

**Verwendung einer modifizierten Kokillenoberfläche zur Vermeidung von
längsrissbasierten Schalenfehlern in einer Dünnbrammengießanlage**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und
Verfahrenstechnik der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dipl. - Ing.
Matthias Dresler
aus
Rheinberg

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl - Heinz Spitzer

Tag der mündlichen Prüfung: 18.06.2020

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen meiner Tätigkeit als Ingenieur bei der thyssenkrupp Steel Europe AG im Rahmen des Projektes „Oberflächenstrukturierte Kokille“ angefertigt. Ich danke allen Mitarbeitern, die mich im Rahmen dieses Projektes unterstützt und mir das Anfertigen dieser Arbeit ermöglicht haben.

Ich danke meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Deike, Leiter des Lehrstuhls für Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung an der Universität Duisburg-Essen für die Möglichkeit zur Promotion sowie den fachlichen Diskussionen im Rahmen dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. - H. Spitzer, Leiter des Lehrstuhls für metallurgische Prozesstechnik der technischen Universität Clausthal danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. E. Balichev, Herrn Dr. C. Höckling und Herrn Dr. S. Kurtenbach für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen sowie die kritischen Anmerkungen zu dieser Arbeit.

Viel Dank gilt meinen Eltern, meinem Bruder Patrick und meinen Schwiegereltern, die mich stets in meinen Vorhaben unterstützt haben, beginnend bei meinem ersten Schulabschluss bis hin zum Abschluss dieser Promotion. Meinen Kindern danke ich dafür, dass sie in der Zeit der Anfertigung dieser Arbeit so tapfer auf Zeit mit mir verzichtet haben.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Frau Tabea, die nie an mir gezweifelt hat. Danke für dein Vertrauen. Danke, dass es dich gibt!

Duisburg, im Juli 2020.

Matthias Dresler

Zusammenfassung

Moderne Stahlprodukte müssen hinsichtlich ihrer Qualität immer höheren Ansprüchen genügen. Unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten hat daher eine Vermeidung von fehlerhaften Produkten oberste Priorität.

Ein wesentlicher Produktionsschritt der Stahlerzeugung ist der Stranggießprozess. Das Herzstück des Gießprozesses ist die Kokille, in der der flüssige Stahl zu festen Produkten erstarrt. Ein möglicher, in der Kokille auftretender Fehler ist der so genannte längsrisssbasierte Schalenfehler. Dieser beeinträchtigt die mechanischen Eigenschaften des Produktes und führt zu einer verminderten Oberflächenqualität.

Eine Ursache für die Bildung dieser Schalenfehler ist die während der Erstarrung auftretende Inhomogenität des aus der Kokille abzuführenden Wärmestroms. Eine besonders hohe Wärmestrominhomogenität tritt beim Gießprozess von Dünnbrammen auf. Dieser Prozess ist somit anfällig für längsrisssbasierte Schalenfehler. Daher liegt der Fokus der Arbeit auf dem Gießprozess von Dünnbrammen. Ziel dieser Arbeit ist es, durch eine geeignete Modifikation der Kokillenoberfläche den Wärmestrom in der Kokille zu beeinflussen und so den Fehlerbefall auf dem Produkt zu reduzieren.

Hierzu werden zunächst potenzielle Oberflächenstrukturen hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in der Kokille bewertet und priorisiert. In ersten Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich durch die Verwendung der Oberflächenstruktur eine signifikante Reduktion des Kontaktwärmestroms ergibt. Deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Strukturen konnten nicht festgestellt werden.

Gemäß der Priorisierung der Strukturen hinsichtlich ihres Einsatzes und aufgrund der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Kontaktwärmestrom wird die Nadelstruktur für betriebliche Einsätze ausgewählt. Durch weitere Untersuchungen werden die Auswirkungen der Rauheit der Struktur auf den Wärmestrom ermittelt. So existiert ein Grenzwert in der Rauheit, dessen Überschreitung zu keiner weiteren signifikanten Reduktion im Wärmestrom führt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse und unter Einhaltung betrieblicher Restriktionen werden Kokillenplattenoberflächen mit einer Struktur präpariert und unter Betriebsbedingungen eingesetzt. Die Verwendung der strukturierten Kokillenplattenoberflächen zeigt eine Homogenisierung des Wärmestroms in der Kokille sowie eine Reduktion des längsriszbasierten Schalenfehlers auf dem erzeugten Produkt. Somit kann durch die Modifikation der Kokillenoberfläche eine deutliche Verbesserung der Produktqualität erzielt werden.

Aufbauend auf den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse kann durch zukünftige Betrachtungen eine Übertragung der Kokillenoberflächenmodifikation auf weitere Gießverfahren erfolgen. Weiterhin bietet die Verwendung einer strukturierten Kokille das Potenzial, neue längsrissskritische Stähle über einen Dünnbrammen - Gießprozess zu erzeugen.

Abstract

Today advanced steel products have to fulfill high standards of quality. The continuous casting process is an essential process step of steel production. For environmental and economic reasons, it is necessary to avoid defects which reduce the quality of the product.

An essential part of steel production is the continuous casting process. The core of the continuous casting process is the mould in which the melt is transferred into solid products. A possible type of defect, which can occur in the mould, is called longitudinal crack based shell defect.

These type of defects affect the mechanical properties of steel products and lead to a diminished surface quality. The inhomogeneity of the cooling load in the mould caused by the solidifying melt is one reason of these kind of shell defects. The thin slab casting process is characterised by especially high inhomogeneity of the cooling load. That is the reason why this process is highly sensible to longitudinal crack based shell defects. Hence the focus of this work is on the thin slab casting process. The objective of this work is to affect the cooling load in the mould and to reduce the defects on the product by modifying the surface of the mould.

At first potential surface structures are evaluated and prioritised concerning their skill of application in the mould. Initial studies revealed that the application of a surface structure lead to a significant reduction of the contact cooling load. Distinct differences between the potential surface structures could not be established.

According to the prioritisation of the structures concerning their skill of application and based on the results of the studies on the contact cooling loads the needle structure was chosen for operational usage. Further studies show the effects of the structure's roughness on the cooling load. A limit on roughness exists beyond that, the cooling load is not reduced significantly further.

Based on these results and satisfying the operational constraints, the structure was placed on the surface of several moulds. These moulds were used in the continuous casting process of thin slabs. Applying these structured moulds, the cooling load in the mould was homogenised and the amount of the longitudinal crack based shell defects

on the product was reduced. Thus, an improvement of the product quality was achieved by using the modified mould surface.

Attributed to the knowledge gained in this work, a transfer of the surface structure to the conventional casting process is possible. Furthermore, usage of these moulds has the potential to prevent longitudinal crack based shell defects in new products, which normally have high risk of such defects.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik.....	2
3	Problemstellung: Bildung von Längsrissen und Schalenfehlern	8
4	Wärmeübertragung in der Stranggusskokille.....	10
4.1	<i>Formen der Wärmeübertragung.....</i>	<i>10</i>
4.1.1	Konduktion	10
4.1.2	Konvektion	11
4.1.3	Wärmestrahlung.....	12
4.2	<i>Beschreibung der in der Kokille existierenden Wärmeströme.....</i>	<i>14</i>
4.2.1	Inhomogenität im Wärmestrom über die Kokillenhöhe	17
4.2.2	Inhomogenität im Wärmestrom über die Kokillenbreite	18
4.2.3	Inhomogenität im Wärmestrom durch lokale, sich temporär verändernde Einflüsse	20
4.3	<i>Auswirkungen hoher und inhomogener Wärmestromdichten auf die Oberflächenqualität</i> <i>der Strangschale</i>	<i>23</i>
5	Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte.....	28
5.1	<i>Definition verschiedener Rauheitskenngrößen.....</i>	<i>30</i>
5.1.1	Der arithmetische Mittenrauwert.....	30
5.1.2	Die maximale und die gemittelte Rautiefe.....	32
5.2	<i>Messung der Rauheitskenngrößen.....</i>	<i>34</i>
5.3	<i>Vorstellung der potenziellen Oberflächenmodifikationen</i>	<i>36</i>
5.3.1	Aktueller Aufbau der Kokillenwand.....	36
5.3.2	Anforderungen an die Kokillenoberflächenmodifikation	38
5.3.3	Eigenschaften der potenziellen Oberflächenmodifikationen	40
5.3.3.1	Durch Beschichtung aufgetragene Oberflächenstruktur	40
5.3.3.2	Mechanisch abgetragene Rillenstruktur.....	42
5.3.3.3	Durch Materialverdichtung erzeugte Oberflächenstruktur.....	45
5.3.4	Herstellungs- und prozesstechnische Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Oberflächenstruktur	48
6	Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom	51

6.1	<i>Vorüberlegungen zur Versuchsreihe</i>	51
6.2	<i>Versuchsaufbau und -durchführung</i>	54
6.3	<i>Ergebnisse der Versuchsreihen</i>	57
6.3.1	Vergleich des Wärmestromverhaltens der Oberflächenmodifikation gegenüber der bisher eingesetzten Oberflächenstruktur	57
6.3.2	Auswirkungen der Oberflächenrauheit auf den Kontaktwärmestrom.....	61
6.4	<i>Zwischenfazit zur Modifikation der Kokillenoberfläche</i>	64
7	Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen	66
7.1	<i>Festlegung des Arbeitsbereiches für Betriebsversuche</i>	66
7.2	<i>Herstellung der Oberflächenstruktur</i>	68
7.3	<i>Vorbereitung der modifizierten Kokillen</i>	69
7.4	<i>Einfluss der Kokillen mit Oberflächenmodifikation auf den Gießprozess und auf Wärmestrom in der Kokille</i>	72
7.5	<i>Haltbarkeit der Struktur und Auswirkung dieser auf die Kokillenstandzeit</i>	76
7.6	<i>Zwischenfazit zu den prozesstechnischen Erkenntnissen der betrieblichen Kokilleneinsätze und Neudefinition der Strukturparameter</i>	79
8	Einfluss der veränderten Kokillenoberflächenstruktur auf die Produktqualität	81
8.1	<i>Beschreibung des betrachteten Fehlers</i>	81
8.2	<i>Auswertung der Warmbandoberflächenqualität bei Einsatz der oberflächenstrukturierten Kokillen</i>	83
8.2.1	Bemessung der Oberflächenfehler	83
8.2.2	Auswertung in Bezug auf die Fehlerlänge	84
8.2.3	Auswertung in Bezug auf die Fehleranzahl	86
8.3	<i>Zusammenfassung und Fazit zur Oberflächenqualität der erzeugten Warmbänder</i>	88
9	Diskussion	90
9.1	<i>Auswirkungen der Oberflächenmodifikation auf den Kokillenwärmestrom</i>	90
9.1.1	Wirkungsweise der Oberflächenstruktur	90
9.1.1.1	Erster Ansatz zur Wirkungsweise der Oberflächenstruktur infolge der mit Schlacke gefüllten Vertiefungen.....	91
9.1.1.2	Zweiter Ansatz zur Wirkungsweise der Oberflächenstruktur infolge der mit Gas/Luft gefüllten Vertiefungen.....	93

9.1.1.3	Beurteilung der beiden Ansätze	96
9.1.2	Bedeutung der Wirkungsweise für den Wärmehaushalt der Kokille	99
9.2	<i>Auswirkungen der Oberflächenmodifikation auf die Produktqualität</i>	101
9.2.1	Wirkungsweise der Oberflächenmodifikation auf die Erstarrungseffekte der Stahlmarken A, B und C	104
9.2.2	Wirkungsweise der Oberflächenmodifikation auf die Erstarrungseffekte der Stahlmarke D.....	106
9.3	<i>Abschließendes Fazit zu den Auswirkungen der Oberflächenstruktur</i>	107
10	Zusammenfassung und Ausblick	109
11	Literaturverzeichnis	111
12	Anhang	120
12.1	<i>Berechnung des Kohlenstoffäquivalentes</i>	120
12.2	<i>Berechnung des Mindeststichprobenumfangs (a priori)</i>	122

Buchstabenverzeichnis

Römische Buchstaben:

A	:	Fläche
C	:	Gemessener Kohlenstoffgehalt des Stahls in % Massenanteil
Ca	:	Chemisches Zeichen für Kalzium
C_e	:	Kohlenstoffäquivalent
C_δ	:	Kohlenstoffgehalt des Punktes H im Eisenkohlenstoffdiagramm
C_γ	:	Kohlenstoffgehalt des Punktes J im Eisenkohlenstoffdiagramm
C'_δ	:	Kohlenstoffgehalt des Punktes C'_δ im Eisenkohlenstoffdiagramm
C'_γ	:	Kohlenstoffgehalt des Punktes C'_γ im Eisenkohlenstoffdiagramm
D	:	Strangschalendicke
dx	:	Änderung der Raumkoordinate in x-Richtung
dy	:	Änderung der Raumkoordinate in y-Richtung
dz	:	Änderung der Raumkoordinate in z-Richtung
e	:	Fehlertoleranz
F	:	Chemisches Zeichen für Fluor
F_G	:	Gewichtskraft
g	:	Erdbeschleunigung
K	:	Erstarrungskonstante
lr	:	Profillänge zur Ermittlung des Mittenrauwertes
ln	:	Messstrecke zur Ermittlung von Rauheitskenngrößen
m	:	Masse
N	:	Gesamtmenge
n_{min}	:	Mindeststichprobenumfang
n	:	Tatsächlicher Stichprobenumfang
O	:	Chemisches Zeichen für Sauerstoff
\dot{Q}	:	Absoluter Wärmestrom

\dot{q}	:	Flächenspezifischer Wärmestrom
Ra	:	Mittenrauwert
$Rmax$:	Maximale Rautiefe
Rz	:	Gemittelte Rautiefe
s	:	Schichtdicke
Si	:	Chemisches Zeichen für Silizium
t	:	Erstarrungszeit
$Z(x)$:	Profil der Messstrecke „x“ zur Ermittlung des Mittenrauwertes
z_i	:	Profilwert der Einzelmessstrecke zur Ermittlung der gemittelten Rautiefe
z	:	Statistische Berechnungsgröße auf Basis des Vertrauensniveaus

Griechische Buchstaben:

$\acute{\alpha}$:	Absorptionskoeffizient
α	:	Wärmeübergangskoeffizient
ε	:	Emissionskoeffizient
ϑ	:	Temperatur
$d\vartheta$:	Änderung der Temperatur
λ	:	Wärmeleitfähigkeit
π	:	Mittelwert der Grundgesamtheit
ρ	:	Reflektionskoeffizient
σ	:	Stefan – Boltzmann – Konstante
τ	:	Transmissionskoeffizient

1 Einleitung

Wird ein Blick in die moderne Stahlindustrie geworfen, so sind schnell die Herausforderungen zu erkennen, mit denen die Stahlproduktion konfrontiert wird. Von Seiten der Kunden müssen die hergestellten Produkte höchste technologische Anforderungen erfüllen. Gleichzeitig besteht seitens der Stahlhersteller der Anspruch, eine möglichst hohe Produktionseffizienz eines so energieintensiven Prozesses zu gewährleisten. Es ist daher aus ökonomischen und ökologischen Gründen äußerst wichtig, fehlerfreie Stahlprodukte herzustellen.

Um dem Auftreten von Fehlstellen im Produkt möglichst effektiv entgegen zu wirken, ist es notwendig, jeden einzelnen Prozessschritt der Stahlherstellung zu optimieren. Ein wesentlicher, in dieser Arbeit näher betrachteter Prozessschritt, ist das so genannte „Gießen“. In diesem Prozessschritt wird der flüssige Stahl abgekühlt und erstarrt zu festem Material. Der Erstarrungsprozess findet in einer gekühlten Kupferform, der so genannten „Kokille“ statt. Dem in der Kokille befindlichen Stahl wird Wärme entzogen. Die Erstarrung beginnt an der Stahloberfläche im Bereich des Gießspiegels. Es bildet sich eine Außenhülle aus festem Stahl, die so genannte Strangschale. Innerhalb des Erstarrungsprozesses können an der Oberfläche der Strangschale Fehlstellen entstehen, die wiederum in weiteren Prozessschritten zu Oberflächenfehlern führen können. Diese gilt es möglichst zu vermeiden.

Diese Oberflächenfehler können in weiteren Prozessschritten nur unter erheblichem Aufwand korrigiert werden. Daher wird eine Vermeidung der Fehler im Gießprozess angestrebt. Durch Anpassung von Prozessparametern (wie bspw. der Gießgeschwindigkeit) ist es möglich die Oberflächenfehler zu reduzieren. Weiterhin werden Gießhilfsstoffe auf die Vermeidung der Oberflächenfehler hin optimiert.

Eine weitere Möglichkeit zur Fehlerreduktion ist die Optimierung der Kokille beziehungsweise der Kokillenoberfläche. Ziel dieser Arbeit ist es, durch eine geeignete Modifikation der Kokillenoberfläche die Fehlstellen im erstarrenden Stahl zu vermeiden und dadurch den Fehlerbefall auf der Produktoberfläche zu reduzieren.

2 Stand der Technik

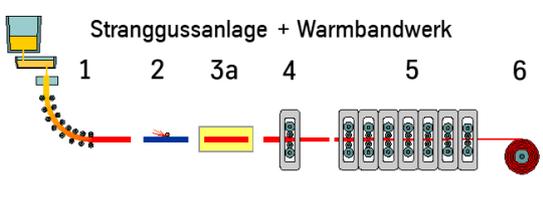
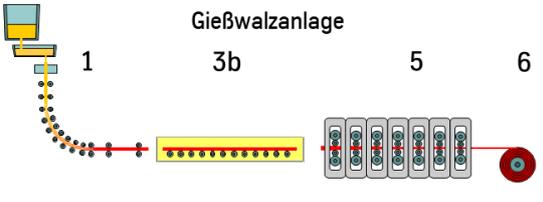
Innerhalb des Hüttenwerkes am Standort in Duisburg stellt die thyssenkrupp Steel Europe AG Stähle für verschiedenste Anwendungen in der Industrie- und Automobilbranche her. Hierzu wird zunächst aus Eisenerzen und Koks flüssiges Roheisen gewonnen. Dieses wird anschließend in einem Oxygenstahlwerk zu flüssigem Stahl mit definierter chemischer Zusammensetzung und Abgabetemperatur weiterverarbeitet und an eine Stranggießanlage (kurz „SGA“ oder engl. „CC“ = Continuous Casting) übergeben. Hier findet der Gießprozess, ein für die Stahlherstellung wesentlicher Prozessschritt, statt. Aus der Stahlschmelze wird durch kontrollierte Abkühlung und Erstarrung ein fester Stahlstrang erzeugt. Dieser durchgestarrte Stahlstrang wird am Ende des Gießprozesses in Brammen mit einer vorgegebenen Länge aufgeteilt. Bereits beim Gießen ist es wichtig, eine möglichst hohe Oberflächenqualität der produzierten Brammen zu gewährleisten. Einmal erzeugte Fehler in der Produktoberfläche können nur mit einem deutlichen Mehraufwand behoben werden, falls dies überhaupt noch möglich ist. Die Brammen werden anschließend durch den Walzprozess zu so genanntem „Warmband“ ausgewalzt. Meist werden die Brammen über einen längeren, logistisch bedingten Zeitraum gelagert, ehe sie in einem Warmbandwerk wieder auf ca. 1200 °C aufgeheizt und zu Warmband ausgewalzt werden. Ein großer Vorteil dieser Route besteht darin, dass die Brammen inspiziert und im Falle eines Fehlerbefalls repariert sowie auf mehrere zeitlich versetzte Aufträge verteilt werden können, bevor sie anschließend im Warmbandwerk weiterverarbeitet werden. Das Warmband kann direkt verkauft oder in Kaltwalzwerken mit Hilfe von Walz-, Glüh- und Beschichtungsprozessen zu dünnerem Kaltband weiterverarbeitet werden.

Alternativ kann Warmband auch über eine weitere Route, die Dünnbrammenroute, hergestellt werden. Hierfür wird lediglich ein Aggregat, die so genannte Gießwalzanlage (kurz „GWA“ oder engl. „TSC“ = Thin Slab Casting [KLIN17]) eingesetzt. In der Gießwalzanlage der thyssenkrupp Steel Europe AG werden aus der Stahlschmelze Dünnbrammen von bis maximal 65 mm Dicke hergestellt. Diese Dünnbrammen werden „inline“ in einem Ofen auf eine Walztemperatur von bis zu

1230 °C erhitzt und anschließend in einer Warmbandstraße direkt zu Warmband ausgewalzt.

Ein Vorteil dieses „gekoppelten Prozesses“ ist, dass, im Vergleich zur konventionellen Produktionsroute, Warmbänder mit engeren Maßtoleranzen hergestellt werden können. Da die Dünnbrammen nicht abkühlen, sondern direkt inline auf Walztemperatur aufgeheizt und ausgewalzt werden, ist die Prozessroute über die Gießwalzanlage zudem auch energetisch günstiger. Nachteilig ist, dass durch den Inline-Prozess eventuell fehlerbehaftete Dünnbrammen vor dem Auswalzen nicht repariert werden können. Eingewalzte Fehler führen zwangsweise zu verringerter Qualität bis hin zu Materialausschuss. Daher konzentrieren sich die in dieser Arbeit behandelten Themen vor allem auf die Dünnbrammenroute.

Die Kenngrößen und Eigenschaften der beiden unterschiedlichen Prozessrouten sind in **Tabelle 2.1** dargestellt.

Herstellungsrouten	Gießdicke [mm]	Gießbreite [mm]	Gießgeschwindigkeit [m/min]	Warmbanddicke [mm]
 <p>Stranggussanlage + Warmbandwerk</p> <p>1 2 3a 4 5 6</p>	215 - 260	1180 - 2600	0,6 - 1,3	1,5 - 20
 <p>Gießwalzanlage</p> <p>1 3b 5 6</p>	48 - 65	900 - 1600	4 - 6	1 - 12,5

1: Gießmaschine, 2: Flämmerei, 3a: Stoß- oder Hubbalkenofen, 3b: Rollenherdofen, 4: Vorgerüst, 5: Fertigstaffel, 6: Kühlstrecke und Haspel

Tabelle 2.1: Betrachtete Herstellungsrouten zur Warmbandherstellung.

In den beiden vorgestellten Herstellungsrouten ist es notwendig, das flüssige Material zu festem Material zu erstarren. Dieser Vorgang wird in beiden Prozessen jeweils in einer Gießmaschine durchgeführt. Das Herzstück der Gießmaschine ist die Kokille, in

der die Erstarrung der Schmelze eingeleitet wird. Beim Brammenstrangguss besteht die Kokille aus vier Kupferplatten, die auf Wasserkästen montiert sind und deren Rückwände aktiv durch Wasser gekühlt werden. Diese vier Kupferplatten werden Breit- beziehungsweise Schmalseiten genannt (vgl. **Abbildung 2.1**).

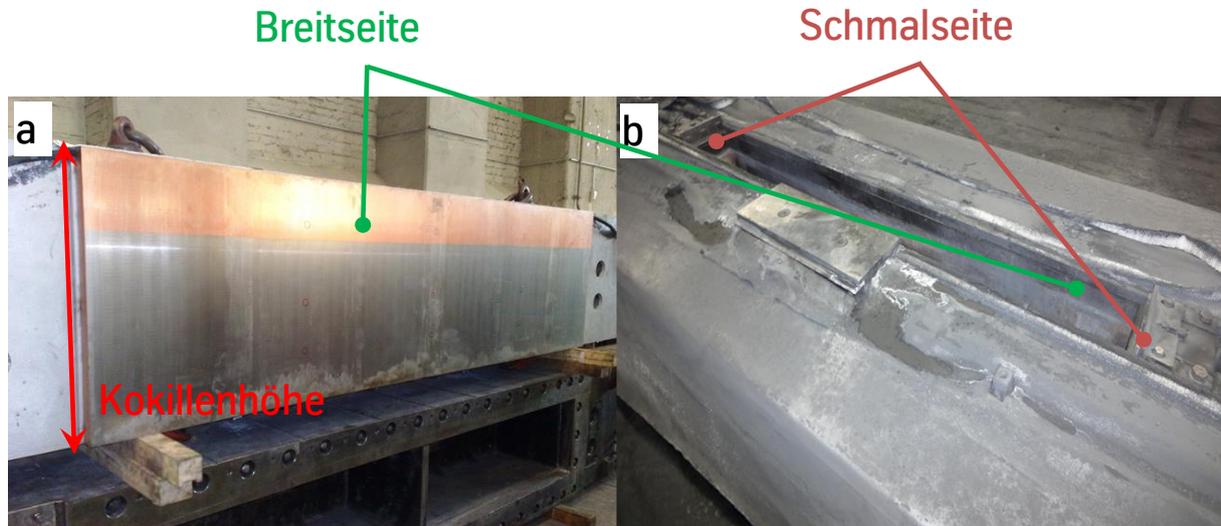


Abbildung 2.1: Breitseite, Schmalseiten und Kokillenhöhe einer konventionellen, teilvernickelten Kupferkokille: Ausgebaute Platte (a) und Öffnung auf der Kokillenseite (b).

Um das Schrumpfen (Zusammenziehen während der Abkühlung, vgl. Kapitel 4.2.1) des Stahls während der Abkühlung zu berücksichtigen verjüngen sich die Kokillenplatten an den Schmalseiten konisch nach unten. Je nach Anforderung an die Kokille besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Kokillenoberflächen teilweise mit einer Nickelschicht zu versehen, um einen Kupfereintrag in den Stahl zu vermeiden. An die Kokillen der GWA wird zusätzlich die Herausforderung einer besonderen Plattengeometrie gestellt, deren Ursache im Folgenden beschrieben wird.

Die vorgegebene Dicke des aus der Kokille der Gießwalzanlage austretenden, erstarrenden Stahlstranges beträgt 48 mm - 65 mm. Das vergleichsweise dünne Austrittsmaß ist vorteilhaft, um Warmband mit guten Ebenheits- und Planheitstoleranzen zu erzeugen, da das Material im Vergleich zur konventionellen Herstellungsroutenicht so stark verformt werden muss.

Eine dünne Kokillenaustrittsöffnung bedingt, dass die Kokillenbreitseiten in einem vergleichsweise geringen Abstand zueinander verbaut werden. Zwischen diese Platten muss in Gießprozess das so genannte Tauchrohr eingeführt werden, um die

Schmelze in die Kokille einzuleiten. Diese Tauchrohre können nicht beliebig dünn ausgelegt werden, da sonst die Gießkapazität negativ beeinflusst wird.

Eine Lösung um das dünne Kokillenaustrittsmaß an der Gießwalzanlage zu gewährleisten und gleichzeitig eine hohe Gießkapazität beizubehalten ist der Einsatz von „Trichterkokillen“. Diese Kokillen besitzen eine Aussparung (den „Trichter“), die über die Höhe der Kokille nach unten hin ausläuft (vgl. **Abbildung 2.2**).

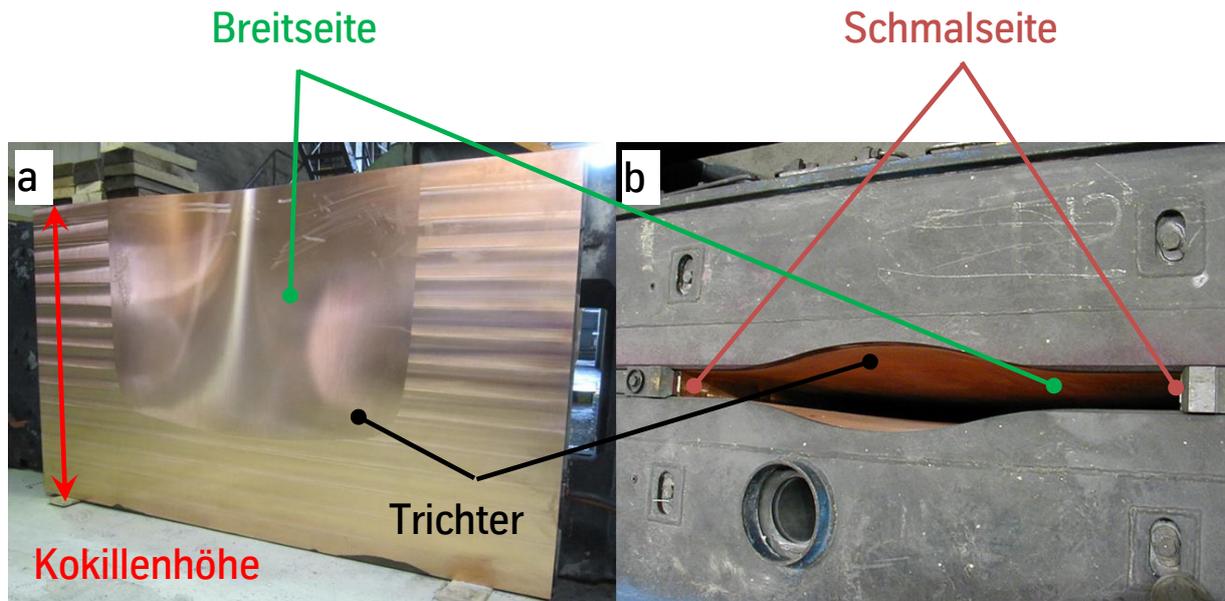


Abbildung 2.2: Breitseiten, Schmalseiten und Kokillenhöhe einer Kupferkokille der Gießwalzanlage: Ausgebaute Platte (a) und Öffnung auf der Kokillenoberseite (b).

Unabhängig von Gießanlagentyp und Gießformat laufen im Allgemeinen in jeder Stranggusskokille die gleichen Prozesse ab. Ebenfalls werden für jeden Gießprozess Medien (bspw. Gießpulver, Gießschlacke oder Abdeckmasse) verwendet, deren Wirkweise und Zusammensetzung ähnlich ist. In **Abbildung 2.3** wird der schematische Aufbau der während des Gießprozesses innerhalb einer Kokille befindlichen Medien dargestellt. Die detaillierte Funktionsweise der Medien wird im weiteren Verlauf genauer betrachtet.

Stand der Technik

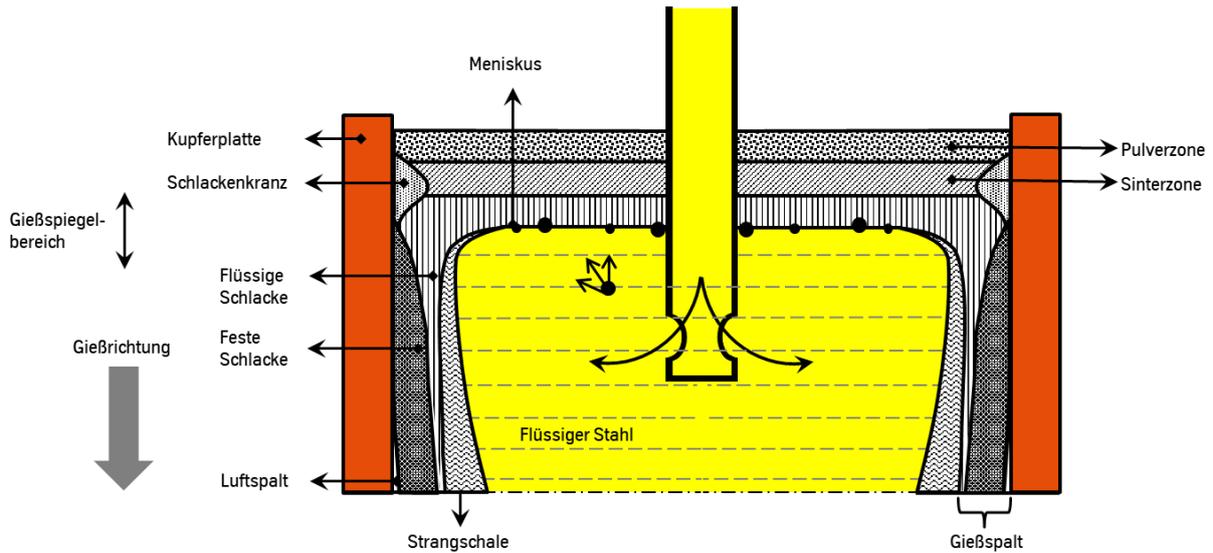


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau einer Kokille während des Gießprozesses (Längsschnitt über Kokillenhöhe) [RUDN15].

Im Gießspiegelbereich wird die Erstarrung des flüssigen Stahls eingeleitet und es erfolgt die Ausbildung einer Strangschale (ausgehend vom Meniskus). Der die Kokille verlassene Stahl wird fortan „Stahlstrang“ oder „Strang“ genannt. Sobald der im Kern noch flüssige Strang die Kokille verlässt, ist die Strangschale stark genug, um dem ferrostatischen Druck des im Kern befindlichen, noch flüssigen Stahls standzuhalten. Der entstandene Strang wird im weiteren Verlauf durch Rollensegmente gestützt und über eine Spritzwasserkühlung so lange gekühlt, bis auch der Kern erstarrt ist. Bei den meisten Anlagentypen, so auch bei denen der thyssenkrupp Steel Europe AG, wird der Stahlstrang währenddessen in die horizontale Ebene umgebogen. Abschließend wird der Stahlstrang in Brammen oder Dünnbrammen aufgeteilt.

Zur Beeinflussung des eigentlichen Erstarrungsprozesses in der Kokille ist die Verwendung eines Gießpulvers entscheidend. Das Gießpulver wird kontinuierlich auf die Oberfläche des flüssigen Stahls, den Gießspiegel aufgegeben, schmilzt aufgrund der thermischen Energie des Stahls auf und bildet eine Gießschlacke. Diese Gießschlacke fließt in den so genannten Gießspalt zwischen der Strangschale und der Kokillenplatte. Ein Teil der Schlacke erstarrt an der Kokillenwand, während der verbleibende Teil der Schlacke bis zum Verlassen der Kokille weitestgehend flüssig bleibt. Durch die Oszillation der Kokille und der damit verbundenen „Hubbewegung“ wird kontinuierlich flüssige Schlacke in den Gießspalt gefördert. Die Hauptaufgaben der Gießschlacke sind vor allem die Beeinflussung der Wärmeabfuhr aus der Kokille,

Stand der Technik

sowie die Bildung eines Schmierfilms zwischen Kokille und Strangschale. Der Schmierfilm dient der Minimierung der Reibung zwischen Stahlstrang und Kokille, welche durch die Hubbewegung induziert wird.

Im unteren Teil der Kokille bewirkt der Erstarrungs- und Abkühlungsschrumpfung des Stahlstranges ein Ablösen der Strangschale von der Kokillenplatte, sodass ein Luftspalt entsteht. Die Gießschlacke, die bisher den Raum zwischen Strangschale und Kokillenplatte gefüllt hat, haftet entweder an der Oberfläche der Strangschale oder löst sich und fällt hinunter.

3 Problemstellung: Bildung von Längsrissen und Schalenfehlern

Die Kontrolle der Erstarrung des Stahls in der Kokille und in der Sekundärkühlung ist eine der größten Herausforderungen im Gießprozess. Das primäre Ziel ist es, den Stahl in der Kokille soweit erstarren zu lassen, dass die Strangschale am Ende der Kokille ausreichend stabil ist, um dem ferrostatischen Druck des flüssigen Stahlkerns Stand zu halten und einen so genannten Durchbruch – also ein Aufreißen der Strangschale – zu vermeiden. In der aus Spritzwasserdüsen bestehenden Sekundärkühlung wird der Stahlstrang soweit abgekühlt, dass auch der Kern des Stranges durcherstarrt und geschnitten werden kann.

Die Primärerstarrung des Stahls und die Entstehung der Strangschale finden in der Kokille statt. Während dieser Erstarrung entstehen hohe Wärmestromdichten und zugleich eine hohe Volatilität des Wärmestroms (vgl. Kapitel 4.2.3), sowohl zeitlich als auch über die Kokillenbreite gesehen. Dies verursacht lokale Inhomogenitäten in der Dicke der erstarrenden Strangschale.

Zugleich entstehen Eigenspannungen in der Strangschale, die durch die Schrumpfung des Stahls im Verlauf des Abkühlvorganges hervorgerufen werden. Die genaue Entstehung der Eigenspannungen wird in Kapitel 4.3 erläutert. Kühlt die mit Eigenspannungen behaftete Strangschale ab, kann diese in Bereichen dünner Strangschalen an der Oberfläche aufreißen. Mit jeder Hubbewegung der Kokille schreitet der entstandene Riss fort, bis dieser auf einen Bereich in der Strangschale trifft, die den Eigenspannungen standhalten kann. Der hierdurch entstehende Fehler wird „Längsriss“ genannt (vgl. **Abbildung 3.1, a**).

Im Kontakt mit der Umgebungsluft beginnt die Oberfläche des Stahlstranges zu verzundern. Generell kann der Zunder beispielsweise in einem Zunderwäscher unter Zuhilfenahme eines Wasserstrahls mit hohem Druck von der Brammenoberfläche entfernt werden. Zunder, der sich in einem Längsriss befindet, kann nicht oder nur sehr schwer entfernt werden und wird dementsprechend im Warmband mit ausgewalzt. In diesem Fall liegt eine mit Zunder gefüllte Materialtrennung des Stahls vor, die im ausgewalzten Warmband zu einem so genannten „Schalenfehler“ (vgl. **Abbildung**

Problemstellung: Bildung von Längsrissen und Schalenfehlern

3.1, **b**) wird. Dieser Fehler kann durch Kerbwirkung zu vorzeitigem Bauteilversagen und inhomogenen Materialeigenschaften führen oder Beschichtungsprobleme verursachen, so dass Materialabwertung und -ausschuss die Folge sind.

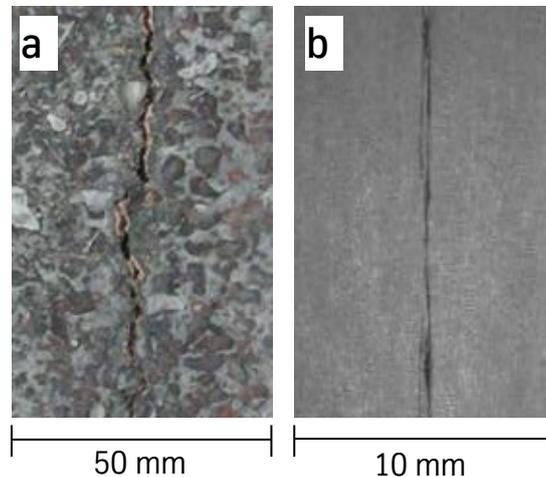


Abbildung 3.1: Längsriss auf einer Brammenoberfläche (a) und Schalenfehler auf dem Warmband (b).

Ein auf konventionell erzeugten Brammen auftretender Längsriss kann durch einen zusätzlichen Prozessschritt, das „Flämmen“ repariert werden. Beim Flämmen wird das längsrissbehaftete Material einer heißen Flamme ausgesetzt und bis zur Risswurzel wieder aufgeschmolzen. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn der Längsriss nur wenige Millimeter tief in das Material hineinragt. Zu tiefe Längsrisse können auch durch dieses Verfahren nicht mehr repariert werden. Aufgrund des gekoppelten Prozesses ist das Flämmen an der GWA nicht möglich. Daher führt ein in der Gießmaschine entstandener Längsriss direkt zu einer Materialabwertung beziehungsweise zu Materialausschuss.

Zur Steigerung der Produktqualität des in der GWA produzierten Stahls ist es unerlässlich, Längsrisse und Schalenfehler zu reduzieren beziehungsweise vollständig zu vermeiden. Um dies zu erreichen, wurde in dieser Arbeit eine Modifikation der Kokillenplattenoberfläche untersucht, mit dem Ziel, den Wärmestrom in der Kokille zu homogenisieren und Eigenspannungen in der Strangschale zu reduzieren.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die in der Kokille vorherrschenden Wärmeströme betrachtet, bevor im Weiteren mögliche Modifikationen der Kokillenoberflächenstruktur vorgestellt werden.

4 Wärmeübertragung in der Stranggusskokille

Die Wärmeströme innerhalb der Kokille basieren auf drei verschiedenen, grundlegenden Formen der Wärmeübertragung. Je nach Bereich in der Kokille sind diese Formen von unterschiedlicher Bedeutung für den Erstarrungsprozess. Die grundlegenden Formen werden zunächst vorgestellt. Anschließend werden die in der Kokille existierenden Wärmeströme genauer erläutert.

4.1 Formen der Wärmeübertragung

Im Allgemeinen existieren nach [KNEE08] drei ideale und grundlegende Formen der Wärmeübertragung, die Konduktion, die Konvektion und die Wärmestrahlung. Je nach Bereich innerhalb der Kokille beeinflussen diese Formen der Wärmeübertragung die dort vorherrschenden Wärmeströme unterschiedlich stark.

4.1.1 Konduktion

Die Konduktion, auch Wärmeleitung genannt, beschreibt den molekularen Wärmetransport in festen, flüssigen und gasförmigen Medien. Sie basiert auf einer Temperaturdifferenz, welche einen Unterschied in der kinetischen Energie zwischen den einzelnen Molekülen eines Materials verursacht. Mathematisch wird die Wärmestromdichte, die durch die Wärmeleitung in einem Körper bezogen auf eine bestimmte Fläche entsteht, für den stationären Fall nach dem Gesetz von Fourier beschrieben [BÖCK06], [KNEE08]:

$$\dot{q} = -\lambda * \left(\frac{d\vartheta}{dx} + \frac{d\vartheta}{dy} + \frac{d\vartheta}{dz} \right) \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

Die Wärmestromdichte, die pro Zeiteinheit und Fläche übertragene Wärmemenge ($[J/(m^2*s)]$ bzw. $[W/m^2]$), ist somit abhängig von der Wärmeleitfähigkeit (λ) des Materials und von den vorherrschenden Temperaturgradienten. Die Wärmeleitfähigkeit ist

grundsätzlich abhängig von der Temperatur. Wird ein Wärmestrom ausschließlich entlang einer Koordinate betrachtet – also eindimensional – und die Wärmeleitfähigkeit für ein bestimmtes Temperaturniveau als konstant angesehen, so kann die Gleichung 4.1 vereinfacht auch wie folgt dargestellt werden [BÖCK06], [KNEE08]:

$$\dot{q} = -\lambda * \frac{d\vartheta}{dz} \quad (\text{Gleichung 4.2})$$

Der absolute Wärmestrom, die pro Zeiteinheit übertragene Wärmemenge ([J/s] bzw. [W]), durch eine ebene Wand der Dicke s innerhalb einer definierten Fläche A kann zudem durch folgenden Zusammenhang beschrieben werden [BÖCK06], [KNEE08]:

$$\dot{Q} = -\frac{\lambda}{s} * A_{Wand} * (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (\text{Gleichung 4.3})$$

Gleichung 4.3 findet häufig Anwendung, wenn die Wärmeströme entlang zweier Koordinatenrichtungen im Vergleich zur dritten Richtung vernachlässigbar klein sind und zudem die Wärmeleitfähigkeit des übertragenden Mediums für den betrachteten Temperaturbereich als konstant angesehen werden kann.

