



Einfluss von Gießspiegelschwankungen auf den makroskopischen Reinheitsgrad

Masterarbeit

eingereicht von

Petra Roppl

am Lehrstuhl für Metallurgie
der Montanuniversität Leoben

Leoben, Juni 2008



Masterarbeit Petra Roppl

Frau **Petra Roppl** wird vom Lehrstuhl für Metallurgie folgendes Masterarbeitsthema gestellt:

Einfluss von Gießspiegelschwankungen auf den makroskopischen Reinheitsgrad

Beim Vergießen von Vorblöcken an der Stranggießanlage treten vereinzelt Gießspiegelschwankungen auf. Im Rahmen dieser Arbeit ist der Einfluss von instationären Verhältnissen beim Stranggießen, insbesondere im Zusammenhang mit Clogging, auf den makroskopischen Reinheitsgrad im Gussprodukt zu untersuchen. Insbesondere sind die Art, Ausdehnung und Lage der auftretenden Fehler in Abhängigkeit von der Stärke der Gießspiegelschwankung von Interesse.

Aufgabenstellung und geplante Untersuchungen:

- Literaturstudium
- Systematische Auswertung der Aufzeichnungen über Gießspiegelschwankungen
- Beprobung am überwalzten Produkt bzw. an Rohren und Stabstahl bei Schmelzen, wo Unregelmäßigkeiten bei der Vergießbarkeit aufgetreten sind
- US-Prüfung, um die Lage von nichtmetallischen Einschlüssen feststellen zu können
- Untersuchung der Menge, Größe und Art der NME (eingezogenes Gießpulver in Oberflächennähe, Cloggingprodukte im Stranginneren)
- Quantitative Abschätzung des Einflusses von Gießspiegelschwankungen auf Fehler im Vorblock (wann muss verschrottet werden)

Betreuer: Ass. Prof. Dr Christian Bernhard (Montanuniversität Leoben)

Dipl.-Ing. Wolfgang Rauter (voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG)

Dipl.-Ing. Markus Lechner (voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG)

voestalpine



Einfluss von Gießspiegelschwankungen auf den makroskopischen Reinheitsgrad

Masterarbeit
eingereicht von

Petra Roppl



Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss von instationären Verhältnissen beim Stranggießen auf die Produktqualität. Insbesondere den Auswirkungen von Gießspiegelschwankungen im Zusammenhang mit Clogging auf den makroskopischen Reinheitsgrad von stranggegossenem Halbzeug wurde besondere Bedeutung beigemessen. In der Literatur ist diese Problemstellung noch nicht explizit diskutiert worden und es bestehen nur unzureichende Kenntnisse über qualitätsmindernde Konsequenzen. Die einzelnen Formen von auftretenden Gießspiegelschwankungen wurden untersucht und deren Auslöser charakterisiert. Vorblöcke, bei welchen Unregelmäßigkeiten im Gießverlauf aufgetreten sind, wurden separiert, zu adäquaten Formaten umgeformt und mittels Ultraschalltechnik auf deren makroskopischen Reinheitsgrad überprüft. Die detektierten Ungängen wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht und mit den aufgetretenen Gießspiegelschwankungen verglichen.

voestalpine



Influence of mold level fluctuations on the macroscopic purity degree

Master thesis

Author:

Petra Roppl



Abstract

The present work deals with the influence of unsteady conditions during continuous casting on the product quality. In particular, the effect of mould level fluctuations in conjunction with clogging was studied with respect to macroscopic steel cleanness. Not discussed in the literature so far, there is only little knowledge about the quality reducing effects of mould level fluctuations. Especially focusing on the individual types of mould level fluctuations and their activators, blooms which showed irregularities during casting, were rolled to tubes and bars and inspected by ultrasonic. The detected discontinuities were further examined by scanning electron microscopy and the results were compared with the mould level fluctuations.

voestalpine

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den verwendeten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Petra Roppl

Leoben, Juni 2008

Danksagung

An erster Stelle geht mein Dank an Herrn Dr. Christian Bernhard für die ständige Bereitschaft zu klärenden Diskussionen und die großartige Unterstützung während der gesamten Arbeit. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Rauter bedanken. Er hat mich bei der Durchführung der Arbeit in jeder Weise unterstützt und mit förderlicher Kritik und wertvollen Hinweisen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Mein Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Markus Lechner für das entgegengebrachte Interesse und die unterstützende Betreuung. Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Peter Sammt, Stahl Judenburg AG, und Herrn Ing. Franz Eggbauer, voestalpine Tubulars Kindberg, für die kompetente Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen. Zuletzt gebührt ein besonderer Dank meiner Familie, ohne deren Geduld und Unterstützung während des gesamten Studiums das Durchführen dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Stranggießen	3
2.2	Instationäre Verhältnisse beim Stranggießen und deren Auswirkungen	4
2.2.1	Strömung im Verteiler	5
2.2.2	Strömung der Schmelze in der Kokille und Gießspiegelschwankungen	6
2.2.3	Partikelbewegung und Abscheidung	9
2.3	Clogging	9
2.3.1	Ursachen von Clogging	10
2.3.2	Einfluss von Titan	14
2.3.3	Maßnahmen zur Vermeidung von Clogging	15
2.3.4	Entstehungsorte und Morphologie der Ablagerungen	19
2.4	Einschlüsse im Gussprodukt	20
2.4.1	Einteilung der Einschlüsse	21
2.4.2	Exogene Einschlüsse durch Reoxidation	23
2.4.3	Exogene Einschlüsse durch Schlackeneinzug	23
2.4.4	Exogene Einschlüsse aufgrund von Erosion des Feuerfestmaterials	24
2.4.5	Einschlussbildung bei der Desoxidation	24
2.4.6	Auswirkungen der Einschlüsse	27
2.4.7	Absorption und Auflösung von Einschlüssen in der Kokille	29
2.5	Ca-Behandlung	30
2.6	Prüfungsmethoden	37
2.6.1	Ultraschallprüfung	37
2.7	Zusammenfassung	40
3	Praktischer Teil	42
3.1	Problemstellung	42
3.2	Gießspiegelverlauf und Gießspiegelschwankungen	42
3.2.1	Gießspiegelregelung	42

3.2.2	Untersuchung des Regelsystems der CC3 und Beschreibung von Gießspiegelschwankungen	43
3.3	Untersuchung von ausgewählten Proben	53
3.3.1	Auswahl der Proben	53
3.3.2	Vorbereitung der Proben und Prüfung auf den makroskopischen Reinheitsgrad.....	55
3.4	Ergebnisse	60
3.4.1	Ergebnisse der Ultraschallprüfung der Nahtlosrohrproben	60
3.4.2	Ergebnisse der metallographischen Untersuchung der Nahtlosrohrproben	72
3.4.3	Ergebnisse der Ultraschallprüfung der Knüppel.....	78
3.4.4	Ergebnisse der metallographischen Untersuchung der Stäbe.....	84
3.5	Diskussion der Ergebnisse	86
4	Zusammenfassung und Ausblick.....	91
	Literaturverzeichnis	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Prinzip einer Stranggießanlage	3
Abbildung 2-2: Strömung in der Kokille bei senkrechtem ETA-Ausgang	6
Abbildung 2-3: Auslöser von Oberflächenfehlern.....	8
Abbildung 2-4: Kontaktwinkel	11
Abbildung 2-5: Bildung von Tonerde an der Grenzfläche Feuerfestmaterial-Stahlschmelze	13
Abbildung 2-6: Einfluss der Oberflächenrauigkeit	18
Abbildung 2-7: Ausbildung von Schichten bei Cloggingablagerungen.....	20
Abbildung 2-8: Möglichkeiten des Schlackeneinzugs in der Kokille.....	24
Abbildung 2-9: Oxidwachstumsformen in Abhängigkeit von den örtlichen Aktivitätsverhältnissen des Sauerstoffs und des Desoxidationsmetalls.....	26
Abbildung 2-10: Schädlichkeitsindex verschiedener Einschlusstypen bezüglich der Lebensdauer eines Kugellagerstahls.....	27
Abbildung 2-11: Einfangen von Einschlussclustern und Schlacke.....	30
Abbildung 2-12: Einbringmöglichkeiten von Ca in die Pfanne.....	31
Abbildung 2-13: Modifikation mittels Ca-Behandlung.....	32
Abbildung 2-14: Phasendiagramm CaO-Al ₂ O ₃	33
Abbildung 2-15: Mechanismus der Al ₂ O ₃ -Modifikation durch Ca-Behandlung	34
Abbildung 2-16: Fenster der Vergießbarkeit	35
Abbildung 2-17: Änderung der Zusammensetzung von Einschlüssen ab dem Zeitpunkt der Ca-Zugabe bei einem aluminiumberuhigten Stahl.....	36
Abbildung 2-18: a) CaO-Gehalt der Oxide bei verschiedenen Sauerstoffgehalten und b) Stabilität diverser Phasen jeweils gültig für 0,04 %Al und 1600 °C.....	37
Abbildung 2-19: Durchschallungsverfahren	39
Abbildung 2-20: Impuls-Echo-Verfahren	39
Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau und Anordnung der Strahlenquelle – Szintillationszähler Kombination	43
Abbildung 3-2: Zuschmieren des Gießkanals durch Clogging (Typ I).....	44

Abbildung 3-3: Starke Gießspiegelschwankungen durch Clogging (Typ II).....	45
Abbildung 3-4: Plötzliches Absenken des Stopfens (Typ III).....	46
Abbildung 3-5: Gießspiegelschwankungen, ETA mit 45 mm Innendurchmesser (Typ IV)....	47
Abbildung 3-6: Vermessen von Gießspiegelschwankungen	48
Abbildung 3-7: Gießgeschwindigkeit 1,6 m/min, ETA mit 35 mm Innendurchmesser.....	50
Abbildung 3-8: Gießgeschwindigkeit 1,5 m/min, ETA mit 35 mm Innendurchmesser.....	50
Abbildung 3-9: Gießgeschwindigkeit 1,2 m/min, ETA mit 35 mm Innendurchmesser.....	51
Abbildung 3-10: Gießgeschwindigkeit 1,2 m/min, ETA mit 45 mm Innendurchmesser.....	51
Abbildung 3-11: Einfluss der ETA-Geometrie auf den Durchflussquerschnitt.....	52
Abbildung 3-12: Zusammenhang Gradienten Gießspiegel – Gradienten Stopfen	54
Abbildung 3-13: Gießspiegelverlauf des Datenpunktes „A“ in Abbildung 3-12	55
Abbildung 3-14: Herstellung der zu prüfenden Rohre	56
Abbildung 3-15: Anordnung der Prüfköpfe der Ultraschallprüfanlage	57
Abbildung 3-16: Einrichtung der Tauchtechnikprüfung	58
Abbildung 3-17: Herstellung der zu prüfenden Stäbe	59
Abbildung 3-18: Aufzeichnung der Ultraschallprüfung eines guten Rohres	61
Abbildung 3-19: Aufzeichnung der Ultraschallprüfung der Probe B8	61
Abbildung 3-20: Anzeige der Tauchtechnikprüfung für „B8-4 R“	62
Abbildung 3-21: Darstellung der Größe des detektierten Fehlers der Probe „B8-4 R“	63
Abbildung 3-22: Berechnung des Gießspiegelwertes für ein Segment.....	64
Abbildung 3-23: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Anzahl der Fehlersignale für die untersuchte Probe B2.....	65
Abbildung 3-24: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Anzahl der Fehlersignale für die untersuchte Probe B4.....	66
Abbildung 3-25: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Anzahl der Fehlersignale für die untersuchten Proben B9 und B10	67
Abbildung 3-26: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Anzahl der Fehlersignale für die untersuchte Probe B11.....	68
Abbildung 3-27: Detektierbarkeit von Fehlern an den Nahtlosrohrproben	69
Abbildung 3-28: Lage der NME der Proben B3, B4, B7 und B8.....	71
Abbildung 3-29: Lage der NME der Proben B10 und B11	72
Abbildung 3-30: Aufnahme und Röntgenspektrum für B4-5 E	74
Abbildung 3-31: Aufnahme von B8-3 E und Markierungen der analysierten Bereiche	75
Abbildung 3-32: B10-5 R(1) mit mittlerer Zusammensetzung in Massenprozent.....	76
Abbildung 3-33: B10-5 (R2) mit mittlerer Zusammensetzung in Massenprozent.....	76
Abbildung 3-34: Phasendiagramm CaO-Al ₂ O ₃ mit den detektierten Einschlüssen	77

Abbildung 3-35: Detektierbarkeit von NME an den Stäben.....	79
Abbildung 3-36: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Fehlerbereich der untersuchten Probe K2	80
Abbildung 3-37: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Fehlerbereich der untersuchten Probe K3	81
Abbildung 3-38: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Fehlerbereich der untersuchten Probe K4	82
Abbildung 3-39: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Fehlerbereich der untersuchten Probe K5	83
Abbildung 3-40: Darstellung und Analyse einzelner Bereiche des Kernfehlers (K5/2-M)	84
Abbildung 3-41: Darstellung und Analyse einzelner Bereiche des Oberflächenfehlers (K3/2-E)	85
Abbildung 3-42: Fehleranteil der Proben.....	87
Abbildung 3-43: Anteil an fehlerhaften Proben für jeden Typ.....	88
Abbildung 3-44: Zusammenhang der Auslenkung des Gießspiegels und den Anteil fehlerhafter Proben	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-I: Einfluss von Titan auf die Ausbildung der Ablagerungen	15
Tabelle 2-II: Reinheitsgradanforderungen verschiedener Stähle (T.O. = Total Oxygen)	21
Tabelle 2-III: Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien	38
Tabelle 3-I: Erfassen der Daten und Bildung der Gradienten	49
Tabelle 3-II: Auflistung der Proben	53
Tabelle 3-III: Analysen der untersuchten Stahlsorten	54
Tabelle 3-IV: Analyse der in Abbildung 1.31 markierten Bereiche	75
Tabelle 3-V: Analyse der in Abbildung 3.40 markierten Bereiche	85
Tabelle 3-VI: Analyse der in Abbildung 3.41 markierten Bereiche	85

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG (im Weiteren VASD) erzeugt jährlich rund 1,55 Mio. Tonnen Stahl. Die Produktpalette umfasst ein weit gefächertes Programm von Stahlsorten für höchste Anforderungen wie Schienenstähle, Kugellagerstähle, Federstähle, Reifencordstähle, Stähle für Nahtlosrohre, Vergüttestähle und viele mehr. Die Erzeugungslinie besteht aus Sinteranlage, Hochofen, Roheisenentschwefelung, LD-Konverter, Sekundärmetallurgie, Stranggießanlagen und Knüppelwalzwerk. Das Roheisen wird mittels Torpedopfannen vom Hochofen zum Stahlwerk transportiert. Von dort gelangt es in Roheisenpfannen und wird nach der Entschwefelung in den LD-Tiegel chargiert. Der hier erhaltene Rohstahl wird in 70 t Pfannen abgestochen und in der Sekundärmetallurgie weiterbehandelt. Die fertige Stahlschmelze wird an den Stranggießanlagen, je nach gewünschtem Format, vergossen. Die VASD verfügt über zwei Stranggießanlagen: eine 3-strängige Vorblockstranggießanlage (CC2) und eine 5-strängige Vorblockstranggießanlage (CC3). Um den hohen Qualitätsanforderungen der Kunden gerecht zu werden, ist eine kontrollierte und störungsfreie Stahlerzeugung von Nöten. Die Stranggießanlage stellt die letzte Anlage der Flüssigphase dar und hat somit weitreichenden Einfluss auf die Produktqualität. Durch die steigenden Anforderungen an Qualität und Produktivität wächst auch das Interesse an strömungstechnischen Optimierungen beim Stranggießen. Durch ungleichmäßige Strömungen im System Tauchrohr-Kokille kann sowohl die Innen- als auch die Oberflächenqualität des Gussproduktes verschlechtert werden. Um einen störungsfreien Gießverlauf zu gewährleisten, müssen demnach neben anderen Bedingungen auch optimale Strömungsverhältnisse vorherrschen. Ziel dieser Diplomarbeit ist, den Einfluss von instationären Verhältnissen beim Stranggießen auf den makroskopischen Reinheitsgrad im Gussprodukt zu untersuchen. Besonderes Augenmerk soll hierbei auf den Einfluss von Gießspiegelschwankungen gelegt werden. Der Zusammenhang der Art, Lage und

Ausdehnung der auftretenden Fehler und der Stärke der Gießspiegelschwankung soll erarbeitet werden. Hierbei sind vor allem Stahlsorten von Interesse, welche Al-beruhigt, teilweise schwefelgeregelt, mit Ca behandelt sind und unterschiedliche Kohlenstoffgehalte aufweisen. Vergossen werden diese Stahlsorten unter anderem auf der Stranggießanlage CC3 im Rundformat mit einem Durchmesser von 230 mm. Die Stranggießanlage verfügt über ein computerunterstütztes Protokollierungssystem, welches die jeweiligen Positionen des Gießspiegels und des Stopfens aufzeichnet. Unregelmäßigkeiten im Stopfenwegverlauf und Gießspiegelschwankungen sollen im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden und die Folgen bezüglich der Fehler im Gussprodukt sind aufzuzeigen. Zweck der Untersuchungen ist es, einen Grenzwert für die Auslenkung des Gießspiegels festzulegen, ab welcher die Qualitätseinbußen so hoch sind, dass das betroffene Teilstück zu verschrotten ist.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Stranggießen

Stranggießen ist ein Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung von Halbzeug wie Brammen, Vorblöcke, Rundblöcke, Knüppel und Trägerprofile. Aus diesem Halbzeug können somit verschiedene Produkte wie Bleche, Schienen, Rohre, Draht sowie Fein- und Großprofile etc. erzeugt werden. In den letzten Jahren hat sich dieses Verfahren im Gegensatz zur zweistufigen Fertigung über den Blockguss aus wirtschaftlichen und qualitativen Gründen durchgesetzt. Einen Überblick über eine Stranggießanlage liefert **Abbildung 2-1**.

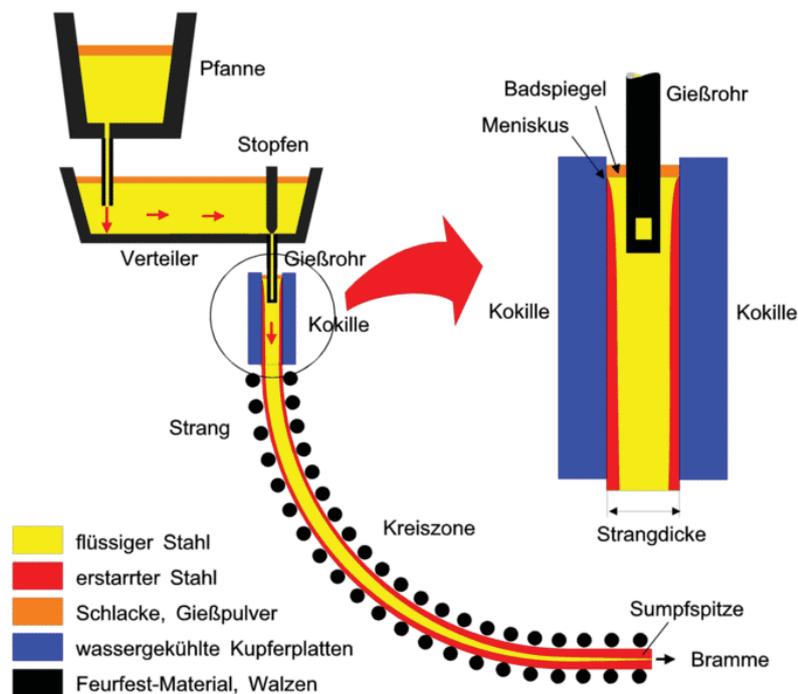


Abbildung 2-1: Prinzip einer Stranggießanlage^[2]

Beim Stranggießen fließt der flüssige Stahl von der Pfanne durch einen Bodenausguss in einen Verteiler. Um die Schmelze dabei vor Reoxidation zu bewahren, wird ein Schattenrohr als Gießstrahlschutz verwendet. Der Verteiler dient hauptsächlich als Puffergefäß und verteilt die Schmelze auf die einzelnen Stränge. Außerdem leistet der Verteiler noch metallurgische Arbeit, da die Schmelze homogenisiert wird und nichtmetallische Einschlüsse abgeschieden werden können. Der Stahl fließt über Eintauchausgüsse (im Weiteren ETA genannt) in eine wassergekühlte, bodenlose Kokille. Die Durchflussrate wird dabei über Stopfen geregelt. Innerhalb der Kokille erstarrt die Strangschale und der Strang wird mittels Führungsrollen, die für den Weitertransport und die Abstützung sorgen, nach unten abgezogen. Im gleichen Ausmaß wie abgezogen wird, wird Stahl in die Kokille nachgegossen, sodass sich ein endloser Strang bildet. Der Gießspiegel in der Kokille wird kontinuierlich als Schutz vor Reoxidation mit Gießpulver abgedeckt, welches auch als Schmiermittel dient und aufsteigende nichtmetallische Einschlüsse aufnehmen kann. Damit der Stahl an der Kokillenwand nicht anhaftet, oszilliert diese mit definiertem Hub. Beim Verlassen der Kokille tritt der Strang, dessen Kern noch flüssig ist, in die Sekundärkühlzone. Dort wird durch Spritzdüsen mit Wasser gekühlt, damit der Strang völlig durcherstarrt. Durch die intensive Kühlung stellt sich ein gleichmäßiges Erstarrungsgefüge mit günstigen technologischen Eigenschaften ein. Aufgrund der niedrigeren Bauhöhe und zur Vermeidung von hohen Drücken durch die flüssige Stahlsäule im Inneren des Stranges, werden heutzutage meist Kreisbogenstranggießanlagen betrieben. Die Stranggießanlage CC3 der VASD verfügt über eine gebogene Kokille, was erlaubt den Strang kreisbogenförmig zu gießen wodurch keine Biegezone notwendig ist. Nach der Sekundärkühlzone beginnt in der Richtzone die Rückbiegung des Stranges in die Waagrechte. Der auslaufende Strang wird mittels einer Brennschneidmaschine oder Knüppelschere auf die gewünschte Länge abgetrennt.^{[3], [4]}

2.2 Instationäre Verhältnisse beim Stranggießen und deren Auswirkungen

Treten beim Stranggießen instationäre Verhältnisse auf, kann dies zu Fehlern im Produkt führen. Qualitätseinbußen während des Stranggießens können oftmals auf ungünstige Strömungsverhältnisse zurückgeführt werden. In der Pfanne und im Verteiler haben Strömungen die Aufgabe die Schmelze zu homogenisieren und das Zusammenpacken von Einschlüssen zu fördern, damit diese aufsteigen und sich in die Schlacke abscheiden. Strömungen können durch das Einleiten von Gas oder durch natürliche Konvektion erzeugt werden. Die natürliche Konvektion ergibt sich aus Dichteunterschieden der Schmelze bei

verschiedenen Temperaturen. Kommt eine Spülung mit Inertgas zum Einsatz sollte der Gasfluss so gesteuert werden, dass sich eine optimale Strömung ausbildet, welche die Schmelze homogenisiert und Einschlüsse zusammenpacken und aufsteigen, aber die Schlackenschicht dabei nicht aufgerissen wird.^[5]

Der Verteiler stellt ein wichtiges metallurgisches Gefäß dar, dessen Aufgaben das Abscheiden von Einschlüssen, Beibehalten einer homogenen Schmelze und das Vermeiden von strömungsbedingten Problemen, wie beispielsweise Hotspots und Ablagerungen im Gießkanal, umfassen. Generell kann im Zuge dieses Prozessschrittes die Qualität verbessert, beibehalten oder verschlechtert werden. Bilden sich ungünstige Strömungsverhältnisse aus, so kann es zur Wirbelbildung, toten Zonen, unbeständigen Strömungsgeschwindigkeiten und infolge dessen zu Reoxidation und Schlackeneinzug kommen.

