utg, TU München	AiF 14029 N
Name der Forschungsstelle	AiF-Vorhaben-Nr.
	01.03.04 bis 28.2.06
	Bewilligungszeitraum
Abschlussbericht	
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießerei	wesen (utg)
(Forschungsstelle 1 von 1)	
zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA ü	iber die
Otto von Guericke	
geförderten Forschungsvorhaben	
Forschungsthema:	
Methode zur Vorhersage von Eigenspannu Kokille	ıngen und Verzug in einer ofenabhängigen
Garching, 7.8.2006	Ricken
Ort, Datum	Unterschrift des Projektleiters

Dokumentationsblatt

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorha	aben
× Normalverfahren	
Fördervariante ZUTECH	1
Stifterverband Metalle	14029 N/ 1
Name der AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)	AiF- Vorhaben-Nr. / GAG
	1.3.2004 28.2.2006
Wirtschaftszweig (WZ)	Bewilligungszeitraum
	157.000 €
Aktenzeichen der MV	Summe der beantragten Zuwendung (bZ)
Forschungsstelle(n):	
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg)	
Technische Universität München	
Forschungsthema:	
Methode zur Vorhersage von Eigenspannungen und Verzug	

Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten:

in einer ofenabhängigen Kokille

Es war möglich, das Verhalten der Kokille in einer thermisch-mechanisch gekoppelten FE-Simulation nachzuvollziehen. Die experimentell ermittelten Temperaturverteilungen konnten gut mit der FE-Simulation bestätigt werden. Die Wärmeabfuhr von der Kokille konnte durch das Einbringen einer Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler entscheidend verbessert werden. Der Wärmeübergang ändert sich nicht mehr, denn das Flüssigmetall steht immer in Kontakt mit Kokille und Kühler. Dadurch wird eine über die Gießzeit konstante Wärmeabfuhr erreicht. Durch die Kompensation des Verzuges konnte mehr Wärme in der gleichen Zeit abgeführt werden als zuvor. Dies kann zur Senkung der Strangaustrittstemperatur oder zur Erhöhung der Gießgeschwindigkeit genutzt werden. In Stichversuchen konnte durch die schnellere Erstarrung ein feineres Gefüge erzeugt werden.

Technische Universität München

Name der Forschungsstelle

14029 N / 1			
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG			
1.3.2004 — 28.2.2006			
Bewilligungszeitraum			

Fragebogen zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse

1.	Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht	ja ×	zum Teil	nein	
2.	Die Bedeutung der Forschungsergebnisse ist folgendermaßen einzuschätzen:	hoch	mittel	gering	z.Zt. nicht absehbar
	 wissenschaftlich-technischer Nutzen 	х			
	 wirtschaftlicher Nutzen f ür KMU 	х			
3.	Die Forschungsergebnisse liefern einen inno	vativen	Beitrag		
	 zu einem neuen Produkt 				
	 zur Weiterentwicklung eines Produkts 				
	 zu einem neuen Verfahren 				
	 zur Weiterentwicklung eines Verfahrens 	х			
4.	Eine industrielle Anwendung der	ja	demnächst	nein	z.Zt. nicht
	Forschungsergebnisse ist realisiert		×		absehbar
5.	Eine weiterführende FuE kann in < 3 Jahren	ia	vielleicht		
_,	zur Innovation (z.B. Pilotanwendung) führen	Ja.	vielleicht	nein	z.Zt. nicht absehbar
		х			
6.	Zuordnung der erzielten Forschungsergebnis	se zu Fa	achgebieten	gemäß Anlag	ge 1
7.	Zuordnung der erzielten Forschungsergebnis	se zu W	irtschaftszw	eigen gemäß	Anlage 2
8.	Die Forschungsergebnisse wurden in einer de entsprechend Abschnitt 3.6 des IGF-Leitfader zulässigen Formen veröffentlicht	er ns	ja	demnächst	nein
9.	Zusätzlich bei ZUTECH-Vorhaben: Der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtscha ausreichend beschriebene Maßnahmen zu fol	lgenden	Punkten:	ja	пein
9.	Zusätzlich bei ZUTECH-Vorhaben: Der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtscha ausreichend beschriebene Maßnahmen zu fol zum möglichen Umfang der industriellen N	lgenden	Punkten:	ja	пеіп
9.	 Zusätzlich bei ZUTECH-Vorhaben: Der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtscha ausreichend beschriebene Maßnahmen zu folgen zum möglichen Umfang der industriellen Nachungsergebnisse 	lgenden Vutzung	Punkten: der	ja	пеin
9. 10.	 Zusätzlich bei ZUTECH-Vorhaben: Der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaausreichend beschriebene Maßnahmen zu fol zum möglichen Umfang der industriellen N Forschungsergebnisse zur konkreten Umsetzung der Forschungs 	lgenden Nutzung ergebnis	Punkten: der sse in KMU	ja	nein
	 Zusätzlich bei ZUTECH-Vorhaben: Der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaausreichend beschriebene Maßnahmen zu fol zum möglichen Umfang der industriellen N Forschungsergebnisse zur konkreten Umsetzung der Forschungs 	lgenden Nutzung ergebnis Ergebn	Punkten: der sse in KMU	ja	nein
10. Both	Zusätzlich bei ZUTECH-Vorhaben: Der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtscha ausreichend beschriebene Maßnahmen zu fol zum möglichen Umfang der industriellen N Forschungsergebnisse zur konkreten Umsetzung der Forschungs Die Darstellung der Maßnahmen im Plan zum in die Wirtschaft ist ausreichend, um eine spät der Forschungsergebnisse zu ermöglichen Chatun (12 09 2006) verband Metalle straße 58/59	lgenden Nutzung ergebnis Ergebn tere Eva	Punkten: der sse in KMU stransfer luierung Lehrstuhl und (Technische Walthe	tir Union	itechnik Sen
Slifter Walt	Zusätzlich bei ZUTECH-Vorhaben: Der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtscha ausreichend beschriebene Maßnahmen zu fol zum möglichen Umfang der industriellen N Forschungsergebnisse zur konkreten Umsetzung der Forschungs Die Darstellung der Maßnahmen im Plan zum in die Wirtschaft ist ausreichend, um eine spät der Forschungsergebnisse zu ermöglichen Ch 12 09 2006 verband Metalle straße 58/59	lgenden Nutzung ergebnis Ergebn tere Eva	Punkten: der sse in KMU stransfer luierung Lehrstuhl und (Technische Walthe	tir Union	itechnik Sen Nonchen

Name der Forschungsstelle

14029 N	7	1
AiF-Vorhaben-Nr.	7	GAG
1.3.2004	:	28.2.2006

Bewilligungszeitraum

Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Fachgebieten

(Anlage 1 des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)

Fachgebiete	Hauptsächliche Nutzung	Nutzung auch möglich
Rohstoffe		
Werkstoffe, Materialien	х	
Chemie		
Verfahrenstechnik		
Lebensmitteltechnik, Bio-, Gentechnik		
Mikrobiologie, Hygiene		
Umwelttechnik		
Konstruktion		-
Produktion	×	
Elektrotechnik, Mikrosystemtechnik, Medizintechnik		
Mess-, Regel-, Automatisierungstechnik		
Informations- und Kommunikationstechnik		
Betriebswirtschaft, Organisation		

Name der Forschungsstelle

1402	9 N / 1				
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG					
1.3.2004 —	28.2.2006				
Bewilligungszeitraum					

Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Wirtschaftszweigen

(Anlage 2 des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)

	Wirtschaftszweige	Hauptsächliche	Nutzung	
Abteilung	Kurzname	Nutzung	auch möglich	
10	Kohlenbergbau und Torfgewinnung			
15	Ernährungsgewerbe			
17/18	Textil- und Bekleidungsgewerbe			
19	Ledergewerbe			
20	Holzgewerbe			
21/22	Papier-, Verlags- und Druckgewerbe		-, ''	
23	Kokerei, Mineralölverarbeitung, Spalt- und Brutstoffe			
24	Chemische Industrie			
25	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren			
26	Glasgewerbe, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden			
27/28	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen	x		
29	Maschinenbau		_	
30/31/ 32/33	Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräte, Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik			
34/35	Fahrzeugbau		-	
36	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte u. sonstige Erzeugnisse		-	
40/41	Energie- und Wasserversorgung			
45	Baugewerbe			
60	Landverkehr, Transport			
72/74	Erbringung von Dienstleistungen überwiegend für Unternehmen			

Stifterverband Metalle

AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)

AiF-Vorhaben-Nr:

AiF-Antrags-Nr.: /

Blatt-Nr./BA-Nr.: /

Aktenzeichen der MV

(wird von der AiF eingesetzt)

Abschlussbericht

Inhalt:

1	Zusammenfassung	3
2	Stand der Technik	4
2.1	Problembeschreibung	
2.2	Bisherige Lösungsversuche	7
3	Ergebnisse	11
3.1	Thermomechanisch gekoppelte Simulation	11
3.2	Luftspaltmessung im Gießbetrieb mit CuSn6	17
3.3	Versuchsstand zur Ermittlung von Wärmeübergangskoeffizienten	21
3.4	Lösungsansatz zur Eliminierung des Spaltes: Flüssigmetallkoppelung	22
3.5	Konstruktive Ausführung der Flüssigmetallkoppelung	25
3.6	Umsetzung der Flüssigmetallkoppelung mit Zn	26
3.7	Umsetzung der Flüssigmetallkoppelung mit CuSn6	27
4	Bewertung der Ergebnisse	32
4.1	Wissenschaftlich-technische Bewertung	32
4.2	Wirtschaftliche Bewertung	32
4.3	Potenziale zur Weiterentwicklung	32
5	Veröffentlichungen	33
6	Anhang	35

1 Zusammenfassung

Das Hauptziel des abgeschlossenen Forschungsprojektes war es, die Auswirkungen der Luftspaltbildungen auf die Halbzeugqualität während des horizontalen Stranggießens zu minimieren. Die Luftspaltbildungen werden unterteilt in das Strangabheben und das Kokillenatmen. Beide behindern die Wärmeabfuhr. Das Strangabheben wird verursacht durch die Erstarrungsschwindung. Der Strang löst sich bei der Erstarrung von der Kokillenwand. Bei der weiteren Abkühlung des Stranges vergrößert sich dieser Spalt. Das Kokillenatmen entsteht durch thermischen Verzug zwischen Kokille und Kühler. Aufgrund hoher Temperaturgradienten und unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten bildet sich auch zwischen Kokille und Kühler ein Luftspalt aus. Durch die Gegenkoppelung von Wärmeleitung und Spaltbildung gerät das System ins Schwingen. Der örtlich und zeitlich ungleichmäßige Wärmestrom führt zu unterschiedlichen Erstarrungsbedingungen im Gussstrang. Dies beeinträchtigt die Qualität des Stranges erheblich.

