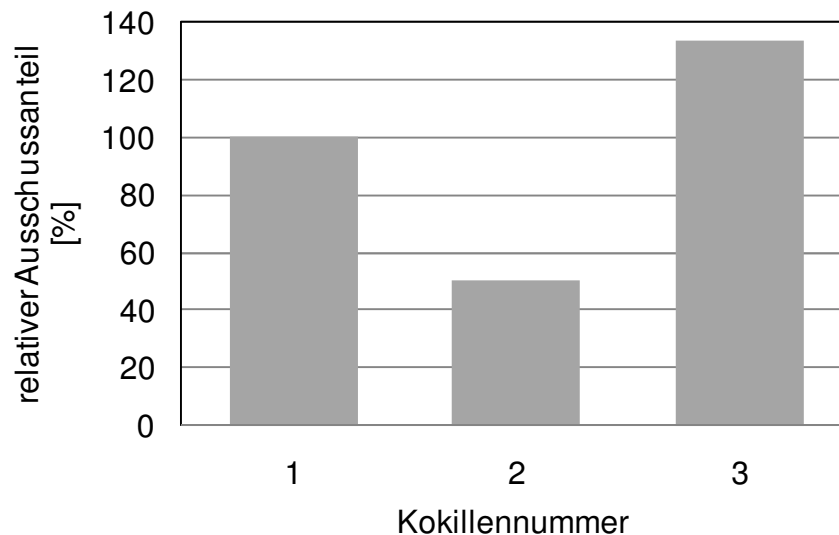


Abbildung 66: Relative Ausschussanteile durch exzentrische Pressenden, Versuchskampagne 2, Kokille 1: konventionell, Kokille 2: Tasche 120° x 30 mm, Kokille 3: 60° x 200 mm [RICK11]

Deutlich zu erkennen ist der hohe Ausschussanteil, der durch Kokille 3 (Tasche 200 mm, 60°) erzeugt wurde. Gegenüber dem konventionellen Aufbau (Kokille 1) kann trotz des zentrischen Erstarrungsmittelpunktes keine Verbesserung erzielt werden. Darüber hinaus fällt weiterhin der große Unterschied zwischen Kokille 1 (konventioneller Aufbau) und Kokille 2 (Tasche 30 mm, Öffnungswinkel 120°) auf. Obwohl sich anhand der Kornstrukturen keine Unterschiede im Gefüge feststellen lassen, liegt die Ausschussrate bei Kokille 2 um 50 % niedriger als bei Kokille 1.

Abbildung 67 stellt den relativen Ausschussanteil beim Pressen aufgrund der automatischen Exzentrizitätsvermessung dar (Referenz konventioneller Aufbau entspricht 100 %). Der Ausschussanteil der zentrischen Stränge (Kokille 3) ist hier im Vergleich zum konventionellen Aufbau (Kokille 1) sowie zu Kokille 2 etwas geringer ausgeprägt.

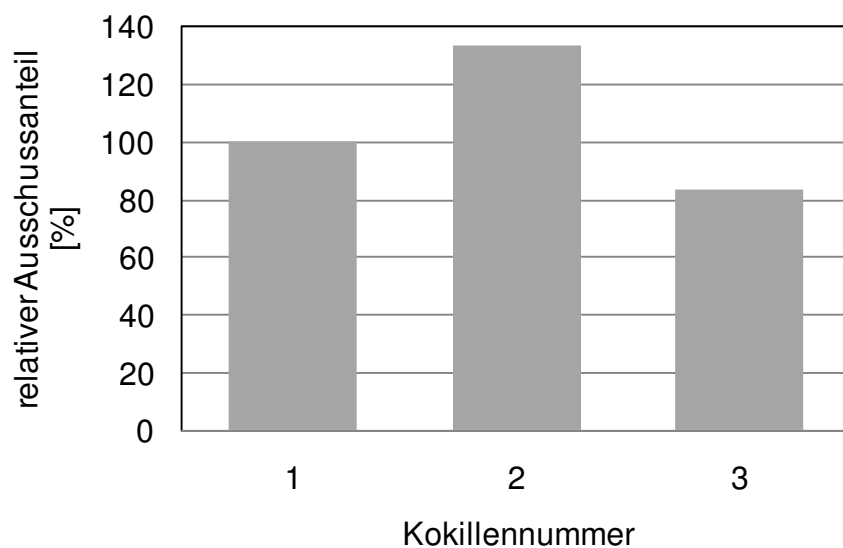


Abbildung 67: *Relative Ausschussanteile durch Exzentrizität, automatische Vermessung, Versuchskampagne 2, Kokille 1: konventionell, Kokille 2: Tasche 120° x 30 mm, Kokille 3: 60° x 200 mm [RICK11]*