Die Produktqualität von stranggegossenem Material wird stark von den Strömungsverhältnissen in der Kokille beeinflusst. Besonderes Augenmerk muss hierbei auf das Verhalten von Einschlusspartikeln gelegt werden, da sich diese im Endprodukt als Fehler wiederfinden wenn sie nicht abgeschieden werden.^[6] Damit gute Bedingungen beim Gießen gewährleistet werden können, ist die Regelung des Gießspiegels in der Kokille von großer Bedeutung. Treten Gießspiegelschwankungen auf, können Strangschalenfehler und weitere Qualitätseinbußen, welche in **Kapitel 2.2.2** erläutert werden, die Folge sein. Die Ursachen dafür sind sehr vielfältig und umfassen neben metallurgisch bedingten Problemen auch mechanische, elektrische und elektronische Störungen des Regelsystems. In den folgenden Absätzen werden verschiedene Ursachen und Auswirkungen von instationären Verhältnissen in den einzelnen Entstehungsorten der Stranggießanlage erläutert.^{[3], [5]}

2.2.1 Strömung im Verteiler

Die Strömungen im Verteiler sollten sich so ausbilden, dass eine möglichst lange Verweilzeit der Schmelze gewährleistet wird. Somit steht genügend Zeit zur Verfügung, vorhandene Einschlüsse noch vor dem Vergießen in die Verteilerschlacke abzuscheiden. Der Fluss wird durch die Geometrie des Verteilers, Füllhöhe, Ausgussöffnung und diversen Einbauten bestimmt. Tiefe Verteiler mit hohen Kapazitäten erhöhen die Verweilzeit und tragen so zur Erhöhung des Reinheitsgrades bei. Weiters wird bei großen Verteilern auch der Wirbelbildung entgegengewirkt und es ergibt sich ein größerer Puffer während des Pfannenwechsels, bevor ein Mitreißen der Verteilerschlacke zu Problemen führt. Die Verteiler der CC3 in der VASD haben eine Kapazität von 25 Tonnen. Es werden verschiedene Einbauten wie Leisten, Dämme, Sterneinbauten und Pralltöpfe verwendet.

Wird im Verteiler mit Inertgas gespült, so wird die Kollision der Einschlüsse und das folgende Abscheiden erleichtert. Dies kommt bei der VASD jedoch nicht zur Anwendung. Hierbei besteht die Gefahr, dass mit Partikeln behaftete Blasen in die Kokille gelangen und zu Fehlern im Gussprodukt führen.^[5]

2.2.2 Strömung der Schmelze in der Kokille und Gießspiegelschwankungen

Die Strömung in der Kokille ist ein wichtiger Faktor für die Produktqualität.^[7] Da hier der Übergang von fest auf flüssig erfolgt, kann eine schlechte Kontrolle viele qualitätsmindernde Folgen haben. Häufige Fehlerquellen sind das Einschließen von Gasblasen und festen Partikeln in die erstarrende Schale, Schlackeneinzug, unzureichende Abdeckung durch die Schlacke, Oberflächenfehler oder Ausbrüche infolge von Gießspiegelschwankungen. Die Beschaffenheit des Gießstrahles hängt primär von der ETA-Öffnung ab. Jedoch ist seine Ausbildung auch von der Gasdurchflussrate, vom Format des zu vergießenden Materials, der Gießgeschwindigkeit und den elektromagnetischen Kräften abhängig, wenn in der Kokille elektromagnetisches Rühren eingesetzt wird. Die Eintauchausgüsse, welche an der CC3 der VASD verwendet werden, besitzen einen vertikalen Ausguss. Dieser bewirkt, dass der Strahl sehr tief in den Strang eindringt und die Strömung einen weiten Weg zurücklegt, bis es zu einer Aufwärtsströmung in den Meniskusbereich kommt (**Abbildung 2-2**). Bei Ausbildung einer ruhigen Oberfläche ist das Eindringen von Gießpulverschlacke eher unwahrscheinlich, jedoch ist es ebenso ungünstig, wenn der Meniskus zu ruhig und infolge dessen kalt ist, da es dadurch zum Einfrieren des Badspiegels kommt.^[5]

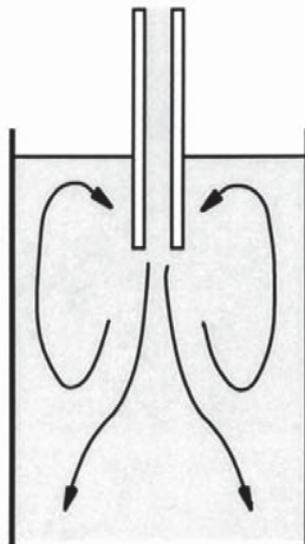


Abbildung 2-2: Strömung in der Kokille bei senkrechtem ETA-Ausgang^[5]

Viele Oberflächenfehler haben ihren Ursprung im Meniskus in der Kokille, wo die Schalendicke noch sehr dünn ist. Die Ursache ist meist das Einziehen von Gießpulver bzw. Gießpulverschlacke, Einschlüssen oder Gasblasen. Sind die Gasblasen sehr klein wird das Aufsteigen in die Schlacke aufgrund des geringeren Auftriebes erschwert. Ist der Badspiegel sehr unruhig, stockend oder bildet sich ein erstarrter Haken aus, so können die Blasen eingefangen werden, welche zu oberflächennahen Lunkern führen. Ein solcher Haken bildet sich aus, wenn sich die dünne erstarrende Strangschale durch die Oszillation nach innen neigt und so der Form eines Hakens ähnelt. Der englische Ausdruck „hook formation“ ist für dieses Phänomen geläufiger. Dieser erstarrte Haken kann nun von flüssiger Schmelze überlaufen werden und zu oben genannten Produktfehlern führen. Der Auftrieb von Einschlusspartikeln ist aufgrund des minderen Dichteunterschiedes noch geringer als jener von Gasblasen und so werden diese noch leichter von der erstarrenden Schale erfasst und führen zu oberflächennahen Innenfehlern, welche die mechanischen und technologischen Eigenschaften des Produktes herabsetzen. Einige Partikel werden durch die Strömung tief in den flüssigen Metallsumpf gezogen und können hier an der Schale haften bleiben. Das Einziehen wird durch hohe Gießgeschwindigkeiten und unregelmäßige Strömungen, wie sie durch Clogging ausgelöst werden können, verstärkt. Auf Clogging wird in **Kapitel 2.3** eingegangen.^{[5], [8]}

Gießspiegelschwankungen werden oft mit gleichzeitigem Auftreten einer Änderung der Stopfenposition beobachtet. Kommt es zu einer Erhöhung des Gießspiegelniveaus in Verbindung mit Clogging, geht damit meist eine Abnahme der Öffnungsposition des Stopfens einher. Somit lässt sich auf ein Loslösen von Ablagerungen schließen, was zu einer plötzlichen Erhöhung der Durchflussmenge und somit zum Ansteigen des Gießspiegels führt. Wird aufgrund von Turbulenzen, hohen Fließgeschwindigkeiten oder Wirbelbildung Gießpulver eingezogen, so ergeben sich oberflächennahe Fehler und Schalen. Dringt der Gießstrahl zu tief in den Strang oder ist die Überhitzung zu gering, so hat der Schmelzspiegel zu wenig Bewegung und kühlt zu stark ab, was zu Einfrierungen des Meniskus und daher zur Hakenbildung führen kann.^{[5], [9]}

Generell unterscheidet man zwei Arten von Gießspiegelschwankungen: entweder hebt oder senkt sich der gesamte Badspiegel gleichmäßig über den Querschnitt, oder es kommt zu lokalen Schwankungen, was vor allem bei großen Querschnitten zu beobachten ist. Ein plötzlicher lokaler Anstieg des Spiegels kann zum Überlaufen des Meniskus führen. Dabei kann Stahl an der Kokillenwand haften bleiben und so zu einem Ausbruch führen oder es entsteht ein erstarrter Haken welcher, wie bereits erwähnt, Gießpulver, Gasblasen oder Einschlüsse einziehen kann. Ein plötzlicher Abfall des Badspiegels legt die Innenseite der erstarrenden Schale frei, welche nun mit Schlacke bedeckt wird, was Oberflächenfehler

hervorrufft. Kommt der Badspiegel wieder in seine ursprüngliche Lage zurück, erstarrt neuerlich Stahl auf der bereits kalten, erstarrten Strangschale und führt zu Verspannungen und Biegungen durch das Wiedererwärmen der Oberfläche (**Abbildung 2-3**). Jedoch ist dieses Phänomen ausschließlich bei großen Gießformaten zu beobachten.

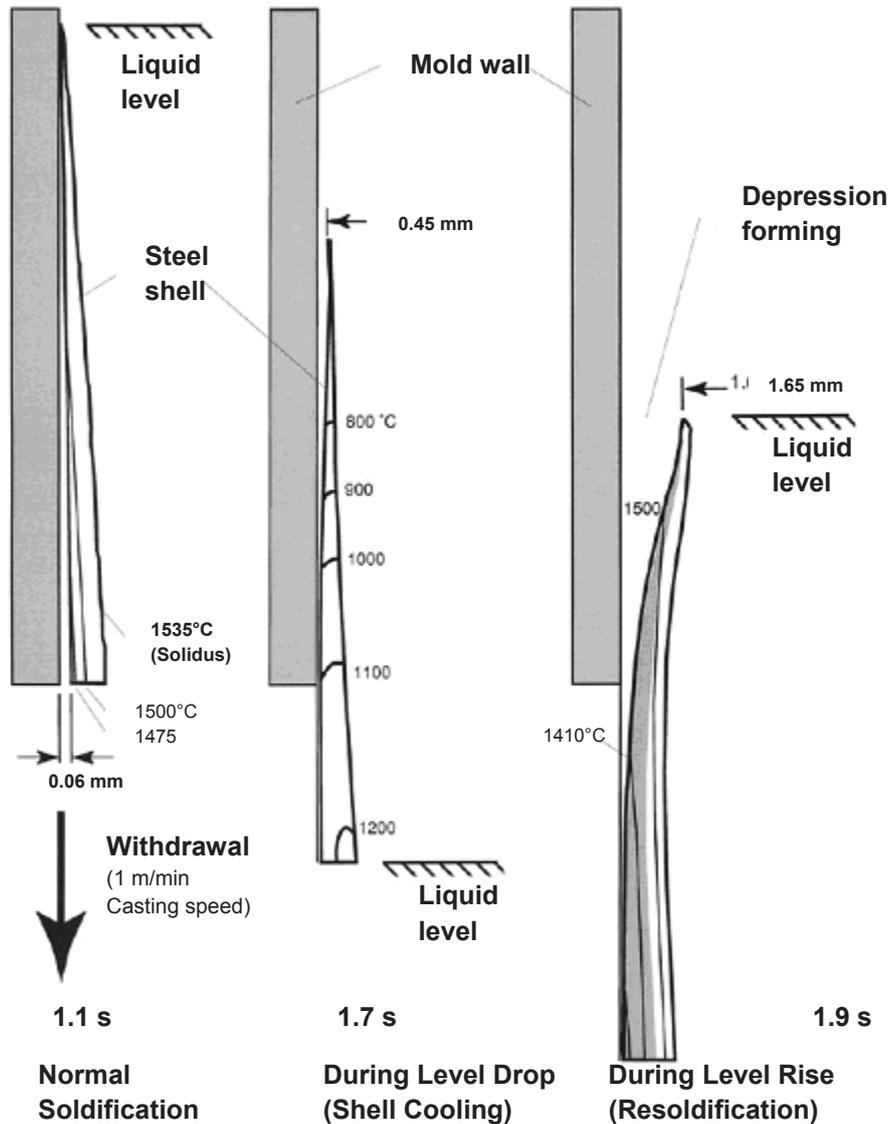


Abbildung 2-3: Auslöser von Oberflächenfehlern^[5]

Gründe für solche Badspiegelschwankungen können verschieden sein, jedoch sind sie noch nicht vollständig erforscht. So wird vermutet, dass das Loslösen von Clogging-Ablagerungen oder plötzliche Änderungen der Gießgeschwindigkeit zu einer Gießspiegelschwankung führen können. Laut *M. Wolf*^[10] kann auch elektromagnetisches Rühren, wenn es zu knapp unterhalb des Meniskus stattfindet, Schwankungen induzieren. Wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, ist die Strömungsbildung in der Kokille zusammenfassend von folgenden

Parametern abhängig: Stopfenposition, Clogging, Gießgeschwindigkeit, Formatgröße, Gasdurchflussrate, Eindringtiefe des ETAs und den elektromagnetischen Kräften des elektromagnetischen Rührens. Aufgrund des qualitätsrelevanten Einflusses sollten diese Parameter im Hinblick auf eine kontrollierte Strömung optimal gestaltet werden.^[5]

2.2.3 Partikelbewegung und Abscheidung

Studien haben gezeigt, dass sich die Einschlüsse bei Rundbogenstranggießanlagen eher in der erstarrenden Strangschale festsetzen, als bei vertikalen Anlagen. Ist der Strang vertikal ausgerichtet, können die Partikel leichter in den Kokillenbereich aufsteigen und so von der Schlacke aufgenommen werden. Untersuchungen zufolge setzen sich die meisten Einschlüsse 1 – 3 m unterhalb der Kokille fest.^[8]

Jedoch wurden bis jetzt größtenteils Brammenstranggießanlagen genauer untersucht. Eine Simulationsstudie von *Thomas et al.*^[6] zeigt, dass sich Partikel mit einem Durchmesser von 0,5 – 300 µm größtenteils in den ersten 2,55 m der Stranggießanlage an der Schale festsetzen. Diese Untersuchungen beziehen sich auf ein Modell mit einem Kokillenquerschnitt von 1,3 x 0,25 m und einer Gießgeschwindigkeit von 1,2 m/min. Nur einem kleinen Anteil der Einschlüsse gelingt es in die Kokillenschlacke aufzusteigen. Weiters wurde in dieser Studie festgestellt, dass die Bewegung der Partikel stark von der Strömungsbildung abhängt, Gasblasen die Abscheidung der Einschlüsse durch anhaften an den Blasen unterstützen, kleine Partikel unter 30 µm kaum eine Chance haben in die Schlacke aufzusteigen und dass das Verhalten von größeren Einschlüssen schwer zu beschreiben ist, da für qualitative Aussagen weitere Untersuchungen notwendig sind.^[6]

Bezüglich des Zusammenhangs von Clogging und dem Reinheitsgrad des Produktes wurde bei Brammenstranggießanlagen festgestellt, dass Schmelzen, bei welchen Clogging aufgetreten ist, Einschlüsse in Form von Aluminiumoxiden und Aluminaten im Endprodukt enthalten. Lösen sich größere Ablagerungspartikel, so steigen diese mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit in den Meniskusbereich auf, da hohe Auftriebskräfte auf die Teilchen wirken. Entweder werden sie dort von der Schlacke aufgenommen oder sie werden von der erstarrenden Strangschale eingefangen. Winzige Partikel gelangen in die Mitte des Stranges und sind später im Inneren der Bramme aufzufinden.^[9]

2.3 Clogging

Unter Clogging versteht man das Anlagern fester Teilchen im Ausgussystem einer Stranggussanlage. Dadurch kommt es zu Störungen im Gießverlauf und somit zu einer

Minderung der Gießleistung und der Produktivität der Anlage. Dieses Phänomen steht in engem Zusammenhang mit dem Reinheitsgrad der zu vergießenden Schmelze und tritt vor allem bei aluminiumberuhigten Stählen auf. Die nichtmetallischen Phasen wachsen entweder im Bereich des Stopfens und des Verteilerausgusses an, oder direkt im Eintauchausguss. Hier führen die Anwachsungen zu einer Querschnittsverringerung des Gießkanals und vermindern somit die Gießleistung und es kommt generell zu einer Beeinträchtigung des Gießprozesses. Findet eine sehr starke Ansatzbildung statt, kann die Schmelze nicht mehr vergossen werden und ein Gießabbruch ist die Folge. Daneben kann ein Loslösen von abgelagerten Partikeln zur Qualitätsminderung des Produktes führen. Größere Partikel können die Kokillenschlacke modifizieren, gelangen die Teilchen in den Strang, wird der makroskopische Reinheitsgrad stark verschlechtert. Weiters kommt es beim Ablösen der Ablagerungen zu Gießspiegelschwankungen in der Kokille, welche die Oberflächengüte und den oberflächennahen Reinheitsgrad des Produktes vermindern.^{[11], [12]}

2.3.1 Ursachen von Clogging

Im Folgenden wird auf einige Parameter eingegangen, welche Clogging verursachen können. Wie oben bereits erwähnt wurde, tritt Clogging verstärkt bei aluminiumberuhigten Stählen auf. Die Einschlussbildung in Folge einer Desoxidation wird in **Kapitel 2.4.5** beschrieben. Grundsätzlich bilden feste Einschlüsse mit der flüssigen Schmelze nicht benetzende Systeme und neigen somit dazu zusammenzupacken, wenn ähnliche Einschlüsse oder eine geeignete Substanz anwesend sind. Eine Ausnahme stellt hierbei das Titanoxid dar. Auf den Einfluss von Titan wird in **Kapitel 2.3.2** eingegangen. Die Anlagerung der Desoxidationsprodukte an der ETA-Wand kann auf verschiedene Arten erfolgen und der Aufbau der Ablagerungsschicht ist abhängig von der Stahlzusammensetzung, der Gießtemperatur, den Wärmeübergangsbedingungen im ETA und dessen Werkstoff und Geometrie.^{[13], [14]}

Die Benetzbarkeit der Einschlüsse wird durch den Kontaktwinkel charakterisiert, welcher von der Oberflächenspannung abhängig ist. Mittels dieses Kontaktwinkels Θ lässt sich die Benetzung eines Festkörpers durch eine Flüssigkeit beschreiben. Definiert ist der Kontaktwinkel als jener Winkel, den eine Tangente an die Tropfenkontur im Dreiphasenpunkt zur Oberfläche des Festkörpers bildet (siehe **Abbildung 2-4**).^[15]

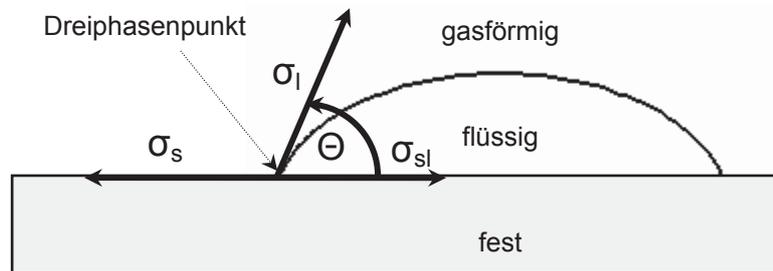


Abbildung 2-4: Kontaktwinkel^[16]

σ_s bezeichnet hierbei die Oberflächenenergie des Feststoffes, σ_l die Oberflächenspannung der flüssigen Schmelze und σ_{sl} die Grenzflächenspannung zwischen Feststoff und Schmelze. Nach der Beziehung von *Young*^[16] ist die Benetzbarkeit umso besser, je höher die Oberflächenenergie des Feststoffes ist und je kleiner die Grenzflächenspannung, da sich dadurch ein kleiner Kontaktwinkel ergibt.^[16]

$$\sigma_s = \sigma_{sl} + \sigma_l \cdot \cos\Theta \quad (1)$$

Generell bedeutet ein Kontaktwinkel $\Theta < 90^\circ$, dass die flüssige Schmelze den Feststoff benetzt, wohingegen ein Kontaktwinkel $\Theta > 90^\circ$ besagt, dass der Feststoff nicht benetzt wird. Allgemein spricht man bei einem Kontaktwinkel $0^\circ < \Theta < 90^\circ$ von guter Benetzbarkeit und bei $90^\circ < \Theta < 180^\circ$ von Unbenetzbarkeit.^{[17], [18]}

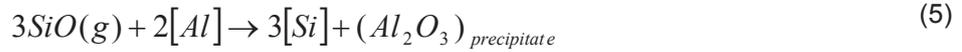
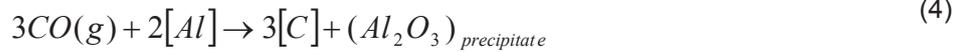
Der Kontaktwinkel von Aluminiumoxid bewegt sich in flüssigem Stahl zwischen 134 bis 146 Grad. Aufgrund der Unbenetzbarkeit lagern sich die Aluminiumoxidpartikel am feuerfesten Material des ETAs an, um die Kontaktfläche zum Stahl zu minimieren. Dadurch werden die Anziehungskräfte zwischen Partikel und ETA größer als die Strömungskräfte des Stahls und das Teilchen bleibt am Feuerfestmaterial haften. Auch eine Koagulation durch Brückenbildung der Partikel untereinander minimiert den Kontakt zum Stahlbad. Je größer der Kontaktwinkel und je größer der Einschluss, desto eher kommt es bei hohen Temperaturen zum Zusammenwachsen der einzelnen Partikel. Treten im Tauchrohr turbulente Strömungen auf, gelangen die Desoxidationsprodukte wie Aluminiumoxid aufgrund ihrer geringeren Dichte an die Außenseite und können sich so an der Wand ablagern. Weisen die Wände des ETAs eine sehr raue Oberfläche auf, können Partikel leichter an ihr haften bleiben.^{[8], [11], [13], [14], [19]}

Generell hat die Behandlung in der Sekundärmetallurgie den größten Einfluss auf die Vergießbarkeit der Schmelze. Wird beispielsweise nach einer Aluminium- oder

Kühlschrottzugabe nicht ausreichend lange nachgespült, können die Reaktionsprodukte nicht mehr abgeschieden werden. *Miki et al.*^[20] haben eine Simulationsstudie bezüglich des Abscheidens von Einschlüssen erstellt. Darin wurde auch der Einfluss der Spülstärke auf die Bewegung und Koagulation der Einschlüsse in der Schmelze untersucht. Die Studie belegt, dass zuerst ein kurzzeitig heftiges Spülen empfohlen wird, damit die Durchmischung und Kollision der Partikel untereinander gewährleistet ist und dadurch eine Agglomeration der Teilchen stattfindet. Danach ist sanftes Spülen notwendig, damit die gebildeten Agglomerate Zeit haben, sich in die Schlacke abzuscheiden. Entfällt das sanfte Nachspülen, würden durch Kollision wieder größere Agglomerate entstehen, welche bis hin zum Stranggießprozess nicht mehr abgeschieden werden können.^[21]

Während der gesamten Behandlungsdauer in der Pfanne und im Verteiler muss stets auf die Gefahr der Reoxidation geachtet werden. Während des Gießprozesses kann eine Reoxidation durch Lufteintritt in den ETA stattfinden, welche das Auftreten von Clogging auslösen kann. Durch die Stopfenregelung wird die Strömung begrenzt und es entsteht ein Druckabfall durch den so genannten „Venturi-Effekt“. Im Bereich unterhalb des Stopfens ist der Strömungsquerschnitt verengt. Nach dem Kontinuitätsgesetz, das besagt, dass dieselbe Flüssigkeitsmenge aus- wie eintritt, muss die Schmelze an dieser Engstelle dieselbe Durchflussmenge aufweisen wie an den übrigen Querschnitten. Um dies zu erreichen, herrscht an der Engstelle eine höhere Strömungsgeschwindigkeit vor. *Tsai und Heaslip et al.*^{[22], [23]} haben mit Wassermodellen belegt, dass sich demzufolge ein Unterdruckgebiet mit Drücken kleiner 1 atm unterhalb des Stopfens ausbildet, wodurch nun durch Poren und Risse Luft in den ETA gesaugt wird. Die Ausbildung des niedrigen Druckes ist abhängig vom Füllgrad des Verteilers, der Gießgeschwindigkeit, des ETA-Sitzes, der Geometrie des Stopfens und des Öffnungsgrades, sowie der Oberflächenbeschaffenheit im ETA und somit auch von den gebildeten Ablagerungen. Die eingetretene Luft reagiert mit dem im Stahl gelösten Aluminium unter der Bildung von Tonerde, welche sich am ETA absetzt. Ansteigende Stickstoffgehalte zwischen Verteiler und Kokille weisen auf ein solches Eindringen von Luft hin. Ablagerungen, welche aufgrund von Lufteintritt entstehen, sind relativ groß und weisen meist eine dendritische Struktur auf.^{[21], [24]}