Es war möglich, dieses Verhalten in einer thermisch-mechanisch gekoppelten FE-Simulation nachzuvollziehen. Die experimentell ermittelten Temperaturverteilungen konnten gut mit der FE-Simulation bestätigt werden.

Die Wärmeabfuhr von der Kokille konnte durch das Einbringen einer Flüssigmetallschicht zwischen Kokille und Kühler entscheidend verbessert werden. Das Flüssigmetall kompensiert den unvermeidlichen Verzug von Kokille und Kühler. Dadurch wird eine über die Gießzeit wesentlich konstantere Wärmeabfuhr erreicht. Durch die verbesserte Wärmeleitung kann mehr Wärme in der gleichen Zeit abgeführt werden als zuvor. Dies kann zur Senkung der Strangaustrittstemperatur oder zur Erhöhung der Gießgeschwindigkeit genutzt werden. In Stichversuchen konnte durch die schnellere Erstarrung ein feineres Gefüge erzeugt werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde damit erreicht.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens legen weitere Untersuchungen nahe, inwieweit das Flüssigmetall zwischen Kokille und Kühler auch gezielt zur Lenkung der Erstarrung eingesetzt werden kann.

2 Stand der Technik

Halbzeuge aus NE-Metallen, vor allem Kupferbasislegierungen, werden in einer ersten Verarbeitungsstufe in Stranggießanlagen hergestellt [DUBB83]. Das formgebende Element ist eine beidseitig offene Dauerform (Kokille) mit Kühlvorrichtung. Dabei gelangt das flüssige Metall (Schmelze) auf einer Seite in die Kokille. Auf einem kurzen Weg wird dem Metall mit Hilfe der Kühlvorrichtung soviel Wärme entzogen, dass der Strang am Kokillenaustritt vollständig erstarrt ist. Der erstarrte Strang wird mit Hilfe von Antriebsrollen abgezogen.

Das Stranggießen wird grundsätzlich in zwei Verfahren unterteilt: Das vertikale und das horizontale Stranggießen. Bei der Verarbeitung von Kupferlegierungen hat sich in der industriellen Praxis das horizontale Stranggießen bewährt. Im Vergleich zum vertikalen Verfahren sind hier die Anlagenkosten etwa 50 % niedriger. Die Instandhaltung ist einfacher und die Überwachung der Produktion besser zu gewährleisten.

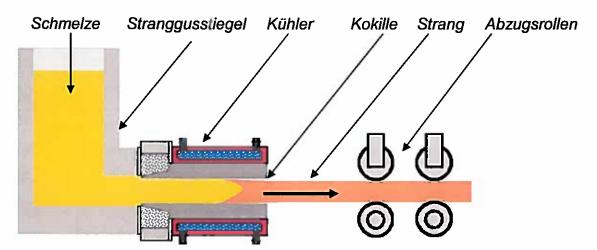


Abbildung 1: Schema einer horizontalen Stranggussanlage mit ofenabhängiger Kokille, Schnitt parallel zur Gießrichtung

Vor allem in mittelständischen Unternehmen und insbesondere für wechselnde Kupferlegierungen auf einer Anlage hat sich daher das horizontale Stranggießen mit Graphitkokillen gegenüber dem vertikalen Verfahren durchgesetzt [WOLF01].

2.1 Problembeschreibung

Dem horizontalen Stranggießverfahren stehen auf metallurgischer Seite auch Nachteile gegenüber. Durch den Einfluss der Schwerkraft liegt der Strang auf seiner Unterseite besser an der Kokille an als auf seiner Oberseite. Hieraus folgt eine bessere Wärmeleitung vom Strang an die Unterseite als an die Oberseite der Kokille. Die Erstarrung der Schmelze ist von unten schneller als von oben.

Die Fläche, an der sich die Erstarrungsfronten von oben und unten treffen, liegt daher nicht in der Mitte des Stranges. Sie ist meist nach oben verschoben. Diese Grenzfläche bleibt im Gefüge erhalten und äußert sich in den Materialeigenschaften.

Die Qualität des Stranges hängt im Wesentlichen von den Kühlverhältnissen in der Kokille und der Kinematik der Strangbewegung ab [BRAU94], [HART89]. Die Strangbewegung wird durch Bewegen des Stranges gegenüber der feststehenden Kokille mittels der Abzugsrollen erreicht. Die Abziehbewegung des Stranges kann, je nach vergossenem Werkstoff, kontinuierlich oder durch zyklische Bewegungen (Oszillation) erfolgen [BAUM00].

Die Kokille ist beim horizontalen Stranggießen direkt mit dem Ofen verbunden. Sie wird aus Feinkorngraphit gefertigt. Dieser Werkstoff verfügt über gute Trockenschmier- und Gleiteigenschaften, geringe Benetzungsfähigkeit gegenüber flüssigen Metallen, eine hohe Wärmeleitfähigkeit sowie eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit [KIND95]. Graphit hat allerdings den Nachteil, dass er sehr hygroskopisch und porös ist. Daher kann die Graphitkokille nicht direkt mit Wasser gekühlt werden. Das Kühlwasser würde sofort in den Graphit einziehen und bei Berührung mit der heißen Schmelze würde das gespeicherte Wasser schlagartig verdampfen und die Kokille sprengen. Um diesen Nachteil zu umgehen, wird auf die Kokille eine wasserdurchströmte Kupferplatte als Kühler aufgeschraubt.

Der Wärmetransport von der Kokille zum Kupferkühler ist derzeit die Schwachstelle dieses Aufbaus. Die direkt an der Schmelze bzw. an der erstarrten Randschale anliegende Seite der Graphitkokille wird deutlich heißer als die am Kühler anliegende Seite. Der Temperaturgradient verursacht auf der Innenseite eine größere Wärmeausdehnung als auf der Außenseite. Dadurch biegt sich die Kokille wie ein Birnetallplättchen zur Schmelze hin. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten vom Kupfer des Kühlers mit 16,8 x 10⁻⁶/K und vom Graphit der Kokille mit 7,9 x 10⁻⁶/K sind ebenfalls unterschiedlich. Daher kommt es zu thermischen Spannungen und zum Verzug zwischen Kokille und Kühler. Es entstehen Luftspalte und die

Flächenpressung zwischen den Partnern ändert sich. Als Konsequenz dieser Bewegungen ändert sich wiederum der lokale Wärmeübergang von der Kokille zum Kühler. Durch den Wechsel von Anlegen und Abheben der Kokille gerät das System ins Schwingen. Dieses Phänomen ist derzeit an allen horizontalen Stranggießanlagen zu beobachten und wird als Kokillenatmen bezeichnet. Es stellt ein wesentliches Hindernis bei der Erzeugung durchgängig hoher Qualität dar.

Die Wärmeleitfähigkeit von Luft λ_{Luft} = 0,026 W/(m*K) ist um vier Größenordnungen schlechter als die von Graphit mit λ_{Graphit} = 169 W/(m*K) und Kupfer mit λ_{Kupfer} = 384 W/(m*K).

Der Luftspalt ist also trotz seiner geringen Dicke ein sehr großer thermischer Widerstand. Er verringert die Wärmeabfuhr von der Kokille zum Kühler. Als Folge daraus sinken die erreichbare Erstarrungsgeschwindigkeit und die mögliche Gießgeschwindigkeit.

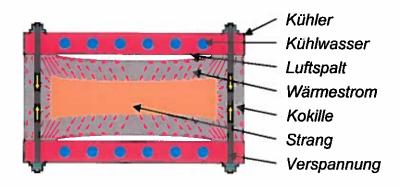


Abbildung 2: Luftspalt zwischen Kokille und Kühler, Schnitt senkrecht zur Gießrichtung

Die bisherige Anordnung des Kühlsystems für die Graphitkokillen, insbesondere beim Stranggießen von Rechteckhalbzeugen, besteht aus zwei Kupferplatten mit Innenkanälen, die über Rohrleitungen an den Kühlwasserkreislauf angeschlossen werden.

Bei den heute üblichen geklemmten Kokillen nimmt der Wärmestrom hauptsächlich den Weg durch die Bereiche der Graphitplatten, wo diese durch die Verschraubung direkt am Kühler anliegen (siehe Abbildung 2).