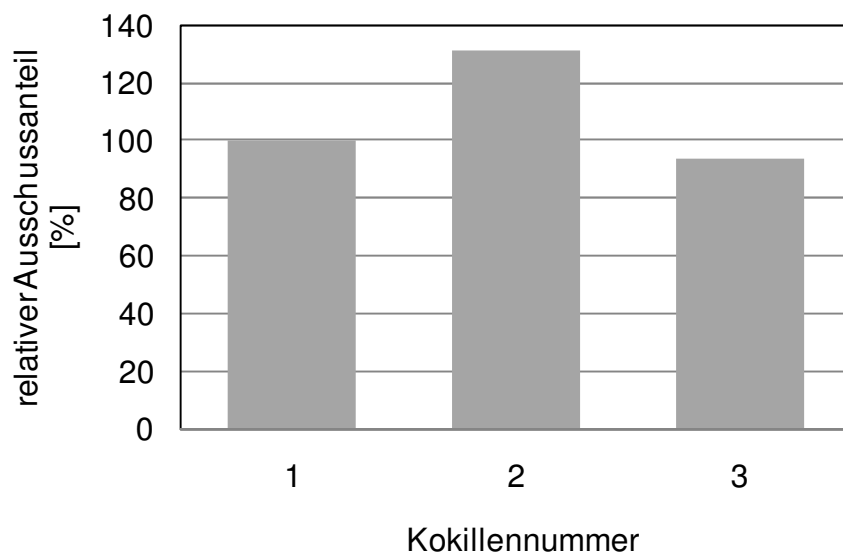


Abbildung 68: *Gesamter relativer Ausschuss Presskampagne durch Exzentrizität, Versuchskampagne 2, Kokille 1: konventionell, Kokille 2: Tasche 120° x 30 mm, Kokille 3: 60° x 200 mm [RICK11]*

Insgesamt betrachtet ist der Ausschuss der Rohre, die aus einem zentrischen Bolzen

gepresst wurden, gegenüber dem Ausschuss der Rohre aus einem konventionell gegossenen Bolzen etwas geringer (Abbildung 68).

Es sind jedoch keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der exzentrischen Lage der thermischen Mitte im Pressbolzen und der Ausschussrate der gepressten Rohre durch Exzentrizität kann demzufolge nicht nachgewiesen werden. Zusammenfassend kann durch die Verschiebung der Position des Erstarrungsmittelpunktes keine Verbesserung der Qualität der gepressten Rohre erreicht werden.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Im mittelständischen Bereich hat sich das horizontale Stranggießverfahren für die Erzeugung von Kupfer-Vorprodukten vor allem durch die große Flexibilität sowie des geringen erforderlichen Invests etabliert. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen des Verfahrens existieren jedoch Nachteile, die die erreichbare Produktqualität einschränken. Durch den Einfluss der Schwerkraft und einer damit verbundenen ungleichmäßigen Wärmeabfuhr während der Erstarrung entsteht ein über dem Produktquerschnitt ungleichmäßiges Gefüge. Die Lage der thermischen Mitte ist, abhängig von den gewählten Prozessparametern, außermittig in die Oberhälfte des Gussstranges verschoben. Zusätzlich unterscheiden sich die Korngrößen ober- und unterhalb der thermischen Mitte. Bei der Weiterverarbeitung kann dies zu Schwierigkeiten im Prozess und zu Qualitätseinbußen der weiterverarbeiteten Produkte führen.

Um diese Qualitätsmängel zu eliminieren, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Kokillen-Kühler-System entwickelt, mit dem eine gegenüber dem Ausgangszustand signifikant verbesserte Produktqualität erreicht werden kann.

Ausgehend von Vorversuchen mit einem konventionellen Aufbau von Kokille und Kühler kommt die in [RICK09] entwickelte Flüssigmetallkühlung zum Einsatz, um den instationären Vorgang des Kokillenatmens während des Gießprozesses bei Bandformaten (150 x 15 mm) zu verhindern. Durch den Einsatz der Wärmekoppelschicht zwischen Kokille und Kühlerplatten kann die Wärmeabfuhr aus der Kokille erhöht werden, die Gießgeschwindigkeit lässt sich um bis zu 60 % steigern. Dabei kann der in der Literatur beschriebene Zusammenhang zwischen der Gießgeschwindigkeit und der Lage der thermischen Mitte bestätigt werden. Je schneller ein Strang gegossen wird, desto mehr nähert sich die Lage der thermischen Mitte der geometrischen Mitte an. Erreicht wird diese jedoch nicht. Die mit diesem Aufbau erreichbare Produktqualität dient als Referenz für alle nachfolgenden Versuche im Bandformat.