Es besteht auch die Möglichkeit einer Reaktion der Schmelze mit dem feuerfesten Material des ETAs. Das Aluminium in der Schmelze reduziert den Sauerstoff aus dem Feuerfestmaterial und es entsteht wiederum Aluminiumoxid. Man vermutet Kohlenstoffmonoxid als Quelle des Sauerstoffs, wenn der Kohlenstoff im ETA mit Bindemitteln oder Verunreinigungen reagiert. Eine weitere Quelle stellt Siliziumoxid dar, wenn es im Feuerfestmaterial enthalten ist. Die folgenden Gleichungen spiegeln die möglichen Reaktionen wieder.^{[21], [24]}



In nachstehender **Abbildung 2-5** werden die dabei auftretenden Vorgänge nochmals verdeutlicht:

Feuerfestmaterial $p_{O_2} = 10^{-17}$ atm	Grenzfläche	Stahl $p_{O_2} = 10^{-11}$ atm
$C_{(s)} \rightarrow$	$C_{(Fe)}$	$\leftarrow [Al]_{Fe}$
$C_{(s)} + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_{(g)}$	$Al_2O_{3(s)}$	
$CO_{(g)} \rightarrow$	$C_{(Fe)} + [O]_{Fe}$	$\leftarrow [O]_{Fe}$
$MO_{(s)} + C_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + CO_{(g)}$	$MO_{(s)}$	
$M_{(g)} \rightarrow$	$M_{(Fe)}$	$\leftarrow Al_2O_{3(s)}$

M: Si, Na, K

Abbildung 2-5: Bildung von Tonerde an der Grenzfläche Feuerfestmaterial-Stahlschmelze^[19]

Ausgehend von obigen Erläuterungen kann generell zwischen mehreren Clogging-Typen unterschieden werden. Diese Differenzierung beruht auf den unterschiedlichen Entstehungsarten der Ablagerungen, wobei die verschiedenen Typen oft in Kombination miteinander auftreten.^[13]

- Desoxidationsprodukte wie Aluminium, Zirkon, Titan lagern sich im Ausgussystem der Stranggussanlage an. Die Zusammensetzung der abgelagerten Teilchen entspricht jener der mikroskopischen Einschlüsse, welche während der sekundärmetallurgischen Behandlung entstanden sind. Diese weisen einen Durchmesser von typischerweise 1-20 μm auf und neigen stark zur Koagulation. Je nach Kohlenstoffgehalt kann in diesem Netzwerk auch erstarrte Schmelze gefunden werden, wobei dies bei höherkohligen Qualitäten mit geringer Konzentration an Desoxidationsprodukten eher zu beobachten ist. Bei Calcium-modifizierten Qualitäten findet man in den Clogging-Ablagerungen auch Calciumsulfide und Calciumaluminat.^[13]

- Anlagerung komplexer Oxide bestehend aus Gießpulverbestandteilen und Desoxidationsprodukten. Es wird davon ausgegangen, dass das Gießpulver aufgrund von Rückströmungen in den ETA gezogen wird, sich dort an der Wand anlagert und mit den Desoxidationsprodukten eine Schicht bildet.^[13]
- Ablagerungen von Reaktionsprodukten aus Reaktionen zwischen den Desoxidationsmitteln und der Umgebungsluft oder in der Schmelze gelöstem Sauerstoff. Wie bereits erwähnt, entsteht durch das Strömen der Schmelze in das Tauchrohr ein Unterdruck. Aufgrund dessen kann nun an porösen Stellen Luft in das Tauchrohr gelangen, welche mit der Schmelze reagiert. Weiters wird beim Abkühlen der Schmelze, oder aus der feuerfesten Ausmauerung Sauerstoff frei, welcher wiederum mit den Desoxidationsmitteln reagiert. Im Gegensatz zu den anderen Ablagerungen weisen diese jedoch keine gesinterte Matrix auf. Es bildet sich ein Film an der ETA-Wand aus.^[13]
- Vor allem bei Angusschargen mit unzureichender Vorheizung des ETAs kann es zum so genannten „Einfrieren“ kommen. Dies stellt somit auch eine Art Clogging dar. Durch einen hohen Wärmeübergang und geringer Überhitzung der Schmelze erstarrt diese bereits im Ausgussystem. Bei höherlegierten Stählen, vor allem Stähle mit höherem Kohlenstoffgehalt, ist die Abkühlrate aufgrund von Seigerungen höher. Unter diesen Umständen wird sich auch mehr Stahl im ETA oder in den Zwischenräumen der Ablagerungen einlagern.^[12]

2.3.2 Einfluss von Titan

Durch Reoxidation werden primär Tonerdeeinschlüsse erzeugt. Enthält die Schmelze zudem Titan, so können sich $\text{TiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$ Phasen bilden. Diese Phasen sind mit der Stahlschmelze gut benetzbar und der erstarrte Stahl zwischen den Einschlüssen verfestigt somit die Ablagerung. *Basu et al.*^[24] haben Versuche bezüglich der Vergießbarkeit von titanhaltigen Stählen durchgeführt und die Ablagerungen in den Tauchrohren untersucht. Die nachfolgende **Tabelle 2-I** zeigt eine Gegenüberstellung der Cloggingablagerungen von titanhaltigem und titanfreiem Stahl.

Der Ursprung der $\text{TiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$ Einschlüsse liegt in einer Reoxidation der Schmelze meist in der Pfanne oder im Verteiler. Untersuchungen haben gezeigt, dass reine Tonerdeeinschlüsse in titanlegierten Schmelzen oft von $\text{TiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$ –Schichten umhüllt sind. Die Ausbildung solcher Schichten wurde in titanfreien Schmelzen noch nicht beobachtet.^[24]

Tabelle 2-1: Einfluss von Titan auf die Ausbildung der Ablagerungen^[24]

Betrachtungseinheit	Ablagerung in Ti-Al Stahl	Ablagerung in Ti-freiem Stahl
Volumen	mehr	weniger
Dichte	höher	niedriger
Farbe	grau-weiß	weiß
Bröckeligkeit	fest	bröckelig
Gegenwärtigkeit von eingeschlossenem erstarrtem Stahl	große Menge an erstarrtem Stahl in der Ablagerung	lokale globulare Stahlpartikel
Zusammensetzung	grobe Tonerdepartikel und Spinelle	korallenartige Tonerdecluster
Spinell-Anteil	bis zu 15-20 Vol.% Spinell längs der Tonerdecluster	kleine Spinellanteile an wenigen Stellen
Titanhaltige Ablagerungen	feine titanhaltige Ablagerungen	keine titanhaltigen Ablagerungen
Tonerde-Einschlussgröße	gemischte Größenverteilung	eher feinere Tonerdepartikel

2.3.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Clogging

Da das Auftreten von Clogging den Gießverlauf stark beeinträchtigt und somit die Produktivität der Anlage stark mindert, wird nach Möglichkeiten gesucht, um die Entstehung von Ablagerungen möglichst zu vermeiden. In der Literatur lassen sich einige Ansätze und Anregungen dazu finden. Um Clogging zu vermeiden ist es grundsätzlich wichtig die Zahl der Desoxidations- und Reoxidationsprodukte so gering wie möglich zu halten, also einen hohen Reinheitsgrad der Schmelze anzustreben. In einer Studie von *Burty et al.*^[25] wurde festgestellt, dass im Zuge der Behandlung in der Pfanne die Einschlüsse um 65 bis 75 %, im Verteiler um 20 bis 25 % und in der Kokille um 5 – 10 % verringert werden. Im Verteiler ist jedoch eine eventuelle Reoxidation zu beachten.^[25]

Um den Reinheitsgrad der Schmelze zu erhöhen, ist ausreichende Spülung und wenn erforderlich auch eine Vakuumbehandlung im Zuge der sekundärmetallurgischen Behandlung nötig. Herrschen im Verteiler optimale Strömungsbedingungen, ist die Verweilzeit der Schmelze relativ hoch und Einschlüsse können noch abgeschieden werden.

Wichtig ist auch, dass beim Abstich keine Schlacke in die Pfanne mitläuft, das selbe ist beim Entleeren der Pfanne in den Verteiler zu beachten. Im Folgenden wird auf einige Punkte eingegangen, welche zur Verhinderung der Ansatzbildung beitragen können.^[13]

2.3.3.1 Vermeiden von Reoxidation

Wie bereits erwähnt muss die Schmelze stets vor Reoxidation geschützt werden. Während der Behandlung in der Pfanne kann diese durch das Aufbringen einer Schlacke mit ausreichender Schichtdicke und das Verhindern von offenen Stellen durch zu heftiges Spülen vermieden werden. Während des Stranggießprozesses versucht man durch das Entleeren der Pfanne durch ein Schattenrohr, das Aufbringen einer Schlacke im Verteiler und das Vergießen durch Tauchrohre, die Schmelze vor einer Reoxidation so gut wie möglich zu schützen. Die Schlacke sollte einen geringen Gehalt an reduzierbaren Oxiden enthalten. Besonders bei Angusschargen sollte die Reoxidation besonders beachtet werden, da sich beim Füllen des Verteilers eine große Kontaktfläche der Schmelze gegenüber der Luft ergibt. Somit kann es zur Oxidation der Schmelze kommen. Eine Minimierung kann durch Fluten des Verteilers mit Argon erreicht werden. Auch eine Abdichtungsmatte welche bereits beim Vorheizen unterhalb der Verteilerabdeckung angebracht wird, kann das Herstellen einer inerten Atmosphäre unterstützen. Versuche von *Hayden und Barnes*^[26] haben gezeigt, dass dadurch der Sauerstoffgehalt im Verteiler von 15 % O₂ auf unter 1 % O₂ gesenkt werden konnte. Generell ist eine Gasdichtheit des gesamten Systems anzustreben.^{[12], [21]}

2.3.3.2 Inertgasspülung

Eine weitere Abhilfe stellt die Möglichkeit des Spülens von Inertgas durch den Stopfen im Verteiler dar. *Rackers und Thomas*^[13] geben eine typische Durchflussrate von 5 NI/min bei Brammenstranggießanlagen an. Das hindurchströmende Gas bildet einen Film um die ETA-Wand aus, welches ein Anlagern der Reaktionsprodukte behindert. Durch die Gasblasen wird eine Flotation der Partikel in der Schmelze begünstigt. Zudem wird eine höhere Turbulenz im ETA erzeugt und abgelagerte Partikel können sich dadurch von der Wand wieder loslösen. Weiters wird der Druck im ETA ausgeglichen, wodurch die Gefahr der Luftansaugung infolge von Unterdruck nicht mehr gegeben ist.^[13]

Außerdem werden Reaktionen zwischen Schmelze und Feuerfestmaterial gehemmt, da der Partialdruck der oxidierenden Gase durch die Inertgasspülung gesenkt wird. Die Gasblasen haften an den Einschlüssen und begünstigen ein Aufsteigen und Abscheiden in die Schlacke. Jedoch können sich einige Blasen an kleine Einschlüsse heften und auch in die erstarrende Strangschale geraten. Dies führt zu Poren und Fehlern an der Oberfläche im

Endprodukt. Vor allem bei kleinen Gießquerschnitten erweist sich das Spülen als äußerst schwierig. Die Gasblasen können leicht von der Erstarrungsfront eingefangen werden und lassen sich später als Gasblasenseigerung im Gussprodukt finden. Beim Abkühlen der Schmelze nimmt der Druck in den Gasblasen ab, wodurch die Restschmelze durch Kapillaren angesaugt wird und somit geseigerte Bereiche entstehen. Ein weiterer Nachteil der Gasspülung ist, dass durch entstehende Badspiegelwallungen die Schlackenlinie beeinträchtigt wird, Gießpulver eingeblasen werden könnte, und weitere Qualitätsverminderungen stattfinden können. Diese Nachteile werden durch eine zu hohe Durchflussrate noch verstärkt. Es kommt zu Strömungsturbulenzen in der Kokille, welche wiederum zu Oberflächenfehlern führen. Daher ist der Durchfluss ständig zu kontrollieren, um das Optimum hinsichtlich Verbrauch und Nutzen gewährleisten zu können. Durch eine stetige Beobachtung der Manometer an jeder Spülstation lassen sich Probleme beim Vergießen erkennen. Steigt der Druck während des Gießens, deutet dies auf verstopfte Tauchrohre hin.^{[3], [12], [19], [27]}

2.3.3.3 Optimierung des ETA

Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Geometrie des ETAs zu optimieren. Große Radien, glatte Oberflächen, Abstimmung aller Komponenten und das Entfernen von Fremdstoffen aus der Bohrung sind empfohlene Maßnahmen. Wichtig ist eine gute und wenn möglich abgedichtete Befestigung des ETAs am Verteiler, damit ein Lufteintritt vermieden werden kann. Daher sind nur qualitativ hochwertige Feuerfeststoffe mit hoher Verschleißfestigkeit, Gasundurchlässigkeit und ausreichender Thermoschockbeständigkeit zu verwenden. Ein ausreichendes Vorheizen der Tauchrohre ist unabdingbar. Um die Wärmeabfuhr während des Gießens zu vermindern, kann eine Isolation angebracht werden. Bezüglich des Werkstoffes des ETAs wurden bislang viele Kombinationen untersucht. Im Bereich der Kokillenschlacke erhöht eine Verstärkung mit Zirkonoxid-Graphit die Verschleißbeständigkeit. Zusätze von sauerstoffaffinen Elementen wie beispielsweise metallischem Silizium tragen zur Verzögerung der Entkohlung bei und verbessern somit die Bindung des Werkstoffes. Jedoch ist Silizium nur gering gegenüber dem in der Schmelze gelösten Aluminium beständig und fördert somit die Ansatzbildung. Daher sollten Anteile an SiO_2 in den ETA-Werkstoffen bei clogginggefährdeten Güten möglichst gering gehalten werden. Eine Zugabe von Calcium zum Werkstoff ermöglicht durch die Kollision von Einschlüssen mit der ETA-Wand die Modifikation von festen Tonerdepartikeln in flüssige Teilchen, was jedoch durch die Diffusion des Calciums an die Reaktionsoberfläche begrenzt ist. Auf die Vermeidung von Clogging durch das Anwenden einer Calcium-Behandlung wird in **Kapitel 2.5** eingegangen. Das Beifügen von Bornitrid kann das Clogging ebenfalls

reduzieren. Jedoch ist die genaue Wirkungsweise dieser Verbindung nicht bekannt. Es wird angenommen, dass das Bornitrid eine Boroxidschicht an der ETA-Oberfläche ausbildet und so die Oberflächenrauigkeit minimiert. Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Anlagerungsneigung wird in **Abbildung 2-6** abgebildet.

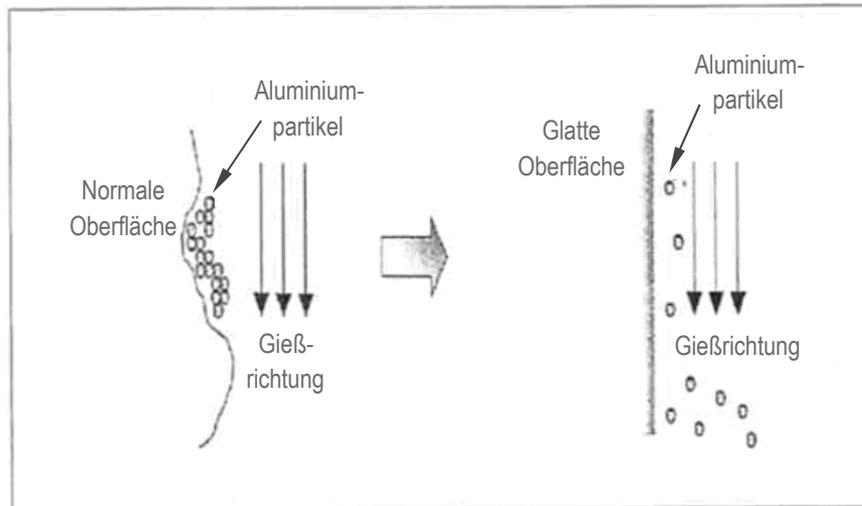


Abbildung 2-6: Einfluss der Oberflächenrauigkeit^[1]

Jedoch sind bezüglich des Bornitrids auch andere Wirkungsweisen denkbar. Um das Auftreten von Clogging gänzlich zu vermeiden, wäre es nötig, die Bildung der ersten Ablagerungsschicht durch das Zusammenwirken eines optimierten ETA-Werkstoffs und Stopfenspülung zu unterbinden. Dazu müsste der Kontaktwinkel zwischen Feuerfestmaterial, Spülgas und Stahlschmelze unter 60° gehalten werden, um die Anziehungskräfte zu minimieren. Jedoch wurde bis jetzt noch kein geeignetes Feuerfestmaterial gefunden, welches einen solch geringen Kontaktwinkel bei gleichzeitiger fehlender Reaktivität aufweist. Des Weiteren kann durch Zugabe bestimmter Stoffe die thermische Leitfähigkeit und die Reaktionsfähigkeit mit der Schmelze herabgesetzt und ein Lufteintritt durch die Poren vermieden werden.^{[11], [13], [19]}

2.3.3.4 Verzögerung des Clogging

Ist es bereits zur Bildung von Ablagerungen gekommen, gibt es Maßnahmen zur Verzögerung der Ablagerungswachstumsrate. Hat das Clogging eingesetzt, werden die ETA-Wände zunehmend rauer und somit ist es für Einschlüsse leichter sich anzulagern. In den Bereichen mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze ist die Wachstumsrate am höchsten. Daher ist die Bauweise des ETAs ein wichtiger Einflussfaktor und sollte so optimal wie möglich gestaltet sein. Die genauen Auswirkungen der Geometrie des ETAs wurden bereits im vorherigen Absatz erläutert. Durch Turbulenzen oder unregelmäßige

Strömungsgeschwindigkeiten können sich die Ablagerungen zum Teil oder auch gänzlich wieder lösen und gelangen somit in die Kokille. Solche Zustände können durch das Einleiten von Inertgas erreicht werden, wodurch zusätzlich die Wachstumsrate der Ablagerungen gesenkt werden kann. Jedoch muss beachtet werden, dass eine Spülung zu längeren Gießzeiten und wie oben erwähnt zu Problemen mit der Qualität des Gussproduktes führen kann. Da Einlagerungen von Stahl in die Zwischenräume der Ablagerungen zu einer Stabilisierung dieser führen, ist ein gutes Vorheizen beziehungsweise ein Isolation des ETAs von Vorteil. Auch eine höhere Gießtemperatur kann das Erstarren der Schmelze im ETA erschweren.^[14]

2.3.3.5 Schlackenzusammensetzung

Werden Top-Schlacken in der Pfanne oder im Verteiler aufgegeben, so erfüllen sie dort mehrere Funktionen: zum Einen die thermische Isolation der Schmelze und den Schutz gegen Reoxidation durch die Umgebungsluft, zum Anderen werden Einschlüsse aufgenommen und so aus der Schmelze entfernt. Als Verteilerschlacke kommt häufig Reisschalenasche zum Einsatz, da diese preiswert ist und die Schmelze gut isoliert. Jedoch enthält Reisschalenasche rund 80 % SiO_2 , welches leicht reduziert wird und so zur Einschlussbildung führen kann. Überdies ist diese sehr staub- und kohlenstoffhaltig (~ 10 % C). Daher sind basische Zuschläge basierend auf $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ -Verbindungen mit $\text{SiO}_2 < 10\%$ günstiger, jedoch neigen diese Schlacken zur Krustenbildung an der Oberfläche und werden aufgrund ihrer niedrigen Viskosität leichter in die Schmelze gezogen. Um die Vorteile beider Schlacken nutzen zu können, wird beispielsweise bei AK Steel Ashland eine zweischichtige Schlacke aufgebracht. Unterhalb eine niedrighschmelzende basische Schlacke zur Einschlussaufnahme und an der Oberfläche eine Reisschalenasche um die Isolation zu gewährleisten. Auch bei der VASD wird bei bestimmten Qualitäten das Aufbringen einer zweischichtigen Schlacke angewendet.^[8]

2.3.4 Entstehungsorte und Morphologie der Ablagerungen

Die Ablagerungen können sich an verschiedensten Stellen im Ausgussystem bilden. Man findet sie im Bereich des Stopfens am Verteilerausguss, entlang des ETAs oder an den ETA-Ausgängen. Die Struktur der Ablagerungen ist meist sehr ähnlich: die äußerste Lage des Feuerfestmaterials weist eine entkohlte Schicht von bis zu 6 mm Dicke auf, darauf befindet sich eine dünne Reaktionsschicht bis zu 3 mm Dicke, welche aus komplexen Oxiden besteht und von der Hauptablagerungsschicht bedeckt ist. Diese kann bis zu mehreren Zentimetern Dicke aufweisen und von Stahl infiltriert sein.

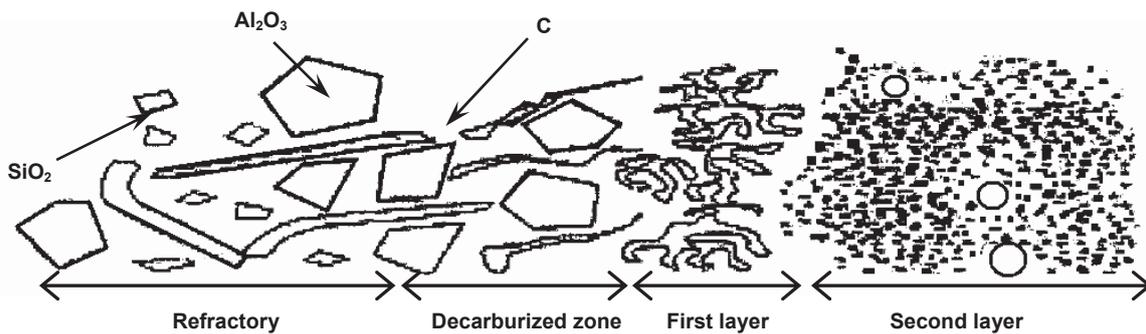


Abbildung 2-7: Ausbildung von Schichten bei Cloggingablagerungen^[19]

Die Zusammensetzung der einzelnen Schichten wurde schon weitgehend untersucht und lässt sich aus einigen Literaturstellen zusammenfassen und ist in **Abbildung 2-7** skizziert.

Die Entkohlung der äußersten Schicht des ETAs lässt sich auf dessen Vorheizen und auf interne Reaktionen der Feuerfestmaterials zurückführen. Jedoch kann dies durch Aufbringen spezieller Beschichtungen minimiert werden. Die darauf abgelagerte Schicht setzt sich aus Produkten komplexer Redoxreaktionen zusammen. Durch interne Reaktionen im Feuerfestmaterial bilden sich oxidierende Gase, welche durch die Desoxidationselemente in der Schmelze wieder reduziert werden. Beispiele für solche Reaktionen sind in **Kapitel 2.3.1** anhand der Gleichungen 2-5 angeführt. Da diese Schicht meist sehr dünn ist, sind die Auswirkungen auf den Gießverlauf nicht maßgebend. Die Hauptschicht des Cloggings besteht aus einem hoch porösen, dreidimensionalen nichtmetallischem Netzwerk und kann eine Dicke von mehreren Zentimetern erreichen. Die einzelnen Bestandteile können zusammensintern und auch von der Schmelze infiltriert sein. Bei den meisten aluminiumberuhigten Güten weist diese Schicht einen hohen Anteil an Hohlräumen auf. Die Zusammensetzung der Teilchen gleicht jenen der Desoxidationsprodukte in der Pflanne, und jenen der Reoxidationsprodukte im Verteiler. *Nadif et al.*^[19] erwähnen in einer Studie, dass ein Anteil von lediglich 1 bis 5 % der im Verteiler vorliegenden Einschlüsse (üblicherweise 20 bis 80 ppm) ausreicht, um das Tauchrohr vollständig zu blockieren, wenn diese in den Gießkanal gelangen. Im folgenden Kapitel werden die Entstehung verschiedener Einschlussklassen und deren Auswirkung auf die Qualität des Endproduktes erläutert.^[19]

2.4 Einschlüsse im Gussprodukt

Die Nachfrage an hochqualitativen Produkten ist in den letzten Jahren stark gestiegen und daher werden die Anforderungen an den Reinheitsgrad immer höher. Die mechanischen

Eigenschaften werden von der Anwesenheit, Größe, Verteilung, Zusammensetzung und Morphologie von Einschlüssen und Ablagerungen bestimmt, welche Spannungen induzieren. Desoxidation, Reoxidation, Schlackeneinzug, chemische Reaktionen und exogene Einschlüsse können Quellen der Einschlussbildung sein. Besonders die Anwesenheit von großen Makroeinschlüssen hat sehr nachteilige Auswirkungen auf die Qualität des Endproduktes und kann vor allem die Polierbarkeit und Korrosionsbeständigkeit herabsetzen und eine fehlerhafte Oberfläche ausbilden. Die Duktilität nimmt mit zunehmender Anzahl an Oxiden und Sulfiden stark ab und die Bruchzähigkeit wird durch Einschlüsse ebenfalls gemindert. Außerdem können Fehlstellen zur Rissbildung führen. Die Ursache für das Vorkommen von Ermüdungsrissen sind meist harte spröde Oxide, vor allem große Tonerdepartikel größer 30 µm. In **Tabelle 2-II** werden typische Reinheitsgradanforderungen einiger Stahlqualitäten angeführt.