2.2 Bisherige Lösungsversuche

Um das Entstehen des Luftspaltes zwischen Kokille und Kühler während des Gießbetriebs zu verhindern, liegen bereits einige Ideen und Untersuchungen in Form von Patentschriften vor. In der betrieblichen Praxis werden heute bei breiten Gießformaten meist Zuganker in die Graphitkokille eingebracht, die die Kokille an den Kühler ziehen sollen (siehe Abbildung 3). Hierdurch kann die Kühlwirkung in der direkten Umgebung der Zuganker deutlich verbessert werden. Diese Systeme geraten aber ebenso ins Schwingen wie geklemmte Kokillen. Die Luftspaltbildung kann nur nahe der Zuganker verringert werden.

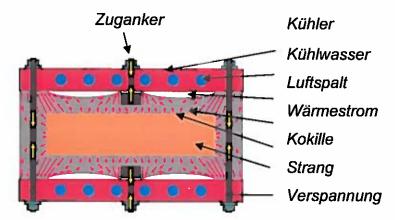


Abbildung 3: Verringerung des Luftspaltes durch Zuganker, Schnitt senkrecht zur Gießrichtung

In [FEUC87] wird vorgeschlagen, dass der Kühler in einzelne Kühlrohre segmentiert wird, die einzeln an die Kokille gedrückt werden können. Für das Mehrfachstranggießen insbesondere von Drahtquerschnitten schlägt [KATS79] vor, mehrere Kokillen mit Kühlplatten zu einem Paket zu verspannen.

Eine andere Möglichkeit, den Kontakt zwischen Kokille und Kühler zu verbessern ist, zwischen Kokille und Kühler Unterdruck bzw. ein Vakuum anzulegen. Durch den Unterdruck soll die Kokille derart an den Kühler herangezogen werden, dass sich kein Luftspalt ausbilden kann. Nachteilig bei dieser Anordnung ist, dass durch den porösen Graphit beständig Luft nachfließen kann. Der Luftsauerstoff führt im Hochtemperaturbereich der Kokille zu stark erhöhtem Abbrand. Diese Lösung hat sich daher in der Praxis nicht durchsetzen können.

Es ist naheliegend, den Spalt mit einem Gas zu füllen, das Wärme besser überträgt und sich entsprechend der Veränderung der Spaltgröße ausdehnen kann. Dieser

Lösungsversuch wird in der Patentschrift [GRIS82] vorgeschlagen. Hier wird der Spalt z. B. mit Wasserstoff oder Helium gefüllt. Das Gas wird hierbei wahlweise nur als Wärmeleiter zwischen die Bauelemente eingebracht oder im Gleichstrom mit dem erstarrenden Gussstrang geführt und auf der Austrittsseite des Stranges zur Rückführung im Kreislauf aufgefangen. Die Patentschrift beschreibt, dass das Gas auch durch die Kokille bis zur Strangoberfläche vordringen soll und somit im Bereich hinter dem Strangabheben die Wärmeleitung zwischen der bereits erstarrten Randschale und der Kokille verbessert wird.

Wärmeleitfähigkeiten ausgewählter Gase:

Luft:	0,026	W/(m*K)
Wasserstoff:	0,184	W/(m*K)
Helium:	0,15	W/(m*K)
Stickstoff:	0,026	W/(m*K)
Argon:	0,0173	3 W/(m*K)
zum Vergleich: Graphit:	169	W/(m*K)
Kupfer:	384	W/(m*K)
		[KUCH96]

Die Tabelle zeigt den verbleibenden großen Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit zwischen der Gasfüllung und allen anderen Konstruktionselementen (Graphit, Kupfer). Der hieraus resultierende Wärmewiderstand verhindert eine wesentliche Erhöhung der Gießgeschwindigkeit. Das Problem der unkontrollierten Änderung des Wärmeüberganges durch das Atmen der Kokille ist nicht gelöst. Dieser Ansatz kann trotz verbesserter Wärmeleitung durch den Spalt das grundsätzliche Problem der Spaltbildung zwischen Kokille und Kühler nicht beheben.

In [FEUC87] wird die Graphitkokille durch mehrere in Gießrichtung parallel verlaufende Kühlvierkantrohre an einen Tragrahmen der Kühlvorrichtung verspannt. Der Luftspalt zwischen Kühler und Kokille wird dabei durch spezielle Metallkompensatoren an den Kühlwasser-Rohrleitungen ständig überwacht und im Gießbetrieb mechanisch nachgeregelt. Trotz dieser Überwachung des Luftspaltes bleibt die gesamte Kühlfläche kleiner im Vergleich zu den Plattenkühlern. Dazu

kommt der enorme Platzbedarf infolge der sehr großen Abmessungen der Kühlvorrichtung. Dies ist überhaupt nur bei sehr großen Strangformaten möglich und findet keine Anwendung für die bei Kupferlegierungen üblichen Strangformate.

[BENE00] versucht, durch eine druckgeregelte Kühlung die Kokillenseitenwände gegen den Strang zu drücken. Selbst wenn dies gelingt, ist das Problem der unterschiedlichen lokalen Wärmeübergänge zwischen Kühler und Kokille nicht gelöst.

Die Veränderung der Schnittstellengeometrie zwischen Kühler und Kokille durch eine verrippte Wärmetauscherform des Kühlers nach [BIED91] sowie durch sandwichartige Ineinanderpressung des Kühlers mit hoch wärmeleitfähigem Bindemittel an die Graphitkokille [BROS85] führt insgesamt zu einer Erhöhung der wärmeabführenden Fläche der Kokille, nicht jedoch zu einer vollständigen Beseitigung des Luftspaltes zwischen Kokille und Kühler.

Um dem Kokillenatmen entgegenzuwirken, werden gelegentlich spezielle Wärmeleitpasten aus Kupfer auf den Graphit- und den Kühleroberflächen aufgetragen [FEUC87]. Sie bewirken ebenfalls kein Verschwinden des Kokillenatmens während des Gießbetriebes. Die eingebrachten Pasten werden beim ersten Atmen der Kokille flach gedrückt, können sich dann aber nicht mehr ausdehnen. Beim zweiten Atemzyklus entsteht somit wieder ein Luftspalt als wäre keine Paste vorhanden.

In [OEHM82] wird die Füllung des Spaltes mit Zinn oder einer Zinnlegierung am Beispiel von Rundformaten vorgeschlagen. Die Bildung des Luftspaltes zwischen Kokille und Kühler infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe Graphit bzw. Kupfer kann durch diesen Aufbau verhindert werden. Bei der hier angewendeten Kühlvorrichtung wird eine Flüssigkeit mit hoher Wärmeleitfähigkeit, beispielsweise eine geschmolzene Zinnlegierung, zum Füllen des Luftspaltes verwendet. Dabei kommt das wärmeübertragende Medium nicht in Berührung mit der Metallschmelze und dem Gussstrang. Der entscheidende Nachteil dieses Aufbaus ist, dass Zinn mit seinem Schmelzpunkt von 232 °C bei Raumtemperatur fest vorliegt. Die niedrigste Temperatur, bei der eine Zinn-Zink-Legierung flüssig vorliegt, ist die eutektische Temperatur von 189 °C. Zinn-Zink-Legierungen benötigen daher eine zusätzliche Heizung, damit das Flüssigmetall im Ausgleichsbehälter während des Gießens nicht erstarrt. Die Legierung kann auch nicht problemlos flüssig in den Spalt eingebracht werden. Die Legierung erstarrt,

sowie die Temperatur der Anlage unter die Solidustemperatur dieser Legierung fällt. Die Beherrschung der Änderung des Aggregatszustandes stellt ein wesentliches Hindernis für die Anwendung dieser Lösung dar. Wenn das Zinn im Spalt erstarrt, schrumpft es auf die Kokille auf und löst sich durch Schwindung vom Kühler ab. Es entsteht ein Luftspalt, der ein kontrolliertes Anfahren der Anlage verhindert. Beim das Zinn zunächst verflüssigt werden. seine Gießbeginn muss um spaltüberbrückende Funktion übernehmen zu können. Ob und wie dieses Problem beim Patentanmelder gelöst worden ist, ist nicht bekannt geworden. Obwohl das Patent bereits ausgelaufen ist, sind bisher keine weiteren Informationen über die Anwendung des Patentes beim Anmelder oder über einen Nachbau von Wettbewerbern bekannt geworden. Außer der Patentschrift des abgelaufenen Patentes liegen keine Veröffentlichungen vor.

3 Ergebnisse

3.1 Thermomechanisch gekoppelte Simulation

Ein Ziel des Projektes war die Erweiterung der Gießsimulation WINCAST der RWP GmbH um ein Strangguss-Modul. Die Erprobung und Anpassung des Modells erfolgte am utg. An der Simulation eines Gießversuches sollen beispielhaft die Simulationsergebnisse diskutiert werden.

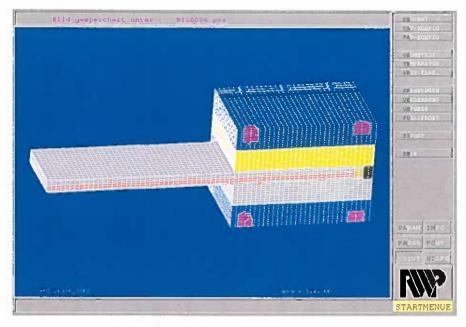


Abbildung 4: geometrisches Modell

Abbildung 4 zeigt das FE-Modell der Stranggießanlage in abstrahierter Form. Aus Symmetriegründen wurde nur ein Halbstrang berechnet. Die Gießrichtung ist in der Abbildung von rechts nach links. Der Strang ist in verschiedene Gebiete geteilt. Ganz rechts das schwarz dargestellte Stoffgebiet stellt den Starter und die Schmelze dar. Von hier tritt während des Gießvorganges mit jedem Gießzyklus neue Schmelze mit der vorgegebenen Gießtemperatur über die Systemgrenze ein. Der daran links anschließende Teil des Stranges repräsentiert das Anfahrstück. Dieses Anfahrstück und der weitere Strang ist horizontal in zwei Stoffgebiete aufgeteilt. Hierdurch wird in der Ergebnisdarstellung eine einfache Zugänglichkeit der Mitte des Stranges für die Beurteilung erreicht. Am linken Rand des FE-Netzes tritt der abgekühlte Strang über die Systemgrenze wieder aus. Der Strang ist oben, unten und an der Seite von der Graphitkokille umschlossen. An der oberen und unteren Kokillenplatte liegen die Kupferkühler oben und unten an. Die Kühlkanäle in den Kühlern sind wirklichkeitsnah

modelliert worden. In die Kühlkanäle tritt an der Kühlwassereinlaufbohrung ein vorgegebener Kühlwasserstrom mit ein und erwärmt sich auf dem Weg zur Kühlwasserauslassbohrung. Das Kokillen-Kühler-Paket ist mit drei Zugankern aus Stahl, die die Spannschrauben repräsentieren, verspannt. Das ganze Modell ist in einem rechteckigen Bereich von Luft mit Konvektionsrandbedingungen umgeben.