4.1.2 Konvektion

Die Wärmeübertragung zwischen festen Körpern und Fluiden wird als Konvektion bezeichnet. In Theorie und Praxis wird häufig zwischen der „natürlichen“ oder „freien“ Konvektion und der „erzwungenen“ Konvektion unterschieden. Ursache für die freie Konvektion sind Temperaturdifferenzen im Fluid, die zu Dichteunterschieden führen und somit Strömungen verursachen. Die erzwungene Konvektion basiert auf Druckdifferenzen, die beispielweise durch Höhenunterschiede oder Pumpen hervorgerufen werden. Die Konvektion ist die in der Technik am häufigsten vorkommende Wärmeübertragungsart [BÖCK06]. Mathematisch wird die spezifische

Wärmeübertragung in der Stranggusskokille

Wärmestromdichte, die durch Konvektion übertragen wird, durch den nachfolgenden Zusammenhang definiert [KNEE08]:

$$\dot{q} = \alpha * (\vartheta_{Fluid} - \vartheta_{Körper}) \quad (\text{Gleichung 4.4})$$

Die Wärmeübergangszahl α (engl. heat transfer coefficient) gibt hierbei an, welcher Wärmestrom pro Flächeneinheit und in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz übertragen wird. Ihre Einheit ist $W/(m^2K)$ [BÖCK06]. Beim Gießprozess ist im Allgemeinen die Konvektion die dominierende Wärmeübertragungsform. Sie findet vor allem im Meniskusbereich, im flüssigen Kern des Stahlstranges und im Kühlwasser statt. Für die Wärmeübertragung durch feste Schlackenschichten ist die Konvektion von untergeordneter Bedeutung.

4.1.3 Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung oder auch nur „Strahlung“ genannt ist eine weitere Form der Wärmeübertragung. Ein Übertragungsmedium ist im Gegensatz zur Konvektion oder Wärmeleitung nicht notwendig. Die Wärmestrahlung basiert auf elektromagnetischen Wellen. Die Wellen werden beim Auftreffen auf einen Körper von diesem, je nach seinen Eigenschaften, absorbiert, transferiert oder reflektiert. Wird der absorbierte Anteil (Absorptionsverhältnis) mit $\acute{\alpha}$, der transferierte Anteil mit τ und der reflektierte Anteil mit ρ bezeichnet, gilt immer [BÖCK06]:

$$\acute{\alpha} + \tau + \rho = 1 \quad (\text{Gleichung 4.5})$$

Das Kirchhoff'sche Gesetz sagt zudem aus, dass das Emissionsverhältnis ε gleich seinem Absorptionsverhältnis $\acute{\alpha}$ ist. Des Weiteren gilt für die Körperoberflächen [BÖCK06]:

Wärmeübertragung in der Stranggusskokille

Schwarzer Körper:	Alle auftreffenden Strahlen werden absorbiert ($\alpha = \varepsilon = 1$)
Weißer/spiegelnder Körper:	Alle Strahlen werden reflektiert ($\rho = 1$)
Grauer/farbiger Körper:	Die auftreffenden Strahlen werden teilweise absorbiert, transmittiert, und/oder reflektiert.

Die durch Strahlung verursachte Wärmestromdichte kann im Allgemeinen mit Hilfe der Stefan-Boltzmann-Konstante σ berechnet werden [BÖCK06]:

$$\dot{q} = \sigma * \vartheta^4 \quad (\text{Gleichung 4.6})$$

mit $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{(m^2 * K^4)}$ (Stefan-Boltzmann-Konstante)

Für reale Körper wird Gleichung 4.6 häufig mit dem Emissionsgrad korrigiert, sodass in technischen Fragestellungen für die Berechnung der durch Strahlung verursachten Wärmestromdichte Gleichung 4.7 angewandt wird.

$$\dot{q} = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (\text{Gleichung 4.7})$$

In realen technischen Problemen tritt häufig eine Mischform aus Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion auf. Die verschiedenen Formen der Wärmeübertragung liegen je nach Anwendungsfall unterschiedlich stark vor. Im nächsten Schritt erfolgt eine Betrachtung der in der Kokille vorherrschenden Wärmeströme.

4.2 Beschreibung der in der Kokille existierenden Wärmeströme

Im Folgenden werden die in der Kokille dominierenden Wärmeströme näher beschrieben. Eine schematische Übersicht der primär in der Kokille vorherrschenden Wärmeströme ist in **Abbildung 4.1** zu erkennen. Hierbei entsprechen die einzelnen Wärmeströme \dot{Q}_i denen über das jeweilige Medium zu- oder abgeführten absoluten Wärmeströmen.

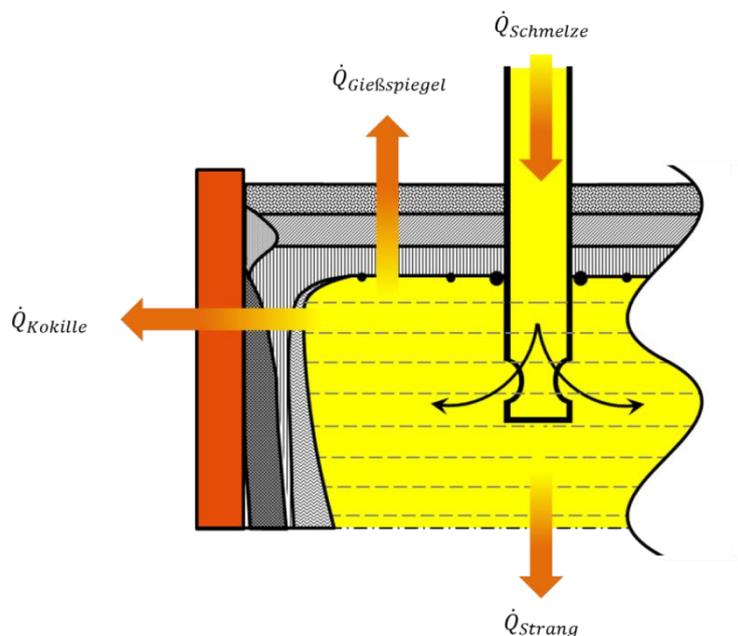


Abbildung 4.1: Schema der primär in der Kokille existierenden Wärmeströme

Über das Tauchrohr wird der Kokille mit der einströmenden Schmelze kontinuierlich Wärme ($\dot{Q}_{Schmelze}$) zugeführt. Der daraus resultierende Wärmestrom ist proportional zum Massenstrom, der durch das Tauchrohr strömt, sowie zur Eintrittstemperatur der Schmelze. Des Weiteren nimmt die spezifische Wärmekapazität des Stahls Einfluss auf die durch den ein- und austretenden Stahl zugeführten und abgeführten Wärmeströme ($\dot{Q}_{Schmelze}$ und \dot{Q}_{Strang}). Die Wärmekapazität ist abhängig von der Temperatur und der chemischen Zusammensetzung der Schmelze. Die Strangschale muss am Kokillenaustritt ausreichend stabil sein, um dem von innen auf sie einwirkenden ferrostatischen Druck widerstehen zu können und nicht aufzureißen. Es muss dabei

beachtet werden, dass zusätzlich zu der in die Kokille eingetragenen Wärmeenergie der Schmelze auch die durch die Erstarrung freigesetzte Wärmeenergie abtransportiert wird. Im Vergleich zum Wärmeaustausch zwischen Stahlschmelze und Kokille ist der Wärmeaustausch zwischen Tauchrohr und Stahlschmelze im stationären Fall sehr gering. Daher kann dieser vernachlässigt werden.

Der Abtransport der Wärme aus der Kokille erfolgt in drei Richtungen (vgl. **Abbildung 4.1**):

- 1.) Der Wärmestrom durch die untere Kokillenöffnung aufgrund des Abtransports des Stahlstranges (\dot{Q}_{Strang}) wird analog zum Wärmestrom der in die Kokille eintretenden Schmelze bestimmt. Er definiert sich ebenfalls über Massenstrom, Temperatur und Wärmekapazität des Stahlstranges.
- 2.) Zudem existiert ein Wärmestrom durch die obere Kokillenöffnung hinaus über die Schlacken- und Sinterschichten im Bereich des Gießspiegels ($\dot{Q}_{Gießspiegel}$). Die Schmelze verliert an Energie durch Abgabe von Wärme an die darüber liegenden Schlacke- und Sinterschichten ($\dot{Q}_{Gießspiegel}$). Die Wärme wird durch die einzelnen Schichten über Strahlung, Konvektion und Leitung aus der oberen Öffnung der Kokille hinaus an die Umgebung übertragen. Gleichzeitig wird durch die abfließende Gießschlacke Wärme aus der Kokille abgeführt.
- 3.) Der Wärmestrom über die mit Wasser gekühlten Kokillenplatten durch die Schlackenschichten und die Strangschale hindurch ($\dot{Q}_{Kokille}$) setzt sich aus einer Kombination aus Strahlung, Konvektion und Leitung zusammen.

Über die Wärmeströme an der oberen und unteren Kokillenöffnung wird die Wärme in vertikaler Richtung aus der Kokille hinausgetragen [ECKH16]. Die Wärmeabfuhr in horizontaler Richtung wird durch die gekühlten Kokillenplatten ($\dot{Q}_{Kokille}$) realisiert.

Die Wärmebilanz innerhalb einer Kokille kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden. Zum einen wirken sich prozesstechnische Parameter wie beispielsweise

- Gießgeschwindigkeit,
- Gießformat,
- Konizität der Kokillenplatten,
- Oszillationsfrequenz,

Wärmeübertragung in der Stranggusskokille

- Überhitzung der Schmelze,
- Kokillenkühlwassertemperatur,
- Kühlwassermassenstrom

auf die Wärmebilanz aus [BEYE06], [SCHW06], [ZHIQ16]. Zum anderen existiert ein Wechselspiel zwischen den in der Kokille vorherrschenden Wärmeströmen und den physikalischen Gegebenheiten (beispielsweise „lokale Strangschalendicke“) der jeweiligen Stahlschmelze. Besonders im Bereich des Gießspiegels muss ein Großteil der Wärme von den Kokillenplatten abgeführt werden (vgl. **Abbildung 4.2**).

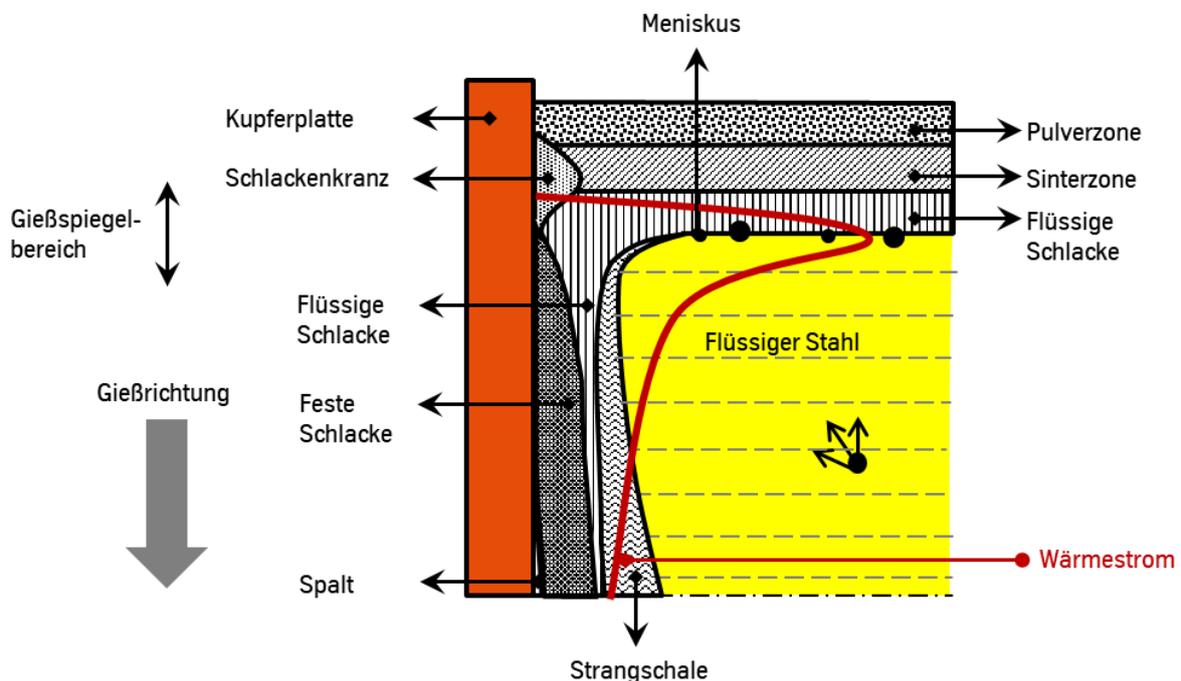


Abbildung 4.2: Ausbildung des durch die Kokillenwand abgeführten Wärmestroms innerhalb von Stranggusskokillen über die Kokillenhöhe (Schema).

Dies führt zu einer Inhomogenität des abgeführten Wärmestroms, betrachtet über die Kokillenhöhe. Zeitgleich existiert aufgrund anderer Faktoren (wie z.B. das Strömungsverhalten der Schmelze) auch eine Inhomogenität über die Kokillenbreite. Weiterhin wird die in der Kokille vorherrschende Inhomogenität des Wärmestroms zusätzlich durch lokale sowie auch durch zeitlich befristete Effekte verstärkt. Diese werden nun in den nachfolgenden Absätzen näher erläutert.

4.2.1 Inhomogenität im Wärmestrom über die Kokillenhöhe

Der in **Abbildung 4.2** dargestellte Wärmestrom zeigt ein deutliches Maximum im Bereich des Gießspiegels. Ursächlich für dieses Maximum ist das hohe Angebot an Wärme bei gleichzeitig dünnen Schlackenschichten sowie einer dünnen Strangschale und den daraus resultierenden geringen Wärmewiderständen.

Ein wesentlicher Widerstand für den Wärmestrom ist die sich ausbildende Strangschale. Die Dicke der Strangschale kann unterhalb der Kokille bereits mehrere Zentimeter betragen. Da die Erstarrung im Bereich des Gießspiegels beginnt, ist die Strangschale dort nur wenig ausgebildet. Somit stellt dort die Strangschale keinen Widerstand gegenüber dem abzuführenden Wärmestrom dar. Die Wärme wird überwiegend durch Strahlung übertragen.

Sobald ein Körper erstarrt, wird zudem Erstarrungsenthalpie freigesetzt [BARD41], die zusätzlich zur Wärme der in die Kokille eindringenden Schmelze abgeführt werden muss. Seitens der Schmelze wirken im Gießspiegelbereich keine, beziehungsweise nur geringe Wärmewiderstände bei gleichzeitig durch die Erstarrungsenthalpie erhöhtem Wärmeeintrag.

Die amorphe und vor allem die kristalline Schlackenschicht wirken als Widerstand gegenüber dem abzuführenden Wärmestrom [MILL05]. Diese Schlackenschichten sind im Bereich des Gießspiegels nur im geringen Maße ausgebildet. Die Schlacke ist in diesem Bereich überwiegend flüssig. Die flüssige Schlackenschicht stellt analog zur Strangschale keinen nennenswerten Widerstand gegenüber dem Wärmestrom dar. Somit kann die Wärme im Vergleich zu Bereichen unterhalb des Gießspiegels ohne größere Widerstände abfließen.

Im unteren Teil der Kokille kühlt der Stahlstrang innerhalb der Kokille weiter ab und zieht sich aufgrund der Volumenkontraktion zusammen [ECKH16]. Diese Schrumpfung sorgt dafür, dass sich die Strangschale im unteren Bereich der Kokille von der Kokillenwand ablöst. Um der Schrumpfung entgegen zu wirken, werden für die Kokillenplatten Konizitäten vorgegeben. Diese helfen, den Einfluss der Volumenkontraktion zu verringern, jedoch nicht gänzlich aufzuheben. Vor allem lokale Volumenkontraktionen können durch die vorgegebene Konizität nur teilweise kompensiert werden.

In Kokillen konventioneller Stranggussanlagen können im Bereich des Gießspiegels Wärmestromdichten von ca. 1-2 MW/m² auftreten [MAHA91], [SCHW06]. Bei Dünnbrammenanlagen nach dem TSC - Prinzip erreicht die Wärmestromdichte aufgrund der hohen Gießgeschwindigkeiten Spitzen von ca. 6-8 MW/m² [GIRG02]. Je größer der im Gießspiegelbereich abzuführende Wärmestrom ist, desto größer ist der Unterschied im Wärmestrom über die Kokillenhöhe und desto größer ist das Potenzial für die Bildung von Eigenspannungen. Daher liegt der Fokus in dieser Arbeit auf der Vermeidung hoher Wärmestromspitzen in Dünnbrammenanlagen.

4.2.2 Inhomogenität im Wärmestrom über die Kokillenbreite

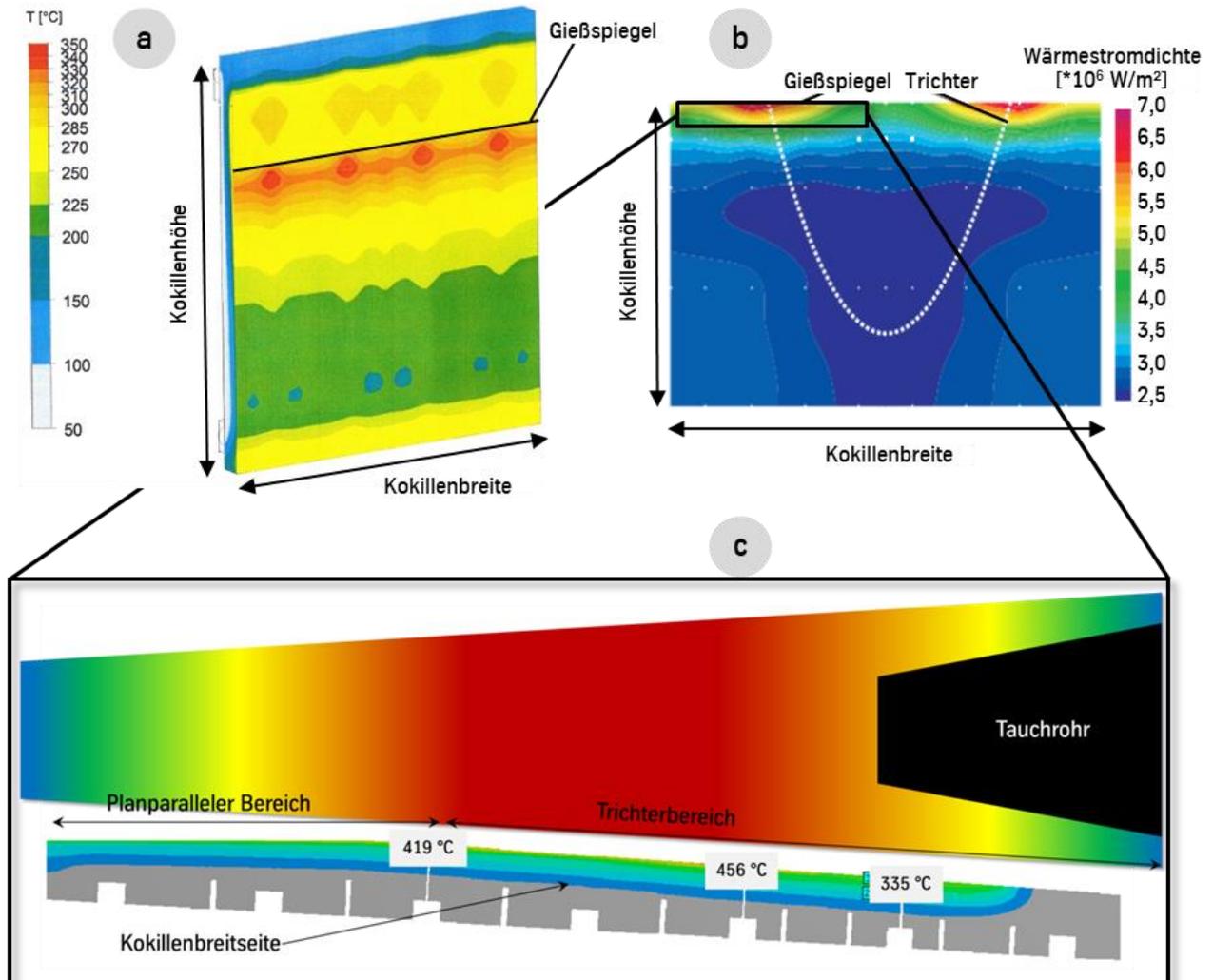
Der Wärmestrom variiert auch über die Kokillenbreite. Dies ist darauf zurückzuführen, dass kontinuierlich neue, heiße Schmelze entlang der Tauchrohrströmung in die Kokille eingebracht wird. Dadurch entstehen Bereiche flüssiger Schmelze, die auf einem höheren Temperaturniveau liegen als ihre Umgebung. Da die Temperaturdifferenz gemäß Gleichung 4.2 ausschlaggebend für den Wärmestrom ist, führen die unterschiedlichen Temperaturniveaus auch zu unterschiedlichen Wärmeströmen.

In Kombination mit der Strömung der Schmelze nimmt insbesondere bei Dünnbrammenanlagen nach dem TSC - Prinzip auch die Kokillenplattengeometrie Einfluss auf den Wärmestrom. Bedingt durch die Prozesstechnik und die Geometrie existiert bei Trichterkokillen auf Höhe des Gießspiegels ein Übergang zwischen der planparallelen Fläche und dem Trichter [SUCK01]. Aufgrund der Strömungsverhältnisse in der Trichterkokille und der auf Höhe der Trichterkanten einströmenden neuen, heißen Schmelze entstehen an dieser Stelle die höchsten Temperaturen im Stahlstrang. Zusätzlich liegt der Stahlstrang im planparallelen Teil der Kokille und in den Übergängen zum Trichter besser an der Kokillenwand an, als vergleichsweise in der Trichtermitte. Daher entstehen an den Trichterübergängen „Wärmestrom - Hotspots“ (vgl. **Abbildung 4.3, Grafik b/c**).

Lokal betrachtet existieren über die Kokillenbreite zudem Bereiche, in denen sich der abzuführende Wärmestrom aufgrund der Kokillenplattengeometrie besonders hoch ausbildet. **Abbildung 4.3, Grafik a** zeigt die sich in diesem Falle aufgrund des Wärmestroms einstellenden Kokillenplattenoberflächentemperaturen. Die sich bildenden

Wärmeübertragung in der Stranggusskokille

„Hot-Spots“ über die Kokillenbreite sind deutlich erkennbar. Ursachen für die Inhomogenität kann in diesem Falle eine lokal unterschiedliche Kupferplattendicke aufgrund von beispielsweise Befestigungsbolzen, Kühlkanälen oder Thermoelementbohrungen sein.



Draufsicht auf den in (b) ausgeschnittenen Bereich

Abbildung 4.3: Temperatur- und Wärmestrominhomogenität über die Kokillenbreite (gemessen circa 15mm unterhalb der Kokillenoberfläche auf Höhe des Gießspiegels: Effekte aufgrund von Kokillenplatteneinbauten (a). Effekte aufgrund der Trichtergeometrie bei TSC-Anlagen (b bzw. c).

Des Weiteren beginnt die Erstarrung des Stahls von den Schmalseiten einer Kokille her in Richtung des Tauchrohres. Im Bereich der Schmalseite und somit auch der

Strangkante wird der Strang von drei Seiten (zwei Kokillenbreitseiten und eine Kokillenschmalseite) gekühlt. Daher herrscht hier eine hohe Kühlleistung vor und der Stahlstrang ist an den Kanten kälter als in der Strangmitte.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass neben der Wärmestromdifferenz über die Kokillenhöhe auch eine Inhomogenität des Wärmestroms über die Kokillenbreite vorherrscht. Dies kann physikalische, prozessbedingte oder geometrische Ursachen haben. Je dünner die Kokillenplatte ist, desto stärker ist der Einfluss dieser Unterschiede auf den Wärmehaushalt der Kokille und somit auf die Bildung der Strangschale.

4.2.3 Inhomogenität im Wärmestrom durch lokale, sich temporär verändernde Einflüsse

Neben den in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 beschriebenen Effekten, die meist dauerhaft und über die gesamte Kokille wirken, finden auch Prozesse statt, die den Wärmestrom nur sehr lokal beeinflussen und zudem zeitlich variabel sind. Um diese genauer zu beschreiben, wird im Folgenden die Wärmestromverteilung in einer TSC-Kokille über die Kokillenhöhe und Kokillenbreite detaillierter betrachtet (vgl. **Abbildung 4.4**).

Zusätzlich zu den makroskopischen Unterschieden existieren feine, lokale Unterschiede im Wärmestrom (in der Größenordnung weniger Quadratmillimeter). Diese Unterschiede sind zeit- sowie ortsabhängig und führen zu einer hohen Volatilität im Wärmestrom (vgl. **Abbildung 4.4**). Besonders im Bereich des Gießspiegels ist die Volatilität extrem hoch. Hier liegt der Stahlstrang an der Kokillenplatte an, die Temperaturdifferenz zwischen heißer Stahlschmelze und Kokillenplatte ist hoch und die Strangschale noch sehr dünn. Weiter unten in der Kokille sind die Auswirkungen der Volatilität aufgrund der dickeren Strangschale, der Kontraktion des Stahlstranges sowie dem damit verbundenen Abheben der Strangschale von der Kokillenplatte, geringer.

Wärmeübertragung in der Stranggusskokille

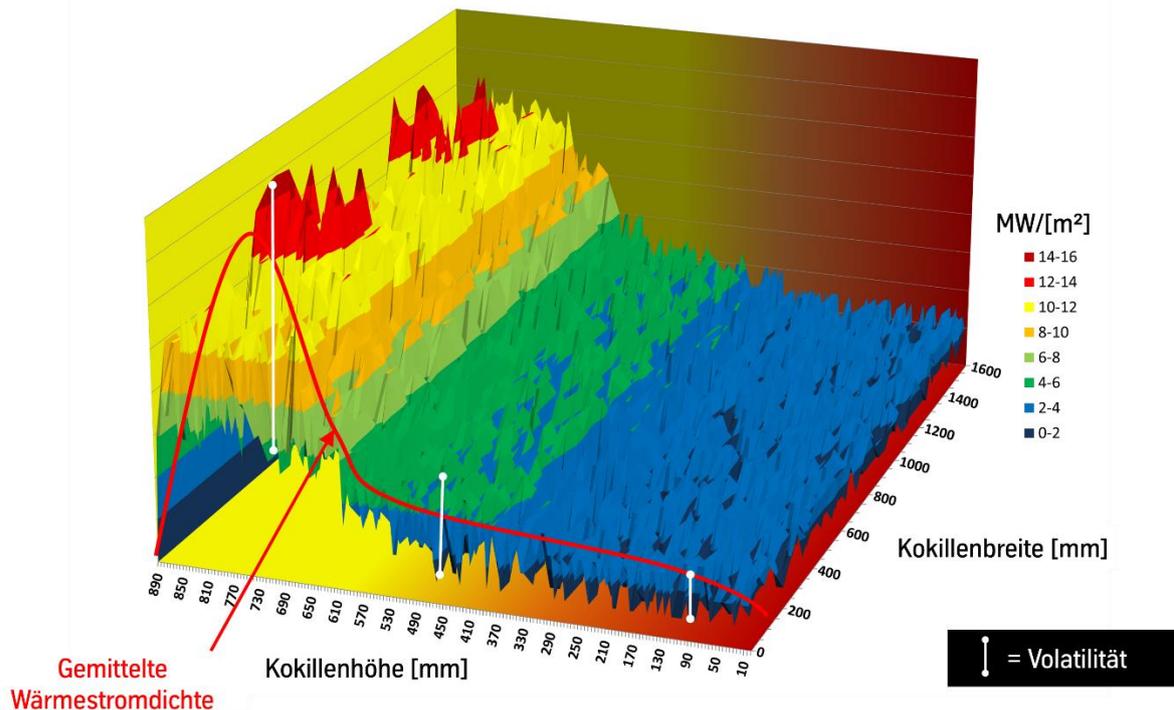


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Verteilung der Wärmestromdichte über Kokillenhöhe und -breite.

Generell sind die Ursachen für die Volatilität vielfältig. Ein Grund für die Volatilität ist beispielsweise die Primärerstarrung der Strangschale aus der Schmelze heraus. Diese beginnt nicht zeitgleich an jedem Ort der Kokille. Vielmehr wird die Erstarrung an vielen einzelnen Punkten initiiert und breitet sich entlang der Kokillenplatte aus. Allein bedingt durch dieses Phänomen bildet sich über die Kokillenbreite und -höhe eine lokal unterschiedlich dicke Strangschale aus.

Des Weiteren verhält sich das System Kokille / Schmelze instationär. Heiße Schmelze wird kontinuierlich der Kokille zugeführt und strömt an der Innenseite der Strangschale entlang. Dies kann lokal zu einem Wiederaufschmelzen der Dendritenspitzen der Strangschale führen und das Strangschalenwachstum beeinflussen.

Neben der Beeinflussung der Erstarrung der Strangschale aus dem Stranginneren heraus werden die Erstarrung, die Strangschalendicke und der resultierende lokale Wärmestrom auch von außen beeinflusst. Maßgeblich für den lokalen Wärmestrom sind die lokale Dicke des Schlackenfilms und die Eigenschaften der sich jeweils bildenden einzelnen Schlackenschichten.

Durch die Oszillation der Kokille wird kontinuierlich Schlacke in den Gießspalt eingesogen. Die Dicke des Schlackenfilms ändert sich jedoch zeitlich und örtlich innerhalb der Oszillation. Diese Änderung beeinflusst den Wärmewiderstand der Schlackenschicht gemäß Gleichung 4.3 und somit den lokalen Wärmestrom durch die Schlackenschicht sowie schlussendlich die Erstarrung der Strangschale. Hierdurch wird die Volatilität zwischen den lokalen Wärmeströmen gefördert. Zudem verhält sich die Primärerstarrung der Schlacke ähnlich dem Erstarrungsverhalten der Schmelze und tritt demnach nicht zeitgleich an jedem Ort der Kokille in vergleichbarem Maße auf.

Die Hauptaufgabe des Gießpulvers beziehungsweise der Gießschlacke ist es, die Wärmeabfuhr über die Kokillenplatten (vgl. Abbildung 4.1, $\dot{Q}_{Kokille}$) zu steuern sowie positiv auf den Wärmehaushalt in der Kokille einzuwirken. Des Weiteren wird durch die Gießschlacke ein Film zwischen oszillierender Kokille und dem Stahlstrang gebildet, um eine ausreichende Schmierung zu gewährleisten.

Im Wesentlichen wird der Wärmestrom, der sich von der Strangschale durch die Gießschlacke in die Kupferplatte ausbildet, über das Zusammenspiel von amorphen und kristallinen Schlackenschichten reguliert. Die Erstarrung der flüssigen Schlackenschicht zu festen amorphen und kristallinen Schlackenschichten beginnt im Bereich des Gießspiegels. Beide Erstarrungsformen – amorph und kristallin – wirken unterschiedlich stark als Wärmestromwiderstände [ECKH16].

Die amorphe Struktur ist lose angeordnet und somit licht- und strahlungsdurchlässig [SCHW06]. Demnach wird in der amorphen Schlackenschicht ein hoher Anteil der Wärme über Strahlung transmittiert. Je höher der Siliziumdioxidanteil in der Schlackenschicht ist, desto stärker bildet sich die amorphe Schlackenschicht aus.

Eine kristalline Schlackenschicht hingegen fungiert als Widerstand für die Wärmestrahlung, sodass der Anteil der Wärmestrahlung im Wärmestrom gehemmt wird. Die konvektiven und konduktiven Anteile des Wärmestroms werden durch die kristalline Schlackenschicht nur geringfügig beeinflusst. Die mineralogische Phase „Cuspidin“ (chemische Formel $\text{Ca}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{F}_2$) ist eine der Hauptphasen der kristallinen Schlackenschicht und somit für eine Reduktion des Wärmestroms mitverantwortlich, da die Strahlungsanteile im Wärmestrom durch die kristalline Schlackenschicht reduziert werden [ECKH16]. Zusätzlich besitzt die kristalline Schlackenschicht

gegenüber der amorphen Schlackenschicht einen größeren Wärmewiderstand. Insofern ist die Bildung von Cuspidin ein geeignetes Mittel zur Reduktion der Wärmestromspitze im Gießspiegelbereich.

Ein zu hoher Cuspidinanteil in der Schlackenschicht beeinflusst jedoch die Viskosität und die daraus resultierenden Schmiereigenschaften der Gießschlacke negativ [SPIE17]. Gleichzeitig kann nicht sichergestellt werden, dass sich Cuspidin lokal nur dort bildet, wo eine Reduktion des Wärmestroms gewünscht ist. Schlechte Schmiereigenschaften und ein globaler Eingriff in den Wärmehaushalt der Kokille können zu Beeinträchtigungen der Oberflächenqualität bis hin zum Aufreißen der Strangschale führen. Daher ist es enorm wichtig, die Arbeitspunkte der Gießpulver so einzustellen, dass Schmierung und Wärmeabfuhr berücksichtigt werden.

Eine Steuerung des Wärmestroms über Kokillenhöhe und -breite kann mit konventionellen Mitteln somit nur in Grenzen erfolgen. Eine gezielte Beeinflussung eines lokalen Wärmestroms und der Volatilität ist ohne weitere Maßnahmen nicht möglich. Gerade im Gießspiegelbereich ist aufgrund der hohen Wärmeströme, der hohen Volatilität und der noch dünnen Strangschale das Potenzial zur Entstehung von Rissen in der Strangschalenoberfläche besonders hoch. Diese Risse können im Warmband zu Schalenfehlern führen. Um die Anzahl der Schalenfehler zu reduzieren, soll vor allem der während der Erstarrung im Bereich des Meniskus entstehende Wärmestrom so beeinflusst werden, dass die lokal abgeführte Wärme und die Volatilität im Wärmestrom reduziert werden. In Kapitel 4.3 werden die Konsequenzen einer zu hohen Wärmeabfuhr auf die Ausbildung der Strangschale in der Kokille beschrieben.

4.3 Auswirkungen hoher und inhomogener Wärmestromdichten auf die Oberflächenqualität der Strangschale

Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, können Eigenspannungen in der Strangschale zu Oberflächenfehlern führen. Fehler dieser Art äußern sich in der Regel in einem Längsriss in der Bramme, der im Warmband zu einem Schalenfehler ausgewalzt wird. Oft entstehen Längsrisse auch aufgrund der Tatsache, dass die eingestellte Konizität der

Kokillenschmalseiten und das Schrumpfen des Stahlstranges nicht miteinander harmonieren [ECKH16]. Diese Art der Längsrisse ist häufig eine Folge von nicht passender Konizität und wird meist von Strang- und Strangschalendepressionen begleitet. Daher soll dieser Fehlertyp in der hier vorliegenden Arbeit nicht betrachtet werden. Vielmehr werden hier die Längsrisstypen thematisiert, die aufgrund inhomogener Wärmeabfuhr in der Kokille entstehen. Diese Art der Längsrisse tritt meist ohne Strang- oder Strangschalendepressionen auf. Der hier betrachtete Längsrisstyp ist klein und regellos über die Brammenbreite verteilt.

Eine Ursache für Längsrisse können ungünstige Spannungszustände sein, die durch die Erstarrung des Stahls in der Kokille ausgebildet werden (vgl. Kapitel 3). Diese Spannungszustände können in der Kokille oder in der Sekundärkühlung aufgrund der Beaufschlagung der Brammenoberfläche mit Wasser zu einem Aufreißen der Brammenoberfläche führen. Eine unregelmäßige Wärmeabfuhr aus der Kokille und somit auch aus der Strangschale führt zu Ungängen in der Strangschale, die dann den erstarrungsbedingten Eigenspannungen nur schwer standhalten kann.

Im Gießspiegelbereich laufen zwei Vorgänge ab, die final die hier betrachteten Längsrisse auf der Brammenoberfläche hervorrufen können. Zum einen existieren im Gießspiegelbereich kurz nach Beginn der Erstarrung hohe Temperaturen bei gleichzeitig dünner und somit verletzlicher Strangschale. Zum anderen strömt zeitgleich durch das Tauchrohr kontinuierlich frische Schmelze in die Kokille, mit der auch neue Wärme in Richtung der Kokillenwand und somit in Richtung der Strangschale getragen wird. Auch diese Wärmeströme variieren zeitlich und örtlich.

In Abhängigkeit verschiedener Parameter (bspw. chemische Zusammensetzung des Stahls, abgeführter Wärmestrom, usw.) stellen sich unterschiedliche Erstarrungsformen ein [KURZ84]. Eine dieser Erstarrungsformen ist das Dendritenwachstum von der Oberfläche ins Körperinnere hinein [SAHM99]. Je höher die lokal vorherrschende Temperatur ist, desto stärker wird das Dendritenwachstum gehemmt. Somit nimmt ein variierender Wärmestrom aus dem Inneren des Stahlstranges heraus direkt Einfluss auf die Erstarrung. Gleichzeitig wird bei hoher Erstarrungsgeschwindigkeit viel Energie in Form von Wärme freigesetzt [BAEH16], [SEID15]. Es entstehen innerhalb der Schmelze nahe der Strangschale Bereiche hoher und niedriger Wärmeniveaus. Bereiche auf hohem Wärmeniveau verzögern durch die dort freiwerdende

latente Wärme die Erstarrung stärker als Bereiche auf weniger hohem Wärmeniveau. Somit wachsen die Dendriten lokal und zeitlich unterschiedlich schnell. Bei Fortschreiten der Erstarrung werden kleinere Dendriten von größeren verdrängt oder sogar wieder aufgeschmolzen. In Bereichen wo sich nicht nur einzelne, sondern gleich mehrere Dendriten zurückbilden, kann eine lokal dünnere Strangschale und daraus folgend eine potenzielle Schwachstelle entstehen.

Durch die in dieser Arbeit behandelte Kokillenmodifikation (vgl. Kapitel 5.3) soll unter anderem eine Homogenisierung des Wärmestroms vorgenommen werden, die auch die soeben beschriebene Erstarrung auf der Innenseite der Strangschale beeinflusst. Vor allem nimmt die Modifikation jedoch eher Einfluss auf die Inhomogenität in der Wärmeübertragung, die an der äußeren Strangschale auftritt. Wie die Erstarrung an der Außenseite der Strangschale beeinflusst wird und wie hierdurch Eigenspannungen auftreten, wird im folgenden Absatz beschrieben.

Neben den Einflüssen, die während der Erstarrung auf die innere Strangschale einwirken, wird das Strangschalenwachstum auch von der Außenseite der Strangschale her beeinflusst. Durch die in Kapitel 4.2 beschriebenen Widerstände entstehen „Spitzen“ und „Senken“ im Wärmestrom, die Einfluss auf das Strangschalenwachstum nehmen. Die Erstarrung des Stahls beginnt nach Unterschreiten der Liquidustemperatur und endet mit Erreichen der Solidustemperatur. Die Erstarrung kann nach dem Erstarrungsgesetz („Wurzel-t-Gesetz“) beschrieben [GUDE02] werden:

$$D = K * \sqrt{t} \quad \text{(Gleichung 4.8)}$$

mit D = Strangschalendicke [mm]

K = Erstarrungskonstante [$1/\text{mm}^{0.5}$]

t = Erstarrungszeit [s]

In der Erstarrungskonstanten K sind das Wärmediffusionsvermögen, die Temperaturdifferenz zwischen gekühlter und aufgeheizter Kokillenwand, die Dichte des Gießmetalls und die Erstarrungswärme zusammengefasst [GUDE02]. Die Erstarrungskonstante ist bei genauerer Betrachtung also keine Konstante, sondern ein Faktor, der empirisch ermittelt wird. Beispielsweise wird in Erstarrungsversuchen die Schichtdicke des erstarrten Materials zu einem vorgegebenen Zeitpunkt bestimmt. Anschließend kann gemäß Gleichung 4.8 die Erstarrungskonstante für den vorliegenden Fall

Wärmeübertragung in der Stranggusskokille

berechnet werden [SUZU04]. Typischerweise variieren die Werte für die Erstarrungskonstanten zwischen $18,4/\text{mm}^{0,5}$ und $38/\text{mm}^{0,5}$ [HANA09]. Je nach lokal vorherrschenden Erstarrungsbedingungen ergeben sich demnach lokal unterschiedliche Erstarrungskonstanten, wodurch gemäß Gleichung 4.8 lokal die Strangschalendicke variiert.

Rein physikalisch ist die Temperaturdifferenz zwischen der Schmelze und der Kokille die wesentliche Triebkraft für die Initiierung der Erstarrung und für die sich einstellende Erstarrungsgeschwindigkeit der Strangschale. Eine Variation im Wärmestrom führt somit dazu, dass die Strangschale zeitlich und örtlich unterschiedlich stark wächst. Ursachen können beispielsweise das Anlegeverhalten des Stahlstranges im Trichter, oder unregelmäßig dicke Schlackenschichten sein (vgl. Kapitel 4.2 und **Abbildung 4.5**).