Tabelle 2-II: Reinheitsgradanforderungen verschiedener Stähle (T.O. = Total Oxygen)^[8]

Produkte	Maximale Verunreinigungen	Maximale Einschlussgröße
Automobil- und Tiefziehgüten	[C] ≤ 30 ppm, [N] ≤ 30 ppm	100 µm
Stahl zur Rohrfertigung	[S] ≤ 30 ppm, [N] ≤ 35 ppm, T.O. ≤ 30 ppm	100 µm
Kugellagerstahl	T.O. ≤ 10 ppm	15 µm
Reifencord	[H] ≤ 2 ppm, [N] ≤ 40 ppm, T.O. ≤ 15 ppm	10-20 µm
Grobblech	[H] ≤ 2 ppm, [N] ≤ 30-40 ppm, T.O. ≤ 20 ppm	einzelner Einschluss 13 µm Cluster 200 µm
Draht	[N] ≤ 60 ppm, T.O. ≤ 30 ppm	20 µm

Einschlüsse besitzen verschiedene Morphologien und Eigenschaften. Besonders schädlich sind bei gewissen Qualitäten jene Einschlüsse, die sich im Zuge eines Umformprozesses mitverformen da sich somit anisotrope Werkstoffeigenschaften ergeben.^[8]

2.4.1 Einteilung der Einschlüsse

Generell werden Einschlüsse in Stahlschmelzen in endogene und exogene Einschlüsse unterteilt.

2.4.1.1 Endogene Einschlüsse

Zu diesen Einschlüssen zählen Desoxidationsprodukte und Partikel, welche sich während des Abkühlens und der Erstarrung ausscheiden. Desoxidationsprodukte werden in **Kapitel 2.4.5** noch genauer behandelt. Während der Erstarrung der Schmelze erhöht sich die Konzentration an gelöstem Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel, wobei die Löslichkeit dieser Elemente abnimmt. Daher bilden sich Tonerde-, Silikat-, Aluminiumnitrideinschlüsse und Sulfide. Sulfide bilden sich interdendritisch während der Erstarrung und lagern sich häufig an Oxide an. Normalerweise sind diese Einschlüsse eher klein ($< 10 \mu\text{m}$).^[8]

2.4.1.2 Exogene Einschlüsse

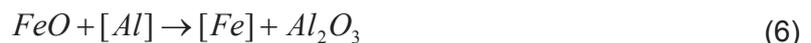
Primär fallen diese Einschlüsse aufgrund von chemischen Reaktionen und Wechselwirkungen der Schmelze mit ihrer Umgebung (Schlacke, feuerfeste Ausmauerung, Luft) an. Diese Einschlüsse verursachen Probleme während der mechanischen Bearbeitung des Produktes und führen zu Fehlern wie Rillen und Furchen auf der Oberfläche. Außerdem bedingen die Einschlüsse einen höheren Werkzeugverschleiß. Exogene Einschlüsse weisen folgende gemeinsame Eigenschaften auf:

- Variable Zusammensetzung, da sich an den Oberflächen von bereits gebildeten Einschlüssen oft neue Ablagerungen bilden
- Unregelmäßige Form
- Geringe Anzahl im Vergleich zu endogenen Einschlüssen
- Im Gegensatz zu den endogenen Einschlüssen keine regelmäßige Verteilung in der Schmelze, da sie einerseits meist während der Erstarrung gebildet werden und so eher unkontrolliert auftreten und andererseits scheiden sie sich aufgrund ihrer Größe leicht wieder ab. Aus diesem Grund sind sie häufig nahe der Oberfläche zu finden.
- Aufgrund ihrer Größe schädlicher bezüglich der mechanischen Eigenschaften als kleine Einschlüsse.

Grundsätzlich scheiden sich große, exogene Einschlüsse wieder ab, jedoch kann dies aufgrund verschiedener Faktoren verhindert werden. Bilden sie sich erst sehr spät, so bleibt nicht mehr ausreichend Zeit um aus der Schmelze aufzusteigen, bevor es zum Vergießen kommt. Ein weiterer Grund wäre fehlende Überhitzung oder ungünstige Strömungen in der Schmelze.^[8]

2.4.2 Exogene Einschlüsse durch Reoxidation

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, dass es zu einer Reoxidation der Schmelze kommen kann. Bei Angusschargen kann es beim Verteilerfüllen aufgrund der hohen Turbulenzen zu Vermischungen der Schmelze mit Luft kommen. Fehlt eine hinreichende Schlackenschicht so reagiert das Stahlbad mit der Umgebungsluft. Aufgrund von Unterdrücken kann Luft durch Kupplungen oder Defekte angesaugt werden, wie es bereits in **Kapitel 2.3** erwähnt wurde. Während dieser Art der Reoxidation neigen Desoxidationselemente wie Aluminium, Silizium, Calcium usw. zur Oxidation und generieren so nichtmetallische Einschlüsse. Einschlüsse aufgrund von Reoxidationen sind in der Regel ein bis zwei Größenordnungen größer als Einschlüsse aufgrund von Desoxidation. Eine weitere Möglichkeit der Reoxidation besteht durch Reaktionen der Schmelze mit der Schlacke oder der feuerfesten Ausmauerung. Durch enthaltenes SiO_2 , FeO und MnO können sich nach folgenden Reaktionen große Tonerdeinschlüsse mit variabler Zusammensetzung bilden:



Außerdem kann es durch chemische Reaktionen zur Erosion der Feuerfestmaterialien kommen und dadurch zu Strömungsveränderungen und Einschluss von Materialpartikeln.^[8]

2.4.3 Exogene Einschlüsse durch Schlackeneinzug

Alle Umleer- und Abstichvorgänge bedingen intensives Mischen von Schlacke und Metall und somit können sich Einschlüsse bilden. Diese sind meist 10-300 μm groß, enthalten große Mengen an CaO oder MgO , sind üblicherweise bei den vorliegenden Temperaturen flüssig und besitzen daher eine kugelige Form. Die Möglichkeit des Schlackeneinzugs in der Kokille und weitere nachteilige Faktoren sind in **Kapitel 2.2.2** erläutert und in **Abbildung 2-8** nochmals graphisch dargestellt.^[8]

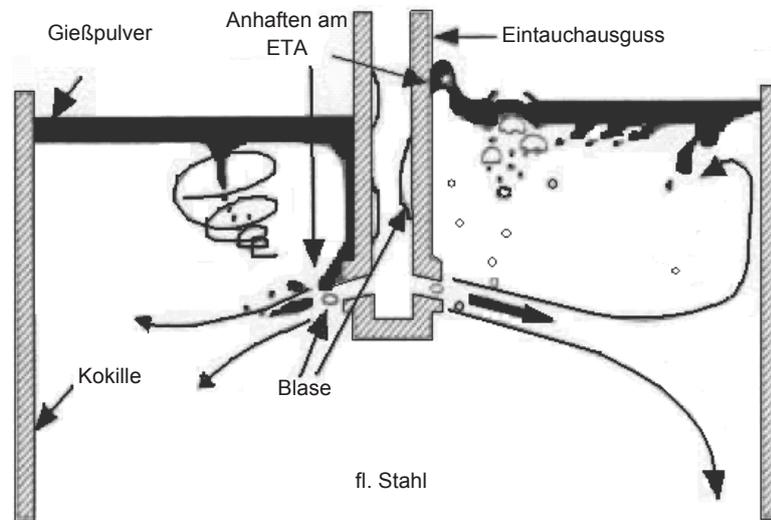


Abbildung 2-8: Möglichkeiten des Schlackeneinzugs in der Kokille^[8]

2.4.4 Exogene Einschlüsse aufgrund von Erosion des Feuerfestmaterials

Einschlüsse durch abgebröckeltes Feuerfestmaterial ergeben meist große feste Einschlüsse, welche unterschiedliche Formen annehmen. Sie fungieren oft als Keim für die Bildung heterogener Tonerdepartikel. Zur Erosion kommt es durch turbulente Strömung, Reoxidation, hohe Gießtemperaturen und andere chemische Reaktionen. Vor allem hoch manganhaltige Qualitäten gelten als besonders aggressiv bezüglich der Ausmauerung. Desoxidationselemente reagieren mit dem Sauerstoff der Materialien oder es bildet sich Kohlenstoffmonoxid wodurch wieder Sauerstoff geliefert wird. Daher sollten hohe Gehalte an Siliziumoxiden und dergleichen in den Materialien vermieden werden.^[8]

2.4.5 Einschlussbildung bei der Desoxidation

In diesem Kapitel werden die Keimbildung und das Wachstum von Tonerdeeinschlüssen während der Desoxidation beschrieben. Die Auswirkungen von nichtmetallischen Einschlüssen, zu welchen Desoxidationsprodukte gehören, hängen von mehreren Faktoren ab: Anzahl, Zusammensetzung und Morphologie der Einschlüsse, sowie die Größenverteilung.

Generell kann zwischen vier Typen der Desoxidationsprodukte unterschieden werden.

- *Primäre Desoxidationsprodukte* entstehen direkt nach der Zugabe des Desoxidationsmittels und werden nachfolgend genauer erläutert.

- *Sekundäre Desoxidationsprodukte* bilden sich beim Abkühlen der Schmelze zur Liquidustemperatur, da Desoxidationsreaktionen temperaturabhängig sind.
- *Tertiäre Desoxidationsprodukte* entstehen zwischen der Liquidus- und Solidustemperatur. Beim Erstarren reichern sich Sauerstoff und das Desoxidationsmittel aufgrund der abnehmenden Löslichkeit in der Schmelze an. Wird dabei die Sättigungslöslichkeit überschritten, so scheiden sich neue Desoxidationsprodukte aus.
- Als *Quartäreinschlüsse* werden von *Javoiskij et al.*^[28] jene Einschlüsse genannt, welche sich beim durcherstarten Stahl aufgrund der weiter sinkenden Löslichkeit ausscheiden.

Der Größe nach unterscheidet man folgende Einschlüsse:

- Makroeinschlüsse > 20 µm
- Mikroeingeschlüsse 1 – 20 µm (primäre, sekundäre, tertiäre Oxideinschlüsse)
- Submikroeinschlüsse.... < 1 µm (Quartäreinschlüsse)^[29]

Kurz nach der Zugabe von Aluminium oder Silizium zur Desoxidation bilden sich primäre Einschlüsse in der Schmelze nach folgender Reaktion:



Erreichen die gebildeten Partikel einen kritischen Radius, so beginnen sie zu wachsen. Dieser kritische Radius nimmt mit zunehmender Übersättigung der Schmelze und schwindender Oberflächenspannung ab. Da die Übersättigung ein zeitabhängiger Prozess ist, ergibt sich die kritische Keimgröße während des Desoxidationsprozesses auch mit der Zeit.^[30]

Zu Beginn wachsen die Partikel durch Diffusion der Desoxidationselemente und des Sauerstoffes. Ein weiterer Wachstumsprozess findet durch die Ostwald Reifung statt, wobei größere Partikel auf Kosten von kleinen Partikeln wachsen, um die Oberflächenenergie zu minimieren. Daneben führen Kollisionen aufgrund der Brownschen Bewegung auch zu einer Vergrößerung der Einschlüsse. Sind die Partikel groß genug, so geschieht der Wachstumsprozess aufgrund von turbulenter Kollision und Stokes Kollision. Größere Einschlüsse können aufgrund ihres Dichteunterschiedes zur Schmelze, Anhaftung an Gasblasen und Strömungen im Stahlbad in die Schlacke abgeschieden werden. Kleine Partikel verbleiben in der Schmelze und können zu Problemen im weiteren Behandlungsverlauf und einer Qualitätsminderung des Endproduktes führen.^{[30], [31]}

Die Gestalt der endogenen Einschlüsse kann dendritisch, clusterförmig oder korallenartig sein. Dies trifft vor allem auf Tonerdeeingeschlüsse zu. Silikate sind für gewöhnlich kugelförmig, da sie in der Schmelze in flüssigem oder glasigem Zustand auftreten. Herrscht ein Mangel an Keimen, so können einzelne Partikel zu großen dendritischen Strukturen wachsen. Andernfalls bilden sich aufgrund von Kollisionsvorgängen Cluster aus einzelnen Partikeln. Die Größe von dendritischen Tonerdeeingeschlüssen beträgt meist 30 bis 100 μm und die der korallenartigen üblicherweise $< 50 \mu\text{m}$. Wie sich die Einschlussformen je nach Sauerstoff- und Aluminiumgehalt der Schmelze verändern soll nachstehende **Abbildung 2-9** zeigen:

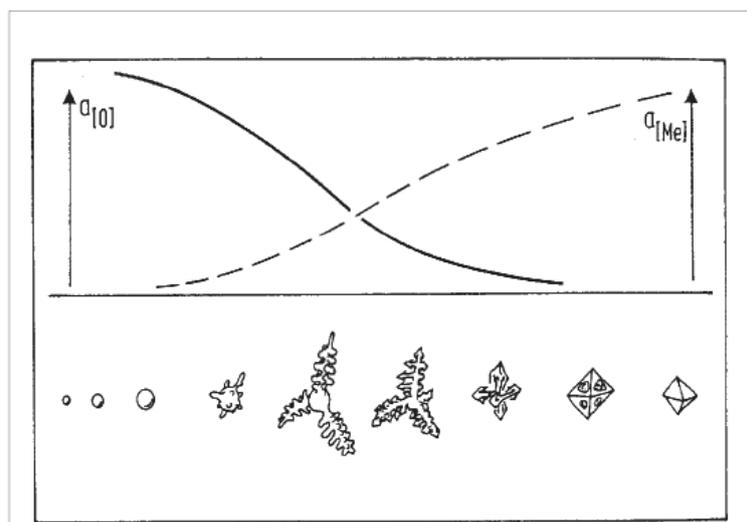


Abbildung 2-9: Oxidwachstumsformen in Abhängigkeit von den örtlichen Aktivitätsverhältnissen des Sauerstoffs und des Desoxidationsmetalls^[32]

Untersuchungen haben gezeigt, dass das Wachstum von Partikeln $< 1 \mu\text{m}$ hauptsächlich diffusionsgesteuert und durch Brownsche Kollision erfolgt, während Partikel $> 2 \mu\text{m}$ aufgrund von turbulenten Kollisionen wachsen. Einschlüsse in dieser Größenordnung neigen zur Clusterbildung. Erreichen die Partikel eine gewisse Größe, so bilden sich Makroeinschlüsse, welche aufgrund ihres Auftriebes und den oben genannten Faktoren abgeschieden werden können. Die Größenverteilung der Einschlüsse ist auch von der Spülstärke abhängig. Somit ergeben höhere Spülraten auch größere Partikel. Das Abscheiden der Einschlüsse kann durch eine gezielte Spülbehandlung unterstützt werden. Die Wirkung von metallurgischen Behandlungen wird maßgeblich von der Spülstärke beeinflusst. Starkes Spülen beschleunigt die Auflösung der Legierungselemente und begünstigt Schlacke-Schmelze-Reaktionen. Jedoch kann zu heftiges Spülen einen Spülfleck in der Schlackenschicht bewirken, wodurch es zur Reoxidation der Schmelze kommen kann und die feuerfeste Ausmauerung der Pfanne

starker Erosion ausgesetzt wird. Zu Beginn der Behandlung (Entschwefelung, Desoxidation und Einschlussabscheidung) beschleunigt eine starke Spülung die Reaktionen und trägt zur Einschlussvergrößerung durch Kollision bei. Die Bildung von großen Einschlüssen ist wichtig, damit diese abgeschieden werden können und der Reinheitsgrad verbessert wird. Zum Abschluss soll ein sanftes Nachspülen erfolgen um einerseits die Abscheidung der großen Einschlüsse zu fördern, aber andererseits ein weiteres Wachstum der kleinen Partikel zu verhindern, da diese vor dem Stranggießprozess nicht mehr abgeschieden werden können.^{[8], [29], [30], [31]}

2.4.6 Auswirkungen der Einschlüsse

Einschlüsse können verschiedene Produktfehler und Qualitätsminderungen verursachen. Bei der Verformung können Risse auftreten und die Lebensdauer von Produkten wie Achsen und Lager kann vermindert werden.^[8] Bei Kreisbogenstranggießanlagen bilden sich Einschlussbänder bevorzugt an der Oberseite. Dieses Band befindet sich meist 20 – 30 mm unter der Oberfläche und entsteht im gebogenen Abschnitt des Strangverlaufes. Meist enthalten Einschlussbänder Makroeinschlüsse, da diese aufgrund ihrer Größe schneller aufsteigen können.^[33]

Der Einfluss von Einschlüssen auf die mechanischen Eigenschaften des Produktes ist abhängig von deren Größe, Form, Verformbarkeit, thermischen Eigenschaften und ihrer Bindung in der Matrix. Etwa wird die Dauerfestigkeit eines Werkstückes überwiegend von der Größe der Einschlüsse beeinflusst. Einen Überblick über die Schädlichkeit verschiedener Einschlüsse im Bezug auf die Lebensdauer eines Kugellagerstahls gibt **Abbildung 2-10**.

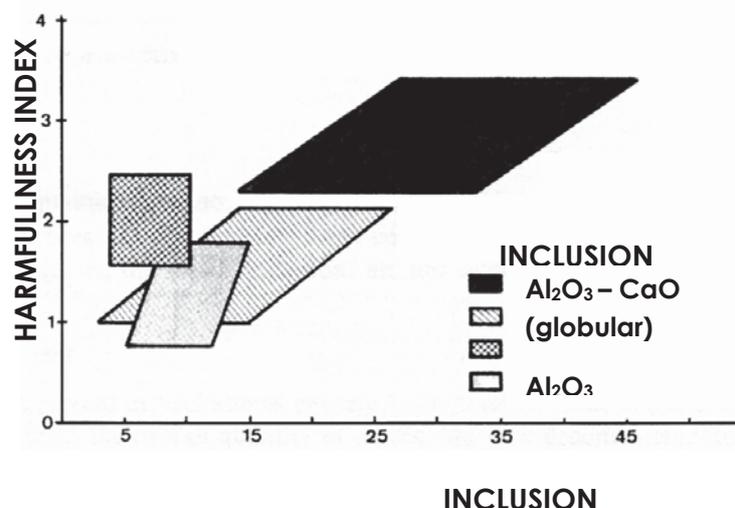


Abbildung 2-10: Schädlichkeitsindex verschiedener Einschlusstypen bezüglich der Lebensdauer eines Kugellagerstahls^[34]

Durch Einschlüsse treten örtliche Spannungsspitzen auf. Sind die Einschlüsse von unregelmäßiger Form und weisen zudem scharfe Kanten auf, so erhöhen sich die Spannungskonzentrationen um den Einschluss, wodurch Ermüdungsrisse leichter initiiert werden können. Beispielsweise sind Titanitride von eckiger Form mit scharfen Kanten, wodurch früher Risse ausgelöst werden als bei gleichgroßen kugelförmigen Einschlüssen.^[34] Weisen die Einschlüsse einen anderen Wärmeausdehnungskoeffizient als die Matrix auf, so werden Spannungen um den Einschluss generiert. Vor allem primäre oxidische Einschlüsse besitzen andere physikalische Eigenschaften als die Stahlmatrix. Somit ergeben sich während der Erwärmung und Abkühlung, sowie bei Phasenumwandlungen und unter Einfluss äußerer Spannungen, an der Phasengrenzfläche Einschluss-Matrix örtliche Spannungsfelder. Während des Warmwalzens werden solche Spannungen abgebaut. Ist der Wärmeausdehnungskoeffizient des Einschlusses kleiner als jener der Matrix, so ergeben sich beim darauf folgenden Abkühlen Zugspannungen. Dies trifft auf die meisten Oxide zu. Solche induzierten Spannungen wirken sich vor allem auf die Dauerfestigkeit des Werkstoffes aus. Befindet sich beispielsweise bei einem schwingend beanspruchten Bauteil ein primärer oxidischer Einschluss an ungünstiger Stelle, kann dieser Auslöser für einen Schwingbruch sein. Mangan- und Calciumsulfide weisen hingegen einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten als Stahl auf und lösen folglich beim Abkühlen keine schädlichen Zugspannungen aus.^{[34], [29]}

Bezüglich der Bearbeitbarkeit von Stahl, haben Einschlüsse unterschiedliche Auswirkungen. Betrachtet man die spanende Bearbeitung, agieren Einschlüsse einerseits als Spannungsbildner, wodurch Risse erzeugt werden und Späne leichter abbrechen. Jedoch können Einschlüsse andererseits je nach Beschaffenheit auch zu hohem Verschleiß des Werkzeuges führen. Vor allem sulfidische Einschlüsse werden im Zusammenhang mit spanender Bearbeitung in der Literatur^{[35], [36], [37]} mehrmals erwähnt. Einesteils fördern diese Einschlüsse spröde, kleine Späne und demgegenüber tritt durch die Schmierwirkung auf die Werkzeugschneide verminderte Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug auf. Dadurch lassen sich erhöhte Standzeiten erzielen. Oxidische Einschlüsse gelten wiederum als nachteilig bezüglich der Bearbeitbarkeit, da die meisten Oxide unterhalb der Liquidustemperatur von Stahl nicht verformbar sind. Zu diesen Oxiden zählen Korund (α - Al_2O_3) und Chromoxid (Cr_2O_3). Auch Calciumaluminat (C_xA_y) weisen diese Eigenschaft auf.^{[38], [39]}

Der Einfluss auf die Ermüdungseigenschaften wurde hauptsächlich bei hochfesten Stählen und Kugellagerstählen untersucht. In der Vergangenheit galten alle Einschlüsse als eine der Hauptursachen für das Versagen eines Werkstoffes. Nach zahlreichen Erforschungen wurde aufgezeigt, dass der Sachverhalt um einiges komplexer ist und zwischen den einzelnen

Einschlusstypen unterschieden werden muss. Vor allem spielen die Anzahl, Eigenschaften und Verteilung der Einschlüsse eine wichtige Rolle. Unverformbare Einschlüsse stellen Keime für Mikrorissbildung dar, wenn sie eine kritische Größe überschreiten und verursachen zudem Scherverformungen. Diese kritische Einschlussgröße wird mit dem Abstand des Einschlusses von der Stahloberfläche größer und bewegt sich zwischen 10 – 30 μm .^{[38], [40]}

Betrachtet man die Herstellung von Flachprodukten, sind Einschlüsse, welche Risse beim Tiefziehen verursachen, typischerweise 50 – 150 μm groß und die Zusammensetzung weist meist eine $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ -Verbindung auf. Es können somit Produktfehler entstehen, die meist verschiedene Zusammensetzungen aus Calcium, Magnesium, Aluminium, Natrium und Sauerstoff aufweisen. Diese Elemente sind in der Verteiler- und Gießpulverschlacke, sowie auch im Feuerfestmaterial enthalten und können so in die Schmelze gelangen. Ein weiterer Defekt, welcher oft bei Kaltband beobachtet wird sind Schlieren. Diese Fehler treten an der Oberfläche des kalt gewalzten Gutes auf und sind mehrere Mikrometer bis Millimeter breit und bis zu einem Meter lang. Diese Art der Oberflächenfehler beruht auf nichtmetallischen Einschlüssen, welche sich in der Nähe der Oberfläche befinden. Solche Fehler können auch in Kombination mit gestreckten Blasen auftreten. Die Folgen dieser Fehler sind eine unsaubere Oberfläche und Probleme bei der Formgebung.^[8]