Bei der hier folgenden Simulationsrechnung wurden die Parameter eines Gießversuches im Go-Stop-Back-Betrieb (Pilgerschrittverfahren) nachgebildet:

Ziehen	(go)	4,0 mm
Wartezeit	(stop)	0,6 sec
Rückhub	(back)	0,5 mm

Daraus ergibt sich eine Abzugsgeschwindigkeit von $v_{\text{gieß}}$ 200 mm/min.

Die Schmelzetemperatur des Gießversuches betrug ca. 1170 °C. Der Kühlwasserstrom war auf 9 I/min eingestellt.

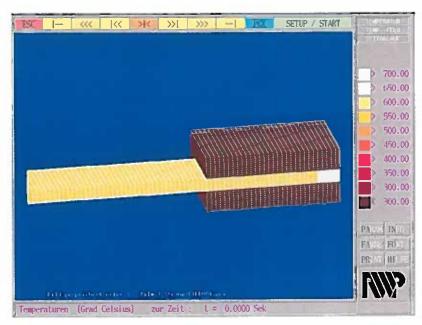


Abbildung 5: Startbedingungen

Die Starttemperaturen der Simulation sind:

Schmelze: 1170 °C Kühler: 25 °C

Anfahrstück: 800 °C Kühlwasser: 25 °C

Strang: 500 °C Umgebungsluft: 25 °C

Kokille: 200 °C

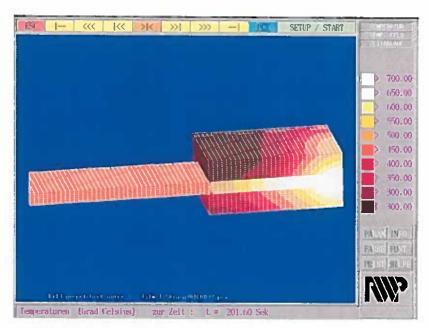


Abbildung 6: Temperaturen von Strang und Kokille

Abbildung 6 zeigt die berechneten Temperaturen nach 201,6 sec. Hier sind nur der Strang und die Kokille dargestellt, der Kühler ist noch ausgeblendet. Es ist deutlich zu erkennen, dass die untere Kokillenplatte heißer ist als die obere. Die Auswirkung der besseren Wärmeleitung durch die untere Kokillenplatte findet sich im Strang wieder. Der Strang ist an seiner Unterseite kühler als an der Oberseite.

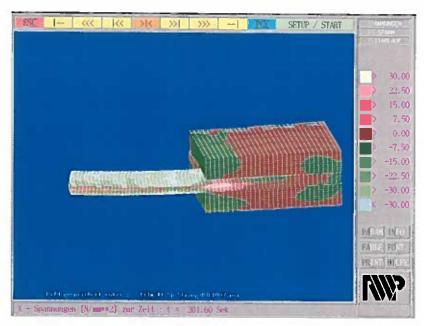


Abbildung 7: Spannung und Verzug von Strang und Kokille

Abbildung 7 zeigt die Spannungen und Dehnungen zum gleichen Zeitpunkt wie Abbildung 6. Das Strangabheben auf der Oberseite ist gut erkennbar. Außerhalb der Kokille verzieht sich der Strang nach oben.

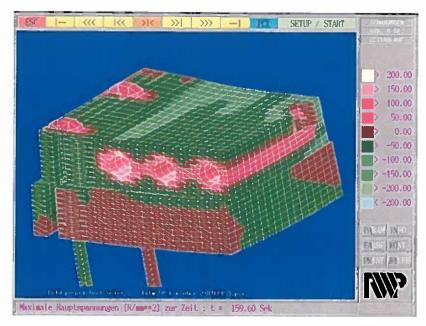


Abbildung 8: Spannung und Verzug von Kokille, Kühler und Zuganker

In Abbildung 8 sind je ein viertel Kokille und Kühler ohne den Strang dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt hat sich die Kokille deutlich gegenüber dem Kühler ausgedehnt. Das ganze Paket ist durch den Temperaturgradienten verzogen.

Im Bereich der Kühlbohrungen sind starke Zugspannungen im Kühler zu beobachten.

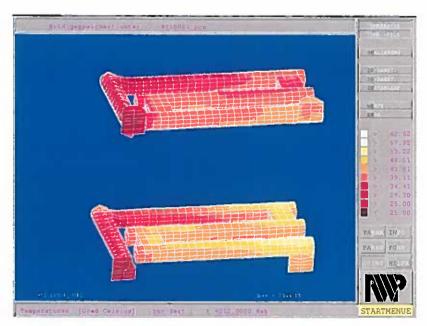


Abbildung 9: Kühlwassererwärmung

Abbildung 9 zeigt, dass sich das Kühlwasser im unteren Kühler stärker erwärmt als im oberen. Dies entspricht der größeren von der Strangunterseite abgeführten Wärmemenge.

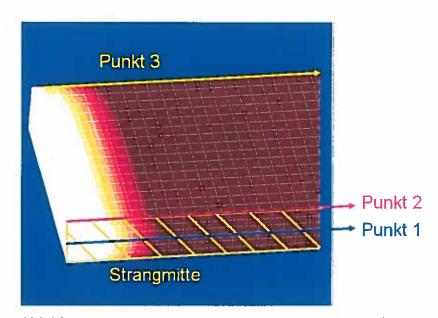


Abbildung 10: Lage der Punkte für spezielle Abkühlkurven

Abbildung 10 zeigt die Lage von drei ausgewählten Punkten des Stranges. Die Gießrichtung ist in diesem Bild von links nach rechts. Punkt 1 ist die geometrische Mitte des Stranges. Punkt 2 liegt mittig auf der Strangoberfläche. Hier wird während

der Gießversuche die Strangaustrittstemperatur gemessen. Punkt 3 liegt an der oberen Ecke des Stranges.

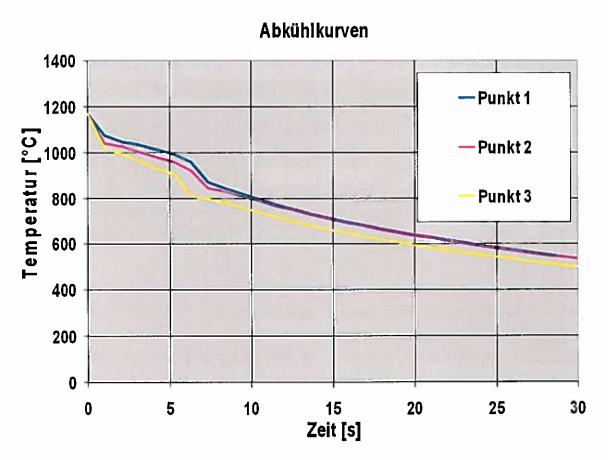


Abbildung 11: spezielle Abkühlkurven

Abbildung 11 zeigt für die in Abbildung 10 dargestellten speziellen Punkte den Temperaturverlauf über der Zeit. Erwartungsgemäß ist die Temperatur im Kern des Stranges am höchsten und an der Ecke am niedrigsten.

Die Strangtemperatur des Gießversuches war mit 500 °C gemessen worden. In der Simulation zeigt der Strang mit einer Austrittstemperatur von 499 °C trotz der geometrischen Vereinfachungen das gleiche thermische Verhalten wie der Strang im Gießversuch. Die Spaltbildung lässt sich in ihrer thermischen Wirksamkeit in der Simulation darstellen.

Das Fazit der Simulation des bestehenden Gießprozesses ist:

- Die Rechenergebnisse der thermomechanisch gekoppelten Simulation stimmen mit den Messergebnissen des Gießversuches überein.
- Das Modell berücksichtigt das Kokillenatmen am Beginn des Gießprozesses.
- Das Modell ist geeignet, den Wärme- und Stofftransport von der Schmelze bis zum Kühlwasser zu optimieren.

Das Ziel der Beschreibug des horizontalen Stranggießens durch die Stranggießsimulation WinCast-Conti konnte hiermit erreicht werden. Mit der Simulation der thermomechanischen Vorgänge in der Kokille ist auch ohne experimentelle Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten ein wesentliches Werkzeug zum besseren Prozessverständnis beim horizontalen Stranggießen geschaffen worden.

3.2 Luftspaltmessung im Gießbetrieb mit CuSn6

Der Spalt zwischen der Kokille und dem Kühler ist sehr dünn. Von der Strangaustrittsseite kann der Spalt mit einer Fühlerlehre gemessen werden. Auf diese Art wurden im Betrieb Werte bis zu 3/10 mm gemessen. Die flächige Ausdehnung des Spaltes ist an einem "Fußabdruck" (footprint, Abbildungen 12 und 13) auf den Kokillenplatten zu erkennen.

