

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Mikrostranggießen von Kleinstprofilen

Der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Elke Bombach

geboren am 21. Januar 1956

in Kleinhartmannsdorf

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast, TU Bergakademie Freiberg
Prof. Dr.-Ing. habil. Bertram Hentschel, TU Bergakademie Freiberg
Prof. Dr. Lars Arnberg, NTNU Trondheim

Tag der Verleihung: 02. April 2004

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin des Lehrstuhls Hütten- Gießerei- und Umformmaschinen am Institut für Maschinenbau der TU Bergakademie Freiberg. Sie resultiert aus einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast gilt mein besonderer Dank. Für die freundliche Förderung, die wissenschaftliche Betreuung sowie für alle Anregungen zu dieser Arbeit danke ich ihm ganz herzlich.

Den beiden Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bertram Hentschel und Herrn Prof. Lars Arnberg Ph. D. möchte ich danken, dass sie dieses Amt und die damit verbundene Mühe auf sich genommen haben.

Herrn Prof. Hentschel danke ich außerdem sehr für fachliche Diskussionen und seine wertvollen Hinweise und Anregungen zur Verbesserung des Manuskripts.

Für die Unterstützung bei der Erarbeitung der physikalischen Grundlagen bin ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Jochen Monecke und Herrn Dr. Wolfgang Cordts sehr dankbar.

Bei Herrn Klaus Löser und Herrn Uwe Engmann bedanke ich mich für die vielfältige Hilfe und das Engagement bei der Realisierung der Versuchsanlage.

Frau Carola Schwartz danke ich sehr für die gewissenhafte Durchführung und Dokumentation eines großen Teils der Experimente.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei all denjenigen, die mich ermutigt und motiviert haben, die für die Diskussion größerer und kleinerer Probleme Zeit aufbrachten und durch Korrekturen zum besseren Verständnis der Arbeit beitrugen.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meiner Familie. Meinem Mann und meinem Sohn danke ich herzlich für ihr Verständnis und ihre Geduld sowie für die verlässliche Unterstützung und den steten Rückhalt.

INHALTSVERZEICHNIS

SYMBOLVERZEICHNIS	IV	
1	MOTIVATION	1
2	LITERATURAUSWERTUNG ZUM STAND DER TECHNIK	7
2.1	Fertigungsverfahren zur Erzeugung von Mikrostrukturen	7
2.2	Fertigungsverfahren zur Herstellung strangförmiger Produkte	11
2.2.1	Umformverfahren Strangpressen, Drahtziehen, Walzen	11
2.2.2	Urformverfahren Stranggießen und Rascherstarrungsverfahren	12
2.3	Das Stranggießverfahren nach Ohno	13
2.3.1	Verfahrensprinzip	13
2.3.2	Vorteile und Anwendungen	15
3	ZIELSTELLUNG	19
4	MODELLHAFTE BESCHREIBUNG DES HORIZONTALLEN MIKROSTRANGGIEßVERFAHRENS	21
4.1	Verfahrensprinzip	21
4.2	Schmelzefluss und Formfüllung	22
4.3	Erstarrungsvorgang und Kühlbedingungen	26
4.3.1	Theoretische Grundlagen zur Berechnung von Erstarrungsvorgängen	26
4.3.2	Wärmetransport bei der Strangerstarrung	30
4.3.3	Berechnung der Position der Erstarrungsfront	35
4.3.4	Einfluss der Profilgeometrie	36
4.3.5	Einfluss der Kühlbedingungen	38
4.4	Wirkung der Prozessparameter	42

5	MIKROSTRANGGIEßAPPARATUR	45
5.1	Aufbau und Funktionsweise der Apparatur	45
5.2	Schmelzsystem und Formtemperierung	47
5.3	Gießform	48
5.4	Kühlsystem	50
5.5	Strangabführung	54
5.6	Steuer-, Regel- und Datenerfassungssystem	55
6	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	58
6.1	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	58
6.2	Grundlagenuntersuchungen	60
6.3	Analyse der technologischen Parameter beim Gießen von Kreisprofilen	61
6.3.1	Untersuchungsschwerpunkte	61
6.3.2	Eingrenzung des Experimentierfeldes	62
6.3.3	Ermittlung der Haupteinflussgrößen	64
6.4	Untersuchungen zur Charakterisierung des Temperaturverlaufs in Gießrichtung	67
7	MÖGLICHKEITEN DER PROZESSSTEUERUNG	75
7.1	Steuermodelle	75
7.2	Prozesssteuerung mit Hilfe eines empirischen Modells	76
7.2.1	Modellentwicklung	76
7.2.2	Prozesssteuerung	77
7.3	Prozesssteuerung mit Hilfe eines analytischen Modells	79

8	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	84
8.1	Profilformen und Abmessungen	84
8.2	Werkstoffe und Gefügestruktur	85
8.3	Maßgenauigkeit und Profilausprägung	86
8.3.1	Kreisprofile	86
8.3.2	Sternprofile	88
8.3.3	Vierkantprofile	89
8.4	Oberflächengüte	90
8.5	Einfluss abnehmender Profilquerschnitte	94
9	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE WEITERENTWICKLUNG DER VERSUCHSAPPARTUR	98
10	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	100
11	LITERATURVERZEICHNIS	103
12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	113
13	TABELLENVERZEICHNIS	116
14	ANHANG	117
14.1	Abbildungen	117
14.2	Tabellen	127
14.3	Zeichnungen	134

SYMBOLVERZEICHNIS

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>	<u>Einheit</u>
A	Fläche	mm
A_{Bad}	Oberfläche des Schmelzbades	mm ²
A_{Form}	Querschnitt des Formkanals	mm ²
A_K	Kontaktfläche	mm ²
A_q	Querschnittsfläche	mm ²
L_{Abzug}	Länge des abgezogenen Gussstranges	
Q	Wärme	J
Q_E	bei der Erstarrung frei werdende Wärme	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{Q}_E	Wärmestrom der bei der Erstarrung frei werdenden Wärme	W
\dot{Q}_K	Konvektionsstrom	W
\dot{Q}_L	Wärmestrom in der Schmelze	W
\dot{Q}_S	Wärmestrom im Gussstrang	W
T	Temperatur	° C
T_{Bad}	Temperatur des Schmelzbades	° C
T_E	Erstarrungstemperatur	° C

Symbolverzeichnis

T_{Form}	Temperatur der Form	° C
$T_{Kühl}$	Temperatur des Kühlbades	° C
T_L	Temperatur der Schmelze in der Form	° C
T_O	Temperatur der Oberfläche des Gussstranges	° C
T_S	Temperatur des Gussstranges	° C
T_U	Umgebungstemperatur	° C
U	Umfang	mm
V	Volumen	m ³
\dot{V}_0	Volumenstrom bei Absenkung des Schmelzbades,	mm ³ /s
\dot{V}_1	Volumenstrom im Formkanal	mm ³ /s
a	Temperaturleitfähigkeit	m/s ²
c	spezifische Wärmekapazität	J/kg K
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/kg K
d	Durchmesser	mm
h_0	Niveau des Schmelzpegels	mm
h_1	Gießniveau	mm
h_E	spezifische Erstarrungsenthalpie	J/kg
n	flächennormale Raumrichtung	mm
l	Länge	mm
p_0	Umgebungsdruck	Pa

Symbolverzeichnis

p_l	Druck im Formkanal	Pa
p_s	Schweredruck	Pa
\tilde{q}	Wärmequelle oder -senke	W/m ²
s	Strangdicke	mm
t	Zeit	s
t_0	Initialwert der Zeit	s
u	Schleppgeschwindigkeit	mm/s
v_0	Strömungsgeschwindigkeit beim Absinken des Schmelzpegels	mm/s
v_g	Gießgeschwindigkeit	mm/s
v_F	Geschwindigkeit eines strömenden Fluids	mm/s
v_l	Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze im Formkanal	mm/s
w	Anströmgeschwindigkeit	m/s
x	Koordinate	mm
x_0	Initialwert der x-Koordinate	mm
z	Koordinate	mm

Griechische Symbole

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>	<u>Einheit</u>
Δh	Höhe des Schmelzpegels	mm
Δp_V	Druckverlust	Pa

Symbolverzeichnis

α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
Θ	Übertemperatur	K
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
λ_F	Wärmeleitfähigkeit des Kühlfluids	W/mK
λ_L	Wärmeleitfähigkeit der Schmelze	W/mK
λ_S	Wärmeleitfähigkeit in der festen Phase	W/mK
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ_F	Dichte des Kühlfluids	kg/m ³
ρ_L	Dichte der Schmelze	kg/m ³

Indizes

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>
0	Initialwert
1	Zustand eins
<i>Abzug</i>	Abzugslänge
<i>Bad</i>	Schmelzbad
E	Erstarrung
F	Fluid
<i>Form</i>	Form
g	gießen

K	Kontakt
$Kühl$	Kühlung
L	liquid
lam	laminar
O	Oberfläche
p	Druck
q	Querschnitt
S	solid
U	Umgebung
$turb$	turbulent
V	Verlust

Operatoren

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>
∂	Partielle Ableitung
∇	Nabla Operator

Dimensionslose Kenngrößen

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>
Nu	Nusseltzahl
Re	Renoldszahl
Pe	Pecletzahl

Pr Prandtlzahl

1 MOTIVATION

In den letzten Jahren hat sich die Mikrotechnik zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt. Auch für die Zukunft wird ein steigender Bedarf an mikrotechnischen Produkten prognostiziert. Insbesondere Automobil-, Kommunikations- und Informationstechnik, Luft- und Raumfahrt sowie die Medizintechnik gelten als wachsende Märkte für den Einsatz mikrotechnischer Systeme /6, 19/.

In vielen Bereichen des menschlichen Lebens werden mikrotechnische Produkte bereits als selbstverständlich hingenommen und genutzt.

In modernen Fahrzeugen sorgen beispielsweise eine Vielzahl mikrotechnischer Sensoren als Bestandteile von Fahrassistenzsystemen wie Motorsteuergeräten, Abstandsüberwachungssystemen und Klimaanlage für Sicherheit und Fahrkomfort. Sie werden als Beschleunigungssensoren zur Auslösung von Airbags, als Bremsverschleißsensoren zur kontinuierlichen Überwachung des Verschleißes der Bremsscheiben oder als Wegmesssensoren in Einparksystemen eingesetzt /74/.

In der Kommunikationstechnik wird der Trend zur Miniaturisierung bei gleichzeitig wachsender Funktionalität besonders bei Mobiltelefonen deutlich. Grundlage hierfür ist der zunehmende Einsatz von Komponenten der Feinwerk- und Mikrotechnik. Auch im Bereich der Bürotechnik finden zunehmend mikrotechnische Produkte Verwendung /6/.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet der Mikrotechnik ist die Medizintechnik. Neue Operationstechniken der minimalinvasiven Chirurgie, bei denen der Operateur mit Hilfe von Endoskopen nur durch knopflochgroße Öffnungen im Inneren des Körpers agiert, erfordern entsprechend kleine Instrumente. Für ihre Herstellung werden mikrotechnische Verfahren angewendet. Gleiches gilt auch für andere Bereiche der Medizintechnik. Die Fabrikation von Insulinpumpen, Herzschrittmachern und Hörgeräten verlangt ebenfalls den Einsatz mikrotechnische Bauteile und Verfahren /6/.

Mikrotechnische Produkte müssen nicht immer sehr kleine Gesamtabmessungen besitzen. Auch Bauteile größerer Abmessungen zählen dazu, wenn sie z. B. mikrostrukturierte Oberflächen aufweisen. Hier wird zwischen Mikrosystemen und Mikrostrukturprodukten unterschieden /68/. Ein Beispiel dafür sind mikrostrukturierte Metallfolien. Sie dienen als Oberflächenverkleidungen für Luft- und Raumfahrzeuge zur Reduzierung von Strömungsverlusten und somit zum Sparen von Treibstoff /6/, oder werden als Reflektorfolien für Verkehrsschilder benutzt /90/. Mikrostrukturierte Folien werden aber auch in kleinsten Abmessungen in Katalysatoren eingebaut /54/

Überwogen früher vor allem Produkte, die aus Silizium und Halbleiterwerkstoffen hergestellt wurden, so reicht die Werkstoffpalette heute von Metallen über Kunststoffe hin bis zu Glas und keramischen Werkstoffen. Sogar organische Materialien, wie organische Halbleiter werden mittlerweile in Mikrosystemen (Displays /2/ und Sensoren /24/) eingesetzt.

Mikrosysteme und mikrostrukturierte Bauteile sind sowohl Bestandteil von Massengütern als auch von Produkten, die nur als Prototypen bzw. in kleineren Stückzahlen gefertigt werden.

Die Massen- und Großserienfertigung mikrotechnischer Komponenten wird derzeit immer noch vor allem von den aus der IC-Technologie bekannten Siliziumätztechniken und lithografischen Verfahren sowie den daraus weiterentwickelten Technologien, wie z. B. Ligaverfahren (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) /5/, und Mikrospritzgießverfahren, die als letzter Prozessschritt beim LIGA-Verfahren für die Serien- und Großserienfertigung hochpräziser komplexer Mikroteile aus Metallen (MIM: Metal Injection Molding /17/), Keramikwerkstoffen (CIM: Ceramic Injection Molding /17/) und Kunststoffen eingesetzt werden, dominiert.

Für die Klein- und Mittelserienfertigung mikrotechnischer Bauteile sind diese Verfahren auf Grund der hohen Ausrüstungskosten nicht geeignet. Hierfür gewinnen Techniken, die auf konventionellen Fertigungsverfahren beruhen, wie z. B. die auf der Grundlage der klassischen Zerspanungsprozesse Fräsen, Bohren, Drehen und Schleifen entwickelten Mikrozerspanungsverfahren, Mikroerodierverfahren

(Draht- und Funkenerosion) und Laserbearbeitungstechniken zunehmend an Bedeutung /15, 29/.

Vor dem Hintergrund eines wachsenden Bedarfs an mikrotechnischen Produkten wurden in den letzten Jahren verschiedene anwendungsbereite Techniken für die Fabrikation mikrostrukturierter Bauteile entwickelt sowie Forschungsergebnisse zu neueren Verfahrensentwicklungen auf diesem Gebiet publiziert.

Gießverfahren spielen, mit Ausnahme der oben erwähnten Mikrospritzgießverfahren, für die Produktion mikrotechnischer Komponenten bisher noch eine untergeordnete Rolle, obwohl sie ein breites Formenspektrum erlauben und die Verarbeitung unterschiedlichster Werkstoffe zulassen.

Thema der vorliegenden Arbeit sind theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Stranggießen kleinster Profile mit mikrostrukturierten Profilquerschnitten, deren Querschnittsabmessungen und Profilausprägungen unter einem Millimeter liegen und die als Halbzeuge für Anwendungen in der Mikrotechnik eingesetzt werden können.

Zukünftige Einsatzgebiete und Anwendungsmöglichkeiten stranggegossener Mikroprofile sind auf folgenden Gebieten zu erwarten:

1. Halbzeuge für die Fertigung mikromechanischer Bauteile

Stranggegossene Mikroprofile könnten, wenn der Profilquerschnitt in Form und Abmessungen der Geometrie mikromechanischer Bauteile entspricht, durch Trennen mit Hilfe geeigneter Trennverfahren (z. B. Drahterodieren) zu mikromechanischen Bauteilen weiterverarbeitet werden. Vorteilhaft wäre dieses Verfahren vor allem für die Herstellung von Bauteilen deren Aspektverhältnisse (Verhältnis von Längenausdehnung zu lateraler Ausdehnung) die bei Abformverfahren erreichbaren Aspektverhältnisse überschreiten. Geeignet dafür sind vor allem Bauteile mit prismatischen Querschnitten wie der in Abbildung 1.1 dargestellte Läufer samt den dazugehörigen Führungsschienen.

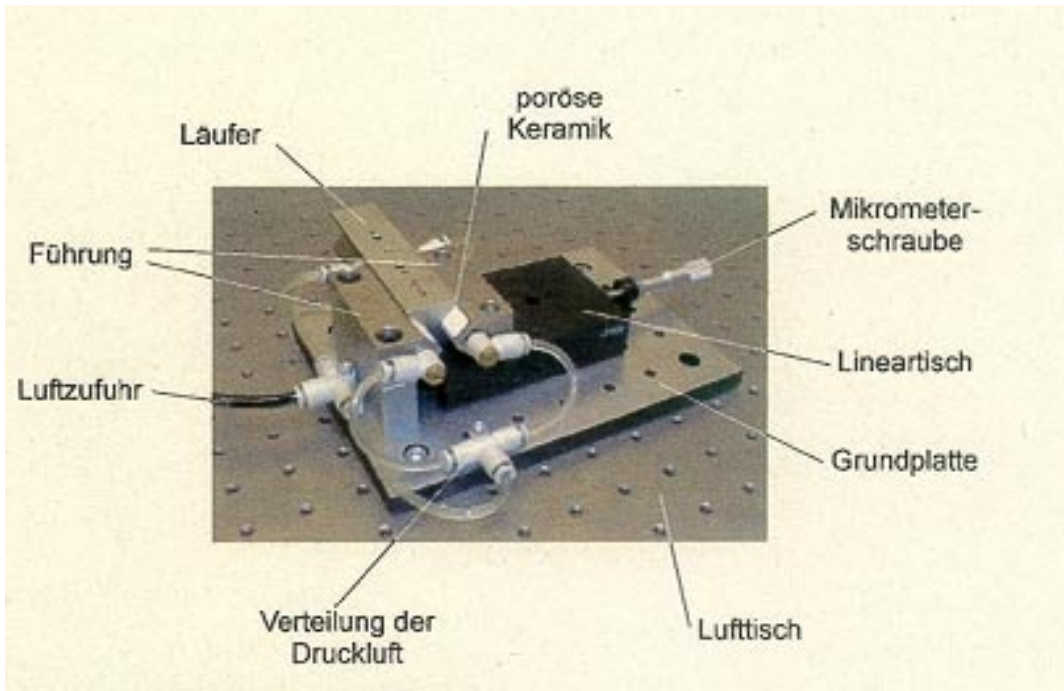


Abbildung 1.1: Funktionsmuster einer Mikroführung (Länge 8,4 mm) /14/

Wenn es gelingt, Zahnradprofile zu gießen könnten aus diesen Mikrozahnräder, wie in der Abbildung 1.2 zu sehen, oder Wellen für Mikrogetriebe, Abbildung 1.3, erzeugt werden.

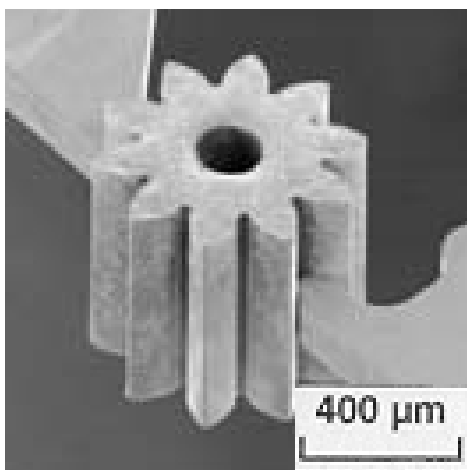


Abbildung 1.2: Mikrozahnrad (Institut für Mikrotechnik Mainz) /5/

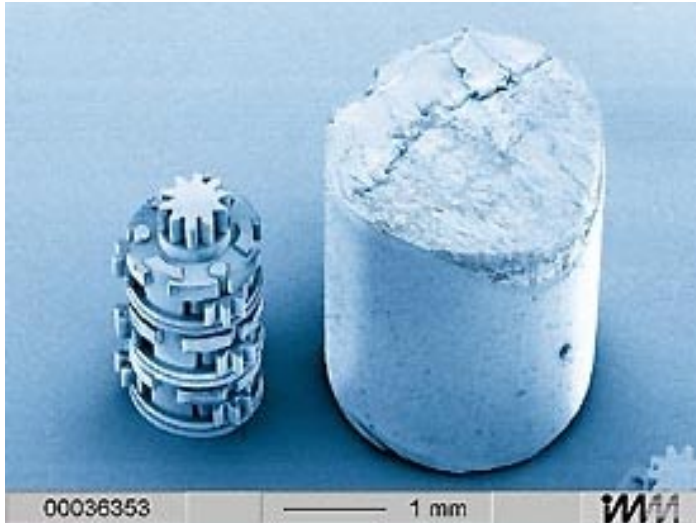


Abbildung 1.3: Mikrogetriebe (Institut für Mikrotechnik Mainz)

2. Elektroden für das Mikroerodieren

Abbildung 1.4 und Abbildung 1.5 zeigen zum Mikroerodieren eingesetzte Elektroden. Die Profilform dieser Elektroden wird durch Abrichten an einer Opferelektrode erzeugt. Für die Senkelektrode in Abbildung 1.4 wurden als Ausgangsmaterial Zylinderstäbe von einem Millimeter Durchmesser verwendet und auf einer Senkerodiermaschine mit Hilfe eines Hartmetallstabes, der als Opferelektrode diente, auf das geforderte Maß gebracht. Dieser Abrichtprozess ist sehr zeitintensiv. Hier wären durch den Einsatz gegossener Mikroprofile aus Kupfer möglicherweise Zeiteinsparungen erzielbar.

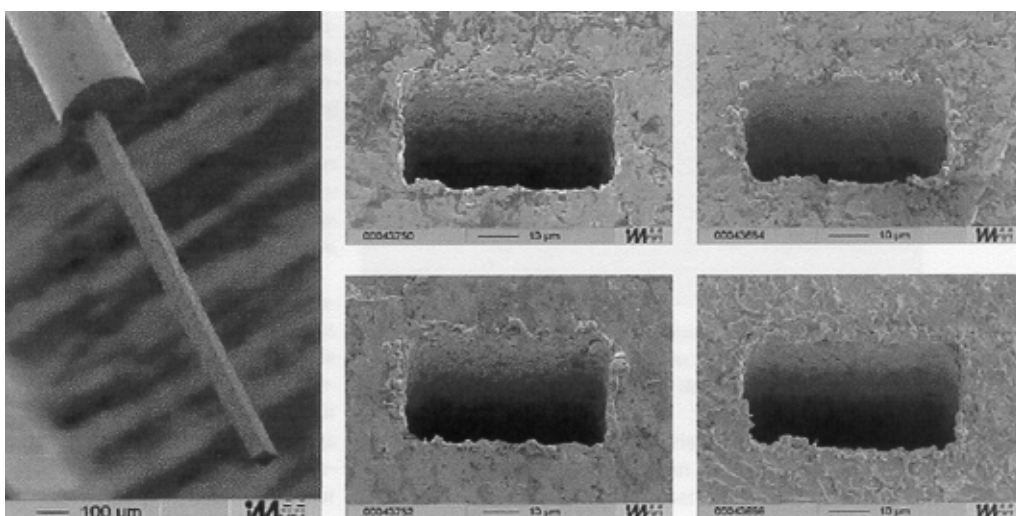


Abbildung 1.4: Elektrode für das Erodieren senken rechteckiger Durchbrüche /50/

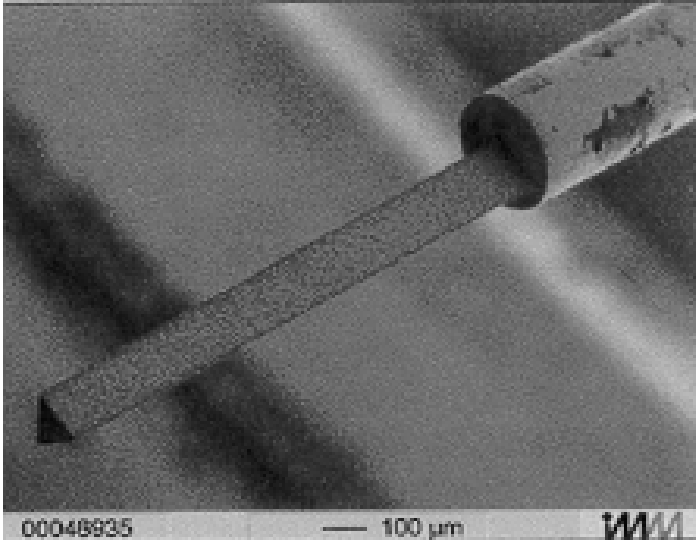


Abbildung 1.5: Dreieckselektrode zum Mikrosenkerodieren /94/

Ebenso könnte stranggegossener Profildraht aus Kupfer mit mikrostrukturierten Querschnittsabmessungen für das Mikrodrahterodieren spezieller Profilformen eingesetzt werden.

3. Verwendung als Profildraht zum Hartlöten

Auch für Anwendungen des Hartlötens, bei denen profilierter Lötendraht (Abbildung 1.6) in sehr kleinen Abmessungen benötigt wird, wären gegossene Mikroprofile geeignet.

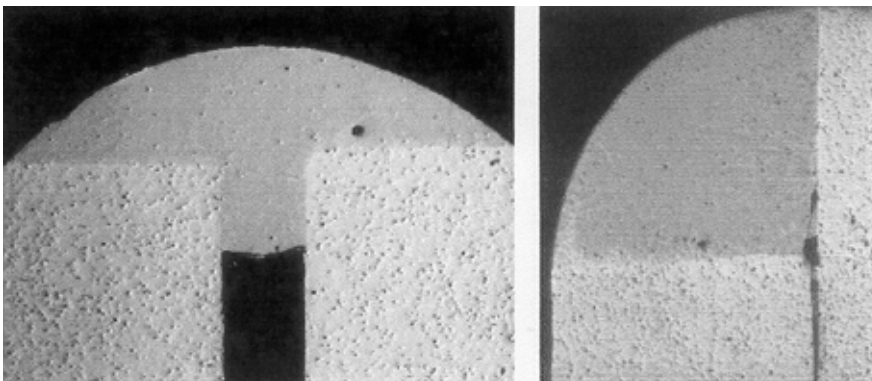


Abbildung 1.6: Laserstrahlhartlötverbindungen an Aluminium /14/

Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass für die Verwendung kleinster Profile ein breites Anwendungspotenzial zu erkennen ist.

2 LITERATURAUSWERTUNG ZUM STAND DER TECHNIK

2.1 Fertigungsverfahren zur Erzeugung von Mikrostrukturen

Für die Herstellung mikrotechnischer Bauteile kommen derzeit vorwiegend die in Abbildung 2.1 dargestellten Verfahren zum Einsatz. Sowohl hochspezialisierte Sonderverfahren als auch Techniken, die von konventionellen Fertigungsprozessen abgeleitet wurden, sind mittlerweile Stand der Technik.

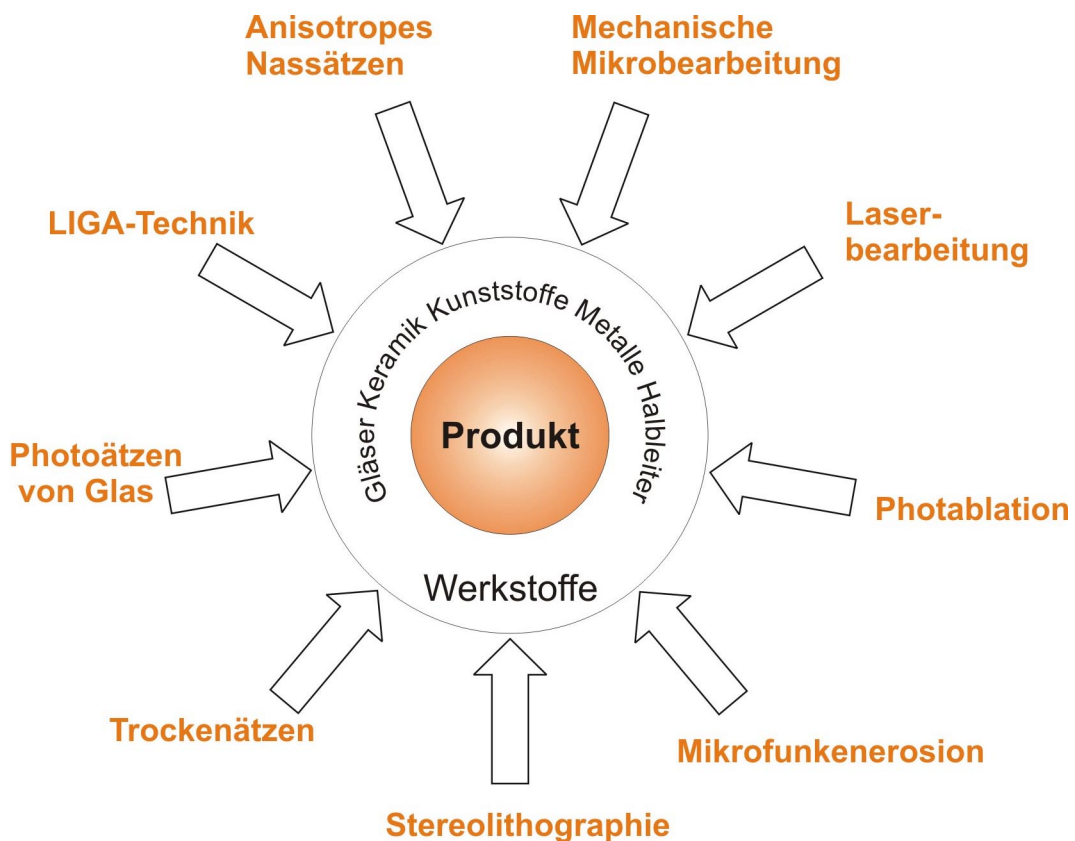


Abbildung 2.1: Herstellungsverfahren der Mikrotechnik nach /6/

Bei den technologisch stark spezialisierten Sonderverfahren der Mikrotechnik sind oft prozessbedingte physikalische Effekte und ihr Einfluss auf den zu bearbeitenden Werkstoff eng miteinander verknüpft. Sie bedingen umfangreiche teure Aus-

rüstungen -auch in speziellen Umgebungen (wie z. B. Reinsträume, Vakuunkammern)- und erfordern hochqualifiziertes Personal. Ihre Durchführung wird erst bei großen Stückzahlen wirtschaftlich. Häufig sind sie als Firmen-know-how für kleinere und mittelständische Firmen schwer verfügbar.

Neuere Verfahrensentwicklungen verbinden Verfahrenselemente aus der Halbleitertechnologie mit konventionellen Fertigungsmethoden. Hier ist besonders das Mikrospritzgießen in Verbindung mit dem LIGA-Verfahren zu nennen.

Siliziumätztechniken

Siliziumätztechniken beruhen auf der selektiven und anisotropen Ätzbarkeit von Silizium und erlauben die Herausarbeitung feinsten geometrischer Strukturen, die auf lithografischer Basis durch Maskierung vorgegeben werden. Je feiner diese Strukturen aufgelöst werden sollen, desto höhere Anforderungen werden an die Lithographieverfahren gestellt. In Abhängigkeit von der Kristallorientierung des Siliziums sind Strukturabmessungen bis zu wenigen Mikrometern erzielbar /30/. Diese Abhängigkeit von der Kristallstruktur beschränkt allerdings auch die Vielfalt der produzierbaren Bauteilgeometrien /93/.

Aufbautechniken (LIGA-Verfahren)

LIGA-Verfahren erlauben die Fertigung extrem kleiner und präziser Teile aus Metallen und Kunststoffen. Bei dieser Technik werden strahlenphysikalisch leicht veränderbare Werkstoffe mit Masken abgedeckt und einer Röntgen- oder Laserstrahlung ausgesetzt. Durch Entwickeln entfernt man selektiv entweder die abgedeckten oder freiliegenden Bereiche. Die entstandenen Freiräume können galvanisch mit einem metallischen Werkstoff gefüllt werden. Nach Entfernen des Resistwerkstoffes liegt eine Gussform vor, mit deren Hilfe dann durch Galvanoabformung oder Mikrospritzgießen mehrere Abgüsse hergestellt werden können /3, 5, 17/

Laserbearbeitungstechniken

In der Mikrotechnik ist das Schweißen, Lüten, Schneiden, Bohren und Abtragen mittels Laser Stand der Technik /1, 42/. Vorwiegend werden dazu Festkörper- und Gaslaser eingesetzt. Die Fertigung mikrostrukturierter Bauteile mit Hilfe von Eximerlasern steht am Beginn der industriellen Anwendung /6, 9, 61/.

Elektronenstrahlverfahren

In der IC-Technologie und Mikromechanik werden die Elektronenstrahlverfahren vor allem zur Herstellung lithografischer Masken angewendet. Sie eignen sich aber auch zum Materialabtragen im Sinne des Bohrens, Schneidens und Ritzens sowie für präzise Punkt- oder Nahtschweißungen. Bei dieser Technik werden stark beschleunigte Elektronen (Elektronenstrahlen) unter Vakuum auf die zu bearbeitenden Werkstücke gerichtet. In Abhängigkeit der Strahlintensität wird das Material verdampft oder verschweißt. Die kleinsten erreichbaren Brennfleckdurchmesser liegen dabei unter 1 µm /30/.

Mikrozerspanungsverfahren

Mikrozerspanungsverfahren beruhen auf den konventionellen, spanenden Fertigungsverfahren Drehen, Schleifen, Fräsen und Bohren. Sie bieten ein breites Spektrum herstellbarer Formen und sind bei kleinen Stückzahlen flexibler als Ätztechnologien. Allerdings erfordern die kleinen Werkzeugabmessungen mit Durchmessern unter einem Millimeter spezielle Werkzeugmaschinen mit sehr hohen Spindeldrehzahlen, um auch bei solch kleinen Abmessungen die erforderlichen Schnittgeschwindigkeiten zu erreichen /64, 93/.

Mikroerodierverfahren (EDM-Techniken)

Erodierverfahren gewinnen für die mikrotechnische Fertigung zunehmend an Bedeutung. Dies gilt sowohl für Draht- als auch für Senkerosionsverfahren. Da sie die hochgenaue Bearbeitung von Stahl und Hartmetallen erlauben, werden sie vor

allem im Präzisionsformenbau, wie z. B. für die Herstellung von Mikrospritzgussformen eingesetzt. Mikroerodierverfahren eignen sich wegen des relativ hohen Werkzeugverschleißes und langer Bearbeitungszeiten nur für die Einzel- und Kleinserienfertigung /6, 94/.

Pulverspritzgießen

Das Pulverspritzgießen von Mikrokomponenten aus Metall und Keramik wird zur Erweiterung der Werkstoffpalette für mikrotechnische Bauteile entwickelt. Durch Mikro-Pulverspritzgießen, Entbindern und Sintern können mikrostrukturierte Teile aus Metall oder Keramik mit 50 µm Wanddicke und Strukturdetails von 10 µm bei maximalen Oberflächenqualitäten von $R_a = 40$ nm sowie minimal 0,25 mg Bauteilgewicht hergestellt werden /65, 66, 67, 62/.

Extrusion von Mikroprofilen aus Kunststoff

Untersuchungen zur Extrusion von Mikroprofilen aus Kunststoff (Polystyrol) für die Herstellung von Filtern, Mikroprofilsträngen oder verlorenen Formen für metallische Hohlprofile stehen noch am Anfang /92/.

Präzisionsgießverfahren

In /96, 95/ wird ein Mikropräzisionsgießverfahren beschrieben, dass vom konventionellen Präzisionsguss abgeleitet ist und zur Zeit noch erforscht wird. Bei diesem Verfahren werden Mikromodelle aus Kunststoff an ein Angussystem aus Wachs montiert und anschließend in Keramik eingebettet. Beim Erhitzen schmilzt das Modell aus und wird pyrolysiert. In die Hohlform aus Keramik erfolgt dann der Abguss des erschmolzenen Metalls im Schleuderguss- oder Vakuumdruckgussverfahren. Nach Reinigung des erstarrten Gusskörpers werden die Komponenten vereinzelt /95/.

Neben keramischen Formen werden auch LIGA-Strukturen abgeformt, deren laterale Dimensionen etwa 50 µm betragen.

Als Gießwerkstoffe kommen Edelmetalllegierungen und Aluminiumbronzen zum Einsatz. Die mit diesen Werkstoffen erreichbaren Oberflächenrauheitswerte liegen bei $R_a < 0,5 \mu\text{m}$ /96/.

Mikroprägen

Prägeverfahren eignen sich zum Strukturieren flächiger Teile, die in großen Stückzahlen benötigt werden. Das Heißprägen von Kunststoffen ist in der Mikro-technik bereits Stand der Technik /6/. Der Einsatz von Prägeverfahren für die Strukturierung metallischer Werkstoffe wird zur Zeit erforscht. In /71/ werden in Aluminium geprägte Gitterstrukturen mit Kanalbreiten von 0,1 mm Breite vorgestellt.

2.2 Fertigungsverfahren zur Herstellung strangförmiger Produkte

2.2.1 Umformverfahren Strangpressen, Drahtziehen, Walzen

Strangpressen

Durch Strangpressen werden Profile mit nahezu unbegrenztem Formenspektrum hergestellt. Bevorzugter Werkstoff für dieses Verfahren sind Aluminiumlegierungen, aus denen besonders dünnwandige Profile gepresst werden können. Die Abmessungen (Durchmesser des umschreibenden Kreises) der kleinsten, derzeit erzeugbaren Hohlprofile liegen zwischen 7 und 10 mm mit Wanddicken von 0,2 mm bis 0,5 mm und bei Vollprofilen bei minimal 5 mm Durchmesser des umschreibenden Kreises. Hierfür werden Maschinen, die Presskräfte bis zu 16 MN realisieren können, benötigt /27/.

Drahtziehen

Mit Hilfe von Diamantziehsteinen können Drähte mit kreisförmigem Querschnitt und Durchmessern im Mikrometerbereich gezogen werden. In größeren Abmessungen (oberhalb 1 Millimeter) sind auch profilierte Drähte herstellbar. Hierfür werden Hartmetallziehsteine verwendet. Das erzielbare Formenspektrum bleibt aber aufgrund der in den Ziehsteinen auftretenden hohen Tangentialspannungen auf einfache Profilformen begrenzt /72, 91/.

Walzen

Obwohl das Walzen von Profilen sehr kleiner Abmessungen, wie sie zum Beispiel für Brillengestelle benötigt werden, bereits Stand der Technik ist, werden Walzverfahren für die Herstellung mikrostrukturierter Profile noch nicht eingesetzt. Die Ursachen dafür liegen darin begründet, dass bei relativ großem Kraftbedarf eine hohe mechanische Präzision realisiert werden muss.

2.2.2 Urformverfahren Stranggießen und Rascherstarrungsverfahren

Stranggießverfahren

Konventionelle Stranggießverfahren eröffnen interessante Möglichkeiten zur endabmessungsnahen Fertigung von Draht- und Stabmaterial direkt aus der Schmelze. Sie eignen sich sowohl zur Herstellung strangförmiger Produkte aus schwer umformbaren Werkstoffen, als auch zur Fabrikation solcher Erzeugnisse, bei denen das direkte Gießen auf Grund von Querschnittsform und Abmessungen zu signifikanten Kosteneinsparungen führt. Die kleinsten durch konventionelles Stranggießen derzeit wirtschaftlich produzierbaren Querschnittsabmessungen liegen jedoch bei mindestens fünf Millimetern Durchmesser /87/.

Rascherstarrungsverfahren

Verfahren der Rascherstarrungstechnologie wurden zur Herstellung von Metallfolien und -bändern entwickelt. Während sie zum direkten Gießen von Flachprodukten mit sehr kleinen geometrischen Abmessungen bereits industriell genutzt werden /63/, wurden in neueren Forschungsarbeiten erste Forschungsergebnisse zu Verfahrensentwicklungen für das endabmessungsnahe Gießen von Drähten, deren Durchmesser unterhalb der minimalen Querschnittsabmessungen von Walzdraht liegen, vorgestellt /20, 21, 32, 31 /.

Sowohl das Schmelzspinnen in eine rotierende Flüssigkeit /31, 32/, als auch das „Shape-Flow-Casting“-Verfahren /20, 21/ ermöglichen die Herstellung von dünnen Drähten (Durchmesser < 3 mm) mit kreisförmigen Querschnitten direkt aus der Schmelze.

Beim erstgenannten Verfahren wird ein metallischer Freistrahle nach wenigen Millimetern aus einer Düse in eine rotierende Kühlflüssigkeit eingeleitet, wo er schnell erstarrt. Bei der zweiten Methode erstarrt der Freistrahle auf einer rotierenden, profilierten Substratoberfläche. Profilierte Querschnitte sind mit beiden Verfahren nicht herstellbar.

2.3 Das Stranggießverfahren nach Ohno

2.3.1 Verfahrensprinzip

Mitte der 80er Jahre wurde im Chiba-Institut in Japan von A. Ohno ein Kristallzüchtungsverfahren zur Herstellung von Einkristallbarren auf der Basis des Stranggießens entwickelt, mit dem auch sehr kleine Querschnittsabmessungen, die unterhalb der Abmessungen von konventionell gegossenen Strängen liegen, realisiert werden können.

Bei dieser, als OCC-Prozess (Ohno-Continuous-Casting-Prozess) bezeichneten und unter diesem Namen patentierten Technik, wird die Temperatur der Gießform

oberhalb der Erstarrungstemperatur des zu vergießenden Metalls gehalten, und der aus der Form abgeführte Strang direkt gekühlt.

Der infolge des Temperaturgradienten im Gussstrang initiierte Wärmestrom bewirkt die Unterkühlung der in der Kokille anstehenden Schmelze und bei entsprechenden Gießbedingungen erstarrt der Gussstrang innerhalb der Form nahe dem Formausgang.

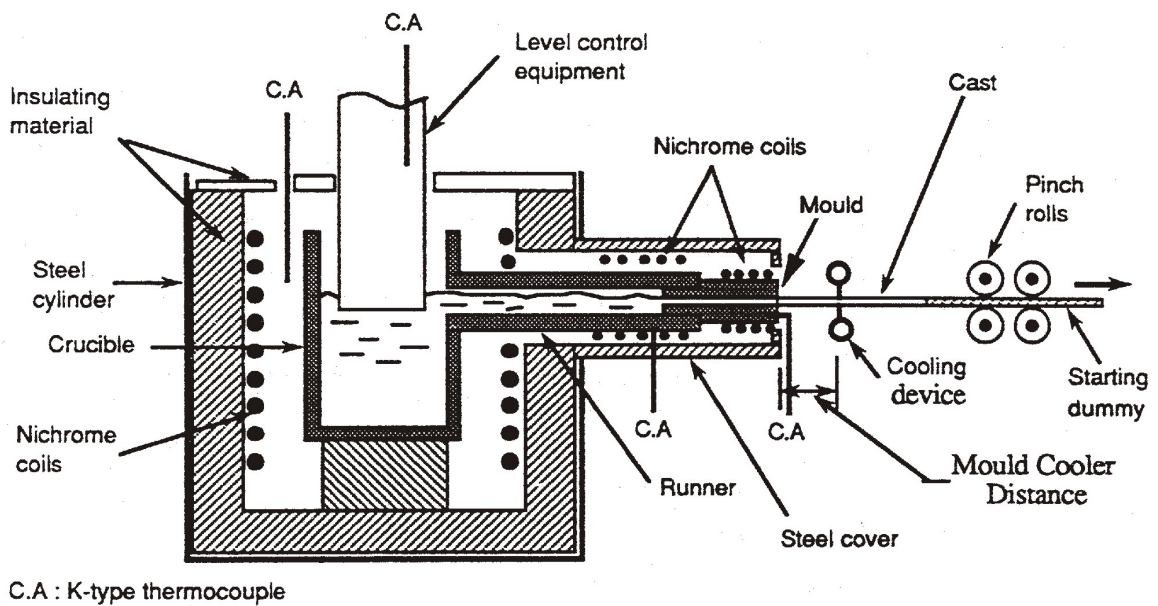


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des horizontalen OCC-Prozesses /10/

In der Literatur werden drei unterschiedliche Konfigurationen dieses Stranggießverfahrens beschrieben /59/. Neben dem am häufigsten verbreiteten horizontalen OCC-Verfahren (Abbildung 2.2) /11, 10, 76, 77, 80, 83/ werden vertikal wirkende Verfahren) /55, 98/ sowie eine spezielle Technik zum Bandgießen /60, 85/ genannt.

Abbildung 2.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau der in /10/ beschriebenen Variante. Die dort dargestellte Apparatur dient zum Gießen kreisrunder Zinnstäbe mit einem Durchmesser von 8,5 mm. Sie besteht aus einem widerstandsbeheizten Ofen, in dem das Gießmetall in einem Tiegel aus Graphit erschmolzen wird. Vom Schmelztiegel wird die Schmelze durch ein seitlich angebrachtes Graphitrohr in die Gießform geleitet. Diese besteht ebenfalls aus Graphit. Gießform und Zulauf werden durch eine separat geregelte Heizung temperiert. Eine Einrichtung, die den

Schmelzpegel im Tiegel mit Hilfe eines absenkbaaren Aluminiumklotzes reguliert, steuert den Schmelzezufluss in die Form. Zu Beginn des Gießvorganges wird, ähnlich wie beim konventionellen Stranggießen, eine Lanze an die in der Form stehende Schmelze angekoppelt und in Gießrichtung bewegt. Die Strangabführung erfolgt mit Hilfe von gegeneinander laufenden Rollen. Für die Kühlung des Gussstranges wird Wasser verwendet. Es wird durch mehrere kreisförmig angeordnete Düsen direkt auf den Strang gesprüht.

Die meisten in der Literatur beschriebenen Anlagen benutzen, wie hier, Wasser als Kühlmittel. In /59/ wird allerdings auch die Möglichkeit der Strangkühlung mit Hilfe von Gasen erwähnt.

2.3.2 Vorteile und Anwendungen

Da die Temperatur der Gießform beim OCC-Prozess oberhalb der Erstarrungstemperatur des zu vergießenden Werkstoffes gehalten und nur der Strang gekühlt wird, erfolgt die Wärmeabfuhr parallel zur Gießrichtung.