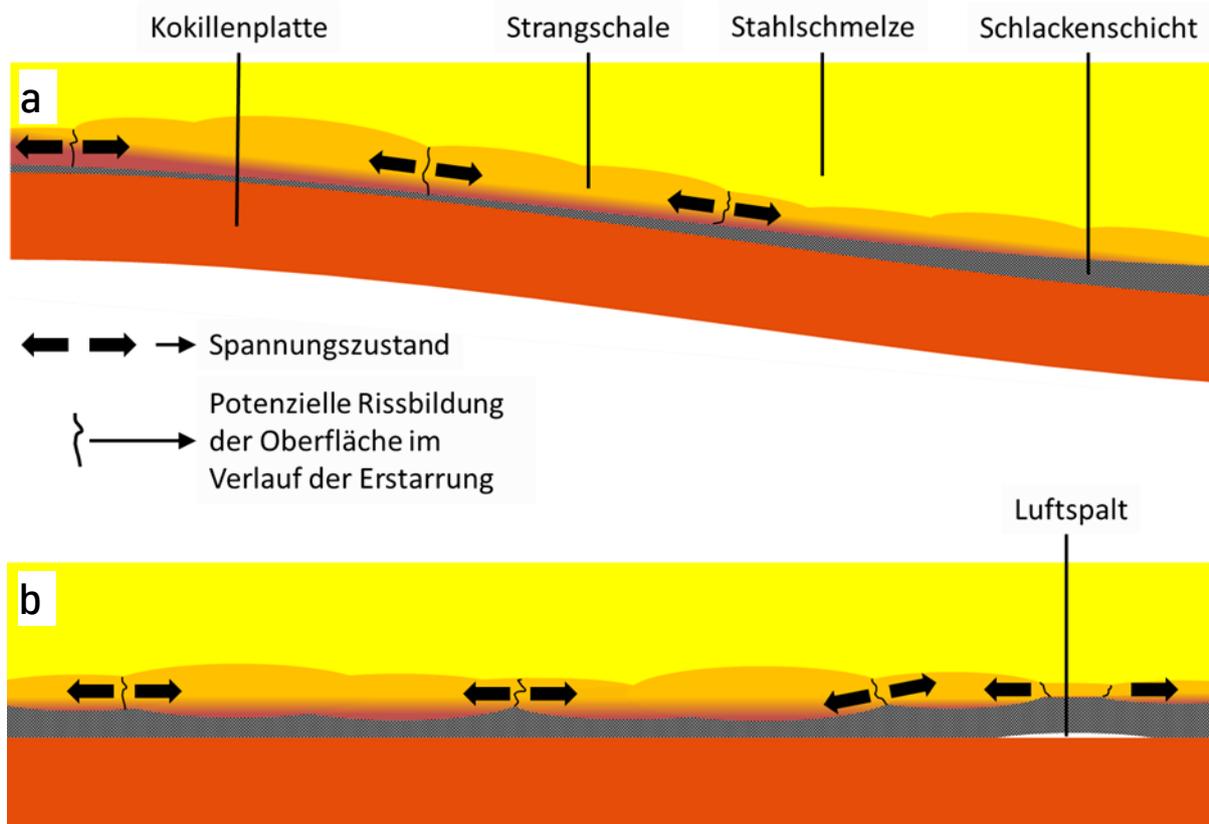


Abbildung 4.5: Beispiele für potenzielle Fehlerursachen einer Längsrissbildung. Abbildung 4.5a: Längsrissbildung aufgrund des Anlegeverhaltens im Trichterbereich von TSC-Kokillen. Abbildung 4.5b: Längsrissbildung aufgrund inhomogener Strangschalendicke hervorgerufen durch Unregelmäßigkeiten in der Schlackenschicht.

Wärmeübertragung in der Stranggusskokille

Der Verlauf der Fehlerentstehung während der Erstarrung ist **Abbildung 4.6** zu entnehmen. Es bildet sich eine lokal unterschiedliche Strangschale aus, die sich aus dickeren Bereichen (vgl. **Abbildung 4.6**, „(A)“) beziehungsweise aus dünneren Bereichen (vgl. **Abbildung 4.6**, „(B)“) zusammensetzt.

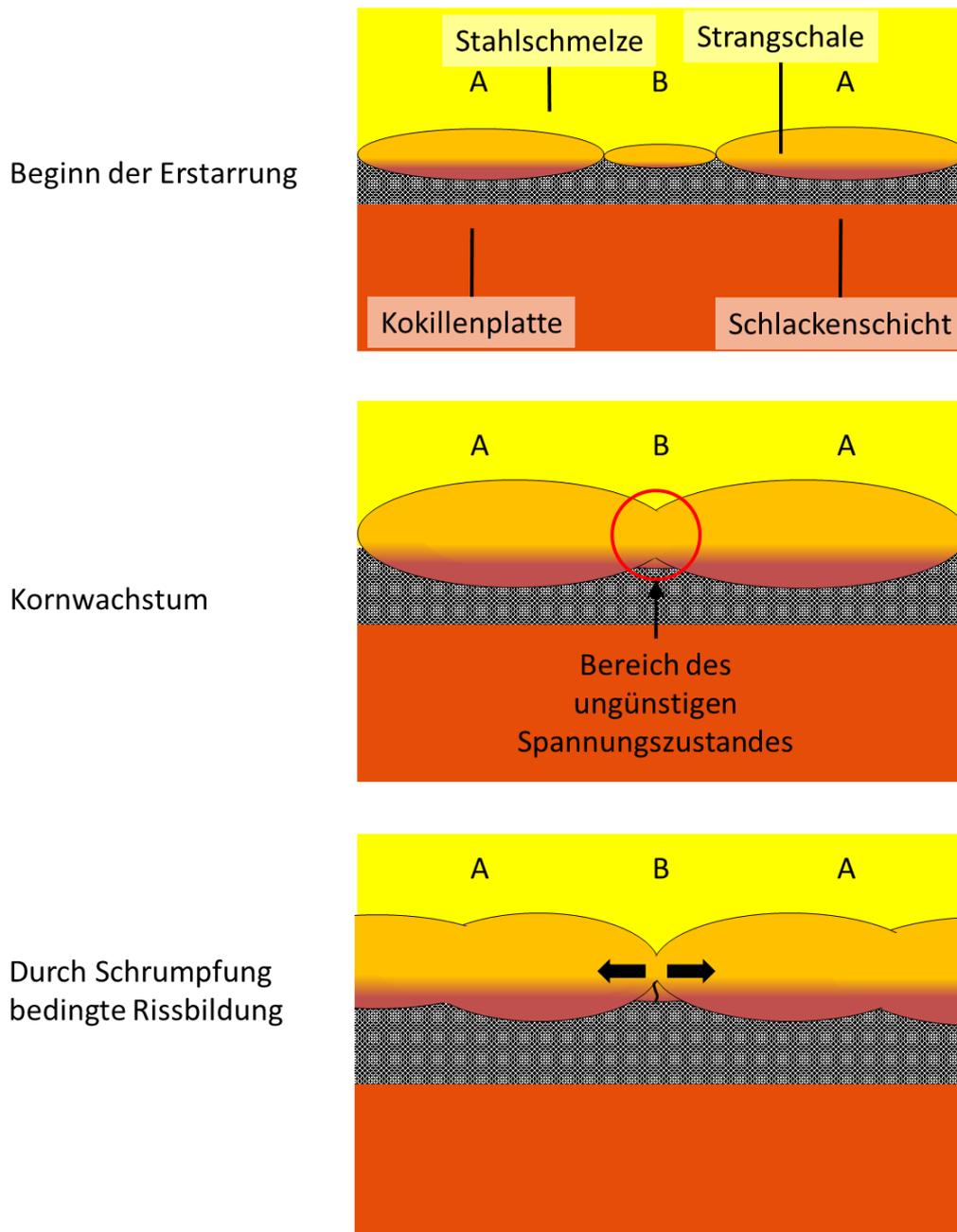


Abbildung 4.6: Entstehungsmechanismus des Längsrisse während der Abkühlung. Die dickeren Strangschalenbereiche (A) verdrängen den dünneren Strangschalenbereich (B). Während des Schrumpfens kommt es anschließend zur Rissbildung.

Schreitet die Erstarrung fort, treten lokale Schrumpfungseffekte auf. Die Bereiche mit dünnerer Strangschale werden durch die Bereiche, in denen die Strangschale dicker ist, verdrängt. In der Folge bildet sich durch die Schrumpfung im Verlauf der Abkühlung ein lokal höherer Spannungszustand im Inneren der Strangschale aus. Bedingt durch die Schrumpfung der Strangschale üben die dickeren Strangschalenbereiche (A) Zugkräfte auf den dünneren Bereich (B) der Strangschale aus. Der dünne Bereich kann den entstehenden Kräften nicht mehr standhalten und ein Oberflächenriss entsteht. Dieser Riss kann anschließend in der Sekundärkühlung durch die weitere Schrumpfung des Stahlstranges und der im Rissgrund vorherrschenden Kerbwirkung weiterwachsen.

Zusammengefasst wurde in diesem Kapitel dargestellt, auf welche Weise sich eine hohe örtliche und zeitliche Volatilität im Wärmestrom auf die Erstarrung auswirkt. Die Strangschale wächst lokal unterschiedlich schnell. Die dünnen Strangschalenbereiche können den Schrumpfspannungen, die während der Erstarrung entstehen, nicht mehr standhalten. Der geringe Widerstand der Strangschale gegen die Spannungen ist die Grundlage für die spätestens in der Sekundärkühlung entstehenden Längsrisse und Schalenfehler.

Ziel ist es nun, den Wärmestrom in der Kokille zu beeinflussen und zu homogenisieren, damit die Ausbildung der Strangschale möglichst homogen erfolgt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll geprüft werden, inwieweit eine Modifikation der Kokillenoberfläche den Wärmestrom beeinflussen kann. Die potenziellen Oberflächenmodifikationen werden im anschließenden Kapitel beschrieben.

5 Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte

Die Oberflächenmodifikation der Stranggusskokille soll durch Verwendung einer speziellen Oberflächentopografie realisiert werden. Solche Strukturen können in verschiedenen Formen auf Oberflächen aufgebracht oder eingebracht werden. Ausgewählte Verfahren werden im Detail in den Unterkapiteln dieses Abschnittes betrachtet. Zuvor soll auf Beispiele potenzieller Verfahren kurz eingegangen werden.

Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte

Durch Verfahren zur Beschichtung werden Kokillenoberflächen entweder über die gesamte Höhe oder nur teilweise im Bereich des Gießspiegels mit einem Substrat versehen. Zweck dieser Beschichtungen ist eine Erhöhung der Verschleißfestigkeit [WIRT76], [GRAV85], [KLEI00], [KÖST01]. Außerdem wird aber auch eine Beeinflussung des Wärmestroms durch die Beschichtung beabsichtigt [BEYE06], [RODE04].

Oberflächentopografien können auch über spanende Verfahren hergestellt werden. Ziel ist es dann, eine Anisotropie in der Oberfläche durch Schleif- oder Fräßverfahren zu erreichen, um den Wärmestrom im Bereich des Gießspiegels zu reduzieren. Häufig wird in diesen Verfahren eine zeilenförmige Struktur in die Kokillenoberfläche eingebracht. Diese Struktur kann längs [FUJI85], [GRUH85], [HISA82], quer [FEHL06], [HISA82] oder diagonal [HISA82] zur Gießrichtung verlaufen.

Des Weiteren kann eine Kokillenoberfläche auch über Verfahren modifiziert werden, die auf einem Stoß- oder Schlagimpuls basieren oder Prägetechniken verwenden. Hierbei wird die Kokillenoberfläche verformt und verdichtet. Ein Materialabtrag findet meist nicht statt. Ein bekanntes Beispiel für diese Art der Bearbeitung ist das Kugelstrahlverfahren [BEYE06], [SEAR09], [VILL09], [STRE04], [YOSH94], [HISA82], [HISA94]. Die dabei entstehende Oberfläche ist meist stochastisch [BEYE06], [SEAR09], [STRE04], [YOSH94] [HISA94] durch Vertiefungen und Erhöhungen geprägt, kann aber in Einzelfällen auch deterministisch [VILL09], [HISA82] ausgelegt werden. In Sonderfällen können deterministische Strukturen auch über Ätzverfahren eingestellt [BUXM81] werden.

Zudem existieren Kokillenmodifikationen, durch die die Leitfähigkeit des Kokillensmaterials [LECH08] oder der Wärmeübergang in den Kokillenkühlkanälen [SEAR09], [WOBK09], [MATH17] beeinflusst werden sollen. Diese Ansätze konzentrieren sich aber nicht auf die Kontaktfläche zwischen Kokille und Schmelze. Daher werden die dazugehörigen Modifikationen hier nicht berücksichtigt.

In dieser Arbeit wird eine weitere Modifikation vorgestellt, über die der Wärmestrom über eine gezielte Veränderung der Kokillenoberfläche beeinflusst wird. Grundlage hierfür bildet die Bandgusstechnologie, wo im Bereich der Erstarrung weit höhere Wärmestromdichten als beim Stranggießen vorliegen [GRÄF11], [HÖCK14], [HÖCK17]. Beim Bandgießen werden Modifikationen der Gießrollenoberflächen eingesetzt, um beispielsweise die Erstarrung des Stahls gezielt einzuleiten und den

Wärmestrom zu reduzieren. Des Weiteren werden auch im Bereich des so genannten Knüppelgießverfahrens Oberflächenveränderungen vorgenommen, um den Einfluss der dort eingesetzten Gießöle auf den Wärmestrom zu regulieren [DRES15]. Da diese Technologien aus Band- und Knüppelgießverfahren bereits teilweise erfolgreich verwendet werden, wird dieser Ansatz nachfolgend auch für den konventionellen Strangguss in Form einer gezielten Modifikation der Kokillenplatte überprüft.

Bevor die Strukturierverfahren eingehender vorgestellt werden, sollen zunächst quantitative Möglichkeiten aufgezeigt werden, die Oberflächenmodifikationen untereinander vergleichen zu können. Die Grundlagen für den Vergleich werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

5.1 Definition verschiedener Rauheitskenngrößen

Die Topografie der potenziellen Oberflächenmodifikationen soll über einfache Messmethoden beschrieben werden. Um verschiedene Oberflächentopografien auch quantitativ miteinander vergleichen zu können, ist die geeignetste Möglichkeit die Verwendung von bekannten Rauheitskenngrößen. Zur Beurteilung der Oberflächentopografien wird zusätzlich eine Sichtprüfung empfohlen, um mit den Kennwerten nicht erfassbare Oberflächenfehler, wie beispielsweise „Riefenbildung“, zu detektieren. Unterstützend werden die nachfolgenden Rauheitskenngrößen eingesetzt, um die erzeugten Oberflächen charakterisieren und untereinander vergleichen zu können. Die nachfolgenden Kenngrößen sind in der Norm DIN EN ISO 4287:2010-07 festgelegt ([DIN10]).

5.1.1 Der arithmetische Mittenrauwert

Der arithmetische Mittenrauwert R_a (vgl. **Abbildung 5.1**) ist gut geeignet, um einen ersten Eindruck von einem vorliegenden Profil zu gewinnen. Durch R_a ist es möglich, eine allmähliche Veränderung eines Profils zu dokumentieren [VOLK05].

Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte

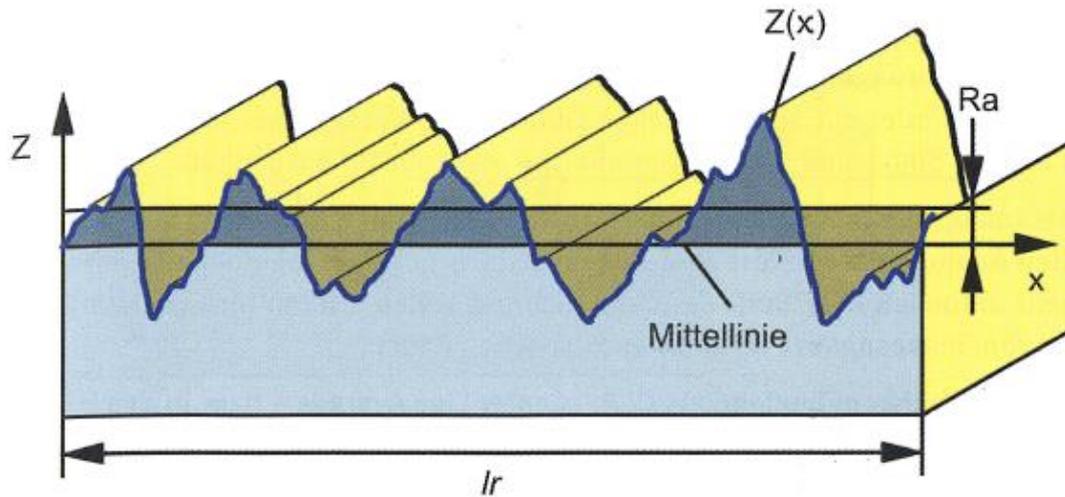


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung zur Bestimmung des arithmetischen Mittenrauwertes R_a [VOLK05].

Die Kenngröße R_a ist in den meisten Rauheitsmessgeräten implementiert. Der arithmetische Mittenrauwert wird mathematisch nach Gleichung 4.1 bestimmt.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \times \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

Der arithmetische Mittenrauwert ist sehr „robust“ gegenüber einzelnen Messwerten (Peaks). Da der Messwert nicht zwischen Riefen, Tälern und Spitzen unterscheiden kann, eignet er sich nur zur Qualitätsprüfung, wenn der Charakter der Rauheit und somit der Charakter des Profils bekannt ist (vgl. **Abbildung 5.2**).

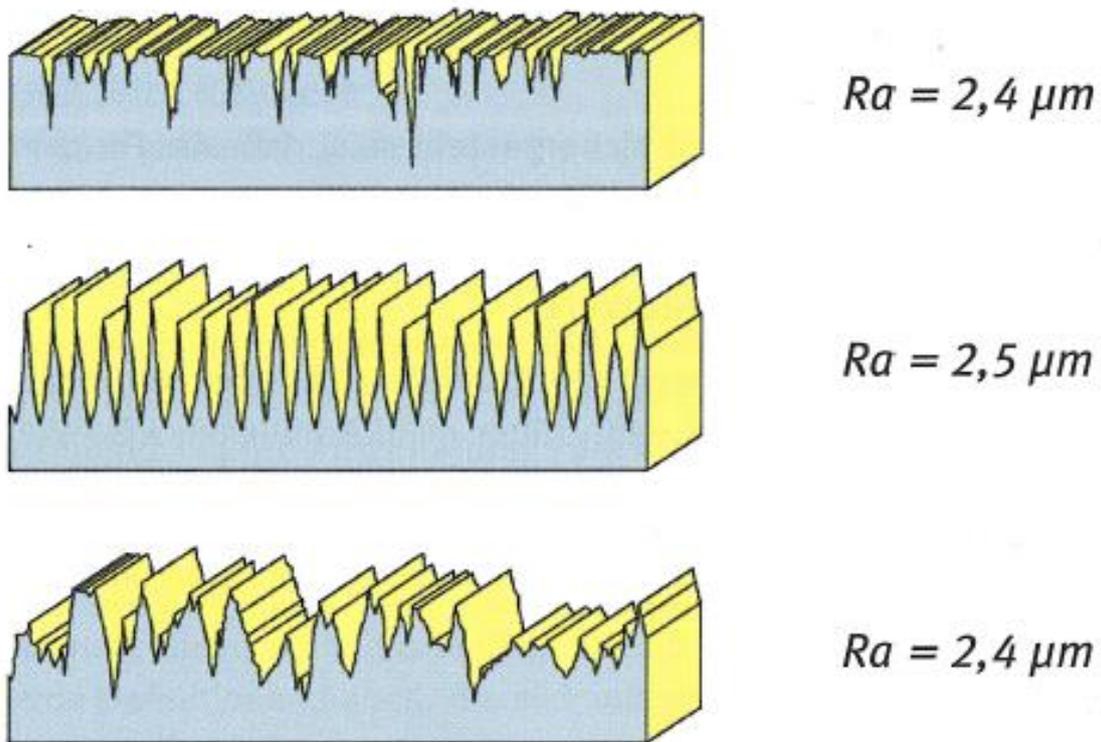


Abbildung 5.2: Unterschiedliche Profile mit annähernd identischen Mittenrauwerten [VOLK05].

5.1.2 Die maximale und die gemittelte Rautiefe

Die gemittelte Rautiefe (R_z) mittelt die maximalen Rautiefen von fünf Einzelmessstrecken gleicher Länge und reagiert daher im Vergleich zu dem Mittenrauwert R_a deutlich sensitiver auf unterschiedliche Topografien [VOLK05]. Mathematisch wird die Berechnung der gemittelten Rautiefe wie folgt durchgeführt (vgl. auch **Abbildung 5.3**).

$$R_z = \frac{1}{5} \times \sum_{i=1}^5 z_i \quad (\text{Gleichung 5.2})$$

mit z_i : maximaler Rauheitswert der jeweiligen Einzelmessstrecke

Dadurch ist die gemittelte Rautiefe genauer als der Mittenrauwert, ohne zu stark durch Einzelmesswerte beeinflusst zu werden. Daher kann durch R_z bereits eine genauere Aussage zur untersuchten Topografie getätigt werden. Die maximale Rautiefe (R_{max})

Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte

ist der größte Abstand von der höchsten Spitze bis zum tiefsten Tal innerhalb einer Einzelmessstrecke (vgl. Abbildung 5.3) [VOLK05]. Da stark aus dem Profil herausragende Spitzen durch die gemittelte Rautiefe nur abgeschwächt dargestellt werden, sollte zur Beurteilung einer Oberflächentopografie immer auch die maximale Rautiefe bestimmt werden. Zudem ist die Verwendung der maximalen Rautiefe sinnvoll, wenn einzelne Störstellen des Werkstücks dessen Funktion beeinträchtigen [VOLK05]. In Bezug auf die Oberflächenmodifikation der Kokillenplatten gibt die maximale Rautiefe Auskunft darüber, ob aufgrund eines zu rauen Profils Undichtigkeiten zwischen den Breit- und den Schmalseiten auftreten können. Die gemittelte Rautiefe zeigt auf, ob es sich bei der Detektion durch die maximale Rautiefe lokal um ein Einzelereignis handelt, oder ob ein generell zu rauhes Profil auf der Kokillenoberfläche vorliegt. Die gemittelte und die maximale Rautiefe können für die in dieser Arbeit vorliegende Oberflächenmodifikation Auskunft darüber geben, ob die Gießsicherheit beeinträchtigt wird.

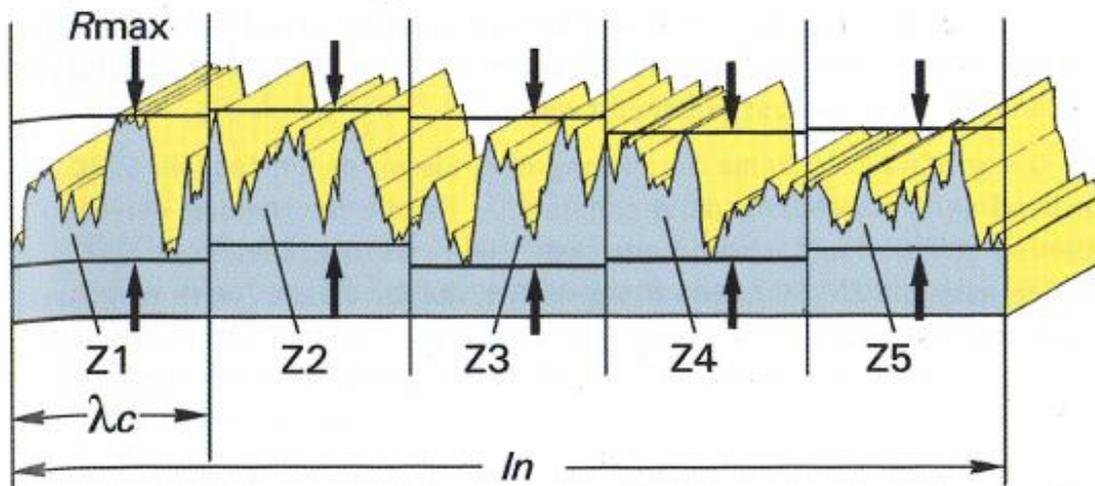


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung zur Bestimmung der gemittelten Rautiefe (R_z) und der maximalen Rautiefe (R_{max}) (nach [VOLK05]).

5.2 Messung der Rauheitskenngößen

Die meisten in dieser Arbeit angewandten Oberflächenmodifikationen erzeugen eine vergleichsweise stochastisch geprägte Oberflächentopografie, die durch ein herkömmliches taktiles Messverfahren (wie beispielsweise das Tastschnittverfahren) nicht vermessen werden kann, ohne das Werkstück oder die Messeinheit zu beschädigen [MAHR19]. Daher werden zur Bestimmung der Rauheitskenngößen und der Oberflächentopografie zwei berührungslose Messverfahren verwendet.

Die in Kapitel 6.2 verwendeten Laborproben werden mittels Konfokalsensorik vermessen. Dies ermöglicht auch die grafische Darstellung der einzelnen Oberflächentopografien. Das dazugehörige Messgerät besteht im Wesentlichen aus einer Sensoreinheit und einem Fokusdetektor (vgl. **Abbildung 5.4**). Die Sensoreinheit dieses Messsystems projiziert ein paralleles Lichtbündel von der Abtastlinse auf die Oberflächenprobe. Das reflektierte Licht wird anschließend auf einen Fokusdetektor gelenkt, welcher Abweichungen von der Idealreflexion innerhalb weniger Nanometer detektiert. Die sich einstellende Höhenauflösung des Systems liegt bei $0,01 \mu\text{m}$ [NANO20].

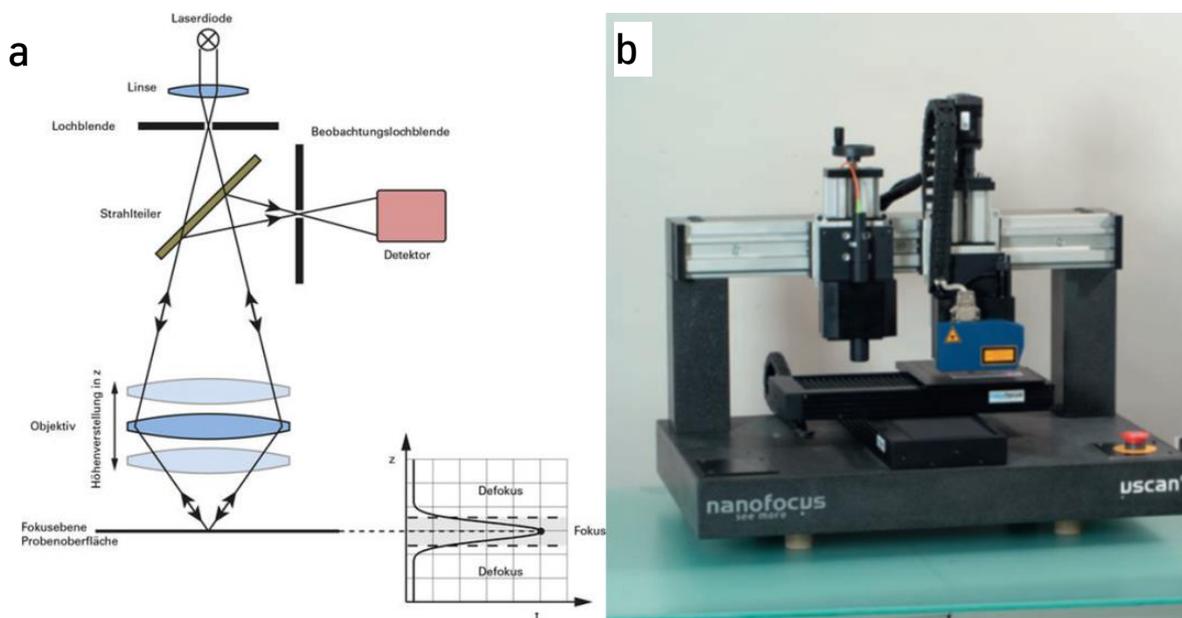


Abbildung 5.4: Aufbau der Konfokalsensorik: Schema (a) und Realbild (b) [NANO20].

Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte

Die Sensoreinheit wird durch einen X-Y-Tisch automatisiert über die Probe verfahren und zeichnet Linienmessungen auf, die anschließend von der Software zu einem 3D-Bild der vermessenen Oberfläche zusammengesetzt werden. Hierdurch kann unter anderem die Topografie der Oberfläche veranschaulicht werden. Die Größe des Messfeldes beträgt circa 64 mm². Für die Messung einer Probe mit dem vorhandenen System werden ca. 25 Minuten benötigt.

Die zu vermessenden betrieblichen Oberflächen können Größen bis zu einem Quadratmeter erreichen. Würde diese Fläche mittels Konfokalsensorik vermessen werden, ergäbe sich eine Messzeit von mehr als 6 Monaten je Kokillenplatte. Aus diesem Grund wurden für die Vermessung zunächst lokale Negative der Kokillenoberfläche unter der Verwendung einer schnell aushärtenden Masse hergestellt (so genannte Abdruckproben (vgl. Kapitel 7.3, Seite 71)). Für eine serielle Messung kann ein System auf Basis der Lichtschnittsensorik angewandt werden, das zuvor mit Hilfe der Konfokalsensorik auf die Kokillenmodifikation hin kalibriert wurde. Ein Beispiel für eine solche Sensorik zeigt **Abbildung 5.5**.



Abbildung 5.5: Beispiel für einen Lichtschnittsensor [MICRO15].

Im folgenden Kapitel werden die potenziellen Oberflächenmodifikationen der Kokillenplattenoberfläche vorgestellt. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass zusätzlich zu den Rauheitskenngrößen auch immer eine optische Beurteilung der Oberflächenmodifikation und der damit verbundenen Oberflächentopografie notwendig ist.

5.3 Vorstellung der potenziellen Oberflächenmodifikationen

In diesem Kapitel wird zunächst der Aufbau der aktuellen Kokillenwand vorgestellt. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden anschließend die Anforderungen und Eigenschaften potenzieller Oberflächenmodifikationen definiert. Abschließend werden die herstellungs- und prozesstechnischen Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Oberflächenstruktur aufgeführt.

5.3.1 Aktueller Aufbau der Kokillenwand

Um einen Vergleich der Kokillenoberflächenmodifikationen zu bisher eingesetzten Kokillen ohne Modifikation zu bekommen, soll zunächst die Oberflächentopografie der bisher serienmäßig eingesetzten Kokillen thematisiert werden. Diese werden mit einer vergleichsweise glatten und spiegelnden Oberfläche (vgl. **Abbildung 5.6**) angeliefert.

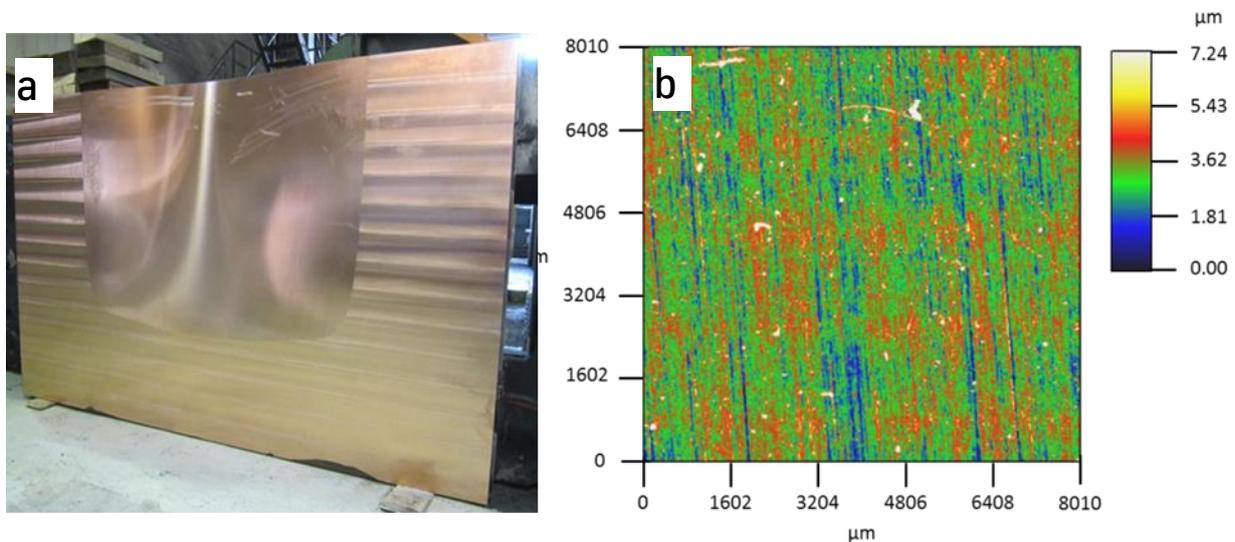


Abbildung 5.6: Kokillenplatte im Anlieferungszustand: Realbild (a), Messung mittels Konfokalsensoren (b).

Ein Einsatz der Kokille im Anlieferungszustand ist jedoch nicht denkbar. Aufgrund der glatten Oberfläche ($R_a = \text{ca. } 0,5 - 1 \text{ } \mu\text{m}$, $R_z = \text{ca. } 5 \text{ } \mu\text{m} - 6 \text{ } \mu\text{m}$, und $R_{\text{max}} = \text{ca. } 11 - 13 \text{ } \mu\text{m}$) kann die Schlacke nicht an der Kokillenwand anhaften. Ein Abriss des Schlackenfilms in der Kokille ist die Folge. Dadurch besteht ein direkter Kontakt der Strangschale mit der Kokillenoberfläche. Eine Schmierung zwischen Strangschale und

Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte

Kokille ist nicht mehr vorhanden und ein so genannter „Kleber“ entsteht, bei dem die Strangschale an der Kokillenoberfläche anhaftet. Gleichzeitig wird der Stahlstrang unten aus der Kokille hinausbefördert. Dabei reißt die Strangschale durch die auf sie wirkenden Zugkräfte an der Stelle des Klebers auf. Neue Schmelze aus dem Inneren des Stahlstranges tritt in direkten Kontakt mit der Kokillenoberfläche. Mit jeder Hubbewegung der Kokille reißt die Strangschale aufgrund der Zugkräfte erneut auf. Dadurch wird das Strangschalenwachstum im Bereich des Klebers verhindert. Am Kokillenausgang kann die Strangschale dem ferrostatischen Druck des Stahls aus dem Stranginneren nicht standhalten, was final in einem Aufreißen der Strangschale unterhalb der Kokille (auch „Durchbruch“ genannt) führen kann [MILL17]. Somit stellt ein Kleber eine erhebliche Beeinträchtigung der Gießsicherheit dar.

Um das Abreißen des Schlackenfilms zu verhindern und somit positiv auf die Gießsicherheit zu einzuwirken, wird daher die Rauheit der Kokillenplattenoberfläche durch Schleifen erhöht. Nach dieser Bearbeitung ergeben sich für die eingesetzten Kokillen ohne weitere Modifikationen Rauheitskennwerte von $R_a = \text{ca. } 2 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$, $R_z = \text{ca. } 14 \mu\text{m} - 18 \mu\text{m}$, und $R_{\text{max}} = \text{ca. } 20 \mu\text{m} - 25 \mu\text{m}$. Eine Makroaufnahme sowie eine Messung der sich durch das Schleifen ergebenden Oberflächentopografie sind in **Abbildung 5.7** dargestellt.

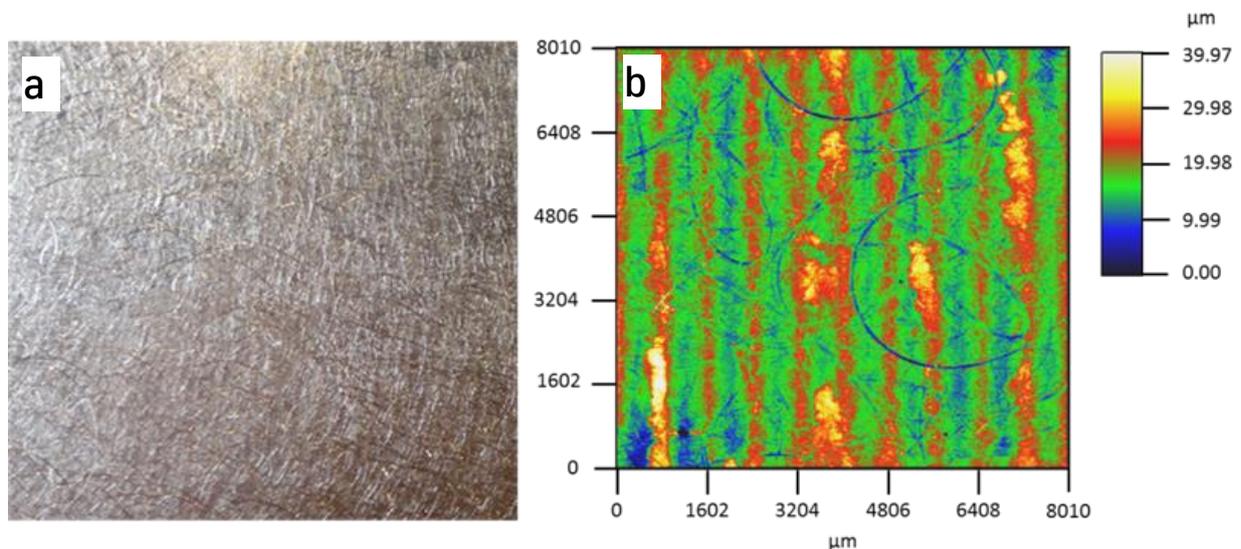


Abbildung 5.7: Oberflächenstruktur angeschliffener Kokillenplatten: Realbild (a), Messung mittels Konfokalsensorik (b).

Eine zusätzliche positive Beeinflussung der Oberflächenqualität des Stahlstranges (beispielsweise durch eine Reduktion der Schalenfehler) konnte nicht nachgewiesen

werden. Um auch eine Verbesserung der Oberflächenqualität zu erreichen, wird in dieser Arbeit der Einsatz einer zusätzlichen Oberflächenmodifikation untersucht und unter betrieblichen Einsätzen erprobt.

Bevor nun die einzelnen Oberflächenmodifikationen und die damit verbundenen Oberflächentopografien vorgestellt werden, ist es wichtig, die Anforderungen an diese zu definieren.

5.3.2 Anforderungen an die Kokillenoberflächenmodifikation

Die an die Oberflächenmodifikation gestellten physikalischen und qualitativen Anforderungen sind indirekt bereits in Kapitel 4.2 vorgegeben worden. Ziel ist, die Wärmestrominhomogenität innerhalb der Kokille auszugleichen, die Ausbildung einer homogenen Strangschale zu unterstützen und so die Oberflächenqualität der Bramme zu verbessern, ohne dadurch die Gießsicherheit zu gefährden.

Zunächst besteht die Forderung an die Oberflächenmodifikation, auf den Wärmestrom in der Kokille einzuwirken. Der hohe Wärmestrom im Bereich des Gießspiegels soll reduziert und so die Wärmestrominhomogenität über die Kokillenhöhe ausgeglichen werden. Auch den Auswirkungen der Inhomogenität im Wärmestrom über die Kokillbreite (beispielsweise aufgrund der Kokillengeometrie und der Strömungsverhältnisse) soll entgegengewirkt werden. Zudem ist es wichtig, dass die in Kapitel 4.2 erwähnte örtliche und zeitliche Volatilität im Wärmestrom kompensiert wird.

Ein wesentlicher Aspekt für die Verwendung einer Oberflächenmodifikation ist, dass das verwendete Material sowie die verwendete Topografie die Sicherheit des Gießprozesses nicht beeinflussen. Dies bedeutet, dass primär die Beeinflussung der Schmiereigenschaften der Gießschlacke nicht negativ verändert werden darf. So sind chemische Reaktionen der Gießschlacke mit dem Material der Oberflächenmodifikation nicht erwünscht. Auch muss weiterhin die Topografie so ausgelegt sein, dass der Schmierfilm der Gießschlacke erhalten bleibt.

Ferner muss die Oberflächentopografie so gewählt sein, dass die Bewegung der Schmalseiten nicht beeinträchtigt wird. Bei einer zu rau ausgelegte Topografie mit zu großer Strukturtiefe/ -höhe besteht das Risiko, dass sich ein nicht erwünschter Spalt

zwischen Kokillenschmalseite und Kokillenbreite bildet. Dringt in diesen Spalt Schmelze ein, sind ein Aufreißen der Strangschale und ein Gießabbruch die Folge. Zudem führt eine zu große Rauheit der Oberflächentopografie dazu, dass die Kokillenschmalseite bei einer Breitenanpassung Schäden (Riefen) auf der Kokillenbreite verursacht.

Gleichzeitig darf die Kokillenstruktur nicht so groß dimensioniert sein, dass eine Verformung der Strangschale erzeugt wird. Sofern sich die Strangschale während der Erstarrung verformt oder biegt, werden die in Kapitel 4.3 beschriebenen Fehlstellen ebenfalls erzeugt.

Aus Sicht der Produktqualität ist es zudem wichtig, dass das Material der Oberflächenmodifikation nicht abgetragen und in die erstarrende Schmelze eingelagert wird. Sonst besteht die Gefahr, dass die Bramme durch das Fremdmaterial verunreinigt wird. Des Weiteren können Fremdmaterialien, die sich mit der Brammenoberfläche verbinden, eine weitere Ursache für Oberflächenfehler auf dem ausgewalzten Warmband darstellen.

Für die Herstellung der Oberflächenmodifikation gilt, dass die Rauheitswerte der Oberflächentopografie und die Topografie selbst reproduzierbar sein müssen. Zudem muss die Herstellung der Topografie möglichst automatisiert, kostengünstig und mit geringem logistischen Aufwand erfolgen. Des Weiteren ist wichtig, dass durch höheren Verschleiß der Kokillenoberfläche die Einsatzdauer der Kokille nicht verkürzt wird. Entweder muss hierzu die Topografie der Kokillenoberfläche in Gießpausen erneuert werden können oder die Oberflächenmodifikation ist so ausgelegt, dass die Topografie den Kokilleneinsatz bis zum standardmäßigen Ausbau der Kokille überdauert. Auch hinsichtlich dieser Kriterien werden die Oberflächenmodifikationen überprüft.

Für den potenziellen Einsatz in Betriebsversuchen wurden verschiedene Oberflächenmodifikationen, zunächst sowohl deterministische, als auch stochastische, in Betracht gezogen, die hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und ihrer Auswirkungen auf den abgeführten Wärmestrom untersucht wurden. Diese Modifikationen sollen nun nachfolgend vorgestellt werden.

5.3.3 Eigenschaften der potenziellen Oberflächenmodifikationen

Um die in Kapitel 5.3.2 gestellten Anforderungen zu erfüllen, werden im weiteren Verlauf verschiedene Oberflächenmodifikationen vorgestellt. Neben den in diesem Kapitel vorgestellten Herstellungstechniken sind auch weitere Techniken für eine Oberflächenmodifikation denkbar. Technologien, die auf chemischen (beispielsweise photochemisches Ätzen [BUXM81] oder thermischen Verfahren (beispielsweise Lasertexturierung [BEYE06] basieren, haben zukünftig durchaus das Potenzial in der Bearbeitung der Kokillenoberflächen Anwendung zu finden. Derzeit sind diese Verfahren jedoch technologisch noch nicht ausgereift und werden daher in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Vielmehr sollen hier Verfahren Anwendung finden, deren Technologie bereits nahezu ausgereift und bekannt ist. Betrachtet werden Strukturen, die entweder auf die Kokillenoberfläche aufgetragen oder mittels Materialabtrag oder Impuls oberflächennah in die Kokillenoberfläche eingebracht werden.