In folgenden Versuchsreihen werden Ansätze verfolgt, die Wärmeabfuhr aus der Kokille über dem Querschnitt gleichmäßiger zu gestalten. Da der Strang schwerkraftbedingt an der Unterseite der Kokille besseren Kontakt zur Kokille hat, kann dort mehr Wärme abgeführt werden. Aus diesem Grund soll die Wärmeabfuhr dort reduziert werden. Der Einsatz unterschiedlich hoher Flüssigmetallschichten an Ober- und Unterseite der Kokille stellt sich dabei als ebenso ungeeignet heraus, wie die Kombination von Graphitsorten unterschiedlich hoher Wärmeleitfähigkeit innerhalb einer Hybridkokille. Mit Hilfe von Temperaturmessdaten während dieser Gießversuche kann nachgewiesen werden, dass sich die Auswirkungen während des Gießbetriebes bei beiden Aufbauvarianten vor allem auf den Mittenbereich der Kokille erstrecken. Der Einlaufbereich der Kokille, in dem jedoch die initiale Keimbildung stattfindet, kann dadurch nicht beeinflusst werden. Bei der Bewertung von aus dem Strang entnommenen Schliffproben kann keine Verbesserung der Lage der thermischen Mitte festgestellt werden. Durch die veränderten Wärmeabfuhrbedingungen ergeben sich jedoch ausgeprägte Unterschiede in den Korngrößen ober- und unterhalb der thermischen Mitte.

Die Auswertung der gewonnenen Versuchsdaten ergibt bei allen Aufbauvarianten im Einlaufbereich der Kokille höhere Temperaturwerte an der Kokillenoberseite im Vergleich zur Unterseite der Kokille. Als Ursache wird eine Konvektionsbewegung innerhalb der Schmelze vermutet, die heiße Schmelze aus der Mitte der Kokille an die Oberseite leitet. Daraus resultiert eine früher einsetzende Randschalenbildung an der Unterseite im Vergleich zur Oberseite. Aus diesem Grund wird in den folgenden Versuchsaufbauten der Beginn der aktiven Kühlzone, also die Position der Kühlplatte an der Unterseite der Kokille in Gießrichtung verschoben. Durch diese Maßnahme kann der Temperaturverlauf an der Unterseite im Einlaufbereich angehoben und an die Werte der Oberseite angenähert werden. Die Erstarrung setzt an Ober- und Unterseite der Kokille durch die konstruktive Anpassung gleichzeitig ein, wodurch sich die Lage der thermischen Mitte in die geometrische Mitte des Stranges verschieben lässt. Über den weiteren Verlauf der Kokille steigen die Temperaturen an der Unterseite jedoch deutlich über das Niveau der Oberseite an, so dass in der

unteren Stranghälfte ein im Vergleich zur oberen Hälfte grobkörniges Gefüge entsteht.

Um die Temperaturverläufe an der Ober- und der Unterseite über der gesamten Länge der Kokille aneinander anzupassen, wird der beschriebene Aufbau mit einem Kokillen-Kühler-Aufbau kombiniert, bei dem unterschiedlich hohe Flüssigmetallschichten an Ober- und Unterseite der Kokille vorliegen. Durch diese Maßnahme stellt sich eine homogene Wärmeabfuhr über dem Querschnitt des Stranges ein und es entstehen gleichmäßige Korngrößen. Die Lage der thermischen Mitte liegt in der geometrischen Mitte des Stranges.

Die zweite Hauptversuchsreihe beschäftigt sich mit einem runden Stranggießformat (\varnothing 40 mm). Als Referenz für die nachfolgenden Untersuchungen wird zunächst ein Versuch mit einem geklemmten Aufbau von Kokille und Kühler durchgeführt. Dem Stand der Technik entsprechend wird die Kokille dabei in das wasserdurchströmte Kühlrohr eingeschrumpft. Anschließend werden die Möglichkeiten der zusätzlichen Flüssigmetallkühlung zwischen Kokille und Kühler beim Rundformat untersucht. Dabei kann nachgewiesen werden, dass der Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler durch die Schrumpfpassung, verglichen mit dem Aufbau beim Bandformat, deutlich besser ist. Bei einem Einsatz des Flüssigmetalls beim Rundformat verschlechtert sich der Wärmeübergang gegenüber dem Ausgangszustand, eine Steigerung der Gießgeschwindigkeit ist somit nicht möglich.