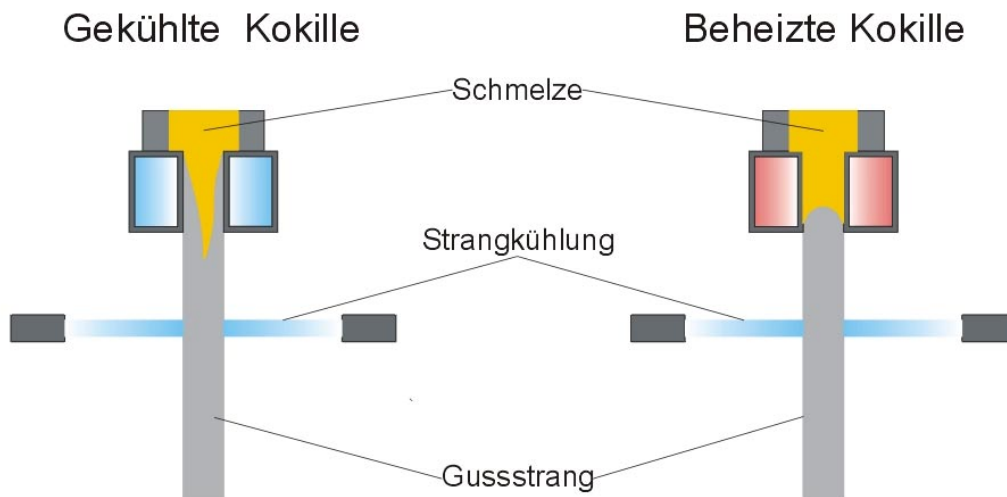


Abbildung 2.3: Vergleich der Erstarrungsmechanismen von konventionellen Stranggießverfahren und OCC-Prozess nach /10/

Daraus resultiert eine gleichgerichtete Erstarrung /81, 84/, und unter genau definierten Gießbedingungen ist sogar das Wachstum von Einkristallen möglich /84, 79/.

Die Entstehung von an der Wand anhaftenden Kristallisationskeimen, welche bei konventionellen, wassergekühlten Systemen in Richtung Strangmitte wachsen und so die Reibung zwischen Formwand und Oberfläche des Gussstranges verursachen, (Abbildung 2.3), wird verhindert, weil die Temperatur der Formwand höher als die Erstarrungstemperatur des Gießmetalls ist.

Das OCC-Verfahren bietet nach /10/ folgende Vorteile:

- Die erzeugten Produkte weisen wegen der verringerten Reibung zwischen Strangoberfläche und Kokillenwand eine saubere glatte Strangoberfläche auf.
- Die vergossenen Materialien sind weitgehend frei von Einschlüssen und Hohlräumen, weil die Erstarrung vom Forminneren ausgehend in Gießrichtung erfolgt.
- Unter definierten Gießbedingungen können einkristalline Gefügestrukturen erzeugt werden.
- Das OCC-Verfahren erlaubt das endabmessungsnahe Gießen unterschiedlicher Querschnittsgeometrien und ist für die Herstellung von Strängen kleiner Abmessungen besonders geeignet.

Industrielle Anwendungen dieses Verfahrens werden bisher nur aus Japan berichtet. Es wird dort zur Herstellung einkristalliner Kupferdrähte für Audio- und Videoanwendungen sowie zur Erzeugung von Drähten aus Aluminiumlegierungen, die beim Hartbeschichten von Oberflächen Anwendung finden, eingesetzt /10, 84/. Weitere Anwendungsmöglichkeiten, wie die Herstellung von Verbundmaterialien /84/, und Stäben aus Hartmetalllegierungen /98/, werden derzeit erforscht.

Forschungsarbeiten zur Thematik wurden vor allem von Soda, H., Motoyasu, G., Mc Lean, A. et al. an der Universität Toronto durchgeführt und publiziert /76 - 83/. In diesen Arbeiten werden die Prozessparameter für spezielle Anwendungsfälle

sowohl bezüglich ihres Einflusses auf die Produktqualität als auch im Hinblick auf den Prozess selbst analysiert. Entsprechende Untersuchungen wurden mit Hilfe von Experimenten zur Herstellung von

- Drähten aus reinem Zinn (\varnothing 2 mm /80/, \varnothing 8,5 mm /76/),
- bleilegierten Zinndrähten (Legierungsgehalt an Blei 2,5-22,5 %, \varnothing 10 mm) /82, 83/,
- Drähten aus Gold (\varnothing 8 mm) /10/,
- einkristallinen Kupferdrähten (\varnothing 4 mm) /79/, und (\varnothing 8 mm) /81/,
- Drähten aus Formgedächtnislegierungen (Cu-Al-Ni) mit gleichgerichteter Morphologie (\varnothing 2 mm) /52/ sowie
- einkristallinen Drähten aus Wismut und Wismutlegierungen (Bi-In-Sn) (\varnothing 1,5 mm bis 2 mm) /51, 13, 73/, durchgeführt.

Kim, M. et al. /38/, sowie Shimzu, T. et al. /75/, beschreiben die Erzeugung von Drähten aus Reinstaluminium (\varnothing 4 mm) /38/, und Aluminiumlegierungen zum Hartbeschichten (\varnothing 4 mm) /75/. In Forschungsarbeiten von Yamazaki, H. et al. wurden Untersuchungen zum Stranggießen von Profilstäben (Kreis-, Vierkant- und Dreieckprofile) aus Hartmetalllegierungen, in Querschnittsausdehnungen von etwa 10 Millimetern, veröffentlicht /98/.

In den oben zitierten Arbeiten werden folgende Parameter als prozessrelevante Größen genannt und ihr Einfluss auf die Strangqualität untersucht:

- die Temperatur im Schmelzbad (Badtemperatur),
- die Temperatur der Gießform (Formtemperatur),
- die Kühlbedingungen und
- die Gießgeschwindigkeit.

Die Kühlbedingungen werden durch das Kühlmedium, seine Strömungsgeschwindigkeit sowie durch den in der Literatur als Kühlabstand bezeichneten Abstand zwischen Formausgang und Position des auf den Strang auftreffenden Kühlstrah-

les charakterisiert. Die genannten Prozessparameter beeinflussen sich gegenseitig /76, 77/.

Die Ausbildung der Gefügestruktur wird nach /79/ vor allem von den thermischen Bedingungen in der Kokille sowie von der Gießgeschwindigkeit bestimmt.

Die Oberflächenqualität des Stranges hängt nach Soda, H. /76-83/ außerdem wesentlich von der Oberflächenbeschaffenheit des Formkanals ab.

Höhe und Gleichmäßigkeit des metallostatischen Druckes am Formausgang wirken sich nach Soda, H. /76/ und Kim, M. /39/ vor allem auf die Kontinuität des Gießprozesses aus.

3 ZIELSTELLUNG

Das im Abschnitt 2.3. vorgestellte Stranggießverfahren nach Ohno erlaubt das Stranggießen sehr kleiner Querschnitte. Allerdings behandeln die meisten, der zu diesem Verfahren vorliegenden Veröffentlichungen Probleme der Gefügeausbildung bei der Strangerstarrung, insbesondere steht die Erzeugung einkristalliner Strukturen im Mittelpunkt des Interesses. Publikationen über Anwendungen des OCC-Verfahrens zur Herstellung mikrostrukturierter Profile sind bisher nicht bekannt.

Es wird davon ausgegangen, dass eine Weiterentwicklung und Anwendung dieses Verfahrens für das Mikrostranggießen von Kleinstprofilen aus Metall das Spektrum vorhandener Verfahren sinnvoll ergänzen könnte.

Die vorliegende Arbeit möchte einen Beitrag zur Entwicklung eines solchen Verfahrens und der dazu erforderlichen Anlagentechnik leisten.

Ziel ist es, das Mikrostranggießen von Kleinstprofilen unter Aspekten der Grundlagen- und Anwendungsforschung zu untersuchen. Die wesentlichen Verfahrensgrößen sollen analysiert und das Prozessverständnis soll vertieft werden. Es ist eine Apparatur zu konzipieren, die das Gießen mikrostrukturierter Profile mit verschiedenartigen Querschnittsformen erlaubt und die Verarbeitung unterschiedlicher Werkstoffe zulässt. Außerdem sollen Möglichkeiten der Prozesssteuerung sondiert werden.

Für die Lösung dieser Problemstellung werden folgende Teilaufgaben selektiert:

- Darstellung der Verfahrensgrundlagen; hierzu wird der Mikrostranggießprozess modellhaft beschrieben und die Wirkung der wichtigsten Prozessgrößen erörtert,
- Entwicklung, Aufbau und Erprobung einer Versuchsanlage zum Mikrostranggießen von Kleinstprofilen,

- Durchführung von Grundlagenuntersuchungen zum Gießen von Kleinstprofilen aus niedrig schmelzenden Metallen,
- Untersuchungen zur Erfassung und Analyse der Prozessparameter sowie
- Prüfung der Möglichkeiten der Prozesssteuerung.

4 MODELLHAFTE BESCHREIBUNG DES HORIZONTALEN MIKROSTRANGGIEßVERFAHRENS

4.1 Verfahrensprinzip

Die Prinzipskizze (Abbildung 4.1) veranschaulicht das Verfahrensprinzip des Mikrostranggießverfahrens.

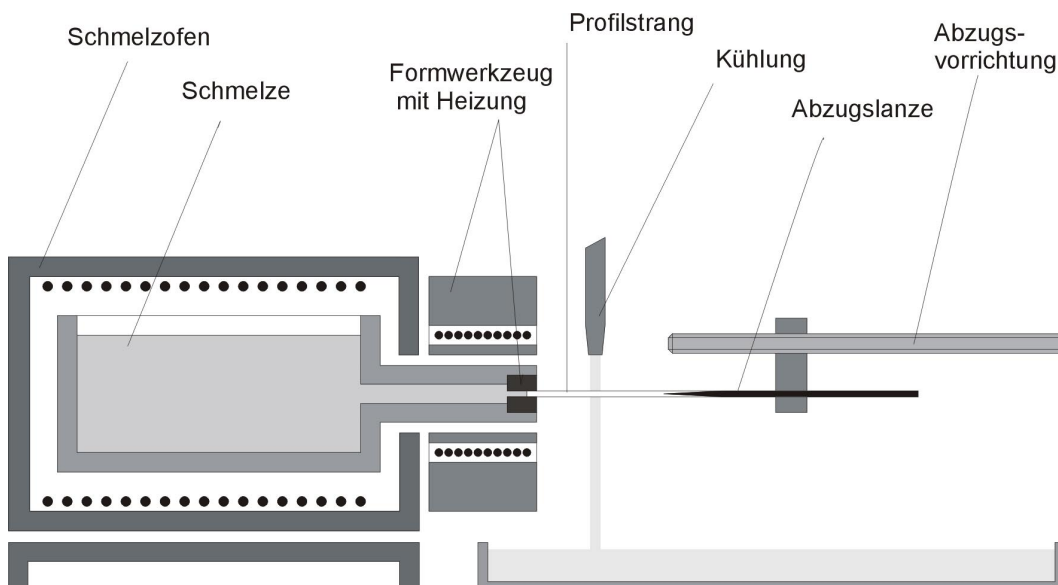


Abbildung 4.1: Horizontales Mikrostranggießen (Verfahrensprinzip)

In einem Schmelzofen wird das zu vergießende Metall in einer Wanne aufgeschmolzen und flüssig gehalten. An der Stirnseite dieser Schmelzwanne ist ein Rohr eingelassen, welches die Gießform (Kokille) aufnimmt. Verbindungsrohr und Kokille werden beheizt. Im Kokilleneinsatz befindet sich ein Formkanal, dessen Profil dem Querschnitt des zu gießenden Stranges entspricht. Bei entsprechender Einstellung der Höhe des Schmelzpegels im Bad reicht der metallostatistische Druck der Schmelze aus, um den profilierten Formkanal der Gießform gut zu füllen. Zu Beginn des Gießvorganges wird am Formausgang ein Metallstab (Anfahrslanze) direkt an die Schmelze angesetzt und von außen gekühlt. Die in der Kokille anstehende Schmelze verliert dabei soviel Wärme, dass sie innerhalb oder nahe dem

Ausgang des Formkanals erstarrt und an die Abzugslanze ankoppelt. Mit Hilfe einer Abzugsspindel wird diese Lanze rückwärts bewegt und der anhängende Profildraht aus der Form gezogen.

4.2 Schmelzefluss und Formfüllung

Voraussetzung für die Ausprägung formgenauer Profilquerschnitte ist eine kontinuierliche Formspeisung. Der Formkanal in der Kokille muss stets über den gesamten Querschnitt bis hin zur Erstarrungsfront mit Schmelze gut ausgefüllt sein. Dies ist gewährleistet, wenn genauso viel Schmelze in den Formkanal hineinfließt, wie Material durch den Gießvorgang aus der Kokille abgeführt wird.

Dieser Zusammenhang kann mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung für inkompressible Materialien (innerhalb des Schmelzbades wird eine konstante Dichte der Schmelze angenommen) für die auftretenden Volumenströme wie folgt formuliert werden.

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_1 = A_{Bad} v_0 = A_{Form} v_1 = konst. \quad (4.1)$$

Dabei entspricht

\dot{V}_0	dem Volumenstrom bei Absenkung des Schmelzbades,
\dot{V}_1	dem Volumenstrom im Formkanal,
A_{Bad}	der Oberfläche des Schmelzbades,
A_{Form}	dem Querschnitt des Formkanals,
v_0	der Strömungsgeschwindigkeit beim Absinken des Schmelzpegels infolge des Gießvorganges und
v_1	der Strömungsgeschwindigkeit im Formkanal.

Abbildung 4.2 zeigt schematisch vereinfacht den Mechanismus der Formspeisung.

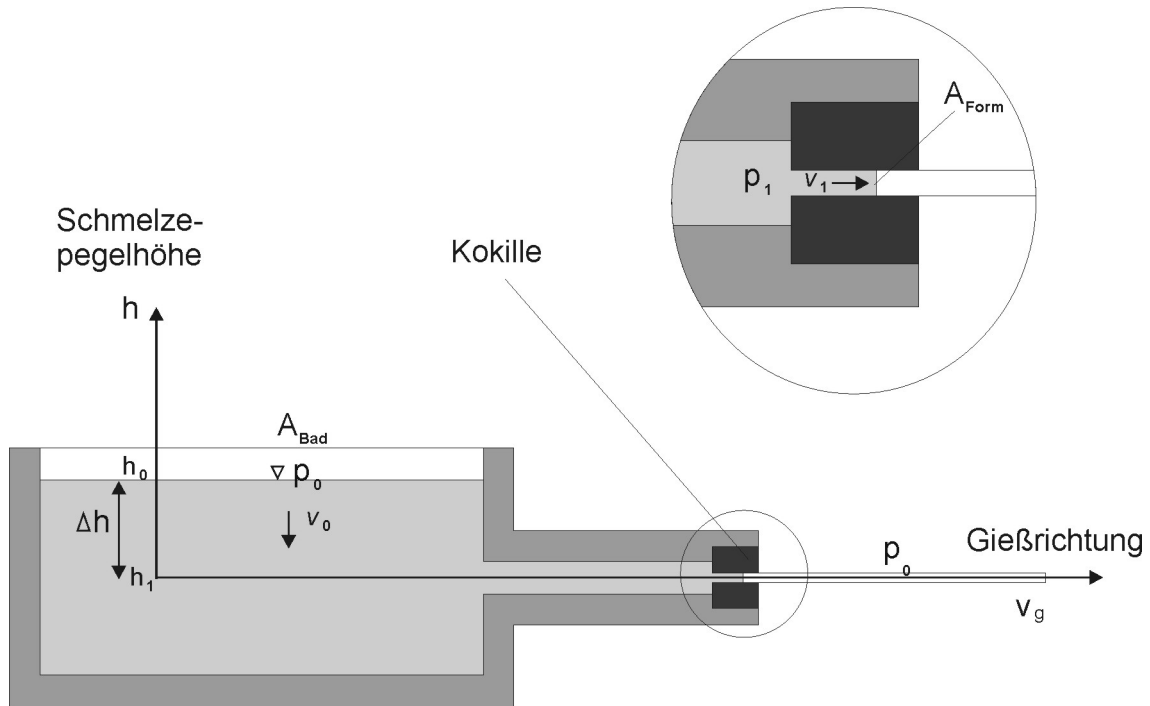


Abbildung 4.2: Formfüllung beim horizontalen Mikrostranggießen

Die in der Skizze verwendeten Variablen haben folgende Bedeutung:

- p_0 ist der Umgebungsdruck,
- p_1 der Druck im Formkanal,
- h_1 das Gießniveau bezogen auf die Mitte des Formkanals,
- h_0 das Niveau des Schmelzpegels
- Δh die Höhe des Schmelzpegels und
- v_g die Gießgeschwindigkeit.

Die Schmelze wird durch den Einfluss ihres Schweredruckes in den Formkanal gedrückt und fließt aus diesem mit der Gießgeschwindigkeit als erstarrter Strang wieder ab. Da der Profilquerschnitt des Gussstranges, bei Vernachlässigung des bei der Erstarrung auftretenden Schwindmaßes, mit dem Querschnitt des Formkanals übereinstimmt, entspricht nach Gleichung (4.1) die Strömungsgeschwin-

digkeit der im Formkanal nachfließenden Schmelze v_1 der Gießgeschwindigkeit v_g .

Der Schweredruck auf dem Niveau des Formkanals ist von der Höhe des Schmelzpegels im Behälter abhängig. Der Abstand zwischen dem Flüssigkeitsspiegel und der Mittellinie des Formkanals wurde in der Skizze (Abbildung 4.2) mit Δh gekennzeichnet. Demnach ergibt sich der Schweredruck der Schmelze auf diesem Niveau aus Gleichung (4.2).

$$p_s = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (4.2)$$

Es ist ersichtlich, dass der Druck p_s , dessen Wirkung die Schmelze in den Formkanal drückt, über Δh und damit mit Hilfe der Pegelhöhe des Schmelzbades reguliert werden kann.

Damit der Formkanal während des Gießvorganges gut gefüllt bleibt und stets genug Schmelze nachströmen kann, muss der Schmelzpegel auf dem dafür erforderlichen Niveau gehalten werden.

Strömungsprozesse inkompressibler Fluide in Gefäßen und Rohrleitungssystemen können mit Hilfe der Energiegleichung von Bernoulli, (Gleichung (4.3) nach /36/), berechnet werden.

$$\frac{\rho \cdot v_F^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h + p + \rho \cdot \int \frac{\partial v_F}{\partial t} ds = konst. \quad (4.3)$$

Die Querschnitte der zu gießenden Profilstränge sind gegenüber der Oberfläche des Schmelzbades sehr klein. Deshalb sinkt während des Gießvorganges der Schmelzpegel im Bad nur sehr langsam und sehr wenig ab. Die mit dem Absinken des Schmelzpegels verbundene Änderung des Schweredruckes kann deshalb vernachlässigt und der Prozess als stationär angesehen werden. Die Bernoulli-gleichung nimmt damit für den in Abbildung 4.2 dargestellten Fall folgende Form an:

$$\frac{\rho \cdot v_0^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_0 + p_0 = \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 + p_1. \quad (4.4)$$

Da die Schmelzbadoberfläche A_{Bad} viel größer als der Strangquerschnitt im Formkanal A_{Form} ist, wird nach Gleichung (4.1) v_0 sehr klein, so dass der Wert von $v_0=0$ gesetzt werden kann.

Beim Einfließen der Schmelze in den Formkanal kommt es zu einer signifikanten Verringerung des Strömungsquerschnittes. Abhängig von der Oberflächenspannung und dem Benetzungsverhalten der Schmelze gegenüber dem Kokillenwerkstoff muss zusätzlich Kraft aufgewendet werden, damit die Schmelze in den Formkanal gedrückt wird. Außerdem kommt es bei realen reibungsbehafteten Flüssigkeiten zu Druckverlusten aufgrund der inneren Reibung sowie der Wandreibung der Fluide. Die auftretenden Druckverluste sind von der Dichte und Viskosität des strömenden Fluids, von dessen Strömungsgeschwindigkeit sowie von der Geometrie und Beschaffenheit der Stromröhre abhängig. Der am Eingang des Formkanals anliegende Druck p_1 muss deshalb um Δp_v (worin der gesamte auftretende Druckverlust zusammengefasst wird) gegenüber dem zum Erreichen der Gießgeschwindigkeit erforderlichen Druck erhöht werden.

Für $h_0 = \Delta h$, $h_1 = 0$, $v_0 = 0$, $v_1 = v_g$ und $p_1 = \Delta p_v + p_0$ ist der zur Formspeisung erforderliche Schweredruck

$$p_s = \rho \cdot g \cdot \Delta h = \frac{\rho \cdot v_g^2}{2} + \Delta p_v. \quad (4.5)$$

Es ist zu vermuten, dass bei kleiner werdenden Profilquerschnitten und komplizierteren Profilgeometrien, bei denen der Profilumfang im Verhältnis zur Querschnittsfläche groß ist, der Druckverlust im Formkanal zunimmt und deshalb der Schmelzpegel angehoben werden muss.

4.3 Erstarrungsvorgang und Kühlbedingungen

4.3.1 Theoretische Grundlagen zur Berechnung von Erstarrungsvorgängen

Grundlage für die Berechnung von Erstarrungsprozessen ist die Fouriersche Differentialgleichung, die zur mathematischen Beschreibung von Temperaturfeldern herangezogen wird [18]. Für mehrdimensionale zeitlich veränderliche Felder in Stoffen, bei denen konstante Stoffeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärmekapazität) vorausgesetzt werden, hat sie die Form

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + \tilde{q} . \quad (4.6)$$

Dabei stellt

ρ	die Dichte des Gießmetalls,
c	die spezifische Wärmekapazität,
$\frac{\partial T}{\partial t}$	die Geschwindigkeit der Temperaturänderung,
λ	die Wärmeleitfähigkeit,
$\nabla^2 T$	die Divergenz des Temperaturgradienten und
\tilde{q}	eine innere Wärmequelle oder -senke dar.

Die linke Seite der Gleichung entspricht der zeitlichen Änderung der inneren Energie des betrachteten Volumenelementes, und die rechte Seite beschreibt den infolge der Energieänderung im Volumenelement initiierten Wärmeleitungsprozess, der zur Herausbildung des Temperaturfeldes führt.

Für die Lösung von Gleichung (4.6) werden eine Anfangsbedingung und, da es sich in jeder Raumrichtung um eine Differenzialgleichung zweiter Ordnung handelt, für jede Koordinatenrichtung jeweils zwei örtliche Randbedingungen benötigt.

Als Anfangsbedingung gilt die Temperaturverteilung innerhalb des betrachteten Gebietes zum Zeitpunkt $t=0$. Sie lautet für ein kartesisches Koordinatensystem:

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0(x, y, z) . \quad (4.7)$$

Die gegebene Anfangstemperaturverteilung ändert sich bei instationären Prozessen im Laufe des Wärmetransportvorganges.

Die örtlichen Randbedingungen werden entsprechend der Wärmeabgabe an der Oberfläche des Temperaturfeldes in drei Gruppen unterteilt /4, 25 ,35/.

Ist die Temperatur an der Oberfläche des betrachteten Gebietes als Funktion der Zeit und des Ortes vorgegeben, wird die Randbedingung als Randbedingung 1. Art bezeichnet (Gleichung (4.8)).

$$T(x = x_o, y = y_o, z = z_o, t) = T_o(x, y, z) \quad (4.8)$$

Wenn der Temperaturgradient normal zur Oberfläche und damit die Wärmestromdichte bekannt ist, spricht man von einer Randbedingung 2. Art. Bei vorgegebener Wärmestromdichte \dot{q} gilt an jeder Stelle der Feldoberfläche die Bedingung

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} . \quad (4.9)$$

wobei n die äußere Flächennormale darstellt, in deren Richtung die Ableitung zu bilden ist. Bei adiabaten Oberflächen gilt $\dot{q} = 0$, weil hier kein Wärmetransport über die Oberflächengrenzen stattfindet und $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ist.

Um eine Randbedingung 3. Art handelt es sich, wenn der Umgebungszustand und die maßgebenden Beziehungen für den übertragenen Wärmestrom bekannt sind.

Je nachdem, ob ein fester Körper (Gleichung (4.10)) oder ein Fluid (Gleichung (4.11)) angrenzen, hat sie die Form

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \frac{\partial T_u}{\partial n} \quad (4.10)$$

oder

$$\dot{Q} = \alpha(T_u - T_o) \cdot A. \quad (4.11)$$

Erstarrungsvorgänge sind instationäre, also zeitabhängige Prozesse. Dies bedeutet, dass sich das Temperaturfeld im erstarrenden Strang und damit die Position der Erstarrungsfront (Phasengrenze) im Laufe der Zeit verändert. Sie verschiebt sich mit der Geschwindigkeit, mit der der erstarrende Strang infolge des Kristallwachstums an Volumen zunimmt (Abbildung 4.3).

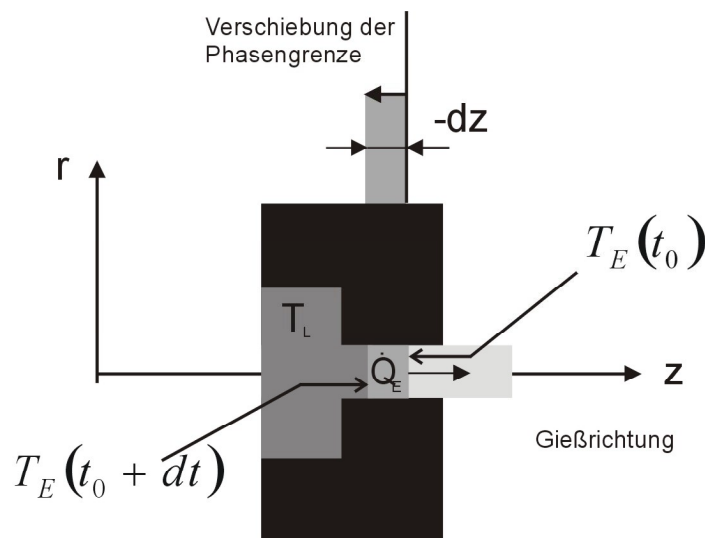


Abbildung 4.3: Verschiebung der Phasengrenze infolge Strangerstarrung

Während der Zeit dt rückt die Erstarrungsfront T_E bei eindimensionaler Betrachtungsweise, um die Strecke dz vor. Dabei wird die Erstarrungsenthalpie h_E frei und muss als Wärme dQ_E abgeführt werden [4].

$$dQ_E = h_E \cdot \rho \cdot A_q (-dz) \quad (4.12)$$

In Gleichung (4.12) entspricht

h_E	der spezifischen Erstarrungsenthalpie der Schmelze,
ρ	der Dichte des Gießwerkstoffes,
A_q	der Querschnittsfläche des Gussstranges und
$-dz$	der Verschiebung der Phasengrenze bei eindimensionaler Betrachtung.

Der daraus resultierende Wärmestrom ist

$$\dot{Q}_E = h_E \cdot \rho \cdot A_q \cdot \left(\frac{-dz}{dt} \right). \quad (4.13)$$

In Gleichung (4.13) ist $\frac{-dz}{dt}$ die Geschwindigkeit, mit welcher der Strang infolge der Kristallisation in z-Richtung wächst. Soll die Erstarrung immer an derselben Stelle innerhalb des Formkanals erfolgen, ergeben sich Restriktionen für die Gießgeschwindigkeit v_g . Diese muss der Geschwindigkeit, mit welcher der erstarrende Strang in axialer Richtung wächst, gleich sein, wobei die Abzugsbewegung entgegengesetzt gerichtet ist.

Unter der Voraussetzung, dass die Gießgeschwindigkeit, die thermischen Bedingungen und die Kühlbedingungen während des Gießprozesses konstant gehalten werden, stellt sich im Kontrollgebiet ein stationäres Temperaturfeld ein.

Für die Beschreibung des Temperaturfeldes im betrachteten Gebiet gilt dann die Poissonsche Differentialgleichung (Gleichung (4.14)).

$$0 = \nabla^2 T + \frac{\tilde{q}}{\lambda} \quad (4.14)$$

Sie stellt einen Sonderfall der Fourierschen Differentialgleichung für den stationären Fall dar, der bei konstanter Wärmeleitfähigkeit innere Wärmequellen und Senken berücksichtigt.

4.3.2 Wärmetransport bei der Strangerstarrung

Die Skizze (Abbildung 4.4) zeigt schematisch vereinfacht die beim horizontalen Mikrostranggießverfahren fließenden Wärmeströme im für den Erstarrungsprozess relevanten Bereich zwischen Gießform und Strangkühlung.

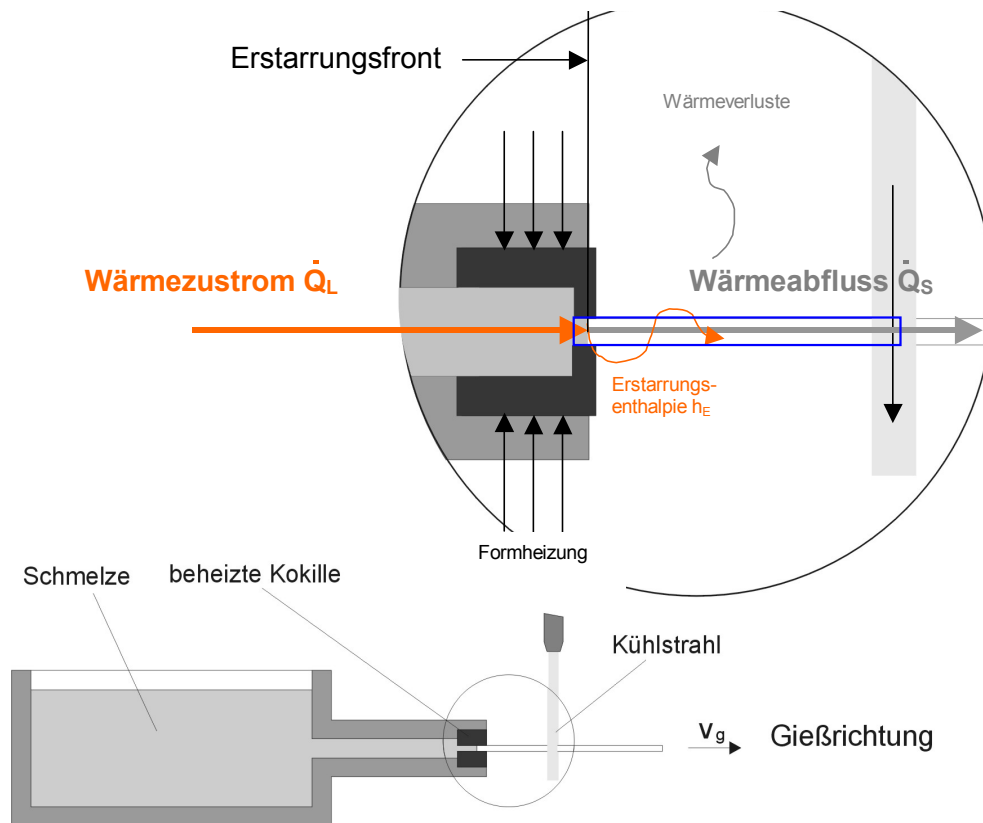


Abbildung 4.4: Wärmetransport beim horizontalen Mikrostranggießverfahren

Typisch für das Mikrostranggießverfahren ist, dass die bei der Erstarrung des Gussstranges frei werdende Wärme direkt über den Strang abgeleitet wird. Die in der flüssigen Phase an die Erstarrungsfront gelangende Wärme sowie die bei der Erstarrung frei werdende latente Schmelzwärme muss von dort über den Strang abgeführt werden.

Die Erstarrungsfront bildet die Grenze zwischen flüssiger und fester Phase. Bei reinen Stoffen und eutektisch erstarrenden Legierungen liegt sie auf der Isotherme der Erstarrungstemperatur des Gießwerkstoffes innerhalb des Temperaturfeldes,

das sich während des Gießprozesses in Schmelze und Strang einstellt. Die Temperaturverteilung innerhalb des Kontrollgebietes wird von der Richtung und Intensität der durch den Gießprozess initiierten Wärmetransportprozesse bestimmt. Beim horizontalen Mikrostranggießen hängen diese vor allem von den thermischen Bedingungen in Schmelzbad und Gießform, von den Kühlbedingungen sowie von der Gießgeschwindigkeit ab.

Für die modellhafte Beschreibung der beim Mikrostranggießen zur Strangerstarung führenden Wärmetransportprozesse sollen folgende Annahmen getroffen werden:

- Das für den Erstarrungsprozess relevante Temperaturfeld wird durch die Oberfläche des Formkanals und die Strangoberfläche begrenzt. In Gießrichtung reicht das betrachtete Gebiet von der im Formkanal anstehenden Schmelze bis in den Bereich der Strangkühlung. Die Feldbegrenzung kann hier beliebig festgelegt werden; in Abbildung 4.4 sind diese imaginären Grenzen durch die blaue Umrandung gekennzeichnet.
- Wegen der sehr geringen Querschnittsabmessungen der zu erzeugenden Profile soll die Krümmung der Feldlinien über den Querschnitt vernachlässigt und die Temperatur über den gesamten Profilquerschnitt als konstant angenommen werden.
- Im Gebiet der flüssigen Phase findet während des Gießprozesses über die Formkanalwand kein Wärmetransport statt. Die Oberfläche der Formkanalwand wird als adiabat betrachtet.

In einem kartesischen Koordinatensystem hat die Gleichung (4.14) die Form

$$0 = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\tilde{q}}{\lambda}. \quad (4.15)$$

Die x Koordinate soll der Gießrichtung entsprechen und die Koordinatenrichtungen y und z die Querschnittsausdehnungen repräsentieren. Da über den Profilquerschnitt eine konstante Temperatur angenommen wird, sind die Temperaturgra-

dienten $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ und $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Somit kann der Wärmetransportprozess mit Hilfe eines eindimensionalen Modells beschrieben werden.

Abbildung 4.5 veranschaulicht den Temperaturverlauf in Gießrichtung bei eindimensionaler Betrachtung.

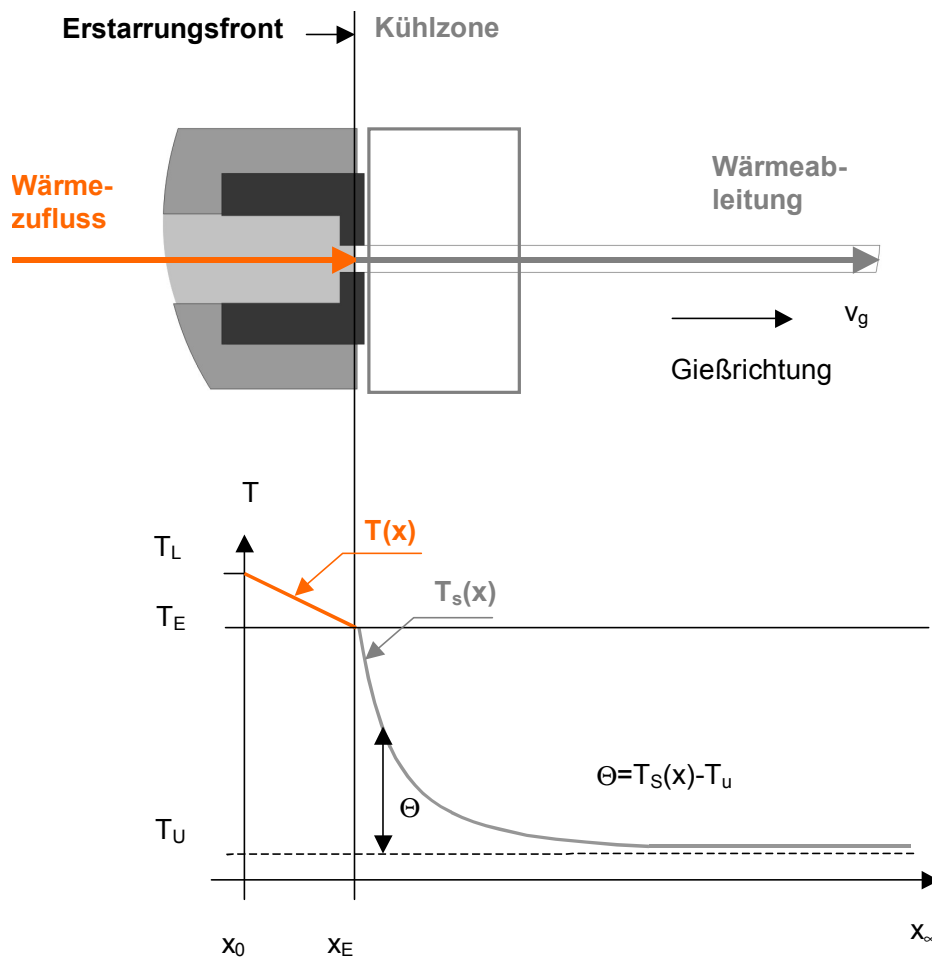


Abbildung 4.5: Prinzipieller Temperaturverlauf in der Schmelze und im erstarrten Strang bei eindimensionaler Betrachtung

Für den eindimensionalen Fall gilt

$$0 = \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\tilde{q}}{\lambda} \quad (4.16)$$

Der Temperaturgradient in Gießrichtung hängt von den Wärmequellen und Wärmesenken im Kontrollgebiet ab.

Wird der konvektive Wärmetransport im Schmelzbad vernachlässigt und ausschließlich Wärmetransport durch Wärmeleitung angenommen sowie innerhalb der Schmelze eine konstante Wärmeleitfähigkeit λ_L vorausgesetzt, fließt im Schmelzbad ein Wärmestrom

$$\dot{Q}_L = -\lambda_L \cdot A_q \frac{dT}{dx} \quad (4.17)$$

in Gießrichtung.

Wegen der Annahme einer adiabaten Randbedingung innerhalb des Formkanals in der flüssigen Phase kann der Temperaturverlauf im Schmelzbad als linear vorausgesetzt werden, damit ist

$$T(x) = T_L - \frac{(T_L - T_E)}{(x_E - x_0)} \cdot x \quad (4.18)$$

Der Temperaturgradient

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{(T_L - T_E)}{(x_E - x_0)} \quad (4.19)$$

hängt von der Temperatur der Schmelze T_L an der Stelle x_0 (Randbedingung 1. Art) und der Entfernung dieses Punktes von der Erstarrungsfront x_E ab.

Von der Erstarrungsfront fließt im erstarrten Gussstrang ein Wärmestrom

$$\dot{Q}_S = -\lambda_S \cdot A_q \cdot \frac{dT_S}{dx} \quad (4.20)$$

ab.

Durch die Kühlung des Gussstranges wird über die Strangoberfläche Wärme konvektiv abgeleitet. Hier liegt eine Randbedingung 3. Art vor.

$$\dot{Q}_K = \alpha \cdot A_K \cdot (T_S(x) - T_U) \quad (4.21)$$

Bei eindimensionaler Betrachtung wird die Temperatur T_S über den gesamten Profilquerschnitt als konstant angesehen. Damit entspricht sie der Oberflächentemperatur des Gussstranges. Der Konvektionsstrom \dot{Q}_K hängt außer von $T_S(x)$ auch von den Kühlbedingungen, die durch den Wärmeübergangskoeffizienten α repräsentiert werden, und der Umgebungstemperatur T_U ab.

Wegen den geringen Querschnittsabmessungen können die Profile mit einer unendlich langen Stabrippe verglichen werden, an deren einem Ende (der Erstarrungsfront) Wärme eingeleitet und über deren Umfang Wärme abgegeben wird.

Unter den Annahmen

- einer konstanten von der Richtung unabhängigen Wärmeleitfähigkeit,
- einer einheitlichen Temperatur über den Strangquerschnitt und
- einer eindimensionalen Betrachtung des Problems

lässt sich damit der Wärmetransportprozess im Strang wie der bei einer unendlich langen Stabrippe /25/ mit folgender Gleichung beschreiben.

$$\frac{d^2\Theta}{dx^2} = m^2\Theta \quad (4.22)$$

Dabei ist

$$\Theta = T - T_U, \quad (4.23)$$

$$d\Theta = dT, \quad (4.24)$$

$$d^2\Theta = d^2T \quad \text{und} \quad (4.25)$$

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot A_q}} \quad (4.26)$$

Die Temperaturverteilung $T=T_S(x)$ im erstarrten Strang ist dann

$$\frac{T_S - T_U}{T_E - T_U} = \frac{\Theta}{\Theta_E} = e^{-m(x-x_E)} \quad (4.27)$$

Sie hängt von der Umgebungstemperatur T_U und vom Wärmeübergangskoeffizienten α sowie von der Geometrie des Profils ab. Die Profilgeometrie wird durch das Verhältnis von Strangumfang U zu Strangquerschnitt A_q verkörpert.

Der Temperaturverlauf entlang der Rippe nimmt nach Gleichung (4.27) exponentiell ab und wird vom Temperatureintrag an der Stirnseite sowie von den Kühlbedingungen beeinflusst.

Die erste Ableitung von Gleichung (4.27)

$$\frac{dT_S}{dx} = -\Theta_E m e^{-m(x-x_E)} \quad (4.28)$$

entspricht dem Temperaturgradienten im Gussstrang in axialer Richtung.

4.3.3 Berechnung der Position der Erstarrungsfront

Neben einer guten Formfüllung ist die Position der Erstarrungsfront innerhalb des Formkanals für die Qualität der Gussstränge von Bedeutung. Erstarrt der Strang zu weit innen im Formkanal, leidet die Oberflächenqualität. Erfolgt die Erstarrung direkt am Formausgang, ist die Prozessstabilität gefährdet.

Auf die Position der Erstarrungsfront wirken sich sowohl die Temperatur der Schmelze in der Form als auch die Kühlbedingungen sowie die Gießgeschwindigkeit aus. Je nachdem, wie viel Wärme an der Erstarrungsfront in den Gussstrang eingeleitet wird und mit welchem Temperaturgradienten die Wärme von der Erstarrungsfront abgeführt wird, verschiebt sich die Position der Erstarrungsfront im Formkanal.

Die Erstarrungsfront ist in der Abbildung 4.5 auf Seite 32 mit $x = x_E$ gekennzeichnet.

Die Wärmebilanz an dieser Stelle lautet

$$\dot{Q}_L(x = x_E) + \dot{Q}_E - \dot{Q}_S(x = x_E) = 0 \quad (4.29)$$

Setzt man für \dot{Q}_L , \dot{Q}_E und \dot{Q}_S die Gleichungen (4.17), (4.13) und (4.20) ein erhält man

$$\frac{\lambda_L A_q (T_L(x = x_0) - T_E)}{x_E} + h_E \rho_S v_g A_q - \left(-\lambda_S A_q \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_E} \right) = 0 \quad (4.30)$$

Für die Position der Erstarrungsfront ergibt sich dann folgendes Modell.

$$x_E = \frac{\lambda_L (T_L(x = x_0) - T_E)}{-\lambda_S \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_E} - h_E \rho_S v_g} \quad (4.31)$$

Der Temperaturgradient im Gussstrang wird durch Gleichung (4.28) ausgedrückt.

Für den Gradienten an der Phasengrenze $x = x_E$ hat diese die folgende Form.

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_E} = -\Theta_E m e^{-m(x_E - x_E)} \quad (4.32)$$

Da an dieser Stelle der Exponent Null ist, gilt

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_E} = -\Theta_E m \quad (4.33)$$

4.3.4 Einfluss der Profilgeometrie

Wie Gleichung (4.33) zeigt, hängt der Temperaturgradient im Gussstrang und damit die Position der Erstarrungsfront von der Konstanten

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda_S \cdot A_q}} \quad (4.34)$$

ab, die den Wärmeübergangskoeffizienten α , die Wärmeleitfähigkeit des Gießwerkstoffes im erstarrten Strang λ_S , und die beiden von der Profilgeometrie abhängenden Größen Umfang U und Profilquerschnitt A_q beinhaltet.

Am Beispiel von Kreisprofilen mit abnehmenden Durchmessern lässt sich gut zeigen, in welcher Größenordnung sich der Temperaturgradient bei Verringerung des Strangquerschnitts verändert.

Entsprechend Gleichung (4.33) und (4.34) ist

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_E} = -\Theta_E \sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda_S \cdot A_q}} \quad (4.35)$$

Ersetzt man den Wärmeübergangskoeffizienten α durch die Nusseltzahl

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_F} \quad (4.36)$$

mit d als dem Durchmesser des zu gießenden Profils, welcher der charakteristischen Länge bei Kühlung im Wasserbad entspricht, erhält man für die Gleichung (4.35) folgenden Ausdruck:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_E} = -\Theta_E \sqrt{\frac{\lambda_F \cdot Nu \cdot U}{\lambda_S \cdot d \cdot A_q}} \quad (4.37)$$

Für

$$U = \pi \cdot d \quad (4.38)$$

und

$$A_q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (4.39)$$

ist dann

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_E} = \left(-\Theta_E \sqrt{\frac{\lambda_F \cdot Nu \cdot 4}{\lambda_S}} \right) \cdot \frac{1}{d} \quad (4.40)$$

Da die in Klammern stehenden Größen unter konstanten Kühlbedingungen unveränderlich sind, hängt der Temperaturgradient an der Phasengrenze nach Gleichung (4.40) bei kreisförmigem Profilquerschnitt vom reziproken Wert des Strangdurchmessers ab.

Dies bedeutet, dass der Gradient beim Gießen kleinerer Querschnitte entsprechend Gleichung (4.40) größer wird. Wenn die Erstarrungsfront im Formkanal unabhängig vom Profilquerschnitt immer an der selben Stelle nahe dem Formausgang liegen soll, muss das beispielsweise bei kleineren Profilquerschnitten durch eine verminderte Strangkühlung kompensiert werden.

Bei vorgegebener Profilgeometrie und Werkstoffen ist der Wärmeübergangskoeffizient die Größe, die während des Stranggießprozesses durch Einstellung der Kühlbedingungen variiert werden kann.

4.3.5 Einfluss der Kühlbedingungen

Beim horizontalen Mikrostranggießen wurden bisher zwei unterschiedliche Kühlmethoden eingesetzt. Die Strangkühlung erfolgte entweder durch Kühlung in einem Fluidstrom, mit dem der Strang quer zur Gießrichtung angeströmt wird, oder in einem ruhenden Kühlbad, durch welches der Strang geschleppt wird.