Jedoch haben Einschlüsse nicht immer negative Auswirkungen auf das Produkt. Oft werden bewusst nichtmetallische Einschlüsse erzeugt um die Festigkeit des Werkstoffes zu erhöhen. Durch diese Einschlüsse wird die Wanderung der Versetzungen behindert und der Werkstoff verfestigt.^[29]

2.4.7 Absorption und Auflösung von Einschlüssen in der Kokille

Eine der Aufgaben des Gießpulvers ist die Aufnahme von an die Oberfläche aufsteigenden Einschlüssen. Jedoch ist ein Aufsteigen und Abscheiden aufgrund von unzureichendem Auftrieb, thermodynamischen Gründen und Oberflächenvorgängen nicht immer möglich. Steigen die Partikel auf, werden sie entweder gelöst oder verbleiben im festen Zustand in der Schlacke. Verbleiben die Teilchen ungelöst in der Schlacke, führt dies zu einer heterogenen Ausbildung der Schlackenschicht. An der Grenzfläche von Schmelze und Schlacke können sich feste Partikel ansammeln. Die Infiltration von Schlacke zwischen Strangschale und Kokille wird regellos und zusammen mit anderen nachteiligen Effekten wird die Schmierung erheblich verschlechtert. Das Abscheidungsverhalten von Tonerdeinschlüssen lässt sich in mehreren Literaturstellen^{[41], [42]} nachlesen und wie folgt zusammenfassen. Tonerdeinschlüsse werden am besten von flüssigen homogenen

Schlacken mit niedrigen Gehalten an Tonerde und Kieselsäure sowie hohen Fluoridgehalten aufgelöst. Allerdings kommt es hierbei zu starker Erosion des Feuerfestmaterials und des Tauchausgusses. Weiters muss erwähnt werden, dass sich in den Tonerdeclustern häufig Eisen ansammelt. Somit wird der Dichteunterschied zwischen Schmelze und Einschluss geringer und das Aufsteigen aufgrund der fehlenden Auftriebskraft erschwert und oft gänzlich verhindert. Besonders große Cluster kühlen während des Aufströmens irreversibel ab und die damit verbundene Kristallisation des Eisens macht ein Auftauchen sehr unwahrscheinlich. Ist ein Einschluss bis zur Oberfläche aufgestiegen und setzt er sich in der Schlacke fest, so kommt es meist zur Überflutung durch die überfließende Schmelze und dies führt zu oberflächennahen Fehlern (**Abbildung 2-11**).^[43]

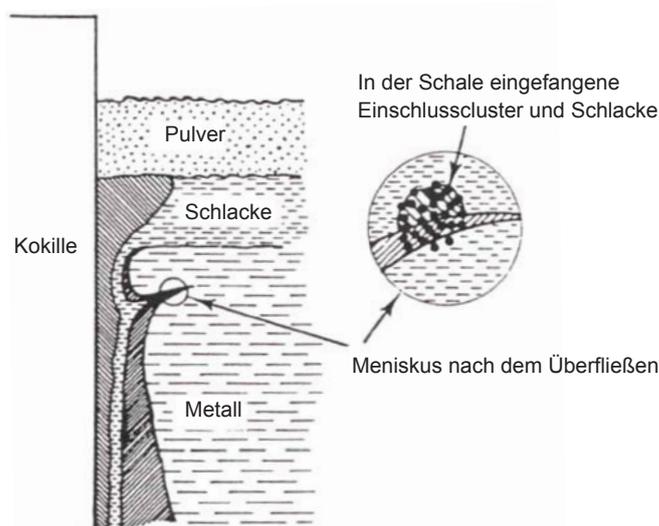


Abbildung 2-11: Einfangen von Einschlussclustern und Schlacke^[43]

2.5 Ca-Behandlung

Der Reinheitsgrad einer Schmelze ist von essentieller Bedeutung für die Weiterverarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften, sowie auch für die Qualität des späteren Endproduktes. Dies fordert die Herstellung einer reinen Schmelze und somit eine geringe Anzahl an oxidischen Einschlüssen und die Beeinflussung und Steuerung deren Morphologie, Größenverteilung und Zusammensetzung. Daher ist es eine der Hauptaufgaben der Sekundärmetallurgie, die Verunreinigungen der Schmelze dahingehend

zu modifizieren und einzustellen, dass eine gute Vergießbarkeit gewährleistet ist und ein Produkt von ausreichender Qualität erzeugt werden kann.

Im Zusammenhang mit der Vergießbarkeit von Stahlschmelzen spielen Aluminiumoxide eine große Rolle. Die Entstehung von Tonerdeinschlüssen wurde bereits in **Kapitel 2.4.5** erläutert. Da der Schmelzpunkt von reinem Al_2O_3 2050 °C beträgt, liegen die Einschlüsse bei Gießtemperaturen in festem Zustand vor und können somit zu Problemen beim Vergießen führen.^[44] Deshalb wird heutzutage in vielen Stahlwerken eine Calciumbehandlung von aluminiumberuhigten Schmelzen durchgeführt. Dabei wird Calcium entweder als Ca- bzw. CaSi-Fülldraht in die Pfanne eingespult oder als pulverförmiges CaSi in die Pfanne injiziert. Bei siliziumfreien Stahlsorten ist die Verwendung von Ca-Fe Legierungen üblich, um den maximalen Siliziumgehalt nicht zu überschreiten. **Abbildung 2-12** zeigt schematisch die verschiedenen Möglichkeiten zur Aufgabe des Calciums.

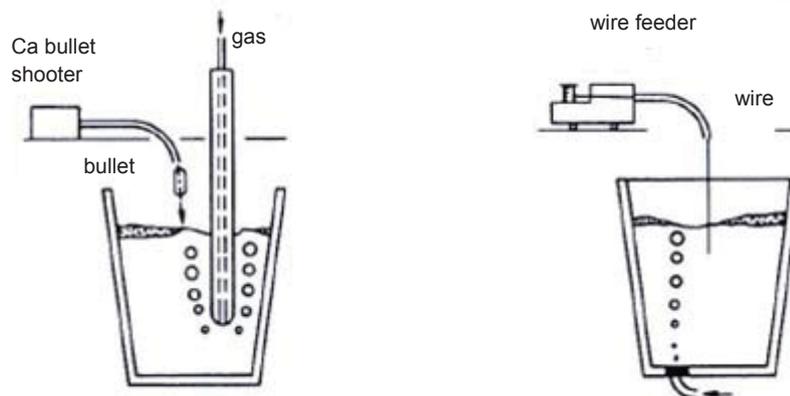
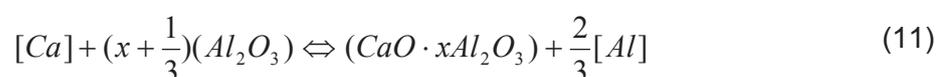


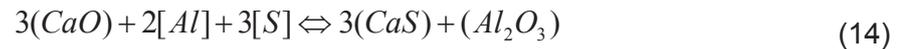
Abbildung 2-12: Einbringmöglichkeiten von Ca in die Pfanne^[32]

Ein bloßes Aufgeben von Calcium auf die Pfanne ist aufgrund des niedrigen Siedepunktes von Calcium (1491 °C) nicht möglich, da es sofort verdampfen würde. Deshalb nutzt man den ferrostatischen Druck der Schmelze aus, indem man die Calciumlegierung möglichst tief in die Pfanne einbringt. Durch die Erhöhung des Druckes wird so die Bildung der Gasphase unterdrückt.^[43]

Durch die Calciumbehandlung werden die festen Tonerdeinschlüsse zu flüssigen Calciumaluminaten modifiziert, welche sich nicht im Ausgussystem anlagern. Der Behandlung liegen nachfolgende chemische Reaktionen zugrunde:



Weist die Schmelze erhöhte Schwefelgehalte auf können auch folgende Reaktionen ablaufen:



Die Reaktionen 10, 12 und 13 spiegeln Desoxidations- bzw. Entschwefelungsreaktionen mit Calcium und Aluminium wieder. Reaktion 11 beschreibt die Modifikation von festen Tonerdeinschlüssen zu Calciumaluminaten durch Zugabe von Calcium und Reaktion 14 stellt die Wechselwirkung zwischen Schwefel, Schmelze und Einschlüssen, sowie auch die Entstehung von Sulfiden dar. Die Modifikation der Einschlussmorphologie wird in **Abbildung 2-13** schematisch dargestellt.^[44]

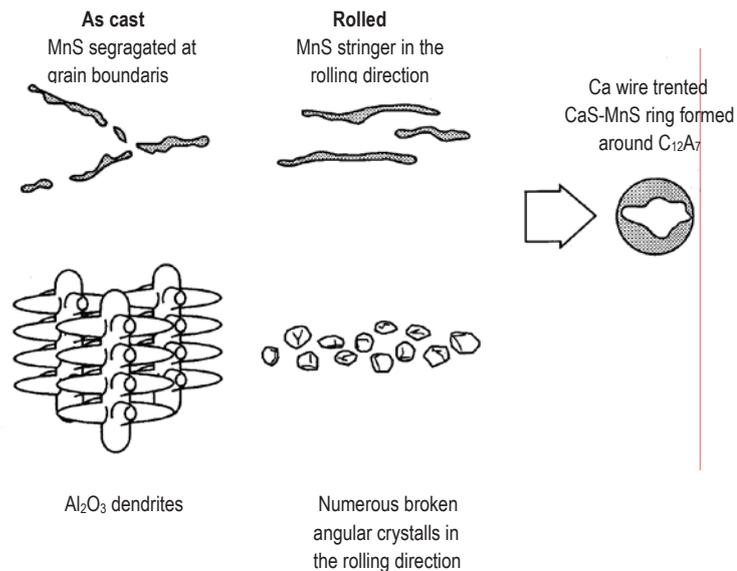


Abbildung 2-13: Modifikation mittels Ca-Behandlung^[44]

Ziel der Calciumbehandlung ist, verbleibende Einschlüsse so zu modifizieren, dass sie bei Gießtemperaturen in flüssiger Form auftreten. Das Phasendiagramm Al₂O₃-CaO, **Abbildung 2-14**, zeigt, dass die Modifikationsstufe C₁₂A₇ mit 1413°C den niedrigsten Schmelzpunkt aufweist und somit beim Stranggießen als flüssige Phase vorliegt. Die Abkürzung C_xA_y steht jeweils für die Verbindung aus xCaO und yAl₂O₃.

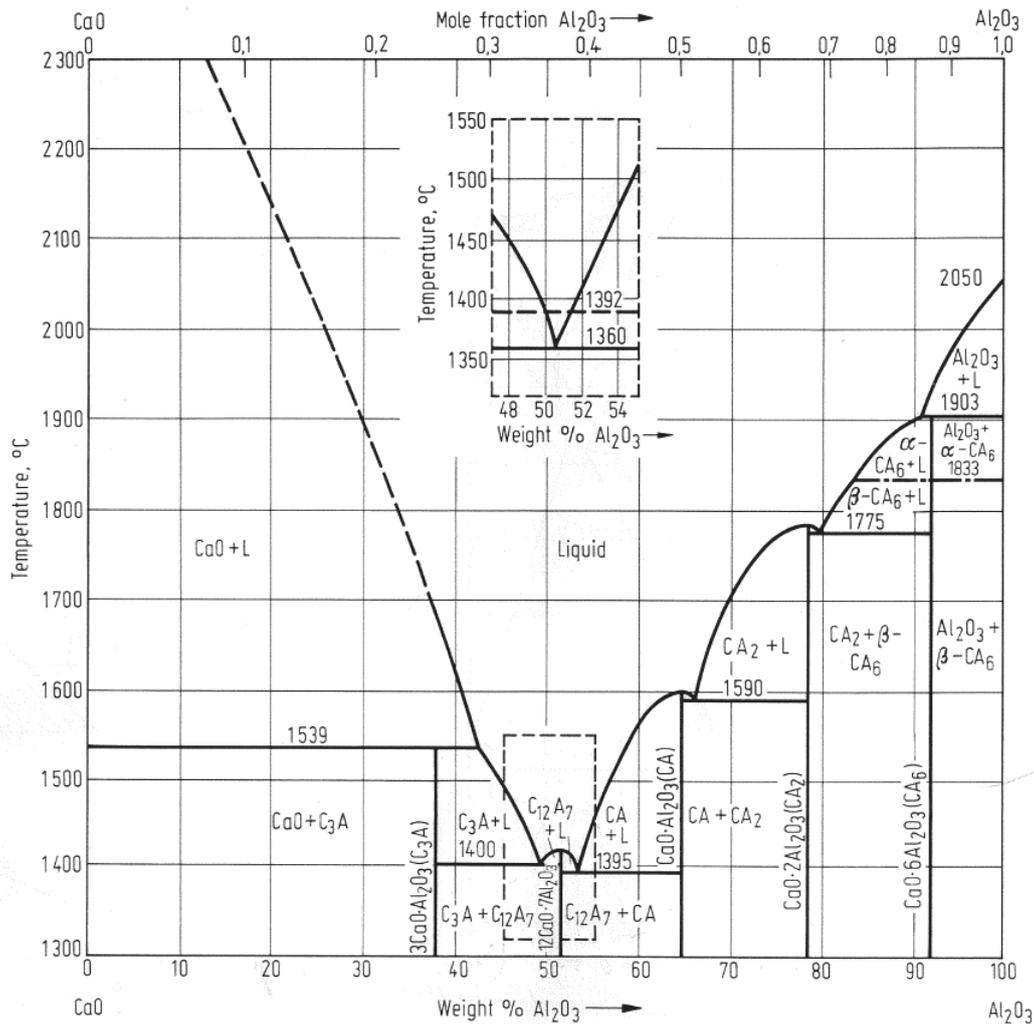


Abbildung 2-14: Phasendiagramm CaO-Al₂O₃^[45]

Gemäß diesem Phasendiagramm läuft die Modifikation in folgenden Schritten ab:



CaO-Partikel kollidieren mit Al₂O₃ Partikel und es entstehen Calciumaluminat. Deren Schmelzpunkt sinkt mit zunehmendem CaO-Anteil. Die Reaktion läuft von einem inneren Kern nach außen hin ab. Dies spiegelt **Abbildung 2-15** wieder.

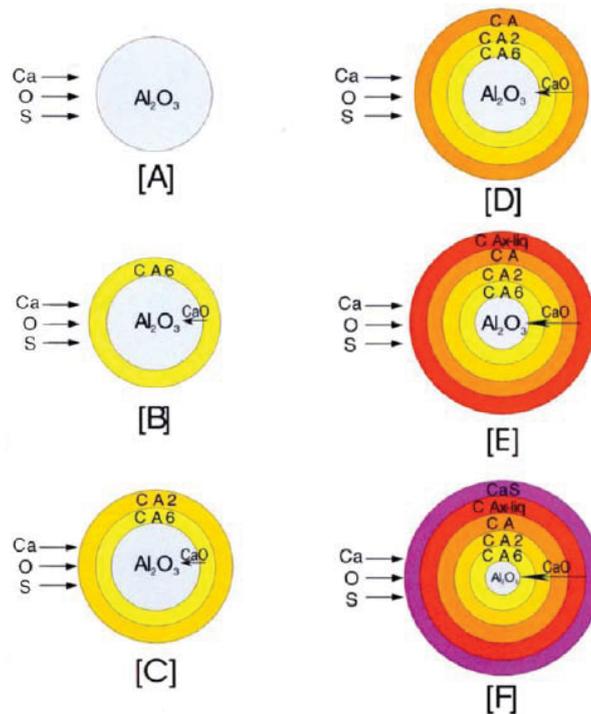


Abbildung 2-15: Mechanismus der Al_2O_3 -Modifikation durch Ca-Behandlung^[46]

Weist die Schmelze einen hohen Schwefelgehalt um 0,1 % S auf, so bildet sich ein CaS-Saum, welcher die weitere Diffusion und somit die Bildung von flüssigen Calciumaluminaten verhindert. Umso höher die Gehalte an Calcium, Schwefel und Aluminium in der Schmelze sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Calciumsulfidbildung. Bei schwefelhaltigen Güten konkurrieren Sauerstoff und Schwefel untereinander bei der Reaktion mit Calcium. Der Bereich von flüssigen Calciumaluminaten wird daher nicht nur von der Calciumzugabe, sondern auch vom Schwefelgehalt in der Schmelze beeinflusst. Mit zunehmendem Aluminiumgehalt der Schmelze sinkt die Sauerstoffaktivität und es bildet sich bevorzugt Calciumsulfid. Weiters sinkt die Sauerstoffaktivität auch mit sinkender Temperatur, was wiederum zur Calciumsulfidbildung führt.^{[19], [47], [48]}

Die Bildung der gewünschten flüssigen Einschlüsse wird begünstigt durch eine höhere Calciumzugabe. Diese Zugabemenge verringert den Al_2O_3 -Anteil im Calciumaluminat und folglich auch den Schmelzpunkt, wodurch ein flüssiger Bereich entsteht. Wird die Calciummenge aber zu hoch bemessen, wirkt sich dies nachteilig aus, da dadurch vermehrt Calciumsulfid gebildet wird. Einen Überblick über den flüssigen Bereich der Einschlüsse gibt nachstehende **Abbildung 2-16:**

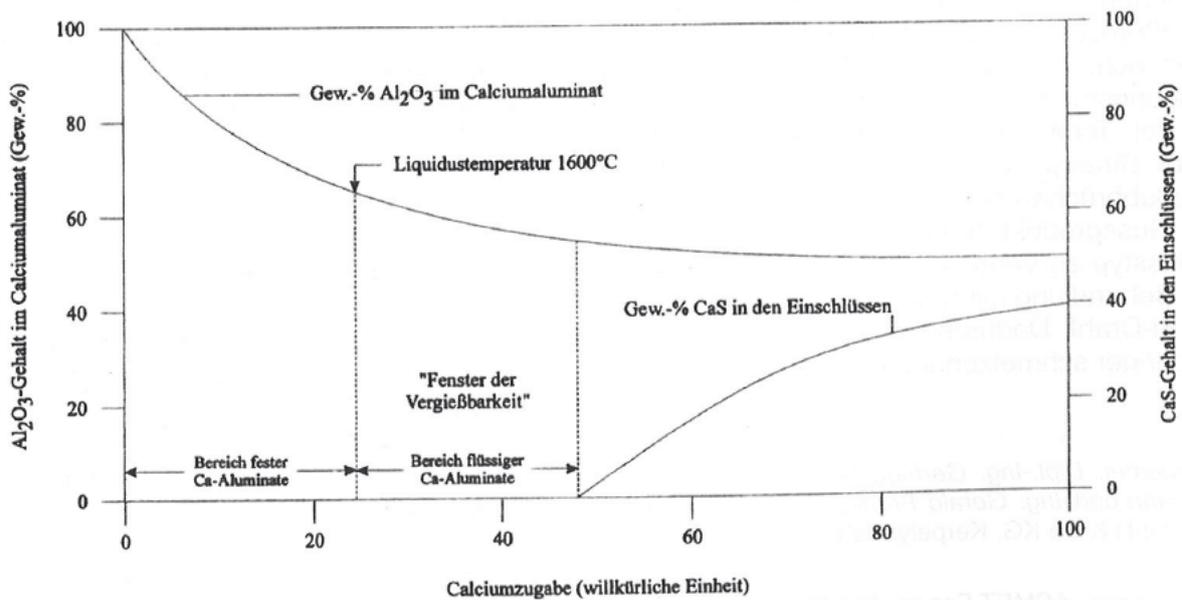


Abbildung 2-16: Fenster der Vergießbarkeit^[44]

Die gesamte Umwandlung lässt sich in zwei Stufen einteilen^[48]:

1. die Wechselwirkung und Reaktion des in der Schmelze gelösten Sauerstoffs und Calciums mit den Aluminiumpartikeln unter der Bildung der flüssigen Calciumaluminat. Dieser Schritt wird hauptsächlich durch die Zusammensetzung der Schmelze beeinflusst.
2. die Wechselwirkung zwischen den flüssigen Calciumaluminaten und den festen Aluminiumpartikeln.

Als geschwindigkeitsbestimmender Schritt können entweder die Diffusion des Calciums in die Schicht der flüssigen Calciumaluminat oder die chemischen Reaktionen an der Aluminium – Calciumaluminat – Grenzfläche angesehen werden. Würde die Diffusion geschwindigkeitsbestimmend sein, sollten erhebliche Konzentrationsunterschiede über die Grenzflächen zu finden sein. Versuche von *Lind et al.*^[48] haben gezeigt, dass die Konzentrationsverteilung von Calcium in der Schmelze äußerst homogen ist. Da es also praktisch keinen Konzentrationsgradienten gibt, folgt daraus, dass die chemische Reaktion an der Grenzfläche als geschwindigkeitsbestimmender Schritt betrachtet wird. Der Gehalt von festem Calcium, Calciumoxiden und Calciumsulfiden in der Schmelze steht in Zusammenhang mit der verstrichenen Zeit ab der Calciumzugabe. Daneben nimmt auch der Ca-Gehalt der Einschlüsse mit der Zeit ab. Dies ist in **Abbildung 2-17** zu sehen.

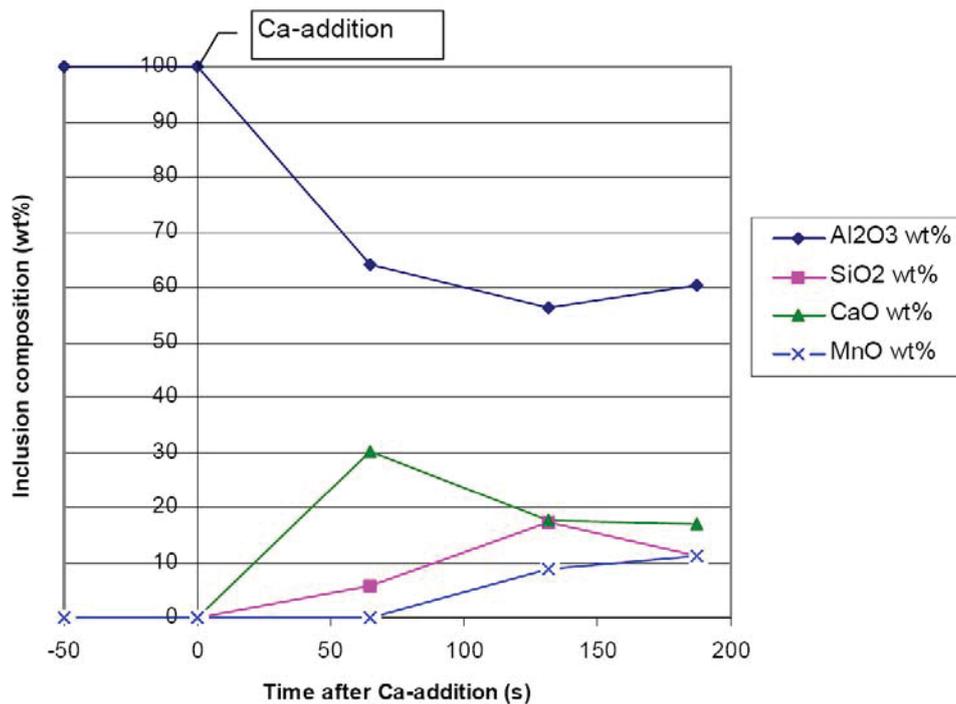


Abbildung 2-17: Änderung der Zusammensetzung von Einschlüssen ab dem Zeitpunkt der Ca-Zugabe bei einem aluminiumberuhigten Stahl^[47]

Die entstandenen Calciumaluminat wachsen und scheiden sich teilweise in die Schlacke ab. Weiters sind diese nicht mehr dendritisch, sondern globular und behalten diese Form auch während und nach einem Umformvorgang annähernd bei.^{[44], [49], [47], [50]}

Das in der Schmelze verbleibende Calcium tritt in folgenden Erscheinungsformen auf:

- als Bestandteil oxidischer Einschlüsse. Enthalten diese zu wenig Calcium, bilden sich feste Calciumaluminat, welche noch stärker zum Clogging neigen als Tonerdeinschlüsse.
- gelöst in der Schmelze. Dazu kommt es vor allem bei hohen Aluminiumgehalten und bei der Erstarrung bildet ein großer Anteil des gelösten Calciums CaS oder (Ca, Mn)S.
- als Bestandteil sulfidischer Einschlüsse. Ist die Sättigungsgrenze erreicht, scheidet sich CaS aus der Schmelze aus und die Menge des übrig gebliebenen Calciums ist zu gering um flüssige Calciumaluminat zu bilden, wodurch es wieder zum Clogging kommt.