Weitere Versuchsreihen beschäftigen sich mit der Verschiebung von Kühlzonen an der Unterseite der Kokille, ähnlich den Versuchen beim Bandformat. Die Verschiebung wird mittels gefräster Taschen in der Kokille umgesetzt, in denen die Kokille nicht am Kühler anliegt. In Einzelversuchen wird der Einfluss verschiedener Taschengrößen auf den Temperaturhaushalt von Kokille und Strang, sowie auf die sich ausbildenden Kornstrukturen untersucht. Durch die Wahl einer geeigneten Taschengröße ist eine Verschiebung der Lage der thermischen Mitte in die geometrische Mitte des Stranges möglich. Dabei ist jedoch mit zunehmender Taschengröße eine ansteigende Vergrößerung der Kornstrukturen in der Unterhälfte des Stranges festzustellen. Um die Korngrößenunterschiede über dem Querschnitt

zu verkleinern, wird in einem zweiten Entwicklungsschritt die Taschengröße wieder verkleinert und zusätzlich der Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler an der Oberseite der Kokille verschlechtert. Durch diese Maßnahmen stellt sich ein insgesamt etwas gröberes, jedoch gleichmäßigeres Gefüge im Strang ein. Die Abweichung zwischen der thermischen Mitte und der geometrischen Mitte ist gering.

Um beim Rundformat ein gleichmäßiges, nahezu symmetrisches Gefüge einzustellen, ist demnach ein Kompromiss zwischen der Abweichung der thermischen von der geometrischen Mitte und den Korngrößenunterschieden über dem Querschnitt erforderlich.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden abschließend Versuche im industriellen Maßstab durchgeführt. Mittels einer geeigneten Tasche an der Unterseite der Kokille können bei einem Rundformat mit einem Durchmesser von 180 mm die Erstarrungsbedingungen dahingehend verändert werden, dass sich die Lage der thermischen Mitte in Richtung der geometrischen Mitte verschiebt. Die Rundbolzen werden auf einer Rohrpresse weiter verarbeitet. Untersucht werden verschiedene Abmessungen von Rohren, sowie verschiedenen Legierungen. Dabei kann jedoch keine eindeutige Verbesserung der Ausschussanteile aufgrund von Exzentrizität beim Pressen von Bolzen mit einem zentrischen Erstarrungsmittelpunkt festgestellt werden. Die außermittige Lage des Erstarrungsmittelpunktes, die als mögliche Ursache für hohe Ausschussraten beim Rohrpressen diskutiert wurde, kann als signifikanter Einfluss auf den Pressvorgang ausgeschlossen werden. In wie weit die unterschiedlichen Korngrößen ober- und unterhalb des Erstarrungsmittelpunktes die Exzentrizität beeinflussen, muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Zur Verlagerung der thermischen Mitte in die geometrische Mitte wurde die erforderliche Verschiebung der Kühlzone an der Unterseite der Kokille in zahlreichen Versuchen für Band- und Rundformat empirisch ermittelt. Das Ziel weiterführender Arbeiten sollte daher sein, mittels einer systematischen Variation von Kühlzonenverschiebungen eine Methodik zu entwickeln, die es erlaubt, die erforderliche Verschiebung in Abhängigkeit des geometrischen Aufbaus von Kokille und Kühler zu bestimmen. Hierfür ist insbesondere beim Bandformat eine Kokillenneukonstruktion

erforderlich, die eine freie Positionierung und Größenbemessung der Flüssigmetallschicht ermöglicht.

Zur konstruktiven Auslegung eines optimierten Kokillen-Kühler-Aufbaus ist die systematische Verbesserung der Simulation notwendig. Die bisher eingesetzte thermische Simulation erlaubt eine vorsichtige Abschätzung des Temperaturhaushalts in der Kokille, kann jedoch in keinem Fall für die Ermittlung realer Temperaturfelder herangezogen werden. Durch die Implementierung einer thermomechanisch gekoppelten Berechnung, die Strömungsvorgänge mit berücksichtigt, muss zunächst der Einfluss von Verzügen in Kokille und Kühler sowie von Konvektionsvorgängen innerhalb der Schmelze abgebildet werden. Durch anschließende Variationsrechnungen könnte im Folgenden die erforderliche Verschiebung der Kühlzone sowie ein angepasster lokaler Wärmeübergang zwischen Kokille und Kühler ermittelt werden, um ein symmetrisches Temperaturfeld innerhalb des Stranges zu erreichen.