In beiden Fällen wird die Wärme konvektiv abgeführt.

Konvektiver Wärmeübergang ist Wärmetransport in einem strömenden Fluid. Wärmeübergangsbeziehungen können allgemeingültig durch eine Gleichung der Gestalt

$$\dot{Q}_K = \alpha \cdot A_K (T_O - T_U) \quad (4.41)$$

ausgedrückt werden.

Dabei ist

- \dot{Q}_K der konvektiv abgeführte Wärmestrom,
- α der Wärmeübergangskoeffizient,
- A_K die auch als Wärmeübergangsfläche bezeichnete Kontaktfläche zwischen Fluid und Festkörper, durch welche die Wärme transportiert wird,
- T_O die Oberflächentemperatur des Stranges
- und
- T_U die vom Prozess unbeeinflusste Umgebungstemperatur.

Der Wärmeübergangskoeffizient hängt vom Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld des Fluids ab. Seine exakte Berechnung setzt die genaue Kenntnis dieser Felder voraus. Alternativ kann der Wärmeübergangskoeffizient, soweit dies möglich ist, experimentell oder mit Hilfe von Ähnlichkeitsbeziehungen dimensionsloser Kennzahlen näherungsweise ermittelt werden /36/.

Inwieweit die Methode der Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten mit Hilfe von Ähnlichkeitsbeziehungen für das Mikrostranggießverfahren geeignet ist, muss noch untersucht werden, weil die Gültigkeit der in /36/ angegebenen Gebrauchsgleichungen zur Bestimmung der Nusseltzahl wegen der geringen Querschnittsabmessungen der Profile und wegen der niedrigen Gießgeschwindigkeiten (1,5 bis 8 mm/s) nicht sicher gegeben ist. Für die Anwendung der Gebrauchsgleichungen für quer angeströmte Zylinder (dies entspräche der Kühlung des Stranges in einem Fluidstrahl) liegen die Reynoldszahlen ($4 < Re < 14$) an der unteren Grenze des zulässigen Bereiches ($10 < Re < 10^7$). Und bei den, bei Kühlung im Wasserbad, vorliegenden niedrigen Schleppgeschwindigkeiten ist es fraglich, ob die Wärmeleitung in Gießrichtung vernachlässigt werden darf; was bei Anwendung der Näherungsgleichungen für geschleppte Bänder in /36/ vorausgesetzt wird.

Aus den Ähnlichkeitsbeziehungen lassen sich aber die Prozessparameter ableiten, die für das jeweilige Kühlverfahren und die diesem entsprechenden Kühlbedingungen von Bedeutung sind.

Kühlung im Luftstrom (quer angeströmter Zylinder)

Die Nusseltzahl

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (4.42)$$

ist die dimensionslose Form des Wärmeübergangskoeffizienten. In dieser Beziehung steht l für die charakteristische Länge oder Anströmlänge.

Bei quer angeströmten Zylindern ist die charakteristische Länge

$$l = \frac{\pi}{2} \cdot d, \quad (4.43)$$

wobei d dem Durchmesser des angeströmten Zylinders entspricht.

Für die mittlere Nusselt-Zahl querangeströmter Drähte und Profilylinder in technischen Anordnungen wird in /36/ folgende Gleichung nach Gnielinski /23/

$$Nu_{l,0} = 0,3 + \sqrt{Nu_{l,lam}^2 + Nu_{l,turb}^2} \quad (4.44)$$

angegeben mit

$$Nu_{l,lam} = 0,664 \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (4.45)$$

und

$$Nu_{l,turb} = \frac{0,037 \cdot Re_i^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re_i^{-0,1} \cdot \left(Pr^{2/3} - 1 \right)} \quad (4.46)$$

Die Nusseltfunktion ist in diesem Fall eine Funktion von Reynolds- und Prandtl-Zahl.

Die Reynolds-Zahl

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (4.47)$$

beschreibt das Geschwindigkeitsfeld mit der charakteristischen Anströmlänge l , der Strömungsgeschwindigkeit w und der kinematischen Viskosität ν des strömenden Fluids.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} \quad (4.48)$$

Die Prandtl-Zahl stellt als das Verhältnis von kinematischer Viskosität ν und Temperaturleitfähigkeit

$$a = \frac{\lambda_F}{\rho_F \cdot c_p} \quad (4.49)$$

einen Stoffwert dar. Durch die Prandtl-Zahl wird das Temperaturfeld mit dem Geschwindigkeitsfeld verknüpft.

Demnach hängt der konvektiv aus dem Gussstrang abzuführende Wärmestrom neben den Stoffwerten des strömenden Fluids, wie Viskosität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität bei konstantem Druck von der Anströmgeschwindigkeit des Fluids w und den Querschnittsabmessungen des Gussstranges ab.

Die Anströmgeschwindigkeit kann bei entsprechendem Versuchsaufbau gut geregelt werden. Sie ist deshalb ein geeigneter Parameter zur Beeinflussung des Temperaturfeldes im Gussstrang.

Kühlung im ruhenden Wasserbad (geschleppte Bänder, Kolbenströmung)

Die Kühlung des Stranges im Wasserbad entspricht nach /36/ dem Fall der Kolbenströmung. Für einen durch ein Wasserbad bewegten Draht wird dort folgende Näherungsformel angegeben:

$$Nu \approx \sqrt{\frac{\pi^4}{4} + \frac{4}{\pi} \cdot Pe \cdot \frac{s}{l}} \quad (4.50)$$

In diesem Fall ist die Näherungsgleichung der Nusseltfunktion von der Pecletzahl Pe und der gekühlten Stranglänge l abhängig.

Die Pecletzahl ist

$$Pe = \frac{u \cdot s}{a} \quad (4.51)$$

Hier entspricht u der Schleppgeschwindigkeit im Kühlbad, beim Mikrostranggießen ist dies die Gießgeschwindigkeit v_g . s ist die Strangdicke bzw. der Durchmesser des Stranges. Die Gleichung (4.52) für die Temperaturleitfähigkeit a beinhaltet die Stoffkonstanten des kühlenden Wassers.

$$a = \frac{\lambda_{Wasser}}{\rho_{Wasser} \cdot c_{Wasser}} \quad (4.52)$$

Dies zeigt, dass die Kühlwirkung von der Gießgeschwindigkeit, den Stoffwerten des Kühlmediums und seiner Temperatur, die hier der Umgebungstemperatur entspricht, beeinflusst wird.

4.4 Wirkung der Prozessparameter

Aus den in den Abschnitten 4.2 und 4.3 dargelegten physikalischen Zusammenhängen können einstellbare Größen abgeleitet werden, die als wichtige Prozessparameter die Formfüllung und die Position der Erstarrungsfront steuern und sich auf die Gussteilqualität bzw. die Prozessstabilität auswirken.

Die Einflussgrößen zur Steuerung der Formfüllung sind nach Gleichung (4.5)

- die Höhe des Schmelzpegels Δh und
- die Gießgeschwindigkeit v_g .

Die Position der Erstarrungsfront hängt entsprechend Gleichung (4.28) vom Temperaturgradienten in der flüssigen Phase und damit unter den gegebenen Voraussetzungen von der Temperatur der Schmelze T_L an der Stelle x_0 ab. Diese Größe kann durch Einstellung der Temperatur im Schmelzbad T_{Bad} in Abstimmung mit der Formtemperatur T_{Form} gesteuert werden.

Gleichzeitig wird die Position der Erstarrungsfront durch den Temperaturgradienten im erstarrten Strang beeinflusst. Entsprechend dem angewendeten Kühlverfahren ergeben sich hierfür jeweils folgende steuerbare Größen, die sich auf den Wärmetransport im Gussstrang auswirken.

Bei Kühlung im ruhenden Wasserbad sind es

- T_K die Kühltemperatur des Kühlbades,
- der Abstand des Kühlbades von der Form
- und v_g die Gießgeschwindigkeit,

welche den Temperaturgradienten in Gießrichtung beeinflussen.

Wird der Strang zur Kühlung mit einem Luftstrom quer angeströmt, kann der konvektive Wärmeentzug infolge der Relativbewegung des aus der Form laufenden Stranges vernachlässigt werden, weil die Gießgeschwindigkeit gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit des anströmenden Fluids sehr klein ist.

Damit sind die für diesen Fall maßgeblichen steuerbaren Größen

- w die Strömungsgeschwindigkeit des quer strömenden Fluids und
- dessen Temperatur T_K .

Das Schema, Abbildung 4.6, zeigt die Wirkung der Prozessparameter auf die Formfüllung und die Position der Erstarrungsfront und damit Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Gussteilqualität und Prozessstabilität.

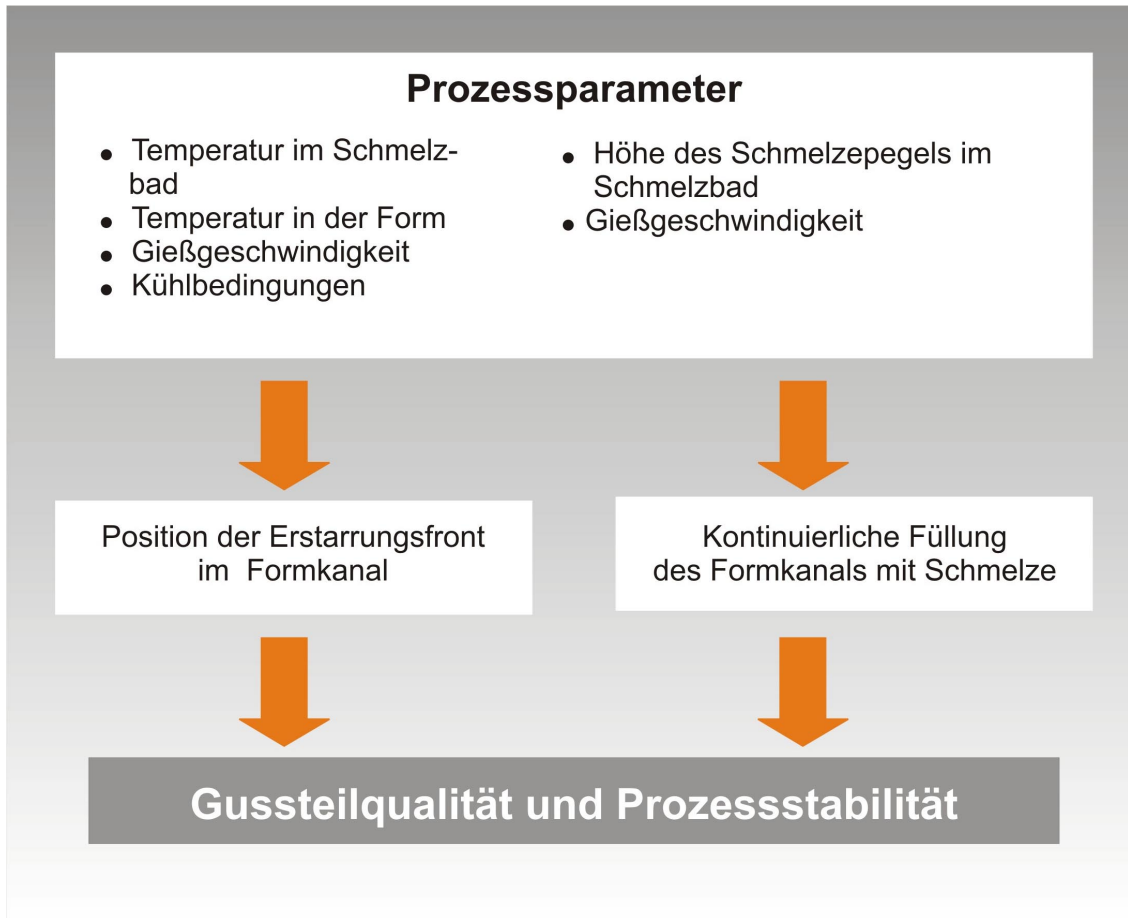


Abbildung 4.6: Einfluss der Prozessparameter auf die Gussteilqualität und Prozessstabilität

5 MIKROSTRANGGIEßAPPARATUR

5.1 Aufbau und Funktionsweise der Apparatur

Für das Prozessstudium sowie für die labormäßige Herstellung mikrostrukturierter Profile wurde eine Versuchsapparatur entwickelt und gebaut. Der schematische Aufbau der Apparatur, ausgenommen das Steuer-, Regel- und Datenerfassungssystem (PC mit PID-Karten), wird in Abbildung 5.1 gezeigt.

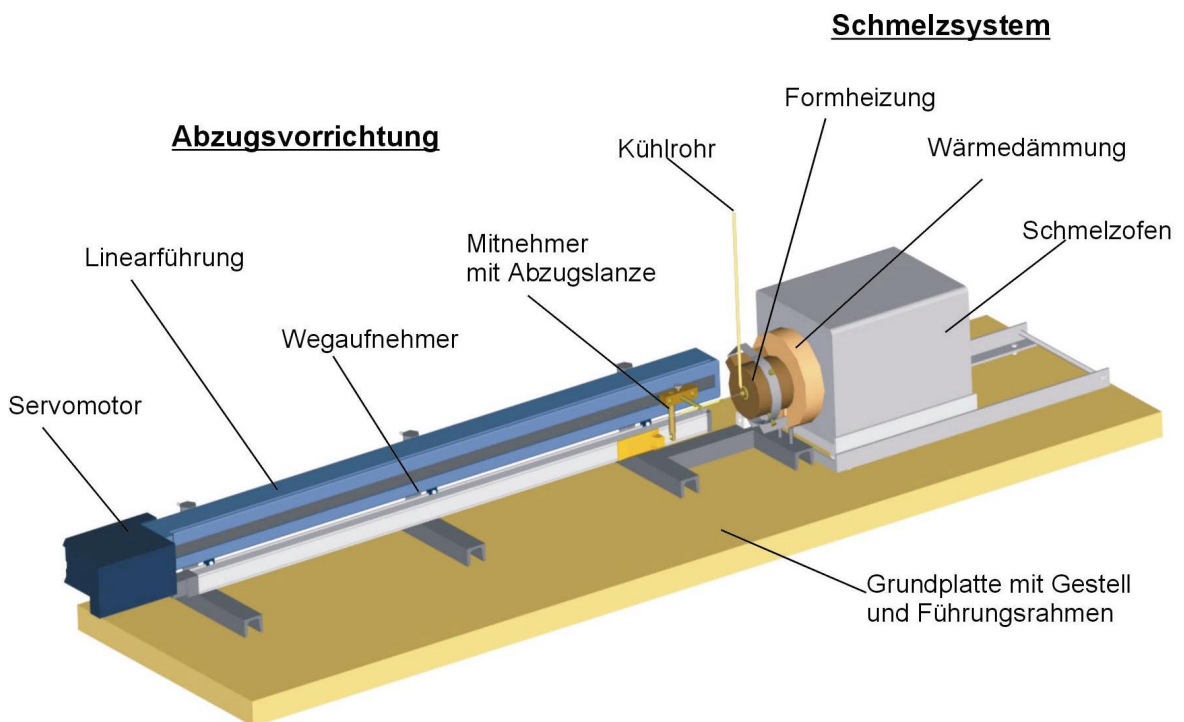


Abbildung 5.1: Mikrostranggießapparatur (schematische Darstellung)

Die Apparatur besteht aus den Hauptkomponenten

- Schmelzsystem mit Formheizung,
- Gießform (Kokille),
- Kühlsystem,

- Strangabzugsvorrichtung.

Und sie ist mit einem Steuer-, Regel- und Datenerfassungssystem ausgestattet.

In Abbildung 5.2 ist diese Apparatur auf einem Foto zu sehen.

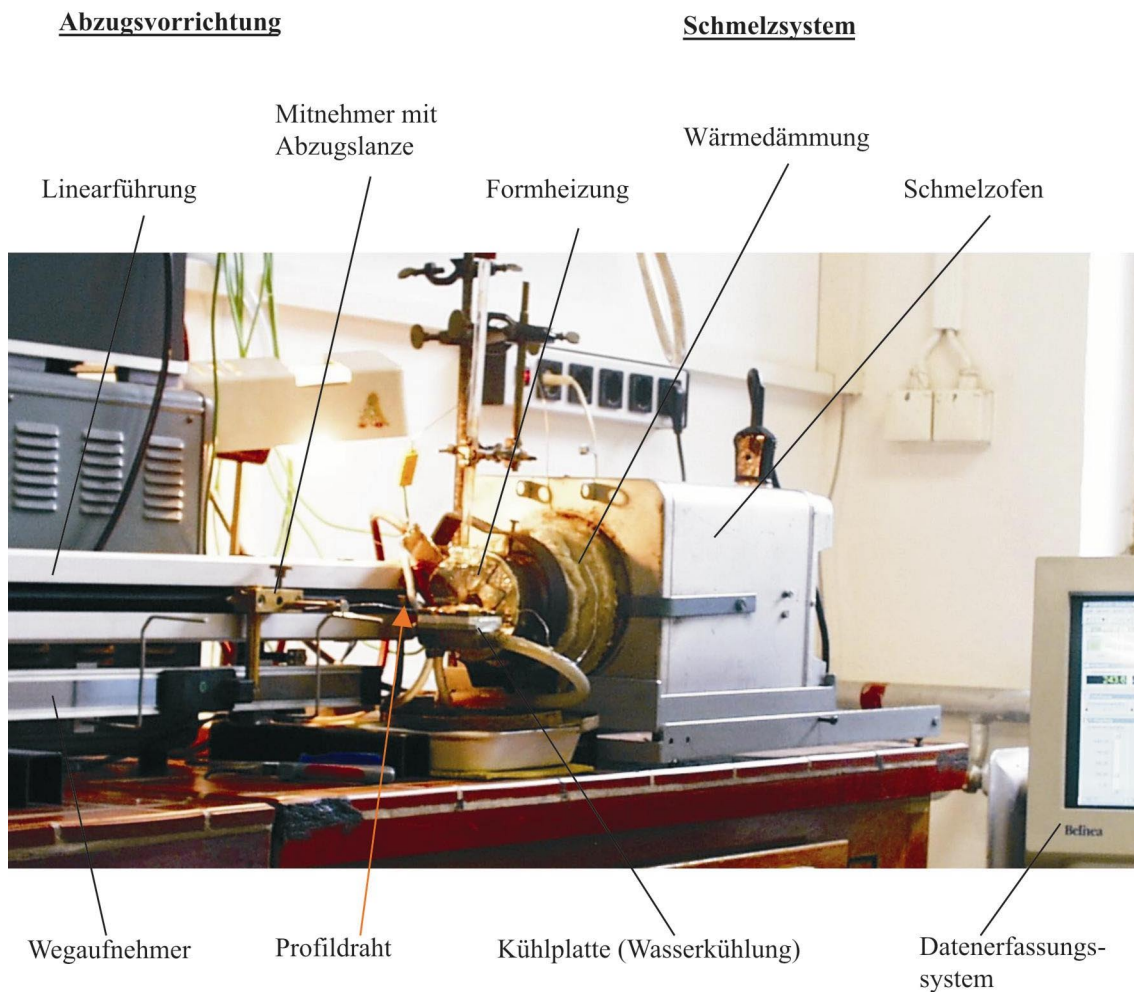


Abbildung 5.2: Mikrostranggießapparatur

Im Laufe der Forschungsarbeiten wurde die Apparatur weiterentwickelt und mehrfach modifiziert.

Diese Veränderungen betreffen insbesondere das Kühlsystem, die Ausführung des Schmelztiegels und Details der Kokillengestaltung.

Aus den im Anhang (Abschnitt 14.3, Seite 134 ff.) befindlichen Zeichnungen sind die Einbaumaße der Apparatur sowie die Abmessungen ausgewählter Komponenten ersichtlich.

5.2 Schmelzsystem und Formtemperierung

Das Schmelzsystem (Abbildung 5.3) dient zum Aufschmelzen des Gießmetalls und zur kontinuierlichen Schmelzebereitstellung während des Gießprozesses. Es besteht aus einem Schmelzofen und einem wannenförmigen Tiegel in dem das Gießmetall erschmolzen und flüssig gehalten wird.

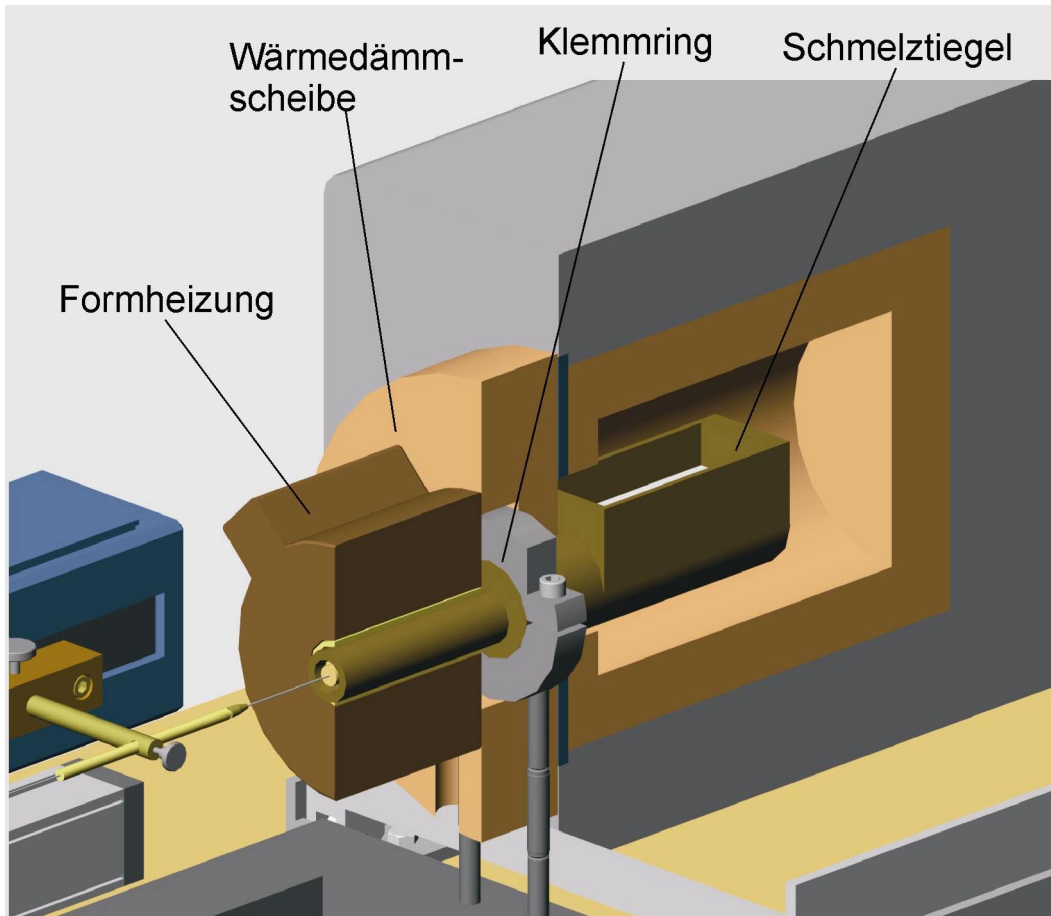


Abbildung 5.3: Schmelzsystem (Halbschnitt)

Als Schmelzofen wird ein widerstandsbeheizter Muffelofen verwendet. Um ein leichtes Befüllen und Überwachen des Schmelzbades zu ermöglichen, ist er verschiebbar auf Rollen gelagert und kann dadurch leicht bewegt werden.

Während des Schmelz- und Gießprozesses wird der Ofen über das Bad geschoben und mit Hilfe mehrerer Dämmscheiben aus Isoliermaterial abgedichtet. Der rohrförmige Auslass des Tiegels, in dessen Ende die Kokille eingesetzt wird, ragt aus dem Schmelzofen heraus und wird mit Hilfe eines zweiten ebenfalls wider-

standsbeheizten Röhrenofens, der direkt auf dem Tiegelrohr aufsitzt, temperiert (Abbildung 5.3).

Die bei den Experimenten verwendeten Schmelztiegel wurden aus Graphit oder aus Stahl gefertigt. Für die ersten Experimente wurde Graphit verwendet, später aber Stahl bevorzugt, weil die Standzeiten der Graphitwannen nicht zufriedenstellend waren und Graphit für Versuche mit Aluminium nicht geeignet ist.

5.3 Gießform

Als Gießform (Abbildung 5.4) werden auswechselbare Formeinsätze (Kokillen) aus Stahl oder Graphit benutzt, in deren Mitte sich als Formkanal eine profilierte Bohrung (Abbildung 5.5) befindet. Entsprechend dem Profilquerschnitt des zu gießenden Stranges unterscheiden sich diese Bohrungen in der Querschnittsform und in den Abmessungen.

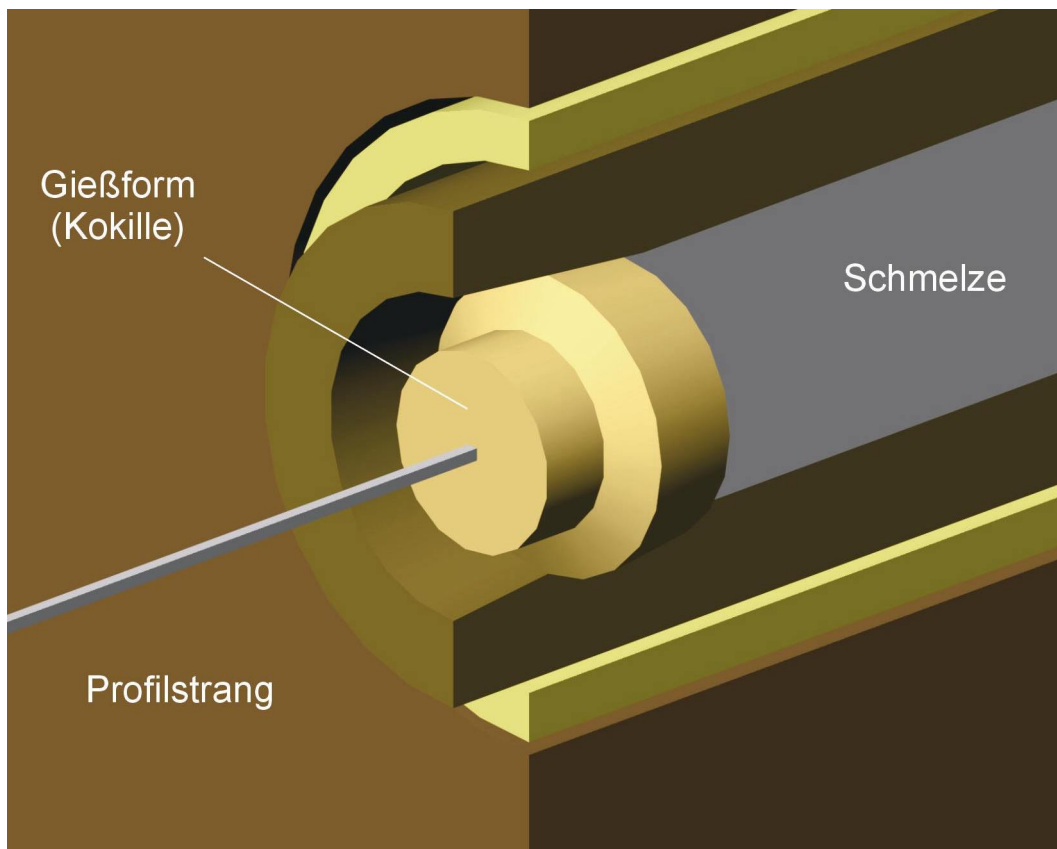


Abbildung 5.4: Gießform (Kokille) im Schmelztiegel

Der kegelförmig gestaltete Formeinsatz wird in das Zuleitungsrohr des Schmelzbadbehälters eingesetzt, mit Wärmedämmstofffasern abgedichtet und mit Hilfe von zwei Madenschrauben befestigt.

Die Formeinsätze sind so gestaltet, dass das Einbringen der mikrostrukturierten Profilbohrungen erleichtert wird. Weil die Fertigung dieser Einsätze, insbesondere die Herstellung profilierter Bohrungen in den gewünschten kleinen Abmessungen, sehr aufwendig und teuer ist, konnten aus Kostengründen die Gießformen unter versuchstechnischen Aspekten nicht immer optimal gestaltet werden.

Die konstruktive Gestaltung und die technische Ausführung der Formeinsätze wirken sich sowohl auf die Prozessführung, d. h. auf die Einstellung der technologischen Parameter während des Gießprozesses, als auch auf die Qualität der gegossenen Profilstränge aus.

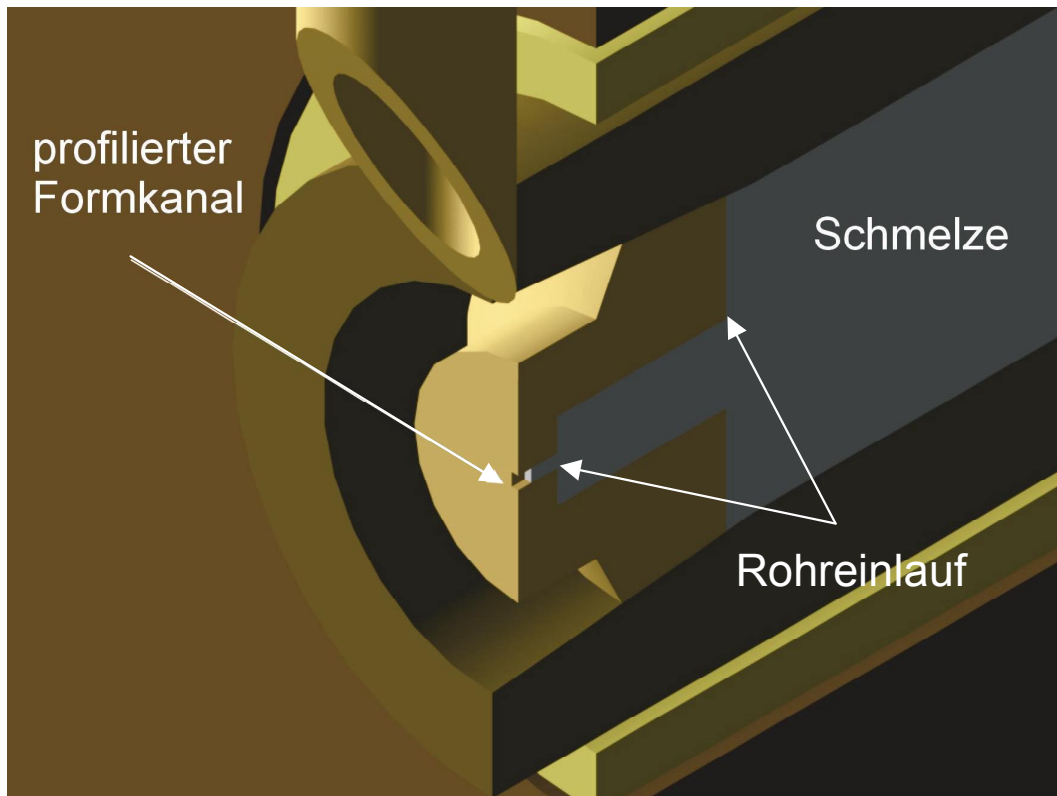


Abbildung 5.5: Gießform (Halbschnitt)

So beeinflusst zum Beispiel die Form des Innenhohlraumes der Kokille die erforderliche Schmelzpegelhöhe, weil der Rohreinlauf, die Länge und der Querschnitt

des Formkanals sich auf den Druckverlust im Kanalbereich und damit auf die einzustellende Höhe des Schmelzpegels auswirken. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch die Oberflächenbeschaffenheit des Formkanals. Diese hat maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächenqualität der Profile.

5.4 Kühlsystem

Das Kühlsystem wurde, um definierte Kühlbedingungen zu erreichen, während der Untersuchungen mehrfach überarbeitet und modifiziert.

Es wurde mit drei verschiedenen Kühlsystemen gearbeitet:

- Kühlung im Wasserstrahl,
- Kühlung im ruhenden Wasserbad und
- Kühlung im Luftstrom.

Kühlung des Stranges im Wasserstrahl

Mit dieser Kühlmethode erfolgten die ersten Experimente, bei denen getestet wurde, ob das Prinzip des horizontalen Mikrostranggießverfahrens für Herstellung mikrostrukturierter Profile geeignet ist. Über dem Strang wurde ein Glasrohr positioniert und der aus dem Rohr strömende Wasserstrahl direkt auf den Gussstrang gelenkt.

Vorteilhaft ist bei dieser Methode vor allem die gute Kühlwirkung, welche auf die hohe Wärmeleitfähigkeit des Wassers, die Turbulenzen beim Auftreffen des Wasserstrahls auf den Strang sowie die gute Wärmeabführung durch Queranströmung des Gussstranges zurückzuführen ist.

Trotz der Vorteile, zu denen auch eine gute Dosierbarkeit der Durchflussmenge (Volumenstrom) gehört, hat diese Kühlmethode folgende gravierende Nachteile:

- Das direkte Auftreffen des Wasserstrahls auf den Strang führte zu Vibrationen mit Resonanzerscheinungen, die das Abreißen des Stranges be-

wirken bzw. Schmelzedurchbrüche verursachen sowie die Oberflächenqualität des Gussstranges negativ beeinflussen.

- Wegen des geringen Abstandes zwischen Kühlstrahl und Gießform gelangte während des Gießprozesses Spritzwasser auf die Oberfläche der Gießform. Dies hatte die plötzliche Abkühlung der Form und die Destabilisierung der thermischen Bedingungen des Systems zur Folge.
- Aus Arbeitsschutzgründen ist unbedingt eine konsequente Ableitung des Kühlwassers erforderlich, weil beim Zusammentreffen von Kühlwasser und Schmelze, insbesondere bei Schmelzedurchbrüchen, das Wasser explosiv verdampft.

Kühlung im ruhenden Wasserbad

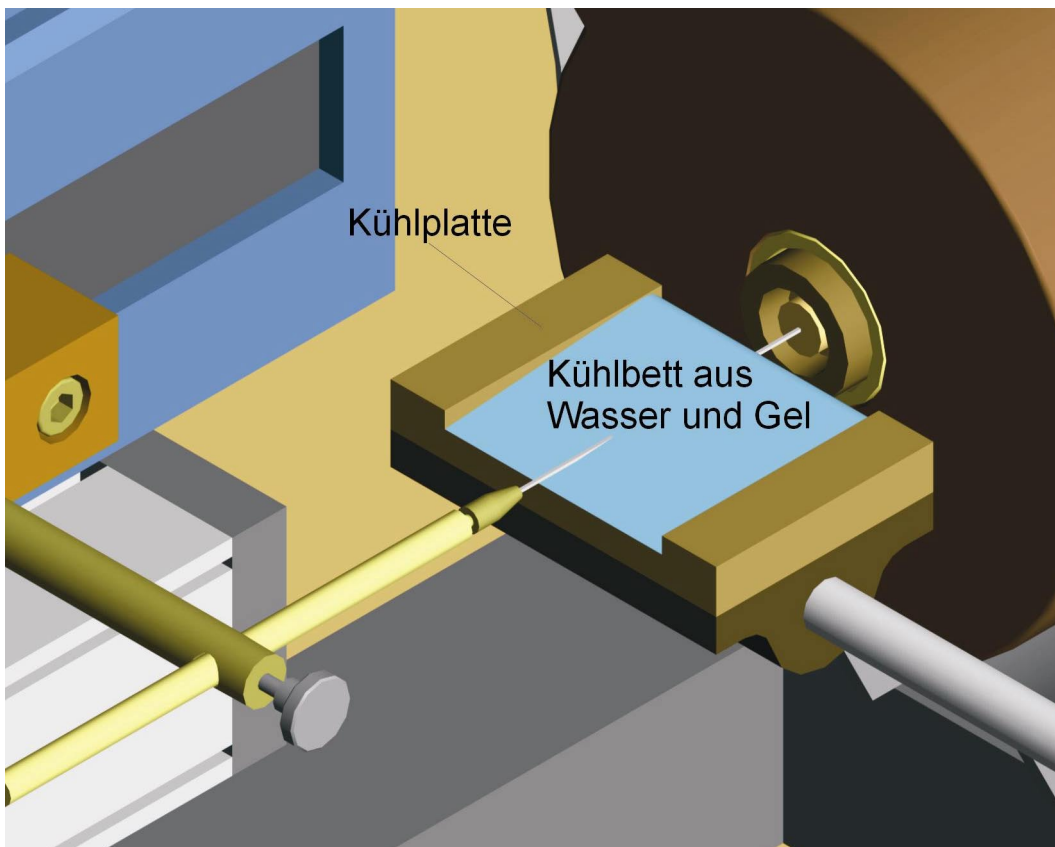


Abbildung 5.6: Strangkühlung im ruhenden Wasserbad

Hierbei wurde ein ruhendes Bad zur Kühlung des Gussstranges im Abstand von nur wenigen Millimetern vor der Gießform angebracht (Abbildung 5.6).

Es besteht aus einer Messingplatte, auf der ein Kühlbett aus Wasser und Gel aufgebaut wird. Das Gel dient zur Fixierung des Kühlmediums. Die Messingplatte wird durch Peltierelemente von unten gekühlt. Dadurch lässt sich die Temperatur des Kühlbades regeln.

Der Wärmeentzug im Kühlbad erfolgt durch erzwungene Konvektion und Wärmeleitung. Der Wärmeübergang im Bad ist von der Oberflächentemperatur des Gussstranges, der Badtemperatur und vom Wärmeübergangskoeffizienten abhängig. Letzterer wird von der Gießgeschwindigkeit und der Wärmeleitfähigkeit des Kühlmediums maßgeblich beeinflusst.

Vorteilhaft bei diesem Kühlsystem sind das Fehlen jeglicher Vibrationseinwirkungen sowie die gute Regelbarkeit der Kühltemperatur. Nachteilig wirkt sich das zur Fixierung des Bades erforderliche Gel aus, weil es die Wärmeleitfähigkeit des Kühlbades herabsetzt, wodurch der Wärmeübergang verschlechtert wird.

Experimente, bei denen Thermoleitpaste mit einer gegenüber dem Gel-Wassergemisch höheren Wärmeleitfähigkeit als Kühlmedium verwendet wurde, zeigten eine bessere Kühlwirkung. Die Paste hatte aber eine starke Verschmutzung der gegossenen Profile zur Folge und ist aus diesem Grund für den gewünschten Zweck nicht geeignet.

Kühlung im Luftstrom

Bei dieser Kühlmethode wird ähnlich, wie bei der Kühlung im Wasserstrahl, ein Kühlrohr aus dem ein Gas strömt, wenige Millimeter vor dem Formausgang über dem Gussstrang positioniert und dieser direkt durch den aus dem Rohr austretenden Luftstrom gekühlt (Abbildung 5.7).

Als Kühlmittel diente bisher Luft, aber auch der Einsatz anderer Gase ist möglich.

Das Kühlrohr ist über Schläuche mit einer Druckluftflasche verbunden. Ein elektronisch steuerbarer Massendurchflussregler dosiert den zur Kühlung erforderlichen Volumenstrom.

Ein großer Vorteil dieses Kühlverfahrens besteht in seiner guten Handhabbarkeit. Der Kühlbereich ist gut positionierbar. Das Verfahren ist auch für vertikal arbeitende Anlagen geeignet. Das Zusammentreffen des Kühlgases mit der Schmelze birgt keine Verletzungsgefahren beim Experimentieren.

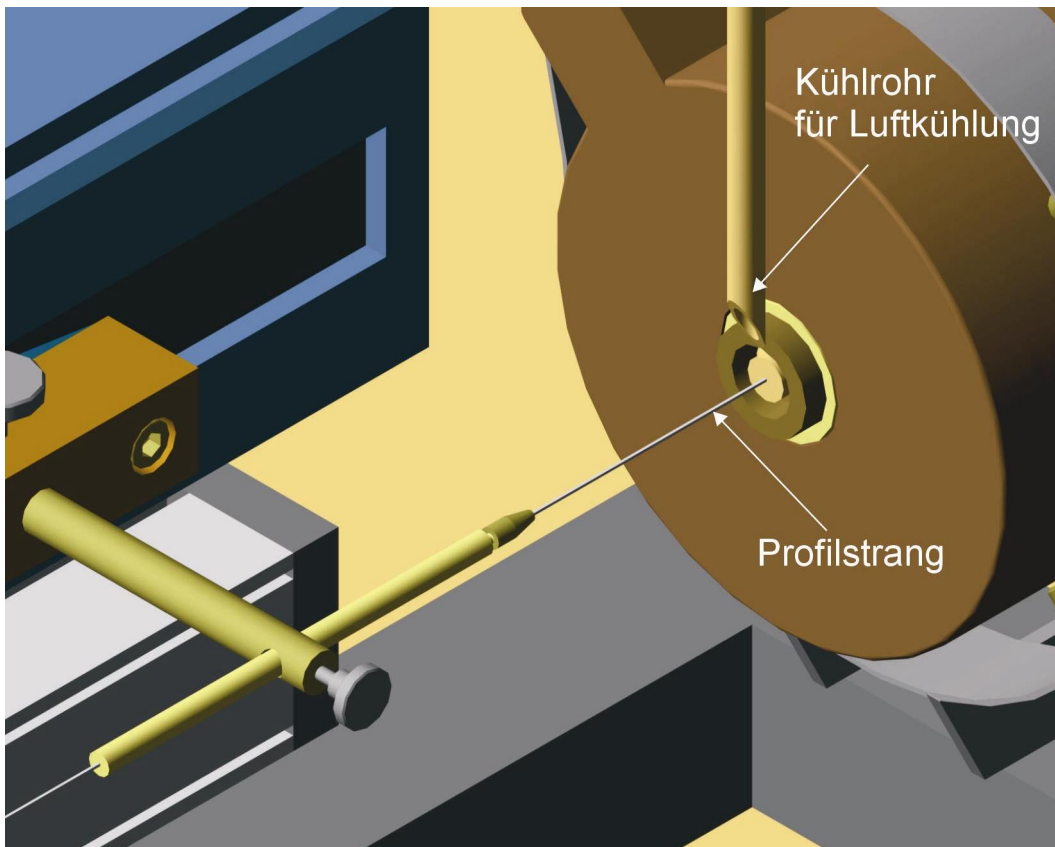


Abbildung 5.7: Strangkühlung im Luftstrom

Nachteilig ist der deutlich geringere Wärmeübergang von Luft gegenüber dem von Wasser. Dies kann aber durch die Einstellung entsprechender Strömungsbedingungen ausgeglichen werden.

Obwohl bei diesem Kühlsystem die Neigung zu Vibrationen und unerwünschten Bewegungen des Gussstranges durch eine zu hohe Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmediums deutlich geringer ist, scheint eine Optimierung der Strangkühlung sinnvoll zu sein. Dies kann z. B. mit Hilfe eines Düsensystems erfolgen.

5.5 Strangabführung

Die Abzugsvorrichtung (Abbildung 5.8) soll eine möglichst erschütterungsfreie Abführung des gegossenen Stranges gewährleisten.

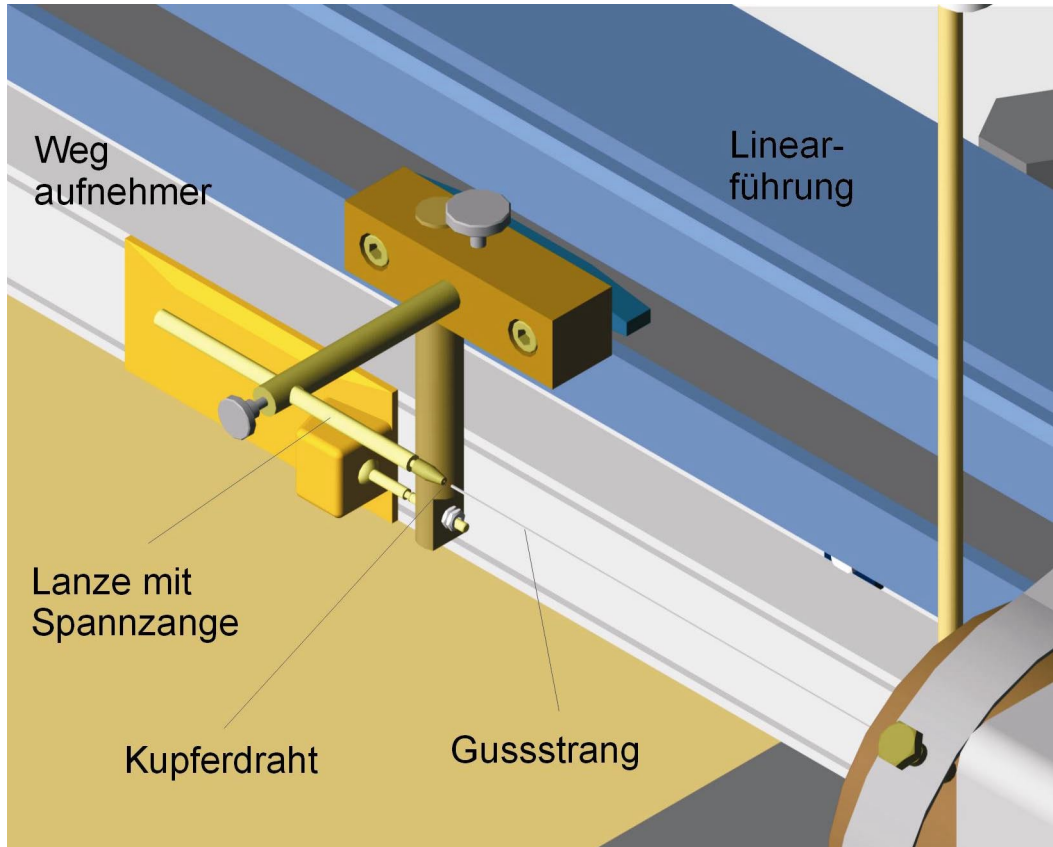


Abbildung 5.8: Abzugsvorrichtung

An der Spitze der Abzugslanze, die zum Herausziehen des gegossenen Stranges verwendet wird, befindet sich eine kleine Spannzange. In dieser ist ein dünner Draht eingespannt, der bei Beginn des Gießvorganges an die Schmelze angekoppelt wird. Bei Bedarf kann er ausgewechselt werden. Die Spitze des Drahtes wird in die im Formkanal anstehende Schmelze eingetaucht. Dabei wird die Abzugslanze ebenso wie der anhängende Strang gekühlt, wodurch die Schmelze an der Drahtspitze erstarrt, anhaftet und als Strang rückwärts aus der Gießform abgezogen werden kann (Abbildung 5.8.)