5.3.3.1 Durch Beschichtung aufgetragene Oberflächenstruktur

Als Vertreter der mittels Beschichtung aufgetragenen Oberflächenstruktur wurde eine thermische Spritzschicht (vgl. **Abbildung 5.8**) bestehend aus einer Nickel-Chrom-Verbindung (20 % Cr) gewählt. Diese Beschichtung wurde bereits in der Bandgusstechnologie untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass Gießrollen, die mit einer wärmedämmenden Schicht bespritzt wurden, zu einem geringen abzuführenden Wärmestrom und zu einer guten Oberflächenqualität am Produkt führen [NAGY05].

Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte

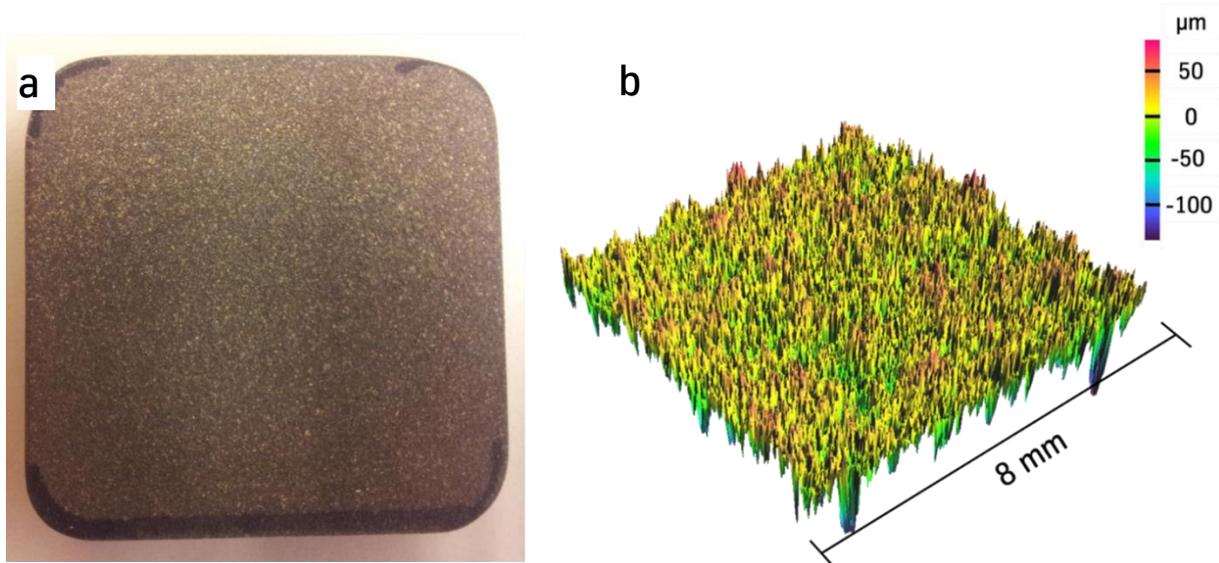


Abbildung 5.8: Realbild (a) und Oberflächentopografie (b) der thermischen Spritzschicht.

Die Oberflächentopografie ist durch vergleichsweise viele kleine, spitze und stochastisch ausgebildete Erhebungen und Vertiefungen gekennzeichnet. Die festgestellten Rauheitswerte betragen $R_a = 17 - 20 \mu\text{m}$, $R_z = 90 \mu\text{m} - 106 \mu\text{m}$ und $R_{\text{max}} = 139 \mu\text{m}$.

Die thermische Spritzschicht besitzt eine Schichtdicke von etwa $200 \mu\text{m}$. **Abbildung 5.9** zeigt eine mikroskopische Aufnahme eines Querschnitts im Bereich der Kokillenoberfläche. Die erzeugte Spritzschicht stellt sich als lockerer Überzug über die Kokille (Kupfer) dar. Eine feste, metallische Verbindung der beiden Komponenten konnte nicht nachgewiesen werden.

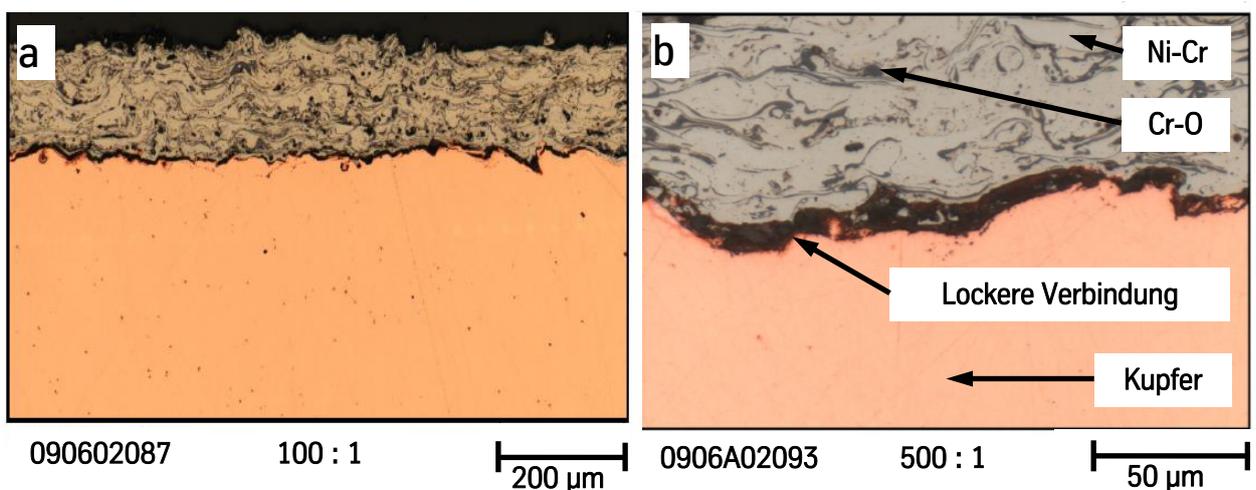


Abbildung 5.9: Lichtmikroskopie, Querschnitt durch beschichtete Kupferkokille: Übersicht (a) und Detailansicht (b).

Da die Zwischenräume zwischen den Einzelerhebungen sehr klein sind, kann für eine spätere Verwendung angenommen werden, dass die Schlacke aufgrund der Oberflächenspannung nicht ausreichend in die Zwischenräume eindringen wird. Eine Wärmedämmung aufgrund einer stärker ausgeprägten Schlackenschicht ist somit nicht vorhanden. Eine Reduktion des Wärmestroms wird jedoch dadurch erzielt, dass durch die zusätzliche Ni-Cr-Schicht ein weiterer Wärmedurchgangs- und Wärmeübergangswiderstand entsteht. Zudem befindet sich in den Zwischenräumen der Struktur Luft, die als zusätzlicher Wärmestromwiderstand wirkt.

Ein Risiko besteht jedoch in der Haltbarkeit der Struktur. Die Verbindung zwischen der Beschichtung und der Kupferoberfläche ist „locker“. Sie kann somit leicht durch die Relativbewegung zwischen Kokille und Stahl aufgelöst werden. Ein Verschleiß der Oberflächenstruktur entsteht. Dies führt zum einen zum Eintrag von Verunreinigungen in den Stahl. Zum anderen verändern sich die Oberflächeneigenschaften, sodass die Ni-Cr-Schicht und die Zwischenräume für die Luft reduziert werden. Dadurch sinkt die wärmedämmende Wirkung der Struktur.

5.3.3.2 Mechanisch abgetragene Rillenstruktur

Die Rillenstruktur (vgl. **Abbildung 5.10**) ist ein Beispiel für eine deterministische Struktur und wird durch einen mechanischen Materialabtrag hergestellt. Die einzelnen Rillen besitzen hier eine Breite von ca. 1 mm und eine Tiefe von ca. 400 μm . Die Rauheit der Struktur beträgt: $R_a = 169 \mu\text{m} - 181 \mu\text{m}$, $R_z = 465 \mu\text{m} - 501 \mu\text{m}$, $R_{\text{max}} = 521 \mu\text{m}$. Eine Kaltverfestigung des Materials findet nicht statt.

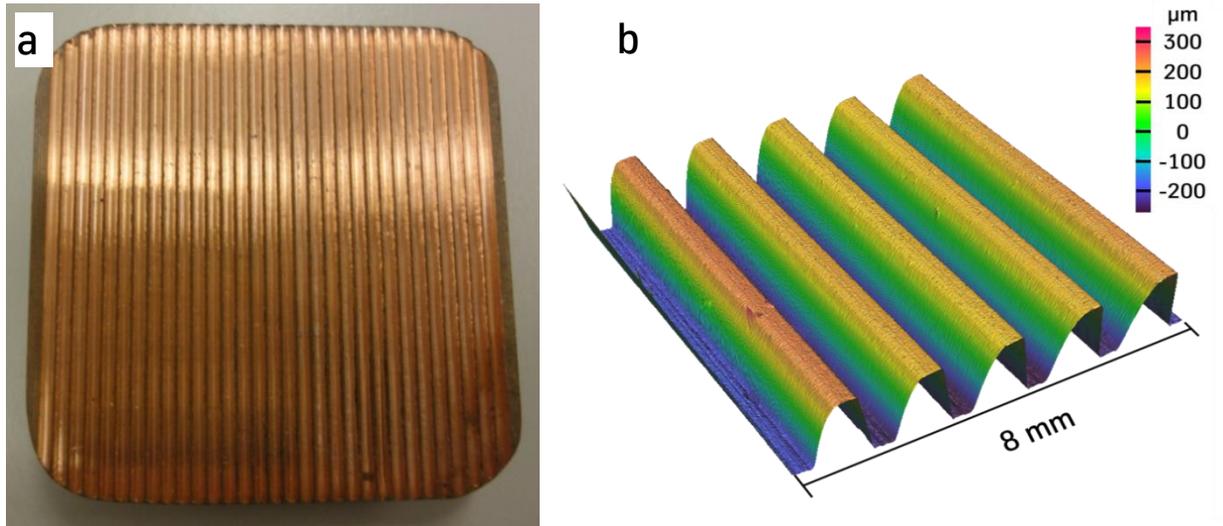


Abbildung 5.10: Rillenstruktur im Realbild (a) und im 3D-Rauheitsprofil (b).

Der Effekt der Struktur besteht darin, dass sich eine wärmedämmende Schicht (beispielsweise Gießschlacke oder Luft) in den Rillen aufbaut, ein höherer Widerstand entsteht und der Wärmestrom gemindert wird. Die Rillen verlaufen dabei parallel zur Gießrichtung, um einen Abtrag der Spitzen durch die Relativbewegung zwischen Kokille und Stahl bei einem späteren möglichen Einsatz zu vermeiden. Untersuchungen zur Verwendung einer Rillenstruktur wurden bereits in der Vergangenheit durchgeführt [FUJI85]. Eine wärmedämmende Wirkung ist dabei prinzipiell belegt worden. Über einen serienmäßigen Einsatz ist jedoch bisher nichts bekannt.

Da die Rillen parallel zur Gießrichtung verlaufen, alternieren über die Kokillenbreite gesehen Spitzen und Täler auf der Kokillenoberfläche. Erkenntnisse aus der Bandgusstechnologie belegen, dass die Erstarrung, die im Bereich von Spitzen beginnt, schneller fortschreitet, als die Erstarrung, die im Bereich der Täler vorherrscht [HÖCK17]. Übertragen auf die Rillenstruktur bedeutet dies, dass sich die Strangschale im Bereich der Spitzen der Rillenstruktur schneller ausbildet als im Bereich der Täler. So entsteht analog zur Rillenstruktur eine alternierend dicke Strangschale (vgl. **Abbildung 5.11**).

Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte

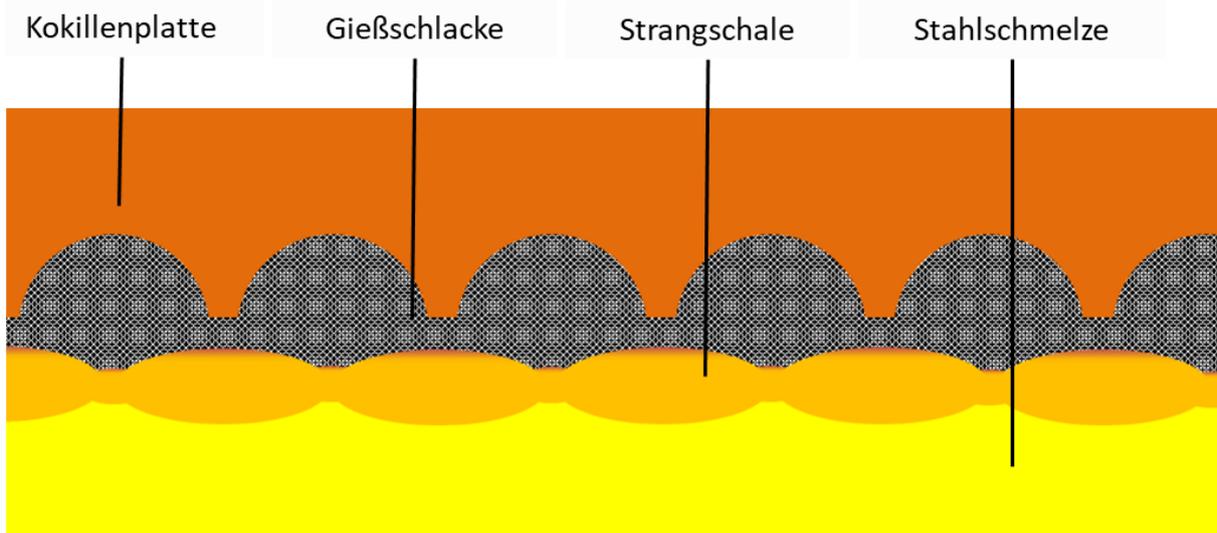


Abbildung 5.11: Erstarungsstruktur der Strangschale bei Einsatz einer mit Rillen versehenen Kokillioberfläche.

Der erstarrende Stahlstrang wird parallel zu den Rillen nach unten aus der Kokille herausgezogen. Dadurch wird während des gesamten Erstarungsvorgangs in der Kokille der in Abbildung 5.11 gezeigte Effekt begünstigt. Somit entsteht bei Verlassen der Kokille eine alternierend dicke Strangschale. Diese bietet ein hohes Potenzial für Fehlstellen, wie sie in Kapitel 4.3 beschrieben werden. Eine Möglichkeit, diesem Effekt entgegen zu wirken, ist die Verwendung einer stochastischen Struktur.

Die Verwendung der Rillenstruktur ist zudem auch aus prozesstechnischer Sicht risikobehaftet. Auf der einen Seite der Kokillenplatte befindet sich heiße Stahlschmelze. Die andere Seite der Kokillenplatte tritt mit Wasser in Kontakt, dessen Temperatur circa 40°C beträgt. Dadurch unterliegt die Kokillenplatte über ihre Dicke hohen thermischen Spannungen. Das Einbringen der Struktur in die Kokillioberfläche schafft Angriffsstellen, an denen das Kokillenmaterial aufgrund von Kerbwirkung zu Rissbildung neigen kann. Somit können im Talgrund der Rillenstruktur feine (Heiß-)Risse und Kupferausbrüche entstehen, welche die Kokillioberfläche beschädigen. Kupfereintrag in die Schmelze bis hin zu einem materialbedingten Ausfall sind die Folge.

Eine Korrektur dieses Zustands ist möglich. Sie gelingt beispielsweise dadurch, dass größere Radien im Tal der Struktur (hier konkret: der Rille) verwendet werden, um die Kerbwirkung auf das Kokillenmaterial zu verringern. Eine weitere Möglichkeit, der Rissbildung entgegen zu wirken ist eine Verdichtung des Kokillenmaterials und das damit verbundene Einbringen von Druckspannungen. Beide Ansätze (Verwendung

größerer Radien und Verdichtung des Kokillenmaterials) können durch die Verwendung eines Verfahrens, das auf Schlag-, Stoß- oder Impulstechniken basiert, realisiert werden.

5.3.3.3 Durch Materialverdichtung erzeugte Oberflächenstruktur

Die Verfahren, die auf Schlag- oder Stoßtechniken basieren, bieten Potenzial zur Herstellung einer geeigneten Oberflächentopografie. Das Material wird bei diesen Verfahren durch einen auf die Oberfläche treffenden Impuls verdichtet. Die Struktur, die sich bei Anwendung dieser Verfahren einstellt, ist stochastisch ausgebildet.

Nadeln und Kugelstrahlen sind Beispiele für Herstellungsverfahren, die auf Stoßimpulsen basieren und in der Gusstechnologie bereits Anwendung finden. Beispielsweise werden im Bandgussverfahren zum Teil kugelstrahlte Rollen eingesetzt, um die Erstarrung gezielt einzuleiten [HÖCK14].

Hinsichtlich der Arbeitsweise zur Reduktion des Wärmestroms sind sich die Oberflächentopografien, die durch Kugelstrahlen und durch Nadeln erzeugt werden, ähnlich. Werden die Topografien im Detail betrachtet, so sind Unterschiede festzustellen, die für die Wirkung der Struktur bedeutend sind. Daher sollen nachfolgend die Herstellungsverfahren und die sich daraus ergebenden Topografien genauer untersucht werden.

Beschreibung und Topografie des Kugelstrahlverfahrens:

Beim Kugelstrahlen werden Kugeln mit einer Geschwindigkeit von 20 m/s - 120 m/s auf die zu bearbeitende Oberfläche geschossen [WIED10]. Die Kugeln treffen hierbei ungerichtet aus unterschiedlichen Winkeln auf die Kokillenoberfläche auf. Neben der Härte der Kugeln und des Werkstücks sind für die Ausbildung der Oberflächentopografie auch die Masse, die Größe und der Auftreffwinkel der auf die Oberfläche geschossenen Kugeln ausschlaggebend.

Abbildung 5.12 zeigt ein Beispiel einer durch das Kugelstrahlen erzeugten Oberflächentopografie. Die sich einstellenden Rauheitskenngrößen betragen in diesem Beispiel $R_a = 13 \mu\text{m} - 19 \mu\text{m}$, $R_z = 55 \mu\text{m} - 67 \mu\text{m}$ und $R_{\text{max}} = 98 \mu\text{m}$. Die Rauheit kann

durch entsprechende Einstellung der Strahlparameter und der verwendeten Kugelmischung auch höhere Werte erreichen. Die Mischung besteht dann aus Kugeln, die aus unterschiedlichen Materialien bestehen und zugleich unterschiedliche Durchmesser besitzen. Dadurch dringen die Kugeln unterschiedlich tief in das Material ein. Insgesamt wird so die Oberflächentopografie stochastischer und rauer.

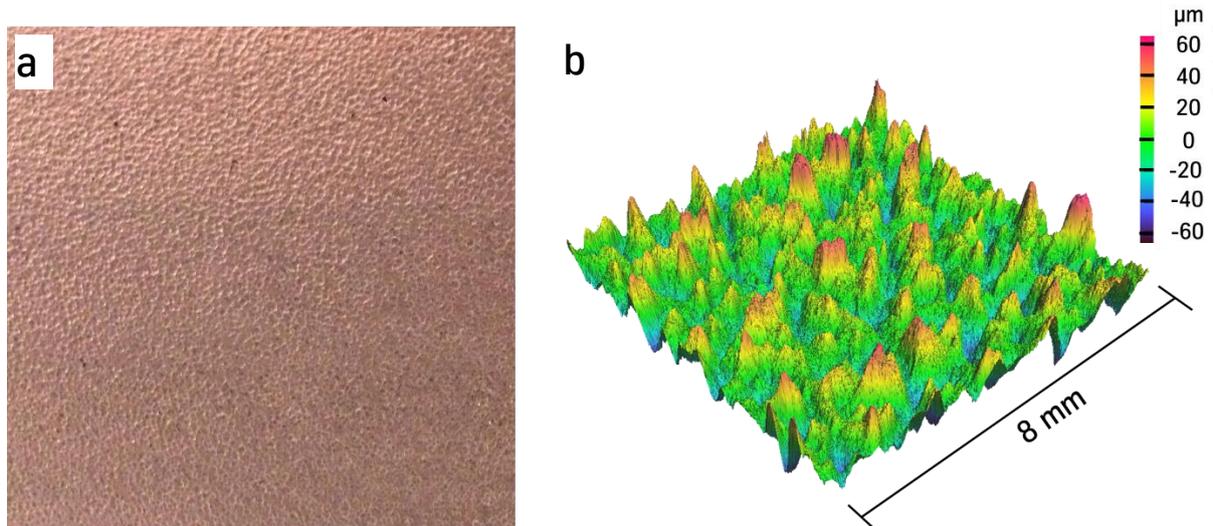


Abbildung 5.12: Oberflächentopografie einer kugelgestrahlten Oberfläche. Realbild (a) und Schema (b).

Die Oberflächentopografie der kugelgestrahlten Struktur ist primär durch Erhöhungen und dazwischenliegende Gräben charakterisiert. Diese Gräben bilden Räume für sich festsetzende Gießschlacke, sodass analog zur Rillenstruktur eine wärmedämmende Wirkung erzielt wird.

Beschreibung und Topografie des Nadelverfahrens:

Ein dem Kugelstrahlen verwandtes Strukturierungsverfahren ist das so genannte „Nadeln“. Beim Nadelverfahren werden zylinderförmige Stäbe (die Nadeln) mit abgerundeten Köpfen unabhängig voneinander in Richtung Werkstückoberfläche beschleunigt. Die Nadeln können sich in einer Führung bewegen und treffen daher gerichtet auf die Werkstückoberfläche auf. Ein Beispiel für ein Nadelgerät zeigt **Abbildung 5.13**.

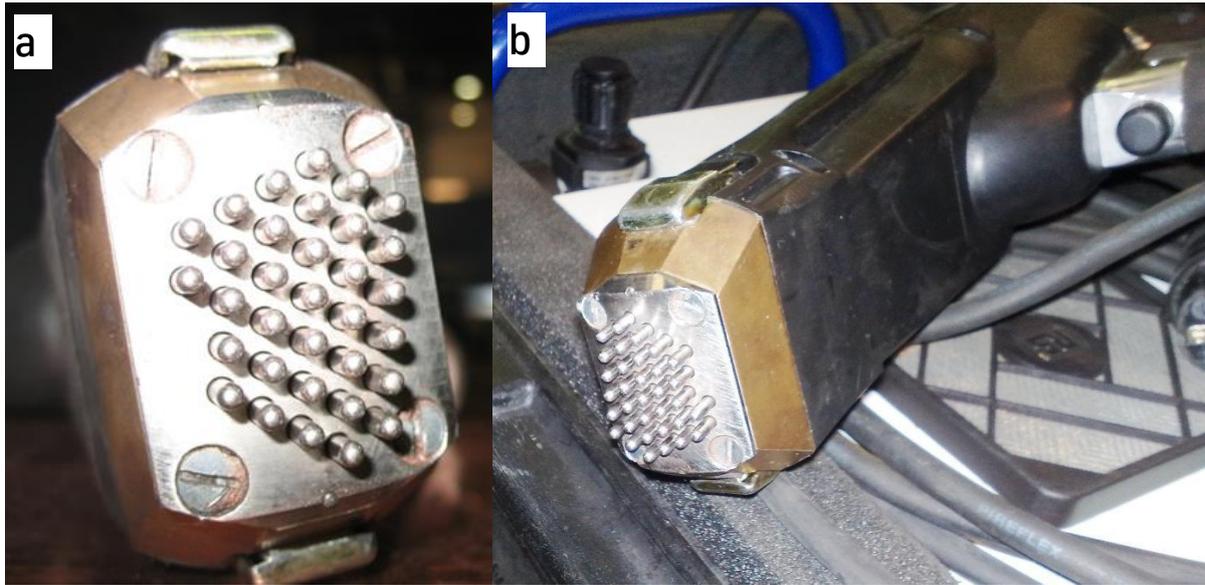


Abbildung 5.13: Beispiel für ein Nadelgerät: Nadelkopf (a) und Nadelpistole (b) [SONA15].

Beim Auftreffen der Stäbe auf die Oberfläche wird das Material ins Werkstückinnere hinein verdichtet, sodass ein Krater entsteht. Größe und Tiefe eines solchen Kraters sind im Wesentlichen abhängig vom Impuls der Nadeln und von der Häufigkeit, mit der die Nadeln auf dieselbe Stelle auftreffen. Auch beim Nadelverfahren reagiert das zu bearbeitende Material mit einer Kombination aus Verformung und Verdichtung.

Die durch das Nadelverfahren entstehende Oberflächentopografie ist im Gegensatz zur Topografie des Kugelstrahlens und des thermischen Spritzens eher von abgeschlossenen, tiefen Kratern geprägt (vgl. **Abbildung 5.14**). Diese Krater können eine Tiefe von über 300 μm besitzen und als Füllräume wirken. Die Rauheit kann zum Kugelstrahlen vergleichbare Werte in der Größenordnung von $R_a = 28 \mu\text{m} - 36 \mu\text{m}$; $R_z = 95 \mu\text{m} - 122 \mu\text{m}$; und $R_{\text{max}} = 169 \mu\text{m}$ annehmen.

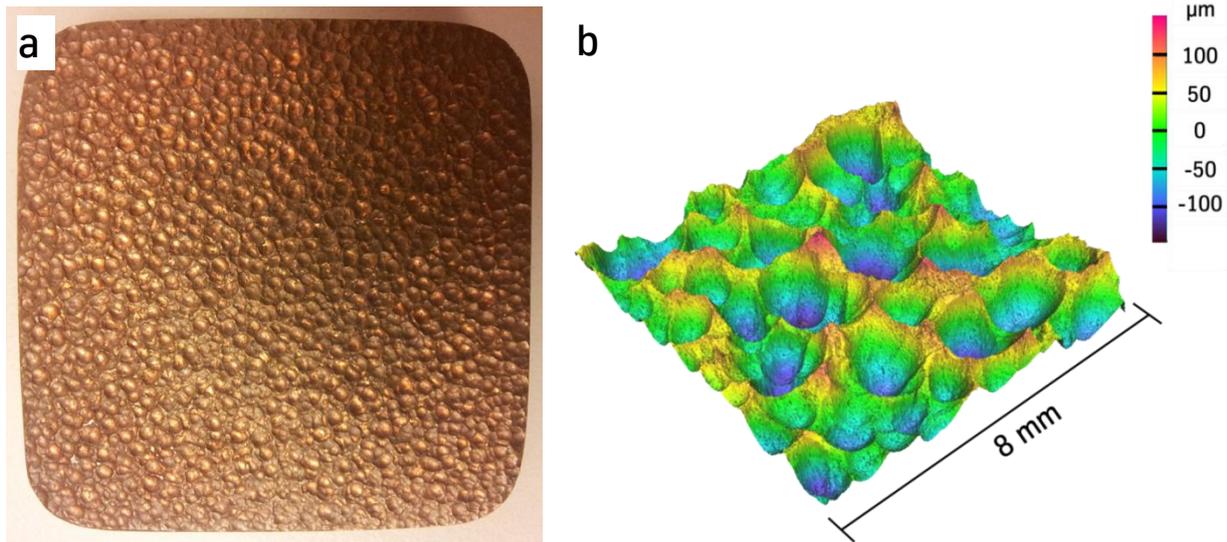


Abbildung 5.14: Oberflächentopografie einer genadelten Oberfläche. Realbild (a) und Schema (b).

5.3.4 Herstellungs- und prozesstechnische Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Oberflächenstruktur

Im vorangegangenen Kapitel wurden die in dieser Arbeit verwendeten, relevanten Oberflächentopografien vorgestellt. Es ist wichtig, das Risiko eines Produktionsabbruchs für den Gießprozess gering zu halten. Basierend auf den bisher gewonnenen Erkenntnissen ist es möglich, eine Priorisierung der ausgewählten Oberflächentopografien vorzunehmen.

Durch Beschichtung aufgetragene Oberflächenstruktur:

Hinsichtlich der Prozesssicherheit ist die Verwendung einer thermischen Spritzschicht im Vergleich zu den anderen hier vorgestellten Verfahren mit dem höchsten Risiko zu bewerten. Die Spritzschicht ist nicht untrennbar mit dem Kokillenmaterial verbunden. Somit besteht die Gefahr, dass sich die thermische Spritzschicht während des Gießprozesses ablösen kann. Dies kann wiederum beispielsweise zu Verunreinigungen im Stahl und somit final zu Oberflächenfehlern führen oder eine Reaktion der Spritzschicht mit der Gießschlacke hervorrufen. Letzteres könnte sogar zur Veränderung

des Schlackenverhaltens führen und einen Durchbruch verursachen. Zudem ist die Herstellung und der dauerhafte Erhalt einer Spritzschicht aufwändiger als die Bearbeitung der Kokillenoberfläche mit den anderen hier vorgestellten Oberflächenmodifikationen.

Mechanisch abgetragene Rillenstruktur:

Die Modifikation der Kokille durch eine mechanisch abgetragene Rillenstruktur bietet im Vergleich zur Beschichtungstechnik höheres Potenzial für einen Einsatz im betrieblichen Gießprozess. Die deterministische Struktur kann zu potenziellen Stellen für die Bildung von Längsrissen in der Strangschale führen (vgl. Kapitel 5.3.3.2). Gleichzeitig besteht das Risiko der Kokillenschädigung (Kerbwirkung im Rillengrund). Daher wird von einer Verwendung der Rillenstruktur abgesehen.

Durch Materialverdichtung erzeugte Oberflächenstruktur:

Das höchste Potenzial für einen betrieblichen Einsatz besitzt eine Kokille, deren Oberflächen durch ein Verfahren bearbeitet wurden, das das Material verdichtet. Die prozesstechnischen Risiken sind moderat. Wichtig ist unter anderem, dass die Struktur nicht zu einer Beeinträchtigung der Funktion der Schmalseiten führt. Dies bedeutet, dass die Struktur nicht zu stark ausgeprägt sein darf. Insbesondere für die maximale Rautiefe (R_{max}) sind hier Obergrenzen vorzugeben.

Durch die Materialverdichtung besteht zudem die Möglichkeit, dass die Struktur auch durch den Einsatzzyklus der Kokille hindurch erhalten bleibt. Das Nadelverfahren bietet gegenüber dem Kugelstrahlen das höhere Potenzial bezüglich der Haltbarkeit der Struktur. Dies liegt darin begründet, dass die Nadelstruktur durch Vertiefungen geprägt ist, während die durch Kugelstrahlen erzeugte Struktur eher durch Spitzen charakterisiert wird (vgl. **Abbildung 5.15**). Die Spitzen der Kugelstrahlstruktur werden durch den Gießprozess abgetragen, während die durch Täler charakterisierte Nadelstruktur erhalten bleibt.

Oberflächenmodifikationen der Kokillenplatte

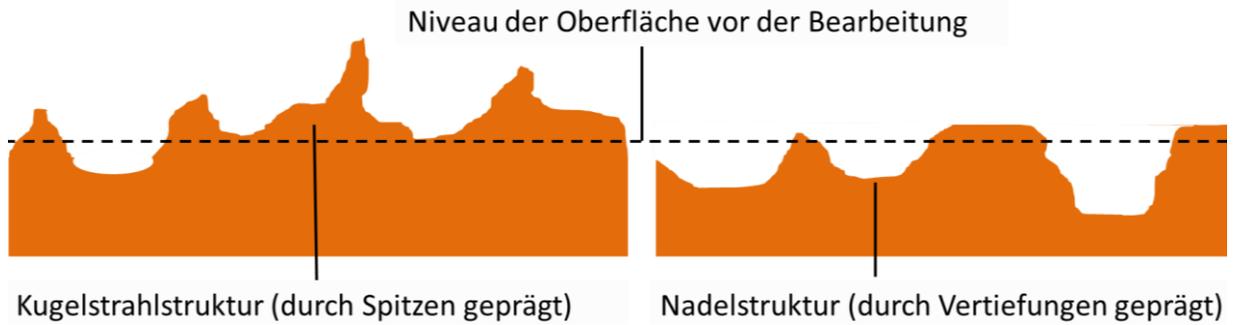


Abbildung 5.15: Vergleich der Oberflächentopografien basierend auf Kugelstrahl- oder Nadelverfahren (schematisch).

Dieser Unterschied kann gegebenenfalls durch die Wahl einer geeigneteren Kugelstrahlmischung oder weitere technische Änderungen in der Kugelstrahltechnik aufgehoben werden. Ein weiteres Argument, das Nadelverfahren dem Kugelstrahlverfahren gegenüber vorzuziehen, ist die einfachere Handhabung im seriellen Prozess.

Daher wird aus prozesstechnischen und herstellungstechnischen Gründen das Nadelverfahren für einen betrieblichen Einsatz ausgewählt. Die Eignung der vorgestellten Verfahren hinsichtlich des betrieblichen Einsatzes wird abschließend nochmals in **Tabelle 5.1** zusammengefasst.

Verfahren zur Oberflächenmodifikation	Haltbarkeit	Negative Beeinflussung der Produktqualität	Eignung für betrieblichen Einsatz
Materialverdichtendes Verfahren (Nadeln)	gut	unwahrscheinlich	1
Materialverdichtendes Verfahren (Kugelstrahlen)	mäßig	unwahrscheinlich	2
Mechanisch abtragendes Verfahren	gut	wahrscheinlich	3
Beschichtungsverfahren	schlecht	sehr wahrscheinlich	4

Tabelle 5.1: Priorisierung der vorgestellten Oberflächenmodifikationen.

6 Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

6.1 Vorüberlegungen zur Versuchsreihe

Die Oberfläche der Kokillenmodifikation beruht auf den Erkenntnissen, die bereits in der Bandgusstechnologie angewandt worden sind. Für Bandgussverfahren wurden in der Vergangenheit verschiedene Oberflächenmodifikationen untersucht [NAGY05], [SCHM06], [SCHM08], [HÖCK17]. Die **Abbildung 6.1** zeigt, dass eine steigende Oberflächenrauheit bei den hohen Wärmestromdichten des Bandgießens die Risslänge auf Warmbändern reduziert.

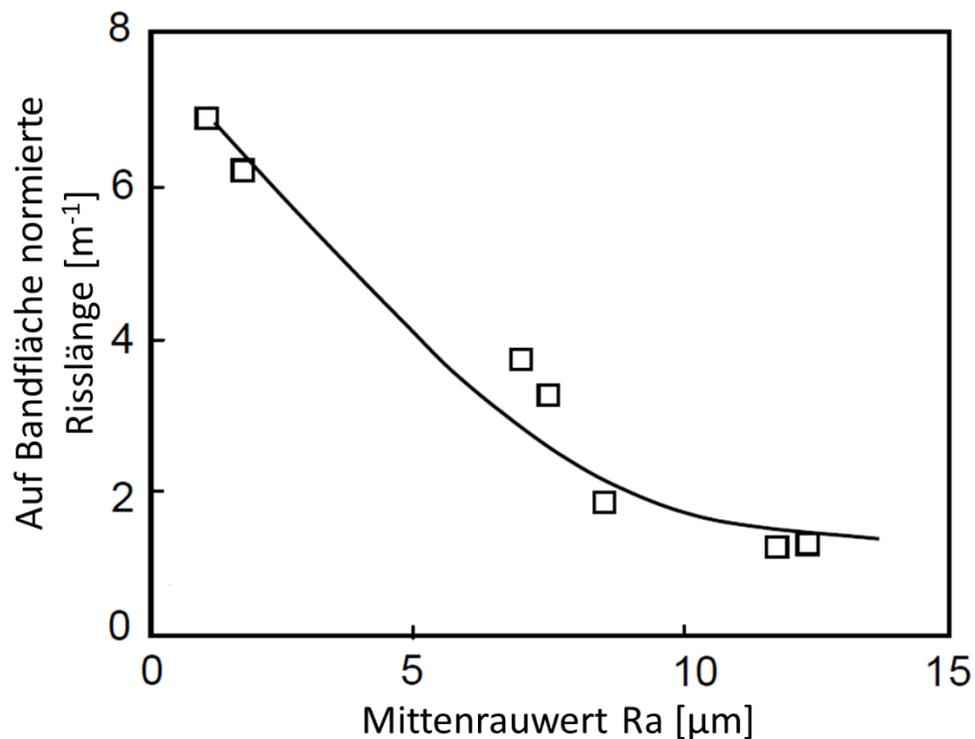


Abbildung 6.1: Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Risslänge des Warmbandes nach [CHOO01].

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

Als eine mögliche Ursache für die Reduktion der Risslänge wird hierbei die wärmestromhemmende Wirkung des Gases genannt, das zur Schmelzeninertisierung eingesetzt wird. Das Gas lagert sich je nach Rauheit der Oberfläche in die sich bildenden Zwischenräume zwischen Kokille und Schmelze ein und reduziert so den abzuführenden Wärmestrom [WANS06], [CHOO01]. Gleichzeitig befinden sich lediglich die Spitzen der rauen Oberfläche mit der Schmelze in Kontakt, sodass der Wärmestrom über geringere Kontaktflächen übertragen werden kann und die absolut abgeführte Wärme zusätzlich vermindert wird.

Des Weiteren wurden Untersuchungen zu Wärmeabfuhr aus Aluminiumschmelzen für Blockgusskokillen durchgeführt [TAHA01]. Unter anderem wurde in dieser Versuchsreihe auch der Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Wärmestrom untersucht. Die **Abbildung 6.2** zeigt, dass der Wärmeübergangskoeffizient mit steigender Rauheit signifikant abnimmt.

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

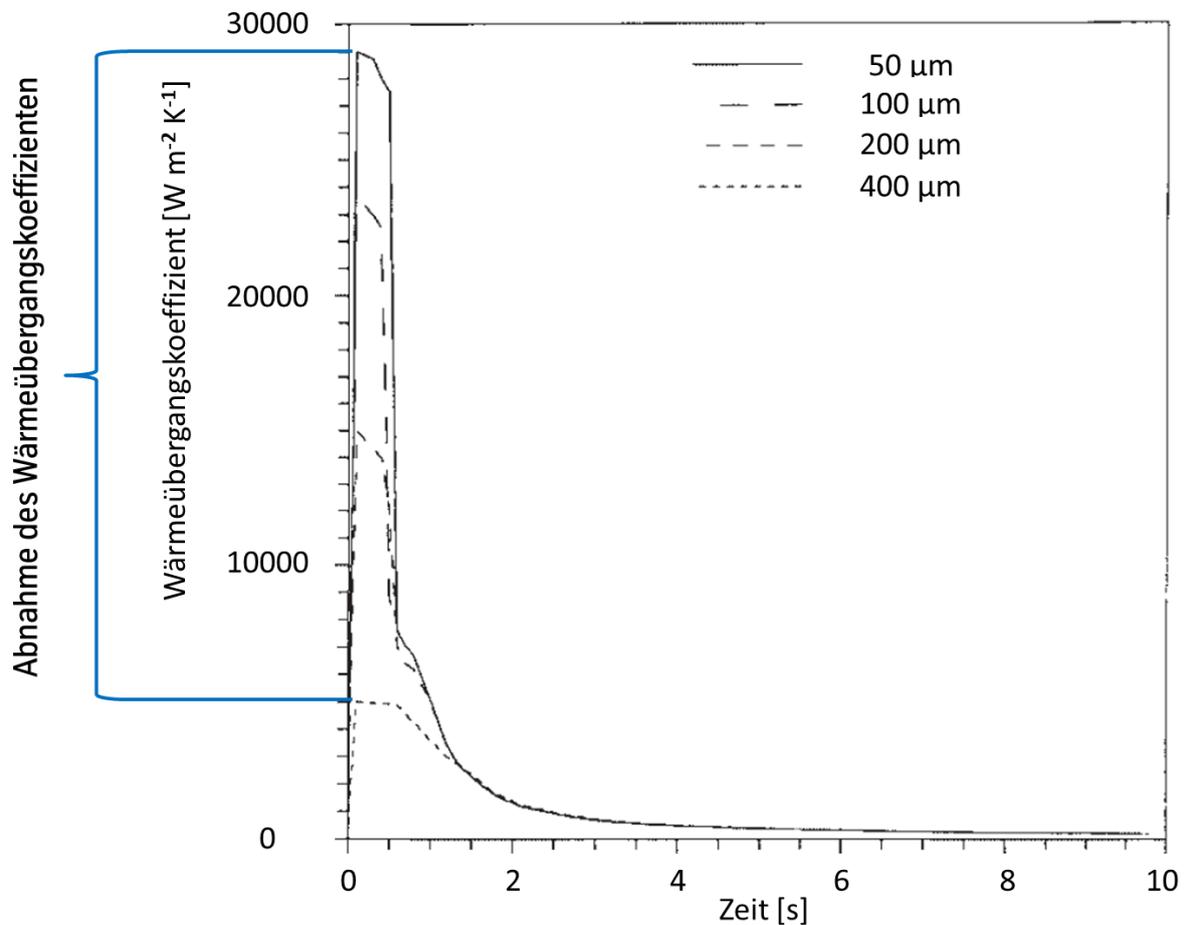


Abbildung 6.2: Veränderung des Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit nach [TAHA01].

Sowohl aus Abbildung 6.1 als auch aus Abbildung 6.2 wird deutlich, dass eine gesteigerte Oberflächenrauheit den Wärmestrom reduziert. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die reduzierende Wirkung einer ausgeprägten Oberflächenrauheit auf den Wärmestrom zu nutzen. Dazu wird die Wirkungsweise der Oberflächenstruktur in dem hier vorliegenden Anwendungsfall zur Reduktion des lokalen Wärmestroms untersucht. Des Weiteren werden Erkenntnisse zur Dimensionierung der Oberflächenrauheit gewonnen. Hierzu dient die nachfolgend beschriebene Versuchsreihe.

6.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Ziel des Versuchsaufbaus ist es, die in Kapitel 6.1 beschriebene Wirkung der Oberflächenstruktur auf den Wärmestrom zu überprüfen. Dazu wird eine Versuchsreihe mit Kontaktversuchen durchgeführt, wobei Oberflächenstrukturen, Kokillmaterialien und die Rauheit variiert werden.

Zu Beginn des Versuches wird ein Stahlblock (Abmessung: 100 mm x 100 mm x 100 mm) in einem Glühofen auf eine Kerntemperatur von 950 °C erhitzt. Die Kerntemperatur wird mit einem Thermoelement (Typ K) gemessen, welches von der Unterseite 50 mm tief in den Block eingeführt und verkörnt ist. Bei einer Temperatur von 950 °C werden die gleichen Tendenzen zur Wirkungsweise der Oberflächenstruktur hin gezeigt, ohne die Messergebnisse durch Strahlungsanteile zu verfälschen oder das Messequipment thermisch stark zu belasten.