Daher kann eine fehlgeschlagene Calciumbehandlung ebenfalls zu Clogging führen. Die **Abbildung 2-18** zeigt den Einfluss von Sauerstoff und die einzelnen Stabilitätszonen der Phasen bei der Calciumbehandlung. Wird zu wenig Calcium zugegeben, so können keine flüssigen Calciumaluminat eingestellt werden. Es kommt zur Bildung von CA₆ oder CA₂,

welche überdies viel stabilere Ablagerungen ausbilden und kaum zerbröckeln. Wird hingegen zu viel Calcium zugegeben, gelangt Sauerstoff in die Schmelze, da das Calcium aufgrund seines hohen Dampfdrucks zu sieden beginnt. Außerdem kann es durch das Kochen zu Interaktionen zwischen Stahl, Schlacke und Feuerfestmaterial kommen, was die Bildung von aluminiumreichen Einschlüssen oder $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ Spinellen zur Folge hat. Kommt es nach der Calciumbehandlung zur Reoxidation, remodifizieren die Einschlüsse und es bilden sich aluminiumreiche Oxide.^[19]

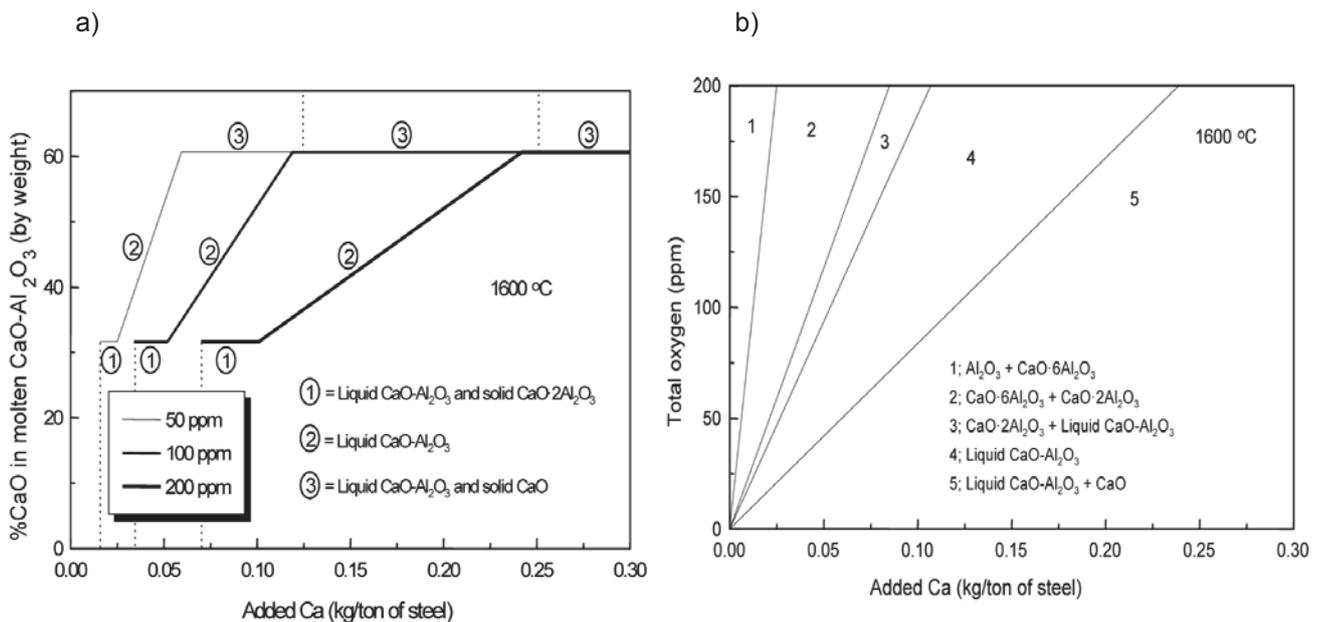


Abbildung 2-18: a) CaO-Gehalt der Oxide bei verschiedenen Sauerstoffgehalten und b) Stabilität diverser Phasen jeweils gültig für 0,04 %Al und 1600 °C^[51]

Jedoch ist eine Calciumbehandlung nicht bei allen Stahlsorten durchführbar. Ist eine hohe Verformbarkeit gefordert, wie etwa bei Karosserieblechen, kann keine Calciumbehandlung durchgeführt werden. Der Grund dafür ist, dass die gebildeten Calciumaluminat kugelförmig, sehr fest und nicht verformbar sind.^[52]

2.6 Prüfungsmethoden

2.6.1 Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung gehört zu den zerstörungsfreien Werkstoffprüfungen, womit Fehlstellen im Gefüge des Werkstoffes detektiert und beurteilt werden können. Ultraschall liegt oberhalb der menschlichen Hörschwelle bei Frequenzen zwischen 20 kHz und 1 GHz.

In Gasen und Flüssigkeiten breitet sich Ultraschall als Longitudinalwelle aus. Da Festkörper neben der Volumenelastizität auch Formelastizität besitzen und somit Scherspannungen auftreten, erfolgt hier die Ausbreitung zusätzlich in Form von Transversalwellen. Bei der Materialprüfung werden die Schwächung bzw. die Reflexion der Schallwellen an Fehlern im Werkstoff ausgenutzt. Treten in Werkstoffen Poren oder Mikrorisse auf, so wird sowohl die longitudinale als auch die transversale Schallgeschwindigkeit reduziert. Weiters kann der Schall an Fehlern, wie nichtmetallischen Einschlüssen, reflektiert werden, wodurch sich ein Echo ergibt. Dadurch ist es möglich Inhomogenitäten im Werkstoff zu detektieren.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c einer Schallwelle ist vom Werkstoff und der Wellenart abhängig und kann mit folgender Gleichung beschrieben werden^[53]:

$$c = f \cdot \lambda \quad (16)$$

cSchallgeschwindigkeit (m/s)

f Frequenz (1/s)

λWellenlänge (m)

In **Tabelle 2-III** sind einige typische Schallgeschwindigkeiten aufgelistet:

Tabelle 2-III: Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien^[53]

Eigenschaft	Stahl	Aluminium	Wasser	Luft	Plexiglas
Longitudinalgeschwindigkeit c_L [m/s]	5920	6320	1480	333	2730
Transversalgeschwindigkeit c_S [m/s]	3250	3130	–	–	1430

Das Messprinzip einer Ultraschallprüfung beruht darauf, dass Ultraschallwellen von einem Prüfkopf in den Werkstoff ausgesandt und an Inhomogenitäten reflektiert werden. Neben der Reflexion tritt zudem eine Schallschwächung ein.^[54]

Generell wird zwischen dem Durchschallungsverfahren und dem Impuls-Echo-Verfahren unterschieden. Beim Durchschallungsverfahren kommen ein Sender und ein Empfänger als Prüfköpfe zum Einsatz. Der Sender sendet Schallwellen durch den Werkstoff. Diese werden durch Inhomogenitäten abgeschwächt und der Empfänger empfängt eine verringerte Schallamplitude (**Abbildung 2-19**). Jedoch ist bei dieser Methode eine Aussage bezüglich der Lage des Fehlers nicht möglich.

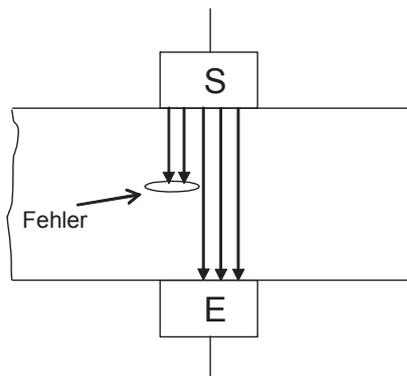


Abbildung 2-19: Durchschallungsverfahren^[53]

Das Impuls-Echo-Verfahren (**Abbildung 2-20**) kommt am häufigsten zum Einsatz. Hierbei wird nur ein Prüfkopf benötigt, welcher zugleich als Sender und Empfänger fungiert. Die Schallwellen durchlaufen den Werkstoff und werden an der Rückwand, sowie auch an Inhomogenitäten des Prüfkörpers reflektiert. Somit wird ein Echo am Empfänger detektiert. Durch die Höhe der Echoamplitude kann auf die Größe des vorliegenden Fehlers geschlossen werden.

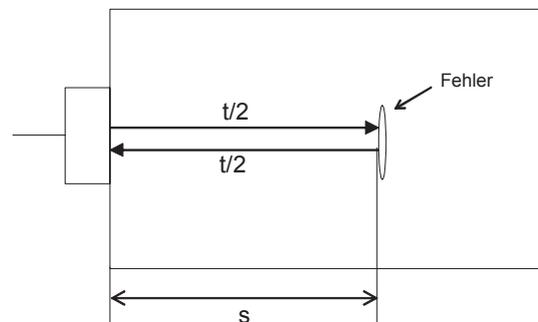


Abbildung 2-20: Impuls-Echo-Verfahren^[53]

Außerdem kann über die Formel $s = \frac{1}{2} c \cdot t$ die Lage s des Fehlers ermittelt werden. Die Schallgeschwindigkeit c ist bekannt und die Echolaufzeit t , welche die Zeit vom Senden des Impulses bis zum Empfang des Echos ausdrückt, wird ebenfalls aufgezeichnet. Die Vorteile dieser Methode liegen darin, dass zur Durchführung der Materialprüfung nur ein Prüfkopf angekoppelt werden muss und lediglich eine Materialseite benötigt wird.^{[53]. [55]}

Bei der praktischen Durchführung der Ultraschallprüfung ist zu beachten, dass Luft den Schall nur sehr schlecht leitet. Daher kommt häufig die Tauchtechnik zum Einsatz, da hierbei eine günstige Ausbreitung des Schalls, welche zu einer effizienten Ortung von Werkstoff-

fehlern erforderlich ist, gewährleistet ist. Der Prüfkörper befindet sich bei diesem Verfahren in einem Wasserbad, in welches auch der Prüfkopf eintaucht. Da Wasser bei einigen Werkstoffen zu Korrosion führen kann, werden dem Wasserbad bei Bedarf geeignete Korrosionsschutzmittel zugesetzt. Ist eine Anwendung der Tauchtechnik nicht möglich, so können am Prüfkopf flexible gummiartige Folien angebracht werden, um das Auftreten eines Luftspalts zwischen Prüfkopf und Werkstück zu unterbinden. Jedoch sind bei der Ankopplung mit Wasser höhere Prüffrequenzen und das Detektieren kleinerer Fehler möglich, weshalb diese Art der Prüfung zu bevorzugen ist.^{[54], [56]}

2.7 Zusammenfassung

Weder in der einschlägigen Literatur, noch in Berichten von Forschungsprojekten, finden sich konkrete Aussagen bezüglich der Auswirkung von Gießspiegelschwankungen auf die Qualität des Gussproduktes. Es wird generell angenommen, dass instationäre Bedingungen beim Stranggießen äußerst schädliche Auswirkungen auf die Produktqualität haben. Jedoch wird diese Erkenntnis mit keinerlei Beweisen oder einschlägigen Versuchsergebnissen belegt. Auch auf die expliziten Folgen einer Gießspiegelschwankung wird an keiner Stelle eingegangen. Es werden lediglich Vermutungen angestellt, dass sich solche Ereignisse vor allem negativ auf die Oberflächenbeschaffenheit des Gussproduktes auswirken. Oft treten Gießspiegelschwankungen im Zusammenhang mit Clogging auf. Die verschiedenen Ursachen, welche zu Clogging führen können, und Maßnahmen, um das Auftreten zu vermindern, sind in **Kapitel 2.3** hinreichend diskutiert. Da Clogging vor allem bei aluminiumberuhigten Schmelzen auftritt, steht dieses Phänomen eng in Zusammenhang mit Aluminiumoxiden, welche unter 2050°C in festem Zustand vorliegen. Um die Vergießbarkeit der Schmelze zu gewährleisten, kommt häufig eine Calciumbehandlung zum Einsatz (**Kapitel 2.5**). Hierbei ist es wichtig, die Aluminiumoxide vollständig mit Calcium zu modifizieren, da schwach modifizierte Calciumaluminat noch stärker zum Clogging neigen als reine Aluminiumoxide.

Die Produktqualität ist stark vom vorliegenden Reinheitsgrad, welcher über die Anzahl, Zusammensetzung und Verteilung nichtmetallischer Einschlüsse definiert ist, abhängig. Die einzelnen Einschlussarten, deren Entstehung und Auswirkungen auf das Gussprodukt, sind in **Kapitel 2.4** erörtert. Beschäftigt man sich mit dem Verhalten von Einschlüssen während des Vergießens der Schmelze und deren Abscheidungsmöglichkeiten, so stellt man fest, dass die Größe der Teilchen und die vorliegenden Strömungsbedingungen sehr wesentlich sind. Je nach deren Größe steigen Einschlüsse durch ihren Auftrieb schneller oder

langsamer auf. Dies wird natürlich von der gegenwärtigen Strömung und deren Richtung beeinflusst. Vor allem das Verhalten von großen Einschlüssen wurde, wie in **Kapitel 2.2.3** erwähnt, noch nicht hinreichend erforscht. Im Zusammenhang mit Clogging werden Aluminiumoxide oder Aluminate als charakteristischer Einschlusstyp im Gussprodukt genannt. Lösen sich kleinere Partikel aus dem Gießsystem, so gelangen diese durch die Strömung in die Mitte des Stranges und sind später im Inneren des Gussproduktes wieder zu finden. Auf große Partikel wirken folglich größere Auftriebskräfte und ein Aufsteigen in den Bereich der Kokillenschlacke gilt als wahrscheinlich. Entweder scheiden sich diese in die Schlacke ab, oder sie werden von der erstarrenden Strangschale eingefangen. Kommt es nun zu Gießspiegelauslenkungen von einigen Millimetern, so wird als eine mögliche Ursache dafür angenommen, dass sich größere Partikel aus dem Ausgussystem gelöst haben. Infolge dessen kann plötzlich eine größere Stahlmenge durch den Gießkanal fließen und es kommt zum sprunghaften Ansteigen des Gießspiegels. Durch diese starke Auslenkung kann es zu Einziehungen von Gießpulver kommen (siehe **Kapitel 2.2.2**). Dadurch werden Produktfehler, welche durch solche Gießspiegelschwankungen ausgelöst werden, eher in oberflächennahen Bereichen vermutet.

Auf Basis der Literatur kann die Aussage getroffen werden, dass Gießspiegelschwankungen zu gravierenden Einbußen hinsichtlich der Produktqualität führen. Man vermutet Produktfehler in Form von Gießpulvereinschlüssen und oberflächennahen Fehlern, sowie nichtmetallische Einschlüsse im Inneren. Anhand von ausgewählten Proben und die Prüfung auf deren makroskopischen Reinheitsgrad soll diese Annahme überprüft werden.

3 Praktischer Teil

3.1 Problemstellung

Der Einfluss von instationären Verhältnissen beim Stranggießen auf den makroskopischen Reinheitsgrad im Gussprodukt ist zu untersuchen. Dabei soll insbesondere auf Schwankungen des Gießspiegels durch Ablösung von Cloggingprodukten eingegangen werden. Dazu wurden die Gießspiegelverläufe der Stranggießanlage CC3 der VASD über einen bestimmten Zeitraum beobachtet. Die Daten von Chargen, bei welchen Probleme in der Vergießbarkeit aufgetreten sind, wurden erfasst und ausgewertet. Da es möglich ist, Gießspiegelschwankungen den Gussprodukten zuzuordnen, wurde eine Auswahl an betroffenen Vorblöcken gewählt und einer Überprüfung auf den makroskopischen Reinheitsgrad unterzogen. Als kurze Einleitung wird im folgenden Kapitel die Regelung des Gießspiegels in der Kokille kurz erläutert und nachstehend folgt eine Beschreibung von Gießspiegelschwankungen und deren Auftrittsformen.

3.2 Gießspiegelverlauf und Gießspiegelschwankungen

3.2.1 Gießspiegelregelung

Die Höhe des Gießspiegels in der Kokille ist einerseits vom Öffnungsgrad des Stopfens und der Füllhöhe im Verteiler abhängig, sowie auch vom Strangabzug, also von der Gießgeschwindigkeit. Je höher der Füllstand im Verteiler, desto höher ist der ferrostatische Druck und desto höher die Durchflussrate. Die Stahlmenge, welche durch den ETA fließt, wird mit dem Stopfen kontrolliert. Je höher die Position des Stopfens, desto größer ist der

Durchflussquerschnitt und somit auch die Durchflussrate und umgekehrt. Die Höhe des Gießspiegels in der Kokille wird bei VASD mit dem so genannten Isotopen-Messverfahren erfasst. Dabei sendet eine radioaktive Quelle γ -Strahlen aus, welche von einem Szintillationszähler detektiert werden, wie in **Abbildung 3-1** dargestellt. Strahlen, welche durch den flüssigen Stahl gesendet werden, werden soweit abgeschwächt, dass sie nicht mehr erfasst werden. Somit kann die Intensität der vom Szintillationszähler detektierten Strahlung mit der Höhe des Gießspiegels in Beziehung gesetzt werden. Als Emissionsquelle dient ^{60}Co , dessen Radioaktivität einen geringen Wert von ungefähr $0,04 \cdot 10^{10}$ Bq ergibt. Damit die Amplituden und Frequenzen der Gießspiegelschwankungen keine zu hohen Werte annehmen, muss die Regelcharakteristik einen ausreichenden integralen Anteil aufweisen.^{[57], [58]}

Die Messdaten des Füllstandes in der Kokille werden an einen Computer gesendet, welcher die Signale an die Stopfenregelung weiterleitet, welche durch heben oder senken des Stopfens den Stahldurchfluss regelt.^[57]

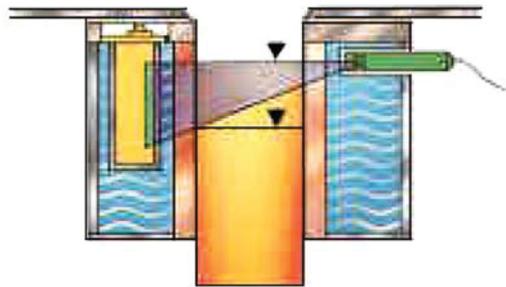


Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau und Anordnung der Strahlenquelle – Szintillationszähler Kombination^[59]

Um sich mit dem Thema Gießspiegelschwankungen auseinandersetzen zu können, bedarf es eines grundlegenden Verständnisses über das Verhalten des Gießspiegelregelsystems. Der folgende Teil beinhaltet Beschreibung der Durchführung und die Ergebnisse der Untersuchung des Regelsystems der Stranggießanlage CC3 der VASD.

3.2.2 Untersuchung des Regelsystems der CC3 und Beschreibung von Gießspiegelschwankungen

Die Gießspiegelaufzeichnungen der Stranggießanlage CC3 wurden über einige Wochen untersucht und ausgewertet. Ziel dieser Auswertung war, festzustellen in wie weit sich eine Änderung der Stopfenregelung auf den Gießspiegel auswirkt, beziehungsweise in wie fern der Stopfen auf eine Gießspiegelschwankung reagiert. Weiterfolgend können Überlegungen

dazu angestellt werden, wie sich der Gießspiegel und die Stopfenregelung verhalten, wenn sich Ablagerungen im Ausgusssystem lösen und in die Kokille gelangen. Lösen sich Ablagerungen aus dem Gießkanal, so kann plötzlich eine größere Stahlmenge durch das Tauchrohr strömen. Dadurch kommt es zu einem Ansteigen des Gießspiegels, worauf wiederum die Stopfenregelung reagiert und der Stopfen sich senkt. Es wurden einzelne Gießspiegelschwankungen aus den Aufzeichnungen herausgefiltert und vermessen. Die Minimal- und Maximalwerte sowie deren Auftrittszeitpunkte des Gießspiegelverlaufes und des Stopfenweges wurden tabellarisch erfasst und ausgewertet. Aus den einzelnen Daten werden die jeweiligen Gradienten $\Delta s/\Delta t$ berechnet und für die einzelnen Gießgeschwindigkeiten in Diagrammform dargestellt. Gießspiegelschwankungen im Zusammenhang mit Clogging sollen dabei besonders beachtet werden. In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Untersuchung aufgelistet. Die Gießspiegelschwankungen lassen sich in einzelne Klassen, welche jeweils unter den Abbildungen angeführt sind, unterteilen:

- Typ I: Zuschmieren des Gießkanals durch Clogging
- Typ II: Starke Gießspiegelschwankungen durch Clogging
- Typ III: Plötzliches Absenken des Stopfens
- Typ IV: Gießspiegelschwankungen, typisch für einen bestimmten Durchmesser des ETAs

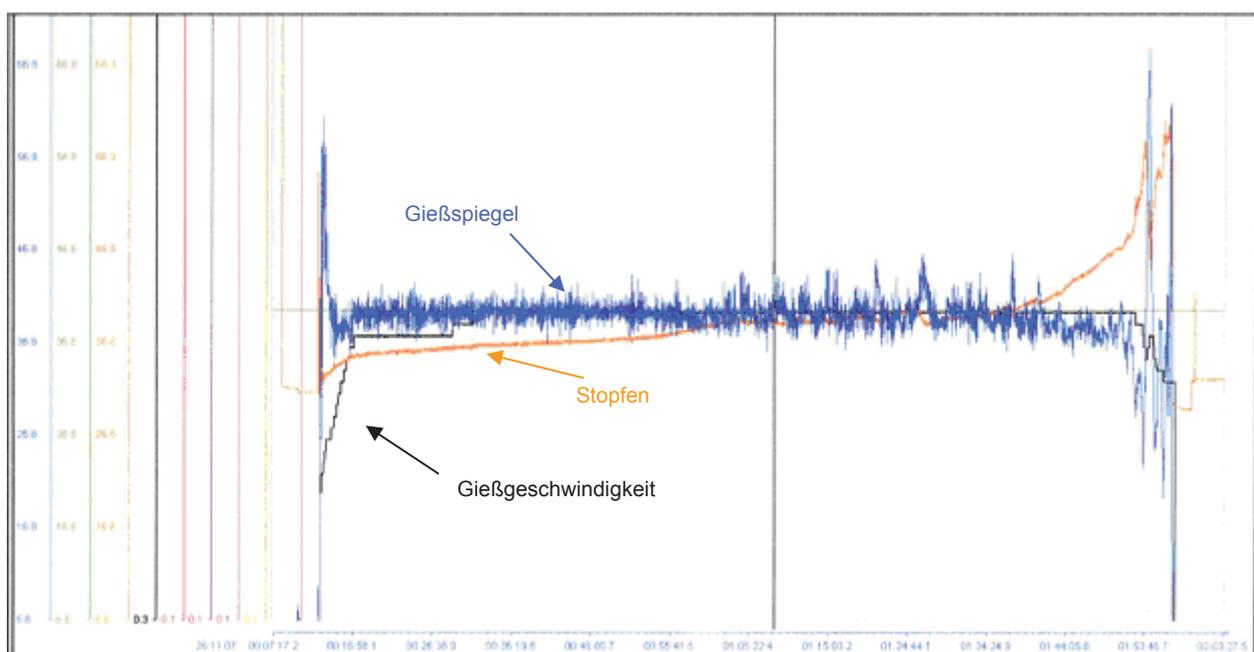


Abbildung 3-2: Zuschmieren des Gießkanals durch Clogging (Typ I)

Exemplarisch sollen an Hand der **Abbildung 3-2** die aufgezeichneten Daten erklärt werden. Die blaue Linie kennzeichnet die Position des Gießspiegels in der Kokille, die orange Linie die Stopfenposition und die schwarze Linie die Gießgeschwindigkeit. Auf der linken Seite befinden sich die Achsen, auf welchen die einzelnen Messgrößen abgelesen werden können. Die Position des Gießspiegels und des Stopfens sind in Prozent aufgetragen, die Einheit der Gießgeschwindigkeit ist Meter pro Minute und am unteren Rand befindet sich die Zeitachse. Bei dieser Auftrittsform der Gießspiegelschwankung, Zuschmieren des Gießkanals durch Clogging, ist deutlich zu sehen, dass der Stopfen vor allem gegen Ende hin immer mehr öffnet, um den Stahldurchfluss konstant zu halten. Durch Ablagerungen verengt der Gießkanal zunehmend und es treten Unregelmäßigkeiten in der Strömung auf. Gegen Ende ist das Tauchrohr bereits so zugesetzt, dass der ferrostatische Druck nicht mehr ausreicht, um die erforderliche Stahlmenge durch den Gießkanal fließen zu lassen. Um dies auszugleichen wird die Gießgeschwindigkeit reduziert und der Stopfen öffnet immer weiter. Man sieht ein Abfallen der Stopfenposition einhergehend mit einer starken Auslenkung des Gießspiegels. Daraus lässt sich darauf schließen, dass sich Ablagerungen aus dem Gießkanal gelöst haben. Infolge des plötzlich höheren Durchflusses steigt der Gießspiegel an, worauf die Stopfenregelung reagiert. Im Folgenden wird der Gießkanal wieder blockiert und der Gießspiegel sinkt immer weiter ab, bis ein weiteres Vergießen der Schmelze unmöglich wird.