Die Längsbewegung der Abzugslanze und des Stranges in Gießrichtung wird mit Hilfe einer Linearführung realisiert. Diese wird von einer Gewindestindel mit Ku-

gelgewinde (Steigung von 2,5 Millimeter pro Umdrehung) über ein Getriebe von einem spannungsgeregelten Servomotor angetrieben. Mit der realisierten Vorrichtung können Stränge bis zu einer Länge von 900 Millimetern gegossen werden.

5.6 Steuer-, Regel- und Datenerfassungssystem

Zur Steuerung und Regelung der Anlage sowie für die Datenerfassung wurde ein PC mit multifunktionalen AD-Wandler-Karten und mit entsprechender Datenerfassungssoftware ausgestattet. Die nachfolgend aufgeführten Parameter können gemessen, geregelt und während des Gießvorganges aufgezeichnet werden. Die Abtastrate wird dabei je nach den Erfordernissen der durchzuführenden Experimente zwischen 5 und 50 Hz variiert.

1. Temperatur im Schmelzbad (Badtemperatur)

Die Badtemperatur wird mit Hilfe eines Mantelthermoelementes direkt im Schmelzbad gemessen und durch Regelung der Heizleistung des Schmelzofens während des Gießprozesses mit einer Temperaturabweichung von ± 1 K konstant gehalten.

2. Temperatur der Form (Formtemperatur)

Zur Messung der Formtemperatur ist ein Thermoelement im Formeinsatz nahe dem Formkanalausgang platziert. Die Formtemperatur wird durch Regelung der Heizleistung des zur Temperierung der Form verwendeten Röhrenofens im Toleranzbereich von ± 1 K eingestellt.

3. Temperatur der Schmelze in der Form (Schmelzetemperatur)

Hierzu ist ein Thermoelement direkt im Inneren der Gießform hinter dem Formkanal positioniert, das die dort anliegende Temperatur der Schmelze während des Gießvorganges erfasst.

4. Temperatur im Kühlbad (Kühltemperatur) bei Kühlung im ruhenden Wasserbad

Zur Messung der Temperatur im Kühlbad befindet sich ein Messfühler im Kühlbett. Die Regelung der Kühltemperatur erfolgt durch Kühlung der Messingplatte, auf der das Kühlbett aufgebaut ist, indem unter der Kühlplatte Peltierelemente zur Temperierung angebracht wurden.

5. Temperatur im Kühlrohr (Fluidtemperatur) bei Kühlung im Luftstrom

Hierzu dient ein Thermoelement am Ausgang des Kühlrohres, das die Temperatur des Fluidstroms misst. Die gemessenen Werte und der Verlauf der Messung können, wie die anderen Messdaten mit Hilfe des Rechners, gespeichert und verarbeitet werden.

6. Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmediums

Der Volumenstrom des Kühlgases wird, wie bereits unter 5.4 erwähnt, durch einen über den PC ansteuerbaren Massendurchflussregler dosiert. Die dazugehörigen Daten werden durch den Rechner erfasst und entsprechend verarbeitet. Die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlgases hängt vom Volumenstrom sowie vom inneren Querschnitt des Kühlrohres ab und wird rechnerisch ermittelt.

7. Gießgeschwindigkeit

Die Gießgeschwindigkeit ist von der Drehzahl des Servomotors, der die Abzugsspindel antreibt, abhängig und kann durch Regelung der Motorspannung des Servomotors eingestellt werden. Ein Wegaufnehmer erfasst die Bewegung des Gussstranges über der Prozesszeit. Daraus wird die Gießgeschwindigkeit berechnet.

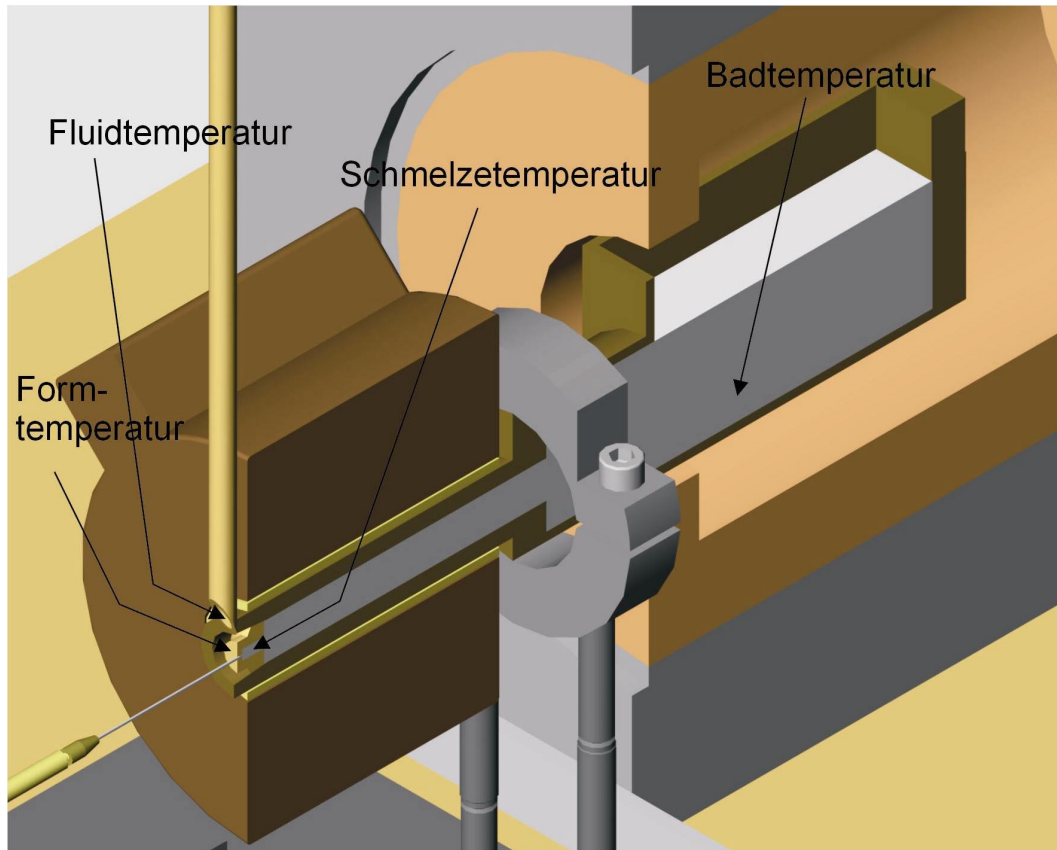


Abbildung 5.9: Position der Thermoelemente für die Temperaturmessungen

In Abbildung 5.9 sind die Messpunkte dargestellt, an denen die Thermoelemente für die Temperaturreglung von Schmelzbad und Form positioniert wurden. Außerdem zeigt die Abbildung die Position der Thermoelemente, mit deren Hilfe während des Gießprozesses die Temperatur der Schmelze in der Form und die Temperatur des Kühlgases am Ausgang des Kühlrohres aufgezeichnet wird.

6 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

6.1 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Das Versuchsprogramm umfasste die Untersuchungskomplexe:

1. Grundlagenuntersuchungen zum Mikrostranggießen von Kleinstprofilen aus niedrig schmelzenden Metallen,
2. Analyse der Prozessparameter beim Gießen von Kreisprofilen unterschiedlichen Querschnitts sowie
3. Untersuchungen zur Charakterisierung des Temperaturverlaufs im erstarrungsrelevanten Bereich zwischen Gießform und Strangkühlung.

Die Versuchsdurchführung entsprach bei allen Experimenten folgendem Schema:

1. Versuchsvorbereitung

- Einsetzen der für die Untersuchungen ausgewählten Kokille in die Schmelzwanne,
- Befestigung der Wanne in der Halterung, Befüllen mit zerkleinertem Schmelzgut,
- Positionierung der Thermoelemente zur Messung der Bad- und Formtemperatur,
- Verschließen und Abdichten des Ofens,
- Beheizen der Anlage bis die eingestellten Temperaturen erreicht sind,
- zwischendurch Kontrolle des Schmelzpegels,
- Einstellung der Kühlbedingungen (Positionierung des Kühlbades bei Wasserkühlung bzw. des Kühlrohres bei Kühlung im Luftstrom),
- Platzierung der Thermoelemente zur Steuerung und Messung der Kühltemperatur und

- Einstellung der Gießgeschwindigkeit, der Gießlänge (Gießweg) und bei Kühlung im Luftstrom Vorgabe des Volumenstroms des Kühlgases

Die Einstellung der Parameter erfolgt direkt über die Bildschirmoberfläche des Monitors des zur Steuerung der Anlage benutzten Computers.

2. Versuchsdurchführung

- Positionierung der Abzugslanze am Formausgang,
- Ankoppeln des Kupferdrahtes an die in der Form anstehende Schmelze,
- Starten des Gießvorganges (Rückfahren der Abzugslanze mittels Linearführung und Servomotor) und der Datenerfassung (Aufzeichnung der Prozessparameter) und
- Versuchsabbruch bei Erreichen der Gießlänge oder bei Prozesstörungen (Schmelzedurchbruch, Abreißen des Gussstranges).

3. Dokumentation des Versuchsablaufs und der Ergebnisse

- visuelle Begutachtung der Oberflächenqualität und Profilform (Beispiel siehe Tabelle 14.3, Seite 128),
- Dokumentation und Darstellung der aufgezeichneten Parameter (Temperatur des Schmelzbades, Temperatur in der Form, Kühltemperatur im Kühlbad oder Kühlrohr, Position der Abzugslanze, Gießlänge, Volumenstrom des Kühlgases sowie von Temperaturen an zwei weiteren Stellen der Anlage),
- Messtechnische Untersuchung der Gusstränge,
- Anfertigung metallischer Querschliffe zur Begutachtung der Profilgeometrie bzw. zur Gefügeuntersuchung bei ausgewählten Proben sowie
- Messung der Oberflächenqualität an ausgewählten Proben.

6.2 Grundlagenuntersuchungen

Die Grundlagenuntersuchungen zum Mikrostranggießen von Kleinstprofilen aus niedrig schmelzenden Metallen dienten

- der Prüfung des Verfahrensprinzips bezüglich seiner Eignung für das Stranggießen mikrostrukturierter Profile,
- der Erprobung und Entwicklung bzw. Weiterentwicklung der Versuchsanlage,
- der Auswahl eines geeigneten Modellwerkstoffes für weiterführende experimentelle Untersuchungen zur Analyse der Prozessparameter und zur Prozesssteuerung sowie
- der Auswahl von geeigneten Profilformen.

Der Test der Eignung des horizontalen Mikrostranggießverfahrens zum Stranggießen von Kleinstprofilen erfolgte zunächst mit Hilfe einer sehr einfachen Versuchsanlage, bei der nur die beiden wichtigsten Prozessparameter, die Temperatur des Schmelzbades und die Temperatur der Gießform geregelt werden konnten.

Die beim Experimentieren mit dieser ersten Anlage gewonnenen Erkenntnisse führten in mehreren Schritten zur Entwicklung der in Kapitel 5 beschriebenen Anlage, mit der dann die in dieser Arbeit dargestellten Resultate erzielt werden konnten.

Bei den Experimenten wurde zunächst mit einfachen Profilformen (Kreisprofile) unterschiedlicher Abmessungen gearbeitet. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen und den dabei gewonnenen Erfahrungen konnten dann Profile mit komplizierteren Querschnitten gegossen werden.

Sämtliche experimentelle Untersuchungen mussten auf Gießversuche mit niedrig schmelzenden Metallen beschränkt bleiben, weil das Vergießen höherschmelzender Werkstoffe auf Grund der Leistung der für die Anlage zur Verfügung stehenden Öfen nicht möglich war.

Als Gießmetalle wurden deshalb reines Zinn (Sn 99.9) und technisch reines Aluminium (Al 99.7) untersucht.

6.3 Analyse der technologischen Parameter beim Gießen von Kreisprofilen

6.3.1 Untersuchungsschwerpunkte

Bei den ersten Experimenten zum Gießen mikrostrukturierter Profile und bei der Erprobung der Versuchsanlage wurde mit empirisch gefundenen Einstellungen gearbeitet.

Die Herstellung maß- und formgenauer Gussstränge in entsprechender Oberflächenqualität erfordert aber eine gesteuerte Prozessführung. Voraussetzung dafür sind Kenntnisse über die Wirkung der Größen, die den Gießprozess maßgeblich beeinflussen. Deshalb wurden experimentelle Untersuchungen zur Analyse der Prozessparameter durchgeführt, bei denen die wichtigsten Einflussgrößen systematisch variiert und die Auswirkungen unterschiedlicher Parametereinstellungen auf den Prozess und auf die Strangqualität untersucht wurden.

Die Formkanaldurchmesser der für die Versuche benutzten Kokillen betragen 1 mm; 0,93 mm; 0,46 mm und 0,31 mm.

Die Strangkühlung erfolgte bei allen hier diskutierten Experimenten im ruhenden Wasserbad.

Das Untersuchungsprogramm hatte folgende drei Teilabschnitte:

1. Versuche zur Eingrenzung des Experimentierfeldes
2. Untersuchung der Haupteinflussgrößen
3. Experimente zur Prozesssteuerung mit Hilfe eines empirischen Modells.

Die Experimente der ersten beiden Versuchsreihen werden in den folgenden beiden Abschnitten erläutert. Auf die Untersuchungen zur Prozesssteuerung mit Hilfe eines empirischen Modells wird dann in Abschnitt 7.2 eingegangen.

6.3.2 Eingrenzung des Experimentierfeldes

Die Untersuchungen zur Eingrenzung des Experimentierfeldes dienten der Festlegung der Grenzen der Arbeitsbereiche, in denen Stränge reproduzierbar und in für die Versuchsauswertung ausreichender Qualität gegossen werden können.

Die durchgeführten Versuchsreihen wurden entsprechend der Formkanaldurchmesser der verwendeten Kokillen mit

- Versuchsreihe Dmr 0,9 bei einem Formkanaldurchmesser von 0,93 mm,
- Versuchsreihe Dmr 0,5 bei einem Formkanaldurchmesser von 0,46 mm und
- Versuchsreihe Dmr 0,3 bei einem Formkanaldurchmesser von 0,31 mm

bezeichnet.

Für die jeweiligen Formkanalabmessungen wurde die Einflussgrößen

- Badtemperatur (Temperatur im Schmelzbad),
- Formtemperatur (Temperatur der Form),
- Kühltemperatur und
- Gießgeschwindigkeit

von empirisch ermittelten Parametereinstellungen ausgehend in Richtung der äußeren Grenzen des Arbeitsbereiches verändert, bis keine Profilstränge mehr gegossen werden konnten.

Tabelle 6.1 zeigt beispielhaft die für die Versuchsreihe „Dmr 0,9“ gewählten Einstellungen. Die für die anderen Experimente gewählten Parameter sind aus Tabelle 14.1 und Tabelle 14.2 im Anhang ersichtlich.

Einflussgröße	Versuchseinstellungen
Temperatur im Schmelzbad (Badtemperatur)	240 °C bis 300 °C (20 K Schrittweite)
Formtemperatur	260 °C bis 300 °C (10 K Schrittweite)
Kühltemperatur	10 °C bis 20 °C (5 K Schrittweite)
Gießgeschwindigkeit	1,4 bis 8 mm/s
Abstand Form Kühlmedium	3,5 mm
Schmelzpegelhöhe im Bad	23 mm
Stranglänge	400 mm
Stahlform	Formkanaldurchmesser 0,93 mm

Tabelle 6.1: Gießversuche zur Erzeugung von Strängen mit kreisförmigem Querschnitt im Durchmesser 0,9 mm

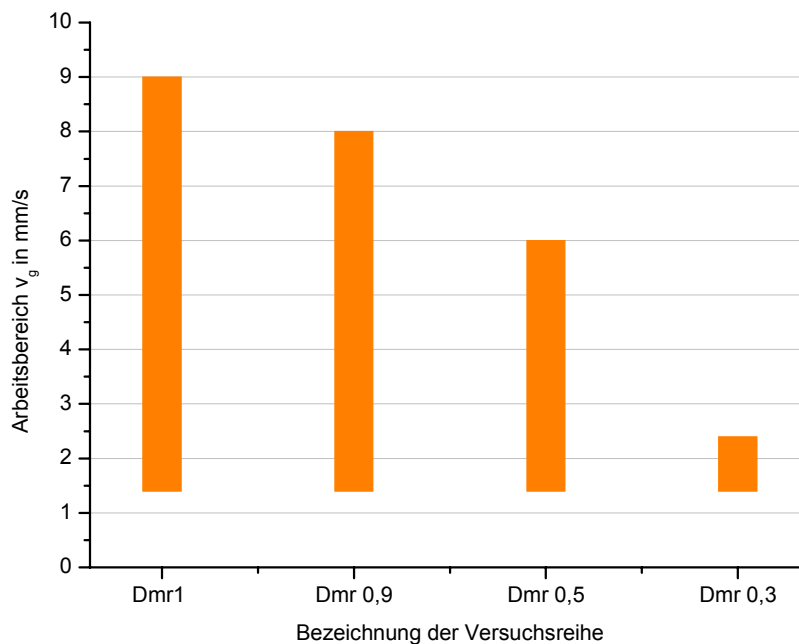


Abbildung 6.1: Arbeitsbereich der Gießgeschwindigkeit (v_g)

In Abbildung 6.1 ist der Arbeitsbereich der Gießgeschwindigkeit und in den im Anhang befindlichen Abbildungen (Abbildung 14.23 bis Abbildung 14.25) sind die

Arbeitsbereiche für Badtemperatur (Abbildung 14.23), Formtemperatur (Abbildung 14.24) und Kühltemperatur (Abbildung 14.25) dargestellt. Innerhalb der durch die Balken gekennzeichneten Grenzen konnten die Parameter variiert und begutachtbare Profilstränge gegossen werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass mit abnehmenden Querschnittsabmessungen der Formkanäle der Arbeitsbereich für Bad-, Form- und Kühltemperatur und für die Gießgeschwindigkeit deutlich kleiner wird.

6.3.3 Ermittlung der Haupteinflussgrößen

Zur Ermittlung der Haupteinflussgrößen wurden die Durchmesser von Gussträngen, die bei unterschiedlichen Parametereinstellungen gegossen wurden, untersucht.

Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, wie stark sich die einzelnen Parameter auf die Zielgröße Strangdurchmesser auswirken.

Der Vergleich der Durchmesser der Gusstränge mit dem Durchmesser des Formkanals der verwendeten Kokille erlaubt tendenzielle Aussagen über die Position der Erstarrungsfront während des Gießvorgangs. Bei Untermaß ist eine Erstarrung innerhalb der Form, bei Übermaß die Erstarrung außerhalb der Form nahe dem Formausgang wahrscheinlich. Deshalb kann von der Stärke des Einflusses der Parameter auf die Strangdicke auch auf die Stärke ihres Einflusses auf die Lage der Erstarrungsfront geschlossen werden.

Zur Analyse der Prozessparameter wurden die Parametereinstellungen eines jeden Experiments zusammen mit den Messdaten der dabei erzeugten Gusstränge tabellarisch erfasst. Die Durchmesser der untersuchten 400 mm langen Stränge wurden unter dem Messmikroskop jeweils an der Längenkoordinate 10 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm und 390 mm ausgemessen und die Oberfläche der Proben visuell begutachtet und bewertet.

Aus den auf diese Weise gewonnenen Datensätzen wurden mit Hilfe eines statistischen Analyseprogramms(Statgraphics 4plus) auf der Grundlage von Regressi-

onsverfahren empirische Modelle entwickelt. Diese erlauben die Berechnung des Strangdurchmessers in Abhängigkeit der Einflussgrößen Badtemperatur, Formtemperatur, Kühltemperatur, Gießgeschwindigkeit und Abzugslänge (L_{Abzug}).

Für die Datensätze der Versuchsreihen Dmr 0,9 und Dmr 0,5 haben die so ermittelten Modellgleichungen die Form von Gleichung (6.1) und (6.2).

Modell für Dmr 0,9:

$$Dmr_{0,9} = 0,0027(T_{Bad}) + 0,0012(T_{Form}) - 0,0026(T_{Kühl}) - 0,026(v_g) + 0,0006(L_{Abzug}) \quad (6.1)$$

Modell für Dmr 0,5:

$$Dmr_{0,5} = -0,0032(T_{Bad}) + 0,0005(T_{Form}) - 0,005(T_{Kühl}) - 0,001(v_g) + 0,0006(L_{Abzug}) \quad (6.2)$$

Dem Modell der Versuchsreihe Dmr 0,9 liegen 350 Datensätze mit 50 unterschiedlichen Parameterkombinationen und dem Modell Dmr 0,5 liegen 180 Datensätze mit 28 Parameterkombinationen zu Grunde. Die Regressionsanalysen beider Modelle mit den dazu gehörigen Signifikanztests sind als Tabellen (Tabelle 14.5 auf Seite 130 und Tabelle 14.6 auf Seite 131) dem Anhang beigelegt.

Mit Hilfe der Koeffizienten der Polynome lässt sich abschätzen, wie stark der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Ausprägung des Durchmessers der Profilstränge ist. Damit die Koeffizienten unterschiedlicher Parameter mit einander verglichen werden können, müssen die Modelle normiert werden. Dies bedeutet das die Grenzen der Arbeitsbereiche der in das Modell eingehenden Parameter in ein und demselben Intervall abgebildet werden. Zum Vergleich der Koeffizienten erfolgte eine Normierung auf das Intervall ± 1 .

Abbildung 6.2 zeigt die normierten Koeffizienten der Einflussgrößen im Vergleich. Daraus geht hervor, dass sich Gießgeschwindigkeit, Bad- und Formtemperatur unterschiedlich stark auf den Prozess auswirken und auch beim Vergleich der beiden Modelle Unterschiede in der Wirkung der Einflussgrößen zu erkennen sind.

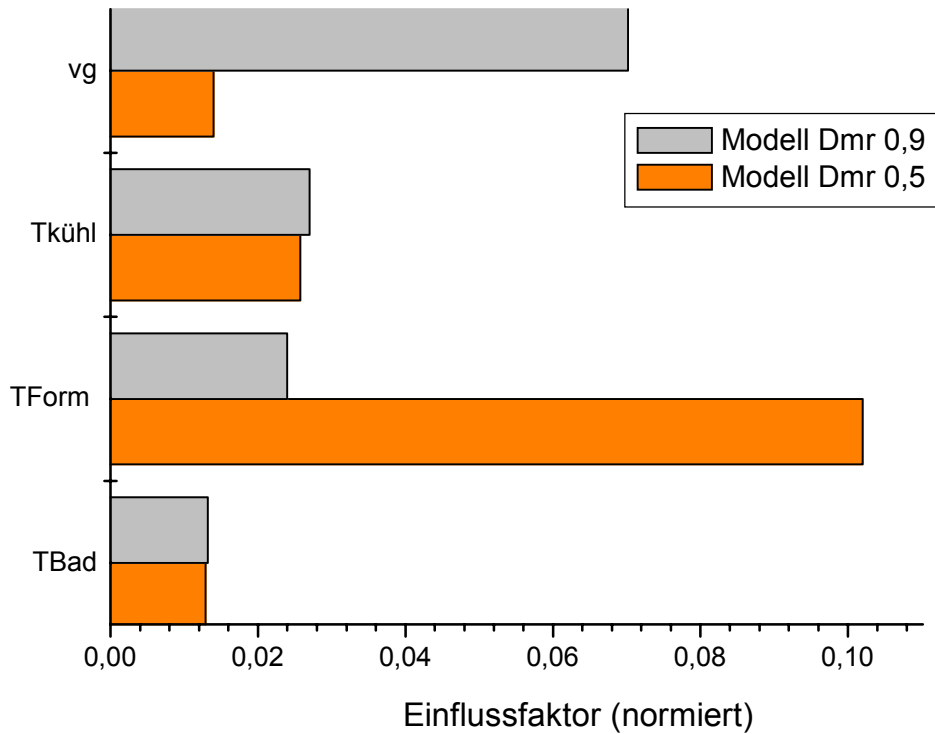


Abbildung 6.2: Vergleich des Einflusses der Prozessparameter auf die Zielgröße Strangdurchmesser

Während der Einfluss der Badtemperatur sowie der Einfluss der Kühltemperatur bei beiden Modellen eine ähnliche Größenordnung hat, überwiegt bei Modell Dmr 0,9 der Einfluss der Gießgeschwindigkeit und bei Modell Dmr 0,5 der Einfluss der Formtemperatur. Dieser Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass sich bei größeren Strangdurchmessern, die durch die Gießgeschwindigkeit verursachte Wärmediffusion in Gießrichtung mehr auf den Prozess auswirken kann als bei kleineren Strangquerschnitten. Im Gegensatz dazu wird bei kleineren Durchmessern die Temperatur der Schmelze im Formkanal stärker durch die Formtemperatur beeinflusst und wirkt sich dementsprechend stärker auf die Lage der Erstarrungsfront aus.

Diese Ergebnisse entsprechen den beim Experimentieren gewonnenen Erfahrungen und stimmen weitgehend mit den Ergebnissen der theoretischen Untersuchungen überein.

Untersuchungen bei denen die Parameter auf der Basis statistischer Versuchspläne systematisch variiert wurden, ergaben keine aussagekräftigen Ergebnisse. Die relativ große Streuung der gemessenen Werte mit einer mittleren Abweichung von $\pm 0,05$ mm führte zu schlechten Ergebnissen bei den statistischen Signifikanztests.

Auch konnte keine Korrelation zwischen Prozessparametern und Oberflächegüte festgestellt werden.

Die Gleichung (6.1) wurde bei den Untersuchungen zur Prozesssteuerung als Steuermodell benutzt. Darauf wird im Gliederungspunkt 7.2 dieser Arbeit ausführlich eingegangen.

6.4 Untersuchungen zur Charakterisierung des Temperaturverlaufs in Gießrichtung

Ziel dieser Versuche war es, die Änderung der Temperatur in Gießrichtung innerhalb der im Formkanal anstehenden Schmelze sowie im erstarrten Gussstrang bis in das Gebiet der Strangkühlung zu erfassen, um daraus Aussagen über den Einfluss der Prozessparameter auf den Temperaturverlauf im erstarrungsrelevanten Bereich und deren Auswirkungen auf die Position der Erstarrungsfront zu erhalten.

Zu diesem Zweck wurde anstelle des Koppeldrahtes aus Kupfer, der beim Start des Gießvorganges in den Formkanal der Kokille eingeführt wird, ein mit sehr dünnem Kupferdraht umwickeltes Thermoelement verwendet, das mit dem anhängenden Gussstrang aus der Form gezogen wird. Die von diesem Thermoelement registrierte Temperaturänderung in Gießrichtung und der Gießweg wurden zeitgleich erfasst.

Es wurden Versuche mit

- Stahlformen mit einem Formkanaldurchmesser von 1 mm bei Kühlung im Wasserbad,

- Graphitformen mit einem rechteckigen Formkanaldurchmesser von 1 mm x 1 mm (Abbildung 14.15) bei Kühlung im Wasserbad und
- Stahlformen mit einem rechteckigen Formkanaldurchmesser von 0,7 mm x 0,7 mm bei Kühlung im Luftstrom

durchgeführt. Der Gießwerkstoff war stets Zinn.

Tabelle 14.7 zeigt die für die Versuche mit Stahlformen eingestellten Parameterkombinationen und Tabelle 14.8 die beim Einsatz von Graphitkokillen gewählten Einstellungen der Prozessparameter. Die Daten wurden mit einer Taktfrequenz von 5 Hz erfasst.

Bei Kühlung des Gussstranges im Luftstrom wurde mit den Einstellungen nach Tabelle 14.9 gearbeitet. Die Datenerfassung erfolgte hier bei einer Taktfrequenz von 20 Hz.

Experimente mit gleicher Einstellung wurden jeweils neun mal wiederholt, so dass für die Auswertung zehn Datensätze zur Verfügung standen.

In Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 ist die gemessene mittlere Änderung der Temperatur über dem Gießweg aufgezeichnet. Die Temperatur wurde beginnend bei –5 mm im Inneren des Formkanals der Gießform bis hinein in den Bereich des kühlenden Wasserbades erfasst. Für die Messungen von Abbildung 6.3 wurde eine Stahlform und für die Messungen von Abbildung 6.4 wurde eine Graphitform benutzt.

Die abgebildeten Temperaturverlaufskurven beruhen auf den Mittelwerten der Messergebnisse von jeweils 10 Messreihen. Die für den Gießweg aufgezeichneten Werte streuen mit einer Standardabweichung von $\pm 0,5$ mm.

Die graphische Darstellung von zwei vergleichbaren Versuchsreihen, d. h. von Experimenten, bei denen mit dem gleichen Temperaturregime und unter gleichen Kühlbedingungen, aber mit unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten gearbeitet wurde, erfolgt gemeinsam in einem Diagramm.

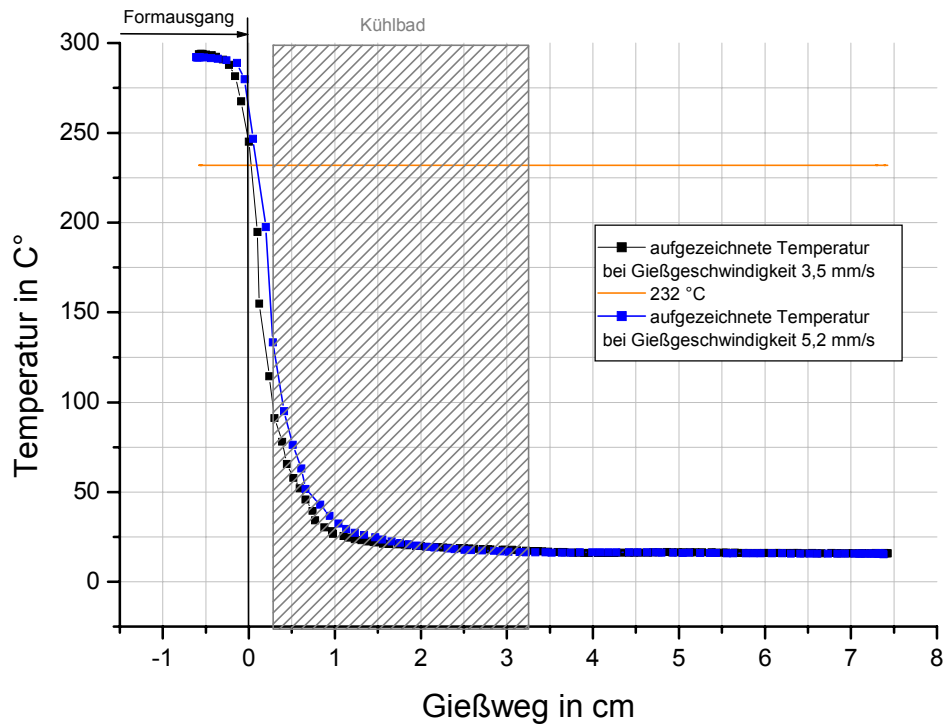


Abbildung 6.3: gemittelter Temperaturverlauf in Stahlformen bei 240 °C Bad- und 260 °C Formtemperatur bei Gießgeschwindigkeiten von 3,5 und 5,2 mm/s

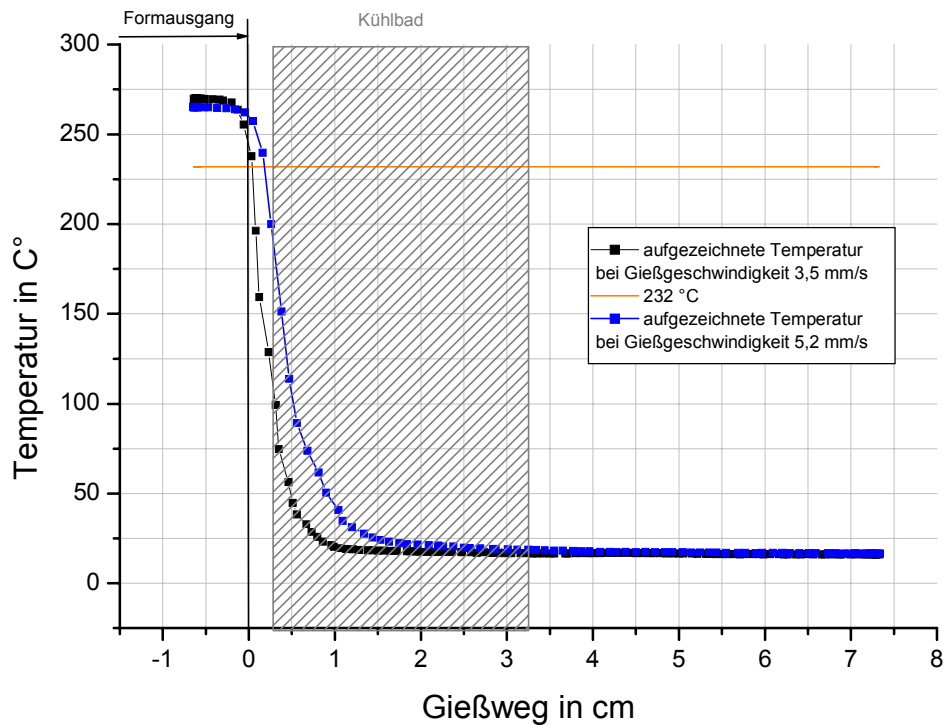


Abbildung 6.4: gemittelter Temperaturverlauf in Graphitformen bei 240 °C Bad- und 260 °C Formtemperatur bei Gießgeschwindigkeiten von 3,5 und 5,2 mm/s

Aus den Grafiken ist deutlich zu erkennen, dass eine höhere Gießgeschwindigkeit eine Verlagerung des Temperaturverlaufs in Gießrichtung bewirkt.

Auffallend ist auch, dass die Temperatur der Schmelze im Formkanal bei der Verwendung von Stahlformen höher als bei der Verwendung von Graphitformen ist, obwohl bei sämtlichen Experimenten für die Steuerung der Form- und Badtemperatur die gleichen Werte eingestellt wurden.

Die Ursache für dieses Verhalten liegt vermutlich an der gegenüber Stahl geringeren Benetzbarkeit der Graphitformen durch die Schmelze. Dies drückt sich vor allem darin aus, dass Temperaturänderungen nicht so schnell übertragen werden können. Insgesamt ist zu beobachten, dass die Graphitformen ein wesentlich stabileres thermisches Verhalten zeigen und in geringerem Maße auf Temperaturschwankungen der Schmelze reagieren.

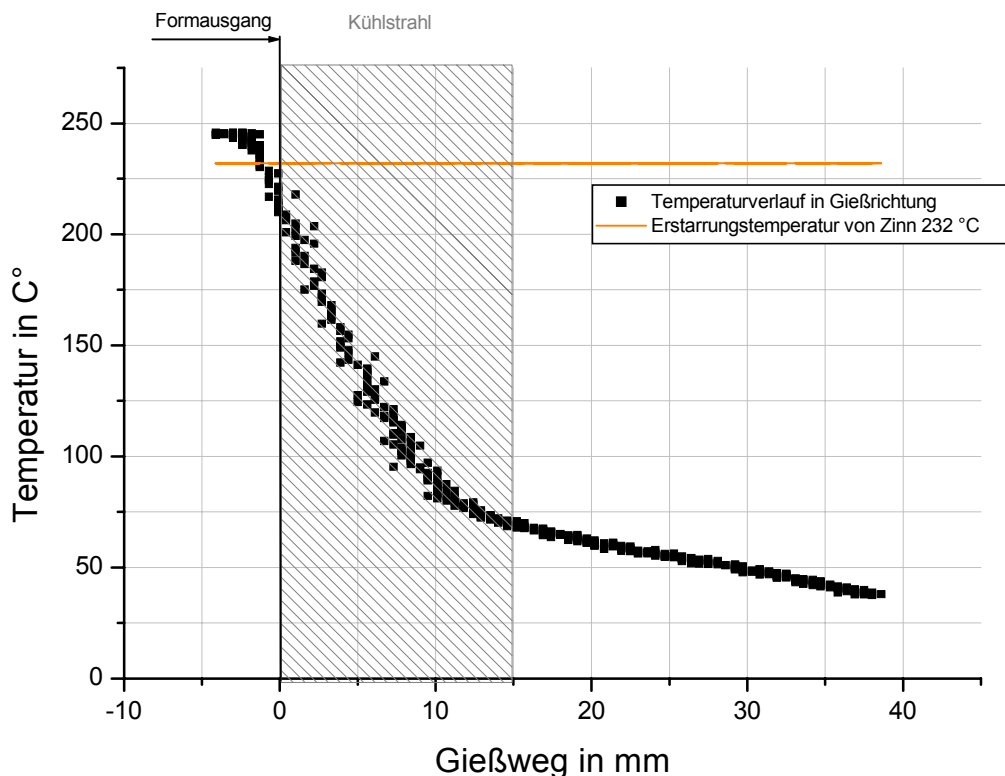


Abbildung 6.5: Temperaturverlauf bei Kühlung im Luftstrom und Verwendung einer Stahlform bei 250 °C Bad- und 247 °C Formtemperatur und einer Gießgeschwindigkeit von 1,8 mm/s,

Abbildung 6.5 zeigt die über den Gießweg aufgezeichnete Temperaturänderung bei Versuchen mit Luftkühlung.

Die Kurve verläuft flacher als bei Kühlung im Wasserbad. Dies bedeutet, dass der mit Luftkühlung erreichbare Temperaturgradient geringer ist. Der Prozess erfordert in diesem Fall niedrigere Temperatureinstellungen in Bad und Form sowie eine geringere Gießgeschwindigkeit.

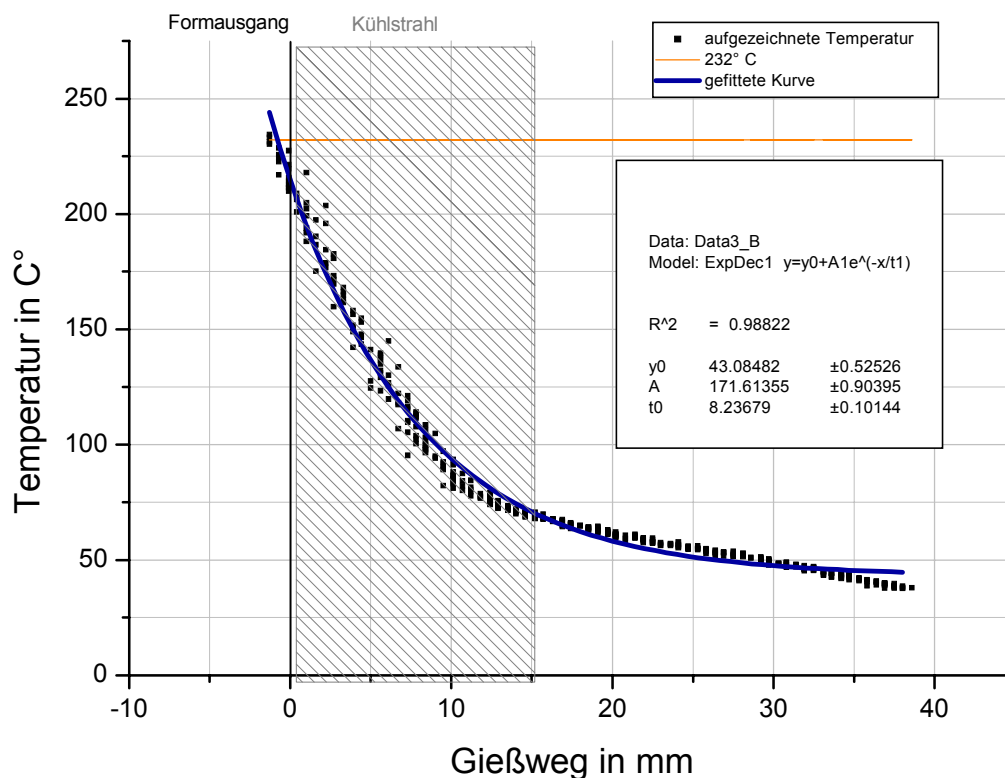


Abbildung 6.6: Temperaturverlauf mit gefitteter Exponentialfunktion

Um Aussagen über den Einfluss der Kühlbedingungen treffen zu können, wurde der Temperaturgradient im erstarrten Strang ermittelt.

Dabei wurde davon ausgegangen, dass in einem unendlich langen Stab, der über den Umfang Wärme abgibt und an dessen Stirnseite Wärme eingeleitet wird, die Temperatur in Längsrichtung exponentiell abfällt. Deshalb wurde für den Teil der Punkteschar der Messwerte, welche den Temperaturverlauf im bereits erstarrten Strang repräsentiert, eine exponentiell abfallende Trendlinie berechnet (Origin 6.0)

und deren Anstieg an der Phasengrenze berechnet. Abbildung 6.6 illustriert diese Vorgehensweise am Beispiel des für einen luftgekühlten Strang aufgezeichneten Temperaturverlaufs.

Formwerkstoff/ Bezeichnung der Versuchsreihe	Formkanal- querschnitt	Gieß- geschwin- digkeit in mm /s	T_L in °C	dT/dx in K/cm	Kühlverfahren
Graphitform / G1 g240-260-10-1, 0	vkt 1x1	3,5	269	-719	Wasserbad
Graphitform / G2 g240-260-10-1,5	vkt 1x1	5,2	265	-480	Wasserbad
Graphitform / G3 g260-280-15-1, 0	vkt 1x1	3,5	280	-640	Wasserbad
Graphitform / G4 g260-280-15-1, 5	vkt 1x1	5,2	285	-617	Wasserbad
Stahlform / S1 s240-260-10-1, 0	Dmr 1	3,5	293	-637	Wasserbad
Stahlform / S2 s240-260-10-1,5	Dmr 1	5,2	292	-614	Wasserbad
Stahlform / S3 s260-260-10-1, 0	Dmr 1	3,5	292	-731	Wasserbad
Stahlform / S4 s260-260-10-1, 5	Dmr 1	5,2	299	-709	Wasserbad
Stahlform / L1 l250-247-1,8	vkt 0,7x0,7	1,8	252	-230	Luftstrom

Tabelle 6.2: Temperaturgradienten im Gussstrang an der Phasengrenze

In Tabelle 6.2 sind die berechneten Temperaturgradienten aufgeführt. Es zeigt sich, dass bei allen Experimenten, bei denen der Gussstrang im Wasserbad ge-

kühlt wurde, der Temperaturabfall in Gießrichtung wesentlich steiler verläuft, als bei den Versuchsreihen, bei denen mit Luft gekühlt wurde.

Nach den Berechnungen führt eine Erhöhung der Gießgeschwindigkeit nicht zu einer Erhöhung des Betrags des Temperaturgradienten, sondern zu dessen Verringerung. Dies deutet darauf hin, dass bei den hier untersuchten Gießprozessen die Wärmediffusion in Gießrichtung mit ansteigender Gießgeschwindigkeit stärker zunahm, als der aus der höheren Gießgeschwindigkeit resultierende konvektive Wärmeübergang.

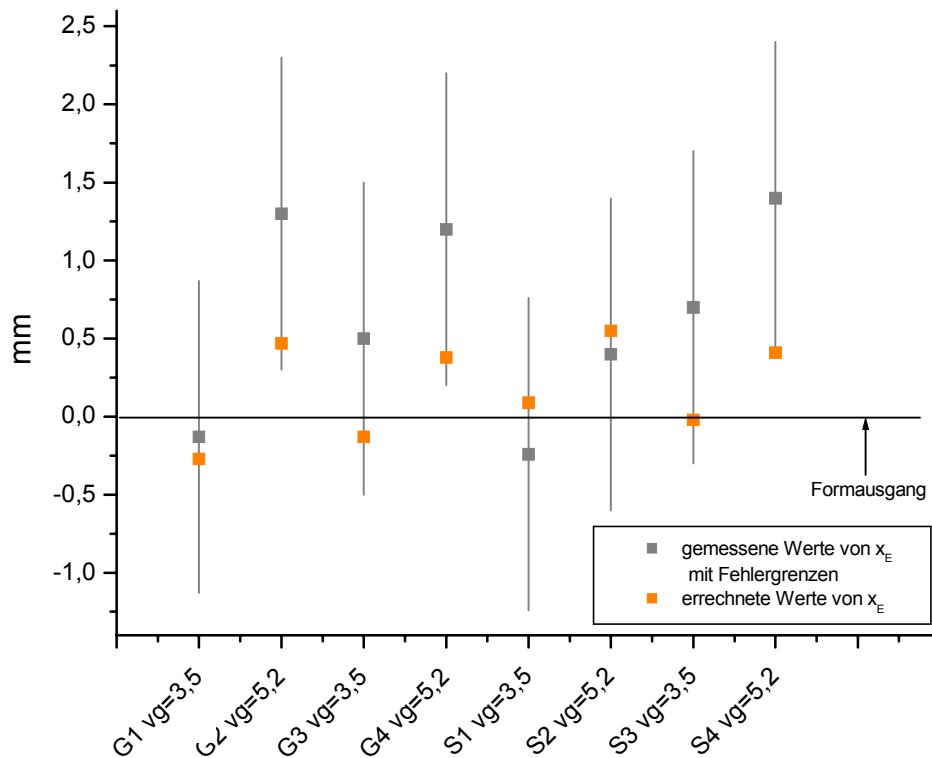


Abbildung 6.7: Vergleich berechneter und gemessener Werte der Position der Erstarrungsfront bei Gießgeschwindigkeiten von 3,5 und 5,2 mm/s und Kühlung im Wasserbad

Abbildung 6.7 zeigt die nach Gleichung (4.31) berechnete Lage der Erstarrungsfront x_E im Vergleich mit gemessenen Werten der Position der Erstarrungsfront. Letztere wurden ermittelt, indem die Temperatur des Stranges gemeinsam mit dem Gießweg aufgezeichnet und die Lage der Erstarrungsfront der Position der

Isotherme von 232 °C (Erstarrungstemperatur von Zinn) zugeordnet wurde. Bei Auswertung der Ergebnisse ist die Toleranz der Positioniergenauigkeit der Anlage von ± 1 mm zu beachten. In der Grafik Abbildung 6.7 ist dieser Toleranzbereich der Messwerte durch eine graue Linie kenntlich gemacht. Alle errechneten Werte liegen innerhalb dieses Bereiches.