Ist die gewünschte Kerntemperatur erreicht, wird der Stahlblock dem Ofen entnommen und auf ein Podest gestellt. Anschließend wird je nach Versuch ein Kupferblock (Abmessung: 100 mm x 100 mm x 30 mm) mit einer der Oberflächenmodifikationen, die in Kapitel 5.3.3 vorgestellt wurden, auf den Stahlblock aufgesetzt und für 180 s mit diesem in Kontakt gebracht. Auch in den Kupferblock ist ein Thermoelement Typ K eingebracht.

Nach der Kontaktzeit von 180 s wird der Kupferblock vom Stahlblock entfernt und in ein Wasserbad (Inhalt 4000 cm³) getaucht. Die Temperatur des Wassers wird mit einem Temperaturfühler Pt100 der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH gemessen. Haben sich die Temperaturen des Kupferblocks und des Wassers angeglichen, ist der Versuch beendet. Je höher die final erreichte Wassertemperatur ist, desto mehr Wärme wurde von dem Kupferblock in das Wasser übertragen und desto höher war der vom Stahlblock in den Kupferblock übertragene Wärmestrom. Alle Temperaturen werden pro Sekunde von einem Datenlogger mit der Typbezeichnung „Almemo 2590 3S“ der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH mitgeschrieben. Eine grafische Darstellung des Versuches ist **Abbildung 6.3** zu entnehmen.

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen
auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

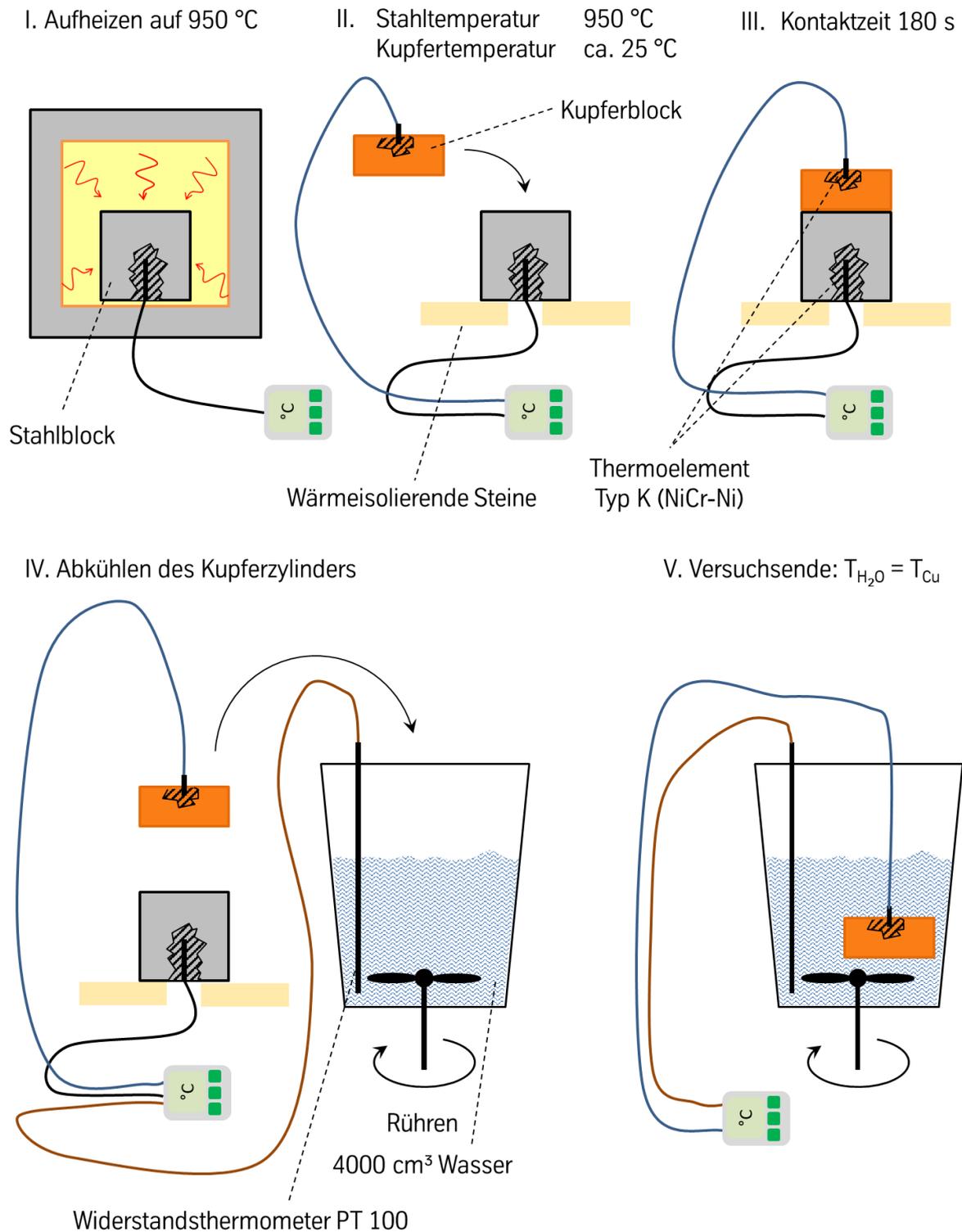


Abbildung 6.3: Vergleich der sich einstellenden Wärmeströme bei unterschiedlichen Oberflächentopografien (bezogen auf die Masse des Kupferblocks).

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

Vorab wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, in denen zusätzlich Schlacke zwischen den Kupfer- und den Stahlblock gegeben wurde, um den Versuch möglichst identisch zum Gießprozess zu gestalten. In den Versuchsreihen unter Verwendung von Schlacke waren das Erstarrungsverhalten (kristallin oder amorph) sowie die Schlackenfilmdicke nicht zu kontrollieren. Die Versuchsreihen lieferten keine auf die Wirkungsweise der Oberflächentopografie hin auswertbaren und plausiblen Ergebnisse. Um die Wirkungsweise der Oberflächentopografie analysieren zu können, wurde daher eine Vereinfachung der Versuche gewählt und auf die Verwendung von Schlacke verzichtet. Die Versuche bilden somit Tendenzen zur Wirkungsweise der Oberflächentopografie ab.

Die Wärmeübertragung durch Luft unterscheidet sich von der Wärmeübertragung durch Schlacke. Der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient von Luft λ_{Luft} wird in der Literatur bei der hier vorliegenden Temperatur von 1000 °C in einem Bereich von 0,0081 W/mK angegeben [KNEE08], [VDI10]. Der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient von Schlacke $\lambda_{\text{Schlacke}}$ liegt bei einer Temperatur von circa 1300 °C je nach herangezogener Literatur zwischen 0,55 W/mK und 2,79 W/mK [KANG12], [HASE12]. Die Wärmeleitfähigkeit der jeweiligen Schlacke ist stark von ihrer chemischen Zusammensetzung abhängig, was die Varianz der in der Literatur dokumentierten Messwerte erklärt.

Da die Bedingungen der Versuchsreihe von den Bedingungen innerhalb der Kokille abweichen, sind die Erkenntnisse nicht unmittelbar auf den Stranggießprozess übertragbar. Zudem werden entscheidende Kriterien wie beispielsweise Kokillenoszillation oder Schlackenfilmdicke nicht berücksichtigt. Vielmehr sind diese Kontaktversuche als erste Näherung für die Auswahl beziehungsweise Auslegung einer Oberflächentopografie für eine betriebliche Versuchsreihe zu sehen. Dadurch sollen qualitativ Unterschiede in den Wärmeübertragungseigenschaften verschiedener Oberflächentopografien herausgearbeitet werden.

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

6.3 Ergebnisse der Versuchsreihen

Die in Kapitel 6.2 beschriebene Versuchsreihe wurde gemäß **Tabelle 6.1** für die Referenztopographie der angeschliffenen Kokillenplatte sowie für die einzelnen Oberflächenmodifikationen durchgeführt.

Oberflächenmodifikation	Vertreter in der Versuchsreihe
Referenzoberfläche	Angeschliffene Oberfläche (vgl. Kapitel 5.3.1)
Materialverdichtendes Verfahren	Nadelstruktur (vgl. Kapitel 5.3.3.3)
Mechanisch abtragendes Verfahren	Rillenstruktur (vgl. Kapitel 5.3.3.2)
Beschichtungsverfahren	Thermische Spritzschicht (vgl. Kapitel 5.3.3.1)

Tabelle 6.1: Verwendete Oberflächenmodifikationen für die Versuchsreihe.

6.3.1 Vergleich des Wärmestromverhaltens der Oberflächenmodifikation gegenüber der bisher eingesetzten Oberflächenstruktur

Innerhalb der Versuchsreihe wurde der Kupferblock, wie in Kapitel 6.2 beschrieben für 180 s mit dem 950 °C heißen Stahlblock in Kontakt gebracht und anschließend im Wasser abgekühlt. Die Erwärmung des Kupferblockes und des Wassers in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit (hier exemplarisch: genadelte Struktur mit unterschiedlicher Rauheit) zeigt **Abbildung 6.4**.

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

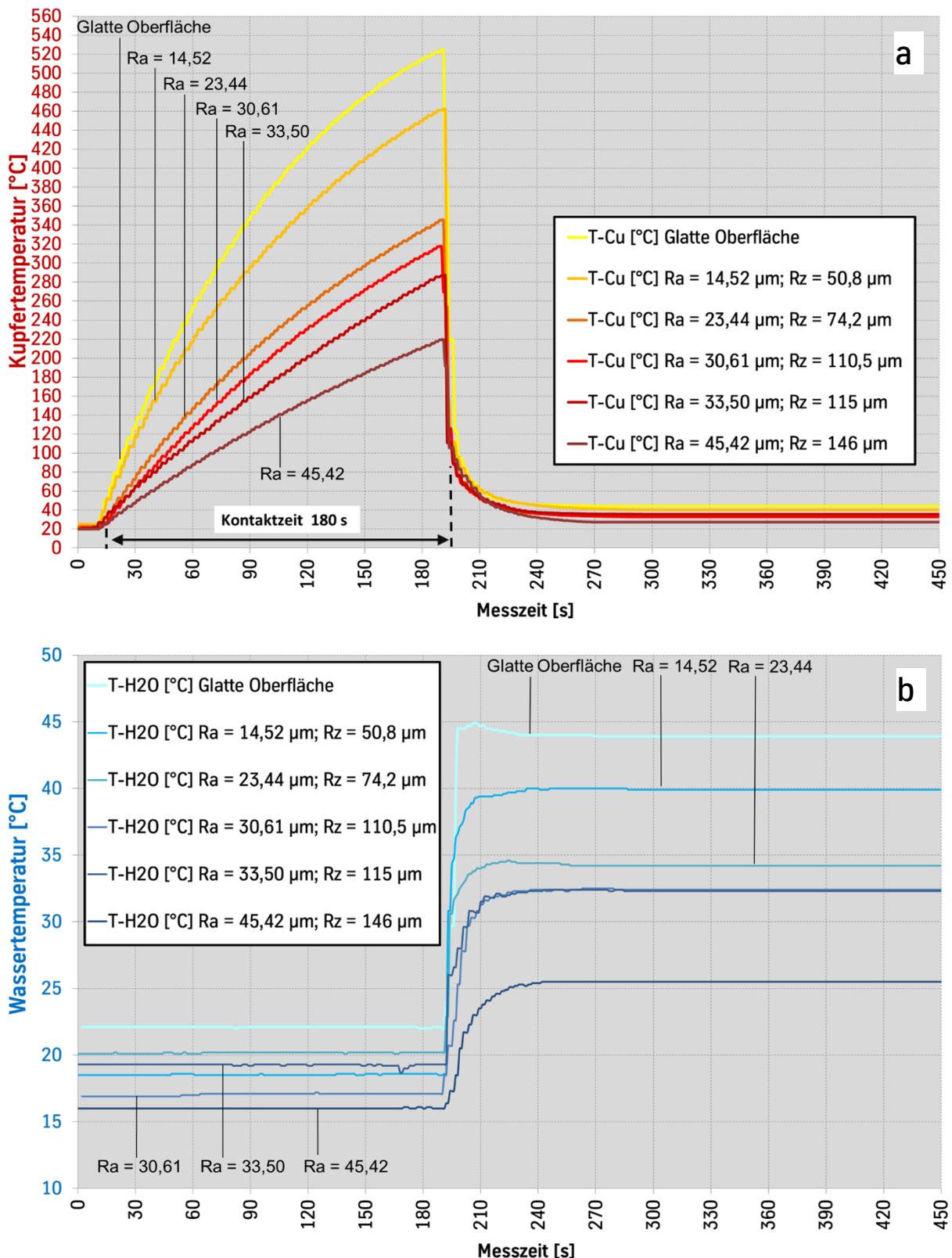


Abbildung 6.4: Temperaturverläufe während der Kontaktversuche unter Verwendung unterschiedlicher Rauheiten. Temperaturverläufe des Kupferblockes (a) sowie zur Kontrolle: Temperaturverläufe des Wassers (b).

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

Im oberen Bild ist die Erwärmung des Kupferblockes innerhalb der ausgewählten Kontaktzeit von 180 s zu erkennen. Anschließend wurde der Kupferblock durch das Wasser auf Temperaturen zwischen 20 °C und 50 °C abgeschreckt. Das untere Bild zeigt die Erwärmung des Wassers (Volumen: 4000 cm³) durch den Kontakt mit dem heißen Kupferblock. Durch die Messung der Kupfer- und Wassertemperaturen werden die übertragenen Wärmemengen redundant ermittelt.

Im Vergleich zur „glatten“ Oberfläche ($R_a = 1,77 \mu\text{m} - 2,42 \mu\text{m}$, $R_z = 8,48 \mu\text{m} - 14,63 \mu\text{m}$) führt eine Zunahme der Rauheit zu immer geringeren Kupfertemperaturen. Da die Kontaktzeit bei allen Versuchen konstant war, ist eine geringere Temperaturzunahme des Kupferblocks beziehungsweise des Wassers somit als ein Indiz für einen geringeren Wärmestrom zu sehen. Die Ursache für den geringeren Wärmestrom liegt in der geringeren Kontaktfläche zwischen Kupfer- und Stahlblock. Je größer die Rauheit der Oberflächen ist, desto größer ist der zwischen den Flächen erzeugte Wärmewiderstand. Ein weiterer Faktor ist die Gewichtskraft, des Kupferblocks, die auf die Kontaktfläche wirkt. Das Gewicht der verwendeten Kupferblöcke beträgt 250 g je Block. Gemäß Gleichung 6.1 ergibt sich somit eine Gewichtskraft von 2,45 N.

$$F_G = m * g \quad (\text{Gleichung 6.1})$$

mit $F_G =$ Gewichtskraft [N]
 $m =$ Masse [kg]
 $g =$ Erdbeschleunigung 9,81 m/s²

Die Ergebnisse der Versuchsreihe bezüglich des Wärmestromverhaltens werden in Form einer massenbezogenen Wärmeaufnahmezeit, hier „Kontaktwärmestrom“ genannt, dargestellt. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen auf diesen Kontaktwärmestrom zeigt **Abbildung 6.5**. Die Wärmeaufnahmezeit wird auf die Masse des Kupferblockes bezogen. Eine Darstellung bezogen auf den flächenspezifischen Wärmestrom ist nicht direkt möglich, da die wärmeübertragenden Flächen der stochastischen Oberflächenmodifikationen nicht ohne Weiteres bestimmt werden können. Es ist deutlich zu erkennen, dass alle untersuchten Oberflächentopografien zu einer Verringerung des Kontaktwärmestroms führen.

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

Die Streuung der Messwerte ist auf die unterschiedlich große, wärmeübertragende Fläche zurückzuführen. Nur einzelne „Spitzen“ der Topografie im Kupferblock berühren die Oberfläche des Stahlblocks. Durch diese „Spitzen“ wird die Wärme hauptsächlich übertragen.

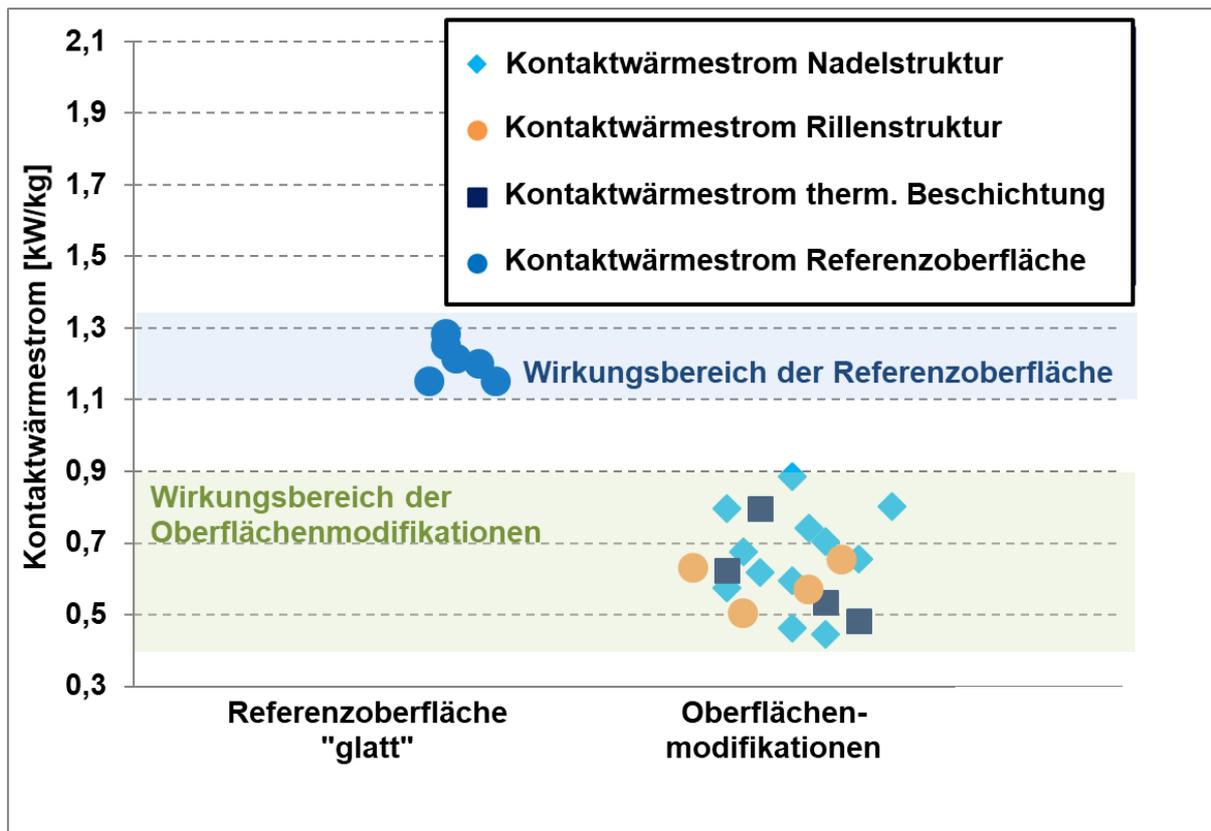


Abbildung 6.5: Vergleich des sich einstellenden Kontaktwärmestroms bei Verwendung unterschiedlicher Oberflächentopografien (bezogen auf die Masse des Kupferblocks).

Der sich einstellenden Kontaktwärmeströme der jeweiligen Topografien unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Ausgehend von den Erkenntnissen aus Kapitel 5.3.4 wird daher für alle weiteren Versuchsreihen sowie für die betrieblichen Kokilleneinsätze zukünftig die Oberflächenmodifikation basierend auf Materialverdichtung eingesetzt. Das Nadelverfahren zeigt das größte Potenzial bezüglich der Relation von Aufwand (in Form von Herstellungsaufwand) und Nutzen (in Form von Reaktion auf den Wärmestrom). Daher wird für die weitere Vorgehensweise ausschließlich das

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

Nadelverfahren betrachtet. Im Folgenden soll anhand der Nadelstruktur überprüft werden, ob ein Grenzwert für den Wärmestrom existiert.

6.3.2 Auswirkungen der Oberflächenrauheit auf den Kontaktwärmestrom

Nachdem die Entscheidung der potenziellen Oberflächenmodifikation durch die zukünftige Verwendung des Nadelverfahrens getroffen worden ist, soll analysiert werden, ob ein Grenzwert der Rauheit existiert, bei dessen Überschreitung keine weitere signifikante Reduktion des Kontaktwärmestroms mehr zu erwarten ist.

Die Auswirkungen der Oberflächenrauheit auf den Kontaktwärmestrom sind im Ansatz in Abbildung 6.4 zu erkennen. Die nach 180 s erreichten Maxima der Temperaturkurven der Kupferblöcke und des Wassers werden mit steigender Rauheit geringer (Abbildung 6.6). Die in **Abbildung 6.6** gekennzeichneten Bereiche 1 (grün) und 2 (orange) zeigen die Änderung der Maximaltemperatur aufgrund des sich verändernden Mittenrauhwertes (dT/dRa). Im Bereich 1 nimmt die Veränderung der Maximaltemperatur einen Wert von $dT/dRa = -7,1 \text{ °C}/\mu\text{m}$ an. Der Wert in Bereich 2 beträgt $dT/dRa = -5,7 \text{ °C}/\mu\text{m}$. Daraus folgt, dass sich auch die Temperaturunterschiede zwischen den erreichten Maxima mit zunehmender Rauheit reduzieren.

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

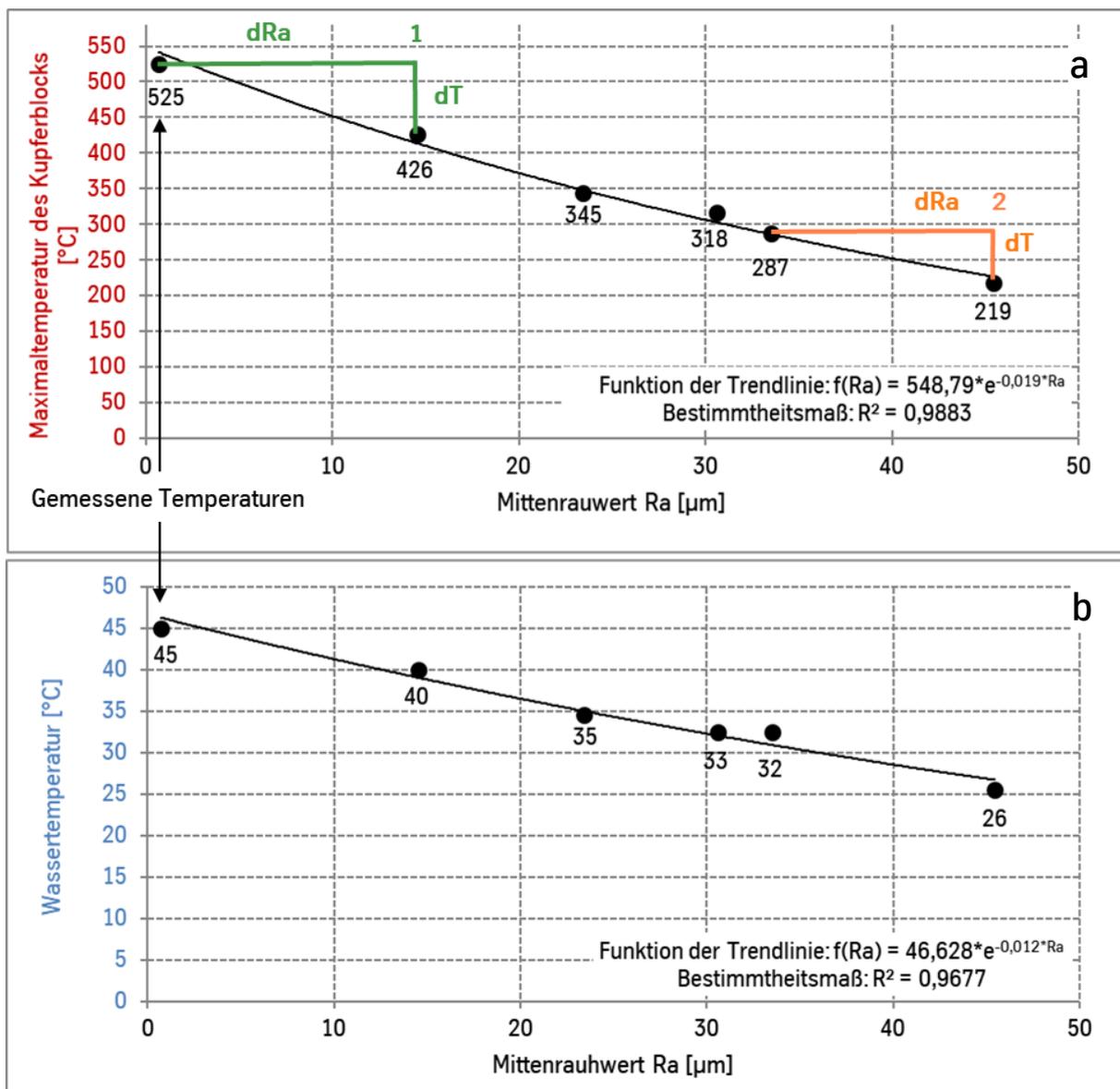


Abbildung 6.6: Gemessene Maximaltemperaturen der Kupferblöcke (a) und des Wassers (b) in Abhängigkeit des Mittenrauhwertes Ra. Weitere Erkenntnis: Die Änderung der Temperatur im Bereich 1 (grün) ist größer als die Änderung der Temperatur im Bereich 2 (orange).

Um die im vorherigen Absatz beschriebenen Aussagen zu stützen, wurde nachfolgend eine weitere Versuchsreihe analog zu dem in Kapitel 6.2 beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt. Diesmal wurde zwischen den Kupferblöcken die Rauheit und somit die Ausprägung der Struktur variiert, um den potenziellen Einfluss der Rauheit auf den Wärmestrom detaillierter zu untersuchen.

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in **Abbildung 6.7** dargestellt. Um die Ergebnisse gemäß Kapitel 5.1 hinreichend genau zu beschreiben, ist die Veränderung der Rauheit sowohl anhand des Mittenrauwertes R_a als auch anhand der gemittelten Rautiefe R_z dokumentiert.

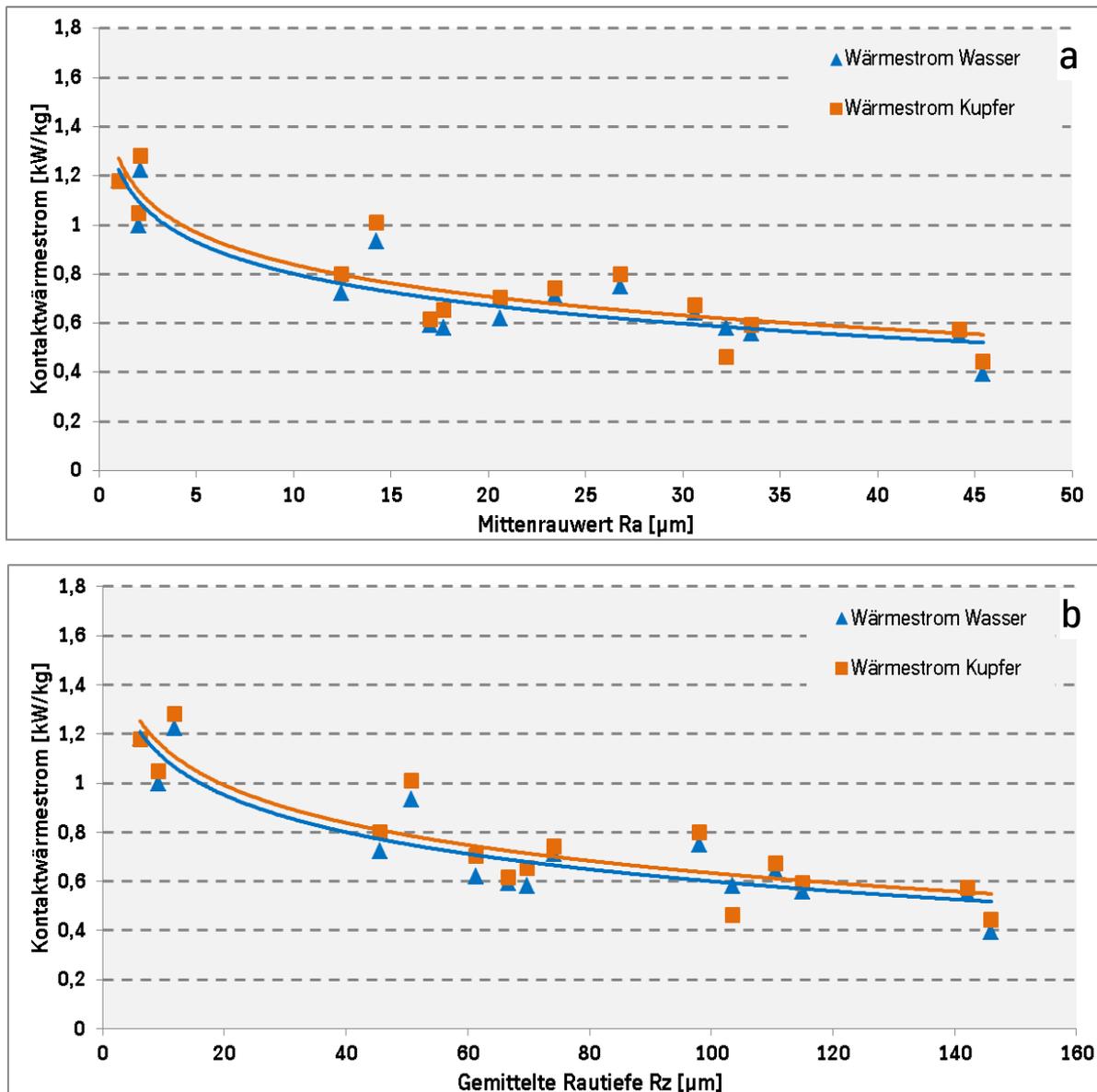


Abbildung 6.7: Verlauf des Kontaktwärmestroms (bezogen auf den Kupferblock), in Abhängigkeit des Mittenrauwertes R_a (a) und der gemittelten Rautiefe R_z (b). „Wärmestrom Wasser“ = basierend auf der Temperaturerhöhung des Wassers, „Wärmestrom Kupfer“ = basierend auf der Temperaturerhöhung des Kupferblocks.

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

Es zeigt sich, dass sich im Kupferblock mit angeschliffener, nahezu glatter Oberfläche ($R_a = 2 \mu\text{m} - 4 \mu\text{m}$, $R_z = 8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$) ein Kontaktwärmestrom zwischen 1,0 kW/kg und 1,3 kW/kg einstellt. Für die mittels Nadler strukturierten Oberflächen stellt sich – in Abhängigkeit von der Rauheit – ein Kontaktwärmestrom von 0,6 kW/kg bis 0,8 kW/kg ein. Eine Strukturierung der Kupferoberflächen hat demnach innerhalb der Versuchsreihe eine Verringerung des Kontaktwärmestroms von 20 % bis 50 % zur Folge, wobei weiterhin berücksichtigt werden muss, dass innerhalb der Versuchsreihe Luft (und nicht Schlacke) als wärmedämmendes Medium zwischen den Oberflächen gewählt wurde.

Während eine Erhöhung des Mittenrauwertes R_a von ca. 10 μm auf ca. 20 μm (bzw. der gemittelten Rautiefe R_z von ca. 40 μm auf ca. 75 μm) eine Reduktion des Kontaktwärmestroms von 0,2 kW/kg zur Folge hat, ist bei einer vergleichbaren Erhöhung von $R_a \approx 32 \mu\text{m}$ auf $R_a \approx 45 \mu\text{m}$ (bzw. $R_z \approx 110 \mu\text{m}$ auf $R_z \approx 140 \mu\text{m}$) nahezu kein Unterschied des Kontaktwärmestroms mehr festzustellen (vgl. Abbildung 6.7).

Diese Feststellung lässt die Schlussfolgerung zu, dass sich der Kontaktwärmestrom einem Grenzwert zwischen 0,4 kW/kg und 0,6 kW/kg annähert. Eine weitere Erhöhung der Oberflächenrauheit wirkt sich somit eher zu Lasten der Prozesssicherheit als zu Gunsten der Reduzierung des Kontaktwärmestroms aus und ist somit nicht sinnvoll.

6.4 Zwischenfazit zur Modifikation der Kokillenoberfläche

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Maßnahme der Oberflächenstrukturierung den Kontaktwärmestrom im Vergleich zur konventionell bearbeiteten Kokillenoberfläche deutlich herabsetzt. Dabei erfolgt die Wärmestromreduktion durch die Oberflächenmodifikationen (Rillenstruktur, thermische Spritzschicht, Nadelstruktur) unter den Rahmenbedingungen der Laborversuche in gleichem Maße. Aufgrund der in Tabelle 5.1 (s. Seite 58) vorgestellten Priorisierung wurde das Nadelverfahren für die nachfolgenden betrieblichen Versuchsreihen ausgewählt.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass sich der Kontaktwärmestrom bei Steigerung der Rauheit einem Grenzwert annähert, sodass eine weitere Steigerung der Rauheit auf

Laboruntersuchungen zur Oberflächenstruktur unter Fokussierung der Auswirkungen
auf den in der Kokille vorherrschenden Wärmestrom

Basis dieser Versuche nicht notwendig ist. Sofern jedoch für den betrieblichen Einsatz (unter Anwesenheit von Schlacke) eine stärkere Rauheit benötigt wird, muss dies berücksichtigt werden. Für den Einsatz der Struktur auf der Kokillenoberfläche wird zunächst folgender Bereich für die Rauheitskenngrößen definiert:

- Mittenrauwert (Ra): $20 \mu\text{m} < \text{Ra} < 45 \mu\text{m}$
- Gemittelte Rautiefe (Rz): $60 \mu\text{m} < \text{Rz} < 140 \mu\text{m}$

Im nachfolgenden Kapitel wird die durch die Laborversuche definierte Nadelstruktur auf die Kokillenoberfläche übertragen und der Einsatz der modifizierten Kokillen unter Betriebsbedingungen erprobt.

7 Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

Basierend auf den Laborversuchen wurde eine Reihe von betrieblichen Kokillen mit der ausgewählten Struktur versehen. Die Struktur wurde auf die Oberflächen von Kokillen der Dünnbrammengießanlage der thyssenkrupp Steel Europe AG aufgebracht.

In Dünnbrammengießanlagen können die Wärmestromdichten innerhalb von Kokillen Werte zwischen 6 - 8 MW/m² annehmen. In den konventionellen Stranggussanlagen betragen die Wärmestromdichten 1 - 2 MW/m². Wie bereits in Kapitel 4.3 erwähnt, tritt vor allem bei hohen Wärmeniveaus eine Inhomogenität in der Erstarrung auf. Von daher wird bei Dünnbrammengießanlagen ein größerer Einfluss auf den Wärmestrom und auf die damit verbundene Oberflächenqualität erwartet.

Des Weiteren ermöglichen die vergleichsweise kurzen Einsatz- und Überarbeitungszeiten (2 - 7 Tage) der Kokillen an den Dünnbrammengießanlagen eine schnellere Rückmeldung auf zuvor eingestellte Oberflächenparameter. Darüber hinaus liegt die Wahl der Dünnbrammengießanlage darin begründet, dass bei Dünnbrammengießanlagen die in dieser Arbeit betrachteten Schalenfehler nach ihrer Entstehung nicht mehr repariert werden können (vgl. Kapitel 3).

7.1 Festlegung des Arbeitsbereiches für Betriebsversuche

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Laborversuchen (vgl. Kapitel 6) wurden nun Versuche mit oberflächenstrukturierten Kokillen an der Gießwalzanlage durchgeführt. Die Herausforderung besteht darin, einerseits die Kokille mit einer Oberflächenmodifikation zu versehen und damit einen Eingriff in den Gießprozess zu tätigen. Andererseits darf die Prozesssicherheit aber nicht gefährdet werden. Daher soll lediglich der Bereich der Kokillen bearbeitet werden, der für eine Veränderung des Wärmestroms und somit für eine potenzielle Fehlerbehebung unabdingbar ist.

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

Durch die Betrachtung der Erstarrung (vgl. Abbildung 4.2) werden vor allem zwei wesentliche Aspekte ersichtlich. Zum einen löst sich der Strang im Verlauf der Erstarrung und Abkühlung aufgrund von Materialkontraktion von der Kokillenwand ab. Zum anderen wird aufgrund der hohen Temperaturdifferenz der größte Wärmestrom bei Erstarrungsbeginn im Bereich des Gießspiegels abgeführt. Daher ist es sinnvoll, nicht die komplette Oberfläche zu strukturieren, sondern die Struktur im Bereich des Gießspiegels einzubringen.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Kokille während des Gießens oszilliert und dass die Füllhöhe der Schmelze in der Kokille aus betrieblichen Gründen variieren kann. Demnach werden Größe und Position des strukturierten Bereiches so ausgelegt, dass die Struktur die Grenze zwischen Kupfer- und Nickelschicht überlappt und gleichzeitig ausreichend Spielraum für variierende Gießspiegelhöhen zur Verfügung steht.

Der zu strukturierende Bereich auf den Kokillen der Gießwalzanlage ist in **Abbildung 7.1** dargestellt. Die Kokille wird über die komplette Breite strukturiert. Dies bedeutet, dass die Struktur auch im so genannten Verstellbereich (Verfahrbereich der Schmalseiten zur Einstellung der Gießbreite) vorhanden ist.

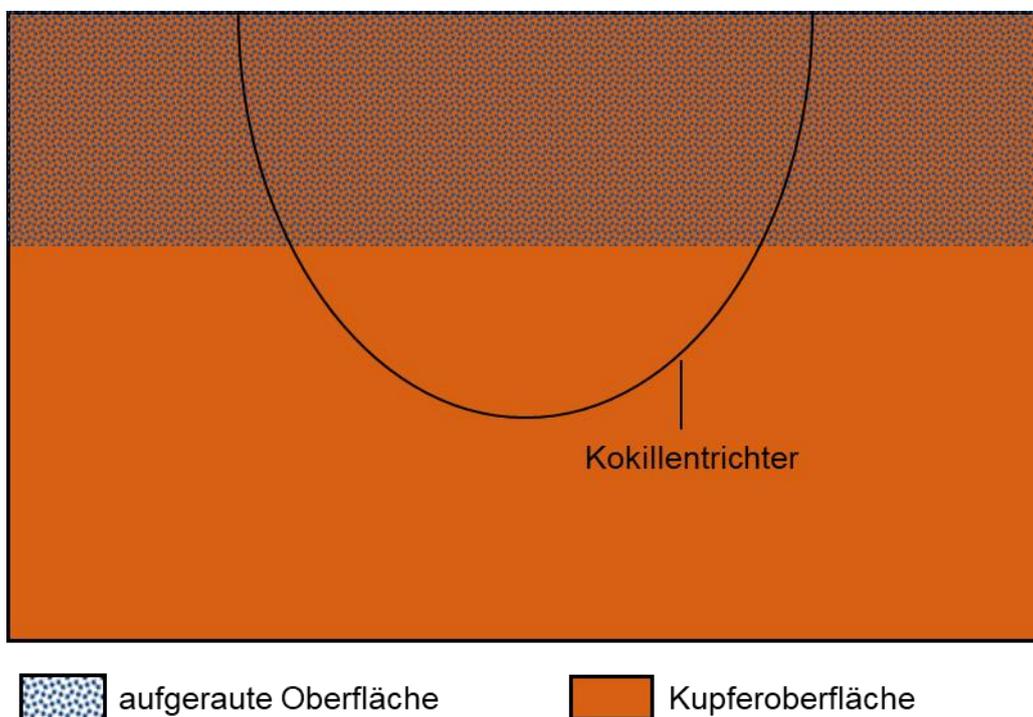


Abbildung 7.1: Strukturierter Bereich einer GWA - Kokillenbreitseite.

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

Aus dem normalen Produktionsprozess an der Dünnbrammengießanlage der thyssenkrupp Steel Europe AG ist bekannt, dass bei einem Spaltmaß von mehr als 400 μm Undichtigkeiten zwischen den Breit- und Schmalseiten entstehen. In diese Undichtigkeiten läuft Schmelze und erstarrt. Die erstarrende Strangschale verklemmt sich in dem Spalt zwischen Breit- und Schmalseite, reißt auf und führt zum Ende des laufenden Gießprozesses.

Um die Abdichtungsprobleme zwischen Schmal- und Breitseite zu vermeiden und ein Auslaufen der Schmelze aus der Kokille zu verhindern, darf ein Spaltmaß von 400 μm daher nicht überschritten werden. Somit darf auch die maximale Rautiefe R_{max} diesen Wert nicht überschreiten. Zusätzlich werden die Kokillenschmalseiten aus dem Grund der Spaltbildung nicht bearbeitet, um die Prozesssicherheit nicht zu gefährden.

Nachdem der Arbeitsbereich auf der Kokillenplatte nun definiert wurde, wird im nachfolgenden Kapitel erläutert, wie die Struktur in die Kokillenoberfläche eingebracht wird.

7.2 Herstellung der Oberflächenstruktur

Die für die Modifikation ausgewählten Kokillenplatten wurden händisch durch Einsatz eines Nadelgerätes mit der Oberflächenstruktur versehen. Das verwendete Nadelgerät ist in **Abbildung 7.2** gezeigt.

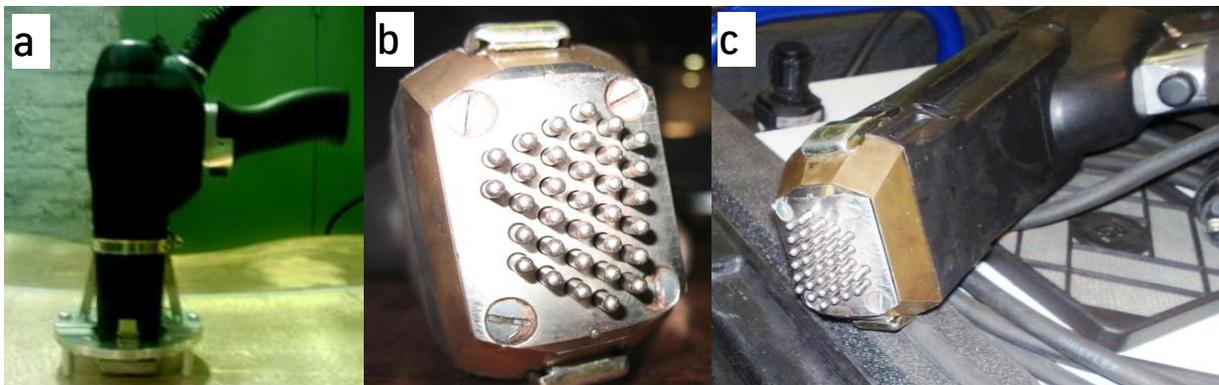


Abbildung 7.2: Beispiel für ein Nadelgerät: Nadelpistole inklusive Abstandshalter aber ohne Steuergerät (a), Nadelkopf (b) und Nadelpistole (c) [SONA15].