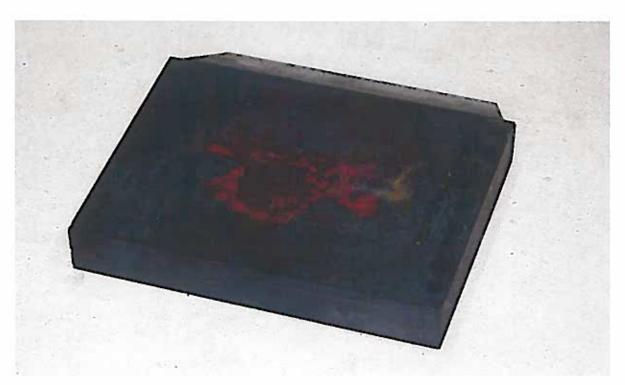


Abbildung 12: Footprint Foto

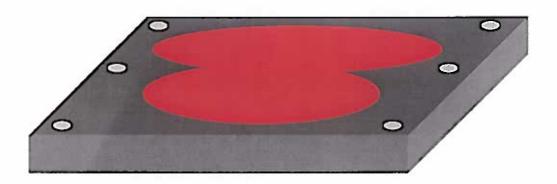


Abbildung 13: Footprint schematisch

Dieser Fußabdruck besteht aus den Bestandteilen der Metallschmelze, in diesem Fall aus Kupfer und Zinn. Sie gelangen durch Diffusion an die äußere Wand der Kokille. In Bereichen, wo die Kokille während des Gießens am Kühler anliegt, lagern sich die Metallatome am Kupferkühler an. Den Luftspalt können die durch die Graphitplatte diffundierenden Atome nicht überwinden. Sie lagern sich daher an der Oberfläche der Kokille ab. Es ergibt sich ein Tragbild der Graphitkokille. Nahe der Verschraubungen liegt die Kokille gut am Kühler an und es bilden sich keine Ablagerungen am Kokillengraphit. Die unterschiedlich starke Zeichnung des Fußabdruckes deutet auf die Dynamik der Spaltbildung hin. In den Randbereichen sind die Ablagerungen signifikant geringer als in der Mitte der Kokille. Die Entstehung

des Fußabdruckes beginnt mit dem Gießbeginn, wenn erstmals Schmelze in die Kokille gelangt. Die Form des Fußabdruckes ist nicht mit der Form der Erstarrungsfront in Einklang zu bringen, die Erweiterung des Gebietes hinter der zweiten Verschraubung wäre metallurgisch nicht erklärbar. Die Ablagerungen werden zum Kokillenaustritt hin deutlich geringer. Dies ist mit dem Abheben des Stranges von der Innenseite der Kokille zu erklären. Zusätzlich nimmt die Temperatur als treibende Kraft der Diffusion zum Ende der Kokille hin deutlich ab. Die Form des Fußabdruckes gibt also im vorderen bis mittleren Bereich der Kokille die Form des Spaltes wieder. Der Spalt kann nicht durch eine Dreiecksbeziehung von den Verschraubungen zur Kokillenmitte beschrieben werden.

Es wären Abstandsmessungen über den gesamten Kokillenquerschnitt notwendig, um den Spalt zeitlich und örtlich hinreichend genau zu beschreiben. Jede dieser Messstellen stellt aber einen Eingriff in das wärmeübertragende System dar. Ein grobes Raster von 20 mm x 20 mm ohne Berücksichtigung der Randkontur würde 9 x 7 = 63 Messstellen nur auf der oberen Kokillenplatte bedeuten. Die untere Kokillenplatte ist durch die Einbaulage ohnehin nicht zugänglich. Ein gleichmäßiges Raster aufzubringen ist auch durch die Anordnung der Kühlkanäle im Inneren der Kokille nicht möglich. Es bleibt also nur die Möglichkeit, einen ermittelten Messpunkt zum Abgleich mit der Simulation zu verwenden. Hierzu wurden verschiedene Messprinzipien untersucht.





a) ohne Abschirmung

b) mit Abschirmung

Abbildung 14: Induktives Wegmesssystem auf der oberen Kokillenplatte

Abbildung 14 zeigt die Anordnung eines induktiven Sensors auf der oberen Kokillenplatte. Die Versuche mit dem induktiven Wegaufnehmer zeigten, dass

aufgrund von Störungen des Induktionsofens reproduzierbare Messergebnisse nicht zu erzielen waren.

Die Versuche mit einem optischen Lasermesssystem lieferten Ergebnisse über den Abstand vom Messgerät zur Kokillenoberfläche. Das Gestänge war aber ebenfalls thermischen Störungen unterworfen. Eine Referenzierung zur Unterseite des Kühlers der Stranggießanlage mit der benötigten Genauigkeit im Gießbetrieb war nicht möglich. Auch wenn der Spalt gemessen werden könnte, verbleibt ein weiteres Problem bei der Beschreibung der thermischen Verhältnisse. Dort, wo die Kokille am Kühler anliegt, ist die übertragene Wärmemenge abhängig von der lokalen Kontaktkraft. Diese hängt ab vom Verzug und der Vorspannung der Schrauben. Da die Schrauben stark erwärmt werden, ist eine Messung der Normalkraft über Dehnmessstreifen nicht sinnvoll.

Die Spaltbildung entzieht sich durch die Kombination aus Komplexität, hoher Temperatur und Unzugänglichkeit einer genaueren messtechnischen Analyse.

3.3 Versuchsstand zur Ermittlung von Wärmeübergangskoeffizienten

Die Messung des spaltweitenabhängigen Wärmeüberganges sollte durch einen Versuchsstand erreicht werden, in dem kontinuierlich durch Hochtemperaturheizer Wärme eingebracht und durch einen Kühler der Stranggießanlage die Wärme wieder abgeführt wird. Dazwischen ist eine Kokillenplatte angeordnet, deren Abstand zum Kühler durch Abstandsplättichen vor dem Versuch einstellbar ist.

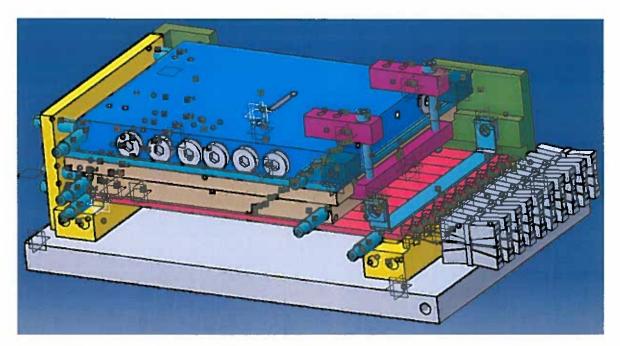


Abbildung 15: Konstruktion Versuchsstand zur Messung des spaltweitenabhängigen Wärmeüberganges

Abbildung 15 zeigt die Konstruktionszeichnung dieses Versuchsstandes. Der Aufbau ruht auf einer Bodenplatte aus Stahl. Auf Keramikblöcken gelagert sind 10 Hochtemperaturheizer angeordnet. Die Isolation zur Bodenplatte ist ausgeblendet. Über den Heizern folgen Kokille und Kühler. Strom- und Wasseranschlüsse sind nicht dargestellt. Die keramischen Heizer sind sehr spröde. Daher ist es nicht möglich, Kokille und Kühler direkt auf die Heizer aufzulegen. Die Heizer würden unter dem Gewicht von Kokille und Kühler brechen. Hinzu kommt der erwartete Verzug der Kokille. Bei erhöhter Temperatur würde die Kokille nur noch teilweise an den Heizern anliegen. In den Randbereichen würde sich ein Luftspalt ausbilden. Für einen gleichmäßigen Wärmeeintrag in die Kokille kommt daher nur eine schwebende Lagerung über den Heizern in Betracht.

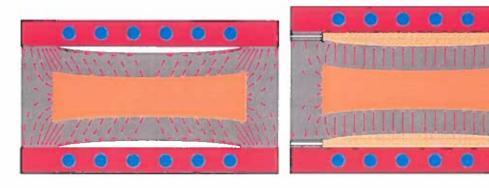
Die benötigte hohe Leistung kann allerdings nicht berührungslos in die Kokillenplatte übertragen werden. Da zeitgleich die Kompensation des Luftspaltes entwickelt wurde, sind diese Versuche frühzeitig eingestellt worden.

3.4 Lösungsansatz zur Eliminierung des Spaltes: Flüssigmetallkoppelung

Die Motivation des Forschungsvorhabens war die Erzeugung von Bändern ohne den störenden Einfluss des Kokillenatmens. Die im Stand der Technik beschriebenen Lösungsversuche haben alle Schwächen. Da die Quantifizierung der einzelnen Anteile der Wärmeübertragung im Betrieb nahezu unmöglich ist, gingen die Überlegungen in Richtung der Eliminierung des Luftspaltes.

Alle mechanischen Verbindungen reagieren nachteilig auf die großen Temperaturunterschiede zwischen Montage und Betriebsbedingungen. Angesichts der vielen vergeblichen Versuche in der Praxis ist hiervon keine Lösung zu erwarten. Im Stand der Technik wurden zahlreiche Berichte genannt, dass mit Wärmeleitpasten gearbeitet wurde. Allen diesen Lösungen ist aber ein Nachteil gemeinsam. Die Pasten werden bei den Bewegungen der Kokillenplatte zusammengedrückt, sie können nicht in die Ausgangsform zurückkehren. Somit stellt sich wie zuvor ein zyklisches Kokillenatmen mit Luftspaltbildung ein. Die Wärmeleitung von Gasen ist sehr Ein geeignetes Wärmeleitmedium muss gesamten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis zur Betriebstemperatur flüssig sein.