Grundlage für die Berechnungen der Position der Erstarrungsfront waren die in Tabelle 14.10 angegebenen Daten und Stoffkonstanten sowie die ermittelten Temperaturgradienten aus Tabelle 6.2.

Sowohl die gemessenen als auch die berechneten Werte zeigen, dass bei Erhöhung der Gießgeschwindigkeit die Phasengrenze in Gießrichtung verschoben wird und bestätigen damit, dass die Modellgleichung (4.31) die wesentlichen physikalische Zusammenhänge des Prozesses berücksichtigt.

7 MÖGLICHKEITEN DER PROZESSSTEUERUNG

7.1 Steuermodelle

Ein wichtiges Kriterium für die Anwendbarkeit eines Fertigungsverfahrens ist eine ausreichende und gleichbleibende Qualität der damit hergestellten Produkte. Dies setzt voraus, dass der Prozess entsprechend den erforderlichen Qualitätskriterien unter reproduzierbaren Bedingungen gesteuert werden kann.

Realisiert wird eine solche Prozessführung, indem die Produktionsanlage nach vorgegebenen Parametern gesteuert wird. Bei den meisten Verfahren wirken mehrere Einflussgrößen gleichzeitig in unterschiedlicher Stärke und beeinflussen sich gegenseitig.

Deshalb werden für die Steuerung komplexer Prozesse mit mehreren Einflussgrößen Steuermodelle benötigt, in denen die Wirkungen aller wichtigen Einflussgrößen in Form einer mathematischen Gleichung oder eines Gleichungssystems miteinander verknüpft sind, woraus dann die entsprechenden Parametereinstellungen gewonnen werden.

Empirische Steuermodelle beruhen auf Versuchsdaten, die analysiert werden, um daraus z. B. mit statistischen Verfahren mathematische Zusammenhänge für die Wirkung der Einflussgrößen zu finden. Der Vorteil dieser Modelle besteht darin, dass systematische Fehler und anlagenbedingte Probleme in das Modell eingehen. Diese Modelle sind allerdings an die Versuchsbedingungen gebunden, unter denen sie erstellt wurden, und somit wenig verallgemeinerungsfähig.

Bei analytischen Modellen wird entsprechend den physikalischen Grundlagen des Verfahrens eine Modellgleichung oder ein Gleichungssystem entwickelt, das die steuerbaren Größen enthält. Der Vorteil dieser Methode ist, dass eine derartige Modellgleichung auch für die Steuerung anderer Anlagen und unter veränderten Betriebsbedingungen benutzt werden kann. Nachteilig ist, dass die Formulierung der physikalischen Zusammenhänge oftmals zu sehr komplizierten Modellen führt,

die ohne entsprechende Vereinfachungen (Vernachlässigung bestimmter Größen) mathematisch nicht handhabbar und deshalb für eine Prozesssteuerung nicht geeignet sind.

Bei der Suche nach Möglichkeiten zur Steuerung des Mikrostranggießprozesses wurden beide Varianten untersucht. Es wurde ein empirisches Modell erstellt und erprobt und auf der Grundlage eines einfachen analytischen Modells Möglichkeiten der Steuerung des Mikrostranggießprozesses diskutiert.

7.2 Prozesssteuerung mit Hilfe eines empirischen Modells

7.2.1 Modellentwicklung

Auf Grund der größeren Variationsbreite der Prozessparameter beim Gießen von Strängen mit einem Durchmesser von 0,9 mm konnte bei den Experimenten dieser Versuchsreihe eine genügend große Anzahl von statistisch auswertbaren Proben produziert und ein Steuermodell entwickelt werden.

Mit Hilfe eines auf multipler Regression basierenden Analyseverfahrens wurde aus dem Datenmaterial, das bei den Gießversuchen gewonnen wurde, ein empirisches Modell erstellt, welches den Einfluss der variierbaren Prozessparameter Badtemperatur, Formtemperatur, Kühltemperatur, Gießgeschwindigkeit auf die Zielgröße Strangdurchmesser berücksichtigt.

Für die Berechnung der Zielgröße Strangdurchmesser konnte aus dem Datensatz der Gießversuche, bei denen eine Kokille mit einem Formkanaldurchmesser von 0,93 mm verwendet wurde, statistisch der mit Gleichung (6.1) auf Seite 65 beschriebene lineare Zusammenhang ermittelt werden:

Hierbei ist T_{Bad} die im Schmelzbad gemessene Temperatur, T_{Form} die nahe dem Formkanal an der Stirnseite der Form gemessene Formtemperatur, $T_{Kühl}$ die Temperatur des Kühlbades, v_g die Gießgeschwindigkeit und L_A die Abzugslänge

also die Stelle des Stranges an der, die in die Statistik eingegangenen Werte gemessen wurden.

7.2.2 Prozesssteuerung

Von den in das statistische Modell eingebundenen Prozessparametern gelten nach den vorangegangenen Untersuchungen zur Analyse der Prozessparameter (Abbildung 6.2) die Gießgeschwindigkeit und die Formtemperatur, welche die Temperatur der Schmelze in der Form stark beeinflusste, als vorwiegend prozessrelevant.

Bei den Experimenten, zur Steuerung der Zielgröße Strangdurchmesser mit Hilfe des empirischen Steuermodells wurde nur die Gießgeschwindigkeit variiert. Auf Grund der thermischen Trägheit der Schmelze ist eine Steuerung des Prozesses durch die Regelung der Schmelzbadtemperatur in der Praxis nicht realisierbar. In abgeschwächter Form trifft dies auch für die Regelung der Form- und Kühltemperatur zu.

In Abbildung 7.1 ist die nach dem Modell berechnete Abhängigkeit des Strangdurchmessers bei verschiedenen Temperatureinstellungen dargestellt. Abbildung 7.2 zeigt die berechneten Werte im Vergleich mit den experimentell bestimmten Daten. Beide Kurven lassen eine relativ gute Übereinstimmung erkennen.

Das Modell spiegelt die speziellen Versuchsbedingungen wider, unter denen die experimentellen Untersuchungen durchgeführt wurden. Es zeigt exemplarisch, dass eine Steuerung des Mikrostranggießprozesses auf diese Weise realisiert werden kann. Es ist aber auf andere Versuchsbedingungen nicht ohne weiteres übertragbar.

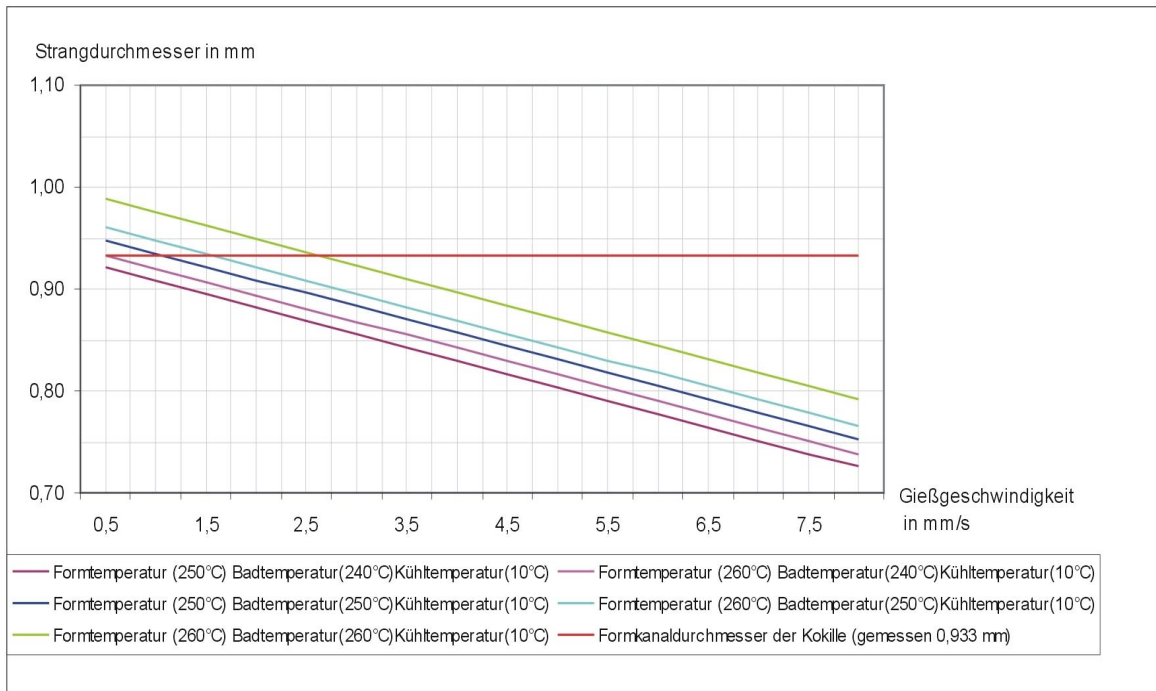


Abbildung 7.1: Nach Modell (6.1) gerechnete Strangdurchmesser

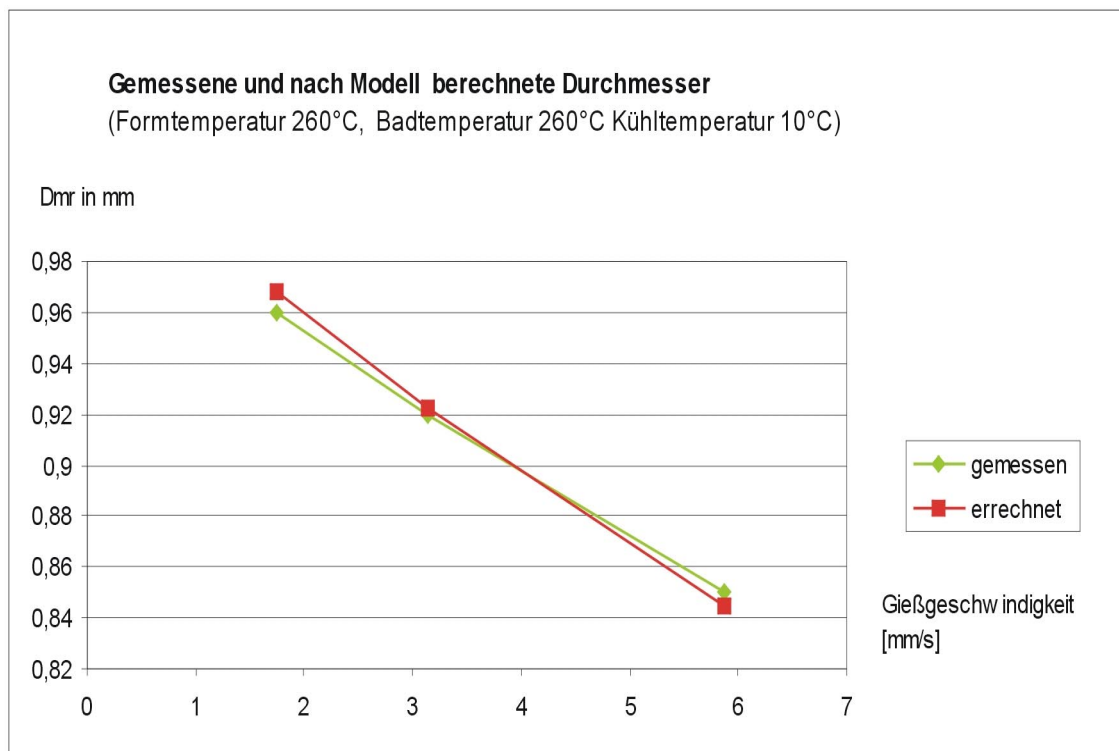


Abbildung 7.2: Gemessene und nach Modell (6.1) berechnete Durchmesser im Vergleich

7.3 Prozesssteuerung mit Hilfe eines analytischen Modells

Wie bei den vorangegangenen Untersuchungen festgestellt werden konnte, ist eine stabile Lage der Erstarrungsfront während des Gießprozesses wichtig für die Gussteilqualität und die Prozessstabilität. Schon die Verschiebung der Phasengrenze um wenige Zehntel Millimeter hat Auswirkungen auf die Qualität der gegossenen Profilstränge.

Die Modellgleichung zur Berechnung der Position der Erstarrungsfront, Gleichung (4.31), die hier noch einmal wiedergegeben wird, zeigt die Verknüpfung der Einflussgrößen, welche vornehmlich die Lage der Erstarrungsfront bestimmen.

$$x_E = \frac{\lambda_l (T_L(x = x_0) - T_E)}{-\lambda_s \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_E} - h_E \rho_s v_g} \quad 4.25$$

Es sind

- T_L die Temperatur der Schmelze im Formkanal
- $\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_E}$ der Temperaturgradient im erstarrten Strang und
- v_g die Gießgeschwindigkeit.

An Hand der Gleichung ist zu erkennen, wie sich eine Veränderung dieser Größen auf den Wert von x_E auswirkt.

Wenn x_E kleiner wird, bedeutet dies, dass sich die Erstarrungsfront in das Forminnere verlagert, während eine Vergrößerung von x_E eine Verschiebung der Phasengrenze in Gießrichtung anzeigt.

In Abbildung 7.3 sind die Auswirkungen der Veränderung der Temperatur der Schmelze T_L des Temperaturgradienten dT/dx und der Gießgeschwindigkeit v_g auf die Position der Phasengrenze für ausgewählte Parameterkombinationen grafisch dargestellt.

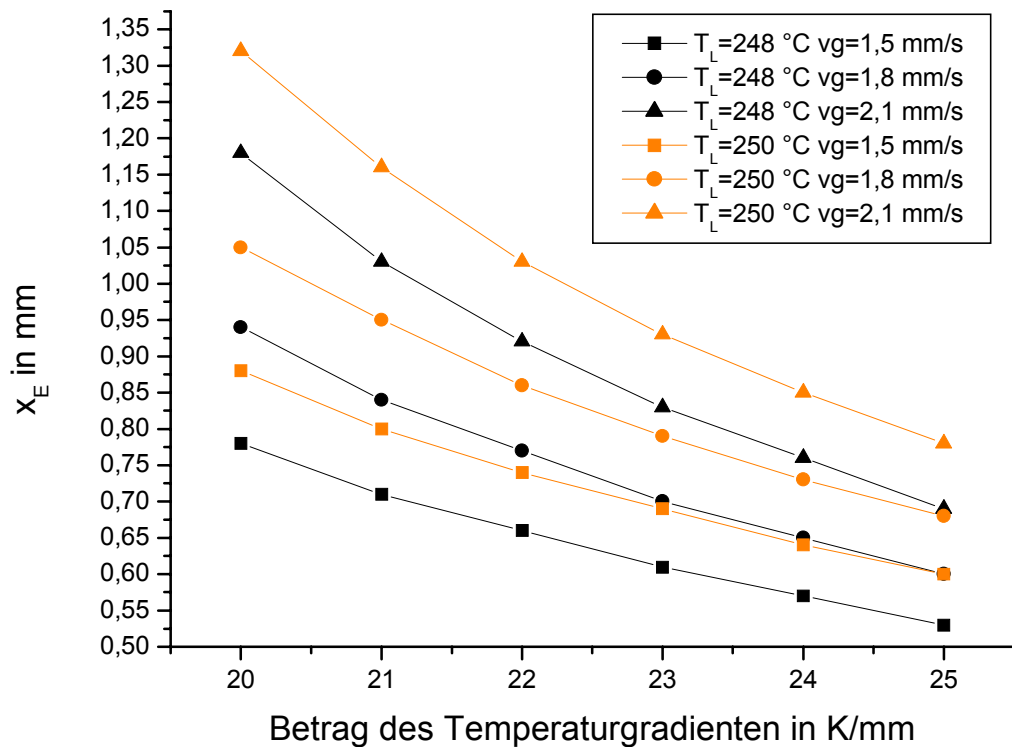


Abbildung 7.3: Verschiebung der Phasengrenze bei Änderung der Haupteinflussgrößen:

Eine Steigerung von T_L führt demnach bei konstantem Temperaturgradienten und bei unveränderter Gießgeschwindigkeit zu einer Verschiebung der Phasengrenze in Gießrichtung. Dies stimmt mit den beim Experimentieren gewonnenen Erkenntnissen überein und ist an einer bei Temperaturanstieg zunehmenden Neigung zu Schmelzedurchbrüchen festzustellen.

Das Absinken der Schmelztemperatur bewirkt dem gegenüber eine Verlagerung der Phasengrenze ins Forminnere. Erkennbar ist dies zuerst an einer Verschlechterung der Oberflächenqualität und führt bei weiterer Temperaturabsenkung zum Einfrieren der in der Form anstehenden Schmelze.

Die Verringerung des Betrags des Temperaturgradienten hat entsprechend der Darstellung in Abbildung 7.3 ebenfalls eine Zunahme von x_E und damit eine Verschiebung der Phasengrenze in Gießrichtung zur Folge, was ebenfalls durch Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bestätigt wurde.

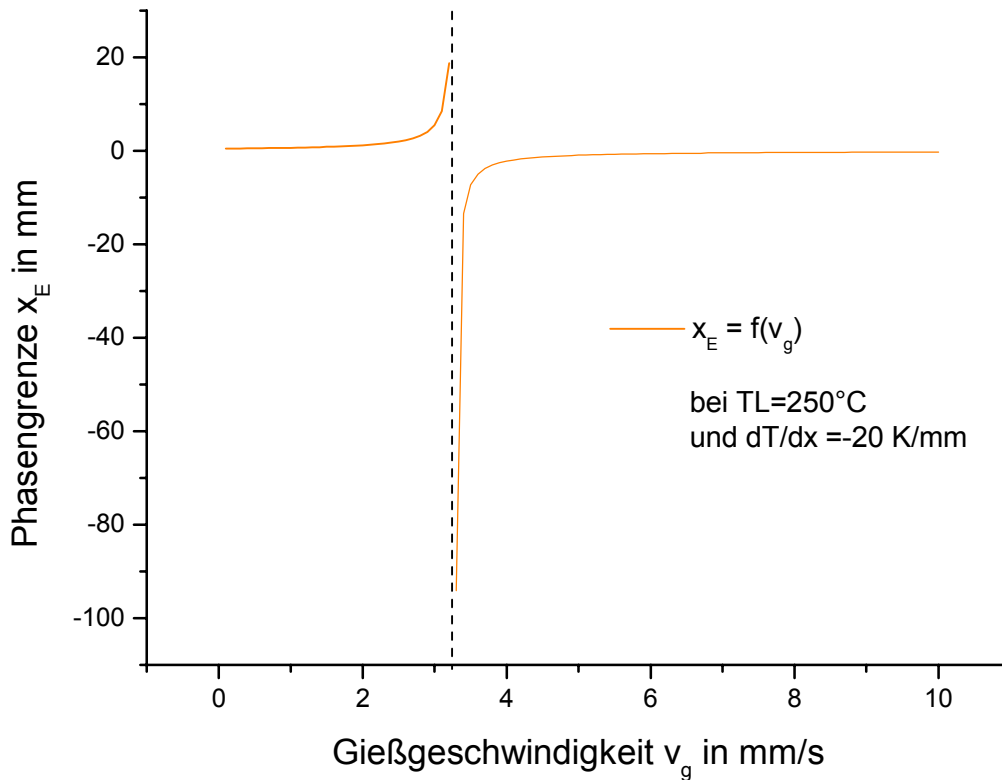


Abbildung 7.4: Berechnete Position der Phasengrenze als Funktion der Gießgeschwindigkeit

Abbildung 7.4 zeigt die nach Gleichung (4.31) berechnete Position der Phasengrenze x_E als Funktion der Gießgeschwindigkeit bei konstanter Temperatur der Schmelze und ebenfalls konstantem Temperaturgradienten. Aus dem Kurvenverlauf ist zu erkennen, dass die Funktion eine Polstelle hat. Für die Prozessführung bedeutet dies, dass der Temperaturgradient und die Gießgeschwindigkeit so auf einander abgestimmt werden müssen, dass der Nenner des Bruches von Gleichung (4.31) nicht gleich oder kleiner Null wird. Wenn sich der Nenner des Bruches Null annähert wird x_E unendlich groß. In der Praxis kann die Strangerstarrung aber nur innerhalb der durch die Form gegebenen geometrischen Grenzen stattfinden, und diese liegen bei wenigen Millimetern Länge. Genauso kann x_E keine negativen Werte annehmen, denn dann läge die Erstarrungsfront innerhalb der flüssigen Phase. Damit sind die Schranken für den Arbeitsbereich der Parameter vorgegeben.

Bei den Gießversuchen war dieser Sachverhalt daran zu erkennen, dass bei Kühlung des Gussstranges im Luftstrom, wobei Temperaturgradienten bis 25 K/mm erreicht werden konnten, mit geringeren Gießgeschwindigkeiten gearbeitet werden musste als bei der Kühlung im Wasserbad, wo höhere Temperaturgradienten (bis 70 K/mm) realisiert wurden.

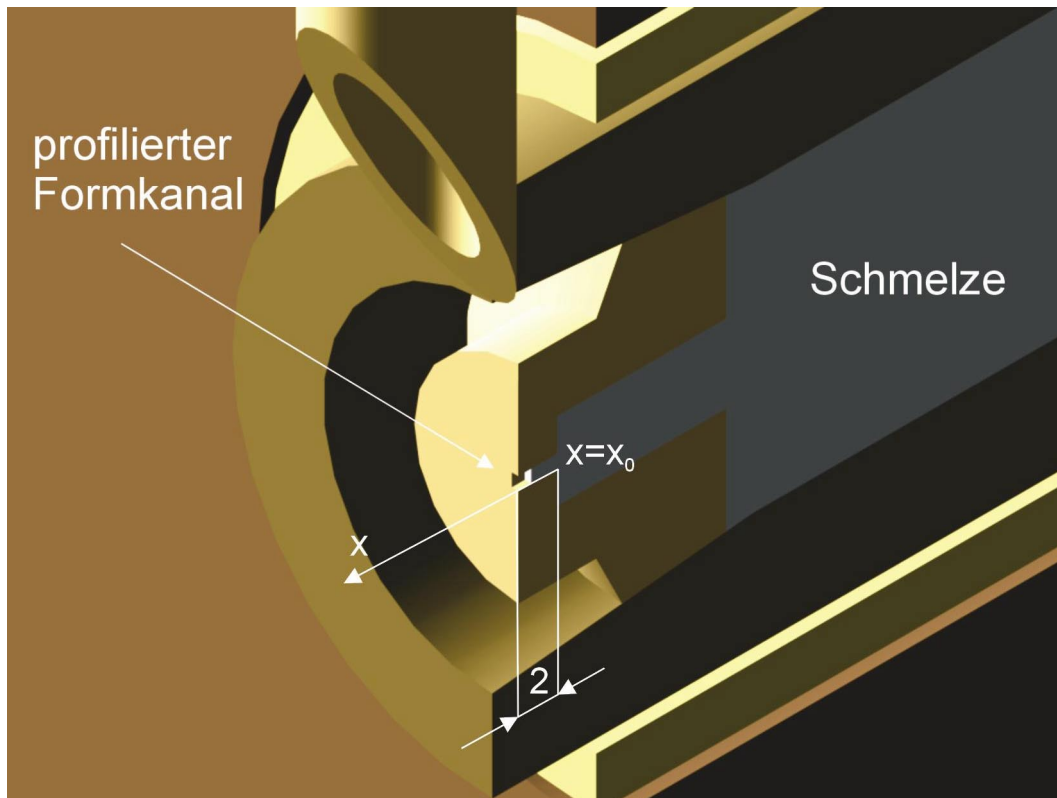


Abbildung 7.5: Kokille mit Formkanal von 2 mm Länge

Wie aus dem Kurvenverlauf zu erkennen ist, ergeben sich für die in Abbildung 7.4 gewählten Parameterkombination nur bis zu einer Gießgeschwindigkeit von etwa 2,8 mm/s praktisch sinnvolle Werte für x_E , wenn man von einer Formkanallänge von 2 mm ausgeht (Abbildung 7.5).

In Abbildung 7.6 wurde x_E für verschiedene realistische Parameterkombinationen nach Gleichung (4.31) berechnet und als Funktion der Gießgeschwindigkeit für einen Wertebereich dargestellt, in dem die Positionierung der Erstarrungsfront unter technischen Aspekten möglich und sinnvoll ist.

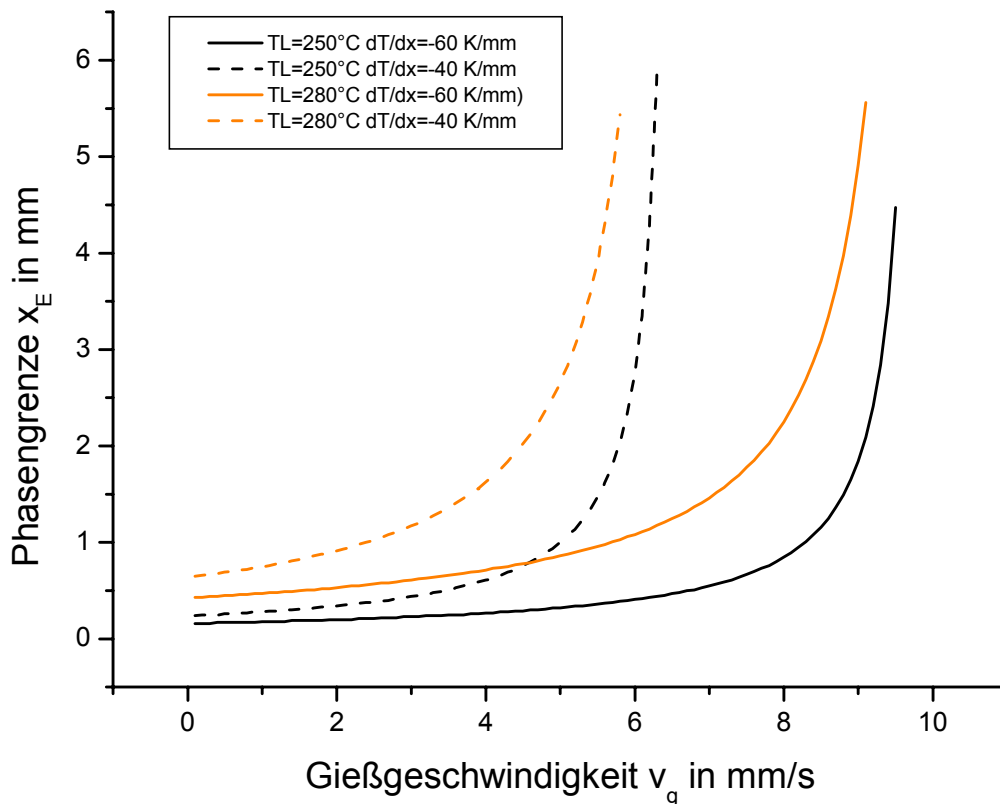


Abbildung 7.6: Nach Gleichung (4.31) berechnete Position der Phasengrenze als Funktion der Gießgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Temperaturgradienten

Es ist ersichtlich, dass bei höherem Temperaturgradienten eine präzisere Steuerung von x_E durch Änderung der Gießgeschwindigkeit erreicht werden kann, als bei niedrigeren Temperaturgradienten.

Die Berechnung und Darstellung von x_E für bestimmte Parameterkombinationen ermöglicht die Abschätzung der Parametereinstellungen bei vorgegebenen Betriebsbedingungen. Auf diese Weise kann z. B die obere Grenze der Gießgeschwindigkeit abgeschätzt werden, bei der die Strangerstarrung innerhalb der Form erfolgt.

Eine gezielte Positionierung der Erstarrungsfront mit Hilfe eines analytischen Modells erscheint nach den bisherigen Erkenntnissen möglich. Die Entwicklung einer handhabbaren Methode bedarf aber noch weiterer Forschungsarbeiten. Das mit Gleichung (4.31) entwickelte Modell stellt eine erste Grundlage für derartige Untersuchungen dar.

8 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

8.1 Profilformen und Abmessungen

Mit der in Kapitel 5 beschriebenen Mikrostranggießapparatur konnten sowohl Profilstränge mit kreisförmigen Querschnitten in unterschiedlichen Abmessungen und Längen als auch Profilstränge mit komplizierter strukturierter Querschnitten hergestellt werden.

Aus Zinn wurden

- Kreisprofile im Durchmesser von 1 mm; 0,9 mm; 0,5 mm und 0,3 mm in Längen bis zu 900 mm (Abbildung 14.2 auf Seite 118),
- Sternprofile in Längen bis 900 mm (Abbildung 14.4 und Abbildungen auf Seite 120)
- Vierkantprofile (Abbildung 14.3 und Abbildungen auf Seite 121) in Längen bis 400 Millimeter gegossen.

Aus Aluminium und Blei wurden 1,0 und 0,5 mm dicke Kreisprofile von 400 mm Länge gegossen.

Die Abbildungen auf Seite 118 und Seite 119 zeigen unter dem Mikroskop fotografierte Profilstränge aus Zinn.

Auf den Seiten 120 und 121 sind die Profilquerschnitte gegossener Zinnstränge als Schliffbild zu sehen. Damit die Querschnittsform der Gussstränge untersucht werden kann, wurden die Gussstränge wie metallografische Proben in Harz eingebettet, angeschliffen und der Profilschliff unter dem Mikroskop (Neophot) fotografiert.

Zusammengehörende Abbildungen sind untereinander angeordnet. Sie zeigen jeweils die vorgegebene Profilform (Profil des Formkanals) als technische Zeich-

nung, die verwendete Gießform (mikroskopische Aufnahme des Formkanals) und das Schliffbild des in der entsprechenden Form gegossenen Stranges.

8.2 Werkstoffe und Gefügestruktur

Beim Gießen von Zinn konnten innerhalb eines breiten Arbeitsbereiches bei sehr unterschiedlichen Parameterkombinationen Stränge in Längen bis an die durch die Apparatur vorgegebene Grenze von 900 Millimetern reproduzierbar gegossen werden. Aus diesem Grund wurde auch für die meisten Experimente Zinn als Gießmetall verwendet.

Die Abbildung 14.17 und Abbildung 14.18 auf Seite 122 zeigen den metallografischen Quer- bzw. Längsschliff eines Zinnstranges, der in einer Kokille mit einem Formkanaldurchmesser von 0,93 mm gegossen wurde.

In der Mitte des Stranges ist die Ausbildung eines einzelnen großen Kornes zu erkennen. In der Randzone sind kleinere Körner ausgebildet. Die Ausprägung eines großen Kornes in der Strangmitte und kleinerer am Probenrand ist bei sämtlichen Schliffproben von Zinnsträngen feststellbar.

Mögliche Ursachen für dieses Gefügebild könnten in einem Erstarrungsverhalten des Stranges, wie es in der Literatur für das OCC-Verfahren beschrieben wird, begründet sein. Dies würde bedeuten, dass der Strang von innen her in Abzugsrichtung erstarrt und das kleinkörnige Gefüge am Rand dadurch entsteht, dass noch flüssige am Strang anhaftende Schmelzereste erst nach Austritt aus der Form erstarren.

Das kleinkörnige Gefüge an der Außenkontur des Profils könnte aber auch durch mechanische Beanspruchung des Stranges infolge der Abzugsbewegung (Reibung am Formrand, Biegebeanspruchung durch das Eigengewicht des Stranges) hervorgerufen worden sein.

Die im Schliffbild erkennbare Textur deutet auf eine Vorzugsorientierung des Kristallwachstums in Abzugsrichtung des Stranges hin.

Mit Aluminium als Gießwerkstoff wurden kreisförmige Stränge im Durchmesser von einem Millimeter und in einer Länge von 400 Millimetern gegossen. Die Strangkühlung erfolgte im Luftstrom durch Queranströmung des Gussstranges. Versuche mit Wasserkühlung schlugen fehl. Sie führten zum sofortigen Einfrieren der Schmelze im Formkanal.

In Abbildung 14.19 ist der metallografische Querschliff und in Abbildung 14.20 der Längsschliff eines dieser Profilstränge dargestellt. Der Querschnitt des Stranges entspricht weitgehend dem Profil der verwendeten Form und ist nahezu kreisrund ausgeformt.

Die Schliffe weisen ein typisch dendritisches Aluminiumgefüge auf. Im Längsschliff ist eine Vorzugsorientierung der Dendriten in Abzugsrichtung erkennbar.

In ihrer derzeitigen Ausführung ist die Versuchsanordnung für die Verarbeitung von Aluminium nur bedingt geeignet. Auf Grund der begrenzten Heizleistung der zur Verfügung stehenden Öfen können keine reproduzierbaren Arbeitsbedingungen im Temperaturbereich zwischen 600 °C und 750 °C eingestellt werden. Außerdem müsste die Apparatur auf ein Arbeiten unter Schutzgas umgerüstet werden. Dies ist insbesondere für das Gießen komplizierterer und sehr kleiner Profilquerschnitte (Querschnittsabmessungen < 0,5 mm) notwendig, um der Gefahr der Verschlickung des Formkanals vorzubeugen.

8.3 Maßgenauigkeit und Profilausprägung

8.3.1 Kreisprofile

Kriterium für die Maßgenauigkeit der kreisförmigen Probestränge ist deren Durchmesser. Er wurde jeweils bei einer Stranglänge von 10 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm und von 390 mm unter einem Messmikroskop gemessen.

Zur Untersuchung wurden vom Durchmesser 0,9 mm 350 Stränge, vom Durchmesser von 0,8 mm 160 Stränge, vom Durchmesser von 0,5 mm 180 und vom Durchmesser von 0,3 mm 24 Stränge herangezogen.

Die Abweichungen der Durchmesser vom Sollmaß lagen im Bereich von $\pm 0,05$ mm.

Im Ergebnis der Messungen ist bei den Querschnittsabmessungen der Probestränge gegenüber dem Querschnitt des Formkanals der Kokille eine deutliche Tendenz zum Untermaß festzustellen. Dies deutet darauf hin, dass bei den meisten Proben die Erstarrung innerhalb des Formkanals oder direkt am Formausgang erfolgte, wobei die im Formkanal anstehende Schmelze nicht über den gesamten Kanalquerschnitt erstarrt ist. Zwischen Formkanalwand und erstarrtem Strang blieb ein „Schmelzefilm“ stehen, dessen Dicke maßgeblich von der Formtemperatur abhängt.

Der Grund für die Maßabweichungen ist eine in geringem Maße veränderte Lage der Erstarrungsfront, die durch eine nicht ganz stabile Prozessführung hervorgerufen wird. Die Ursachen dafür liegen in

- einer ungleichmäßigen Strangkühlung,
- Eigenbewegungen des Gussstranges durch den Abzugsvorgang bzw.
- Temperaturschwankungen

begründet.

Um Aussagen über die Ausprägung der Profilform zu erhalten, wurden von ausgewählten Proben der Strangdurchmesser 0,9 und 0,5 Millimeter metallografische Querschliffe angefertigt. Der visuelle Vergleich der Schliffbilder beider Versuchsreihen zeigt, dass die Stränge aus der Versuchsreihe mit 0,5 mm Durchmesser mehr vom idealen Kreisprofil abweichen als die der Versuchsreihe mit einem Durchmesser von 0,9 mm.

Es wird erwartet, dass mit einer präziseren Regelung der Prozessparameter die Maßhaltigkeit verbessert werden sowie eine bessere Übereinstimmung zwischen dem Profil des Formkanals und Profil des Gussstranges erzielt werden kann.

8.3.2 Sternprofile

In Abbildung 14.7 und Abbildung 14.10 auf Seite 120 sind metallografische Querschliffe von Sternprofilen aus Zinn dargestellt, die in zwei verschiedenen Gießformen hergestellt wurden.

Die Skizze oben links (Abbildung 14.5) enthält die für die Fertigung der Kokillen vorgegebenen Abmaße des Formkanals.

Abbildung 14.6 und Abbildung 14.8 zeigen eine mikroskopische Aufnahme der verwendeten Gießformen mit den nach den Vorgaben der Skizze (Abbildung 14.5) gefertigten Formkanälen. Es ist zu sehen, dass der Formkanal von Abbildung 14.6 weitgehend den Vorgaben der Zeichnung entspricht, während die mikroskopische Aufnahme der Profilbohrung von Abbildung 14.8 fertigungsbedingte Maß- und Formabweichungen erkennen lässt.

Der Strang in Abbildung 14.7 wurde in der in Abbildung 14.6 dargestellten Kokille gegossen. Das Sternprofil ist sehr gleichmäßig ausgeprägt und konnte mit guter Oberflächenqualität über eine Länge von 900 mm abgezogen werden. Allerdings weicht der Querschnitt des Strangprofils vom Ideal der Gießform ab.

Der Außendurchmesser dieses sternförmigen Profilstranges liegt bei durchschnittlich 0,98 mm. Damit ist er nur um 0,01 mm kleiner als der äußere Durchmesser des sternförmigen Formkanals in der Kokille, der mit 0,99 mm gemessen wurde. Dies deutet darauf hin, dass die Gießform bis in die Profilspitzen mit Schmelze ausgefüllt wurde und die Erstarrung des Stranges innerhalb des Formkanals fast über den gesamten Querschnitt erfolgte. Der „Kerndurchmesser“ des sternförmigen Strangquerschnittes ist jedoch mit einem durchschnittlichem Maß von 0,72 mm deutlich größer als die Innenbohrung der verwendeten Form, deren Durchmesser 0,44 mm beträgt.

Die Ursache für diese erkennbare Form- und Maßabweichung liegt möglicherweise darin begründet, dass die Erstarrungsfront nah am Formausgang lag, so dass durch den Abzugsvorgang noch flüssige Restschmelze mitgeschleppt wurde, die

sich in den Zwickeln zwischen den Spitzen des bereits erstarrten Sternprofils gesammelt hat und dort außerhalb der Form erstarrt ist.

Der Strang von Abbildung 14.10 wurde in der Form von Abbildung 14.8 hergestellt. Der Vergleich des Schliffbildes mit der mikroskopischen Aufnahme der verwendeten Kokille (Abbildung 14.8) zeigt, dass hier eine gute Übereinstimmung des Strangquerschnittes mit dem der Profilbohrung erreicht wurde.

8.3.3 Vierkantprofile

Das auf dem Foto (Abbildung 14.3) als Strang und in Abbildung 14.13 als Querschliff abgebildete Vierkantprofil aus Zinn wurde in einer Graphitkokille (Abbildung 14.12) hergestellt. Zwischen Strangquerschnitt und Profilbohrung besteht sowohl in den Abmessungen als auch in der Form Übereinstimmung.

An der in Abbildung 14.12 dargestellten Profilbohrung für den Formkanal ist ein typisches Fertigungsproblem bei der Herstellung sehr kleiner profilierter Bohrungen zu erkennen. Das Drahterodieren des Formkanals erfolgte auf einer Erodieranlage, die zur Herstellung von Graphitelektroden vorgesehen ist, mit handelsüblichem Erodierdraht. Die zur Verfügung stehenden minimalen Drahtabmessungen lagen bei 0,6 mm im Durchmesser. Damit war der kleinstmögliche Eckenradius mit 0,3 mm vorgegeben und die Ausbildung einer scharfkantigen Profilform nicht möglich.

Im Gegensatz dazu wurde die Stahlkokille mit dem in Abbildung 14.15 abgebildeten Formkanalprofil auf einer Mikroerodieranlage gefertigt, bei der zum Drahterodieren sehr dünne Drähte von 40 µm Dicke eingesetzt werden können. Hiermit sind Formkanalprofile in sehr kleinen Querschnittsabmessung und mit genaueren Konturen (Abbildung 14.14) herstellbar.

Das in Abbildung 14.16 und Abbildung 14.21 dargestellte Profil wurde in einer solchen Stahlkokille hergestellt. Das Schliffbild und die mikroskopische Aufnahme der Kokille zeigen gute Übereinstimmung.

Die Innenmaße des Formkanals der verwendeten Kokille betragen 0,697 mm x 0,697 mm (Abbildung 14.22).

Abbildung 14.21 zeigt die mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems ermittelten Abmaße des Profilquerschnitts. Die Messung des Schliffbildes ergab für die Höhe des Profils einen Wert von 0,688 mm, für seine Breite aber unterschiedliche Werte. Das Profil ist unten (die Kokille war in der gleichen Ausrichtung, wie im Bild dargestellt, in die Apparatur eingebaut) breiter. Ursache dafür kann der höhere Schweredruck der Schmelze am unteren Formrand sein.

Aufgrund der glatten Oberfläche des Profilstranges und der mit 0,01 mm relativ geringen Maßabweichung des Profils vom Innenmaß der Form ist zu vermuten, dass der Strang unmittelbar am Formausgang erstarrt ist. Ein Hinweis dafür ist auch das Übermaß der Unterkante des Profils. Dies deutet auf eine Erstarrung des Stranges außerhalb des Formkanals nahe der Formkante hin.

8.4 Oberflächengüte

Die optisch in Längsrichtung des Stranges gemessenen Oberflächenqualitäten fehlerfreier Profilstränge liegen sowohl bei den Zinn- als auch bei den Aluminiumproben bei Mittenrauwerten R_a im Bereich zwischen 0,5 μm und 1,5 μm , so dass die Oberflächenrauheiten mit bloßem Auge nicht mehr zu erkennen sind.

Die gemittelte Rautiefe R_z liegt bei durchschnittlich 3,41 μm (Mittelwert aus 64 Messungen) und entspricht damit einer Oberflächenqualität, wie sie nach DIN 4766-1 bei Druckgussteilen erreicht wird.

Mit zunehmender Stranglänge nahm die Oberflächenqualität ab. Die Ursachen dafür sind

- ein während des Gießvorganges zu verzeichnender Temperaturabfall in der Gießform (Abbildung 14.1),
- eine mit wachsender Stranglänge verstärkte Neigung zu Vibrationen und

- eine zunehmenden Beanspruchung des Stranges durch sein Eigengewicht.

Abbildung 8.1 zeigt typische Oberflächenfehler, die beim Mikrostranggießen von Kreisprofilen auftraten.

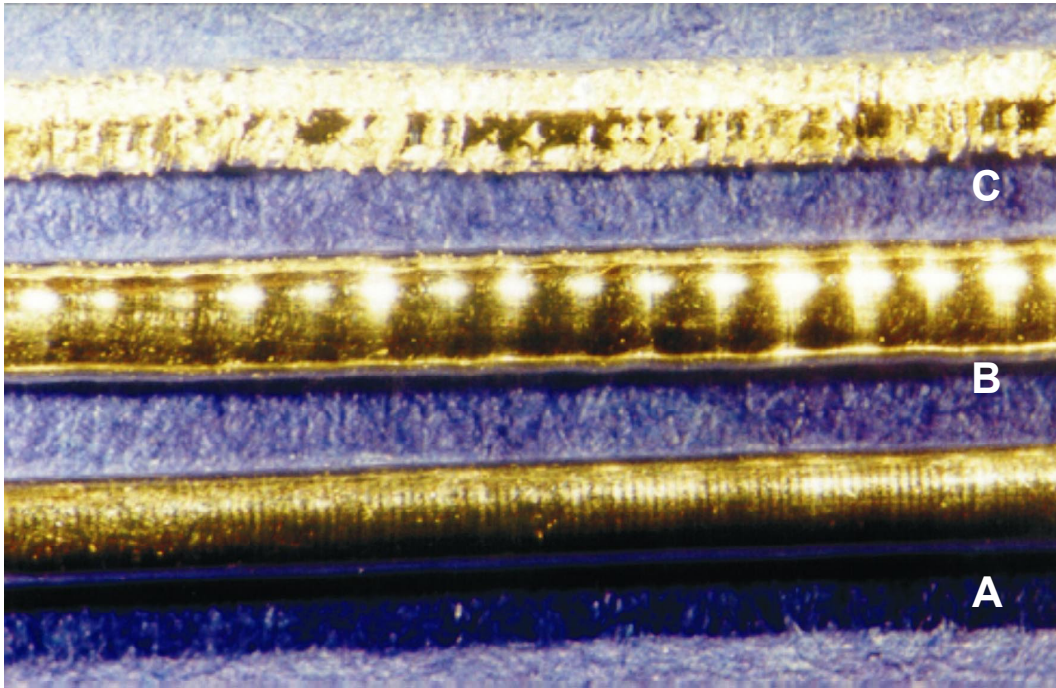


Abbildung 8.1: Oberflächenfehler bei Kreisprofilen (Dmr 0,9 mm): raues Profil (C), welliges Profil (B), Vibrationsmarken (A)

Der im Bild unten dargestellte Strang (A) ist nahe dem Formausgang erstarrt. Die auf seiner Oberfläche zu erkennenden Vibrationsmarken rühren von Vibrationen des Stranges her.

Der Strang in der Mitte (B) hat eine welliges Oberflächenprofil mit regelmäßigen Verdickungen. Dies weist auf eine alternierende Position der Erstarrungsfront direkt am Formausgang hin. Ursache dafür können eine ungleichmäßige Strangkühlung bei sehr guter Formfüllung oder durch die Abzugsbewegung verursachte Schwingungen bei ebenfalls sehr guter Formfüllung sein. Im oben gezeigten Fall liegt der Grund für diese Schwingungen in einer nicht exakt rund laufenden Gewindespindel der Abzugsvorrichtung. Der Abstand zwischen den Verdickungen entspricht der Steigung der verwendeten Spindel.