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

Das gezeigte Nadelgerät wird in kreisförmigen Bewegungen im vorgesehenen Bereich über die Kokillenplatte geführt. Währenddessen treffen die beschleunigten Nadeln (vgl. Abbildung 7.2, Mitte) auf die Kokillenoberfläche auf.

Um einen gleichbleibenden Abstand zur Kokillenoberfläche zu gewährleisten, wird das Nadelgerät in einem Abstandshalter geführt (vgl. Abbildung 7.2, a). Realbild und Oberflächentopografie der durch diese Vorgehensweise erstellten Struktur sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Die manuelle Bearbeitung einer Kokillenplatte mittels Nadelgerät dauert circa acht Stunden. Um eine hohe Reproduzierbarkeit der Struktur und eine schnellere Bearbeitung der Oberfläche in einer späteren seriellen Fertigung zu gewährleisten, ist es sinnvoll, eine automatisierte Bearbeitungsmaschine auf Basis des Nadlers zu verwenden.

7.3 Vorbereitung der modifizierten Kokillen

Es stehen für die Strukturierung 60 Breitseitenplatten zur Verfügung von denen je zwei in einer der zwölf Kokillen der Gießwalzanlage eingebaut werden können. Das Schema, nach dem die Kokillen bearbeitet werden, ist in **Abbildung 7.3** gezeigt. Ist die Kokille in die Gießanlage eingebaut, wird sie nach jedem Produktionsprozess im eingebauten Zustand gesäubert.

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

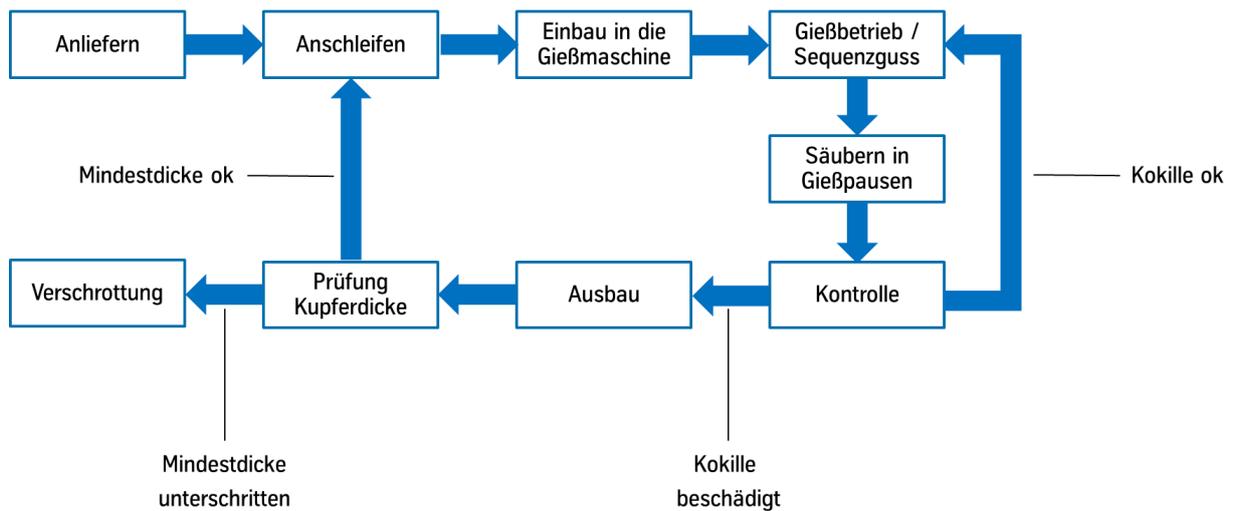


Abbildung 7.3: Prozessschema zu Vorbereitung und Einsatz der konventionellen Gießkokillen.

Solange die Kokille in der Gießmaschine eingebaut ist, ist eine Bearbeitung der Kokillenoberfläche mit dem Nadelgerät nicht möglich. Dies bedeutet, dass die Struktur vor Einbau der Kokille in die Gießmaschine in die Kokillenoberfläche eingebracht werden muss. Den Zeitpunkt der Strukturierung zeigt die **Abbildung 7.4**.

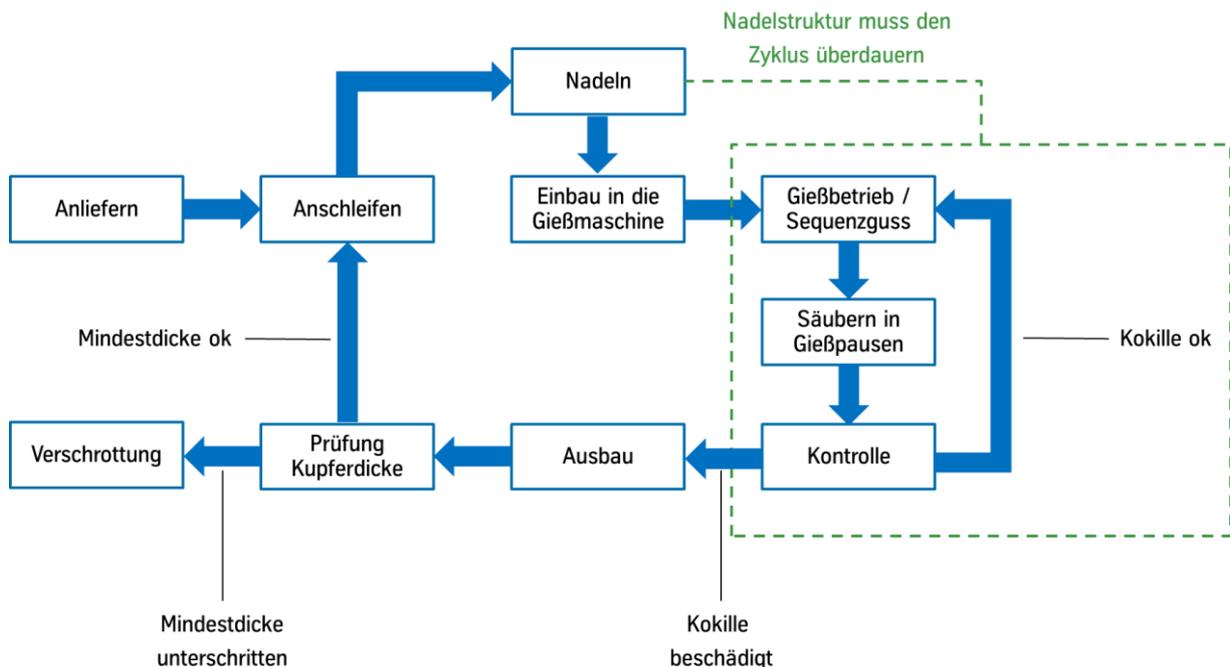


Abbildung 7.4: Prozessschema zu Vorbereitung und Einsatz der Gießkokillen für Betriebsversuche.

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

Um den Effekt der Struktur zu erhalten ist es notwendig, dass diese über den Einsatzzyklus der Kokille funktionsfähig bleibt. Für den betrieblichen Einsatz stehen sieben Breitseitenplattenpaare mit einer Nadelstruktur zur Verfügung. Die Breitseiten wurde gemäß Abbildung 7.1 bearbeitet. Ein Beispiel einer bearbeiteten Breitseite zeigt **Abbildung 7.5**.

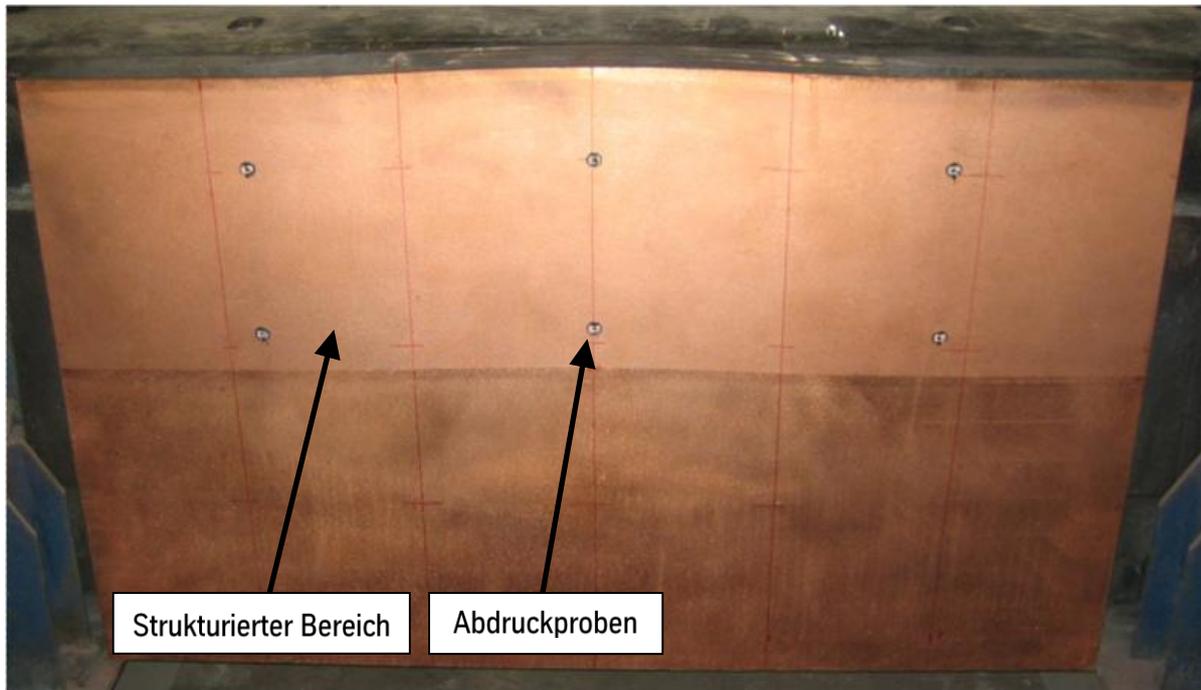


Abbildung 7.5: Strukturierte Kokillenbreitseite aus der Gießwalzanlage.

Um erste Rauheitskennwerte einer jeden Kokillenoberfläche zu erhalten, wurden je Breitseite sechs Abdruckproben genommen und mit der in Kapitel 5.2 vorgestellten Konfokalsensorik vermessen. **Tabelle 7.1** zeigt eine Aufstellung der ersten mit der Nadelstruktur modifizierten Gießkokillen sowie die Durchschnittswerte der Rauheitsparameter.

Die Rauheitsparameter der jeweiligen Versuchskokillen bilden den in Kapitel 6.4 festgelegten Bereich gut ab. Anschließend wurden diese sieben Kokillen in die Gießanlage eingebaut und gemäß dem Schema aus Abbildung 7.4 verwendet.

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter
betrieblichen Bedingungen

Kokillenplatte	Festseite / Losseite	Ra [µm]	Rz [µm]	Rmax [µm]
1	Festseite	39,6	129,7	231,5
	Losseite	50,8	177,7	312,3
2	Festseite	24,8	83,0	164,8
	Losseite	11,4	66,2	111,7
3	Festseite	28,7	99,5	163,0
	Losseite	29,5	101,0	151,0
4	Festseite	36,9	120,9	210,5
	Losseite	39,2	128,4	197,7
5	Festseite	31,1	109,4	203,7
	Losseite	10,0	50,4	171,5
6	Festseite	41,7	139,1	225,8
	Losseite	45,6	156,7	238,5
7	Festseite	38,1	126,0	190,9
	Losseite	40,7	134,1	207,3

Tabelle 7.1: Aufstellung und Rauheitsparameter der ersten Versuchskokillen (Fest- / Losseite = Breitseiten der Kokille (vgl. Abbildung 2.2, Seite 5)).

7.4 Einfluss der Kokillen mit Oberflächenmodifikation auf den Gießprozess und auf Wärmestrom in der Kokille

Die in Kapitel 7.3 vorgestellten Kokillen wurden im Anschluss an ihre Modifikation in der Dünnbrammengießanlage eingesetzt. Prozesstechnisch wurden keine Auffälligkeiten festgestellt. Der Gießprozess lief unverändert ruhig. Während der laufenden Produktion wurden unter Zuhilfenahme von zwei unmittelbar hintereinander befind-

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

lichen Thermoelemente die sich in jedem Bereich der Kokille ergebenden Temperaturen für verschiedene Stahlmarken gemessen. Ein Schema zur Anordnung der Thermoelemente zeigt **Abbildung 7.6**.

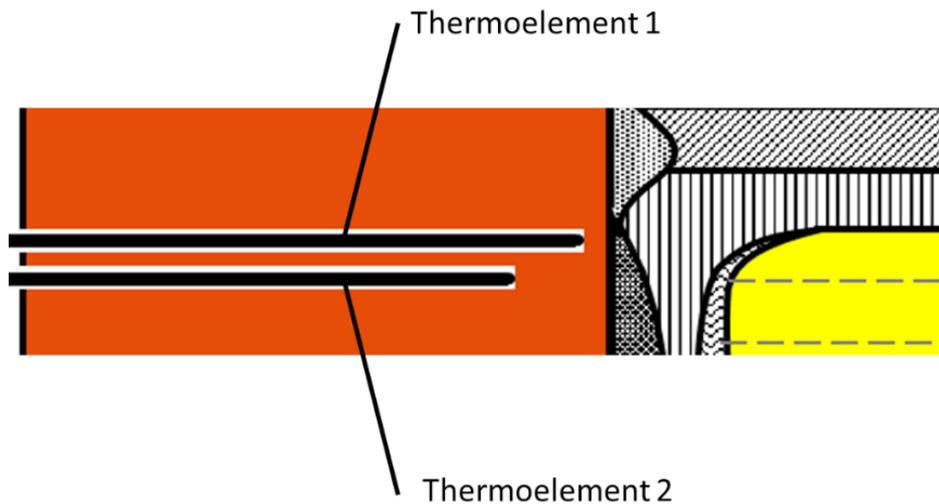


Abbildung 7.6: Schematische Anordnung der Thermoelemente zur Messung des Wärmestroms.

Gemäß Gleichung 4.3 ist es mit den vorhandenen Thermoelementmessungen und Materialkenngrößen möglich, auf den vorherrschenden Wärmestrom zurückzurechnen. Identische Messungen sind an der Gießwalzanlage der thyssenkrupp Steel Europe AG bei Voraktivitäten zu dieser Arbeit durchgeführt worden. Für diese Untersuchungen wurde eine Oberflächenstruktur über das dem Nadelverfahren verwandte Kugelstrahlverfahren auf die Kokillenoberfläche aufgebracht. Die Auswirkungen dieser Oberflächenmodifikation auf den Wärmestrom wird in **Abbildung 7.7** gezeigt.

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

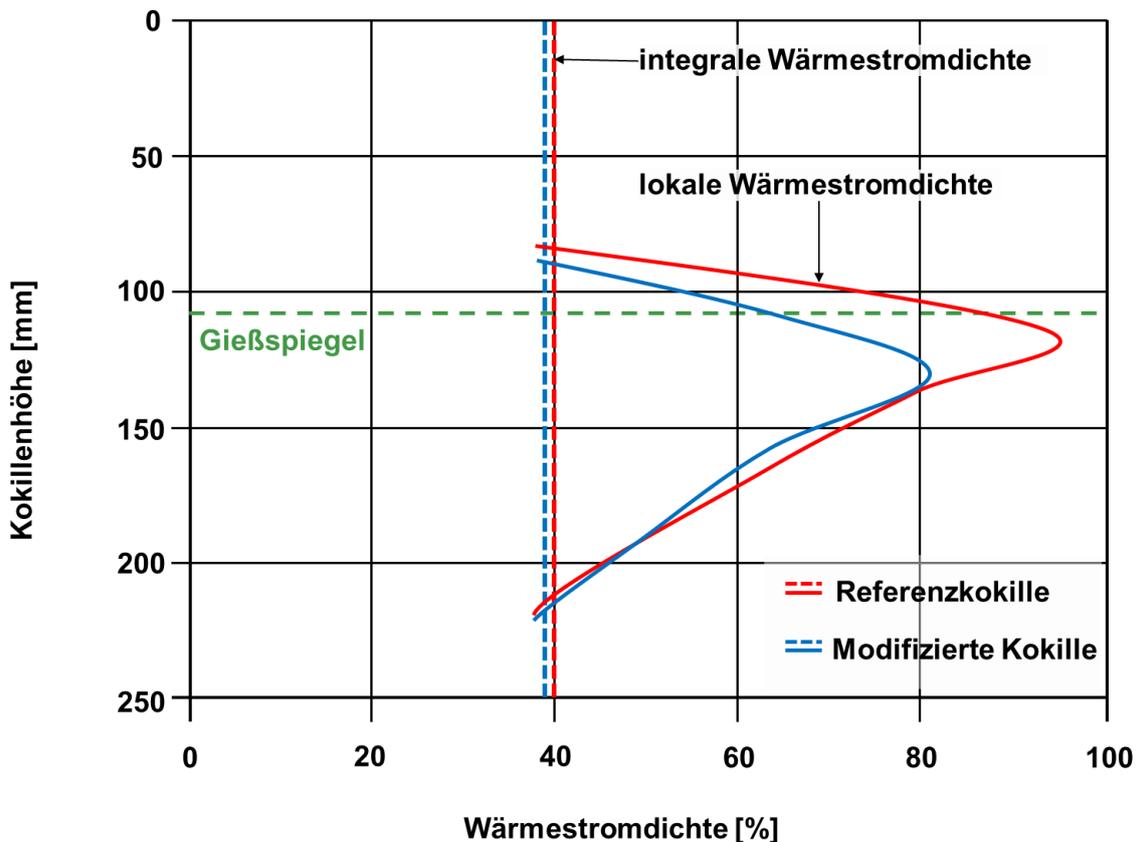


Abbildung 7.7: Auswirkungen der Oberflächenmodifikation auf den Wärmestrom (nach [GIRG02]).

In Abbildung 7.7 werden die integrale und die lokale Wärmestromdichte für eine Referenzkokille und für eine modifizierte Kokille gezeigt. Die Kurven der lokalen Wärmestromdichte zeigen den tatsächlichen Verlauf des Wärmestroms sowie die Ausbildung der Wärmestromspitze. Die integrale Wärmestromdichte verdeutlicht die insgesamt aus der Kokille abgeführte Wärme. Zunächst wird die lokale Wärmestromdichte betrachtet.

Die Spitze des Wärmestroms bildet sich im Gießspiegelbereich circa 125mm unterhalb der Kokillenoberkante aus. Für die Wärmestromspitze, die bei Einsatz der Oberflächenmodifikation entsteht, gilt, dass die lokale Wärmestromdichte gegenüber der Referenz um mehr als 15% reduziert wird.

Das Maximum der Wärmestromdichte bei Einsatz einer Versuchskokille bildet sich gegenüber der Referenzkokille auf die Kokillenhöhe bezogen um einige Zentimeter

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

tiefer aus. Dies bedeutet, dass die Erstarrungswärme im Vergleich zur Referenz später freigesetzt wird, was insgesamt auf eine gemäßigte Erstarrung hindeutet.

Die integrale Wärmestromdichte wird durch die Oberflächenmodifikation nur geringfügig beeinflusst. Die Auswertung der Messergebnisse ergab eine Reduktion des Wärmestroms von circa 4-5% gegenüber der Referenzkokille. Daher bleibt der globale Wärmehaushalt der Kokille nahezu unverändert und eine sichere Erstarrung der Strangschale ist gewährleistet.

Eine Homogenisierung der in Kapitel 4.2 angesprochenen Volatilität des Wärmestroms konnte in den Thermoelementkurven nicht eindeutig beobachtet werden. Die Positionierung der Thermoelemente in vergleichsweise weitem Abstand kann unter anderem als Ursache dafür angesehen werden, dass eine Änderung der Volatilität im Wärmestrom nicht festgestellt werden konnte. Derzeit sind die Anordnung der Thermoelemente und die damit verbundene „Unschärfe“ der Temperaturmessung über die Kokillenbreite der Geometrie der Kokillenplatten geschuldet. Neue Forschungsansätze mit hochauflösenden Kokillen (HD Molds), die faseroptische Temperaturmessung verwenden, könnten an dieser Stelle ein genaueres Bild erzeugen ([LIEF13]).

Abbildung 7.8 zeigt ein Bild der Oberflächenmodifikation nach dem Einsatz der Kokille. Es ist deutlich zu erkennen, dass feste Schlackenreste die Täler der Oberflächenstruktur auffüllen. Dies bedeutet, dass die Schlacke die Täler während des Einsatzes gefüllt hat. Unter diesen Voraussetzungen ist davon auszugehen, dass die Volatilität des Wärmestroms aufgrund der lokal dickeren Schlackenfilms nicht unbeeinträchtigt bleibt.

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen



Abbildung 7.8: Makroaufnahme der Oberflächenmodifikation nach Einsatz der Kokille.

Die Auswirkungen der Struktur auf den Wärmestrom in der Kokille sind jetzt bekannt. Im nachfolgenden Kapitel werden nun die Auswirkungen der Oberflächenstruktur auf die Haltbarkeit der Kokille betrachtet.

7.5 Haltbarkeit der Struktur und Auswirkung dieser auf die Kokillenstandzeit

Nachdem die Auswirkungen auf den Wärmestrom betrachtet wurden, gilt es, die Haltbarkeit der Struktur zu prüfen. Innerhalb der Kokille wirken aufgrund der Stahltemperatur, der freiwerdenden Erstarrungswärme des Stahls, der chemischen Aggressivität des Gießpulvers sowie der Relativbewegung zwischen Stahlstrang und Kokille starke thermische, chemische und mechanische Belastungen auf die Oberflächenstruktur ein. Diese führen über die Einsatzzeit einer Kokille zu einem sukzessiven Abbau der Oberflächenstruktur.

In der Regel wird an der Gießwalzanlage eine Kokille zum Gießen von mehreren tausend Tonnen Stahl eingesetzt, ehe diese standardmäßig ausgebaut und überarbeitet wird. Nach einer solchen „Kokillenreise“ wird die Kokille in einer Werkstatt überarbeitet und – im Falle strukturierter Kokillen – die Struktur neu eingebracht.

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

Die **Abbildung 7.9** zeigt die Struktur vor und nach einer Kokillenreise. Die Struktur-erhöhungen wurden mit der Zeit durch den Stranggießprozess abgetragen. Die Vertiefungen der Struktur sind jedoch weiterhin vorhanden, sodass selbst am Ende der Kokillenreise die Struktur funktional bleibt.

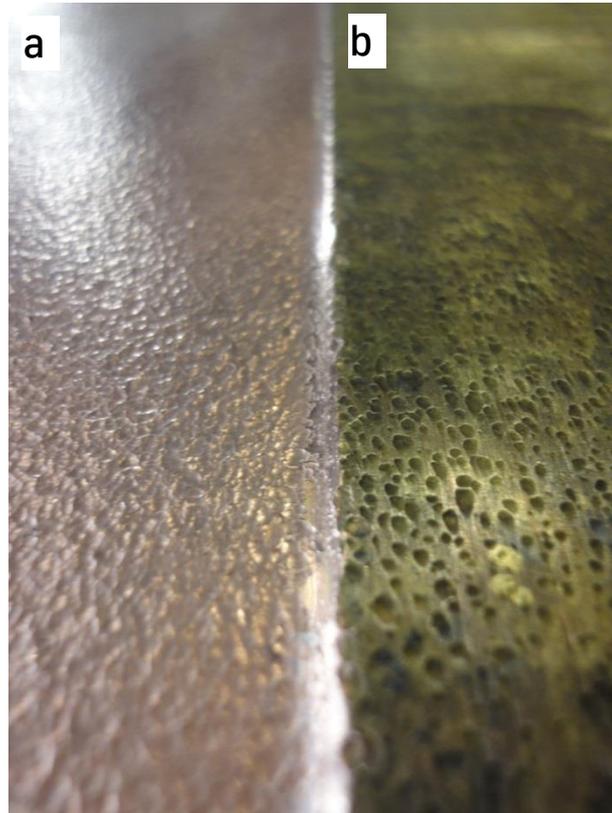


Abbildung 7.9: Oberflächenstruktur vor (a) und nach (b) der Kokillenreise.

Der Tabelle 7.1 ist zu entnehmen, dass unter anderem Kokillenplatten mit Nadelstrukturen versehen wurden, deren Rauheitsparameter an der oberen Grenze des für die Reduzierung des Wärmestroms physikalisch sinnvollen Bereiches lagen. Auch diese Kokillenplatten wurden in der Dünnbrammengießanlage eingesetzt und zeigten während des Gießprozesses zunächst keine Auffälligkeiten.

Die Kontrolle der Breitseitenplatten nach dem Gießprozess zeigte, dass eine Strukturierung mit zu hohen Rauheitsparametern bei den eingesetzten Kokillen zur Bildung von Riefen und Rissen im Bereich des Gießspiegels führt. Im konkreten Fall wurde die Kokille aufgrund dieser Riefen vorzeitig ausgebaut. Die Auswirkungen der zu intensiven Strukturierung sind in **Abbildung 7.10** dargestellt.

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

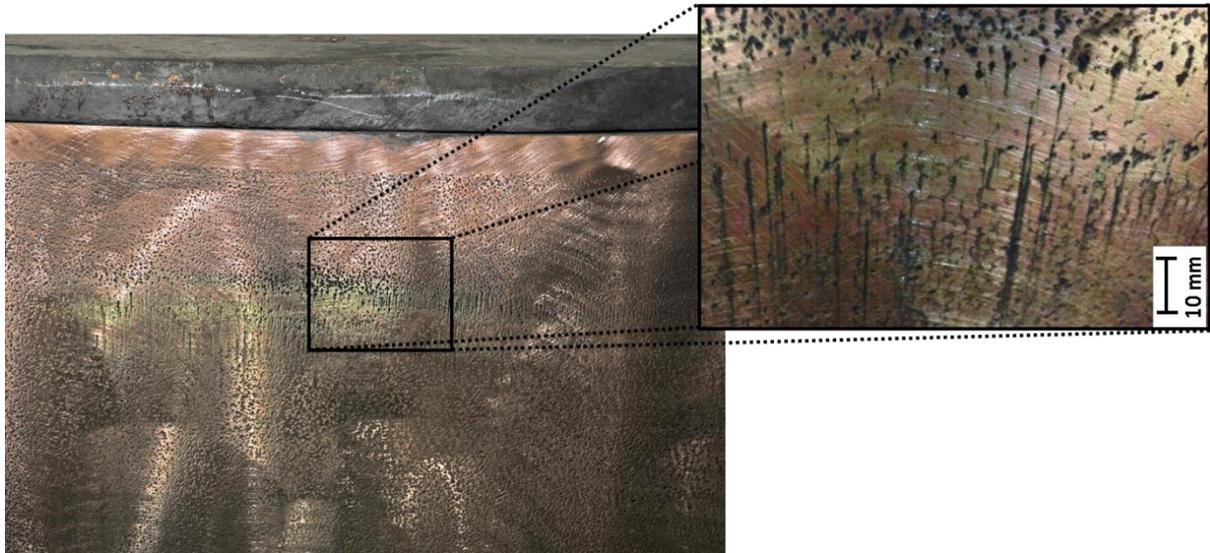


Abbildung 7.10: Oberflächenstruktur nach dem Gießprozess bei zu intensiv eingestellten Strukturierungsparametern.

Die entstandenen Riefen gehen von den Vertiefungen der Struktur aus. Ursache für diese Riefen sind Schlackepartikel, die sich in den großen Tälern der Struktur bilden (vgl. **Abbildung 7.11**). Diese Partikel werden rausgerissen und sind nun hart genug, die Riefe durch Abrasion zu erzeugen.

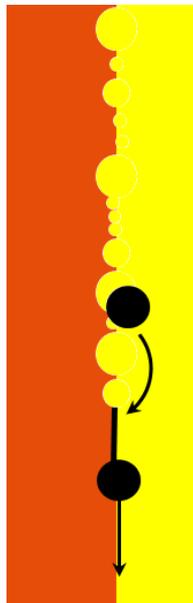


Abbildung 7.11: Riefenbildung durch ein Schlackenpartikel.

Die soeben beschriebenen Riefen verkürzen die Einsatzzeit der Kokille drastisch und beeinflussen die Produktqualität (beispielsweise durch Eintrag von Fremdkörpern) und

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

somit die Gießsicherheit negativ. Für die Kokillen mit geringeren Rauheitsparametern ist keine Riefenbildung beobachtet worden. Daher wurde eine Obergrenze für die Strukturparameter festgelegt, die in Kapitel 7.6 nochmals definiert wird.

7.6 Zwischenfazit zu den prozesstechnischen Erkenntnissen der betrieblichen Kokilleneinsätze und Neudefinition der Strukturparameter

Die in Kapitel 6 ausgewählte Oberflächenstruktur konnte erfolgreich auf die Gießkokillen der Dünnbrammengießanlage übertragen werden. Aus prozesstechnischen Gründen wurde entschieden, die Struktur im Bereich des Gießspiegels in die Oberfläche der Kokillenbreitseiten einzubringen.

Insgesamt wurden zunächst sieben modifizierte Kokillen eingesetzt. Die Prozesssicherheit wurde durch den Einsatz der Kokillen nicht beeinträchtigt.

Durch den Einsatz mehrerer oberflächenstrukturierter Kokillen an der Gießwalzanlage konnten neue Erkenntnisse bezüglich der Auswirkungen auf den Wärmestrom gewonnen werden. Erste Einsätze von strukturierten Kokillen zeigen eine lokale Reduktion der Wärmestromdichte im Bereich des Gießspiegels. Die integrale Wärmestromdichte und daraus folgend der globale Wärmehaushalt der Kokille werden durch die Strukturierung kaum beeinflusst.

Ebenfalls wurde die Haltbarkeit der Oberflächentopografie während des Prozesses überprüft. Auch nach der standardmäßigen Einsatzdauer der Kokille sind die Vertiefungen in der Oberflächenstruktur mit geeigneten Rauheitsparametern weiterhin erkennbar. Die Struktur überdauert somit eine Kokillenreise, bevor sie im Rahmen des standardmäßigen Serviceintervalls erneuert werden kann.

Eine zu intensive Strukturierung kann bei ungünstigen Gießbedingungen zu Beschädigungen der Kokille (Aufschieben und Ausbrechen des Kupfers) führen. Eine Gefährdung des Gießprozesses und der Produktqualität kann in einem solchen Fall nicht ausgeschlossen werden. Um die Struktur prozesssicher zu gestalten, wird daher

Serieneinsätze der Kokillen mit modifizierter Oberflächentopografie unter betrieblichen Bedingungen

eine Neudefinition der Grenzen für den Mittenrauwert Ra und die gemittelte Rautiefe Rz vorgenommen.

Zudem besteht die Gefahr, dass Undichtigkeiten zwischen Schmal- und Breitseiten der Kokillen auftreten, wenn ein Spaltmaß von 400 µm überschritten wird (vgl. Kapitel 7.1). Um die vom Kunden geforderte Breite des Produktes zu produzieren, können die Kokillenschmalseiten entlang der Kokillenbreitseiten bewegt werden. Es muss gewährleistet sein, dass trotz der Anwendung einer Oberflächenstruktur eine ungehinderte Bewegung der Schmalseiten gegeben ist. Daher wird auch für maximale Rautiefe ein zusätzlicher Grenzwert vorgegeben. Der Zielbereich der Kokillenstrukturierung wird abschließend wie folgt angepasst:

- Mittenrauwert (Ra): $20 \mu\text{m} < \text{Ra} < 45 \mu\text{m}$
- Gemittelte Rautiefe (Rz): $60 \mu\text{m} < \text{Rz} < 140 \mu\text{m}$
- Maximale Rautiefe (Rmax): $\text{Rmax} < 400 \mu\text{m}$

Die Rauheitsparameter für die Kokillenmodifikation sind somit hinreichend definiert. Unter Anwendung dieser Parameter werden im nachfolgenden Kapitel mehrere Kokillen in Rahmen von Kleinserien eingesetzt.

Der Fokus der Beobachtungen liegt dann auf den Auswirkungen des Einsatzes oberflächenmodifizierter Kokillen auf den Schalenbefall und somit auf der Produktqualität der in der Dünnbrammengießanlage erzeugten Stahlmarken. Die Ergebnisse dieser Beobachtungen werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

8 Einfluss der veränderten Kokillenoberflächenstruktur auf die Produktqualität

Im vorausgegangenen Kapitel wurde festgestellt, dass die Verwendung der Oberflächenmodifikation unter Einsatz des Nadelverfahrens prozesssicher ist und die Ausbildung des Wärmestroms positiv beeinflusst. Im Weiteren gilt es die Oberflächenqualität der erzeugten Warmbänder zu bewerten und den Einfluss der Modifikation auf die Qualität zu beschreiben.

Dazu werden im Laufe dieses Kapitels die zu betrachtenden Fehler aufgezeigt und die Vorgehensweise der Bewertung vorgestellt. Im weiteren Verlauf werden dann die Ergebnisse zur Entwicklung der Oberflächenqualität detailliert aufgezeigt, ehe abschließend eine kurze Zusammenfassung des Kapitels gegeben wird.

Vor der Betrachtung der relevanten Oberflächenfehler, sei an dieser Stelle erwähnt, dass sich die Modifikation der Kokillenoberfläche nicht begünstigend auf andere Warmbandfehler wie beispielsweise „Kantenrisse“ oder „Einschlüsse nichtmetallischer Materialien“ ausgewirkt hat. Ein signifikanter Einfluss auf die Detektionen anderer Fehlertypen konnte nicht nachgewiesen werden. Diese Aussage wird durch die Analysen des automatisierten Fehlererkennungssystems sowie durch die Rückmeldung der weiterverarbeitenden Betriebe bestätigt. Somit liegt die Vermutung nahe, dass lediglich der im nachfolgenden Kapitel betrachtete Schalenfehler durch die Oberflächenmodifikation beeinflusst wird.

8.1 Beschreibung des betrachteten Fehlers

Bevor die erzeugten Warmbänder auf den Fehlerbefall hin betrachtet werden, ist es wichtig, den zu betrachtenden Fehler genau zu beschreiben. In diesem Kapitel werden häufig die Begriffe (FeO-)Schalen oder (FeO-)Schalenfehler verwendet. Der Schalenfehler wird im Allgemeinen in der Literatur wie folgt beschrieben [BECK09] [VDEH15]:

Einfluss der veränderten Kokillenoberflächenstruktur auf die Produktqualität

„Schalenfehler sind Materialtrennungen im Stahl oder an der Stahloberfläche, die durch verschiedene Einflüsse hervorgerufen werden können. Die Ursachen von Schalenfehlern sind vielfältig. So können beispielsweise (nichtmetallische) Einschlüsse, Risse oder mechanische Vorschädigungen an der Bramme zu Schalenfehlern führen.

Die geometrische Form der Schalenfehler stellt sich je nach Fehlertyp unterschiedlich dar. Schalenfehler erhalten ihre Form durch ein Überlappen und Strecken des Mediums und der Materialtrennung in Walzrichtung. Zudem unterscheidet man geschlossene, offene und teilweise geschlossene Schalen.

Ist der Schalendeckel geöffnet, spricht man von einer offenen Schale. Teilweise geöffnete Schalen erkennt man an feinen Materialtrennungen am Übergang von Schalendeckel zum Grundmaterial. Geschlossene Schalen befinden sich dicht unter der Oberfläche des Grundmaterials und können bei einem Weiterverarbeitungsprozess geöffnet werden.“

Aus dieser Beschreibung wird deutlich, dass die Bezeichnung „Schalenfehler“ für eine Vielzahl von Fehlern genutzt wird. Daher ist es wichtig, den hier behandelten Fehler genau zu definieren.

Der hier betrachtete Schalenfehler erscheint nach dem Walzprozess als dünner Streifen und kann eine Länge von über 10m sowie eine Breite von bis zu 0,01m besitzen (vgl. **Abbildung 8.1**, rechtes Bild). Er grenzt sich deutlich von größeren und längeren Schalenfehlern ab (vgl. **Abbildung 8.1**, linkes Bild).

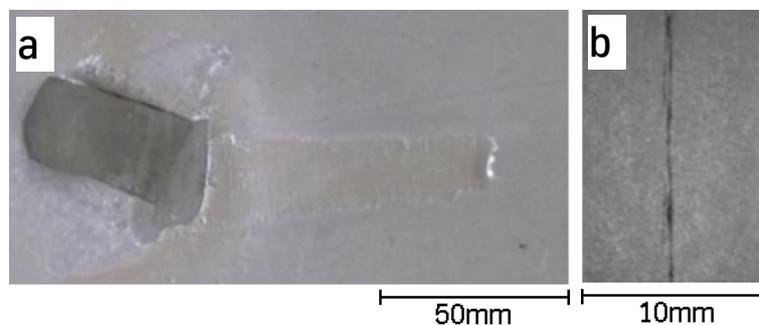


Abbildung 8.1:Beispiele für Schalenfehler. Der in dieser Arbeit betrachtete längsrisssbasierte Schalenfehler ist unter „b“ zu erkennen.

Dieser Schalenfehler tritt als geschlossene, teilweise offene oder offene Schale auf. Er ist diffus über die gesamte Bandbreite und Bandlänge verteilt und belegt sowohl die Bandoberseite als auch die Bandunterseite.

Die Ursachen für diesen Fehlertyp sind Brammenvorschädigungen in Form von Längsrissen. Die Fehlerfolge sind Materialabwertung und -ausschuss da sie zu

vorzeitigem Bauteilversagen, inhomogenen Materialeigenschaften oder Beschichtungsprobleme führen können (vgl. Kapitel 3).

8.2 Auswertung der Warmbandoberflächenqualität bei Einsatz der oberflächenstrukturierten Kokillen

8.2.1 Bemessung der Oberflächenfehler

Zur Bestimmung der Oberflächenqualität der an der Dünnbrammengießanlage erzeugten Warmbänder wurde der Schalenbefall mittels eines Oberflächeninspektionssystems ausgewertet. Um die Fehlerausprägung und Auswirkung der Kokillenmodifikation auf den Fehler ausreichend zu beurteilen, werden die Fehlerlänge und die Fehleranzahl analysiert. Beide Parameter wirken sich gemäß Kapitel 3 unmittelbar auf den Materialausschuss aus.

An der Walzstraße der Dünnbrammengießanlage werden je nach Kundenanforderung Warmbänder unterschiedlicher Dicke (1,2 mm bis max. 12,5 mm) gewalzt. Die Dicke der angelieferten Dünnbramme ist konstant. Daher können aus einem Fehler, der auf der Bramme die gleiche Länge besitzt, je nach Umformgrad Fehler unterschiedlicher Länge entstehen. Um die Fehlerlängen auf dem Warmband untereinander vergleichen zu können, ist es daher notwendig, die vom Oberflächeninspektionssystem gemessene Fehlerlänge auf eine vergleichbare Länge des Warmbandes zu normieren.

Zudem variieren auftragsgemäß die zu walzenden Dünnbrammen in ihrer Länge. Dies beeinflusst die Anzahl der detektierten Oberflächenfehler, da auf einer längeren Bramme absolut mehr Fehler entstehen können, als auf einer kürzeren. Daher ist auch für diesen Parameter eine Normierung auf eine definierte Länge des Warmbandes notwendig.

In der späteren Auswertung wird die Position über die Bandbreite nicht berücksichtigt, da an der Stelle des aufgetretenen Fehlers meist das Band über die komplette Bandbreite herausgetrennt wird. Zur Veranschaulichung ist die Fehlerverteilung des Schalenfehlers über die Bandbreite in **Abbildung 8.2** dargestellt.

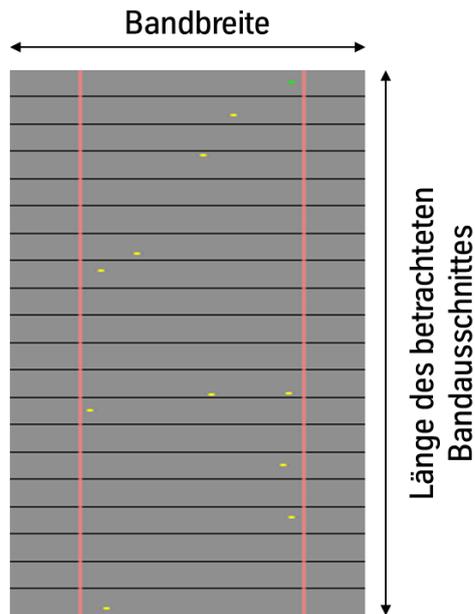


Abbildung 8.2: Verteilung des Schalenfehlers (gelbe Punkte) über die Bandbreite (Schema).

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Auswertungen zum Einfluss der Kokillenoberflächenmodifikation auf die Fehlerlänge und der Fehleranzahl dargestellt.

8.2.2 Auswertung in Bezug auf die Fehlerlänge

Zunächst wurde der Einfluss der Kokillenoberflächenmodifikation auf die Fehlerlänge beobachtet. Ein repräsentatives Diagramm dieser Auswertung ist in **Abbildung 8.3** dargestellt.