Die Wärme wird dann nicht mehr über besonders gut anliegende Bereiche, sondern über den gesamten vom Medium benetzten Querschnitt transportiert (siehe Abbildung 16).



a) geklemmte Kokille

b) mit flüssigem Koppelungsmedium

Abbildung 16: Wärmeleitung von der Kokille zum Kühler

Das neue Kopplungsmedium muss also eine gut wärmeleitende Flüssigkeit sein.

Die Anforderungen sind:

Flüssiger Temperaturbereich von 10 - 1200 °C

Hohe Wärmeleitfähigkeit

Keine Infiltration in Graphit

Kein Angriff von Kupfer

Geringe chemische Reaktivität, keine stark exotherme Reaktion bei erhöhter

Temperatur

Keine Brandgefahr

Ungiftigkeit

Da eine hohe Wärmeleitfähigkeit gefordert wird, engt sich die Suche auf die Gruppe der niedrig schmelzenden Metalle und Metalllegierungen ein:

Quecksilber ist bei Raumtemperatur flüssig. Gegen die Verwendung von Quecksilber spricht seine Giftigkeit. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration MAK liegt bei 0. Die geringe Siedetemperatur von 357 °C wäre ebenfalls nachteilig. Die Suche einer geeigneten Flüssigkeit konzentriert sich daher auf heute gebräuchlichen Quecksilberersatz. Natrium kommt bei Kernkraftwerken als Primärkühlmittel zum Einsatz. Bei den rauhen Einsatzbedingungen in einer Gießerei ist das hoch reaktive Natrium allerdings eher ungeeignet. Sein Schmelzpunkt liegt mit 98 °C auch erheblich über Raumtemperatur.

In der Patentschrift [ÖHMA81] wird eine Flüssigmetallkühlung mit einer Legierung mit mindestens 50 % Zinn vorgeschlagen. Die bekannten Legierungen auf Zinkbasis liegen alle bei Raumtemperatur im festen Zustand vor. Daher wird bei diesem System eine externe Heizung vorgeschlagen, welche das Wärmekoppelungsmedium in flüssigem Zustand halten soll.

Rosesches Metall (50 % Bi, 25 % Pb, 25 % Sn) hat eine Schmelztemperatur von Ts=94 °C. Wood'sches Metall (50 % Bi, 25 % Pb, 12,5 % Cd, 12,5 % Sn) schmilzt bei ca. 70 °C und ist toxisch. Beide Legierungen sind aufgrund der Schmelztemperaturen deutlich über Raumtemperatur und der Elemente Blei bzw. Cadmium für den Einsatz als Kühlmedium eher ungeeignet.

In der Medizintechnik und in der Erforschung der Strömung von metallischen Schmelzen finden heute Legierungen aus Gallium, Indium und Zinn Verwendung.

Diese Legierungen sind absolut ungiftig, bei Raumtemperatur flüssig und haben Siedepunkte deutlich über 1200 °C. Die Auswahl eines geeigneten Wärmeleitungsmediums konzentriert sich daher auf diese Legierungsgruppe. Die Legierungen des Gallium mit den B-Metallen sind in [SPRE55] ausführlich untersucht worden. Am Markt sind zwei verschiedene Legierungen erhältlich:

Galinstan:

Schmelzpunkt: = -19 °C

Siedepunkt: > 1300 °C

Dampfdruck bei 500 °C: < 1,0 - 1,3 hPa

Dichte: $= 6,44 \text{ g/cm}^3$

Viskosität: = 0,0024 NS/m bei 20 °C

Wärmeleitfähigkeit: = 16,5 W/m*K

spez. elektr. Widerstand: = $0,435 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$

Galinstan ist eine eutektische Legierung, die im Wesentlichen aus Ga, In und Sn besteht. Sie ist mit weiteren Spurenelementen modifiziert, um die niedrige Schmelztemperatur zu erreichen. Die genaue Zusammensetzung ist nicht bekannt. Die Legierung ist nicht brennbar, nicht toxisch und als Medizinprodukt zugelassen.

HEK-GalnSn (MCP 11)

Eutektische Legierung aus Ga, In und Sn ohne weitere Zusätze.

Schmelzpunkt: = 10,8 °C

Siedepunkt: > 1300 °C

Dampfdruck: vernachlässigbar

Dichte: $= 6,44 \text{ g/cm}^3$

Die Legierung ist in industriellem Maßstab erhältlich, aber nicht so detailliert untersucht wie das als Thermometerlegierung verwendete Galinstan. Ein einfacher Thermometerversuch ergab von RT bis 500 °C eine Volumenvergrößerung von 6 %. Die Benetzung mit Kupfer ist sehr gut. Die Benetzung mit Graphit ist gering. Für die Wärmeleitfähigkeit wurde der Wert von Galinstan angenommen. Der Benetzungswinkel auf Graphit ändert sich im Bereich bis 300 °C nur wenig. Im

Kontakt mit Sauerstoff bildet sich an der Oberfläche gelegentlich ein schaumartiges Oxid, das mit einem Löffel abgenommen werden kann.

Mit dieser Legierung wurden die weiteren Versuche durchgeführt.

3.5 Konstruktive Ausführung der Flüssigmetallkoppelung

Der konventionelle Aufbau, bei dem die Luftspaltbildung nicht zu verhindern ist, wurde durch eine Schicht aus einer Flüssigmetalllegierung ersetzt (Abbildung 16).

Die Wärmeleitfähigkeit von Luft ist mit $\lambda_{\text{Luft}} = 0,026 \text{ W/(m*K)}$ um mehr als drei Größenordnungen schlechter als die der Flüssigmetalllegierungen auf Basis von Gallium. Diese Legierung ist mit einer Schmelztemperatur von 10,8 °C auch bei Raumtemperatur flüssig, hat bis über 1300 °C keinen nennenswerten Dampfdruck und ist ungiftig.

Für das an der utg-Stranggießanlage verwendete Rechteckformat musste der Raum für das Wärmeleitmedium als eine obere und eine untere Kammer ausgeführt werden. Die Wärmeleitung durch eine Schicht von 5 mm Flüssigmetall ist über 50-fach besser als durch einen Luftspalt von 0,3 mm. Die dicke von 5 mm stellt sicher, dass sich das Flüssigmetall nicht durch seine hohe Oberflächenspannung zu Tropfen zusammenziehen kann. Das Bad aus Schmelzmetall wird von einem Stahlrahmen mit Graphitdichtungen zwischen Kokille und Kühler gehalten. Mit dem Hohlraum verbundene Ausgleichsbehälter stellen sicher, dass der Hohlraum immer ganz gefüllt bleibt. Der direkte Kontakt zwischen Kokille und Kühler im Bereich der Verschraubungen entfällt.

3.6 Umsetzung der Flüssigmetallkoppelung mit Zn

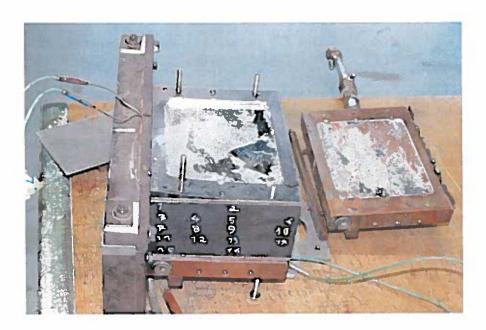
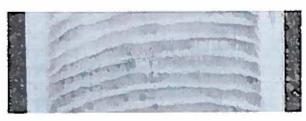


Abbildung 17: Zerlegte Kokille mit Flüssigmetallkoppelung

Die Abbildung zeigt die Flüssigmetallkühlung nach dem ersten Guss. Das Bad aus Schmelzmetall ist mit 150 mm genauso breit wie der erzeugte Strang. Vorne und hinten ist der Rahmen 20 mm breit. Das Schmelzmetallbad ist in Gießrichtung 120 mm lang. In der Abbildung ist der obere Kühler bereits abgenommen. Am Kühler ist noch die Benetzung mit dem Flüssigmetall zu sehen. Die Thermoelemente seitlich in der Kokille sind bereits entfernt. Die Thermoelemente in der Kokillenschnauze sind noch im Feuerfestbeton fixiert. Das neue Kühlsystem mit einer Zwischenschicht aus GalnSn wurde zunächst in einem Gießversuch mit Zink erprobt, da bei der niedrigen Schmelztemperatur von 420 °C die Gefahr bei unzureichender Kühlung deutlich reduziert ist. Zunächst wurde ein Referenzversuch mit einer konventionell geklemmten Kokille durchgeführt.



a) mit geklemmter Kokille



b) mit Flüssigmetallkoppelung

Abbildung 18: Hubmarken auf Strängen aus Zink

Mit der konventionellen Kokille zeigen die Hubmarken deutlich einen gekrümmten Verlauf in der Mitte des 150 mm breiten Stranges.

Durch die Flüssigmetallkoppelung kann dieser Effekt wirksam minimiert werden. Die Erstarrungsfront verläuft in der Mitte des Stranges gerade über den Querschnitt. An den Rändern bildet sich aufgrund des größeren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses ein Meniskus aus. Bei gleicher Gießgeschwindigkeit ist die Strangaustritts-temperatur deutlich geringer als bei der geklemmten Kokille.

Der Volumenausgleich des Flüssigmetalls war allerdings noch problematisch. Beim Anfahren der Anlage wurde kurzzeitig Wasserdampf aus dem Graphit frei. Im Bereich der Flüssigmetallkoppelung hatte dieser Dampf kurzzeitig das Flüssigmetall verdrängt und es durch die Entlüftungsöffnungen herausgedrückt.