Der Strang oben (C) hat eine raue von Rissen gezeichnete Oberfläche. Diese Risse entstehen, wenn während der Strangerstarrung im Bereich der Erstarrungsfront Spannungen auftreten. Beim Mikrostranggießen kommt es dazu, wenn der Strang zu weit im Inneren des Formkanals erstarrt. Die Spannungen werden durch Reibung des bereits erstarrten aus der Form laufenden Stranges an der Innenwand der Form verursacht. Auch zeigen Stränge, bei denen während des Gießprozesses die Formfüllung, entweder durch zu niedrigen Pegelstand im Schmelzbad oder durch Schlackereste in der Form behindert war, ein ähnliches Oberflächenbild.

Eine Ursache für die Verschiebung der Erstarrungsfront in das Innere der Form ist der Temperaturabfall während des Gießprozesses, siehe auch Abbildung 14.1. auf Seite 117 im Anhang. Nach Gleichung (4.31) verschiebt sich die Erstarrungsfront mit abnehmender Temperatur T_L ins Innere der Form. Dies führt zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualität. Durch Steigerung der Gießgeschwindigkeit während des Gießvorganges kann diesem Verhalten entgegen gewirkt und eine Verbesserung der Oberflächenqualität erreicht werden.

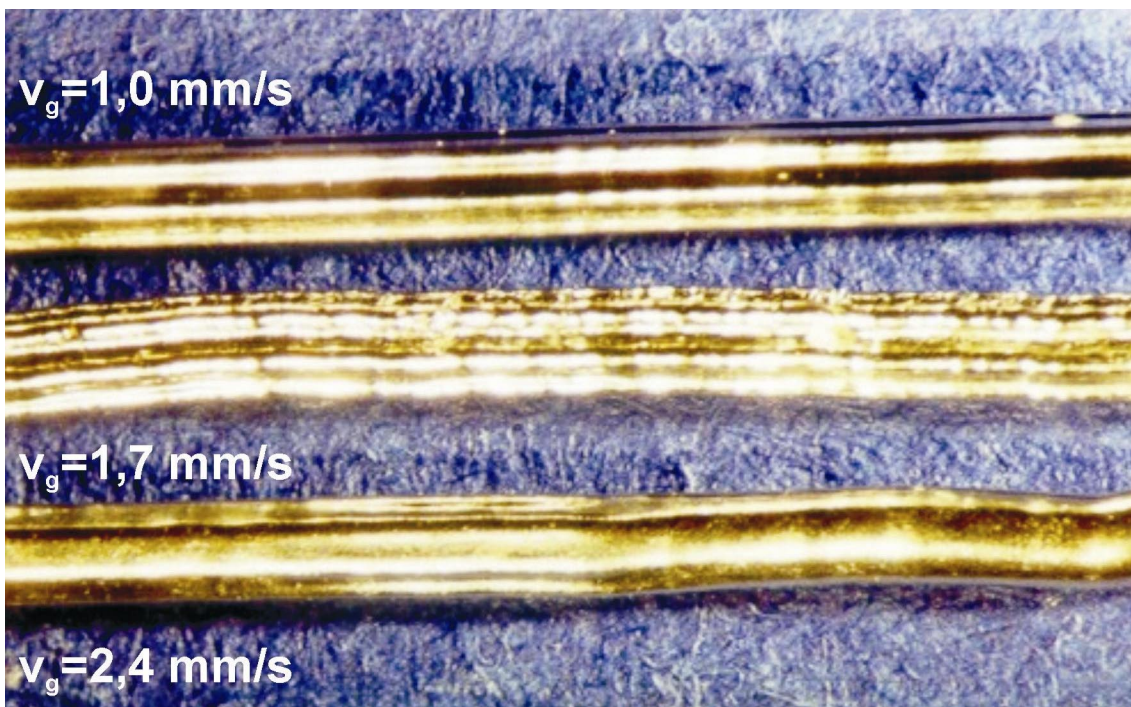


Abbildung 8.2: Sternprofil Vergleich unterschiedlicher Gießgeschwindigkeiten

Beachtenswert ist in diesem Zusammenhang außerdem der Einfluss der Profilgeometrie, wie Abbildung 8.2 zeigt.

Bei den hier abgebildeten Gusssträngen wurde bei gleichen Temperatureinstellungen die Gießgeschwindigkeit gesteigert. Der Strang in der Mitte des Bildes hat gegenüber dem oberen Gussstrang eine verschlechterte Oberflächenqualität. Dies ist ein Indiz dafür, dass er weiter innen im Formkanal erstarrt ist und die Phasengrenze in den Formkanal hinein verschoben wurde. Bei einer weiteren Erhöhung der Gießgeschwindigkeit wird die Form des Profils ungenau und „verläuft“. Ursache ist, dass sich die Phasengrenze wieder aus der Form heraus in Gießrichtung bewegt.

Der hier sichtbar ambivalente Einfluss der Gießgeschwindigkeit widerspricht den in Abschnitt 6.4 dargestellten Untersuchungsergebnissen. Danach hat die Steigerung der Gießgeschwindigkeit eine Verlagerung der Erstarrungsfront in Abzugsrichtung zur Folge, Abbildung 6.3, Abbildung 6.4 und Abbildung 6.7.

Diese Diskrepanz kann folgendermaßen erklärt werden. Bei allen Experimenten zur Messung des Temperaturverlaufs wurden entweder Gießformen mit kreisförmigem Querschnitt ($D_{\text{mr}} = 1 \text{ mm}$) oder mit rechteckigem Formkanalquerschnitt verwendet ($1 \times 1 \text{ mm}$ und $0,7 \times 0,7 \text{ mm}$). Gegenüber diesen Profilen verfügt das sternförmige Profil aus Abbildung 8.2 bei gleicher Längenausdehnung über eine deutlich größere Oberfläche, über die Wärme in das Kühlbad abgeleitet werden kann. Deshalb führte hier eine Steigerung der Gießgeschwindigkeit zuerst zu einer spürbaren Zunahme des Wärmeübergangs und damit zur Erhöhung des Temperaturgradienten. Erst bei weiterer Steigerung der Geschwindigkeit kommt es, wie an der ungenauen „verlaufenen“ Profilform zu sehen ist, zu einer Verlagerung der Erstarrungsfront in Gießrichtung. Dies deutet darauf hin, dass der Temperaturgradient im erstarrten Strang nicht in gleichem Maße weiter angestiegen ist.

Wie das Beispiel (Abbildung 8.2) zeigt, wirkt sich eine Veränderung der Gießgeschwindigkeit auch auf das Temperaturfeld im Gussstrang aus. In diesem Fall hat die höhere Gießgeschwindigkeit zunächst eine sichtbare Steigerung des Temperaturgradienten zur Folge. Bei weiterer Erhöhung der Gießgeschwindigkeit nimmt er allerdings, wie bei den vorangegangenen Untersuchungen festgestellt, infolge höherer Wärmediffusion in Gießrichtung wieder ab. Dies führt zu einer Richtungsänderung bei der Verschiebung der Phasengrenze.

8.5 Einfluss abnehmender Profilquerschnitte

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Analyse der Prozessparameter belegen, dass beim Gießen kleinerer Profilquerschnitte der Gießprozess präziser gesteuert werden muss. Da bei kleineren Querschnittsabmessungen die Bereiche innerhalb denen die Prozessparameter variiert werden können, deutlich kleiner als beim Gießen größerer Abmessungen sind, ist eine höhere Präzision und Stabilität bei der Prozessführung erforderlich.

Insbesondere ist die Temperaturführung im Formkanal von Bedeutung, weil sich Temperaturänderungen der Form bei kleineren Querschnittsabmessungen stärker auswirken als bei größeren Querschnitten. Die Möglichkeit der Korrektur von Temperaturschwankungen durch Anpassung der Gießgeschwindigkeit ist wegen des geringeren Einflusses dieses Parameters bei kleineren Strangquerschnitten schwieriger (Abbildung 6.2., Seite 66).

Bei den Experimenten im Abmessungsbereich zwischen 0,5 und 0,3 mm Durchmesser wurden hinsichtlich der Prozessstabilität die technischen Grenzen der Versuchsanlage erreicht.

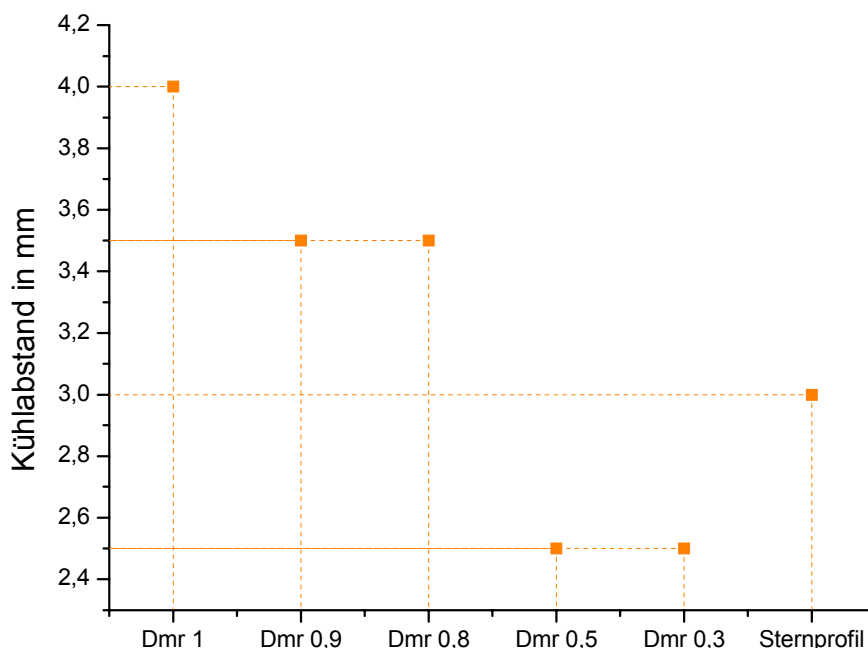


Abbildung 8.3: Kühlabstand bei unterschiedlichem Formkanaldurchmesser

Abbildung 8.3 zeigt den Kühlabstand (Abstand zwischen Formausgang und Kühlmedium) in Abhängigkeit vom Formkanaldurchmesser (Strangquerschnitt). Mit abnehmenden Strangquerschnitten musste der Kühlabstand verringert werden. Dies führte insbesondere bei der Kühlung im Wasserbad zu Problemen, da die Kühlplatte nicht näher als 2,5 mm vor dem Formausgang platziert werden konnte.

Abbildung 8.4 zeigt die für die unterschiedlichen Formkanalquerschnitte erforderlichen Schmelzpegelhöhen. Die Schmelzpegelhöhe, welche den metallostatistischen Druck am Formausgang beeinflusst, wurde für die jeweiligen Formkanalabmessungen so eingestellt, dass der Druck ausreichte, um die Form gut mit Schmelze auszufüllen, ohne dass Schmelzeausbrüche auftraten.

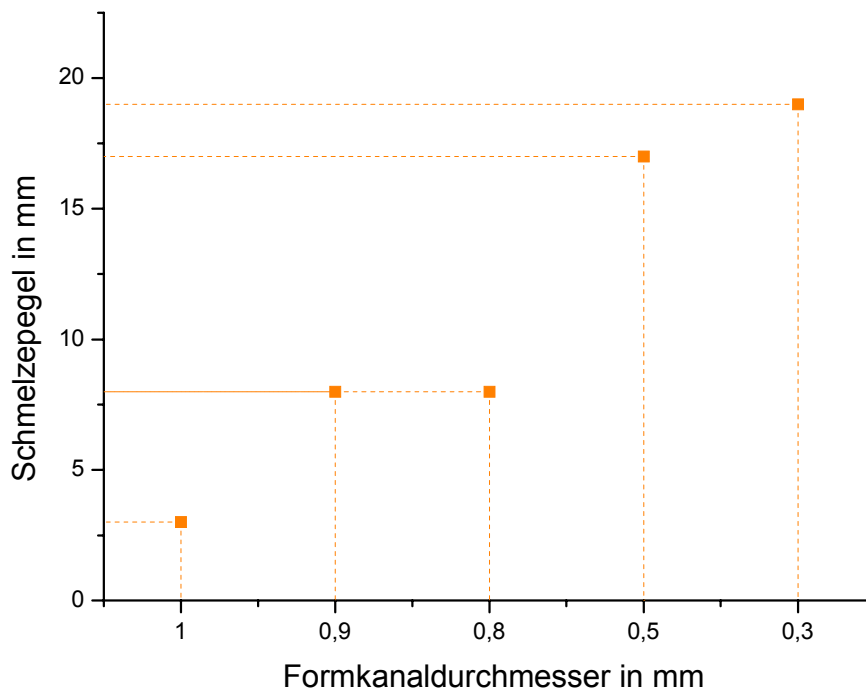


Abbildung 8.4: Schmelzpegelinstellungen bei unterschiedlichen Formkanalabmessungen

Mit abnehmenden Querschnittsabmessungen musste der Pegelstand angehoben werden, um eine ausreichende Formfüllung gewährleisten zu können. Dies zeigt, dass mit abnehmendem Profilquerschnitt der Druckverlust im Formkanal zunimmt.

Der den Pegeln entsprechende Schweredruck ist in Abbildung 8.5 angegeben.

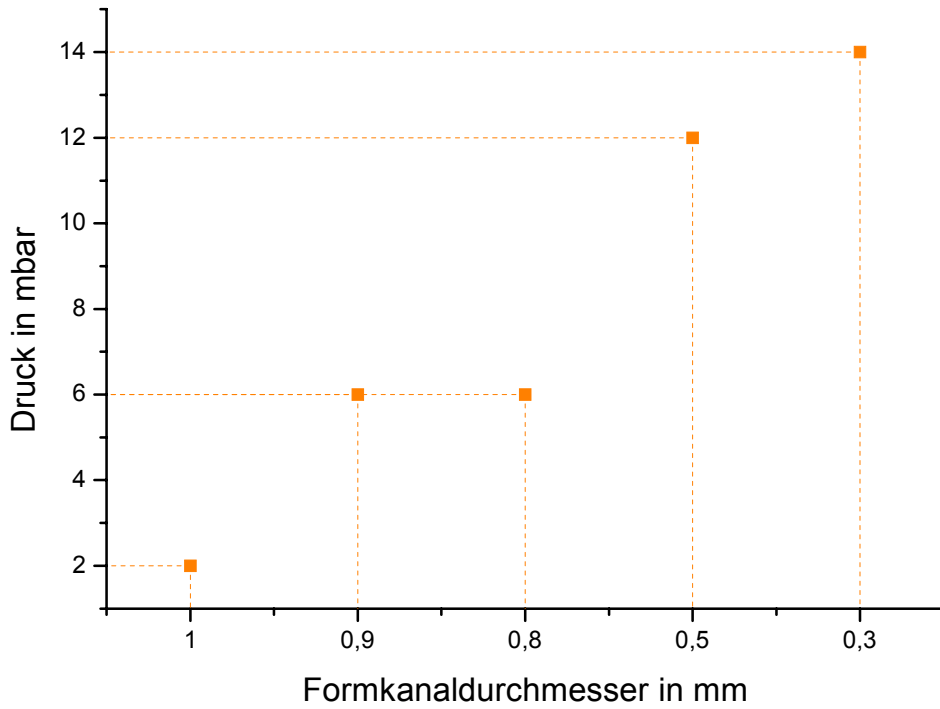


Abbildung 8.5: Schwerdruck entsprechend Schmelzpegelhöhe in mbar

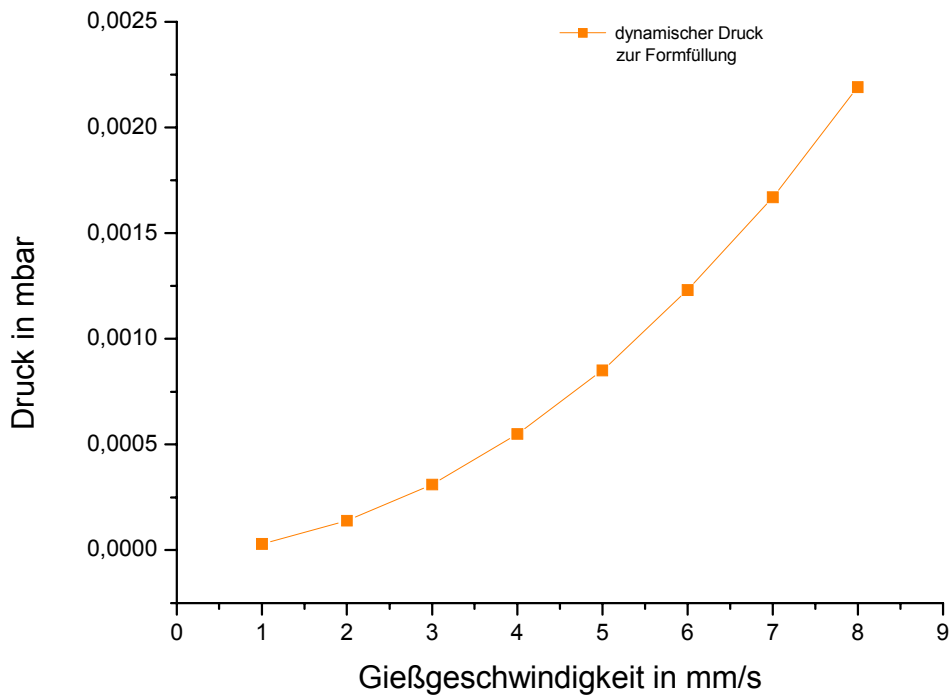


Abbildung 8.6: Berechneter dynamischer Druck zur ausreichenden Formfüllung in Abhängigkeit von der Gießgeschwindigkeit

In Abbildung 8.6 ist der nach Gleichung (4.5) in Abhängigkeit von der Gießgeschwindigkeit berechnete dynamische Druck dargestellt, der zur Formfüllung ausreicht, wenn der Druckverlust vernachlässigt wird. Der für die Formfüllung erforderliche Druck ist mit maximal 0,0022 mbar bei einer Gießgeschwindigkeit von 8 mm/s (beim Mikrostranggießen bisher erreichte „Höchstgeschwindigkeit“) sehr gering. Der Vergleich beider Diagramme zeigt, dass der mit Hilfe der Pegelhöhen experimentell ermittelte Druck deutlich größer ist. Demnach ist der Druckverlust im Formkanal signifikant und steigt mit abnehmenden Querschnitten merklich an.

9 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE WEITERENTWICKLUNG DER VERSUCHSAPPARTUR

Wie die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, beeinflussen schon geringfügige Schwankungen der Lage der Erstarrungsfront während des Gießprozesses die Gussteilqualität. Deshalb ist eine möglichst stabile Prozessführung anzustreben. Folgende Maßnahmen können nach dem jetzigen Erkenntnisstand die Prozessstabilität positiv beeinflussen:

Durch Steigerung der Kühlwirkung kann eine Erhöhung des Temperaturgradienten im Gussstrang erreicht werden. Ein höherer Temperaturgradient bietet nach den Erkenntnissen dieser Arbeit Vorteile für die Korrektur der Lage der Erstarrungsfront durch Steuerung der Gießgeschwindigkeit (Abschnitt 7.3.).

Eine Erhöhung des Temperaturgradienten könnte durch

- Temperierung (Kühlung) des Kühlgases,
- Entwicklung eines optimierten Düsensystems zur Strangkühlung (Kühlung durch Anströmung von mehreren Seiten),
- Verwendung eines Kühlmittels mit größerer Wärmeleitfähigkeit als Luft (z. B. Wasserdampf) sowie
- Optimierung der Parameter, die den Temperaturgradienten beeinflussen

erreicht werden.

Bei einer verbesserten Positioniergenauigkeit des Abzugssystems kann das Ankoppeln der Abzugslanze automatisiert werden. Dadurch könnte der Formenverschleiß beim Ankoppeln an die Schmelze verringert und Kokillen aus Graphit eingesetzt werden. Graphitkokillen sind mechanischer Beanspruchung gegenüber empfindlicher. Sie zeigten aber ein besseres Gleitverhalten und sind thermisch stabiler als Stahlkokillen, so dass dadurch die Prozessstabilität verbessert werden kann.

Voraussetzung für eine bessere Positioniergenauigkeit der Abzugslanze ist ein präziseres Wegmesssystem. Dies bringt außerdem Vorteile für mögliche Untersuchungen zur gezielten Positionierung der Erstarrungsfront. Der Toleranzbereich der Wegmessung und die Positionierbarkeit eines von der Abzugsvorrichtung mitgeführten Thermoelements sollte deshalb $\pm 0,01$ mm nicht überschreiten, weil sich bereits bei einer Temperaturänderung der Schmelze im Formkanal von 2 K die Phasengrenze um 0,2 mm verschiebt (Abbildung 7.3) .

Bei einer vertikal arbeitenden Anlage könnten Oberflächenfehler vermieden werden, die vom Eigengewicht der Stränge herrühren.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Vor dem Hintergrund eines wachsenden Bedarfs an mikrotechnischen Produkten wird davon ausgegangen, dass das Mikrostranggießen von Kleinstprofilen aus Metall das Spektrum vorhandener Verfahren sinnvoll ergänzen könnte. Stranggegossene Mikroprofile wären z. B. als Halbzeuge für die Herstellung mikromechanischer Bauteile, als Ausgangsmaterial für Elektroden zum Mikroerodieren oder als Profildraht zum Hartlöten einsetzbar.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Stranggießen kleinster Profile mit mikrostrukturierten Profilquerschnitten, deren Querschnittsabmessungen und Profilausprägungen unter einem Millimeter liegen und die als Halbzeuge für Anwendungen in der Mikrotechnik eingesetzt werden können. Die hier vorgestellte Forschungsarbeit ist ein erster Beitrag zur Entwicklung eines zum Mikrostranggießen von Kleinstprofilen geeigneten Verfahrens einschließlich der Entwicklung der dazu erforderlichen Anlagentechnik.

Im Rahmen theoretischer Untersuchungen wurde der Mikrostranggießprozess mit Hilfe eines Modells erklärt und die Wirkung der wichtigsten Prozessgrößen erörtert.

Für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen wurde eine Versuchsvorrichtung entwickelt, gebaut und beim Gießen von Kleinstprofilen aus niedrigschmelzenden Metallen erprobt.

Bei den durchgeführten Experimenten ist es gelungen, aus Zinn und Aluminium Profilstränge unterschiedlicher Querschnittsformen (Stern- Vierkant- und Kreisprofile) in Abmessungen, die unter einem Millimeter lagen, bis zu 900 mm Länge zu gießen. Die erreichte Oberflächenqualität fehlerfreier Profilstränge entspricht der mit Hilfe konventioneller Fertigungsverfahren (Feindreifen, Hochgeschwindigkeitsfräsen, Schleifen) oder Druckgießverfahren produzierter Teile. Dies zeigt, dass sowohl das Verfahrensprinzip als auch die Versuchsvorrichtung für das Gießen mikrostrukturierter Profile geeignet sind.

Es wurde festgestellt, dass die Gussteilqualität (Oberflächengüte und Formausprägung) insbesondere von der Position der Erstarrungsfront während des Gießprozesses abhängt.

Die Position der Erstarrungsfront wird durch

- die Gießgeschwindigkeit,
- die Temperatur der Schmelze im Formkanal und
- die Kühlbedingungen maßgeblich beeinflusst.

Während eine Steigerung der Gießgeschwindigkeit sowie eine Erhöhung der Temperatur der Schmelze zur Verschiebung der Phasengrenze in Gießrichtung führt, bewirkt eine verstärkte Strangkühlung eine Verschiebung ins Forminnere.

Die Profile haben die beste Qualität, wenn der Strang innerhalb der Form nahe dem Formausgang erstarrt, und der Prozess stabil geführt wird. Schon geringfügige Schwankungen der Lage der Phasengrenze um wenige Zehntel Millimeter wirken sich auf die Qualität der Gusstränge aus.

Zur Analyse der Prozessparameter wurden sowohl empirische als auch analytische Untersuchungsmethoden angewandt. Es wurden die Grenzen der Arbeitsbereiche der Haupteinflussgrößen ermittelt, an einem Beispiel demonstriert, dass der Mikrostranggießprozess durch ein empirisches Modell gesteuert werden kann sowie weitere Möglichkeiten der Prozesssteuerung an Hand eines analytischen Modells diskutiert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass sich die Gießgeschwindigkeit besonders gut zur Einstellung der Lage der Erstarrungsfront und somit zur Steuerung des Mikrostranggießprozesses eignet. Eine gezielte Positionierung der Erstarrungsfront mit Hilfe eines analytischen Modells scheint nach den derzeitigen Erkenntnissen möglich zu sein, erfordert aber eine noch bessere Anpassung des Modells an den realen Gießprozess sowie eine höhere Präzision bei der Regelung der Versuchsanlage.

Nach den bisherigen Untersuchungen und den dabei erzielten Ergebnissen sind folgende Schwerpunkte für die Fortsetzung der Forschungsarbeiten zu erkennen :

1. Untersuchungen zum Gießen mikrostrukturierter Profile aus verschiedenen praxisrelevanten Werkstoffen,
2. Weiterentwicklung der Anlagentechnik,
3. Anwendung des Verfahrens zur Herstellung kleinerer und komplizierterer Profilformen und
4. Optimierung der Prozesssteuerung

11 LITERATURVERZEICHNIS

- /2/ Amelung-J; Leo-K; Schreil-M: Das organische Display. Computer und Automation. (2003) Heft 6, Seite 28-30 (3 Seiten, 3 Bilder)
- /3/ Arnold-J; Ehrfeld-W; Hesch-K; Möbius-H: Kostengünstige Serienfertigung von Mikrobauteilen durch Laser-LIGA. F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik und Messtechnik 103 (1995) 1-2, Seite 49
- /4/ Baehr-H-D, Stephan-K: Wärme- und Stoffübertragung; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1994
- /5/ Becker-E; Ehrfeld-W: Das LIGA-Verfahren. Phys. 44 (1988) 166-170
- /6/ Beltrami-I; Bley-P; Dahlbeck-R; Ehrfeld-W; Fischer-S; Heim-U; Petersen-B; Wechsung-R; Weck-M; Willeke-G; Wybranski-B; Zimmerschitt-P: Mikrotechnik - Von der Idee bis zum Produkt; Konferenz-Einzelbericht: AWK 99, Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium, Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik, Aachener Perspektiven, Tagungsband, Aachen, D, 10.-11. Jun, 1999, (1999) Seite 399-420
- /7/ Bohl-W: Technische Strömungslehre. Vogel Verlag und Druck GmbH Würzburg 1998
- /8/ Boye-H; Schmidt-J: Einfluss von Oberflächentemperatur und Tropfenparametern auf den Wärmeübergang bei der Sprühkühlung. Chemie Ingenieur Technik 70 (1998) 9, 1177-1178
- /9/ Brinkmann-U; Basting-D; Endert-H; Pippert-K: Licht in der Mikrofertigung. F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik und Messtechnik 103 (1995) 1-2, Seite 49
- /10/ Chabchoub-F; Argyropoulos-S; Mostaghimi-J: Mathematical Modelling and Experimental Measurements on the Horizontal Ohno Continuous Casting Process for Pure Tin. Canadian Metallurgical Quarterly, Band 33 (1994) Heft 2, 73-88

- /11/ Chabchoub-F; Argyropoulos-S; Mostaghimi-J: Mathematical Modelling of the Horizontal Ohno Continuous Casting Process. Proceedings of EPD Congress 1992, TMS, 519-529
- /12/ Chabchoub-F; Mostaghimi-J; Argyropoulos-S: A Three Dimensional Mathematical Model for the Horizontal Ohno Continuous Casting Process. HTD-Vol.196, Transport Phenomena in Materials Processing and Manufacturing ASME 1992
- /13/ Daya-Z-A; Soda-H; Zhirui-W; McLean-A: Innovative casting of net-shape alloy wires. Konferenz-Einzelbericht: Innovative Technol. for Steel and other Materials : Proc. of Gerald Heffernan Internat. Symp., 40th Annual Conf. of Metallurgists of CIM (2001) Seite 215-226 (12 Seiten, 9 Bilder, 3 Quellen), Montreal: Canadian Inst. of Mining, Metallurgy and Petroleum
- /14/ Dekena-B; Kopp-D; Reichstein-M: Aktive Führungen für Mikrosysteme. wt Werkstattstechnik 92 (2002) Heft 11/12 Seite 645-649
- /15/ DFG –Schwerpunktprogramm: „Mikromechanische Produktionstechnik“. Ausschreibung 1997
- /16/ Dickmann-K; Hildenhagen-J; Gerlach-K; Jersch-J: Präzisionsmikrobearbeitung mit Excimerlaser. F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 106(1998) Heft 9, Seite 138-141
- /17/ Ehrfeld-W.: Fortschritt heißt Mikrotechnik. F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Messtechnik 100 (1992), Seite 282-286
- /18/ Engler-S: Zur Morphologie erstarrender Eisen-Kohlenstoff-Legierungen. Gießerei Technisch wissenschaftliche Beihefte 17 (1965) Heft 4, Seite 169 –202
- /19/ Fahrenberg-J: Know-How-Transfer in der Mikrosystemtechnik. wt Werkstattstechnik 90 (2000) Heft 11/12 Seite 484 – 486
- /20/ Frech-W; Frommeyer-G; Munstein-F: Kontinuierliches Gießen von metallischen Drähten nach dem Shape-Flow-Casting-Verfahren. Draht 46 (1995) 6

- /21/ Frommeyer-G; Frech-W: Continuous casting and rapid solidification of wires produced by shape-flow-casting' technique. Das Stranggießen und die beschleunigte Erstarrung nach dem Formfließgießverfahren (Shape-Flow-Casting) erzeugter Drähte. Konferenz-Einzelbericht: Melt Spinning, Strip Casting and Slab Casting. Proceedings of a Symposium, held during the TMS Annual Meeting in Anaheim, California, Feb. 4-8, 1996, (1996) Warrendale: TMS, Seite 53-64 (12 Seiten, 10 Bilder, 2 Tabellen, 4 Quellen), ISBN 0-87339-314-7.
- /22/ Gebhardt-A: Spanende Mikrobearbeitung für die Mikrooptik. F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 106(1998) Heft 9, Seite 260-263
- /23/ Gnielinski-V: Forsch.-Ing. Wes. 41(1975), Nr. 5 S.145/153.
- /24/ Grant-P-S; Lvov-Y; McShane-M-J: Nanostructured fluorescent biosensor for glucose detection. Konferenz-Einzelbericht: Conference Proceedings. Second Joint EMBS-BMES Conference 2002. 24th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society, Band 2 (2002), Seite 1710-1711 (2 Seiten, 8 Quellen), Piscataway: IEEE Operations Center
- /25/ Groß-U: Vorlesungsskript zur Vorlesung Wärme- und Stoffübertragung an der TU- Bergakademie Freiberg (Wintersemester 2001)
- /26/ Gultz-P; Stebler-H: Klonen von hochpräzisen Mikroteilen. F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik und Messtechnik 102 (1994) 1-2, Seite 11- 14
- /27/ Henkel-C: Persönliche Mitteilung zum Pressen von Al-Profilen kleiner Abmessungen. AMAG Aluminium Ranshofen Walzwerk
- /28/ Hering-E; Martin-R; Stohrer-M: Physik für Ingenieure. VDI-Verlag, Düsseldorf 1992
- /29/ Hesselbach-J; Raatz-A; Wrege-J; Herrmann-H; Weule-H; Buchholz-C; Tritschler-H; Knoll-M; Elsner-J; Klocke-F; Weck-M; von Bodenhausen-J; von

- Klitzing-A: mikroPRO-Untersuchungen zum internationalen Stand der Mikro-technik. wt Werkstattstechnik 93 (2003) Heft 3 Seite 119-128
- /30/ Heuberger-A: Mikromechanik, Mikrofertigung mit Methoden der Halbleiter-technologie. Berlin Springer 1991
- /31/ Heyder-B: Kontinuierliches Gießen metallischer Fasern und Drähte durch Schmelzspinnen in eine rotierende Flüssigkeit. Deutsche Dissertation (1992), RWTH Aachen.
- /32/ Heyder-B; Frommeyer-G; Qi-Feipeng: Aus der Schmelze zum Draht. Draht Welt-77 (1991) Seite 20-22, 24-25
- /33/ Hrsg. Beitz-W; Küttner-K: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1999
- /34/ Hrsg. Fischer-U: Tabellenbuch Metall; Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co, 41. Auflage, 1999 Haan-Gruiten
- /35/ Hrsg. Schwerdtfeger-K: Metallurgie des Stranggießens. Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf 1992
- /36/ Hrsg. VDI: VDI-Wärmeatlas 8. Auflage, Springer 1997
- /37/ Kießling, H.; Damm, CH.; Danneberg, P.; Rudolph, M.: Prägen feinstrukturierter optischer Oberflächen; F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik und Messtechnik 105 (1997) S.442-445
- /38/ Kim-M. H; Jo-H; Kang-C. S; Loper-C: A study of unidirectional solidification in horizontal casting of pure aluminium. Konferenz-Einzelbericht: Transactions of the American Foundrymen's Society, Band 102 (1994) Des Plaines: American Foundrymen's Society, Seite 843-847 5 Seiten, 10 Bilder, 6 Quellen, ISBN 0-87433-129-3.
- /39/ Kim-Y. J; Kou-S: An Experimental Study on Process Variables in Crystal Growth by Ohno Continuous Casting. Metallurgical Transactions 19 (1988) Seite 1849-1851

- 40/ Klocke-F; Castell-Codesal-A; Senster-P: Aktive Führungen für Mikrosysteme. wt Werkstattstechnik 93 (2003) Heft 6 Seite 447-451
- /41/ Klocke-F; Castell-Codesal-A; Senster-P: Laserstrahlhartlöten von Aluminium. wt Werkstattstechnik 93 (2003) Heft 6 Seite 447-451
- /42/ Koch-J; Wolf-M; Sepold-G: Mikrobohruge in Dünoblech – hergestellt mit Laser. wt Werkstattechnik 89(1999) Heft 11/12
- /43/ Köhler-M: Ätzverfahren für die Mikrotechnik. WILEY-VCH Verlag Weinheim, New York Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto 1998
- /44/ Memorandum des Arbeitskreises der Universitätsprofessoren der Mikro- und Feinwerktechnik: Konstruktive Entwicklung der Mikrotechnik in Forschung und Lehre. VDE/VDI Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik 15.03. 1994
- /45/ Michaeli-W.; Rogalla-A.; Spennemann-A.; Ziegmann-C.: Spritzgießen von Mikrobautteilen aus Kunststoffen. Werkstattstechnik - wt, Band 89 (1999) Heft 11/12, Seite 503-506
- /46/ Michaeli-W; Rogalla-A; Spennemann-A; Ziegmann-C: Mikrostrukturierte Formteile aus Kunststoff gestalten. F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 106(1998) Heft 9, Seite 642-645
- /47/ Michaeli-W; Rogalla-A; Ziegmann-C: Mikrostrukturen in Serie fertigen, Kunststoffe 89 (1999) Heft 9, Seite 80-82
- /48/ Michaeli-W; Ziegmann-C: Mikrosysteme aus dem Spritzgießwerkzeug. F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 107(1999) Heft 9, Seite 51-54
- /49/ Michaeli-W; Rogalla-A: Spritzgießen von Mikrostrukturen. F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik und Messtechnik 104 (1996)9, Seite 641-643
- /50/ Michel-F; Koch-O; Kunz-St; Gruber-H-P: Mikrofunkenerodieren. wt Werkstattstechnik 91 (2001) Heft 12 Seite 738-742

- /51/ Motoyasu-G; Kadowski-H; Soda-H. McLean-A: The Characteristics of Single crystal Bismuth Wires produced by the Ohno Continuous Casting Process, Journal of Materials Science, 34 (1999) Heft 16, Seite 3893-3899
- /52/ Motoyasu-G; Kaneko-M; Soda-H; McLean-A: Continuously cast Cu-Al-Ni shape memory wires with a unidirectional morphology. Zeitschriftenaufsatz: Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science Band 32A (2001) Heft 3, Seite 585-593
- /53/ Müller-H; Jeschar-R: Wärmeübergang bei der Spritzwasserkühlung von Nichteisenmetallen. Metallkunde 74 (1983) 257-264
- /54/ Müller-R: Metall bedrängt Keramik als Katalysator-Träger. VDI-Nachrichten Band 52 (1998) Heft 17, Seite 17 (1 Seite)
- /55/ Ohno-A: Continuous Casting of Single Crystal Ingots. J. Metals 38 (1986); S.14 - 16
- /56/ Ohno-A: Solidification. Springer 1987
- /57/ Ohno-A; Motoyasu-G; Tada-K; Takahashi-M: Production of Aluminium and Aluminium Alloy Strips by Ohno Strip Casting (OSC.) Process. Proceedings of the Inter. Symp. on Light Metals Processing and Applications, 32nd Annual Conf. of Metallurgists of CIM, Aug. 29 - Sept.2, Quebec of Canada, (1993)
- /58/ Ohno-A; Soda-H: Recent research on the Ohno Continuous Casting (OCC) process. Konferenz-Einzelbericht: Alex McLean Symposium Proceedings, Toronto, CDN, July 12-14, 1998, (1998) Seite 139-146 Warrendale, USA: Iron and Steel Society, ISBN 1-886362-27-0
- /59/ Patentschrift DE 3246470 C1
- /60/ Patentschrift EP 90314267
- /61/ Pfeufer-V: Präzise Lichtblitze. F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik und Messtechnik 104 (1996) 1-2, Seite 533-535

- /62/ Piotter-V; Ruprecht-R; Haußelt-J: Spritzgießen von Mikroteilen aus Metall und Keramik. wt Werkstatttechnik 89 (1999) Heft 11/12
- /63/ Reichelt-W; Kapellner-W; Steffen-R: Endabmessungsnahe Herstellung von Flachprodukten. Stahl und Eisen 108 (1988) Nr. 9
- /64/ Riemer-O; Schmütz-J: Kleinste Strukturen und winzige Späne. F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 107(1999) Heft 9, Seite 55-58
- /65/ Ritzhaupt-Kleissl-H-J; Ruprecht-R; Bauer-W; Piotter-V; Hausselt-J: Pulverspritzgießen für die Mikrotechnik. Konferenz-Einzelbericht: Pulvermetallurgische Formgebung im Wandel, Vorträge des Hagener Symp., Hagen, D, 18.-19. Nov, 1999; Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 15 (1999) Seite 185-204
- /66/ Ruprecht-R; Benzler-T; Hanemann-T; Müller-K; Piotter-V; Thies-A; Wöllmer-H; Hausselt-J: Verschiedene Abformverfahren für die Herstellung von dreidimensionalen Metall-Mikrostrukturen. Swiss-Materials 9 (1999) Nr.5, Seite 5-8
- /67/ Ruprecht-R; Benzler-T; Holzer-P; Müller-K; Norajitra-P; Piotter-V; Ulrich-H: Spritzgießen von Mikroteilen aus Kunststoff, Metall und Keramik. Galvanotechnik, Band 90 (1999) Heft 8, Seite 2260-2267
- /68/ Schaller-Th; Bier-W; Lindner-G; Schubert-K: Mechanische Mikrostrukturierung metallischer Oberflächen; F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik und Messtechnik 102 (1994) S.274-278
- /69/ Schaudel-D: Mikrosystemtechnik - Hoffnungsträger oder Totengräber der Sensorindustrie. VDI-Bericht 1255: Sensoren und Messsysteme. VDI-Verlag, Düsseldorf 1996
- /70/ Schmidt-J; Simon-M; Tritschler-H; Ebner-R: μ -Fräsen und μ -Erodieren für den Formenbau. wt Werkstatttechnik 93 91 (2001) Heft 12 Seite 743-746
- /71/ Schubert-A; Böhm-J; Burkhardt-T: Mikroprägen. wt Werkstofftechnik 90 (2000) Heft 11/12

- /72/ Schuster: Persönliche Mitteilung zum Profildrahtziehen kleiner Abmessungen; Auerhammer Metallwerk GmbH
- /73/ Sengupta-S; Soda-H; McLean-A: Microstructure and properties of a bismuth-indium-tin eutectic alloy. Zeitschriftenaufsatz: Journal of Materials Science, Band 37 (2002) Heft 9, Seite 1747-1758
- /74/ Seubert-T: Mechatronics in Automotive Requests and Solutions for Driver Assistance Systems. Konferenz-Einzelbericht Fraunhofer Institut IZM Berlin: Micromaterials for Automotive, Leipzig; 26. Juni 2003, Verlag ddp Goldenbogen, ISSN 1619-2486 Seite 39
- /75/ Shimzu-T; Yamazaki-H; Soda-H; McLean-A : Development of aluminium alloy welding rod for Hard facing applications. Konferenz-Einzelbericht : Developments and Applications of Ceramics and New Metal Alloys, Proc. of the Int. Symp., Quebec City, CDN, Aug 29-Sep 2, 1993, (1993) Montreal: Canadian Inst. of Mining, Metallurgy and Petroleum, Seite 541-549
- /76/ Soda-H; Chabchoub-F; Argyropoulos-S. A; McLean-A: Experimental study of horizontal Ohno Continuous Casting System. Canadian Metallurgical Quarterly, 31 (1992) 3; Seite 231-239
- /77/ Soda-H; Chabchoub-F; Lam-W. H; Argyropoulos-S. A; McLean-A: The Horizontal Ohno Continuous Casting Process: Process Variables and Their Effect on Casting Stability. Cast Metals, 4 (1991), Seite 12-19.
- /78/ Soda-H; Ichinose-A; Motoyasu-G; McLean-A; Ohno-A: A new fabrication method for the casting of cored materials. Cast Metals, 5 (1992) 2, Seite 95-102
- /79/ Soda-H; McLean-A; Wang-Z; Motoyasu-G: Pilot-scale casting of single-crystal copper wires by the Ohno Continuous Casting Process. Zeitschriftenaufsatz: Journal of Materials Science, Band 30 (1995) Heft 21, Seite 5438-5448

- /80/ Soda-H; Motoyasu-G; Chabchoub-F; Hu-H; McLean-A: Gießen eines dünnen Zindrahtes mit dem Ohno-Stranggießverfahren. *Cast Metals*, 6 (1994) 4, Seite 225-230
- /81/ Soda-H; Motoyasu-G; McLean-A; Bagheri-S. D; Perovic-D: Continuous casting of unidirectionally solidified copper rod. *Cast Metals*, 9 (1996) 1, Seite 37-44
- /82/ Soda-H; Motoyasu-G; McLean-A; Ohno-A: Alloy Casting by the Horizontal Ohno Continuous Casting System. *Cast Metals* 6 (1993); S.76-86
- /83/ Soda-H; Motoyasu-G; McLean-A; Ohno-A: Effects of process variables on cast surface quality of alloy rod produced by the horizontal Ohno continuous casting (OCC) process. Einfluss der Prozessvariablen auf die Gussflächenqualität von Stangen aus Legierungen, die durch horizontales Stranggießen nach dem OCC-Verfahren hergestellt werden. *Canadian Metallurgical Quarterly*, Band 33 (1994) Heft 2, Seite 89-98
- /84/ Soda-H; Motoyasu-G; McLean-A; Ohno-A: Ohno Continuous Casting. *Advanced Materials & Processes*, 147 (1995) 4, Seite 43-45
- /85/ Tada-K; Ohno-A: Production of aluminium strip using an open type, horizontal, heated mould. *Aluminium*, Band 69 (1993) Heft 12, Seite 1092-1093
- /86/ Tschulerna-G: Mikromechanik eine neue Technik kündigt sich an. *F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik und Messtechnik* 101 (1993) 1-2, Seite 261-263
- /87/ Wallmann-R: Persönliche Mitteilung zum Stranggießen. SM Sächsisches Metallwerk GmbH
- /88/ Wang-Y; Kim-Y; Kou-S: Thermal Measurement and Computer Modelling of Heat and Fluid Flow in Crystal Growth by Ohno Continuous Casting 91 (1988) 55-56
- /89/ Weber-L; Ehrfeld-W: Mikroabformung. *Kunststoffe*, 89 (1999) Heft 9, Seite 80-82

- /90/ Weck-M; Day-M; Fischer-S: Mikrozerspanung erfordert angepasste Maschinenkonzepte. Maschinenmarkt, Würzburg, Band 106 (2000) Heft 36, Seite 42,44-45
- /91/ Wehlisch: Persönliche Mitteilung zum Ziehen von Kupferflachdraht; MKM Kupfer und Messing GmbH
- /92/ Wenda-A; Beck-M; Hüntrup-V; Meisel-M; Rothenburg-M; Rübenbach-O; Schmütz-J; Schwierering-C; Gäbler-J: Möglichkeiten und Grenzen der Mikrozerspanung. F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 107 (1999) Heft 9, Seite 64-67
- /93/ Westkemper-E; Hoffmeister-H; Gäbler-J: Spanende Mikrofertigung. F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik und Messtechnik 104 (1996) 7-8, Seite 527-531
- /94/ Wolf-A; Ehrfeld-W; Gruber-H-P: Mikrofunktenerosion für Präzisionsformenbau. wt Werkstatttechnik 89(1999) Heft. 11/12
- /95/ Wöllmer-H; Müller-K; Ruprecht-R; Hausselt-J: Präzisionsguss von Mikroteilen aus Metall. Galvanotechnik 90 (1999) Nr.6
- /96/ Wöllmer-H; Müller-K; Ruprecht-R; Hausselt-J: Präzisionsguss von Mikroteilen aus Metall. Konferenz-Einzelbericht: 3. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, Karlsruhe, D, 2.-3. Apr, 1998, Forschungs-Zentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, Band 6080 (1998) Seite 215-216
- /97/ Yamazaki-H; Ohno-A; Shimizu-T: Das Gießen von Rohren aus der Legierung Stellite Nr.1 mit dem OCC-Verfahren, Casting of Stellite No.1 alloy tubes by the OCC Process. Imono (Journal of the Japan Foundrymen's Society), 66 (1994) Heft 10, Seite 751-756
- /98/ Yamazaki-H; Ohno-A; Shimizu-T: Mechanical and physical properties of stellite rods produced by heated-mould continuous casting method (OCC). Journal of the Japan Institute of Metals, Band 58