12 Verzeichnisse

12.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Längsschnitt durch die Kokillen-Kühler-Baugruppe, konventioneller Aufbau Bandformat [RICK09]	6
Abbildung 2:	Schematischer Längsschnitt durch die Kokillen-Kühler-Baugruppe, konventioneller Aufbau Bandformat [RICK09]	8
Abbildung 3:	Unterschiede der Sumpftiefe ST bei niedrigen (v_{G1}) und hohen Gießgeschwindigkeiten (v_{G2})	9
Abbildung 4:	Veränderung des Gefüges mit steigender Gießgeschwindigkeit [HART89]	12
Abbildung 5:	Ziehzyklus Go-Stop-Back.....	13
Abbildung 6:	Zustandsschaubild Kupfer-Zink [BRUN68].....	15
Abbildung 7:	Einflussfaktoren auf den Wärmefluss vom Ofen in den Kühler	22
Abbildung 8:	Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf die Wärmeabfuhr vom Ofen über die Kokille ins Kühlwasser	24
Abbildung 9:	Versuchsplan	26
Abbildung 10:	Schematischer Aufbau der utg-Stranggießanlage [OECH99]	29
Abbildung 11:	Konventioneller Kokillen-Kühler-Aufbau Bandformat [RICK09]	30
Abbildung 12:	Kokillen-Kühler-Aufbau mit zusätzlicher Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler zur Eliminierung des Kokillenatmens.....	31
Abbildung 13:	Konventioneller Kokillen-Kühler-Aufbau Rundformat	32
Abbildung 14:	Aufbau des Kokillen-Kühler-Systems als FEM-Modell	35
Abbildung 15:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille (KO und KU), Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm Versuch (V) und Simulation (S).....	36
Abbildung 16:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm (Simulation) und Flüssigmetallaufbau 3/5 mm (Simulation)	39

Abbildung 17:	Aufbau mit verschobener Kühlzone an der Unterseite der Kokille als FEM-Modell.....	41
Abbildung 18:	Temperaturverläufe (Simulation) an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und verschobener Aufbau 30 mm	42
Abbildung 19:	Isothermenbilder der Kokillen-Kühler-Aufbauvarianten Flüssigmetallschicht 3/3 mm, Flüssigmetallschicht 3/5 mm und verschobener Aufbau	43
Abbildung 20:	Positionen 1 - 7 der Thermoelemente in der Kokille beim Bandformat	48
Abbildung 21:	Positionen 1 - 3 der Thermoelemente in der Kokille beim Rundformat	49
Abbildung 22:	Konvention der Probenentnahme Bandformat	50
Abbildung 23:	Schematischer konventioneller Aufbau Kokillen-Kühler-Einheit Bandformat [RICK09]	51
Abbildung 24:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, geklemmter Aufbau, Gießgeschwindigkeit 100 %.....	52
Abbildung 25:	Quer- und Längsschliff, konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 100 %.....	54
Abbildung 26:	Kokillen-Kühler-Aufbau 3 mm Flüssigmetall, Bandformat [RIED08]	55
Abbildung 27:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm (Gießgeschwindigkeit 120 %) und geklemmter Aufbau (Gießgeschwindigkeit 100 %).....	56
Abbildung 28:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm, Gießgeschwindigkeit 120 % und 160 %.....	58
Abbildung 29:	Längsschliffe: links: geklemmte Kokille; Mitte: Kokille mit Flüssigmetallschicht 3 mm, Gießgeschwindigkeit 120 %; rechts: Kokille mit Flüssigmetallschicht 3 mm, Gießgeschwindigkeit 160 %.....	59
Abbildung 30:	Kokillen-Kühler-Aufbau 3/6 mm Flüssigmetall, Bandformat [RIED08_1]	61

Abbildung 31:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und Flüssigmetallaufbau 3/6 mm, Gießgeschwindigkeit 120 %	62
Abbildung 32:	Längsschliff, Gießgeschwindigkeit 120 %	63
Abbildung 33:	Schematischer Kreislauf der Flüssigmetall-Umlaufkühlung	64
Abbildung 34:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm statisch und gepumpt, Gießgeschwindigkeit 120 %	65
Abbildung 35:	Längsschliffe Bandformat, Gießgeschwindigkeit 120 %, links FM statisch, rechts FM gepumpt	66
Abbildung 36:	Hybridkokille aus Graphitwerkstoffen mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten	68
Abbildung 37:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und Hybridkokille, Gießgeschwindigkeit 120 %	68
Abbildung 38:	Quer- und Längsschliff, Hybridkokille, Gießgeschwindigkeit 120 %	69
Abbildung 39:	Schliffbild C/SiC-Kokille [WOLB08]	72
Abbildung 40:	Schliffbild beschichtete C/SiC-Tauchproben [WOLB09]	73
Abbildung 41:	Verschiebung der Erstarrungsfront, Bandformat [RIED08_1]	74
Abbildung 42:	Kokillen-Kühler-Aufbau mit verkürzter Kühlzone, Bandformat [RIED08_1]	75
Abbildung 43:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und verschobener Aufbau, Gießgeschwindigkeit 120 %	76
Abbildung 44:	Quer- und Längsschliff, Aufbau mit verschobenem Kühler, 120 % Gießgeschwindigkeit	77
Abbildung 45:	Kokillen-Kühler-Aufbau mit verkürzter Kühlzone, optimiert [HOFF10]	79
Abbildung 46:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 3/3 mm und optimierter Aufbau, Gießgeschwindigkeit 120 %	80
Abbildung 47:	Quer- und Längsschliff, Aufbau mit verschobenem Kühler, optimiert, 120 % Gießgeschwindigkeit	81