3.7 Umsetzung der Flüssigmetallkoppelung mit CuSn6

Die Analyse des zerlegten Systems nach dem Gießen mit Zink hatte gezeigt, dass der Volumenausgleich und die Entlüftung der Flüssigmetallkoppelung noch unbefriedigend waren. Für die Versuche mit CuSn6 wurde daher das Konzept zum Einfüllen des Flüssigmetalls, zur Entlüftung und zum Volumenausgleich überarbeitet.

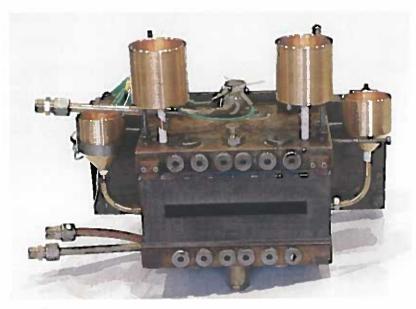
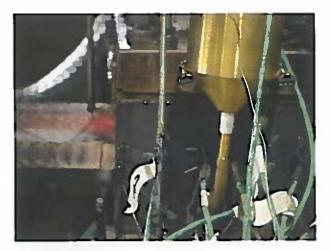
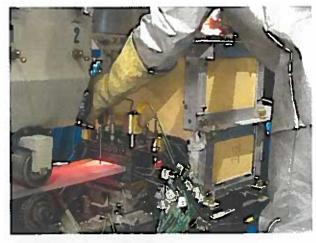


Abbildung 19: optimierte Flüssigmetallkoppelung

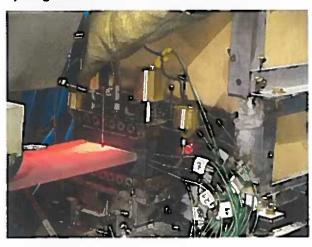
Abbildung 19 zeigt die zusammengebaute Kühler-Kokillen-Konstruktion. Für die obere und die untere Flüssigmetallkoppelung stehen nun jeweils 2 Ausgleichsbehälter aus Messing zur Verfügung. Gasblasen können in den Behältern

langsam aufsteigen. Die Höhe der Metallsäule sorgt für erhöhten Schmelzedruck in der Flüssigmetallkammer und damit verbesserten Kontakt. Das vergrößerte Volumen der Ausgleichsbehälter kann Volumenänderungen auch bei kurzzeitiger Wasserdampfbildung in der Flüssigmetallkammer aufnehmen.





a) angießen



b) stationärer Betrieb 1



c) stationärer Betrieb 2

d)

Gießende

Abbildung 20: Gießen von CuSn6 mit Flüssigmetallkoppelung

Abbildung 20 zeigt mehrere Phasen des Gießprozesses. Beim Angießen kommt der Strang noch relativ kalt aus der Kokille. Es wird schnell und mit geringer Wasserkühlung angezogen. Im stationären Betrieb wird der Strang im Pilgerschrittverfahren gezogen. Das Gießende erfolgt durch vollständige Leerung des Tiegelofens. Der Aufbau erwies sich bei den Versuchen als einfach zu handhaben. Die Strangaustrittstemperatur war zu jedem Zeitpunkt beherrschbar und änderte sich nur langsam.





a) mit geklemmter Kokille

b) mit Flüssigmetallkoppelung

Abbildung 21: Hubmarken auf Strängen aus CuSn6

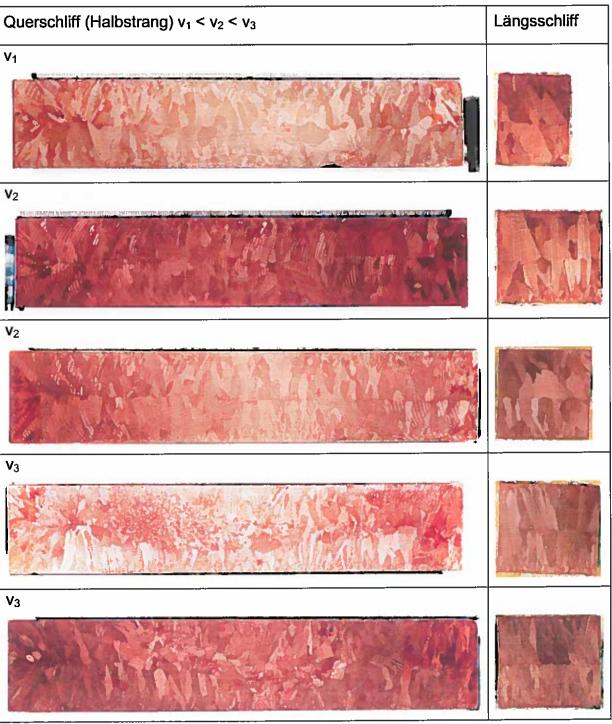


Abbildung 22: Gefügeschliffe CuSn6

Abbildung 21 zeigt Hubmarken auf 150 mm breiten Bronzesträngen. Die Hubmarken verlaufen mit der Flüssigmetallkoppelung nahezu waagerecht über die Strangoberfläche.

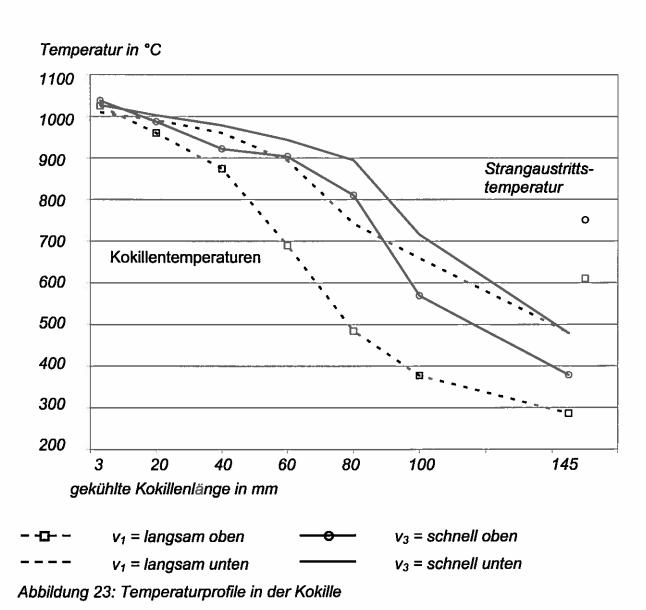
Abbildung 22 zeigt Gefügeschliffe des 15 mm dicken Bandes bei zunehmender Gießgeschwindigkeit: $v_1 < v_2 < v_3$

Die Schliffe zeigen ein deutlich feineres Gefüge bei höherer Gießgeschwindigkeit.

Der Ort, an dem sich beim Bandgießen die Dendriten von oben und unten treffen, wird als thermische Mitte bezeichnet. In der Regel treffen sich die Dendriten beim Bandgießen oberhalb der Strangmitte. Der Strang liegt aufgrund seiner Schwerkraft unten auf, gibt mehr Wärme ab, und die Kristalle wachsen von unten schneller. Bei diesen Versuchen wurde die obere Kokillenplatte mit 10 l/min und die untere mit nur 8 l/min Kühlwasser beaufschlagt. Hierdurch war es möglich, den Ort der letzten Erstarrung unter die Mitte des Stranges zu drücken. Dies kann in der Produktion ohne besondere Maßnahmen nicht erreicht werden. Die bessere Wärmeabfuhr des bereits erstarrten Stranges an die untere Kokillenplatte hat offensichtlich nur geringen Einfluss. Der Einfluss der größeren Kühlwassermenge im oberen Kühler dominiert das Erstarrungsverhalten. Ob auch die unterschiedlichen Bedingungen für Konvektion in der Flüssigmetallschicht zu diesem Effekt beitragen, kann noch nicht abschließend beurteilt werden.

Der Einfluss der Kühlwassermenge auf die thermische Mitte ist noch nicht durch gezielte Variationen untersucht worden. Insbesondere bei den Versuchen mit hoher Gießgeschwindigkeit ist die thermische Mitte nur im Längsschliff zu erkennen. Im Querschliff aufgrund der großen Anzahl geschnittener Körner die thermische Mitte nicht mehr eindeutig zu erkennen. Im Längsschliff zeigt sich die feinere dendritische Gefügeausbildung. Die veränderten Erstarrungsbedingungen finden sich auch in den Temperaturen der Kokille und des austretenden Stranges wieder. In der Kokille wurden im gekühlten Bereich Thermoelemente eingebracht, mit denen das Temperaturprofil überwacht werden konnte. Die Strangtemperatur wurde mittig auf der Strangoberseite mit einem Oberflächenfühler gemessen. Bei schnellerer Gießgeschwindigkeit steigen alle Temperaturen an (Abbildung 23). Die Auswirkung einer erhöhten Kühlwassermenge auf die Erstarrungsgeschwindigkeit war größer als erwartet. Möglicherweise führt die verbesserte Wärmeleitung zwischen Kokille und Kühler zu einer stärkeren Wirksamkeit dieses Prozessparameters als bei geklemmten Kokillen. Dieser Zusammenhang wäre durch weitere Versuche zu

klären. Aus Versuchen mit geklemmter Kokille ist bekannt, dass bei diesem Messaufbau der steile Abfall der Temperaturen an den Kokillenmessstellen unter 900 – 1000 °C das Strangabheben von der Kokille anzeigt [u.a. SIGG04]. Dieser Ort ist bei höherer Gießgeschwindigkeit um ca. 20 mm nach hinten verschoben. Interessant ist jedoch, dass die maximale Kokillentemperatur am Strangaustritt nicht signifikant erhöht ist. Dies ist für den Gießbetrieb vor allem deshalb von Bedeutung, weil die Kokillentemperatur an der Strangaustrittsseite ein wichtiges Kriterium für den oxidativen Verschleiß der Kokille ist.