Einfluss der veränderten Kokillenoberflächenstruktur auf die Produktqualität

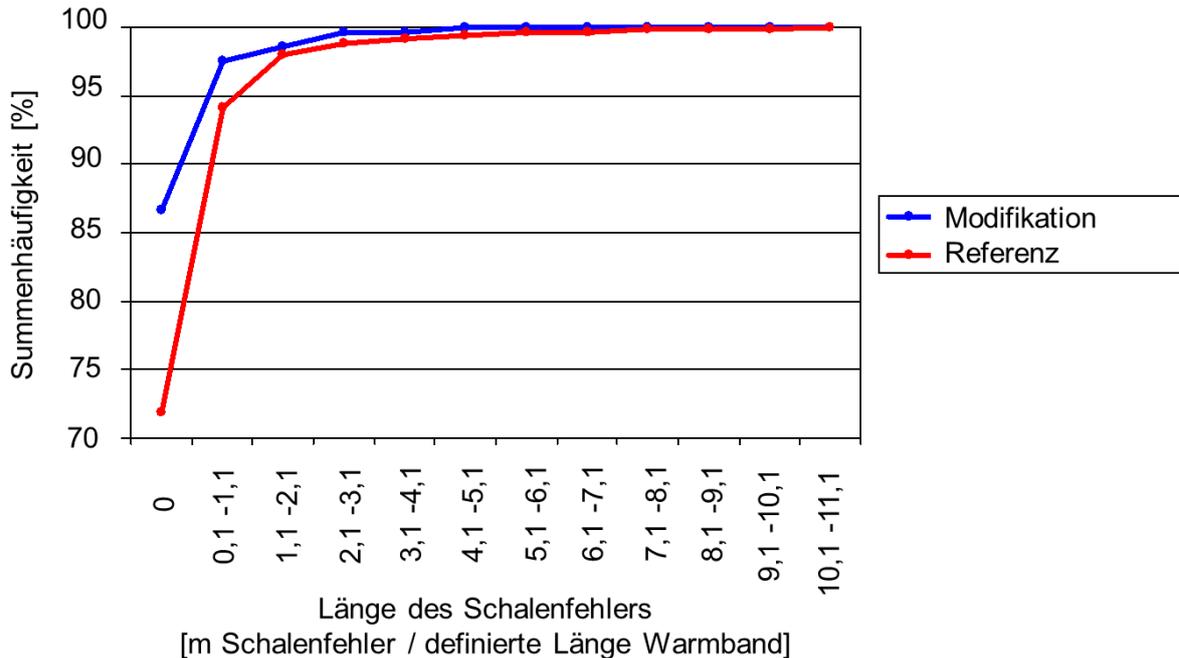


Abbildung 8.3: Summenhäufigkeitskurve zur definierten Fehlerlänge bei Einsatz der Kokillen mit Oberflächenmodifikation (blau) und bei Einsatz der Referenzkokillen (rot).

Die Auswertung zeigt die auf einer definierten Länge im Warmband detektierten Schalenfehler. Bei Einsatz der Kokillen mit Oberflächenmodifikation besitzen 86 % der Schalenfehler eine definierte Länge von kleiner 0,1 m / definierte Länge Warmband. Bei Einsatz der Referenzkokillen werden lediglich 72 % Schalenfehler mit einer definierten Länge von kleiner 0,1 m / definierte Länge Warmband detektiert. Alle weiteren Schalenfehler weisen bereits eine definierte Länge von größer als 0,1 m auf. Bei Einsatz einer Kokille mit Oberflächenmodifikation nimmt die Kurve bei einer definierten Schalenfehlerlänge zwischen 4,1 m und 5,1 m den Wert von 100 % an. Dies bedeutet, dass die größte gemessene Schalenfehlerlänge bei Einsatz der strukturierten Kokille unter 5,1 m liegt. Bei Einsatz der Referenzkokille nimmt die Kurve erst bei einer Fehlerlänge von 7,1 m bis 8,1 m die 100 % an. Demnach wurden Fehlerlängen größer 5,1 m gemessen.

Des Weiteren schneiden sich die in Abbildung 8.3 dargestellten Kurven nicht. Daraus kann für den hier vorliegenden Fall geschlossen werden, dass kein Fehlerlängenbereich existiert, in dem bei Einsatz der strukturierten Kokille größere Fehlerlängen erzeugt wurden, als bei der Referenz.

Die gezeigten Ergebnisse belegen, dass sich der Einsatz der Kokillen mit Oberflächenmodifikation positiv auf die Länge der Schalenfehler auswirkt. Im Weiteren gilt es zu überprüfen, ob auch die Anzahl der Schalenfehler bei Einsatz strukturierter Kokillen reduziert oder zumindest nicht negativ beeinflusst wird. Ansonsten kann keine eindeutige Verbesserung der Oberflächenqualität abgeleitet werden. Die Auswirkungen strukturierter Kokillen auf die Fehleranzahl soll im anschließenden Kapitel betrachtet werden.

8.2.3 Auswertung in Bezug auf die Fehleranzahl

Nachdem die Auswirkungen der modifizierten Kokille auf die Fehlerlänge betrachtet wurden, wird der Fokus in diesem Kapitel auf die Beeinflussung der Fehleranzahl gelegt. Für die Beurteilung des Fehlerbefalls wurden vier Stahlgruppen ausgewählt, die als besonders anfällig für die zu betrachtenden Schalenfehler gelten. Die Stahlgruppen werden fortan mit den Buchstaben „A“ bis „D“ fortlaufend gekennzeichnet. Bei den Stahlgruppen „A“ und „B“ handelt es sich um Stahlmarken bei denen keine weiteren gießtechnischen Sondermaßnahmen getroffen wurden. Für die Stahlgruppen „C“ und „D“ wurden aufgrund hoher Kundenanforderungen zusätzliche gießtechnische Sondermaßnahmen (zum Beispiel eine Reduktion der Gießgeschwindigkeit) ergriffen. In **Abbildung 8.4** ist der Einfluss oberflächenstrukturierter Kokillen auf die Fehleranzahl über einen Zeitraum von eineinhalb Jahren zusammenfassend für alle vier Stahlgruppen dargestellt.

Einfluss der veränderten Kokillenoberflächenstruktur auf die Produktqualität

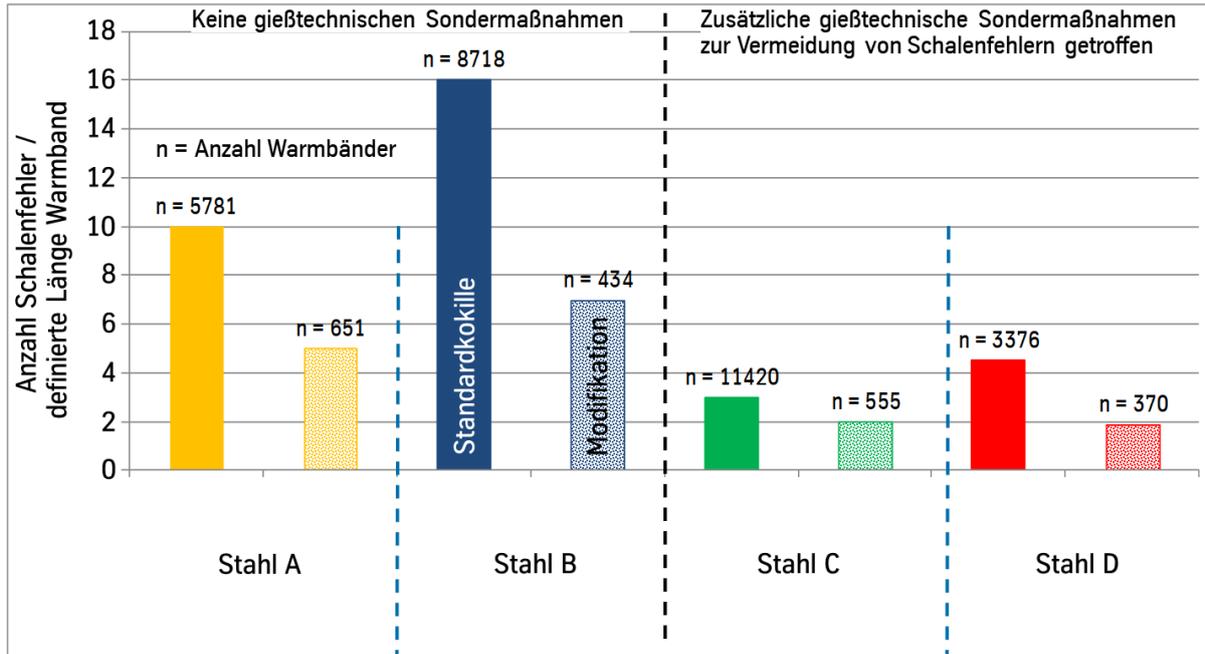


Abbildung 8.4: Auswertung zum Einfluss oberflächenstrukturierter Kokillen auf die Anzahl (Mittelwert) der Schalenfehler für verschiedene Stahlgruppen (ausgefüllte Säule = konventionelle Kokille / gepunktete Säule = Kokille mit Oberflächenmodifikation).

Die in Abbildung 8.4 abgebildeten Säulen zeigen die durchschnittliche Anzahl (Mittelwert) der Schalenfehler bezogen auf eine definierte Länge des Warmbandes. Für alle vier ausgewählten Stahlgruppen zeigt sich eine Reduktion der Anzahl der Schalenfehler pro definierter Länge des Warmbandes. Bei der Stahlmarke B sind die größten Auswirkungen der Oberflächenmodifikation zu sehen. Hier ergibt sich eine Fehlerreduktion von mehr als 50%. Besonders bemerkenswert sind die Ergebnisse der Stahlmarken C und D. Hier traten schon vor Verwendung der Oberflächenmodifikation aufgrund verwendeter Sondermaßnahmen weniger Fehler auf. Trotzdem führt auch hier der Einsatz einer oberflächenstrukturierten Kokille zu einer weiteren Reduktion des Schalenfehlers.

Im Vergleich zu den Referenzen wirken die Stichprobenumfänge der Versuchsmenge zunächst gering. Daher wurde zur Überprüfung des Stichprobenumfangs eine „A-priori-Abschätzung“ für den Mindeststichprobenumfang durchgeführt [LIPP11]. Die Gleichung und die entsprechenden Annahmen zur Berechnung des Mindeststichprobenumfangs sind dem Anhang (vgl. Kapitel 12.2, Gleichung 12.4, zu entnehmen). Die Ergebnisse der Abschätzung zeigt **Tabelle 8.1**.

Stahlmarke	Mindest- stichprobenumfang	Tatsächlicher Stichprobenumfang
Stahlmarke A	363	651
Stahlmarke B	369	434
Stahlmarke C	373	555
Stahlmarke D	349	370

Tabelle 8.1: Vergleich von Mindeststichprobenumfang und tatsächlichem Stichprobenumfang der Versuchsreihe aus Abbildung 8.4.

Aus der Tabelle 8.1 ist deutlich zu entnehmen, dass die tatsächlichen Stichprobenumfänge für jede Stahlmarke größer sind als die Mindeststichprobenumfänge der jeweiligen Stahlmarke. Somit kann das in Abbildung 8.4 gezeigte Ergebnis als valide beurteilt werden.

8.3 Zusammenfassung und Fazit zur Oberflächenqualität der erzeugten Warmbänder

In Kapitel 8.2 wurde der Einfluss der Kokillenmodifikation auf die Produktqualität hin untersucht. Dazu wurde zunächst der zu betrachtende relevante Oberflächenfehler in Kapitel 8.1 definiert und von anderen Fehlertypen abgegrenzt.

Für die Bewertung der Oberflächenqualität wurden die definierte Fehlerlänge und die definierte Fehleranzahl der Oberflächenfehler untersucht. Das Ergebnis ist, dass die Kokille mit modifizierter Kupferplattenoberfläche sowohl die Fehlerlänge als auch die Fehleranzahl für die betrachteten Stähle teilweise deutlich reduziert. Somit kann von einer Verbesserung der Oberflächenqualität durch die Verwendung oberflächenstrukturierter Kokillen ausgegangen werden. Eine Auswirkung der Versuchskokillen auf andere Fehlertypen wurde bisher nicht festgestellt.

Zusammenfassend wurde in den vergangenen Kapiteln festgehalten, dass sowohl der Wärmestrom innerhalb der Kokille als auch die Oberflächenqualität des Warmbandes

Einfluss der veränderten Kokillenoberflächenstruktur auf die Produktqualität

durch den Einsatz der Kokillen mit genadelter Oberfläche positiv beeinflusst werden. Im nachfolgenden Kapitel sollen nun die Hintergründe dieser Erkenntnisse diskutiert und erläutert werden.

9 Diskussion

9.1 Auswirkungen der Oberflächenmodifikation auf den Kokillenwärmestrom

In diesem Kapitel soll erläutert werden, auf welche Weise die Oberflächenstruktur der Kokille auf den Wärmestrom wirkt. Diese Beeinflussung ist, wie bereits in Kapitel 5.3 beschrieben, darauf zurückzuführen, dass durch die Strukturierung Vertiefungen geschaffen werden. Die Ergebnisse aus Kapitel 6.3 zeigen zum einen, dass eine Oberflächenmodifikation den (Kontakt-)Wärmestrom reduzieren kann. Zum anderen nähert sich bei steigender Oberflächenrauheit die Reduktion des Wärmestroms einem Grenzwert an. Eine stärkere Ausprägung der Struktur ist somit innerhalb der technischen Grenzen des Gießprozesses nicht sinnvoll (vgl. Kapitel 7.6). Zudem wurde in Kapitel 7.4 belegt, dass sich eine Oberflächenstruktur im Bereich des Gießspiegels reduzierend auf den sich dort ausbildenden Wärmestrom auswirkt (vgl. Abbildung 7.7). Nachfolgend wird die Wirkungsweise der resultierenden Oberflächenstruktur und der erzeugten Vertiefungen diskutiert.

9.1.1 Wirkungsweise der Oberflächenstruktur

In Kapitel 4.2 wird beschrieben, dass zwischen Kokillenplatte und Strangschale verschiedene Schlackenschichten existieren, die teilweise mit der verwendeten Oberflächenstruktur in Kontakt treten. Die Vertiefungen, die durch das Nadeln der Kokillenoberfläche erzeugt werden, bilden zusätzliche freie Räume zwischen Kokillenoberfläche und Strangschale. Bezüglich der Wirkung, die diese Räume auf den Wärmestrom haben werden zwei Ansätze verfolgt, die nachfolgend beschrieben werden.

9.1.1.1 Erster Ansatz zur Wirkungsweise der Oberflächenstruktur infolge der mit Schlacke gefüllten Vertiefungen

Im ersten Ansatz wird angenommen, dass die Vertiefungen in der Oberfläche mit Gießschlacke gefüllt werden. Die zwischen Kokille und Strangschale vorherrschenden Schlackenschichten erzeugen einen zusätzlichen Widerstand für den abzuführenden Wärmestrom. Dieser Widerstand ist gemäß Gleichung 4.3 abhängig von der Schichtdicke der Schlacke. Zudem ist gerade zu Erstarrungsbeginn die Strangschale sehr dünn und flexibel. Durch die Struktur stehen im Bereich des Gießspiegels neue Räume zur Verfügung, die durch die Gießschlacke gefüllt werden (vgl. **Abbildung 9.1**).

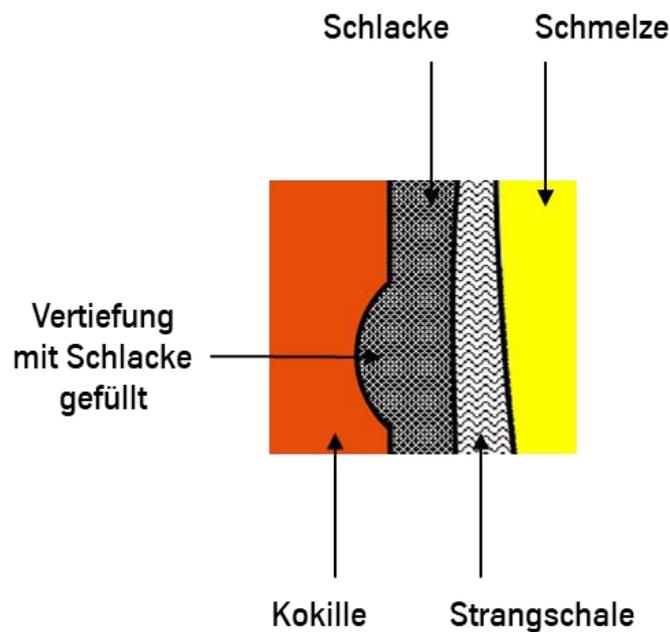


Abbildung 9.1: Schema zum ersten Ansatz bezüglich der Wirkungsweise der Struktur: Die Vertiefung wird mit Schlacke gefüllt (idealisiert dargestellt).

Die einzelnen Schlackenschichten legen sich unterschiedlich stark in das durch die Struktur geschaffene Tal hinein. Dadurch entsteht ein lokal höherer Wärmewiderstand. Dieser soeben beschriebene Ansatz wird in abgewandelter Form auch beim Gießen von Knüppelformaten (vgl. Kapitel 5) angewandt, wo im Vergleich zur Schlacke niedrig viskosere Gießöle verwendet werden, welche die Räume ausfüllen. Gießöle bilden im Gegensatz zu Gießschlacken während des Gießprozesses in den Räumen keine

festen Schichten aus. Von daher kann die Wirkung der Struktur beim Einsatz von Gießölen nicht mit der Wirkung beim Einsatz von Gießschlacken verglichen werden. In den nachfolgenden Absätzen wird die Wirkungsweise der mit Schlacke gefüllten Struktur betrachtet.

Durch die lokal dickere Schlackenschicht entsteht ein größerer Widerstand für den Wärmestrom. Der Schlackenfilm kann im Bereich des Gießspiegels eine Filmdicke von 1 mm bis 2 mm ausbilden [HÖHN18]. Gemäß der in Kapitel 7.6 vorgestellten Ergebnisse kann eine Vertiefung analog zur maximalen Rautiefe einen Wert von 350 μm annehmen. Der Schlackenfilm, der lokal durch die Struktur entsteht, kann, sofern die Vertiefung der Struktur vollständig mit Schlacke gefüllt ist, eine Filmdicke von bis zu 2,4 mm erreichen.

Für einen Vergleich der Wärmeströme wird Gleichung 4.3 durch die Annahme vereinfacht, dass durch die Struktur kein wesentlicher Temperaturunterschied zwischen Strangschalen- und Kokillenoberflächentemperatur entsteht. Diese Annahme vorausgesetzt, wird der lokale Wärmestrom, der durch die Vertiefung hindurch von der Strangschale zur Kokille hin übertragen wird um bis zu 15% reduziert, gegenüber dem Wärmestrom, der über das Plateau ausgetauscht (vgl. **Abbildung 9.2**).

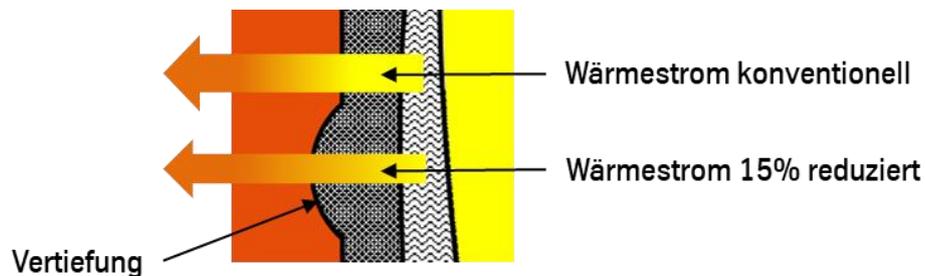


Abbildung 9.2: Darstellung der Wärmeströme bei ausgefüllter Vertiefung. Durch die dickere Schlackenschicht wird der Wärmestrom um bis zu 15 % reduziert.

In der Realität bildet sich für jede Schlackenschicht – amorph, kristallin oder flüssig – ein unterschiedlich hoher Wärmewiderstand aus. Die Ausprägung der einzelnen Schlackenschichten ist von einigen Faktoren abhängig, unter anderem: Gießpulverzu-

sammensetzung, Temperatur des Stahls, Gießgeschwindigkeit oder Zusammensetzung des Stahls. Daher kann die Auswirkung der Struktur auf den Wärmestrom ebenfalls stark variieren.

Des Weiteren ist es prinzipiell möglich, dass sich chemische Bestandteile der Schlacke in der Vertiefung anreichern. Diese lokale Veränderung der Schlacke kann sich dann auf den Wärmestrom in der Kokille auswirken. Auch diese Wirkungsweise der Struktur kann zunächst nicht ausgeschlossen werden.

9.1.1.2 Zweiter Ansatz zur Wirkungsweise der Oberflächenstruktur infolge der mit Gas/Luft gefüllten Vertiefungen

In einem zweiten Ansatz wird angenommen, dass die Vertiefungen nicht durch die Schlacke gefüllt werden (vgl. **Abbildung 9.3**).

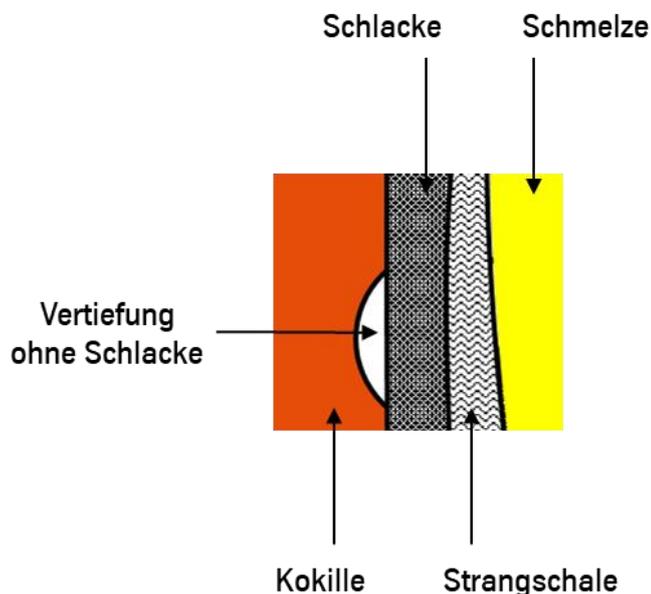


Abbildung 9.3: Zweiter Ansatz zur Wirkungsweise der Struktur: Die Vertiefung wird nicht mit Schlacke gefüllt (idealisiert).

Diskussion

Sofern die Schlacke nicht in die Räume der Vertiefungen eindringt, wird der Wärmestrom aufgrund eines Gaspolsters reduziert. Als zusätzliche Wärmestromwiderstände fungieren die geringen Wärmeleitfähigkeiten von Gasen sowie weitere Wärmeübergänge.

Da in die Kokille aktiv kein Gas eingebracht wird, ist davon auszugehen, dass die Hohlräume, die nicht durch Schlacke aufgefüllt werden, im Wesentlichen mit Luft gefüllt sind. Für den Vergleich der Wärmeströme durch die Schlackenschichten beziehungsweise durch das Luftpolster werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Fläche und das Volumen, durch welche die Wärme übertragen wird, ist in beiden Fällen ebenfalls identisch.
- Die sich einstellenden Oberflächentemperaturen und die sich somit ergebende Temperaturdifferenz zwischen Strangschale und Kokilloberfläche unterscheiden sich in beiden Fällen nicht signifikant.

In dem soeben beschriebenen Fall ist der Wärmestrom im Wesentlichen gemäß Gleichung 4.3 von den unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten der Schlacke beziehungsweise der Luft abhängig. Gemäß Kapitel 6.2 wird für Luft ein Wärmeleitfähigkeitskoeffizient λ_{Luft} von 0,0081 W/mK angegeben [KNEE08]. Der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient von Schlacke $\lambda_{\text{Schlacke}}$ nimmt Werte zwischen 0,55 W/mK und 2,79 W/mK an [KANG12], [HASE12]. Eingesetzt in Gleichung 4.3 ergeben sich unterschiedliche Werte für den durch die 350 μm große Vertiefung abzuführenden Wärmestrom (vgl. **Abbildung 9.4**). Die Reduktion des Wärmestroms durch das Luftpolster im Vergleich zur Wärmeabfuhr durch die Schlackenschichten beträgt mehr als 72 %. Zu beachten, ist bei der Wahl dieses Ansatzes jedoch, dass sich im Vergleich zu Ansatz 1 der Strahlungsanteil im Wärmestrom ändert. Wie hoch die Änderung ist, kann jedoch nicht quantifiziert werden.

Diskussion

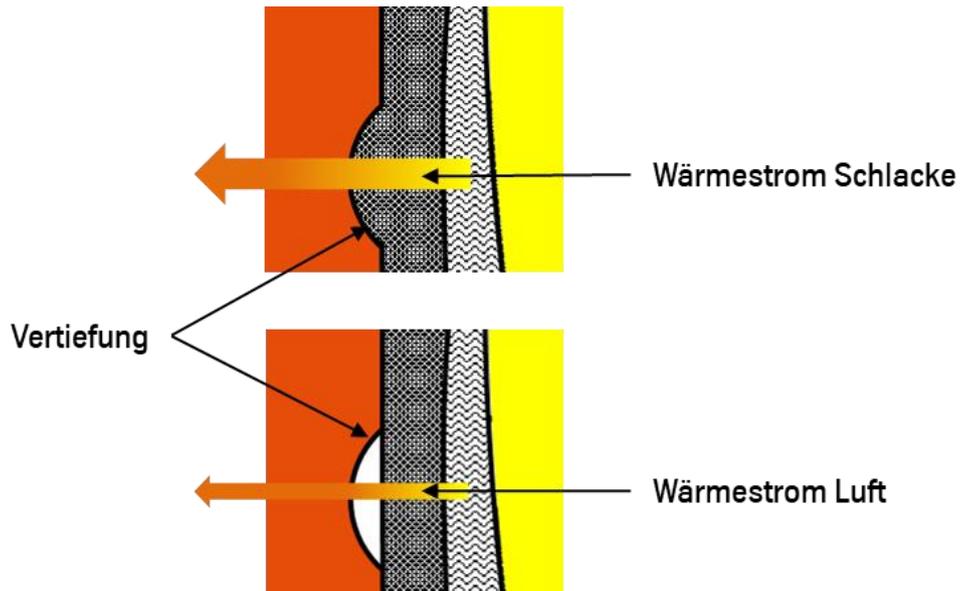


Abbildung 9.4: Deutliche Reduktion des Wärmestroms bei Bildung eines Luftspaltes im Vergleich zum Schlackenfilm (idealisiert).

In der Realität wird die Wärme nicht nur durch die Vertiefungen, sondern auch über die Plateaus übertragen (vgl. **Abbildung 9.5**). Des Weiteren wird zusätzlich mehr Wärme durch Strahlung übertragen. Daher ist die Gesamtreduktion des Wärmestroms über die Breite nicht so groß wie in dem hier beschriebenen, idealisierten Fall.

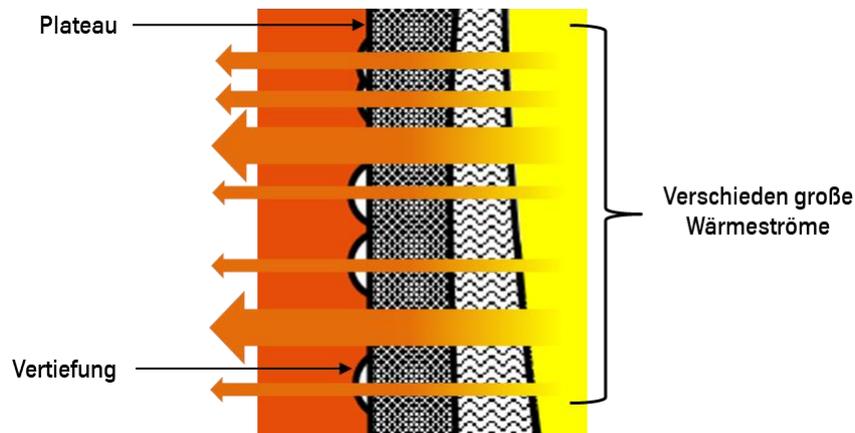


Abbildung 9.5: Durch das Zusammenspiel von Vertiefungen und Plateaus ergeben sich unterschiedlich hohe Wärmeströme.

Dass Luft jedoch prinzipiell als wärmestromhemmende Schicht wirkt, zeigen die Versuche aus Kapitel 6.3.2. Die Abbildung 6.7 zeigt, dass der Wärmestrom bei Einsatz einer Oberflächenstruktur reduziert wird. Bei den im Labor durchgeführten Versuchen

ist Luft die einzige wärmestromhemmende Schicht, was in einer Reduktion des Wärmestroms um circa 50% resultiert.

9.1.1.3 Beurteilung der beiden Ansätze

In diesem Kapitel wird überprüft, inwiefern die in den vorausgegangenen Kapiteln formulierten Ansätze angewendet werden können. Hierzu dient eine aus der Kokille entnommene Schlackenprobe, anhand derer die Ansätze analysiert werden können.

Die Schlackenprobe wurde bei Einsatz einer Kokille entnommen, deren Struktur erst kurz zuvor in die Kokillenoberfläche eingebracht worden war. Ein Foto der Schlackenfilmprobe ist in **Abbildung 9.6** gezeigt.

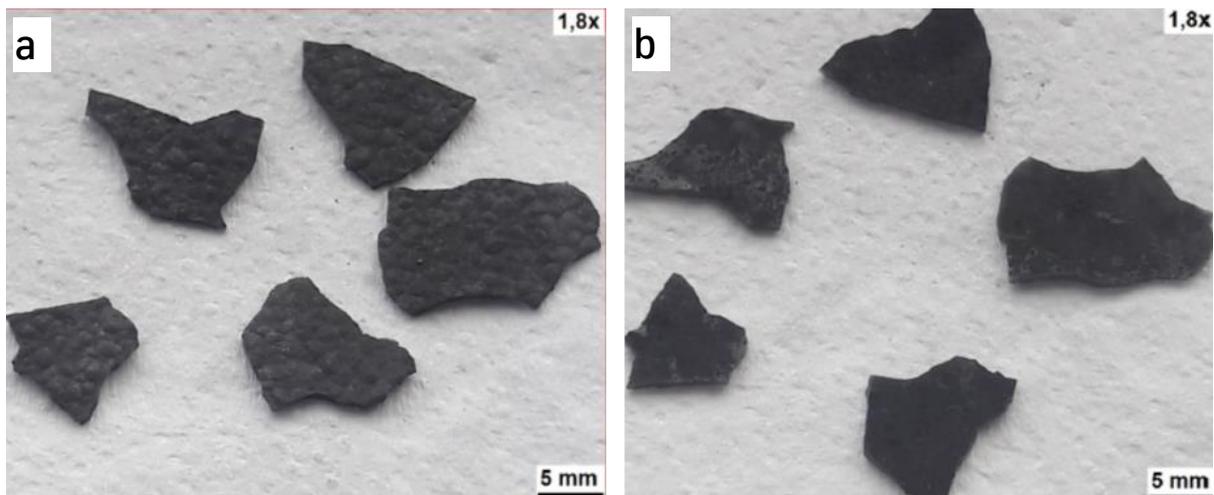


Abbildung 9.6: Realbilder der aus der Kokille entnommenen Schlackenfilmproben (Vorderseite (a) und Rückseite (b)).

Auf der in Abbildung 9.6 gezeigten Oberfläche der Schlackenproben ist ein Negativ der Kokillenoberflächenstruktur entstanden. Gleichzeitig ist die Rückseite der Schlackenschicht im Vergleich zur Vorderseite eben. Das bedeutet, dass die Schlackenschicht sich unterschiedlich dick ausgebildet hat. Die Schlacke dringt somit zumindest teilweise in die Vertiefungen ein.

Die Schlackenprobe wurde mittels eines Rasterelektronenmikroskops (REM) untersucht. Eine detaillierte Aufnahme der Querschnittsfläche einer der Proben zeigt **Abbildung 9.7**.

Die in **Abbildung 9.7** gezeigte Probe besteht überwiegend aus einer amorphen Schlackenschicht. Auf der der Kokillenwand zugewandten Seite wurde eine kristalline Schlackenschicht festgestellt. Eine Veränderung der Elementverteilung konnte für die in der Vertiefung der Kokille befindliche Schlacke nicht festgestellt werden. Die Ausprägung der beiden Schichten, amorph und kristallin, nimmt Einfluss auf den aus der Kokille abzuführenden Wärmestrom [GÖRN04]. Vor allem die kristalline Schlackenschicht reduziert die durch Strahlung abgeführte Wärme und verringert somit den Wärmestrom.



Abbildung 9.7: Mikroskopische Aufnahme einer der in **Abbildung 9.6** gezeigten Proben.

An der Schlackenprobe wurde analog zu Kapitel 5.2 eine Messung der Oberflächentopografie mittels Konfokalsensoren durchgeführt. Das Ergebnis zeigt **Abbildung 9.8**.

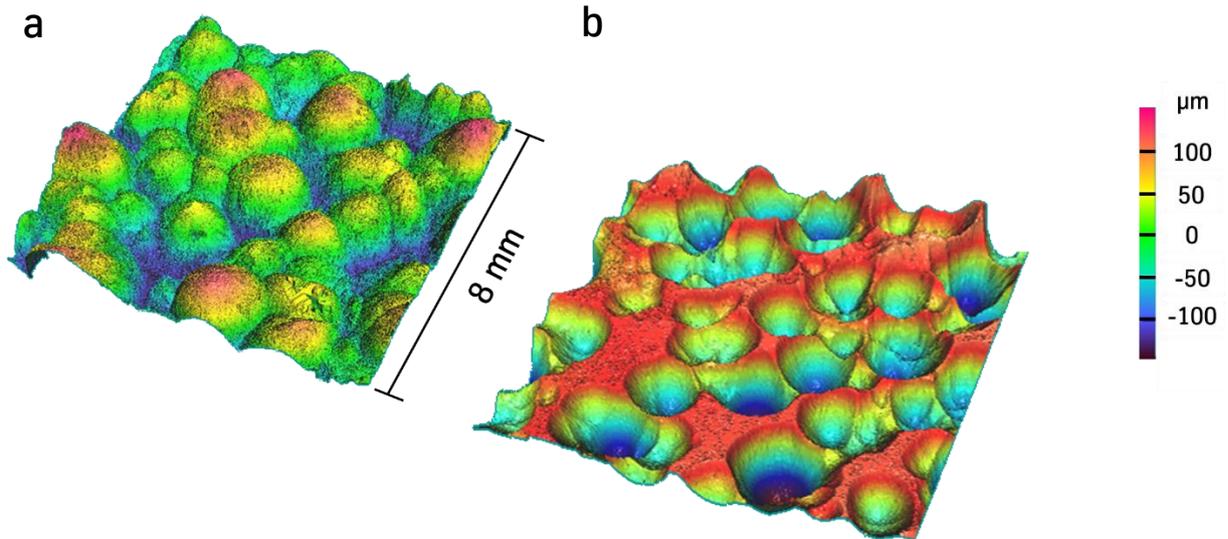


Abbildung 9.8: Beispielhafter Vergleich der Oberflächentopografien der Schlackenprobe (a) und der Kokillenoberflächenstruktur (b).

Die Vermessung der Rauheitswerte der in Abbildung 9.8 gezeigten Aufnahmen hat ergeben, dass die Topografien unterschiedlich stark ausgebildet sind (vgl. **Tabelle 9.1**).

Rauheitswert [μm]	Struktur	Schlacke
Mittenrauwert R_a	34,0	22,5
Gemittelte Rautiefe R_z	112,2	96,8
Maximale Rautiefe R_{max}	163,0	112,5

Tabelle 9.1: Vergleich der Rauheitskennwerte von Oberflächenstruktur und Schlackenschicht.

Der Vergleich der Werte zeigt, dass die Rauheit des Negativs im Vergleich zur Oberflächenstruktur schwächer ist. Die Schlacke dringt somit nicht vollständig in die Vertiefungen ein. Der zwischen Schlacke und Kokillenoberfläche verbleibende Zwischenraum (vgl. **Abbildung 9.9**) muss demnach mit einem Gas oder einem Gasgemisch (Luft) gefüllt sein.

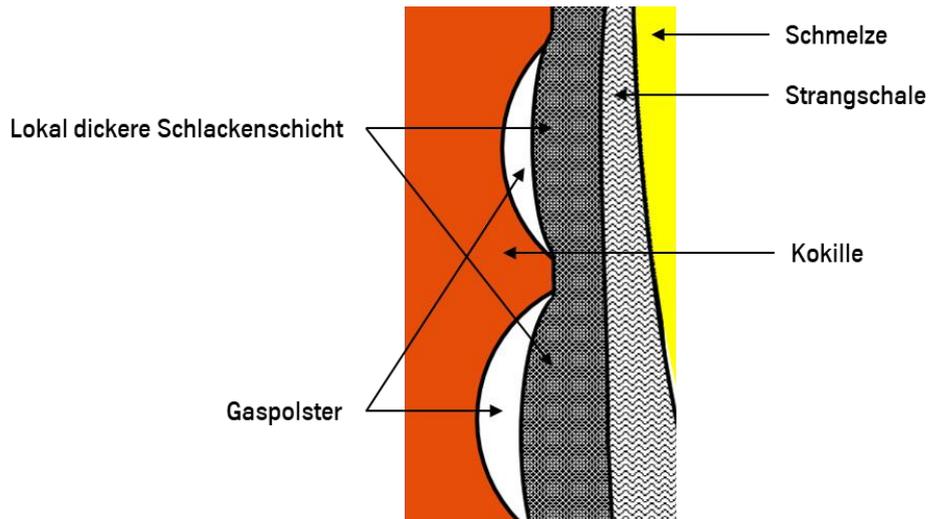


Abbildung 9.9: Zusammenspiel von Oberflächenstruktur, Gaspolster und lokal dickerer Schlackenschicht.

Gemäß Abbildung 9.9 treffen die Effekte aus beiden Ansätzen auf die Wirkungsweise der Oberflächenstruktur zu. Welcher Effekt im konkret vorliegenden Fall stärker ausgebildet ist, hängt von den aktuell eingestellten Prozessparametern, beispielsweise der Gießgeschwindigkeit, der Viskosität, der Oberflächenspannung und dem Erstarrungsverhalten der Schlacke ab. Flüssigere Schlacken dringen aufgrund ihrer geringeren Viskosität und ihrer geringeren Oberflächenspannung tiefer in die Struktur ein, als höher viskose Schlacken.

Im Folgenden wird erläutert, wie sich die Struktur auf Basis der in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse auf die Wärmeströme in der Kokille auswirkt.

9.1.2 Bedeutung der Wirkungsweise für den Wärmehaushalt der Kokille

In diesem Kapitel soll die zentrale Frage nach der Beeinflussung des Wärmestroms in der Kokille durch die Oberflächenstruktur beantwortet werden. Es ist bekannt, dass durch die Struktur sowohl Luft als auch Schlacke über die gesamte Kokillenbreite sowie auch lokal den Wärmestrom verringern.

In der Kokille führt die Struktur gemäß Abbildung 7.7 zu einer signifikanten Reduktion des Wärmestroms. Ursache für die Reduktion ist der erhöhte Wärmewiderstand. Der Widerstand wird durch zwei Faktoren beeinflusst. Einerseits wird die Dicke der

Diskussion

Schlackenschicht lokal erhöht, andererseits behindert die sich in den Vertiefungen befindliche Luft den Wärmestrom zusätzlich.

Durch die Struktur werden vor allem die konduktiven Wärmestromanteile reduziert da die zu durchdringende Schichtdicke lokal erhöht wird oder eine zusätzliche Schicht mit verändertem Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten entsteht. Die durch Strahlung und durch Konvektion entstehenden Wärmeströme hingegen bleiben durch die Struktur weitestgehend unbeeinflusst.

Abbildung 7.7 zeigt zudem, dass primär der Wärmestrom im Bereich des Gießspiegels reduziert wird, obwohl die Struktur über einen größeren Bereich in die Kokillenoberfläche eingebracht wurde. Dies liegt an mehreren Ursachen. Zum einen ist im Bereich des Gießspiegels die Temperaturdifferenz zwischen Kokillenplatte und erstarrendem Stahl am größten. Gemäß Gleichung 4.3 wirken sich Unterschiede im Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten und der Schichtdicke umso größer aus, je höher die sich einstellende Temperaturdifferenz ist.

Zum anderen wächst mit fortlaufender Erstarrung die Strangschale. Als neue zusätzliche wärmestromhemmende Schicht nimmt somit der Einfluss der Strangschale auf den Wärmestrom immer weiter zu (vgl. Gleichung 4.3).

Die Betrachtung der Verteilung des Wärmestroms über die Kokillenhöhe hat gezeigt, dass der Wärmestrom durch Verwendung einer Oberflächenstruktur im Bereich des Gießspiegels reduziert wird.

Die zusätzlichen Wärmestromwiderstände aufgrund der Luftschicht und einer dickeren Schlackenschicht dämpfen die Volatilität im Wärmestrom. Auf Basis der Gleichung 4.3 werden hohe Wärmeströme, die aufgrund von hohen Temperaturdifferenzen entstehen, im Verhältnis zu geringeren Wärmeströmen, die auf geringeren Temperaturdifferenzen basieren, stärker reduziert.

Zusammenfassend ermöglicht die Verwendung einer Struktur auf der Kokillenoberfläche im Vergleich zu Kokillen ohne Oberflächenstruktur also eine über die gesamte Kokille sowie auch lokal gemäßigte Wärmeabfuhr.

9.2 Auswirkungen der Oberflächenmodifikation auf die Produktqualität

Nachdem im vorangegangenen Kapitel der Einfluss der Oberflächenmodifikation auf den Wärmestrom behandelt wurde, sind die Auswirkungen auf die Produktqualität zu behandeln. Basis dieser Diskussion sind das Eisenkohlstoffdiagramm und die Auswertungen des Einflusses der Struktur auf den Schalenfehler (vgl. **Abbildung 8.4**).

Der Einsatz der Kokillen mit Oberflächenmodifikation reduziert den Schalenbefall auf den Warmbändern. Die Fehlerreduktion stellt sich für jeden Stahl (A - D) ein, unabhängig davon, ob gießtechnische Sondermaßnahmen (bspw. Reduzierung der Gießgeschwindigkeit) getroffen wurden. Um zu klären, auf welchen Mechanismen die Fehlerreduktion beruht, wird nachfolgend das Erstarrungsverhalten der hier gezeigten Stähle genauer betrachtet.

Da die Stähle im Hinblick auf ihren späteren Verwendungszweck hin unterschiedlich zusammengesetzt sind, soll eine Methode verwendet werden, die eine Vergleichbarkeit der Stahlmarken innerhalb des Eisenkohlenstoffdiagramms miteinander ermöglicht. Um die im Stahl in unterschiedlichen Konzentrationen enthaltenen Elemente zu berücksichtigen und den Vergleich der Stähle untereinander zu ermöglichen, kann ein Kohlenstoffäquivalent berechnet werden [SHEP12]. Mit diesem Kohlenstoffäquivalent ist es möglich, Stähle unterschiedlicher Legierungen in das Eisenkohlenstoffdiagramm einzutragen und miteinander zu vergleichen. Die Gleichungen 12.1 bis 12.3 zur Berechnung des Kohlenstoffäquivalentes sowie die Gültigkeitsbereiche der Elemente können dem Anhang dieser Arbeit entnommen werden. Für die hier betrachteten Stahlmarken ergeben sich die in **Tabelle 9.2** aufgestellten Kohlenstoffäquivalente.