Abbildung 48:	Temperaturverläufe an der Unterseite der Kokille, alle Aufbauvarianten, Bandformat, Gießgeschwindigkeit 120 %	84
Abbildung 49:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %	87
Abbildung 50:	Querschliff, Aufbau konventionell, Gießgeschwindigkeit 73 %.....	89
Abbildung 51:	Schnittbild des Kokillen-Kühler-Aufbaus mit Flüssigmetallschicht, Rundformat	90
Abbildung 52:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Flüssigmetallaufbau 6 mm und konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %	91
Abbildung 53:	Querschliff, Aufbau mit Flüssigmetall, Gießgeschwindigkeit 73 %.....	93
Abbildung 54:	Rundkokille mit ausgefräster Tasche	94
Abbildung 55:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Tasche 20 mm und konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %.....	95
Abbildung 56:	Querschliff, Aufbau mit 20 mm Tasche, Gießgeschwindigkeit 73 %.....	96
Abbildung 57:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Tasche 40 mm und konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %.....	97
Abbildung 58:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Tasche 60 mm und konventioneller Aufbau, Gießgeschwindigkeit 73 %.....	98
Abbildung 59:	Querschliff, Aufbau mit 60 mm Tasche, Gießgeschwindigkeit 73 %.....	99
Abbildung 60:	Temperaturverläufe an Ober- und Unterseite der Kokille, Vergleich Tasche 20 mm und Tasche 20 mm, optimiert, Gießgeschwindigkeit 73 %.....	100
Abbildung 61:	Querschliff, Aufbau mit 20 mm Tasche, optimiert, Gießgeschwindigkeit 73 %.....	101
Abbildung 62:	Temperaturverläufe an der Unterseite der Kokille, alle Aufbauvarianten, Rundformat, Gießgeschwindigkeit 73 %	105

Abbildung 63:	Querschliff eines industriellen, horizontal gegossenen Bolzens	107
Abbildung 64:	Schematischer modifizierter Kokillen-Kühler-Aufbau bei Diehl Metall Messing [RICK11].....	108
Abbildung 65:	Unterschiedliche Lage des Erstarrungsmittelpunktes, links: konventioneller Aufbau von Kokille und Kühler, rechts: modifizierter Aufbau mit Tasche 60° x 200 mm.....	110
Abbildung 66:	Relative Ausschussanteile durch exzentrische Pressenden, Versuchskampagne 2, Kokille 1: konventionell, Kokille 2: Tasche 120° x 30 mm, Kokille 3: 60° x 200 mm [RICK11]	112
Abbildung 67:	Relative Ausschussanteile durch Exzentrizität, automatische Vermessung, Versuchskampagne 2, Kokille 1: konventionell, Kokille 2: Tasche 120° x 30 mm, Kokille 3: 60° x 200 mm [RICK11]	113
Abbildung 68:	Gesamter relativer Ausschuss Presskampagne durch Exzentrizität, Versuchskampagne 2, Kokille 1: konventionell, Kokille 2: Tasche 120° x 30 mm, Kokille 3: 60° x 200 mm [RICK11]	113

12.2 Literaturverzeichnis

- [BAFA11] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Persönliche Mitteilung von Hr. S. Stehlmann, 2011
- [BAUM00] Baumgartner, R.:
Bandgießen von Kupfer-Zinn-Knetlegierungen mit thermisch isolierter Kokille
Dissertation, Technische Universität München, Hieronymus, 2000
- [BRAU94] Braun, P.:
Bandgießen von Zinnbronze auf einer Horizontal-Stranggießmaschine
Dissertation, RWTH Aachen, 1994