12 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1: Funktionsmuster einer Mikroführung (Länge 8,4 mm) /14/	4
Abbildung 1.2: Mikro Zahnrad (Institut für Mikrotechnik Mainz) /5/	4
Abbildung 1.3: Mikrogetriebe (Institut für Mikrotechnik Mainz)	5
Abbildung 1.4: Elektrode für das Erodieren rechteckiger Durchbrüche /50/	5
Abbildung 1.5: Dreieckselektrode zum Mikrosenkerodieren /94/	6
Abbildung 1.6: Laserstrahlhartlötverbindungen an Aluminium /14/	6
Abbildung 2.1: Herstellungsverfahren der Mikrotechnik nach /6/	7
Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des horizontalen OCC-Prozesses /10/14	
Abbildung 2.3: Vergleich der Erstarrungsmechanismen von konventionellen Stranggießverfahren und OCC-Prozess nach /10/	15
Abbildung 4.1: Horizontales Mikrostranggießen (Verfahrensprinzip)	21
Abbildung 4.2: Formfüllung beim horizontalen Mikrostranggießen	23
Abbildung 4.3: Verschiebung der Phasengrenze infolge Strangerstarrung	28
Abbildung 4.4: Wärmetransport beim horizontalen Mikrostranggießverfahren	30
Abbildung 4.5: Prinzipieller Temperaturverlauf in der Schmelze und im erstarrten Strang bei eindimensionaler Betrachtung	32
Abbildung 4.6: Einfluss der Prozessparameter auf die Gussteilqualität und Prozessstabilität	44
Abbildung 5.1: Mikrostranggießapparatur (schematische Darstellung)	45
Abbildung 5.2: Mikrostranggießapparatur	46
Abbildung 5.3: Schmelzsystem (Halbschnitt)	47
Abbildung 5.4: Gießform (Kokille) im Schmelztiigel	48
Abbildung 5.5: Gießform (Halbschnitt)	49
Abbildung 5.6: Strangkühlung im ruhenden Wasserbad	51
Abbildung 5.7: Strangkühlung im Luftstrom	53
Abbildung 5.8: Abzugsvorrichtung	54
Abbildung 5.9: Position der Thermolemente für die Temperaturmessungen	57
Abbildung 6.1: Arbeitsbereich der Gießgeschwindigkeit (v_g)	63

Abbildung 6.2: Vergleich des Einflusses der Prozessparameter auf die Zielgröße Strangdurchmesser	66
Abbildung 6.3: gemittelter Temperaturverlauf in Stahlformen bei 240 °C Bad- und 260 °C Formtemperatur bei Gießgeschwindigkeiten von 3,5 und 5,2 mm/s	69
Abbildung 6.4: gemittelter Temperaturverlauf in Graphitformen bei 240 °C Bad- und 260 °C Formtemperatur bei Gießgeschwindigkeiten von 3,5 und 5,2 mm/s	69
Abbildung 6.5: Temperaturverlauf bei Kühlung im Luftstrom und Verwendung einer Stahlform bei 250 °C Bad- und 247 °C Formtemperatur und einer Gießgeschwindigkeit von 1,8 mm/s,	70
Abbildung 6.6: Temperaturverlauf mit gefitteter Exponentialfunktion	71
Abbildung 6.7: Vergleich berechneter und gemessener Werte der Position der Erstarrungsfront bei Gießgeschwindigkeiten von 3,5 und 5,2 mm/s und Kühlung im Wasserbad	73
Abbildung 7.1: Nach Modell (6.1) gerechnete Strangdurchmesser	78
Abbildung 7.2: Gemessene und nach Modell (6.1) berechnete Durchmesser im Vergleich	78
Abbildung 7.3: Verschiebung der Phasengrenze bei Änderung der Haupteinflussgrößen:	80
Abbildung 7.4: Berechnete Position der Phasengrenze als Funktion der Gießgeschwindigkeit	81
Abbildung 7.5: Kokille mit Formkanal von 2 mm Länge	82
Abbildung 7.6: Nach Gleichung (4.31) berechnete Position der Phasengrenze als Funktion der Gießgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Temperaturgradienten	83
Abbildung 8.1: Oberflächenfehler bei Kreisprofilen (Dmr 0,9 mm): raues Profil (C), welliges Profil (B), Vibrationsmarken (A)	91
Abbildung 8.2: Sternprofil Vergleich unterschiedlicher Gießgeschwindigkeiten	92
Abbildung 8.3: Kühlabstand bei unterschiedlichem Formkanaldurchmesser	94
Abbildung 8.4: Schmelzpegelinstellungen bei unterschiedlichen Formkanalabmessungen	95
Abbildung 8.5: Schwerdruck entsprechend Schmelzpegelhöhe in mbar	96

Abbildung 8.6: Berechneter dynamischer Druck zur ausreichenden Formfüllung in Abhängigkeit von der Gießgeschwindigkeit	96
Abbildung 14.1: Beispiel für während des Gießvorganges erfasste Daten (Probe M12)	117
Abbildung 14.2: Kreisprofilstränge im Durchmesser 0,5 mm (oben), im Durchmesser 0,8 mm (Mitte) und im Durchmesser 0,9 mm unten	118
Abbildung 14.3: Rechteckprofil aus Zinn 1x1 mm	118
Abbildung 14.4: Sternprofilstrang (unten) Dmr 1 mm	119
Abbildung 14.5: Sternprofil	120
Abbildung 14.6: Stahlform 2	120
Abbildung 14.7: Strangquerschnitt Sternprofil 2 (Zinn)	120
Abbildung 14.8: Stahlform 1	120
Abbildung 14.9: Strangquerschnitt Sternprofil 1(Zinn) im Hellfeld aufgenommen	120
Abbildung 14.10: Strangquerschnitt Sternprofil1 (Zinn)	120
Abbildung 14.11: Rechteckprofil 1	121
Abbildung 14.12: Graphitkokille mit Rechteckprofil	121
Abbildung 14.13: Strangquerschnitt Rechteckprofil	121
Abbildung 14.14: Vierkantprofil 0,7x0,7	121
Abbildung 14.15: Stahlform Vierkantprofil 0,7 x 0,7	121
Abbildung 14.16: Strangquerschnitt Vierkantprofil 0,7 x 0,7	121
Abbildung 14.17: Metallografischer Querschliff eines Zinnstranges	122
Abbildung 14.18: Metallografischer Längsschliff eines Zinnstranges	122
Abbildung 14.19: Metallografischer Querschliff eines Aluminiumstranges	123
Abbildung 14.20: Metallografischer Längsschliff eines Aluminiumstranges	123
Abbildung 14.21: Gießform aus Stahl mit Innenmaßen des Formkanals	124
Abbildung 14.22: Vierkantprofil mit Abmaßen	124
Abbildung 14.23: Arbeitsbereich der Temperatur im Schmelzbad (T_{Bad})	125
Abbildung 14.24: Arbeitsbereich der Formtemperatur (T_{Form})	125
Abbildung 14.25: Arbeitsbereich der Kühltemperatur ($T_{Kühl}$)	126

13 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 6.1: Gießversuche zur Erzeugung von Strängen mit kreisförmigem Querschnitt im Durchmesser 0,9 mm	63
Tabelle 6.2: Temperaturgradienten im Gussstrang an der Phasengrenze	72
Tabelle 14.1: Gießversuche zur Erzeugung von Strängen mit kreisförmigem Querschnitt im Durchmesser 0,5 mm	127
Tabelle 14.2: Gießversuche zur Erzeugung von Strängen mit kreisförmigem Querschnitt im Durchmesser 0,3 mm	127
Tabelle 14.3: ausgewählte Versuchsprotokolle	128
Tabelle 14.4: Experimente zur Bestimmung der technologischen Parameter (Anzahl der Proben und Datensätze)	129
Tabelle 14.5: Regressionsanalyse Dmr 0,9 (Statgraphics)	130
Tabelle 14.6: Regressionsanalyse Dmr 0.5 (Statgraphics)	131
Tabelle 14.7: Parameterkombinationen zur Aufzeichnung der Temperaturänderung in Gießrichtung unter Verwendung von Stahlformen (Kühlung Wasserbad)	132
Tabelle 14.8: Parameterkombinationen zur Aufzeichnung der Temperaturänderung in Gießrichtung bei Verwendung von Graphitformen (Kühlung Wasserbad)	132
Tabelle 14.9: Parameterkombinationen zur Aufzeichnung der Temperaturänderung in Gießrichtung bei Verwendung einer Stahlform (Kühlung im Luftstrom)	132
Tabelle 14.10: Daten und Stoffdaten für die Berechnung von x_E	133

14 ANHANG

14.1 Abbildungen

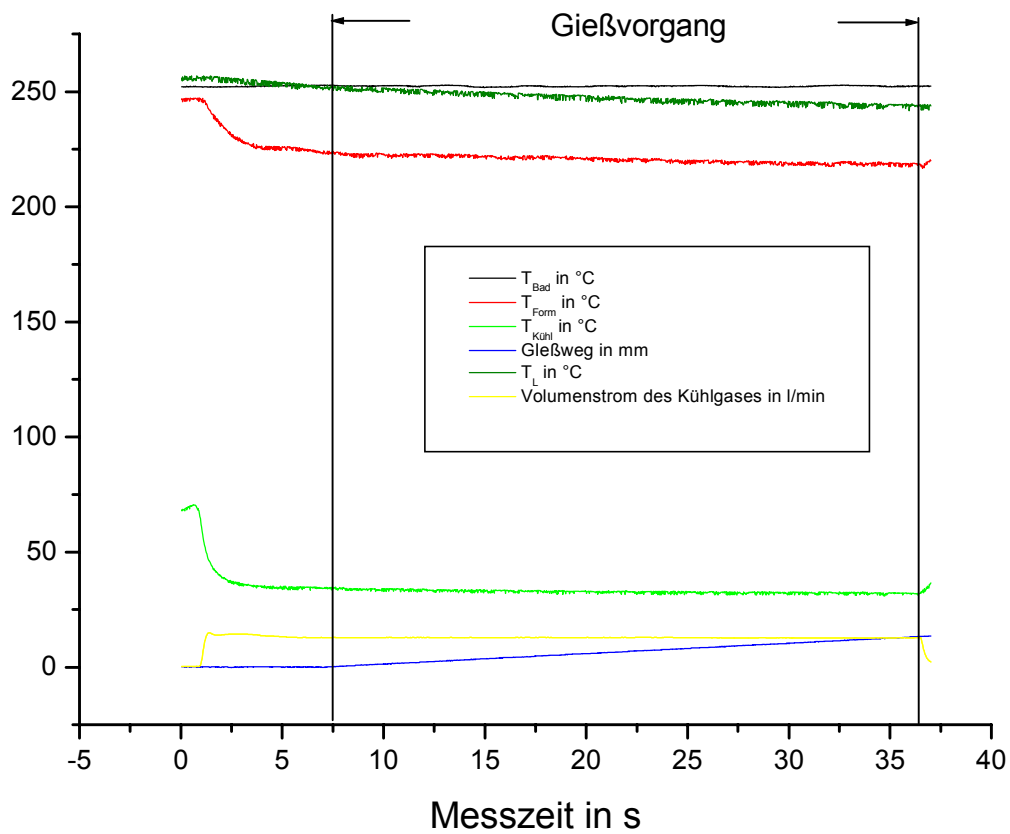


Abbildung 14.1: Beispiel für während des Gießvorganges erfasste Daten (Probe M12)

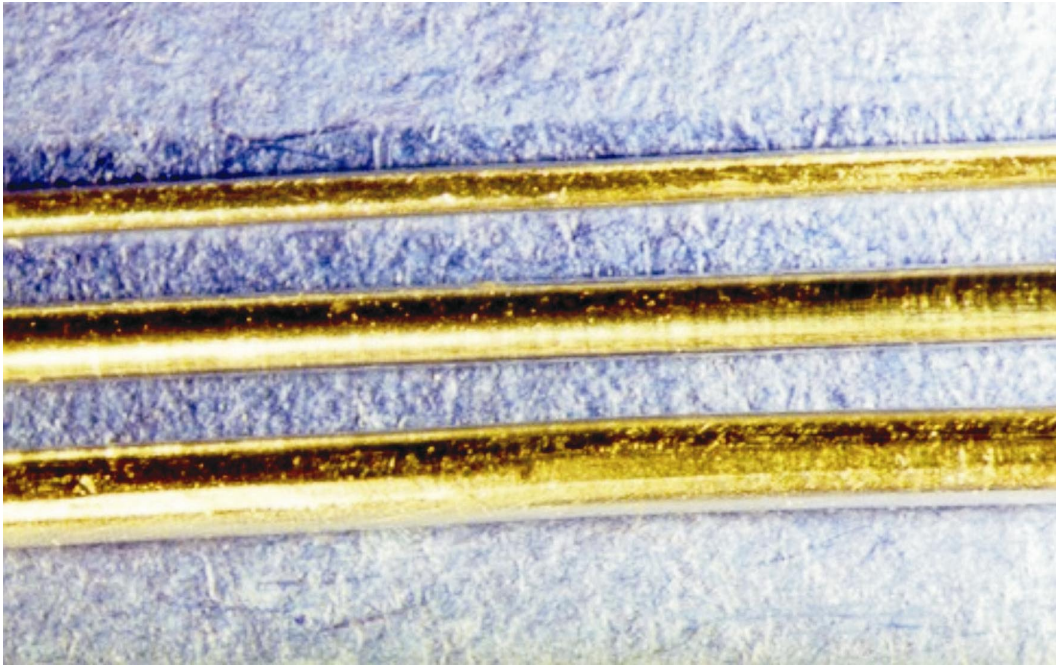


Abbildung 14.2: Kreisprofilstränge im Durchmesser 0,5 mm (oben), im Durchmesser 0,8 mm (Mitte) und im Durchmesser 0,9 mm unten



Abbildung 14.3: Rechteckprofil aus Zinn 1x1 mm



Abbildung 14.4: Sternprofilstrang (unten) Dmr 1 mm

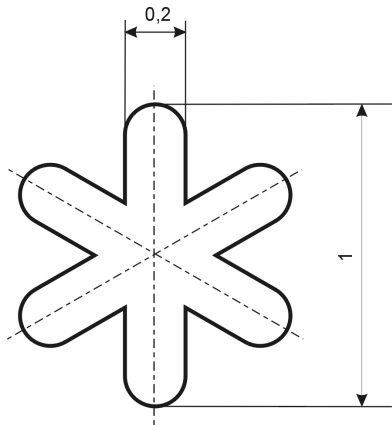


Abbildung 14.5: Sternprofil

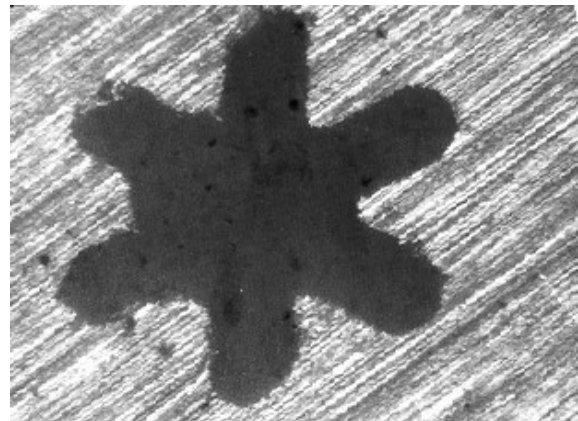


Abbildung 14.8: Stahlform 1

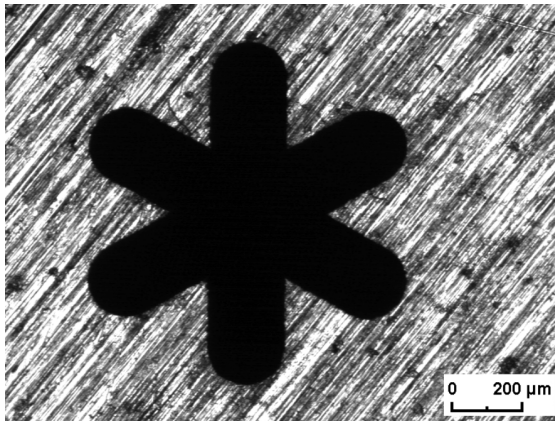


Abbildung 14.6: Stahlform 2

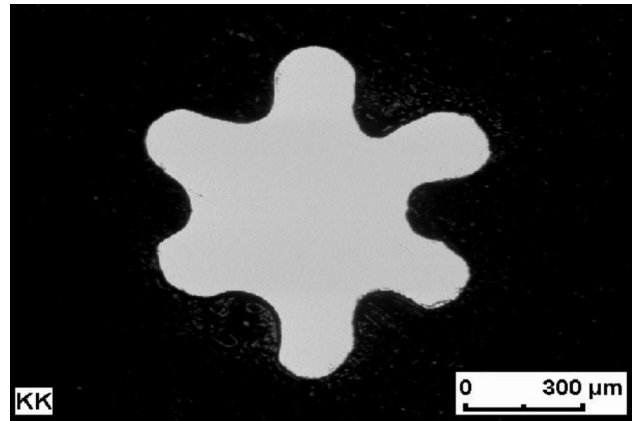


Abbildung 14.9: Strangquerschnitt Sternprofil 1 (Zinn) im Hellfeld aufgenommen

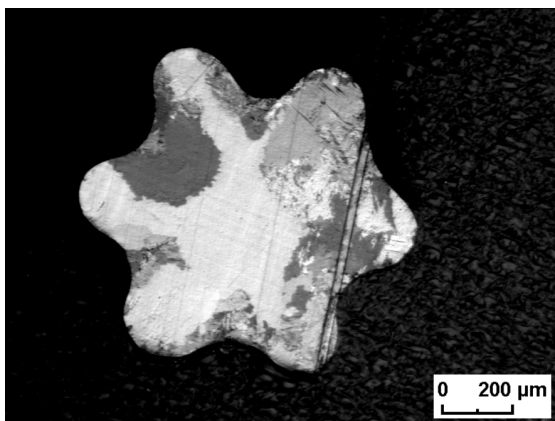


Abbildung 14.7: Strangquerschnitt Sternprofil 2 (Zinn)

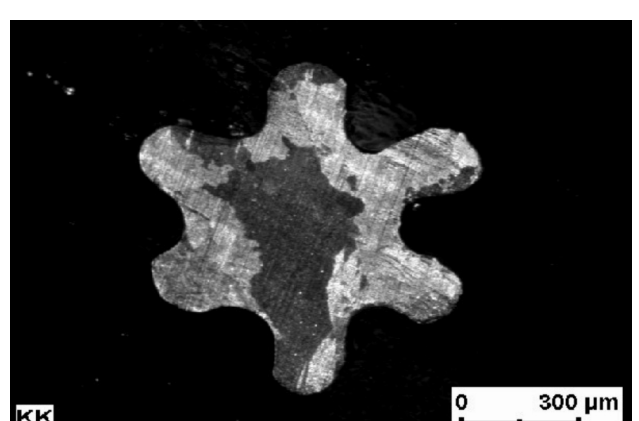


Abbildung 14.10: Strangquerschnitt Sternprofil 1 (Zinn)

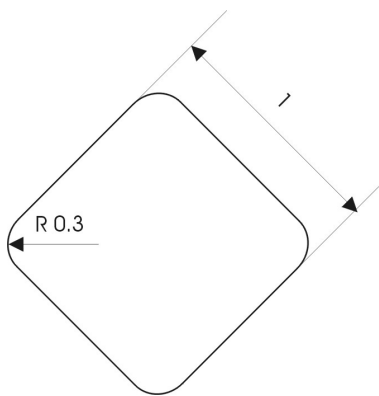


Abbildung 14.11: Rechteckprofil 1

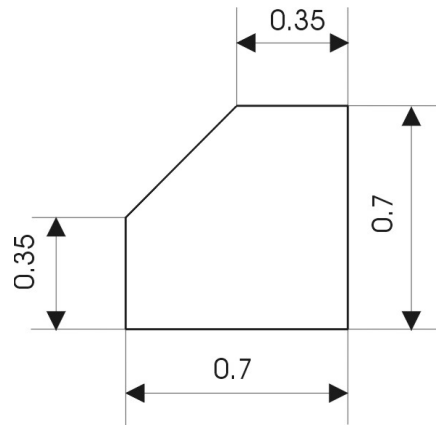


Abbildung 14.14: Vierkantprofil 0,7x0,7

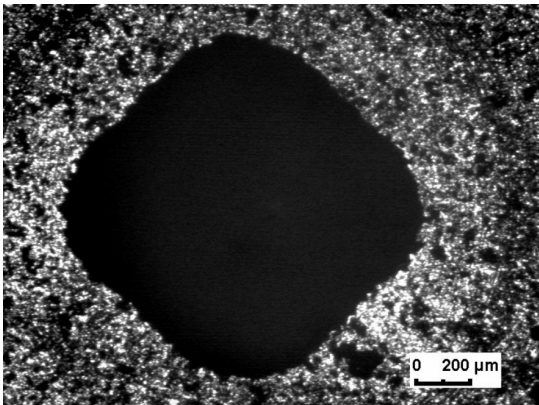


Abbildung 14.12: Graphitkokille mit Rechteckprofil

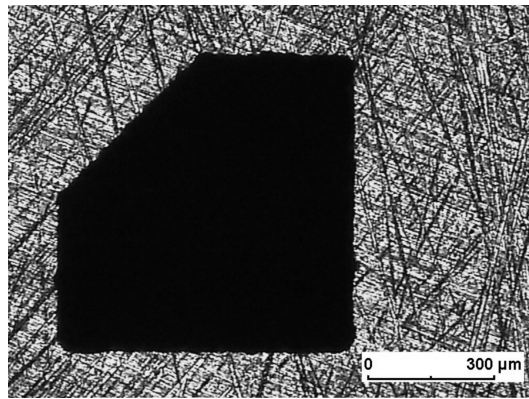


Abbildung 14.15: Stahlform Vierkantprofil 0,7 x 0,7

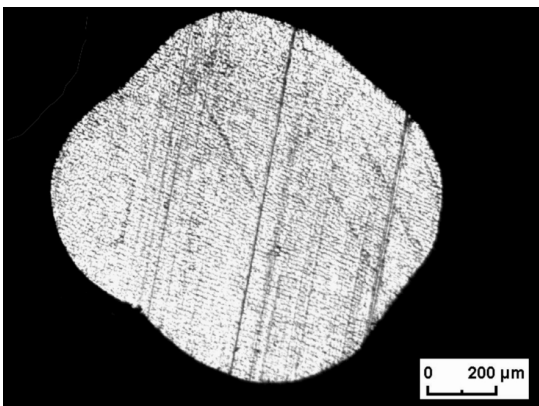


Abbildung 14.13: Strangquerschnitt Rechteckprofil

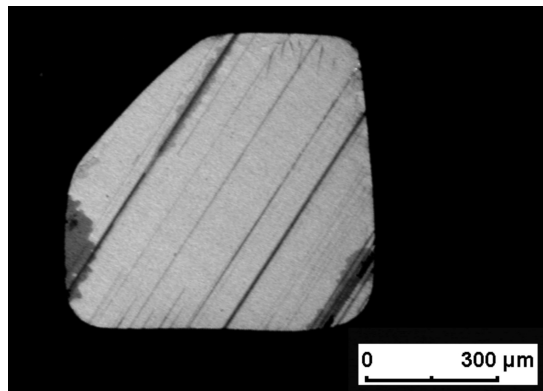


Abbildung 14.16: Strangquerschnitt Vierkantprofil 0,7 x 0,7

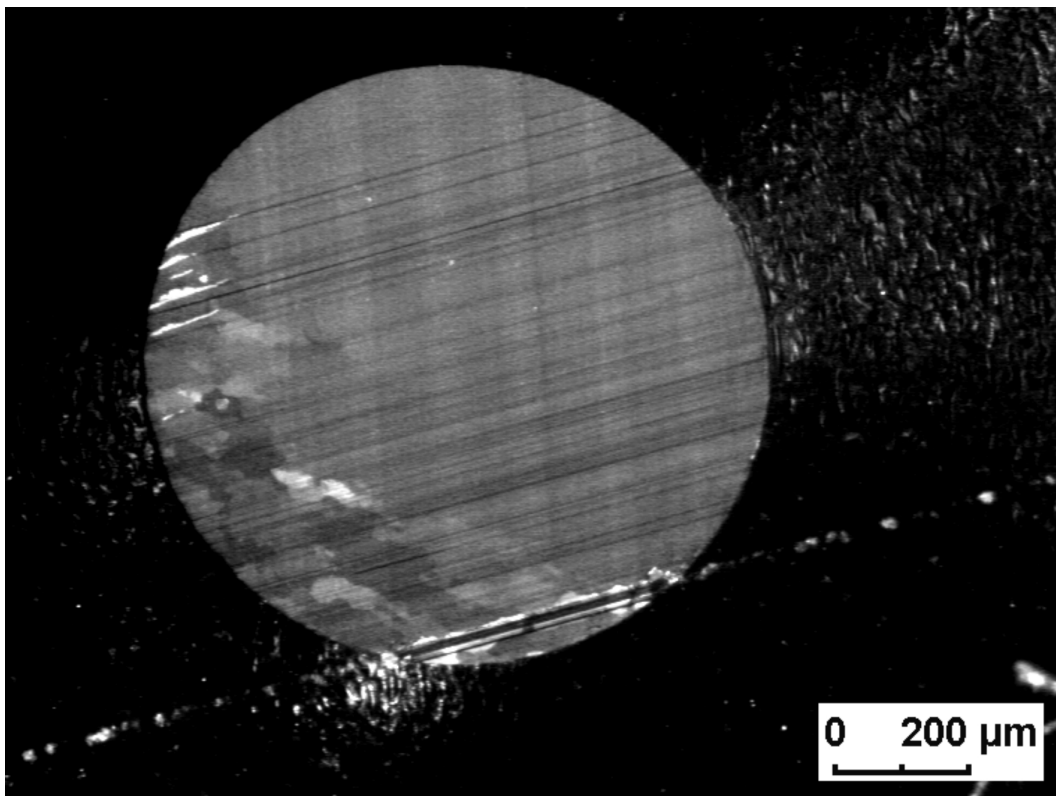


Abbildung 14.17: Metallografischer Querschliff eines Zinnstranges

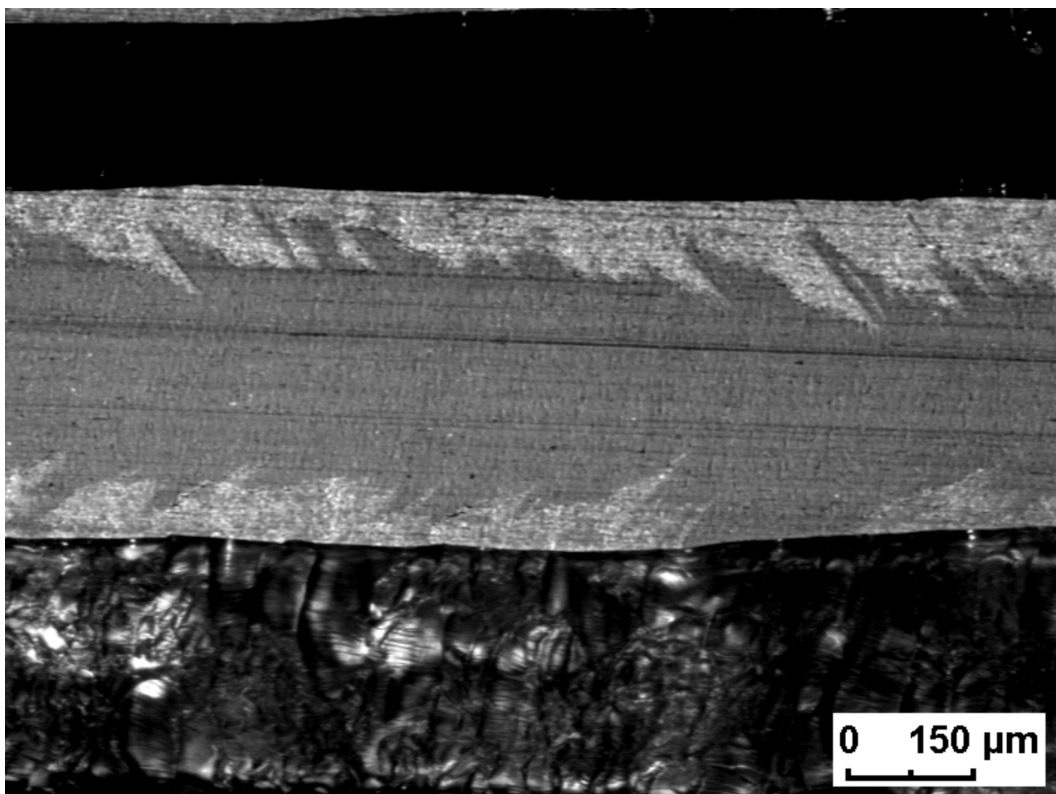


Abbildung 14.18: Metallografischer Längsschliff eines Zinnstranges

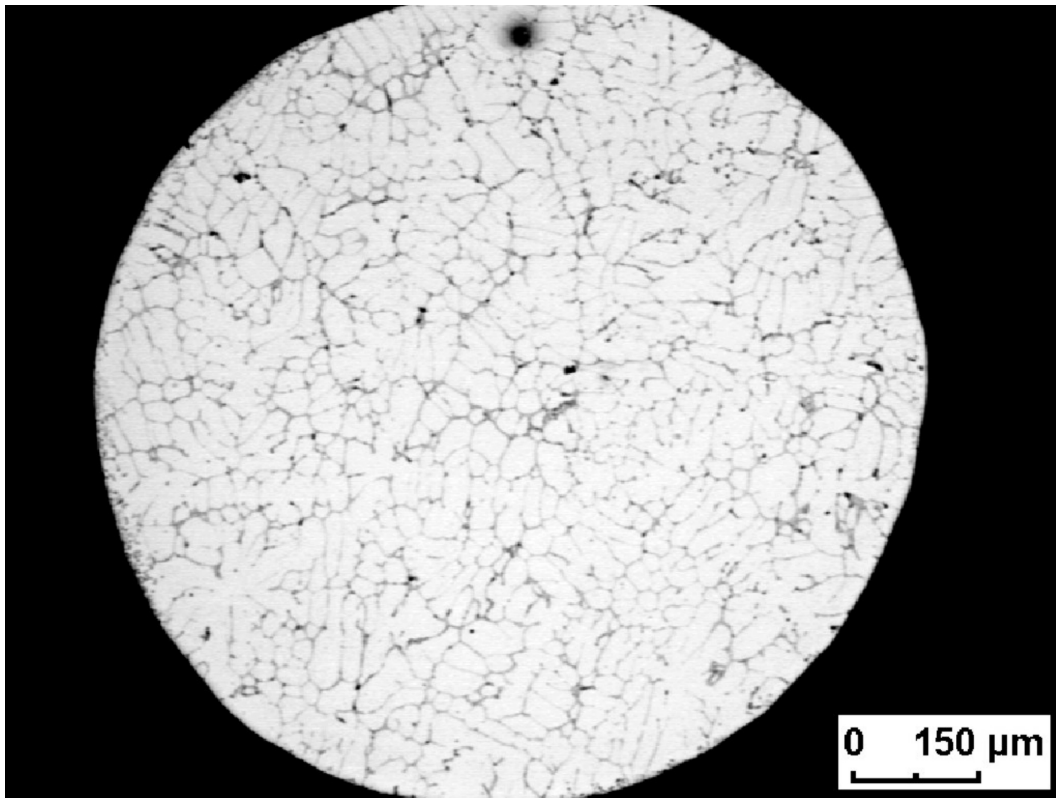


Abbildung 14.19: Metallografischer Querschliff eines Aluminiumstranges

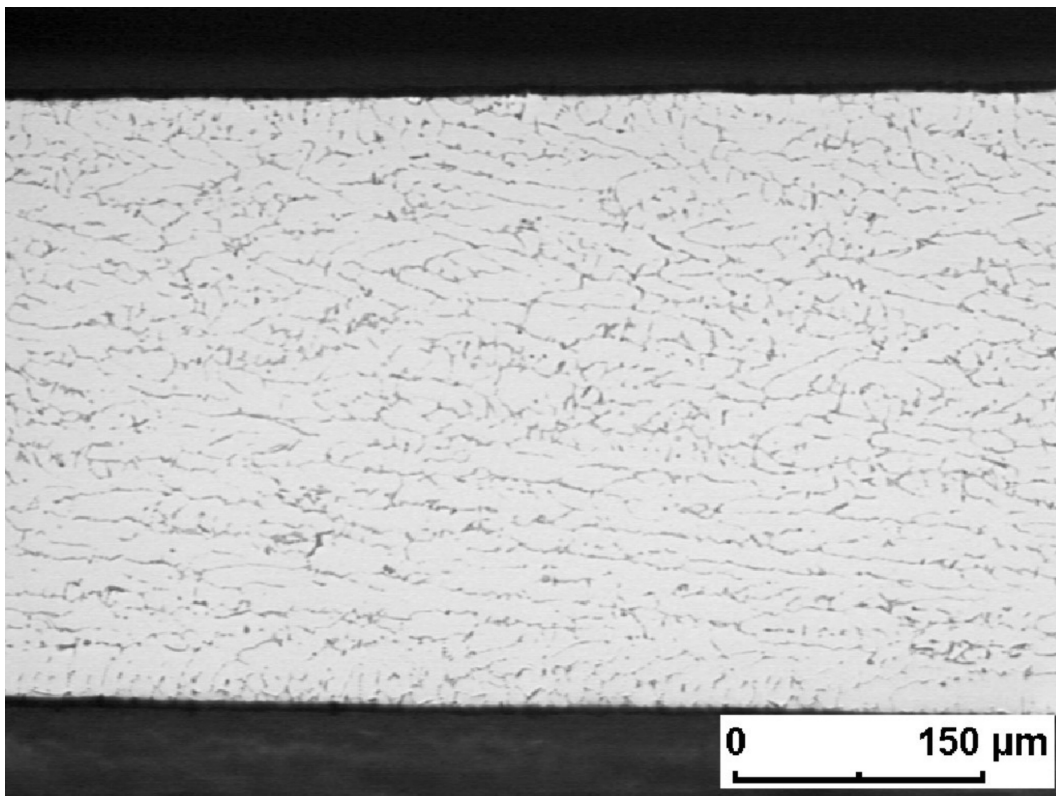


Abbildung 14.20: Metallografischer Längsschliff eines Aluminiumstranges

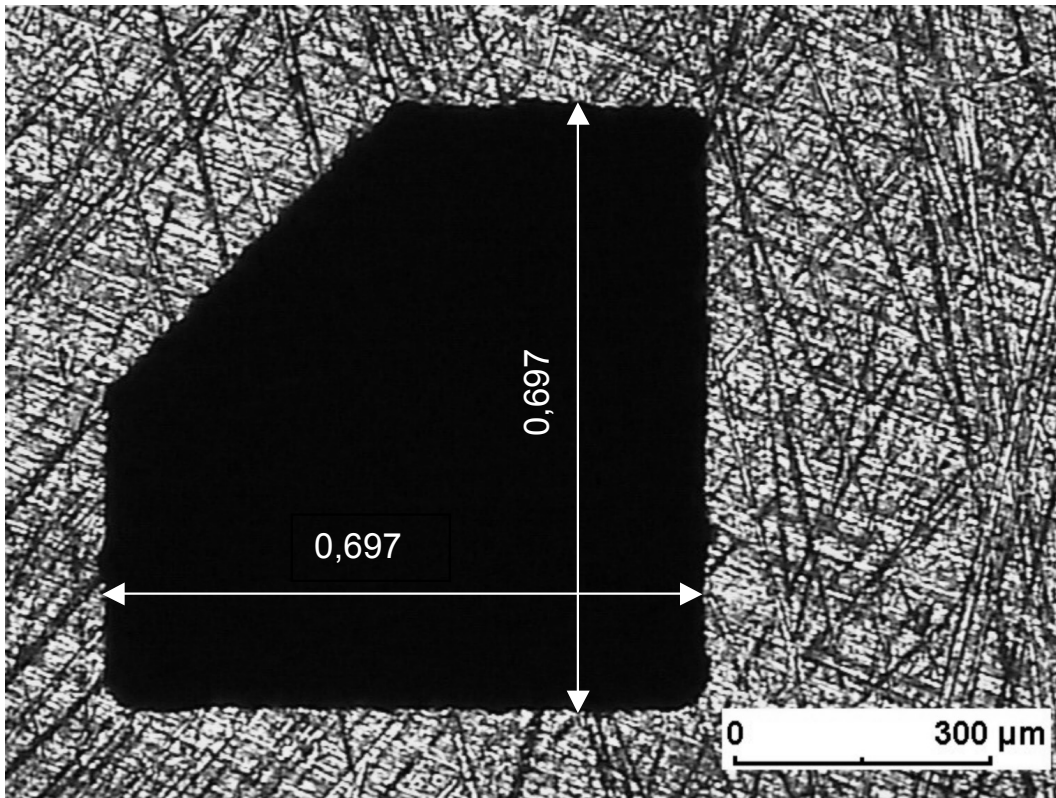


Abbildung 14.21: Gießform aus Stahl mit Innenmaßen des Formkanals

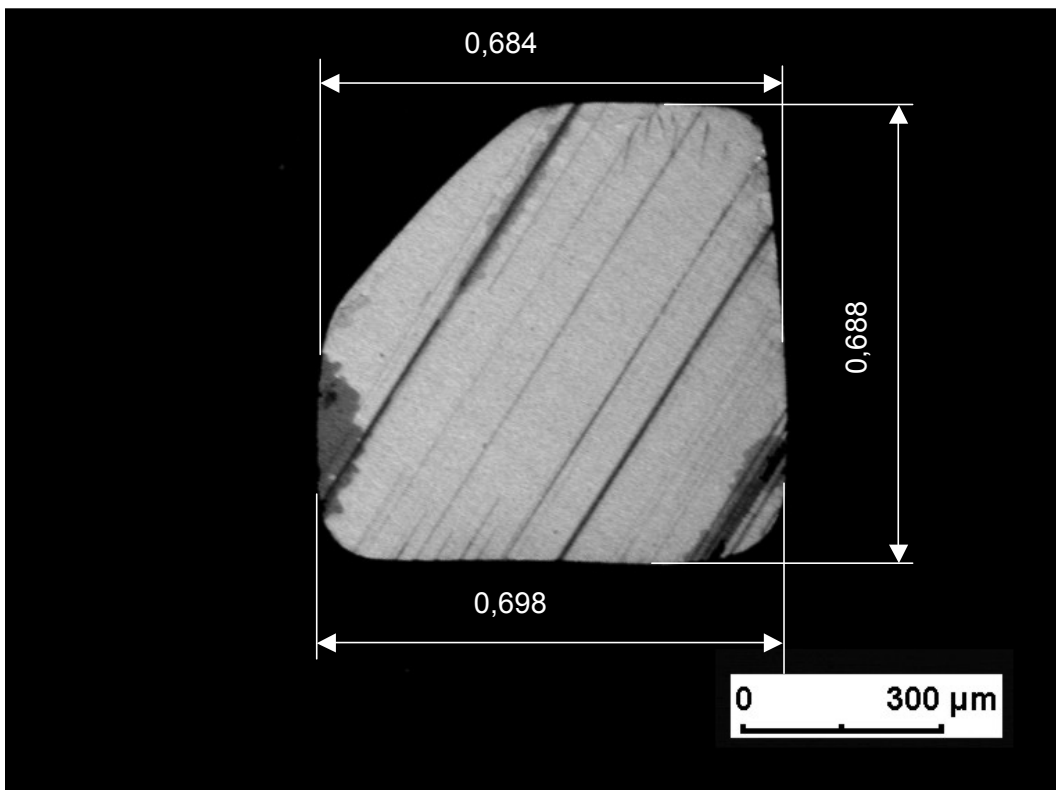


Abbildung 14.22: Vierkantprofil mit Abmaßen

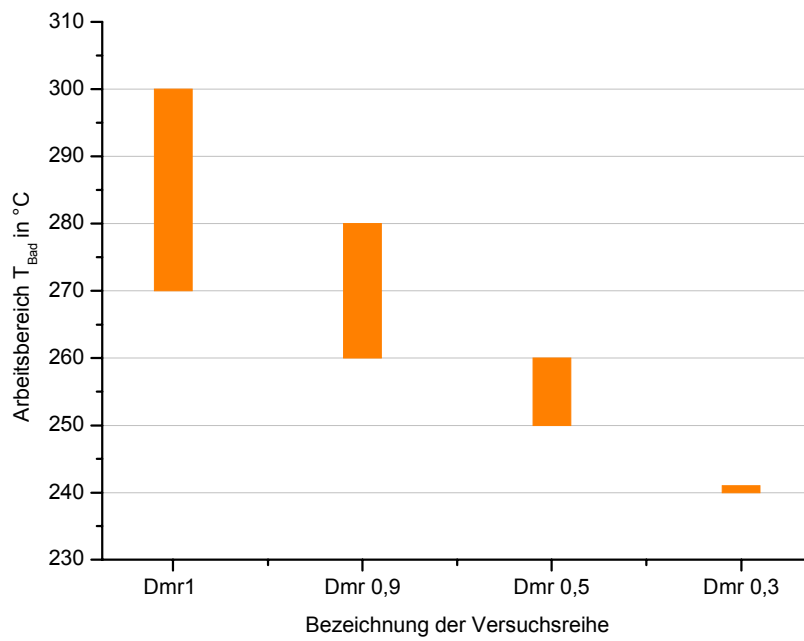


Abbildung 14.23: Arbeitsbereich der Temperatur im Schmelzbad (T_{Bad})

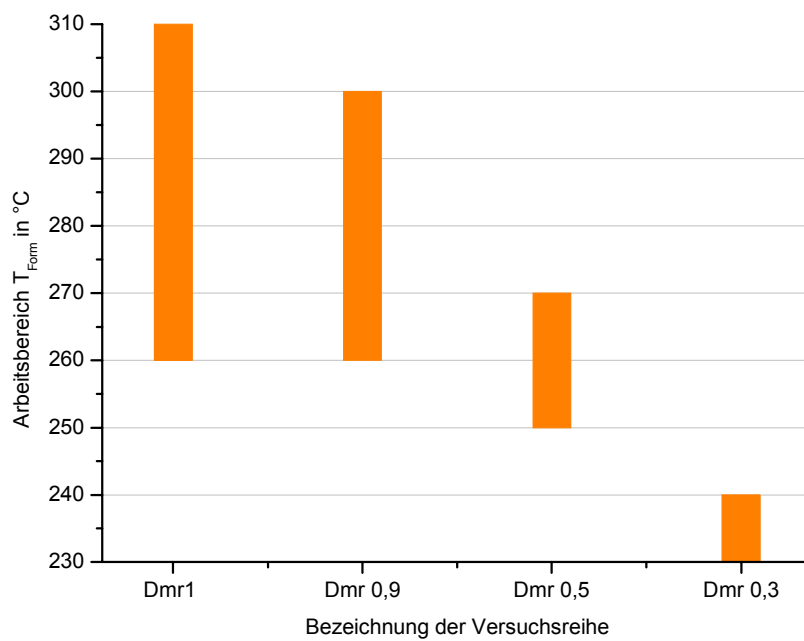


Abbildung 14.24: Arbeitsbereich der Formtemperatur (T_{Form})

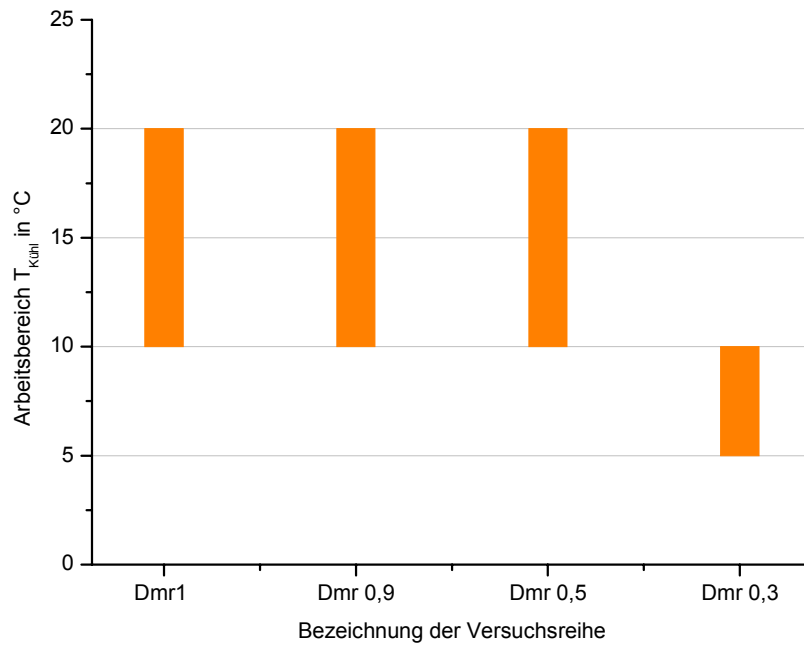


Abbildung 14.25: Arbeitsbereich der Kühltemperatur ($T_{\text{kühl}}$)

14.2 Tabellen

Einflussgröße	Versuchseinstellungen
Temperatur im Schmelzbad (Badtemperatur)	240 °C bis 260 °C (10 K Schrittweite)
Formtemperatur	250 °C bis 270 °C (10 K Schrittweite)
Kühltemperatur	10 °C bis 20 °C (5 K Schrittweite)
Gießgeschwindigkeit	1,4 bis 4,2 mm/s
Abstand Form Kühlmedium	~ 2,8 mm
Schmelzpegelhöhe im Bad	32 mm
Stranglänge	400 mm
Stahlform	Formkanaldurchmesser 0,46 mm

Tabelle 14.1: Gießversuche zur Erzeugung von Strängen mit kreisförmigem Querschnitt im Durchmesser 0,5 mm