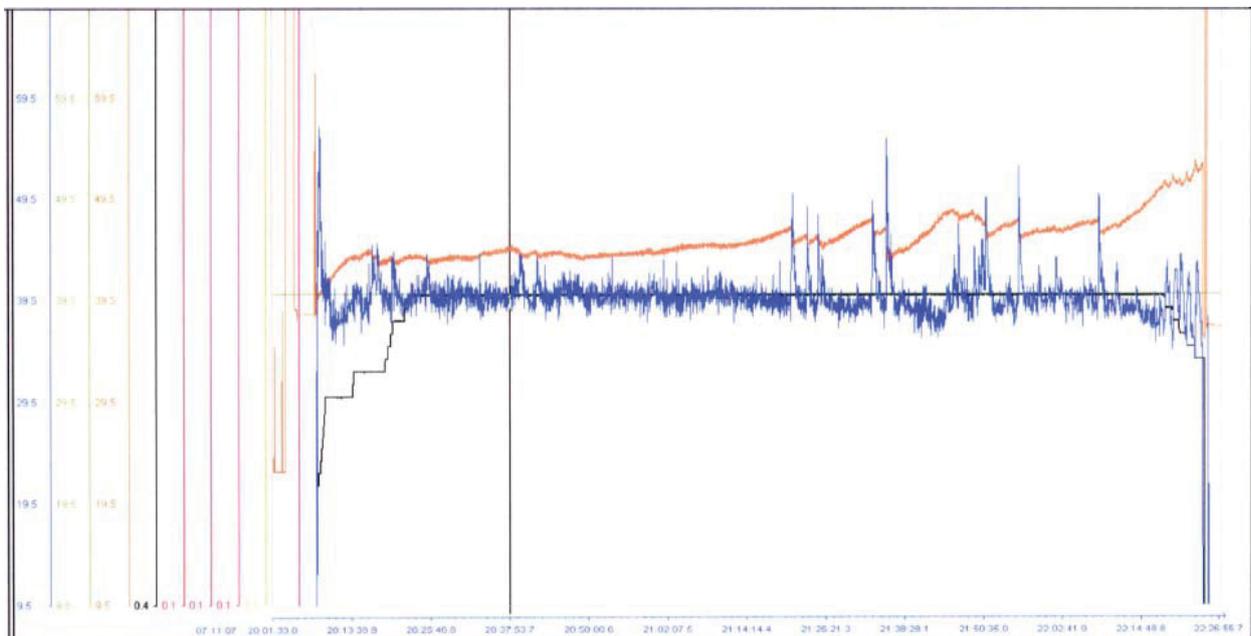


Abbildung 3-3: Starke Gießspiegelschwankungen durch Clogging (Typ II)

In **Abbildung 3-3** sind starke Gießspiegelschwankungen durch Clogging (Typ II) zu sehen, welche sich in Folge des Loslösen von Ablagerungen ergeben. Dadurch kann, wie bereits

erwähnt, plötzlich mehr Stahl durch das Tauchrohr fließen und es kommt zu einer Auslenkung des Gießspiegels, auf welche die Stopfenregelung reagiert. Wie beim vorigen Bild setzt sich das Tauchrohr zum Ende hin soweit zu, dass die Gießgeschwindigkeit stark reduziert wird und der Stopfen schließlich völlig öffnet. Da die Gießgeschwindigkeit nicht unendlich weit gedrosselt und die erforderliche Gießspiegelhöhe nicht gehalten werden kann, ist ein weiteres Vergießen der Schmelze nicht mehr möglich.

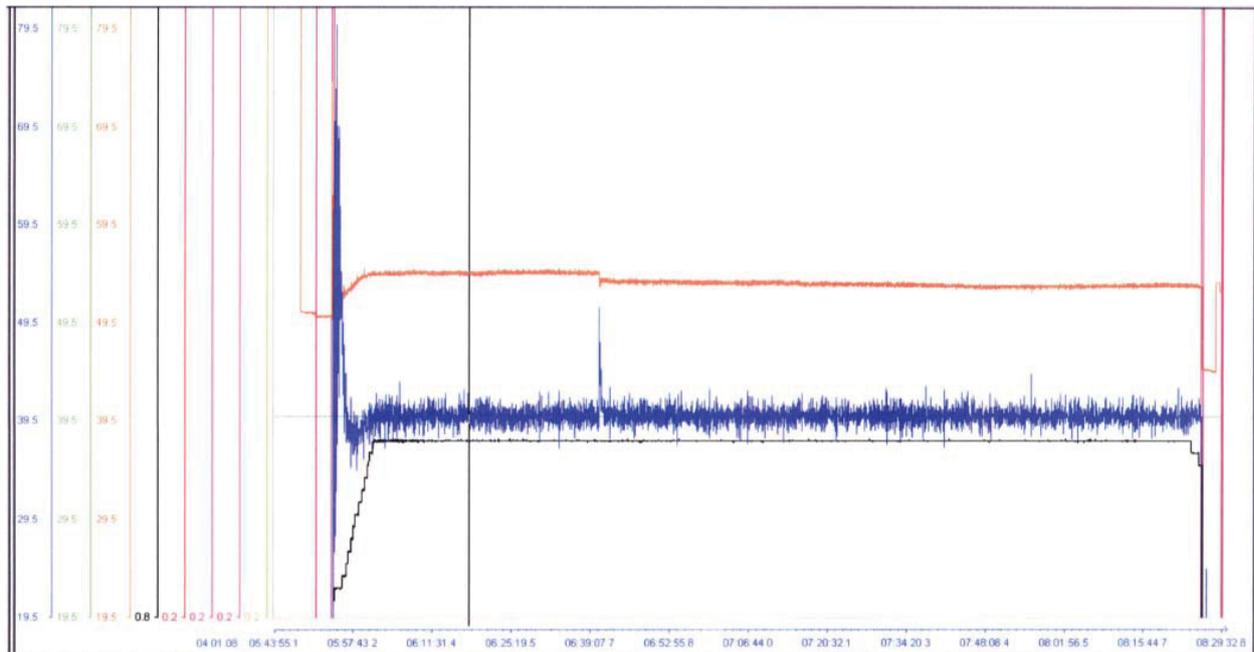


Abbildung 3-4: Plötzliches Absenken des Stopfens (Typ III)

In **Abbildung 3-4**, plötzliches Absenken des Stopfens, ist ein starker Ausschlag des Gießspiegels, einhergehend mit einer Änderung der Stopfenposition zu sehen. Dies ist im Weiteren als Typ III definiert. Der Stopfen senkt sich als Reaktion auf eine Auslenkung des Gießspiegels. Da sich der Stopfen danach nicht in die vorherige Position zurückbewegt, kann davon ausgegangen werden, dass sich etwas vom Stopfen gelöst hat und dadurch eine Gießspiegelschwankung hervorgerufen wurde. Da folglich ein vergrößerter Durchflussquerschnitt entsteht, muss der Stopfen eine tiefere Position einnehmen, um die übliche Durchflussrate wieder herzustellen. Denkbare Gründe für diese Reaktion können auch im Bereich der Stopfenmechanik (Stopfenzylinder, Hebelsystem) liegen. Eine weitere Möglichkeit für die Auslenkung des Gießspiegels wäre ein Absenken des ETA-Sitzes um wenige Millimeter. Dadurch wird ebenso der Querschnitt vergrößert und es kann plötzlich eine höhere Stahlmenge durch das Tauchrohr fließen, was die Stopfenregelung wieder ausgleichen muss.

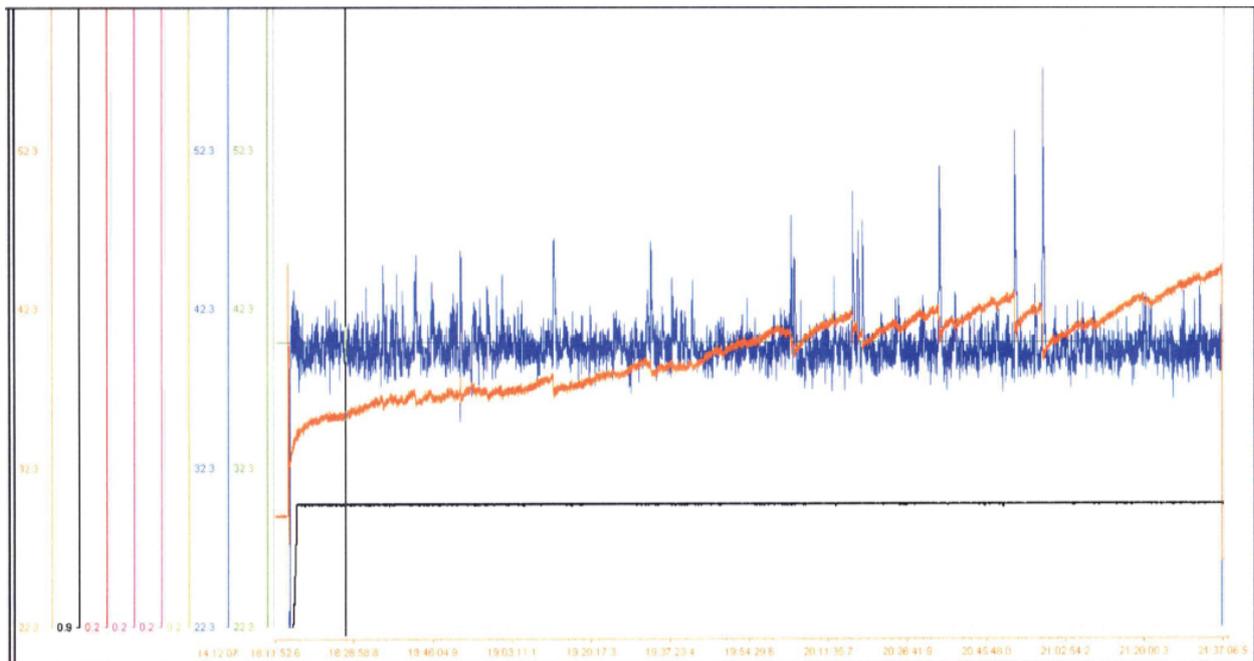


Abbildung 3-5: Gießspiegelschwankungen, ETA mit 45 mm Innendurchmesser (Typ IV)

Bei VASD werden bestimmte Güten durch Eintauchausgüsse mit einem Innendurchmesser von 45 mm anstelle der üblichen 35 mm ETA vergossen. Auffallend ist, dass vor allem bei diesen Güten eine hohe Streubreite der Gießspiegelverläufe und starke Gießspiegelschwankungen, wie in **Abbildung 3-5** ersichtlich, auftreten. Durch den größeren Innendurchmesser dieses ETA ergibt sich ein größerer Durchflussquerschnitt als bei einem ETA mit kleinerer Bohrung. Vor allem der Ringspalt unter dem Stopfen, oberhalb des ETA-Sitzes, vergrößert sich dadurch erheblich. Folglich reagiert der Gießspiegel bei einer Änderung der Stopfenposition umso sensibler. Bei diesem Bild sind zusätzlich typische Anzeichen von Clogging durch das Ansteigen der Stopfenposition deutlich zu sehen.

Um die Gießspiegelschwankungen genauer charakterisieren zu können, werden die entsprechenden Daten erfasst und ausgewertet. Aufzeichnungen von Chargen, bei welchen Unstetigkeiten im Gießverlauf aufgetreten sind, werden herausgefiltert und die Schwankungen vermessen. Dabei werden jeweils das Maximum und Minimum (siehe **Abbildung 3-6**) der Stopfenposition und des Gießspiegels mit der jeweiligen Zeit bestimmt und der Gradient $(\max - \min) / \Delta t$, also $\Delta s / \Delta t$ berechnet.

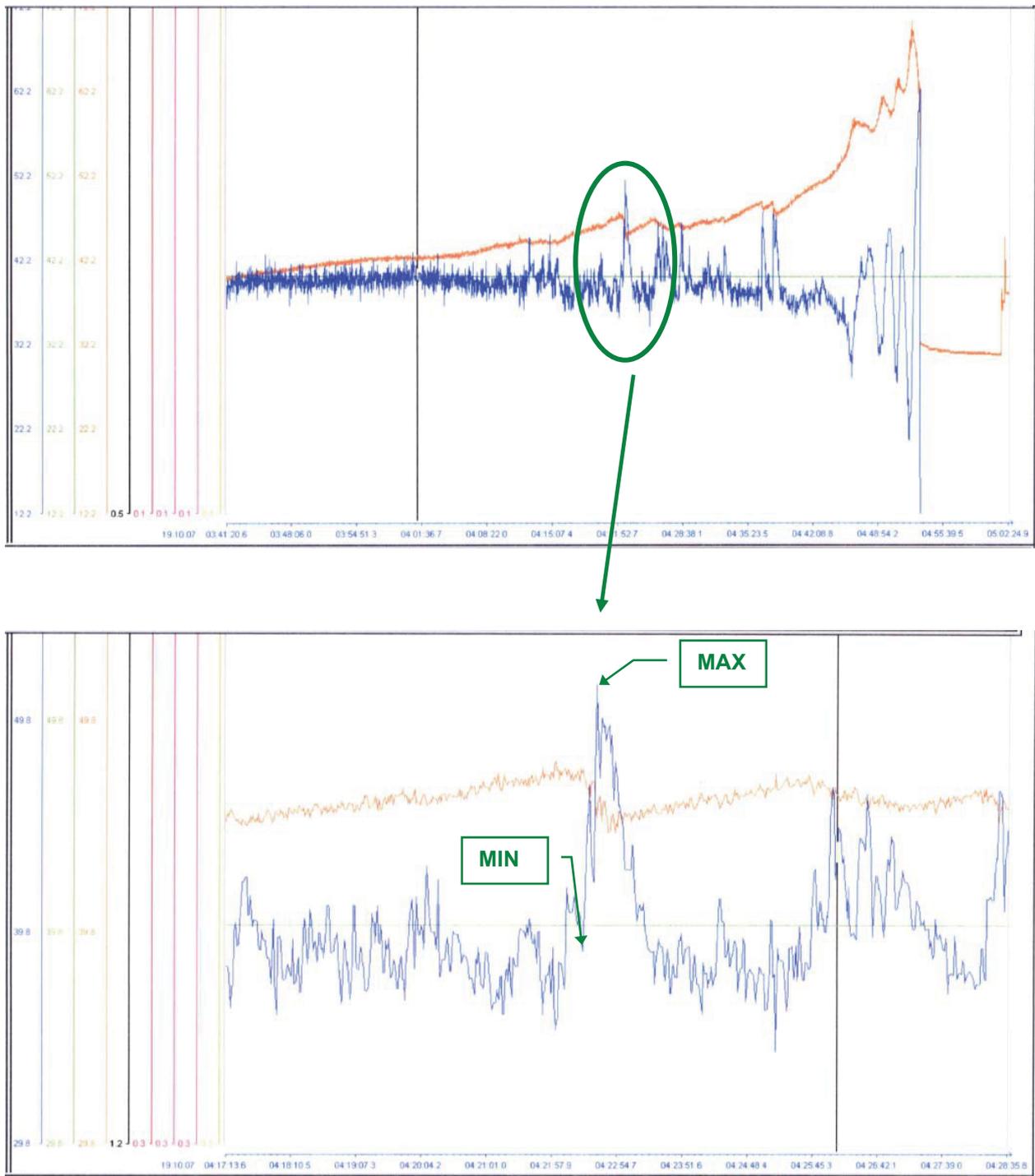


Abbildung 3-6: Vermessen von Gießspiegelschwankungen

Tabelle 3-I: Erfassen der Daten und Bildung der Gradienten

Datum	v [m/min]	GSP MAX [%]	GSP MIN [%]	Δ t1 [s]	Stopfen MAX [%]	Stopfen MIN [%]	Δ t2 [s]	Δ GSP [mm]	Δ Stopfen [mm]	Δ GSP / Δ t1 [mm/s]	Δ Stopfen / Δ t2 [mm/s]
21.12.2007	1,50	65,80	30,10	34,00	53,50	43,20	37	48,20	16,48	1,42	0,45
25.12.2007	1,50	37,65	16,94	56,00	66,27	55,30	61	27,96	17,55	0,50	0,29
25.12.2007	1,50	55,00	32,50	23,00	66,27	63,93	51	30,38	3,74	1,32	0,07
26.12.2007	1,50	59,56	39,34	2,00	42,50	40,57	3	27,30	3,09	13,65	1,03
26.12.2007	1,50	79,76	55,00	2,00	40,57	37,90	2	33,43	4,27	16,71	2,14
26.12.2007	1,50	81,78	77,33	2,00	37,68	30,59	2	6,01	11,34	3,00	5,67
26.12.2007	1,50	57,45	38,90	1,00	50,90	48,30	1	25,04	4,16	25,04	4,16
10.01.2008	1,60	64,00	38,40	4,00	45,60	42,00	4	34,56	5,76	8,64	1,44
13.01.2008	1,60	56,70	38,40	4,00	56,70	53,90	9	24,71	4,48	6,18	0,50
18.01.2008	1,50	68,40	28,30	16,00	51,30	35,00	48	54,14	26,08	3,38	0,54

Diese Daten bilden die Grundlage für nachstehende Diagramme. Der Gradient des Gießspiegels wird über dem Gradienten des Stopfens aufgetragen. An Hand eines Beispiels soll die Berechnung der Gradienten veranschaulicht werden:

$$\frac{"MAX"[mm] - "MIN"[mm]}{\Delta t[s]} = \underline{\underline{Gradient}} \quad (17)$$

$$\frac{91,67[mm] - 54,77[mm]}{3[s]} = \frac{36,90[mm]}{3[s]} = \underline{\underline{12,30\left[\frac{mm}{s}\right]}} \quad (18)$$

Die Umrechnung der Einheit „%“ in „mm“ erfolgt mit dem für die betreffende Stranggießanlage gültigen Parameter. Die Gradienten stellen somit grundsätzlich Geschwindigkeiten dar. Für die unterschiedlichen Gießgeschwindigkeiten wird ein Diagramm erstellt. Dabei muss auch zwischen den einzelnen Eintauchausgüssen unterschieden werden. In wie weit sich ein größerer Innendurchmesser des ETAs auf die Gradienten auswirkt, ist in **Abbildung 3-10** deutlich erkennbar. In den Diagrammen ist durchwegs zu sehen, dass ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen den beiden Gradienten besteht. Dieser ist auf die Regelcharakteristik des Systems zurückzuführen. Je höher die Auslenkung des Gießspiegels, desto ausgeprägter die Reaktion der Stopfenregelung. Somit kann die Intensität der Reaktion der Stopfenregelung auf eine Gießspiegelschwankung aus den Diagrammen abgelesen werden. Für die umgekehrte Betrachtungsweise, wie sie für den Fall des plötzlichen Absenkens des Stopfens (siehe **Abbildung 3-4**) gilt, ist die Auslenkung des Gießspiegels ersichtlich.