- 31 -

4 Bewertung der Ergebnisse

4.1 Wissenschaftlich-technische Bewertung

Unter den beteiligten industriellen Stranggießern besteht Einigkeit, dass das Problem der Luftspaltbildung letztlich durch mechanisches Fügen fester Bauteile nicht zu lösen ist, sondern eine flexible und gut wärmeleitende Verbindung zwischen den Bauteilen notwendig ist.

Erst die Verwendung einer Flüssigmetalllegierung, die chemisch hinreichend inert ist, im Betrieb keiner Aggregatszustandsänderung unterliegt und gute Wärmeleitungseigenschaften besitzt, löst das Problem.

Eine hierfür geeignete Legierung wurde mit dem Eutektikum aus Gallium, Indium und Zinn gefunden und in Gießversuchen erprobt.

Die Legierung ist ungiftig und einfach zu handhaben.

In den Betriebsversuchen konnte die Leistungsfähigkeit des Systems Kokille-Flüssigmetall-Kühler nachgewiesen werden.

4.2 Wirtschaftliche Bewertung

Durch die Begradigung der Erstarrungslinie und die Dämpfung der Systemreaktionen wird mit der Flüssigmetallkoppelung ein wesentlich stabilerer Stranggießprozess erreicht als mit konventionellen geklemmten Kokillen. Die Umsetzung in die Praxis ist durch Anpassungskonstruktionen an bestehenden Anlagen möglich.

Damit ist vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen eine Möglichkeit eröffnet, ohne Einsatz großer Forschungs- und Entwicklungsmittel die entwickelte Lösung in die Produktion zu übernehmen. Es fehlen allerdings noch Untersuchungen zum Verhalten des Aufbaus bei industriell relevanten Produktionszeiträumen.

Es wurde eine provisorische Patentanmeldung beim DPMA eingereicht und dem Stifterverband Metalle zur Verwertung angeboten.

4.3 Potenziale zur Weiterentwicklung

Mit den bisherigen Arbeiten konnten die negativen Auswirkungen der Luftspaltbildung zwischen Kokille und Kühler kompensiert werden. Aufgrund der Erfahrungen mit der Flüssigmetallkoppelung erscheint es möglich, durch Änderung der Form des Schmelzebades die Erstarrung gezielt zu beeinflussen.

Das Fernziel könnte die Entwicklung einer strömenden Gallium-Primärkühlung sein. Hierdurch könnte eine gezielte Führung der Erstarrung ermöglicht werden.

5 Veröffentlichungen

Die thermomechanisch gekoppelte Simulation wurde auf der Concast 2006 in Neu-Ulm unter dem Titel "New Possibilities in the Simulation of Continuous Casting Processes with Wincast-Conti, vorgetragen und im Tagungsband "Continuous Casting" 2005 im Verlag Wiley-CH veröffentlicht (ISBN-13 978-3-527 31341-9).

Die Flüssigmetallkoppelung wurde beim Münchener Kolloquium 2006 im Rahmen der Institutspräsentation öffentlich vorgestellt.

Beim Hochschul-Kupfersymposium des Deutschen Kupferinstitutes am 13. / 14.11.2006 in Dresden wird ein Vortrag unter dem Titel "Flüssigmetallkoppelung zwischen Kühler und Kokille beim Bandgießen von Bronzen" gehalten.

Beim Fachausschuss Stranggießen der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde DGM am 15. / 16.11.2006 in Magdeburg wird ein Vortrag zum Thema "Simulation der Luftspaltbildung beim horizontalen Stranggießen" gehalten.

Leiter der Forschungsstelle

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann

Projektleiter

Dipl.-Ing. Hartmut Ricken

6 Anhang

Abbildungsverzeichnis

Kokille, Schnitt parallel zur Gießrichtung	4
Abbildung 2: Luftspalt zwischen Kokille und Kühler, Schnitt senkrecht zur Gießrichtung	
Abbildung 3: Verringerung des Luftspaltes durch Zuganker, Schnitt senkrecht zur Gießrichtung	
Abbildung 4: geometrisches Modell	11
Abbildung 5: Startbedingungen	12
Abbildung 6: Temperaturen Strang und Kokille	13
Abbildung 7: Spannung und Verzug Strang und Kokille	14
Abbildung 8: Spannung und Verzug Kokille, Kühler und Zuganker	14
Abbildung 9: Kühlwassererwärmung	15
Abbildung 10: Lage der Punkte für spezielle Abkühlkurven	15
Abbildung 11: spezielle Abkühlkurven	16
Abbildung 12: Footprint Foto	18
Abbildung 13: Footprint schematisch	18
Abbildung 14: Induktives Wegmesssystemauf der oberen Kokillenplatte	19
Abbildung 15: Konstruktion Versuchsstand zur Messung des spaltweitenabhängigen Wärmeüberganges	21
Abbildung 16: Wärmeleitung von der Kokille zum Kühler	22
Abbildung 17: Zerlegte Kokille mit Flüssigmetallkoppelung	26
Abbildung 18: Hubmarken auf Strängen aus Zink	26
Abbildung 19: optimierte Flüssigmetallkoppelung	27
Abbildung 20: Gießen von CuSn6 mit Flüssigmetallkoppelung;	28
Abbildung 21: Hubmarken auf Strängen aus CuSn6	29
Abbildung 22: Gefügeschliffe CuSn6	29
Abbildung 23: Temperaturprofile in der Kokille	31

Literaturverzeichnis

[BAUM00] Baumgartner, R.:

Bandgießen von Kupfer-Zinn-Knetlegierungen mit thermisch isolierter

Kokille

Dissertation TU München, 2000

[BENE00] Benedetti, G., Gensini, G., Pavlicevic, M., Poloni, A.:

Stranggießkokille mit verbessertem Wärmeaustausch sowie Verfahren

zur Erhöhung des Wärmeaustauschs einer Stranggießkokille Patentschrift DE 695 18 360 T2, Deutsches Patentamt, 2000

[BIED91] Biedermann, H.-J.:

Stranggießkokille

Offenlegungsschrift DE 39 42 704 A1, Deutsches Patentamt, 1991

[BLUE02] Blümlhuber, W.:

Erweiterte Eigenspannungen in druckgegossenen

Aluminiumzylinderkurbelgehäusen Dissertation, TU München, 2002

[BRAU94] Braun, P.:

Bandgießen von Zinnbronze mit einer Horizontalen-

Stranggießmaschine

Dissertation RWTH Aachen, 1994

[BROS85] Brosch, R.-W.:

Casting mould

Patentschrift EP 0 052 947 B1, Europäisches Patentamt, 1985

[DUBB83] Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 15. Auflage, Springer

Verlag 1983

[FENT02] Fent, A.:

Einfluss der Wärmebehandlung auf den Eigenspannungszustand von

Aluminiumgussteilen

Dissertation, TU München, 2002

[FEUC87] Feuchter, P.:

Stranggießkokille

Patentschrift DE 2847581 C2, Deutsches Patentamt, 1987

[GRIS82] Etablissements Griset:Anordnung einer Stranggießkokille zum

Stranggießen von Metallen

Patentschrift DE3240115 C2, Deutsches Patentamt 1982

[HANS05] Hanß, T.:

Gusseigenspannungen und elastische Verformung nach trennenden

Fertigungsschritten

Dissertation, TU München, 2005

[HART89] Hartmann, D.:

Erstarrung binärer Kupferlegierungen beim horizontalen Stranggießen

in Graphitkokille

Fortschrittsberichte VDI, Reihe 5, Nr. 158

[KATS79] Katschinski, U.: Stranggießkokille zum Mehrfachstranggießen von Drähten und Strängen mit kleinen Querschnitten aus Metall Patentschrift DE2948490, Deutsches Patentamt 1979 [KIND95] Kindler, A.: Feinkorngraphite, Moderne Werkstoffe und ihre technischen Anwendungen Band 119, Die Bibliothek der Technik, Landsberg/Lech, Verlag Moderne Industrie, 1995 Kuchling Horst, Taschenbuch der Physik, 16. Auflage, Fachbuchverlag [KUCH96] Leipzig, 1996 [OECH98] Öchsle, M.: Langfaserverstärkte Keramiken für Bauteilkomponenten in NE-Metallgießereien Dissertation, TU München, 1999 [OEHM82] Öhman, G.A.: An apparatus for the continuous casting of metal bars, pipes and sheets Patentschrift EP 0 062 676 B1, Europäisches Patentamt, 1982 [WOLF01] Wolf, A.: Kontinuierliche Horizontal-Stranggießmaschine für Aluminium. Aluminium, 77, 2001, 9, S. 646-651 [RICK05] Ricken, H. Honsel, C.: New Possibilities in the Simulation of Continuous Casting Processes with WinCast-Conti in: Continuous Casting, 2006, Wiley-CH, Weinheim [RICK06] Ricken. H.: Thermomechanisch gekoppelte Berechnung des horizontalen Stranggießens, Vortrag beim Internationalen WinCast® User Meeting in Roetgen am 6.4.2006 [SIGG04] Siggenauer, T.:

Simulationsgestützte Prozessoptimierung beim horizontalen

Sommerhofer, H.: "Continuous casting method" Patentanmeldung

Stranggießen von Kupfer-Zinn-Legierungen

Dissertation, TU München, 2004

WO2004/076096 A1, 2004

[SOMM04]

Leiter der Forschungsstelle

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann

Projektleiter

Dipl.-Ing. Hartmut Ricken