-
- [BRUN86] Brunnhuber, E.:
Schmelz- und Legierungstechnik von Kupferwerkstoffen
Fachverlag Schiele & Schön GmbH, 1968
- [DIES67] Dies, K.:
Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik
Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1967
- [DKIN07] Deutsches Kupferinstitut:
Kupfer-ZinkLegierungen (Messing und Sondermessing)
DKI-Informationsdruck i.5, 2007
- [DKIN66] Deutsches Kupferinstitut:
Kupfer-Zink-Legierungen
Fachbuch Deutsches Kupferinstitut, 1966
- [DKIN05] Deutsches Kupferinstitut:
Werkstoff-Datenblatt CuZn37, Stand 2005
http://www.kupfer-institut.de/front_frame/pdf/CuZn37.pdf
- [DÖTH10] Döth, B.:
Branchenreport Gießerei-Industrie
IG Metall Vorstand, Wirtschaft, Technologie, Umwelt, Frankfurt am
Main, 2010
- [ENGL61] Engler, S.:
Über den Erstarrungsablauf und die Größe und Aufteilung des
Volumendefizits bei Gußlegierungen
Dissertation, Technischen Hochschule Aachen, 1961
- [ERGA56] Ergang, R.:
Über die Neigung nur teilweise rekristallisierten Alpha-Messings
zum Kornwachstum
Zeitung Metallkunde, Band 47, Heft 6, S. 391 – 396, 1956

- [FISC56] Fischer, E.; Voßkühler, H.:
Das Rekristallisationsdiagramm von Ms63
Zeitung Metallkunde, Band 47, Heft 6, S. 397 – 401, 1956
- [HAAN77] Haanstra, Ir J.; van Panhuys, Ir H.; Smits, J.:
Betriebserfahrungen mit einer vollkontinuierlichen horizontalen
Stranggießanlage zur Herstellung von Pressbolzen aus Messing
Zeitung Metall, 31. Jahrgang, Heft 11, 1977
- [HADD77] Hadden, R.; Indyk, B.:
Heat-transfer characteristics in closed head horizontal continuous
casting
Proceedings of an international conference on solidification, Univer-
sity of Sheffield, S. 250 – 255, 1977
- [HOLZ85] Holz, H.-T.:
Konstruktion einer ofenabhängigen Metallkokille für endabmes-
sungsnahe Gießen von Aluminium-Bändern
Dissertation, Technische Universität München, 1985
- [HART89] Hartmann, D.:
Erstarrung binärer Kupferlegierungen beim horizontalen Stranggie-
ßen in Graphitkokille
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 5, Nr. 158, VDI Verlag, Düsseldorf, 1989
- [HART92_1] Hartmann, D.; Engler, S.:
Erstarrungsverhalten von Cu-Legierungen beim horizontalen
Stranggießen
Teil 1, Metall Nr. 46, S. 129 - 144, 1992
- [HART92_2] Hartmann, D.; Engler, S.:
Erstarrungsverhalten von Cu-Legierungen beim horizontalen
Stranggießen
Teil 2, Metall Nr. 46, S. 333 - 340, 1992

-
- [HERZ69] Herzog, U.; Rönigk, B.; Voßkühler, H.:
Untersuchungen über den Spalt beim Stranggießen von Kupfer
Zeitung Metallkunde, Band 60, Heft 7, 1969
- [HERZ68] Herzog, U.; Rönigk, B.; Voßkühler, H.:
Probleme der Wärmeabfuhr beim Stranggießen von Kupfer
Zeitung Metallkunde, Band 59, Heft 2, 1968
- [HOFF10] Hoffmann H.; Riedel S.; Nerl C.; Wimmer M.:
Stranggießen mit gesteuerter Flüssigmetall-Umlaufkühlung Vortrag
Symposium Stranggießen, Neu-Ulm, 15.- 17.11.2010
- [HOFF10_1] Wolber, P.:
Interner Materialuntersuchungsbericht,
SGL Group, 04/2010
- [KIND95] Kindler, Alois:
Feinkorngraphite: Moderne Werkstoffe und ihre technische Anwendung
Verlag Moderne Industrie, Landsberg am Lech, S. 59, 1995
- [KRAL70] Krall, A. H.; Koch, H. A.:
Neuere Entwicklungen zur Herstellung von Bändern und Profilen
aus Nichteisenmetallen auf horizontal arbeitenden Stranggießanlagen
Giesserei 57, Nr. 9, S. 222 – 226, 1970
- [KRAL83] Krall, A. H.:
Horizontale Stranggießanlagen und die Planung einer geeigneten
Speicher- und Schmelzkapazität bei der Herstellung von NE-Metall-
Halbzeug
Metall, 37. Jahrgang, Heft 5, S. 466 – 471, 1983
- [KRAL85] Krall, A. H.; Koch, H. A.:
Breitbandproduktion aus Kupferlegierungen für Kaltwalzwerke durch
horizontale Stranggießanlagen
Metall, 40. Jahrgang, Heft 8, S. 770 – 774, 1985