Einflussgröße	Versuchseinstellungen
Temperatur im Schmelzbad (Badtemperatur)	Konstant 240 °C
Formtemperatur	230°C und 240 °C
Kühltemperatur	5 °C
Gießgeschwindigkeit	1,7 bis 2,5 mm/s
Abstand Form Kühlmedium	~ 2,8 mm
Schmelzpegelhöhe im Bad	33 mm
Stranglänge	200 mm
Stahlform	Formkanaldurchmesser 0,31 mm

Tabelle 14.2: Gießversuche zur Erzeugung von Strängen mit kreisförmigem Querschnitt im Durchmesser 0,3 mm

Proben Nr.	Badtemperatur in °C	Formtemperatur in °C	Kühltemperatur in °C	Schmelzpegelhöhe in mm	Gieß-geschwindigkeit in mm/s	Messpunkt bei cm	Dmr in mm	Oberfläche glatt=1, leicht gewellt=2, rauh=3	Bemerkung, VM (Vibrationsmarken)
Versuchsreihe Dmr 0,9									
76	240	260	10	23	5,53	1	0,94	1	VM (ab 35 cm)
76	240	260	10	23	5,53	10	0,93	1	
76	240	260	10	23	5,53	20	0,93	1	
76	240	260	10	23	5,53	30	0,92	1	
76	240	260	10	23	5,53	39	0,92	2	
221	260	280	20	23	3,44	1	0,90	1	VM (ab 26 cm),
221	260	280	20	23	3,44	10	0,91	1	
221	260	280	20	23	3,44	20	0,91	2	
221	260	280	20	23	3,44	30	0,92	3	
221	260	280	20	23	3,44	39	0,93	3	
Versuchsreihe Dmr 0,5									
				5					
a2	250	270	20	32	1,06	1	0,49	1	
a2	250	270	20	32	1,06	10	0,48	1	
a2	250	270	20	32	1,06	20	0,47	1	
a2	250	270	20	32	1,06	30	0,46	1	
a2	250	270	20	32	1,06	39	0,48	1	
a58	260	280	15	32	1,74	1	0,47	1	
a58	260	280	15	32	1,74	10	0,45	1	
a58	260	280	15	32	1,74	20	0,46	2	
a58	260	280	15	32	1,74	30	0,47	2	
a58	260	280	15	32	1,74	39	0,47	2	

Tabelle 14.3: ausgewählte Versuchsprotokolle

Formkanal- durchmesser	Stranglänge	Anzahl der ausge- werteten Proben	Anzahl der unterschiedlichen Parameterkombinationen
0,93 mm	400 mm	350	50
0,46 mm	400 mm	180	32
0,32 mm	50 bis 200 mm	24	8

Tabelle 14.4: Experimente zur Bestimmung der technologischen Parameter (Anzahl der Proben und Datensätze)

Anhang/Tabellen

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: dmr

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
kuehl	-0,00264233	0,00117569	-2,24748	0,0246
bad	0,00273529	0,000332744	8,22039	0,0000
form	0,00123966	0,00028099	4,41176	0,0000
v	-0,0260299	0,00318779	-8,16548	0,0000
abstand	-0,000629237	0,000306939	-2,05004	0,0404

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	852,907	5	170,581	8448,02	0,0000
Residual	23,463	1162	0,0201919		
Total	876,37	1167			

R-squared = 97,3227 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 97,3135 percent
Standard Error of Est. = 0,142098
Mean absolute error = 0,109678
Durbin-Watson statistic = 0,675714

Number of excluded rows: 17

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between dmr and 5 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{dmr} = -0,00264233 \cdot \text{kuehl} + 0,00273529 \cdot \text{bad} + 0,00123966 \cdot \text{form} - 0,0260299 \cdot \text{v} - 0,000629237 \cdot \text{abstand}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 97,3227% of the variability in dmr. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 97,3135%. (Note: since the model does not contain a constant, you should be careful in interpreting the R-Squared values. Do not compare these R-Squared values with those of models which do contain a constant.) The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,142098. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,109678 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

Tabelle 14.5: Regressionsanalyse Dmr 0,9 (Statgraphics)

Anhang/Tabellen

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: dmr

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
bad	-0,00324894	0,000396064	-8,20306	0,0000
form	0,00511465	0,000365637	13,9883	0,0000
kuehl	-0,00514822	0,00105249	-4,89149	0,0000
v	-0,0105438	0,0054956	-1,91858	0,0550
abstand	0,000587796	0,000279477	2,1032	0,0354

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	178,812	5	35,7624	3551,43	0,0000
Residual	7,34093	729	0,0100699		
Total	186,153	734			

R-squared = 96,0565 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 96,0349 percent
Standard Error of Est. = 0,100349
Mean absolute error = 0,0750335
Durbin-Watson statistic = 0,802807

Number of excluded rows: 7

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between dmr and 5 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{dmr} = -0,00324894 \cdot \text{bad} + 0,00511465 \cdot \text{form} - 0,00514822 \cdot \text{kuehl} - 0,0105438 \cdot \text{v} + 0,000587796 \cdot \text{abstand}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 96,0565% of the variability in dmr. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 96,0349%. (Note: since the model does not contain a constant, you should be careful in interpreting the R-Squared values. Do not compare these R-Squared values with those of models which do contain a constant.) The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,100349. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,0750335 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

Tabelle 14.6: Regressionsanalyse Dmr 0.5 (Statgraphics)

Badtemperatur in °C	Formtemperatur in °C	Kühlbadtemperatur in °C	Gießgeschwindigkeit in mm/s
260	280	10	1,8
260	280	15	1,8
260	260	10	3,5
260	260	10	5,2
240	260	10	3,5
240	260	10	5,2
240	280	10	3,5
240	280	15	5,2
240	280	15	3,5
240	280	15	5,2

Tabelle 14.7: Parameterkombinationen zur Aufzeichnung der Temperaturänderung in Gießrichtung unter Verwendung von Stahlformen (Kühlung Wasserbad)

Badtemperatur in °C	Formtemperatur in °C	Kühlbadtemperatur in °C	Gießgeschwindigkeit in mm/s
260	280	15	3,5
260	280	15	5,2
240	260	10	3,5
240	260	10	5,2

Tabelle 14.8: Parameterkombinationen zur Aufzeichnung der Temperaturänderung in Gießrichtung bei Verwendung von Graphitformen (Kühlung Wasserbad)

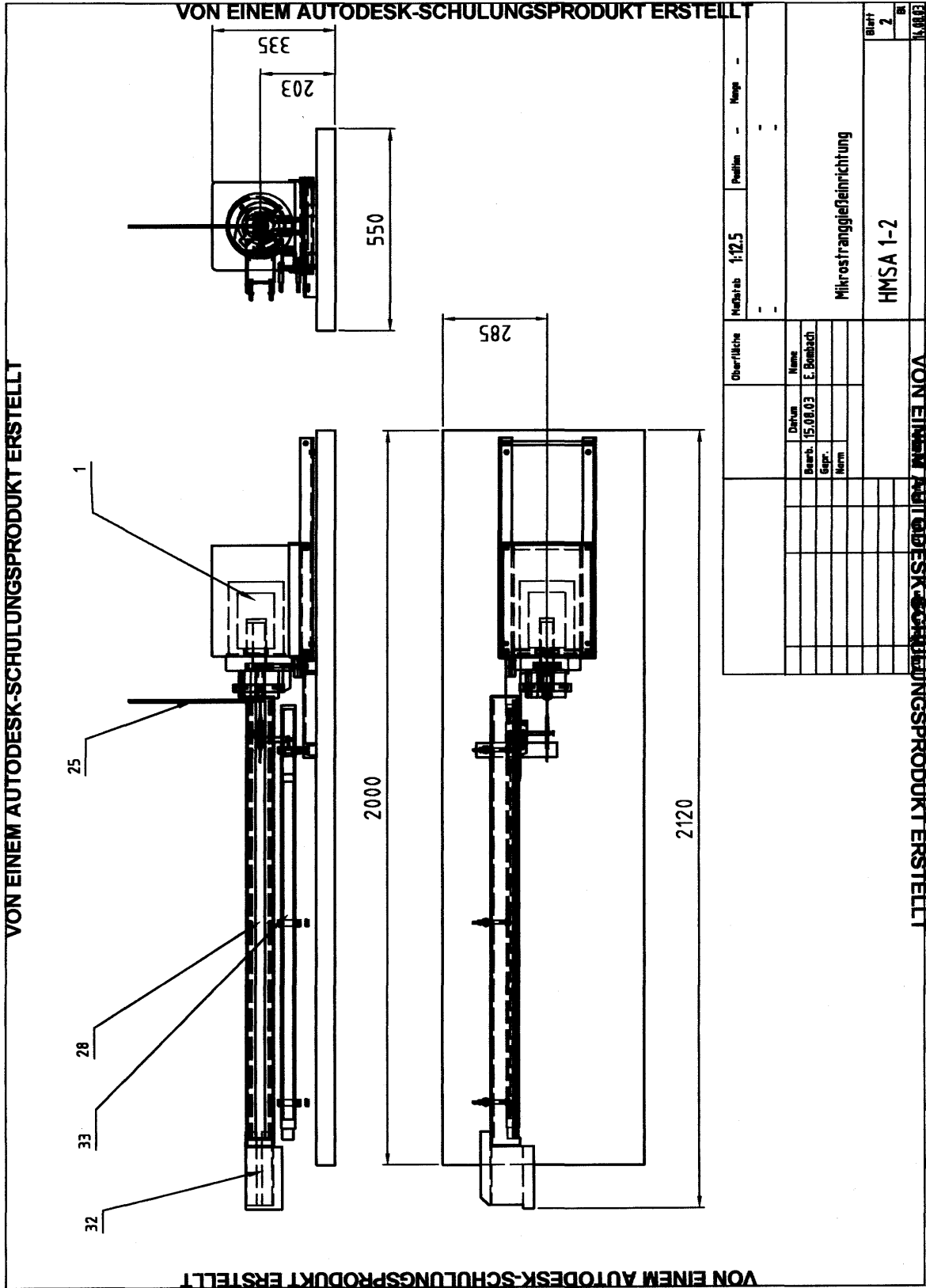
Badtemperatur in °C	Formtemperatur in °C	Fluidstrom in NI/min	Gießgeschwindigkeit in mm/s
250	247	14	1,8

Tabelle 14.9: Parameterkombinationen zur Aufzeichnung der Temperaturänderung in Gießrichtung bei Verwendung einer Stahlform (Kühlung im Luftstrom)

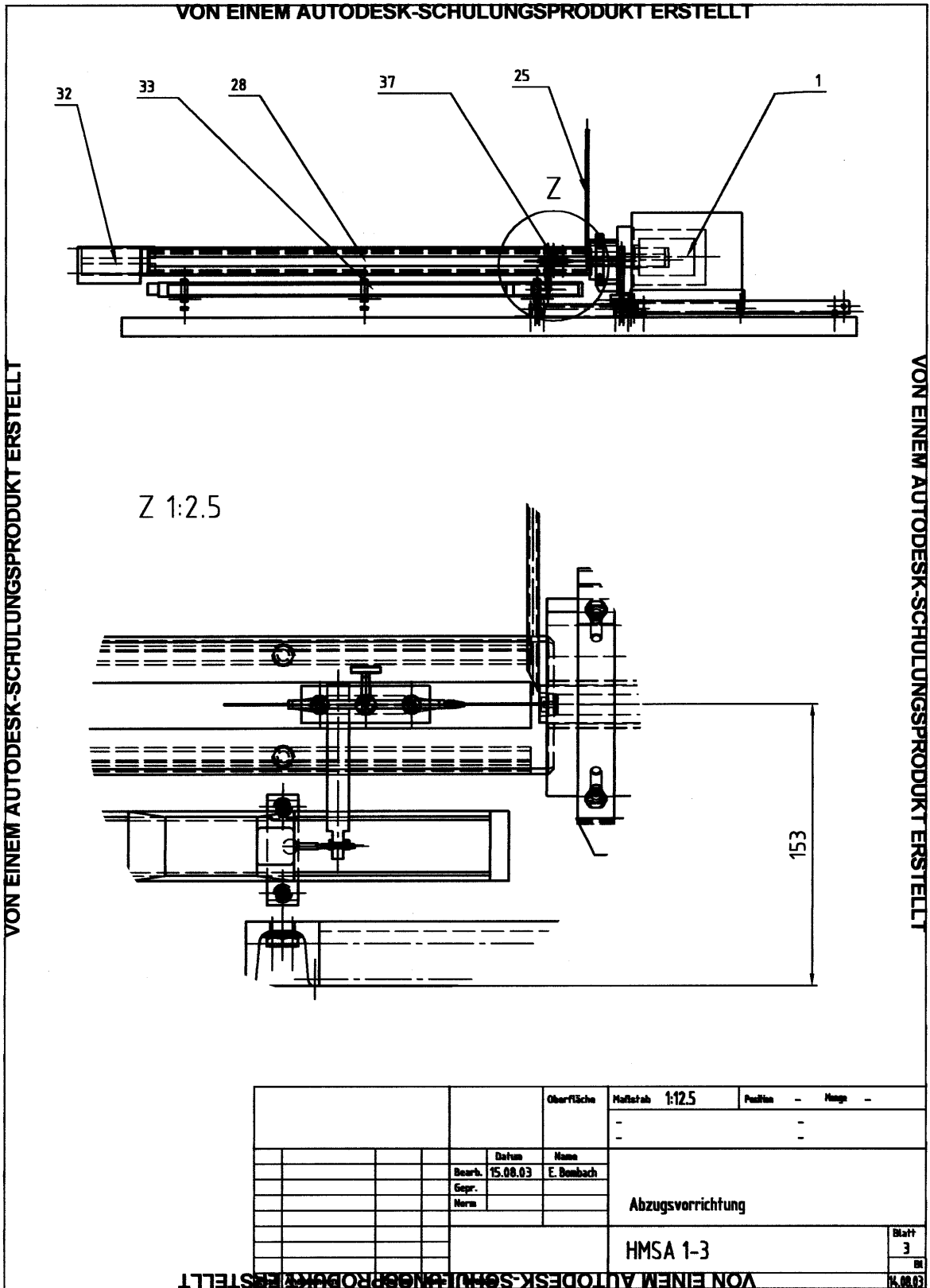
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Wärmeleitfähigkeit von Zinn in der festen Phase	λ_S	68	W/mK
Wärmeleitfähigkeit von Zinn in der flüssigen Phase	λ_L	36	W/mK
Erstarrungsenthalpie von reinem Zinn	h_E	60610	J/kg
Dichte von Zinn in der festen Phase	ρ	6,834	Kg/m ³
Erstarrungstemperatur von Zinn	T_E	232	° C
Temperatur der Schmelze	T_L	nach Tabelle 6.2	° C
Koordinate der Messung von T_L bezogen auf den Formausgang	x_0	- 0,5	mm
Temperaturgradient in der festen Phase an der Stelle x_E	dT/dx	nach Tabelle 6.2	K/mm
Gießgeschwindigkeit	v_g	nach Tabelle 6.2	mm/s
Position der Erstarrungsfront	x_E	berechnet	mm

Tabelle 14.10: Daten und Stoffdaten für die Berechnung von x_E

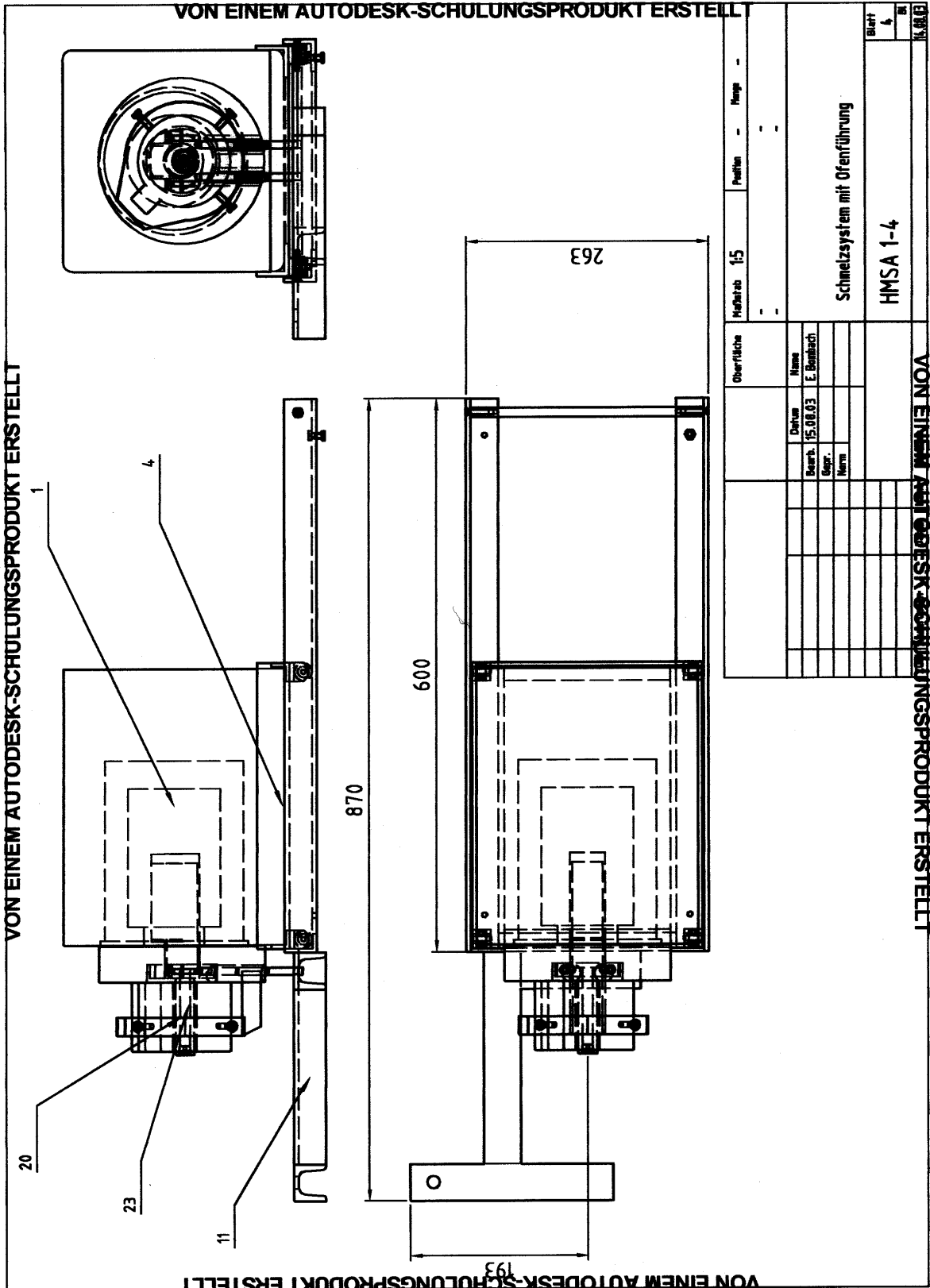
14.3 Zeichnungen



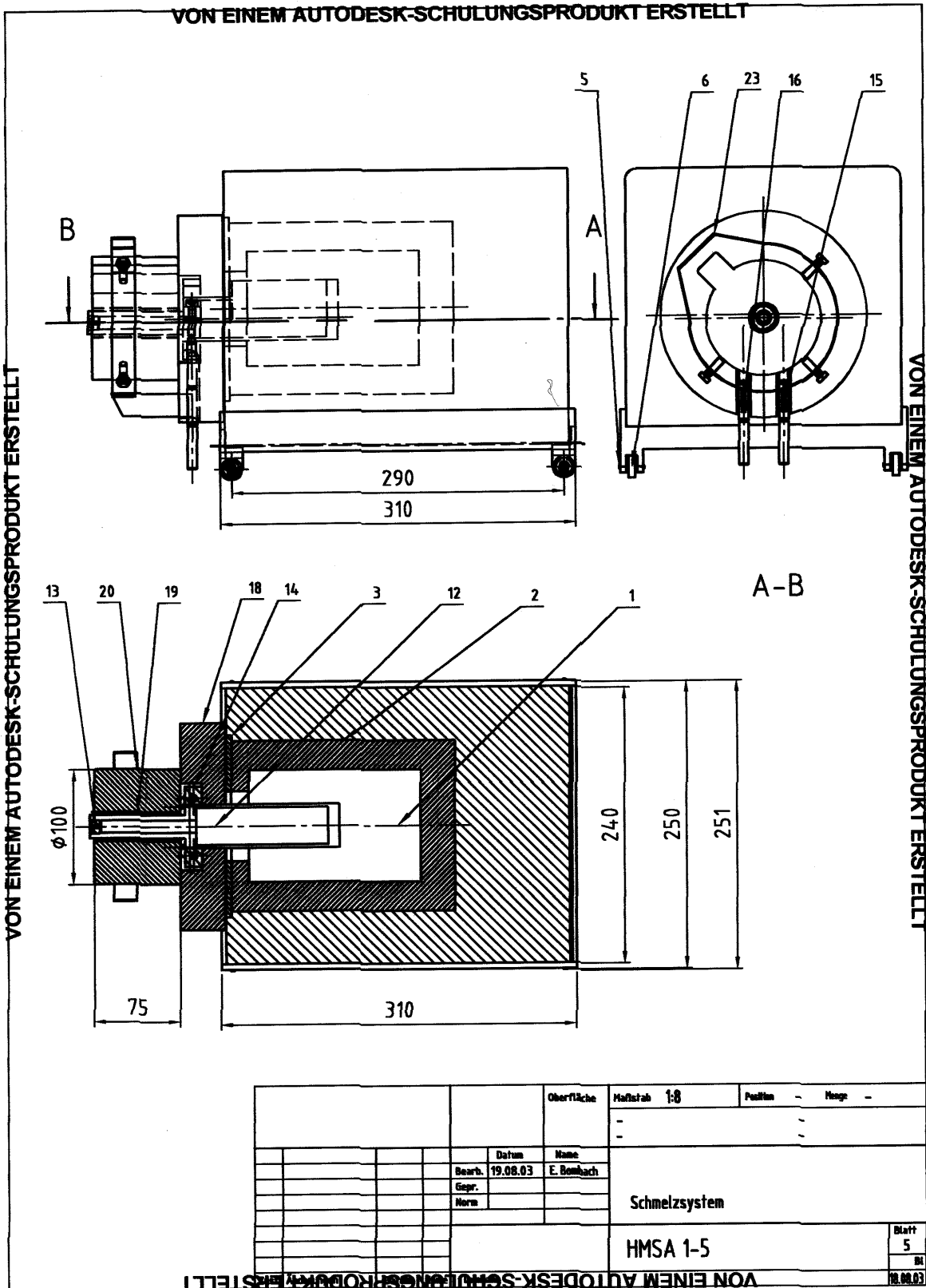
Zeichnung 1: Mikrostranggießanlage mit Grundplatte



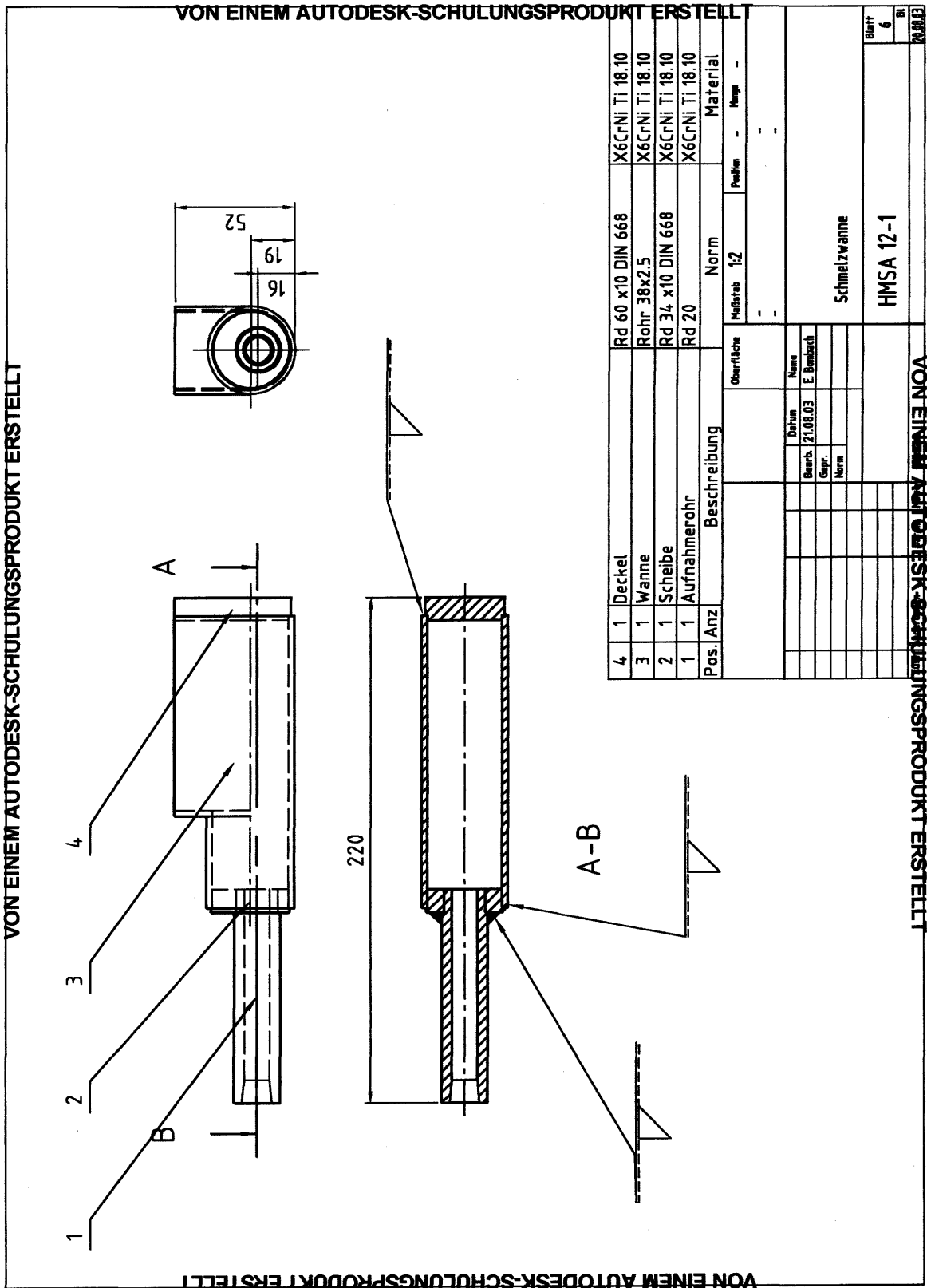
Zeichnung 2: Abzugsvorrichtung



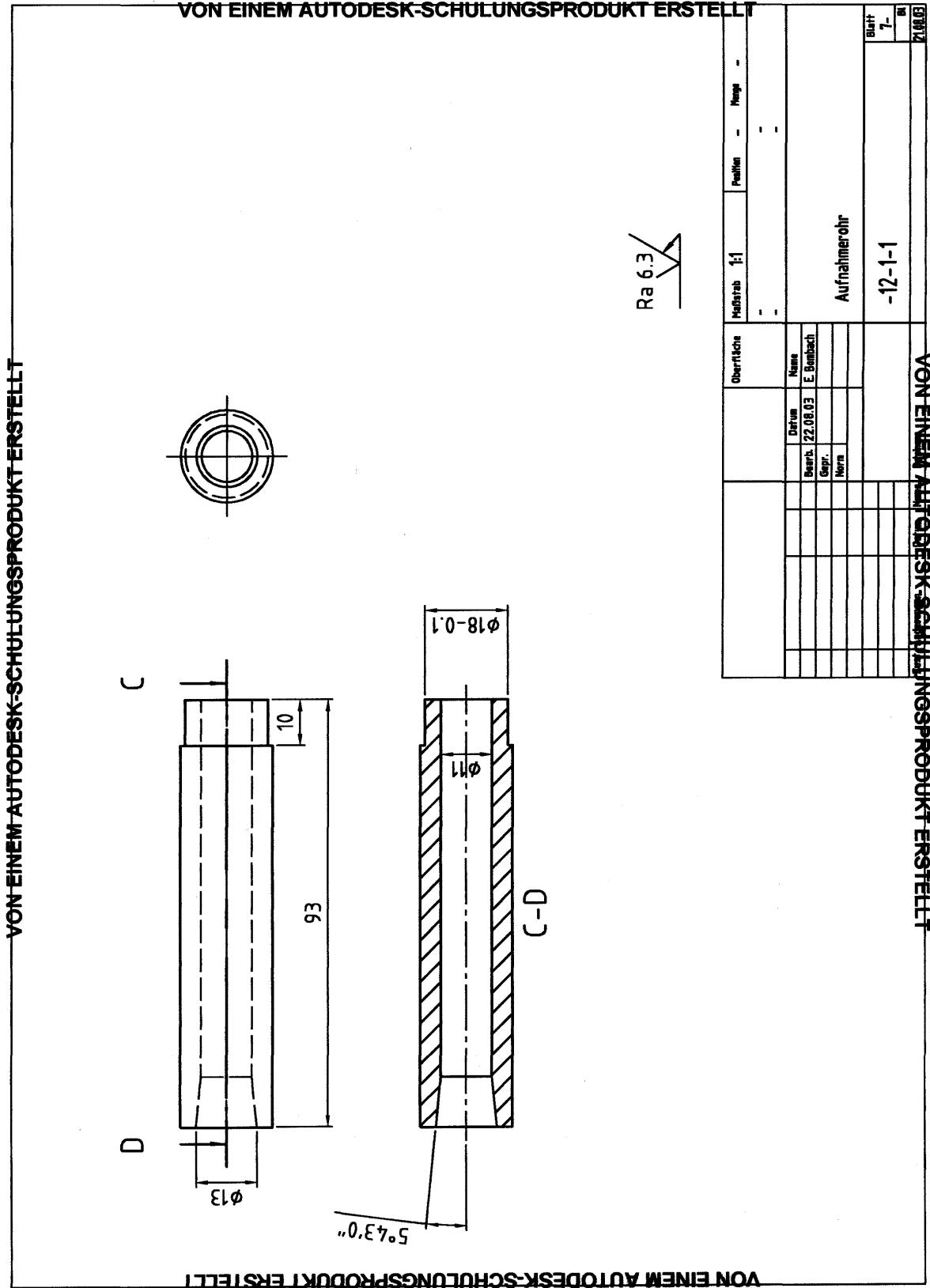
Zeichnung 3: Schmelzsystem



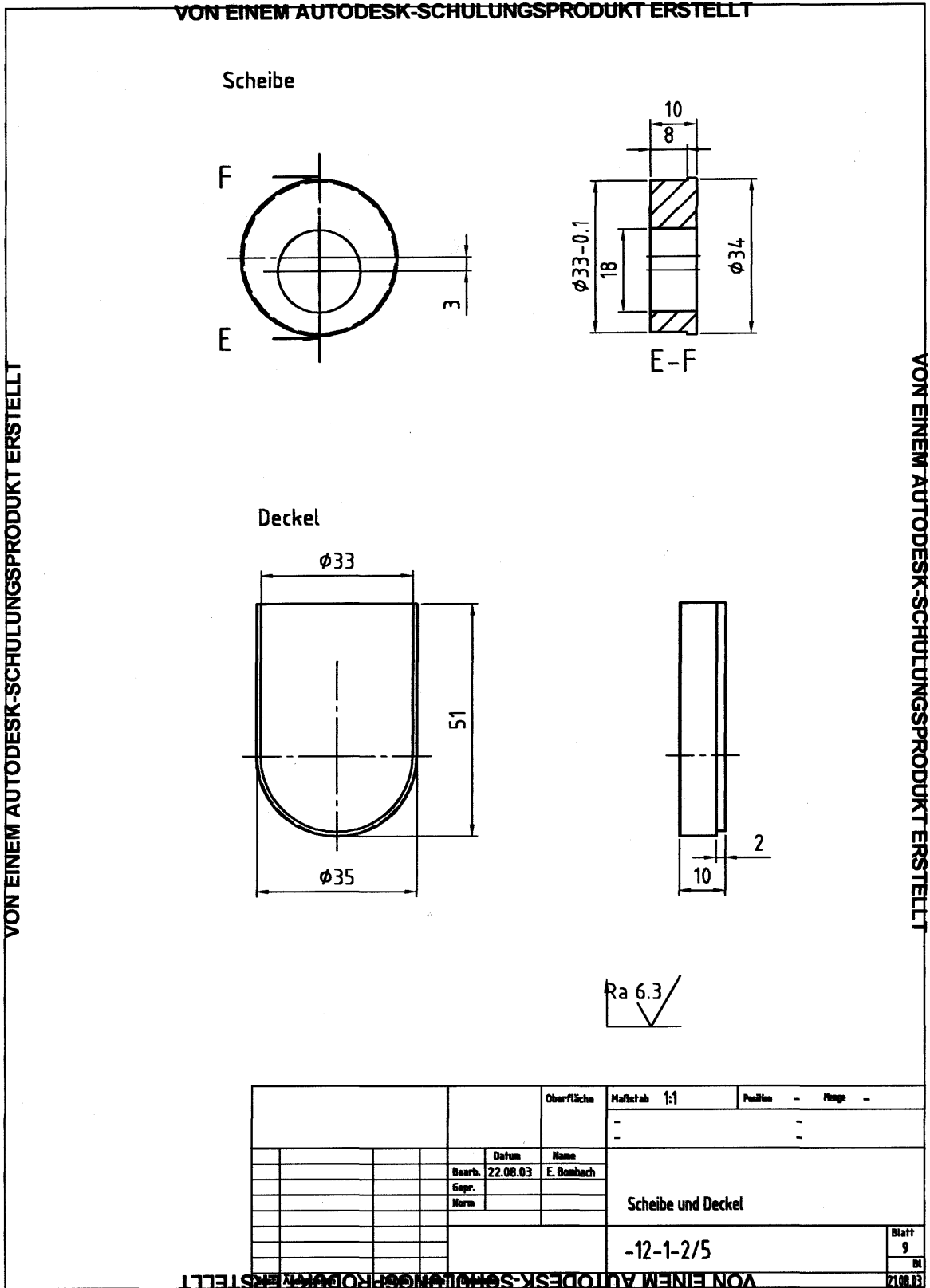
Zeichnung 4: Muffelofen mit Wanne



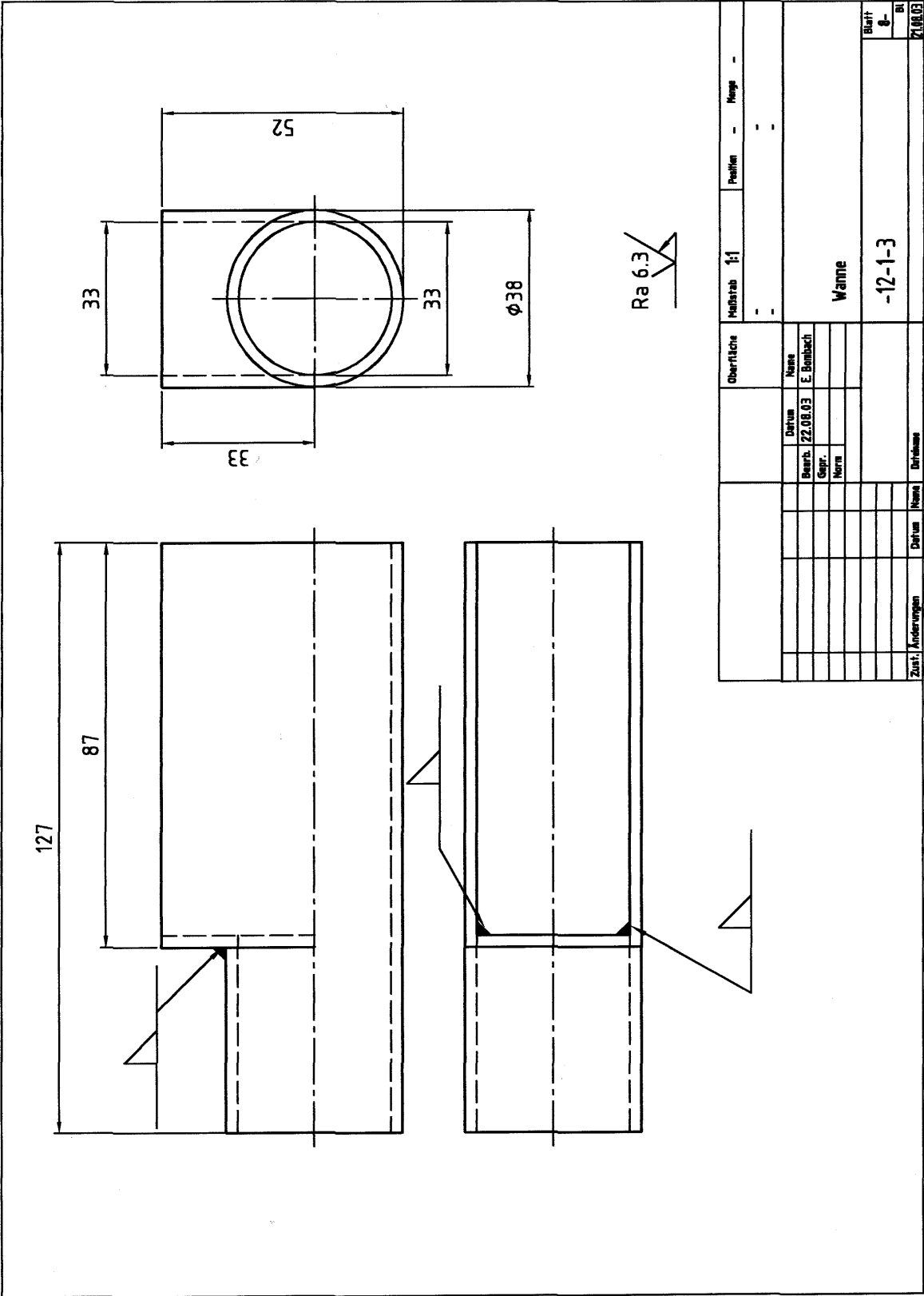
Zeichnung 5: Schmelzwanne



Zeichnung 6: Zuleitungsrohr



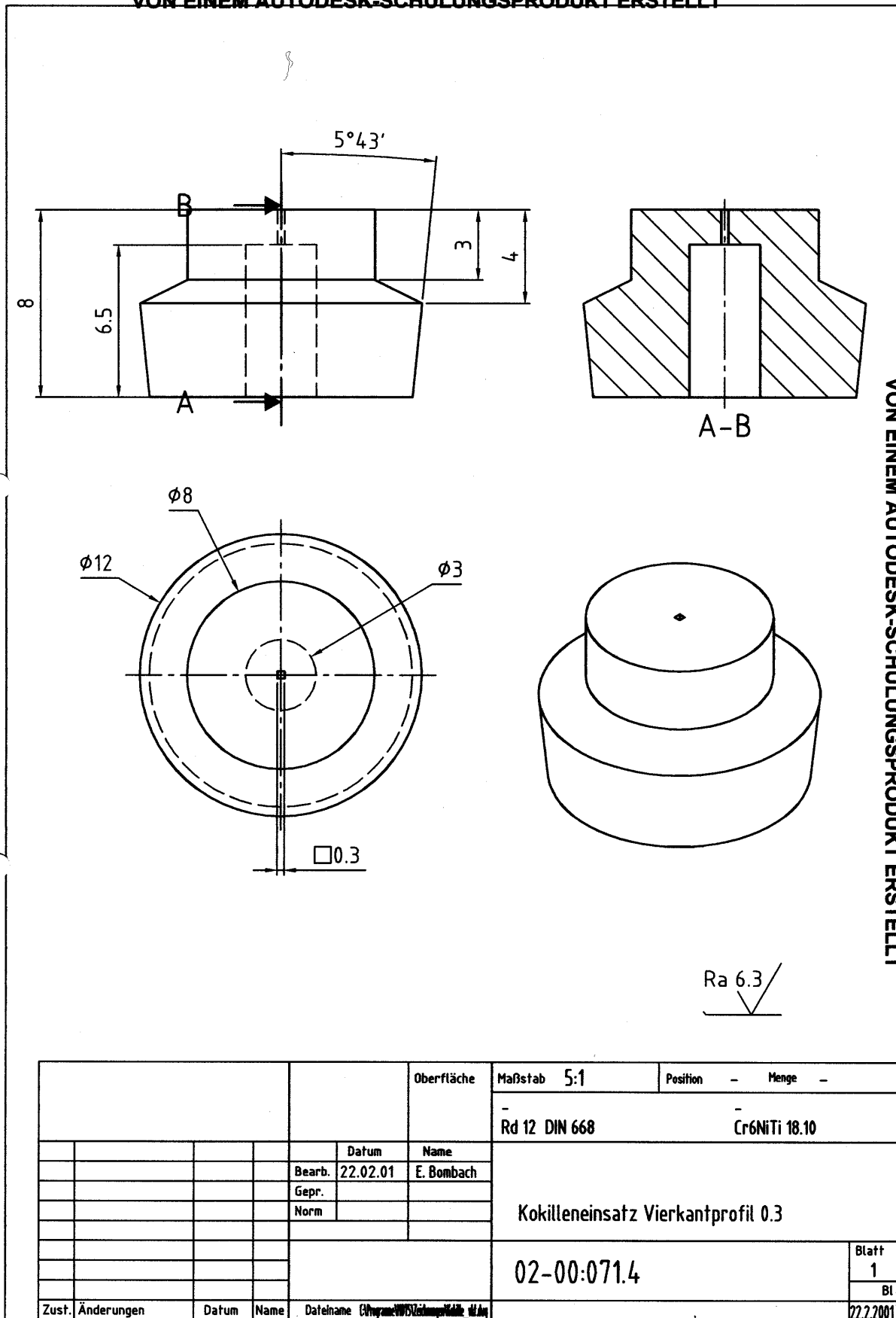
Zeichnung 7: Deckel



Oberfläche		Maßstab	1:1	Position	-	Neige	-
Bezeichnung	22.08.03	Gepr.					
Name	E. Bombach	Norm					
Datum		Name		Wanne		Baufert	
Zust. Änderungen		Datum		-12-1-3		8-	
Datum		Name		Druckname		21.08.03	

Zeichnung 8: Wannenkörper

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT



VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

		Oberfläche		Maßstab 5:1	Position - Menge -
				Rd 12 DIN 668	Cr6NiTi 18.10
		Datum	Name	Kokilleneinsatz Vierkantprofil 0.3	
		Bearb.	22.02.01 E. Bombach		
		Gepr.			
		Norm			
				02-00:071.4	Blatt 1
Zust.	Änderungen	Datum	Name	Dateiname	Bl 22.2.2001

Zeichnung 9: Kokille

HMSA20030811				
Pos.	Anz	Beschreibung	Norm	Material
1	1	Muffelofen		
2	1	Innenauskleidung		
3	1	Abdeckscheibe		X6 CrNiTi1810
4	1	Rahmen	DIN59370 - S235JR - S 35 x 5	S235JR
5	4	Bolzen	ISO 2340 - A - 5 x 22	
6	4	Rillenkugellager	DIN 625 T1 - 635 - 5 x 19 x 6	
7	1	scharfkantiges L-Profil	DIN59370 - S235JR - S 35 x 5	S235JR
8	1	Rundstahl	ISO 1035/1 - 10	1.0037
9	1	Senkschraube	DIN 963 - M5 x 25	
10	1	Senkschraube	ISO 2009 - M5 x 25	
11	1	U-Profil	DIN1026	S235JR
12	1	Schmelzwanne		
13	1	Kokille	DIN 668	X6 CrNiTi1810 Rd 10
14	1	Spannring	DIN 668	St 37-3 Rd 70
15	1	Stütze	DIN 668	St37-3 Rd 8
16	1	Stütze		
17	2	Zylinderschraube	DIN 912 - M6 x 25	
18	1	Dämmscheibe		
19	1	Keramkröhr		
20	1	Formheizung		
21	4	Sechskantschraube	DIN 933 - M6 x 14	
22	12	Sechskantmutter	DIN 439 - M6	
23	1	Halterung		
24	3	Sechskantschraube	DIN 933 - M6 x 20	
25	1	Kühlrohr		
26	3	Scheibe	DIN 125-2 - 10.5	
27	3	Sechskantmutter	DIN 439 - M10	
28	1	Linearführung		
29	6	Sechskantschraube	DIN 931-1 - M6 x 50	
30	6	Scheibe	DIN 125 - A 6.4	
31	1	Schutzlappen		
32	1	Servomotor		

Zeichnung 10: Teileliste (Auszug) Blatt 1

Anhang/Zeichnungen

Pos.	Anz	Beschreibung	Norm	Material
33	1	Wegaufnehmer		
34	1	Anschlussstück		
35	1	Schieber		
36	1	Kugelgelenk		
37	1	Mitnehmer		
38	1	LF-Schieber		
39	1	Bolzen		
40	2	Zylinderschraube	DIN 912 - M5 x 20	
41	1	Lanzenführung	DIN 17660	CuZn40Pb2 Rd 12
42	1	Lanze		
43	1	Spannzange		
44	1	Rändelschraube	DIN 464 M2.5 x 12	
45	1	Rändelschraube	DIN 653 M4 x 16	
46	1	Koppeldraht		
47	3	KLemme		
48	1	Befestigungsstift		
49	6			
50	6	Sechskantschraube	DIN 931-1 - M4 x 25	
51	1	Grundplatte		
52	2	Hohlprofil	50 x 50 x 2.9 - DIN59410 - S235JR	S235JR
53	2	Hohlprofil	50 x 50 x 2.9 - DIN59410 - S235JR	S235JR
54	1	Hohlprofil	50 x 50 x 2.9 - DIN59410 - S235JR	S235JR
55	1	Hohlprofil	50 x 50 x 2.9 - DIN59410 - S235JR	S235JR
56	1	Hohlprofil	50 x 50 x 2.9 - DIN59410 - S235JR	S235JR
57	1			
58	3	Sechskantmutter	DIN 439 - M2.5	
59	1			
60	1			

Zeichnung 11: Teileliste (Auszug) Blatt 2