Stahl	Kohlenstoffäquivalent
Stahl A	0,051
Stahl B	0,053
Stahl C	0,070
Stahl D	0,120

Tabelle 9.2: Berechnete Kohlenstoffäquivalente der betrachteten Stähle [SHEP12].

Diskussion

Die **Abbildung 9.10** zeigt das Eisenkohlenstoffdiagramm. Die innerhalb der Kokille relevanten Erstarrungsprozesse laufen bei Temperaturen von $>1000^{\circ}\text{C}$ ab. Gleichzeitig ergeben sich für die betrachteten Stahlmarken vergleichsweise geringe Kohlenstoffäquivalente. Zur besseren Übersicht soll daher nachfolgend der eisenreiche Bereich bei Temperaturen oberhalb von 1350°C des Eisenkohlenstoffdiagramms betrachtet werden. Die Punkte H und B in **Abbildung 9.11** markieren die Konzentrationsgrenzen des so genannten peritektischen Bereiches.

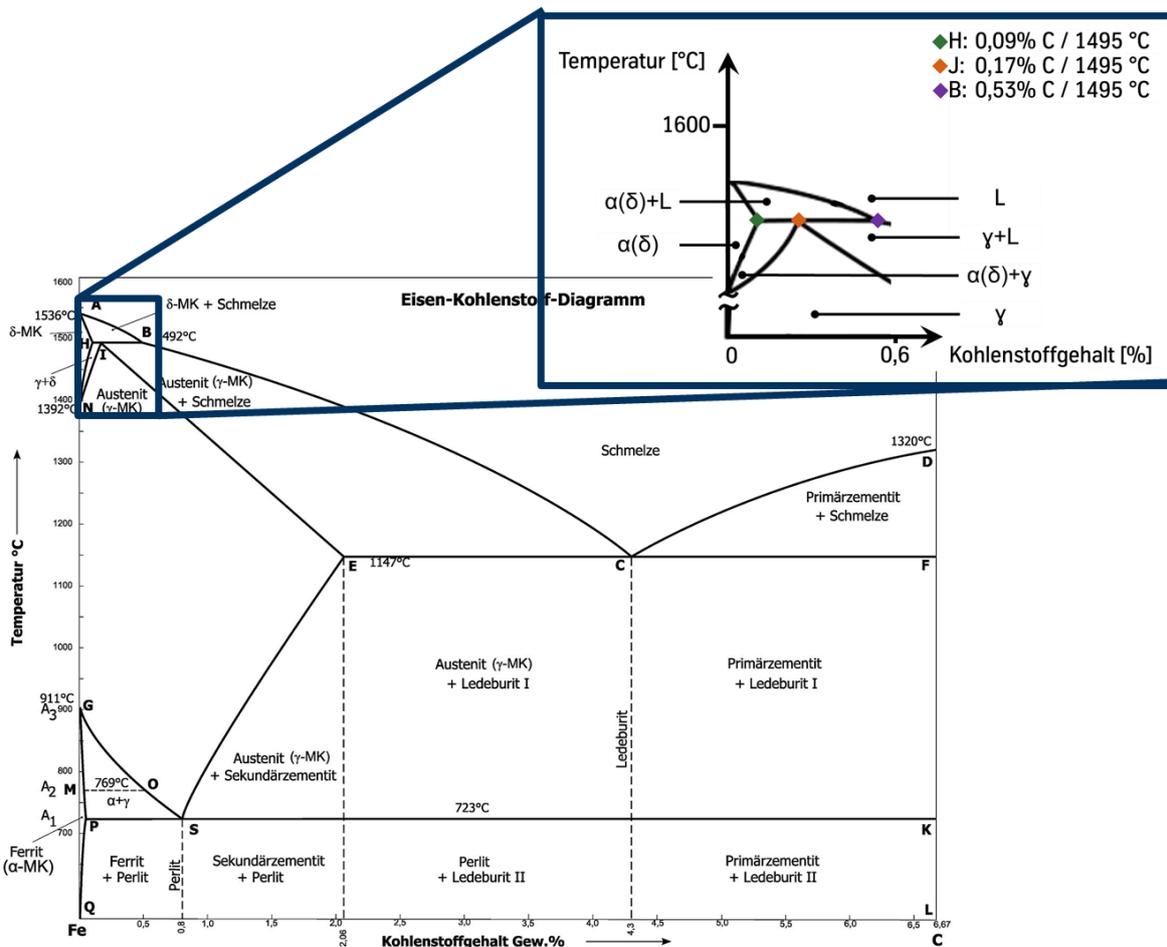


Abbildung 9.10: Darstellung der eisenreichen Seite des Eisenkohlenstoffdiagramms bis circa 7% Kohlenstoff (nach [SCHU62]).

Die in Tabelle 9.2 ermittelten Werte können nach der Vergrößerung des Eisenkohlenstoffdiagramms grafisch dargestellt werden (vgl. **Abbildung 9.11**). Während der Erstarrung der Stähle können unterschiedliche Phasen durchlaufen werden.

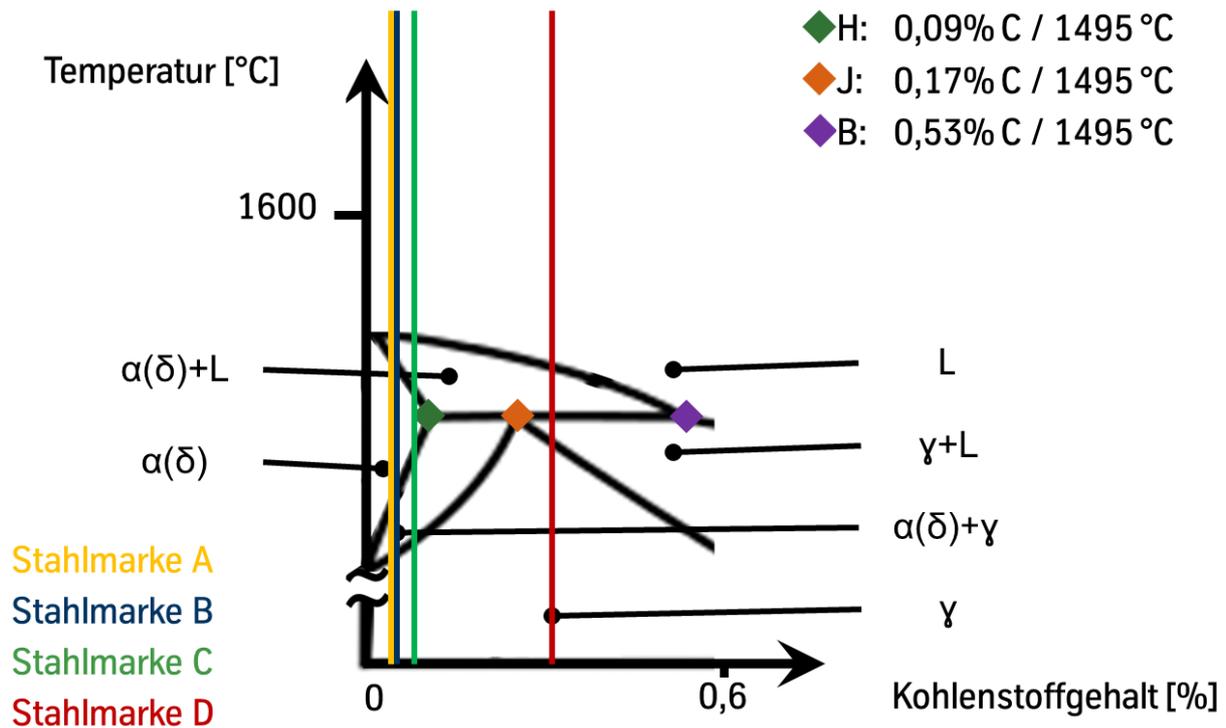


Abbildung 9.11: Übertragung der Kohlenstoffäquivalente der betrachteten Stahlmarken in die eisenreiche Ecke des Eisenkohlenstoffdiagramms.

Die Kohlenstoffäquivalente der Stahlmarken A, B und C befinden sich links des Peritektiums (J) (vgl. Abbildung 9.11) und durchlaufen während der Erstarrung die δ -Ferritphase, während sich der Stahl der Stahlmarke D im Bereich der Peritektikalen (Verbindung der Punkte H, J, B) zwischen den Punkten J und B befindet. Kühlen die Stähle der Stahlmarken A, B und C ab, wandelt sich das ferritische Gefüge in austenitisches Gefüge um. Während dieser Umwandlung reduziert sich das Volumen des Eisens um 1,3% [GUDE02]. Diese Volumenkontraktion bietet Potenzial für die Entstehung von Spannungen in der Strangschale.

Zu Beginn der Erstarrung von Stählen der Stahlmarke D bilden sich zunächst δ -Ferritkristalle. Im Vergleich zu den anderen Stahlmarken liegt hier im Verlauf der Erstarrung über ein längeres Temperaturintervall ein teilflüssiger Zustand vor. Im Verlauf der Erstarrung wird der Kohlenstoff aus der Schmelze ausgeschieden. Mit dem Erreichen der Temperatur des Peritektikums wandeln sich die bereits gebildeten δ -Ferritkristalle mit der Schmelze zu Austenitkristallen um [FOPP19]. Diese Reaktion findet so lange statt, bis die gesamten Ferritkristalle aufgelöst sind. Im Verlauf der weiteren Abkühlung scheiden sich aus der Restschmelze Austenitkristalle aus, bis die gesamte Restschmelze erstarrt ist.

Die Stähle A, B, C und D erstarren also unterschiedlich. Welche Effekte dies auf die Bildung von Eigenspannungen, Längsrissen und Schalenfehler hat und wie die Oberflächenstruktur der Kokille auf diese Effekte einwirkt, soll nachfolgend erläutert werden.

Um die Effekte zur Entstehung der Schalenfehler der hier betrachteten unterschiedlichen Stahlmarken zu beschreiben, ist die Betrachtung der Stahlmarken A, B und C von der Stahlmarke D zu trennen. Auch die Wirkungsweise der Struktur auf die Stahlmarke A, B und C unterscheidet sich von der Wirkungsweise auf die Stahlmarke D. Daher werden zunächst die Stahlmarken A, B und C und die Wirkungsweisen der Oberflächenstrukturen auf diese Stahlmarken betrachtet.

9.2.1 Wirkungsweise der Oberflächenmodifikation auf die Erstarrungseffekte der Stahlmarken A, B und C

Alle drei Stahlmarken liegen in der eisenreichen Phase und mit ihrer chemischen Zusammensetzung links vom Peritektikum. Der Abbildung 9.11 ist zu entnehmen, dass die Stähle aller Stahlmarken während der Erstarrung in einem Temperaturintervall zwischen 1536 °C und 1392 °C mehrere verschiedene Phasen durchlaufen, in denen sich unterschiedliche Gefüge ausbilden.

Untersuchungen von [JABL91] zeigen, dass die thermische Kontraktion in Abhängigkeit von Kohlenstoffgehalt und entstandenem Gefüge zwischen 0,5 mm/m und 4,1 mm/m beträgt. Je nach Temperaturniveau in der Kokille beginnt die Erstarrung an unterschiedlichen Orten und zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Schreitet die Erstarrung fort, wächst die Strangschale lokal betrachtet unterschiedlich schnell. Zudem ist die lokal entstandene Volumenkontraktion aufgrund der inhomogenen Erstarrung des Stahlstranges zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb der Kokille unterschiedlich groß. Die lokale Inhomogenität in der Strangschalendicke bei gleichzeitig lokal unterschiedlicher Volumenkontraktion kann „inselartig“ zu unterschiedlichen Spannungszuständen und zu der Entstehung von Eigenspannungen führen (vgl. Kapitel 4.3).

Diskussion

Eine vergleichsweise dünne Strangschale, die den sich bildenden Eigenspannungen ausgesetzt ist, kann den Eigenspannungen wenig Widerstand entgegensetzen. Heißzugversuche zeigen, dass Stähle der Stahlmarken A, B und C in einem Temperaturintervall zwischen 1100 °C und 1450 °C Warmfestigkeiten von 11 N/mm² bis 48 N/mm² annehmen. Gleichzeitig wurden für die Dehnung in diesem Temperaturintervall Werte zwischen 0% und 32% ermittelt [OFFE19]. Bei Temperaturen oberhalb von 1411 °C wurden im Bereich des ersten Duktilitätsminimums Brucherscheinungen von 0% ermittelt [OFFE19]. Es besteht also für die innerhalb der Kokille vorherrschenden Strangschalentemperaturen eine geringe Duktilität der hier verwendeten Stähle. Die Eigenspannungen wachsen während der Erstarrung und können schließlich zum Längsriss und zum Schalenfehler führen. Wie die Struktur der Kokilloberfläche die soeben beschriebenen Erstarrungseffekte beeinflussen und somit den Schalenfehler für die Stahlmarken A, B und C reduzieren kann, wird nachfolgend beschrieben.

Die Struktur der Kokilloberfläche reduziert die Höhe des Wärmestroms zu Erstarrungsbeginn und die Volatilität des Wärmestroms (vgl. Kapitel 9.1.2). Die Reduzierung des Wärmestroms führt dazu, dass die einzelnen Erstarrungsphasen – Bildung von Ferrit aus der Schmelze und Umwandlung von Ferrit zu Austenit langsamer durchlaufen werden. Somit erhöht sich die Zeit in der sich gemäß dem Erstarrungsgesetz (vgl. Gleichung 4.8, Seite 27) eine dickere, homogenere und somit widerstandsfähigere Strangschale ausbildet. Eine vergleichsweise dicke Strangschale ist unempfindlicher gegenüber Eigenspannungen, sodass weniger Oberflächenfehler entstehen können.

Gleichzeitig führt eine reduzierte Volatilität im Wärmestrom dazu, dass die lokalen mit der Erstarrung verbundenen Volumenveränderungen (bspw. durch Kontraktion) im Verlauf der Erstarrung zu ungefähr gleichen Zeiten stattfinden. Hieraus resultiert an einem Zeitpunkt der Erstarrung und an jedem Ort in der Kokille eine über die Kokillbreite möglichst gleichmäßig dicke Strangschale. Die in Kapitel 4.3 beschriebene Inhomogenität in der Strangschalendicke wird somit reduziert und weniger Eigenspannungen entstehen. Dies wiederum zeigt sich anschließend in einer verminderten Oberflächenfehleranzahl.

9.2.2 Wirkungsweise der Oberflächenmodifikation auf die Erstarrungseffekte der Stahlmarke D

Im Gegensatz zu den Stahlmarken A, B und C erstarren Stähle der Stahlmarke D bei einem Kohlenstoffäquivalent, dessen Konzentration rechts vom Peritektikum (vgl. Abbildung 9.11, Punkt „J“, Seite 103) liegt. Stähle der Stahlmarke D erstarren zunächst teilweise ferritisch. Im Verlauf der peritektischen Reaktion lösen sich die Ferritkristalle wieder auf und es bilden sich Austenitkristalle. Die positive Wirkung von Kokillen mit Oberflächenstruktur auf die Fehlerreduktion ist auch bei Stählen der Stahlmarke D deutlich zu erkennen (vgl. Abbildung 9.11). Die Ursache der Reduktion soll nachfolgend erläutert werden.

Die Volumenkontraktion der für den Kohlenstoffbereich der Stahlmarke D beträgt 4,2 mm/m [JBAL91]. Stähle der Stahlmarke D „schrumpfen“ somit bei der Erstarrung in kurzer Zeit stark. Gleichzeitig findet die peritektische Reaktion im teilflüssigen Bereich statt.

Das Kohlenstoffäquivalent der Stahlmarke D mit 0,12% Kohlenstoffanteil liegt zudem in der Nähe des Peritektikums. Ein Kohlenstoffanteil zwischen 0,09 % und 0,12% Kohlenstoff wird im Strangguss hinsichtlich der Rissbildung als kritisch bewertet [WANS06]. Gleichzeitig ist die Analyse innerhalb einer Stahlpfanne mit 380t Inhalt lokal unterschiedlich, sodass ein der peritektischen Erstarrung ähnliches Erstarrungsverhalten der Stahlmarke D demnach nicht ausgeschlossen ist. Betriebliche Erfahrungen haben zudem ergeben, dass das Gießverhalten der Stahlmarke D ähnlich zu peritektischen Stählen als erstarrungskritisch bewertet wird. Daher werden Maßnahmen, wie beispielsweise eine Reduktion der Gießgeschwindigkeit getroffen, um einen stabilen Gießprozess zu gewährleisten.

Ein positiver Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Erstarrung ist demnach wahrscheinlich und wird zusätzlich durch Abbildung 8.4 belegt. Wie genau sich die Oberflächenstruktur auf den Erstarrungsprozess auswirkt, wird im Folgenden erläutert.

Wie bereits in Kapitel 9.2.1 erwähnt, reduziert die modifizierte Kokille den im Gießspiegelbereich abgeführten Wärmestrom. Dies führt dazu, dass die Strangschale nicht so

schnell erstarrt. Zum einen ist die nun dickere Strangschale unempfindlicher gegenüber Eigenspannungen. Zum anderen läuft die Erstarrung durch den geringeren Wärmestrom langsamer ab. Dadurch steht für die Umwandlung der Ferritkristalle in Austenitkristalle mehr Zeit zur Verfügung.

Gleichzeitig resultiert der geringere abgeführte Wärmestrom im Gießspiegelbereich in einer geringeren Volumenkontraktion. Hierdurch wird die dünne Strangschale weniger stark beansprucht und die Bildung von Eigenspannungen gemindert.

Analog zur Wirkungsweise bei der Erstarrung von Stählen der Stahlmarken A, B und C führt eine reduzierte Volatilität im Wärmestrom dazu, dass die durch die peritektische Erstarrung induzierten lokalen Phasenumwandlungen und die damit verbundenen Volumenveränderungen im Verlauf der Erstarrung zur etwa gleichen Zeit stattfinden. Auch hier entsteht eine gleichmäßigere Strangschalendicke.

Die soeben beschriebenen Effekte können analog zu den in Kapitel 9.2.1 beschriebenen Effekten in einer für den Stahl milderen Abkühlung und somit in einer Reduktion des Schalenfehlers resultieren.

9.3 Abschließendes Fazit zu den Auswirkungen der Oberflächenstruktur

In Kapitel 9 dieser Arbeit wurde die Wirkung der Kokille mit strukturierter Kokilloberfläche diskutiert. Es ist deutlich geworden, dass der Wärmestrom durch eine Oberflächenstrukturierung und der daraus resultierenden Kombination aus lokal dickeren Schlackenschichten und sich in den Vertiefungen bildender Luftpolster reduziert werden kann.

Die Reduktion des Wärmestroms wirkt sich in der Folge auf die Oberflächenqualität des zu gießenden Stahlstranges aus. Eine gemäßigte Abkühlung gibt der Strangschale mehr Zeit zu erstarren und somit widerstandsfähiger gegenüber Eigenspannungen zu werden. Gleichzeitig führt der reduzierte Wärmestrom dazu, dass zwischen Phasenumwandlungen und damit verbundenen Volumenveränderungen ausreichend Zeit für das Strangschalenwachstum zur Verfügung steht. Diese

Diskussion

Volumenveränderungen sind eine Ursache für die Bildung von Eigenspannungen und daraus resultierenden Schalenfehlern.

Zudem reduziert die Oberflächenstruktur die Volatilität der sich lokal ausbildenden Wärmeströme und homogenisiert so die lokale Dicke der sich ausbildenden Strangschale. Daraus folgt eine weitere Verringerung der Eigenspannungen und damit des Schalenfehlers. Welcher dieser Effekte im jeweiligen Gießprozess dominierend ist, hängt entscheidend von den jeweiligen Parametern im Gießprozess ab wie beispielsweise Kupferplattengeometrie und -dicke, zu gießender Stahlmarke sowie verwendetem Gießpulver.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand dieser Arbeit war die Untersuchung einer Oberflächenmodifikation der Kokille für Dünnbrammengießanlagen und ihrer Auswirkungen auf den sich bildenden Wärmestrom und die erzeugte Produktqualität.

Ausgehend vom Stand der Technik wurde das Problem der Entstehung der hier behandelten Schalenfehler beschrieben. Die in dieser Arbeit betrachteten Schalenfehler werden durch inhomogene Wärmeströme innerhalb der Kokille erzeugt. Daher galt es, die Wärmeströme in der Kokille zu homogenisieren und somit den Fehlerbefall zu reduzieren.

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Literatur wurden Untersuchungen mit potenziellen Oberflächenmodifikationen durchgeführt. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurde eine Nadelstruktur für den betrieblichen Einsatz ausgewählt und Kokillen in solcher Weise vorbereitet. Um die Prozesssicherheit nicht zu gefährden wurden Grenzwerte für die Struktur definiert. Die mit der Struktur modifizierten Kokillen wurden anschließend in den betrieblichen Stahlherstellungsprozess eingesetzt und es hat sich gezeigt, dass mit dem Einsatz der modifizierten Kokillen die Wärmeströme homogenisiert und die Schalenfehler reduziert werden konnten.

Die Ursache dieses positiven Effektes ist durch ein Zusammenwirken von Oberflächenstruktur, lokaler Erhöhung der Schlackenschichtdicke und Bildung von Gaspolstern zu erklären.

Die Homogenisierung des Wärmestroms führt zu einer gemäßigten und langsameren Abkühlung der Strangschale und somit zu einer stärkeren Ausbildung. Zudem wird die Erstarrung der Strangschale homogenisiert, wodurch Eigenstressungen und daraus resultierend Schalenfehler vermieden werden.

Das Fazit dieser Arbeit ist, dass durch eine geeignete Oberflächenstruktur die Wärmeströme innerhalb der Kokille homogenisiert werden und dadurch die Produktqualität verbessert wird.

Um die Erkenntnisse dieser Arbeit zu nutzen und die Untersuchungen weiterzuführen ist eine Übertragung der Oberflächenstruktur auf weitere Prozesse wie beispielsweise dem konventionellen Stranggießprozess denkbar. Durch eine Übertragung der

Zusammenfassung und Ausblick

Struktur auf die Kokillenschmalseiten kann der Einfluss dieser auf weitere Fehlertypen wie zum Beispiel Kantenrisse überprüft werden. Sinnvoll ist es zudem, weitere Herstellungsverfahren der Oberflächenstruktur bezüglich ihrer Anwendbarkeit im Stranggießprozess zu untersuchen. Abschließend bietet die modifizierte Kokille das Potenzial neue, schalenfehleranfällige Stahlmarken über Stranggussverfahren zu erzeugen. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich.

11 Literaturverzeichnis

- [AREF12] A. Arefpour, A. Monshi, T. Khayamian, A. Saidi: "Investigation of Viscosity's Effects on Continuous Casting of Steel Mold Powders Containing B₂O₃, Li₂O, TiO₂, Fe₂O₃, ZnO and Na₂O", Engineering, 2012, 4, p. 435-444.
- [BAEH16] H. - D. Baehr, K. Stephan: Wärme- und Stoffübertragung", Ausgabe 9, Springer-Verlag, 2016.
- [BARD41] Peter Bardenheuer, Richard Bleckmann: „Zur Frage des Erstarrens von Stahl in Gußblöcken“, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1941.
- [BECK09] D. Becker et al.: „0-Fehler-Strategie in der Kaltwalzindustrie“, Fachvereinigung Kaltwalzwerke e. V. und die CIELFFA, 2009.
- [BEYE06] H. Beyer-Steinhauer et al.: „Vorrichtung zur Verminderung der Wärmeabfuhr einer Stranggusskokille“, Patent EP 1099496, 2000.
- [BöCK06] P. von Böckh: „Wärmeübertragung - Grundlagen und Praxis“; zweite, bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004 / 2006.
- [BUXM81] K. Buxmann, M. Bolliger, I. Gyöngyös: „Mould with roughened surface for casting metals“, Swiss Aluminium Ltd., Patent: US 4250950, 17.02.1981.
- [CARL08] Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH: „Oberflächenparameter“; Poster, 2008. Internetlink: http://pages.zeiss.com/rs/896-XMS-794/images/DE_60_050_004I_Oberflaeche_A0.pdf, Stand: 16.07.2020
- [CHOO01] Choo, D., Jeong, S., Ha, M., Lee, Y.: "Crack occurrence on the surface of AISi 304 stainless steel strip produced by strip casting process", 59th Electric Furnace Conference, 2001, Phoenix, Arizona S. 761 – 770.

Literaturverzeichnis

- [DIN10] Norm: DIN EN ISO 4287:2010-07 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit, Internetlink: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-4287/129356592>, Stand: 08.12.2018.
- [DRES15] M. Dresler, E. Balichev, M. Thomasky: „Gießkokille zum Vergießen von Stahlschmelze“, Patent DE102013114326, 18.06.2015.
- [ECKH16] D. Eckhardt: “The Elimination of Defects by Mould Flux Adjustment”, Presentation at International Workshop: Surface quality of continuous cast products, Bergamo - Italy, December 2016.
- [FEHL06] G. Fehleemann, A. Girgensohn: „Verfahren zum Herstellen einer Stranggießkokille und Stranggießkokille“, SMS Demag AG, Patent: DE102005023745A1, 2006.
- [FOPP19] M. Foppe: „Experimentelle und numerische Untersuchung des Schrumpfungsverhaltens von peritektisch erstarrenden Stählen“, Dissertation Universität Duisburg Essen, 2019.
- [FUJI85] T. Fujiyama, S. Mayigawa, S. Deshimaru, H. Mizota: “Production of continuous casting slabs free from surface crack”, Steelmaking Conference Proceedings 68, Iron & Steel Society, S. 215-221, Warrendale (Pennsylvania) ,1985.
- [GIRG02] A. Girgensohn: „CSP-Kokille mit modifizierter Oberfläche“ Interne Hausmitteilung der ThyssenKrupp Steel Europe AG und SMS DEMAG, 2003.
- [GRÄF11] G. Gräf: „Schädigung von Gießrollenoberflächen“, Umformtechnische Schriften, Band 158, Shaker Verlag, Aachen 2011.

Literaturverzeichnis

- [GRAV85] H. Gravemann: „Verfahren zur Herstellung einer Stranggusskokille mit verschleißfester Schicht“, Kabel- und Metallwerke Gutehoffnungshütte AG, Patent DE 3415050, 1985.
- [GRUH85] W. Gruhl: „Stranggiesskokille“, Vereinigte Aluminiumwerke Aktiengesellschaft, Patent: EP0141904, 1985.
- [GUDE02] H.W. Gudenau et al.: „Materialsammlung zum Praktikum Metallurgie, Institut für Eisenhüttenkunder der RWTH Aachen, 5. Auflage, Aachen, 2002.
- [HANA09] M. Hanao, M. Kawamoto and A. Yamanaka: “Growth of Solidified Shell just below the Meniscus in Continuous Casting Mold”, ISIJ International, Vol. 49 (2009), No. 3, pp. 365–374
- [HASE12] H. Hasegawa et al.: “Thermal Conductivity Measurements of Some Synthetic Al₂O₃-CaO-SiO₂ Slags by Means of a Front-Heating and Front-Detection Laser-Flash Method”, Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 43B, Dezember 2012, Seiten 1406-1412.
- [HISA82] O. Hisashi, S. Tobutake: “Renzokuchuzoyoigata”, Kawasaki Steel Co., Patent: JPS5711735B2, 1982.
- [HISA94] E. Hisao, et al.: “Mold for continuous casting”, Nippon Steel Corp., Patent: JPH06297103, 25.10.1994.
- [HÖCK17] C. Höckling: “Herstellung von aluminiumlegiertem, hochmanganhaltigem Stahl über eine betriebliche Zwei-Rollen-Bandgießanlage”, Umformtechnische Schriften Band 187, Verlag Mainz, 2017.
- [HÖCK14] C. Höckling, J. Schwabe: Interner Bericht der thyssenkrupp Steel Europe AG, 2014.

Literaturverzeichnis

- [HÖHN18] M. Höhnerbach, G. Eyl: Interner Bericht der thyssenkrupp Steel Europe AG, 2018.
- [JABL91] A. Jablonka et al.: "Thermomechanical properties of iron and iron-carbon alloys: density and thermal contraction", steel research volume 62, 1991.
- [KANG12] Y. Kang, J. Lee, K. Morita: "Thermal Conductivity of Molten Slags: A Review of Measurement Techniques and Discussion Based on Microstructural Analysis", ISIJ International, Volume 54, Issue 9, Pages 2008-2016, 2014.
- [KLEI00] D. Klein: „Verfahren zum Beschichten der Innenseiten einer Durchlaufkokille und einer dergestalt beschichteten Kokille“, SMS Schloemann Siemag AG, Patent DE 4039230, 2000.
- [KLIN17] C. Klinkenberg et al.: "More than 25 Years of Experience in Thin Slab Casting and Rolling Current State of the Art and Future Developments", Steel Research International, Volume 88, 2017.
- [KNEE08] R. Kneer: „Wärme- und Stoffübertragung“, Vorlesungsskript zur Lehrveranstaltung Wärme- und Stoffübertragung (Heat and Mass Transfer), RWTH Aachen, Aachen 2008.
- [KÖST01] R. Köster: „Verfahren zur Herstellung einer Stranggusskokille mit verschleißfester Schicht“, Patent DE 10003827, 2001.
- [KURZ84] W. Kurz, D. Fischer: „Fundamentals of Solidification“, Trans Tech Publications, Switzerland 1984.
- [LECH08] S. Lechner, T. Söntgen, S. Thanner, R. Wagner: „Kokillenplatte für eine Kokille einer Stranggießanlage“, Patent: DE 102007028064, 24.12.2008.

Literaturverzeichnis

- [LIEF13] D. Lieftucht, M. Reifferscheid, T. Schramm, A. Krasilnikov, D. Kirsch: „HD Mold: A new Fiber-Optical-based Mold Monitoring System“, Iron and Steel Technology 10, December 2013.
- [LIPP11] P. von der Lippe: „Wie groß muss meine Stichprobe sein, damit sie repräsentativ ist?“, Diskussionsbeitrag aus der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Duisburg - Essen, Campus Essen, Nr. 187, Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft, Februar 2011, Internetlink:<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/45626/1/657931144.pdf>, Stand: 16.07.2020.
- [MAHA91] R.B. Mahapatra , J.K. Brimacombe, I.V. Samarasekera: “Mold behavior and its influence on quality in the continuous casting of steel slabs, Part II. Mold heat transfer, mold flux behavior, formation of oscillation marks, longitudinal off-corner depressions, and subsurface cracks”, Metallurgical Transactions B 22B (1991), 875-888.
- [MAHR19] Mahr GmbH: “Taktile oder optisch? Welcher Messtechnik bietet welche Vorteile?“, Internetlink: www.mahr.com/de/Leistungen/Fertigungsmesstechnik/Der-News--und-Praxis-Blog/?BlogContentID=20912&Blog-Action=comment (Stand 18.02.19).
- [MATH17] O. Mathews, F. Heini, S. Feldhaus, D. Denzler: „Mould developments for high speed casting“, European Continuous Casting Conference, Wien 2017.
- [MICRO15] Internetlink (Stand 13.04.2015): „<http://www.micro-epsilon.de/glossar/Laser-Linien-Triangulation.html>“, MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG.
- [MILL05] K.C. Mills, A.B. Fox, Z. Li & R.P. Thackray: “Performance and properties of mould fluxes”, Ironmaking & Steelmaking, 32:1, p. 26-34, 2005.

Literaturverzeichnis

- [MILL17] K. C. Mills, C. A. Decker: "The Casting Powders Book", Springer International Publishing, 2017.
- [NAGY05] P. Nagy: „Beschreibung der Oberflächenstruktur und Gefügeausbildung direkt gegossener, hochmanganhaltiger Stahlbänder“, Diplomarbeit RWTH Aachen, 2005.
- [NANO20] NanoFocus AG: „Die Hardwarekomponenten des Meßsystems – Die µScan®-Sensoreinheit“, Internetlink: <https://www.nanofocus.de/technologie/messprinzipien/>, Stand: 16.07.2020
- [OFFE19] A. Offergeld. Ergebnisse der Heißzugversuche. Interne E-Mail der thyssenkrupp Steel Europe AG vom 15.02.2019.
- [RODE04] D. Rode, H. Villanueva: „Kokille für eine Stranggießanlage“, KM Europa Metall Aktiengesellschaft, Patent EP 0911095, 2004.
- [RUDN15] J. Rudnizki, E. Balichev, M. Dresler, S. Karrasch: „Characterisation of mould slag during continuous casting of Al containing steels“, Vortrag bei der Fachausschusssitzung „Physikalische Chemie und metallurgische Verfahrensentwicklung“ (VDEh), Düsseldorf 2015.
- [SAHM99] P. Sahm, I. Egry, T. Volkmann: „Schmelze, Erstarrung, Grenzflächen - Eine Einführung in die Physik und Technologie flüssiger und fester Metalle“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999.
- [SCHM06] W. Schmitz, H. Zimmermann, W. Klos: „Verbesserung der Rollenoberflächentopografie beim Bandgießen“, interner Bericht der thyssenkrupp Steel Europe AG, Berichtsnummer: WSK-W-V GJ05/06-11, 2006.

Literaturverzeichnis

- [SCHM08] W. Schmitz: „Bandgießen von Stahl - ein kurzer Einblick in das Verfahren“, Interne Präsentation der thyssenkrupp Steel Europe AG, 24.06.2008.
- [SCHU62] H. Schumann: „Metallographie“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1962.
- [SCHW06] K. Schwerdtfeger: “Heat Withdrawal in the Mold”, Continuous Casting of Steel. Review and Analysis“, Steel Research International Volume 77 Issue 12, December 2006.
- [SEAR09] J. B. Sears: „Verbesserte Kokillenwandfläche für den Strangguss und Fertigungsverfahren“, AG Industries Inc., Patent: DE 19781990, 02.01.2009.
- [SEID15] M. Seidel: „Thermodynamik verstehen 1: Energielehre – Band 1 von De Gruyter Studium“ Verlag Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2015.
- [SHEP12] R. Sheperd, I. Knopp und H.-G. Braß: “Legierungsmiteleinfluss auf die peritektische Reaktion niedrig legierter Stähle“, Zeitschrift: Stahl und Eisen Volume 132 , Nr. 12, S. 99 - 105, 2012.
- [SONA15] Sonats ® und Schnür + Haller, Online-Flyer, Internetadresse „<http://www.shkg.de/files/Ultraschall-Nadel-Richten.pdf>“, abgerufen am 20.01.2015.
- [SPIE17] T Spierings, H. Hengeveld, J. Kromhout, E. Dekker, P. Sturm, A. Kamperman: “A novel view on casting performance: Application of fiber bragg gratings for slab casting”, 9th ECCO European Continuous Casting Conference – ECCO 2017, Vienna 2017.

Literaturverzeichnis

- [STRE04] H. Streubel: „Stranggießkokille zum Giessen von Strängen aus Metallen, insbesondere Stahlwerkstoffen“, SMS Demag AG, Patent: DE 10256751, 29.04.2004.
- [SUCK01] J. Sucker, H. Beyer-Steinhauer: “Funnel Geometry Of A Mold For The Continuous Casting Of Metal”, Patent US 6,186,220 B1, 13.02.2001.
- [SUZU04] M. Suzuki and Y. Yamaoka: “Influence of Carbon Content on Solidifying Shell Growth of Carbon Steels at the Initial Stage of Solidification” Materials Transactions, Vol. 44, No. 5 (2003) pp. 836 to 844.
- [TAHA01] M. A. Taha, N. A. El-Mahallawy, M. T. El-Mestekawi, and A. A. Hassan: “Estimation of air gap and heat transfer coefficient at different faces of Al and Al – Si castings solidifying in permanent mould”, Materials Science and Technology, Volume 17, September 2001.
- [THOM03] G. Thompson, C. Marique, P. Fourneaux, A. Dez, C. Marchionni, F. Hagemann, D. Senk, W. Schmitz: “Direct application of direct cast steel products”, Final Report of ECSC, Report EUR 20579 EN, Contract No 7210-PR/085, Brüssel (2002).
- [VDEH15] Verlag Stahleisen GmbH: “Fehlerkatalog Grobblech – Catalogue of Heavy Plate Defects“, Stahlinstitut VDEh, 1. Auflage, 2015.
- [VILL09] H. Villanueva, D. Rode: „Kokille zum Stranggießen von Metallen“, KME Germany AG & Co. KG, Patent: DE 19508169, 12.11.2009.
- [VOLK05] R. Volk: „Rauheitsmessung – Theorie und Praxis“; Beuth Verlag GmbH, Villingen-Schwennigen, 2005.
- [WANS06] J. Wans: „Oberflächenqualität peritektisch erstarrender Kohlenstoffstähle – Vergleich zwischen Strangguss und Bandguss“, Dissertation RWTH Aachen, 2006.

Literaturverzeichnis

- [WIED10] J. Wied: „Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen durch Festklopfen“, Dissertation TU Darmstadt, 2010.
- [WIRT76] S. Hara, T. et al.: „Stranggießkokille zum Stranggießen von Stahl“. Sumitomo Metal Industries Ltd.; Satosen Company Ltd., Patent 2625914, 1976.
- [WOBK07] H.-G. Wobker et al.: “Technologies for casting crack-prone steel grade”, METEC – International steel conference on new developments in metallurgical process technologies 3rd, International steel conference on new developments in metallurgical process technologies; 752-759, Düsseldorf, 2007.
- [WOBK09] H.-G. Wobker et. al.: „Kokille zum Stranggießen von Metall“, KME Germany AG & Co. KG, Patent: EP 1792676, 30.12.2009.
- [YOSH94] F. Yoshimori et. al.: “Mold for continuously casting thin cast slab and method for working surface thereof”, Nippon Steel Corp. / Mitsubishi Heavy Ind. Ltd., Patent: JP06134553, 17.05.1994.
- [ZHIQ16] Z. Zhi-qiang, et al.: “Research on the Influential Factors of Heat Flux in Mold of CSP in WISCO.” 9th China International Steel Congress. 2016.

12 Anhang

Nachfolgend werden in dem Anhang dieser Arbeit die Gleichungen für Berechnungen des Kohlenstoffäquivalents sowie für die Berechnung zur Beurteilung des Mindeststichprobenumfangs beschrieben.

12.1 Berechnung des Kohlenstoffäquivalentes

In diesem Kapitel sind die Gleichungen für die Berechnung des Kohlenstoffäquivalentes sowie der für die Berechnung gültige Bereich der Elemente (nach [SHEP12]) aufgeführt.

$$C_e = \frac{C - C_\delta}{C'_y - C_\delta} * (C_y - C_\delta) + C_\delta \quad (\text{Gleichung 12.1})$$

mit:

C_e : Kohlenstoffäquivalent

C : Gemessener Kohlenstoffgehalt des Stahls in % Massenanteil

C_δ : Kohlenstoffgehalt des Punktes H im Eisenkohlenstoffdiagramm in % Massenanteil

C_y : Kohlenstoffgehalt des Punktes J im Eisenkohlenstoffdiagramm in % Massenanteil

C'_δ : Kohlenstoffgehalt des Punktes C'_δ im Eisenkohlenstoffdiagramm in % Massenanteil

C'_y : Kohlenstoffgehalt des Punktes C'_y im Eisenkohlenstoffdiagramm in % Massenanteil

Anhang

$$\begin{aligned}
 C'_\delta = & 0,0927 - 0,0151 * Mn + 0,00776 * Si^2 + 0,0565 * Al + 0,0143 * Al^2 + \\
 & 0,00338 * Al^3 - 0,0170 * Mn * Si - 0,0148 * Mn * Al - 0,0574 * Si * Al - 0,00848 * \\
 & Mn * Si * Al - 0,00900 * (Si * Al)^2 - 0,0121 * (Si + Al) - 0,000775 * Si^4 + \\
 & 0,00128 * (Mn * Si)^3 + 0,00119 * (Mn + Si + Al)^3 + 0,000913 * (Mn * \\
 & Al)^4 - 0,00193 * (Mn * Si * Al)^4 - 0,000341 * (Mn + Si + Al)^4 - 0,0425 * P^2 + \\
 & 0,0549 * P + 0,1369 * S - 0,0135 * Cu - 0,4694 * N + 0,0036 * Sn^2 - 0,014 * \\
 & Sn - 0,0256 * Nb - 0,0357 * Ti + 0,0113 * V - 0,0009 * Mo^2 + 0,0062 * Mo - \\
 & 0,0016 * Cr - 0,0195 * Ni
 \end{aligned}
 \tag{Gleichung 12.2}$$

$$\begin{aligned}
 C'_\gamma = & 0,249 + 0,0673 * Si^2 + 0,177 * Al^2 - 0,0232 * Mn * Si - 0,0116 * Mn * Al + \\
 & 0,140 * Al^5 - 0,105 * Si * Al + 0,0214 * Mn * Si * Al + 0,0104 * (Mn * Si)^2 - \\
 & 0,0429 * (Si * Al)^2 - 0,195 * Al^4 + 0,0441 * Mn^4 - 0,0269 * Mn^5 - 0,0242 * \\
 & e^{Mn} - 0,0437 * e^{Si} + 0,0233 * (Si * Al)^4 + 0,0152 * (Mn * Si * Al)^4 - 0,000721 * \\
 & (Mn + Si + Al)^4 + 0,2651 * P + 0,5573 * S - 0,0174 * Cu - 0,585 * N + 0,0094 * \\
 & Sn^2 - 0,0211 * Sn - 0,027 * Nb + 0,0377 * Ti^2 - 0,0463 * Ti + 0,042 * V - \\
 & 0,0015 * Mo^2 + 0,0238 * Mo + 0,0024 * Cr^2 - 0,002 * Cr - 0,0349 * Ni
 \end{aligned}
 \tag{Gleichung 12.3}$$

12.2 Berechnung des Mindeststichprobenumfangs (a priori)

In diesem Kapitel sind die Annahmen sowie die Gleichung für die Berechnung des Mindeststichprobenumfangs (nach [LIPP11]) aufgeführt.

$$n_{min} \geq \frac{z^2 * \pi * (1 - \pi)}{\left(e^2 + \frac{z^2 * \pi * (1 - \pi)}{N} \right)} \quad (\text{Gleichung 12.4})$$

Annahmen zur Berechnung des Stichprobenumfangs (für statistische Berechnungen übliche Werte):

- Die Gesamtmenge N ist endlich.
- Die Fehlertoleranz e beträgt 5% (=0,05).
- Der Mittelwert der Grundgesamtheit π beträgt 50% (=0,5).
- Das Vertrauensniveau für die verwendeten Daten liegt bei 95%. Für die statistische Berechnungsgröße z ergibt sich ein Wert von 1,96.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Diese Dissertation wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/72424

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20200811-145449-4

Alle Rechte vorbehalten.