-
- [KURZ92] Kurz, W.; Fisher, D.J.:
Fundamentals of Solidification, Third Edition,
Trans Tech Publications Ltd., Switzerland, 1992
- [MCPH08] MCP-HEK GmbH:
Summary of Data for three eutectic Ga-Alloys
Lübeck, 2008
- [NIED02] Niederstraßer, J.:
Funkenspektrometrische Stickstoffbestimmung in niedriglegierten
Stählen unter Berücksichtigung der Einzelfunkenspektrometrie
Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität – Gesamthochschule
Duisburg, 2002
- [OECH99] Oechsle, M.:
Langfaserverstärkte Keramiken für Bauteilkomponenten in
NE-Metallgießereien
Dissertation, Technische Universität München, Hieronymus, 1999
- [PETZ94] Petzow, Günter:
Metallographisches Keramographisches Plastographisches Ätzen
6. überarbeitete Auflage, Gebrüder Bornträger, Berlin Stuttgart,
1994
- [RICK09] Ricken, H. F.:
Stranggießen mit Flüssigmetall als Wärmekopplung zwischen Kokille
und Kühler
Dissertation, Technische Universität München, Hieronymus, 2009
- [RICK11] Ricken, H. F.:
Interner Projektbericht
Diehl Metall Messing, 04/2011
- [RIED08] Riedel, S.; Ricken H.:
Erstarrungsdesign beim horizontalen Stranggießen
Metall, 62. Jahrgang, Heft 10, S. 652 - 655, 2008

-
- [RIED08_1] Riedel, S.; Ricken H.:
Stranggießen mit gesteuerter Flüssigmetall-Umlaufkühlung
Vortrag Hochschul-Kupfersymposium, München, 2008
- [SCHR87] Schrewe, H.:
Stranggießen von Stahl - Einführung und Grundlagen
Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1987
- [SCHU90] Schuhmann, H.:
Metallographie
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1990
- [SIGG04] Siggenauer, T; Hoffmann, H.:
Simulationsgestützte Prozessoptimierung beim horizontalen
Stranggießen von Kupfer-Zinn-Legierungen. Teil 2*
Gießereiforschung 56, Nr. 2, 2004
- [SIGG04_1] Siggenauer, T.:
Simulationsgestützte Prozessoptimierung beim horizontalen
Stranggießen von Kupfer-Zinn-Legierungen
Dissertation, Technische Universität München, Hieronymus, 2004
- [SOMM10] Sommerhofer, H.; Sommerhofer, P.:
Wasserkühlung beim Stranggießen - Ein Muss?
Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Vol. 155(1), S. 12 - 16,
2010
- [TENS88] Tensi, H. M.:
Auswirkung unterschiedlicher Konvektionsarten auf die dendritische
Erstarrungsfront einer AlSi 7-Legierung
Zeitung Metallkunde, Band 79, H7, S. 459 - 466, 1988
- [TENS95] Tensi, H. M.; Xu, C.; Rösch, R.:
Konvektion bei gerichteter Erstarrung ähnlich dem Stranggießen,
Teil 2: Gerichtete Erstarrung mit erzwungener Konvektion, entspre-
chend den Konvektionsverhältnissen in transparenten Medien
Giessereiforschung 47, Nr. 3, 1995

- [THOM76] Thomson, R.:
Hydraulik Modelling of closed-head continuous casting systems
The British Foundrymen, Nr. 69, S. 62 – 70, 1976
- [WEIS95] Weiss, A.; Schmitz, W.; Engler, S.:
Einfluß der Eingießströmung auf die Gefügeausbildung beim vertikalen Stranggießen von CuSn6
Vortragstexte Symposium Stranggießen, DGM Informationsgesellschaft, S. 221 - 230, 1995
- [WOLB08] Wolber, P.; Hoffmann, W. R.:
Interner Materialuntersuchungsbericht,
SGL Group, Bericht Nr. A2655, 10/2008
- [WOLB09] Wolber, P.; Hoffmann, W. R.:
Interner Materialuntersuchungsbericht,
SGL Group, Bericht Nr. A2741, 05/2009
- [WOLB09_1] Wolber, P.:
Interner Materialuntersuchungsbericht,
SGL Group, 03/2009

12.3 Verwendete Normen

- [DIN CEN/TS 13388] Kupfer und Kupferlegierungen – Übersicht über Zusammensetzungen und Produkte
- [DIN EN 60584-2] Thermopaare - Teil 2: Grenzabweichungen der Thermospannungen (IEC 60584-2:1982 + A1:1989) Deutsche Fassung EN 60584-2:1993

12.4 Verwendete Patente

- [DP 750301] Junghans, S.: Verfahren und Vorrichtung zum Gießen von Metallsträngen, 1933
- [AT 65715] Pehrson, A. H.: Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von stangen- oder rohrförmigen Gegenständen aus geschmolzenem Metall, 1914