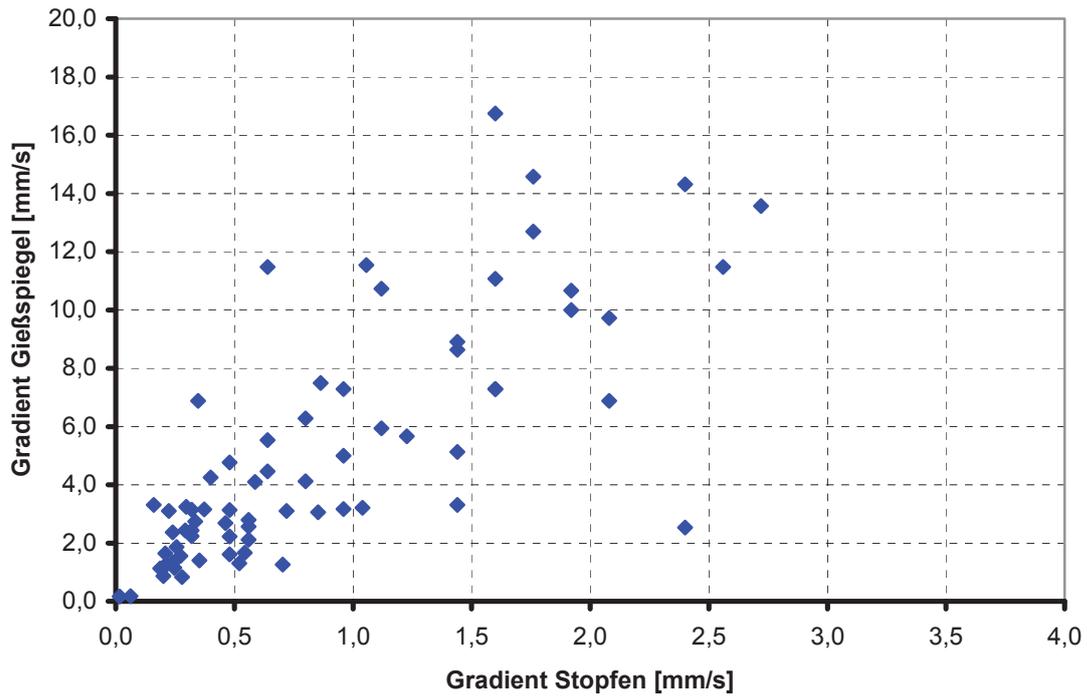


Abbildung 3-7: Gießgeschwindigkeit 1,6 m/min, ETA mit 35 mm Innendurchmesser

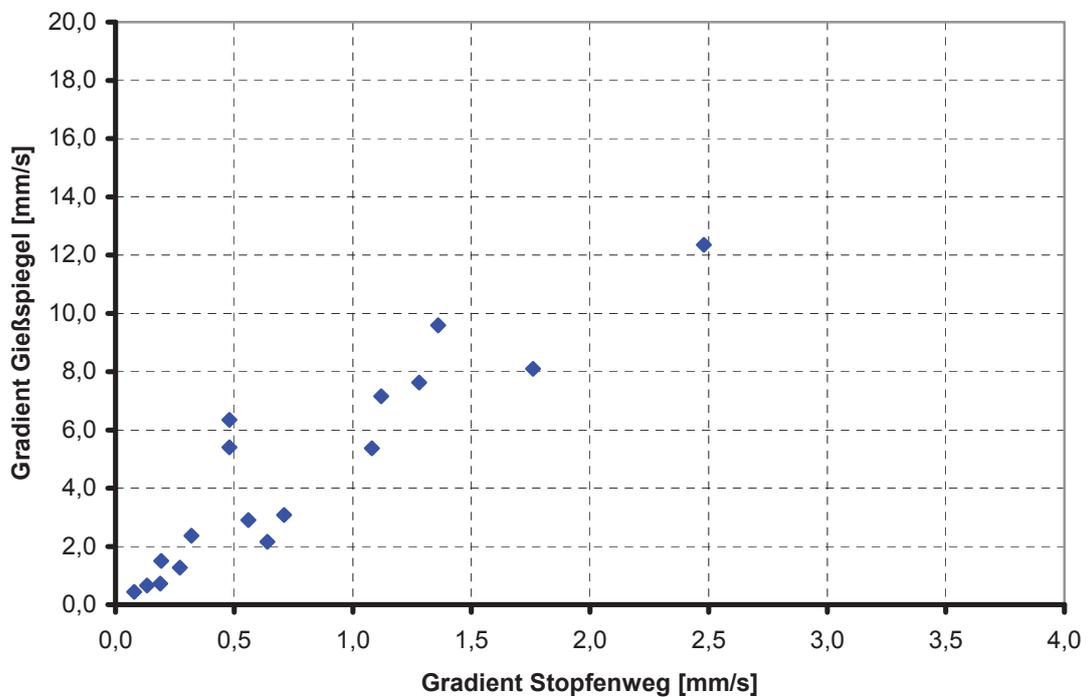


Abbildung 3-8: Gießgeschwindigkeit 1,5 m/min, ETA mit 35 mm Innendurchmesser

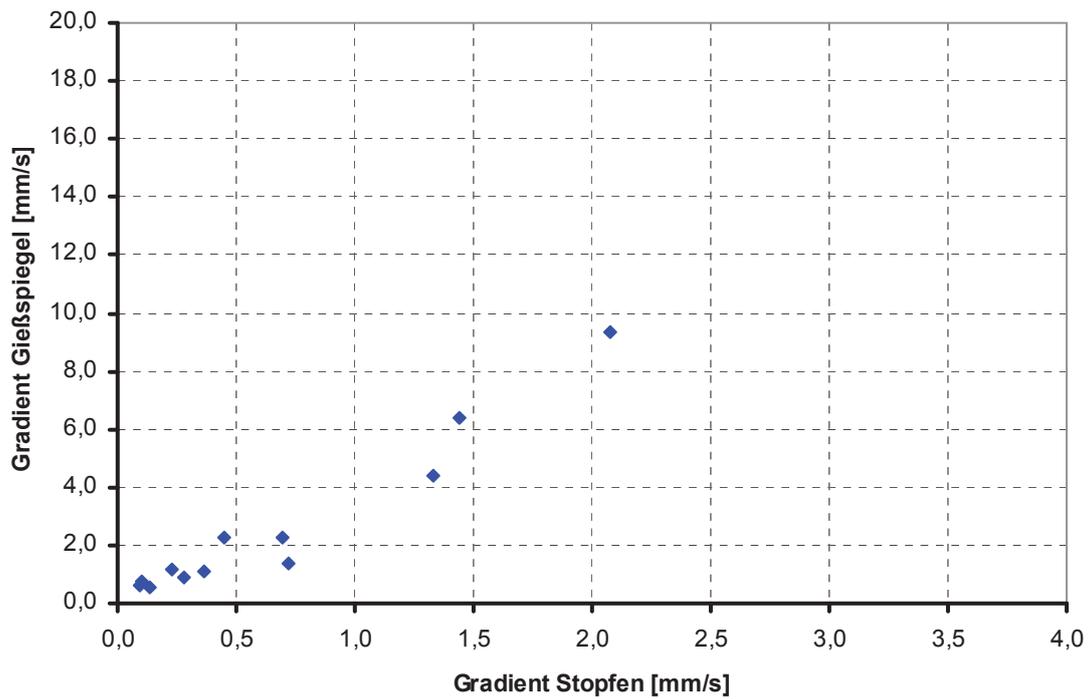


Abbildung 3-9: Gießgeschwindigkeit 1,2 m/min, ETA mit 35 mm Innendurchmesser

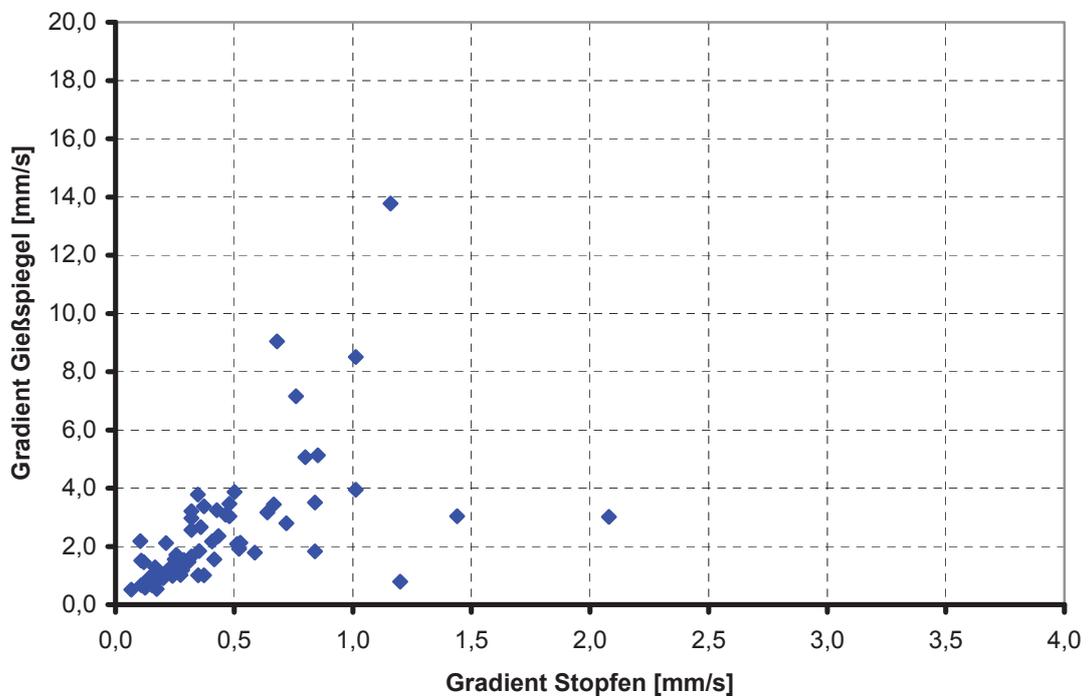


Abbildung 3-10: Gießgeschwindigkeit 1,2 m/min, ETA mit 45 mm Innendurchmesser

Die Gießgeschwindigkeit nimmt von **Abbildung 3-7** bis hin zu **Abbildung 3-9** ab. Es ist deutlich erkennbar, dass mit zunehmender Auslenkung des Gießspiegels der Stopfen einen größeren Weg zurücklegen muss, um die Schwankung auszugleichen. Vergleicht man die Lage der Datenpunkte, so ist ersichtlich, dass sich die Gradienten des Gießspiegels mit abnehmender Gießgeschwindigkeit zu niedrigeren Werten verschieben. Je niedriger die Gießgeschwindigkeit, desto stärker muss die Stopfenregelung eingreifen, um eine Gießspiegelschwankung auszugleichen. Die übliche Gießgeschwindigkeit der Güten, welche mittels des 45 mm ETA vergossen werden, beträgt 1,20 m/min. Da jedoch auch andere Qualitäten mit derselben Gießgeschwindigkeit vergossen werden, können Vergleiche anhand der Messdaten zwischen den beiden Ausgüssen unterschiedlichen Innendurchmessers angestellt werden. Wie in **Abbildung 3-10** ersichtlich, reagiert der Stopfen beim 45 mm ETA mit der Änderung der Öffnungsposition um 1 mm auf eine Gießspiegelschwankung von ~6,5 mm, während für eine solche Gießspiegelschwankung beim 35 mm ETA (siehe **Abbildung 3-9**) eine Änderung der Stopfenposition von 1,6 mm erforderlich ist. Der umgekehrten Betrachtungsweise folgt, dass eine Änderung der Stopfenposition um 1 mm eine Gießspiegelschwankung von ~6,5 mm beim 45 mm ETA und von ~4 mm beim 35 mm ETA nach sich zieht. Die Erklärung für die sensiblere Reaktion beim größeren ETA ist, wie bereits erwähnt, darin begründet, dass sich durch den größeren Querschnitt ein größerer Ringspalt unter dem Stopfen ausbildet. Infolge dessen ergibt sich, wie in **Abbildung 3-11** angedeutet, auch ein größerer Durchflussquerschnitt.

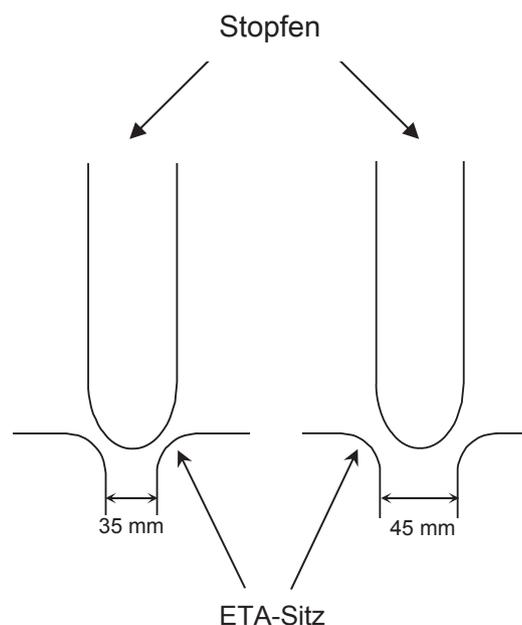


Abbildung 3-11: Einfluss der ETA-Geometrie auf den Durchflussquerschnitt

3.3 Untersuchung von ausgewählten Proben

3.3.1 Auswahl der Proben

Um die Auswirkungen von Gießspiegelschwankungen festzustellen, wurden Vorblöcke, bei welchen starke Gießspiegelschwankungen aufgetreten sind, gesammelt. Es handelt sich dabei um verschiedenste Stahlsorten, die mit A-G bezeichnet werden, welche allesamt aluminiumberuhigt und calciumbehandelt sind. Insgesamt beläuft sich die Anzahl der Proben auf 13 Vorblöcke im 230 mm Rundformat (Blooms) in diversen Längen und 5 Knüppel mit 130 mm Quadratquerschnitt. **Tabelle 3-II** zeigt eine Auflistung der ausgewählten Proben. Die Vorblöcke werden mit B1 bis B13 betitelt, die Knüppel werden mit K1 bis K5 bezeichnet. Weiters enthält die Tabelle den Typ der Gießspiegelschwankung, wie in **Kapitel 3.2.2** definiert, die maximale Auslenkung des Gießspiegels, die Stahlsorte, die weitere Verfahrenslinie, Anzahl der geprüften und Anzahl der fehlerhaften Probenkörper, sowie die weitere Bezeichnung der angefertigten Schliffe für die metallographische Untersuchung.

Tabelle 3-II: Auflistung der Proben

Probe	Typ der Gießspiegelschwankung	max. Auslenkung [mm]	Stahlsorte	weitere Verfahrenslinie	Anzahl der Probenkörper	fehlerhafte Probenkörper	weitere Bezeichnung/ Schliff
B1	Typ I	52,11	A	R	6	6	B1-1 bis B1-7
B2	Typ III	32,54	B	R	14	2	-
B3	Typ III	14,58	C	R	12	3	B3-1
B4	Typ I	54,14	D	R	12	6	B4-1, B4-2
B5	Typ I	24,3	D	R	8	0	-
B6	Typ II	12,69	D	R	14	2	-
B7	Typ I	27,14	D	R	8	1	B7-1
B8	Typ II	25,83	D	R	8	4	B8-1 bis B8-4
B9	Typ I	42,53	D	R	10	1	-
B10	Typ I	23,63	D	R	14	3	B10-1 bis B10-5
B11	Typ II	24,98	E	R	12	0	-
B12	Typ I	63,32	F	R	8	0	-
B13	Typ I	14,72	F	R	12	1	-
K1/2	Typ I	48,2	G	S	72	0	-
K2/1	Typ I	35,2	G	S	59	1	K2/1-M
K3/2	Typ II	34,56	C	S	75	1	K3/2-E
K4/2	Typ III	27,54	C	S	78	1	K4/2-M
K5/2	Typ III	24,92	C	S	77	1	K5/2-M

Eine Auflistung der Analysen der Stahlsorten A bis G erfolgt in **Tabelle 3-III**.

Tabelle 3-III: Analysen der untersuchten Stahlsorten

Bezeichnung	C [%]		Si [%]		Mn [%]		Cr [%]		Mo [%]		S [%]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
A	0,350	0,370	0,050	0,080	0,800	0,870	1,050	1,100	-	0,020	-	0,015
B	0,250	0,290	0,250	0,350	0,750	0,850	1,300	1,450	0,680	0,750		0,008
C	0,350	0,390	0,150	0,300	0,700	0,800	1,000	1,100	-	0,100	0,025	0,035
D	0,290	0,320	0,150	0,300	1,290	1,450	0,210	0,290	-	0,050	-	0,020
E	-	0,030	-	0,025	0,250	0,300	-	0,100	-	0,02	-	0,015
F	0,130	0,160	-	0,100	0,600	0,750	0,800	0,900	-	0,050	0,010	0,020
G	0,170	0,190	-	0,060	0,800	0,900	0,110	0,150	-	0,030	-	0,015

Die Aufzeichnungen der zugehörigen Gießspiegelverläufe wurden erfasst und nach demselben Schema wie im vorigen Kapitel ausgewertet. **Abbildung 3-12** zeigt das Diagramm der Gradienten des Gießspiegelverlaufs über den Gradienten des Stopfens der Proben

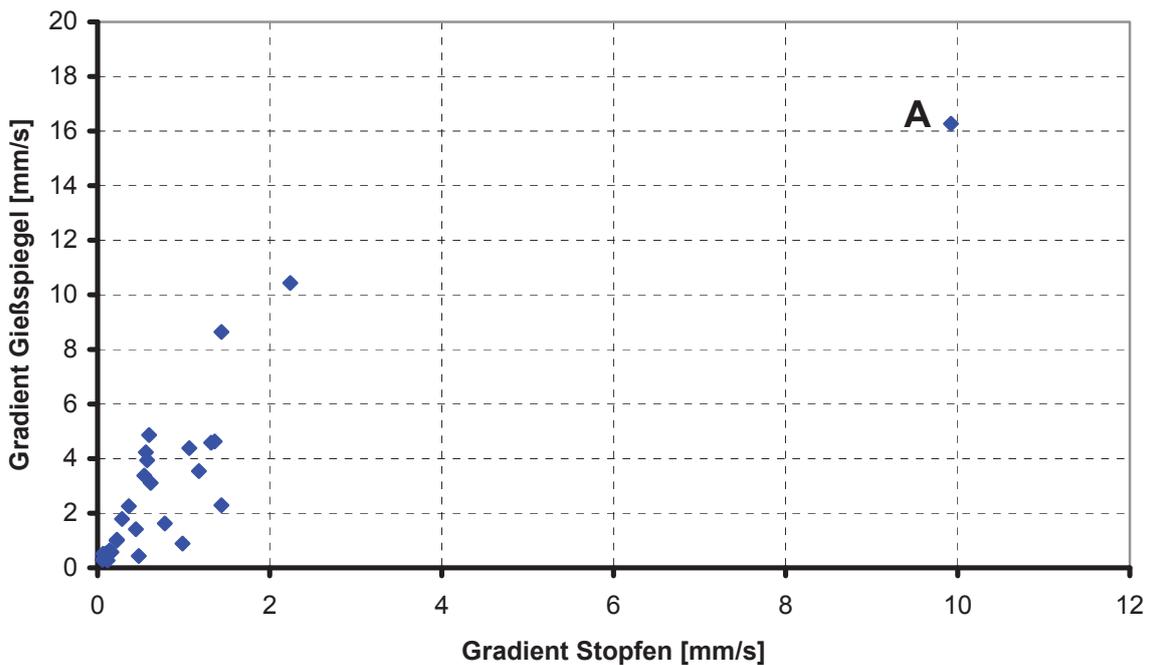


Abbildung 3-12: Zusammenhang Gradienten Gießspiegel – Gradienten Stopfen

Ähnlich der vorigen Diagramme ergibt sich auch hier wieder ein annähernd linearer Zusammenhang. Insbesondere wurden Proben, bei welchen einzelne hohe Gießspiegelschwankungen aufgetreten sind, separiert. Der Punkt A spiegelt eine beträchtliche Auslenkung des Gießspiegels wieder. Die Gießspiegelaufzeichnung für den Punkt A ist **Abbildung 3-13** abgebildet.

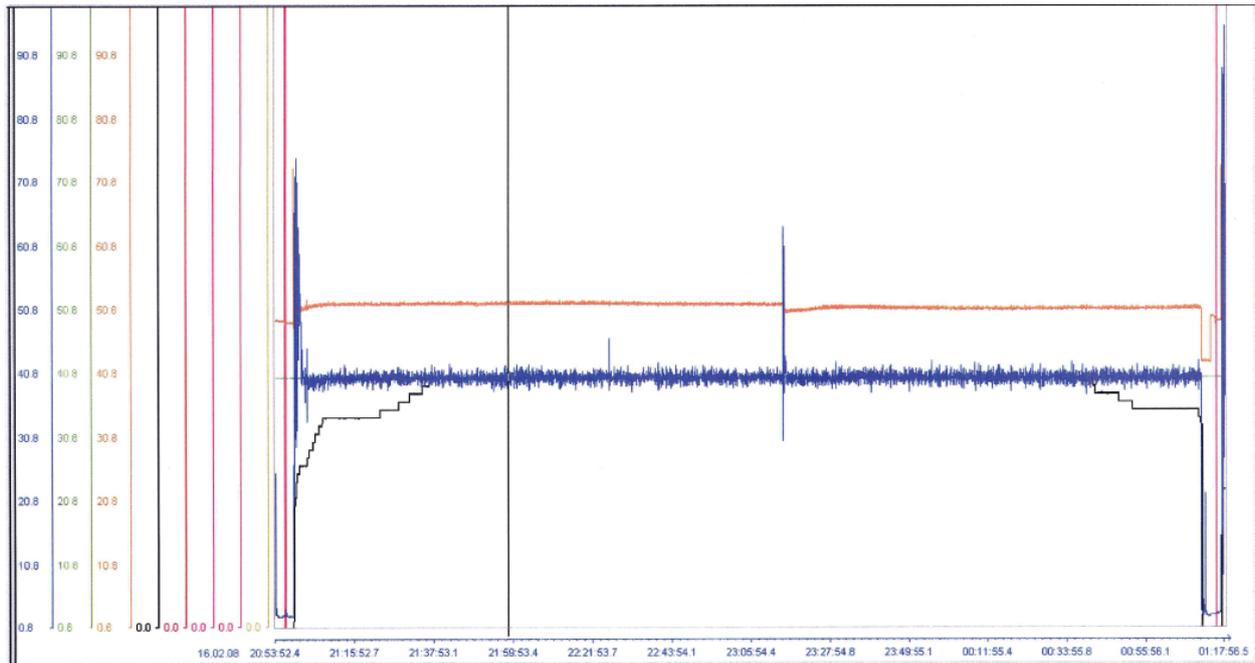


Abbildung 3-13: Gießspiegelverlauf des Datenpunktes „A“ in Abbildung 3-12

Diese Gießspiegelschwankung ist dem Typ III zuzuordnen und der zugehörige Vorblock ist in **Tabelle 3-II** mit B2 benannt. Der Gradient des Gießspiegels dazu errechnet sich nach $\Delta s / \Delta t$ und ergibt demnach einen Wert von 16,27 mm/s. Es handelt sich um eine beträchtliche Auslenkung des Gießspiegels von 32,5 mm. Ob eine solche Auslenkung Einfluss auf die Produktqualität hat, gilt es zu zeigen. Dazu wurden die separierten Proben auf ihren makroskopischen Reinheitsgrad untersucht.

3.3.2 Vorbereitung der Proben und Prüfung auf den makroskopischen Reinheitsgrad

Zur Überprüfung des makroskopischen Reinheitsgrades der Proben wird die Ultraschalltechnik angewendet. Die Möglichkeit dieser Prüfung besteht sowohl bei voestalpine Tubulars GmbH & Co KG in Kindberg, als auch bei Stahl Judenburg GmbH. In beiden Unternehmen kommt die Ultraschalltechnik als standardmäßige Überprüfung der Produkte im Warenausgang zum Einsatz.

Die Bestimmung des makroskopischen Reinheitsgrades der Rundformatproben erfolgt bei voestalpine Tubulars GmbH & Co KG in Kindberg. Dazu werden die ausgewählten Vorböcke mittels einer Hartmetallsäge auf eine Einsatzblocklänge von 1600 mm geteilt und in einem Drehherdofen auf eine Verformungstemperatur von 1325°C erwärmt. Danach werden diese Blöcke im Schrägwalzwerk in einem Walzvorgang über eine entgegengehaltene Dornstange auf Hohlblöcke umgeformt. In der Folge wird der durchlochte Hohlblock mittels einer

Kümpelpresse auf einer Länge von ca. 80 mm auf das Dornstangenende aufgespresst und anschließend auf der Stoßbank zum so genannten Mutterrohr umgeformt. Dazu wird der Hohlblock durch Abstoßen der angetriebenen Dornstange durch nicht angetriebene Dreiwalzen-Gerüste gestoßen und somit gestreckt. Die Dornstange wird aus dem Mutterrohr ausgezogen und die Rohrluppen werden in einem Nachwärmofen auf Warmverformungstemperatur für die anschließende Streckreduzierung gebracht. Um eine gleichmäßige Erwärmung zu erzielen, werden die Rohrluppen während des Ofendurchlaufs ständig gedreht. Nach der Entzunderung erfolgt die Einstellung auf Endgeometrie in einem 28-gerüstigen Streckreduzierwalzwerk. Die zu prüfenden Rohre besitzen einen Durchmesser von 101,6 mm mit einer Wandstärke von 8,84 mm und werden mittels Ultraschall auf Ungängen überprüft. VA Tubulars Kindberg verwendet dazu auf einer automatisierten Anlage der Firma Krautkrämer das Impuls-Echo Verfahren mit Wasser als Ankopplungsmedium. Da die Rohrmaße über der prüfbaren Maximallänge liegen, werden sie in zwei Hälften mit der jeweiligen Bezeichnung „E“ und „R“ geteilt. **Abbildung 3-14** zeigt den Weg der Herstellung vom Bloom zu den Probenstücken für die Ultraschallprüfung, sowie deren Bezeichnung und Einteilung.

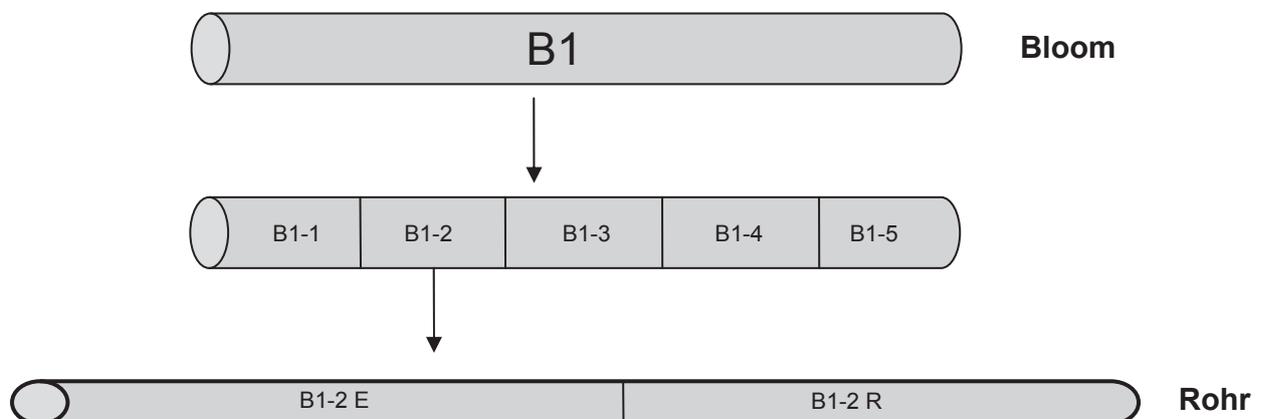


Abbildung 3-14: Herstellung der zu prüfenden Rohre

Jeder Vorblock der Stranggießanlage CC3 wird zur Möglichkeit einer Rückverfolgung gestempelt. Die Chargennummer, die Linie der Stranggießanlage, an welcher der betreffende Bloom vergossen wurde, und die Produktnummer können dabei abgelesen werden. Somit ist eine Zuordnung der Probenstücke zu den Gießspiegelschwankungen möglich.

Bei der Ultraschallprüfung kommen 16 Längsfehlerprüfköpfe mit 12,7 mm Durchmesser und einer Frequenz von 4 MHz zum Einsatz. Der Einschallwinkel im Wasser beträgt dabei 19° und der Transversalwinkel im Rohr 45°.

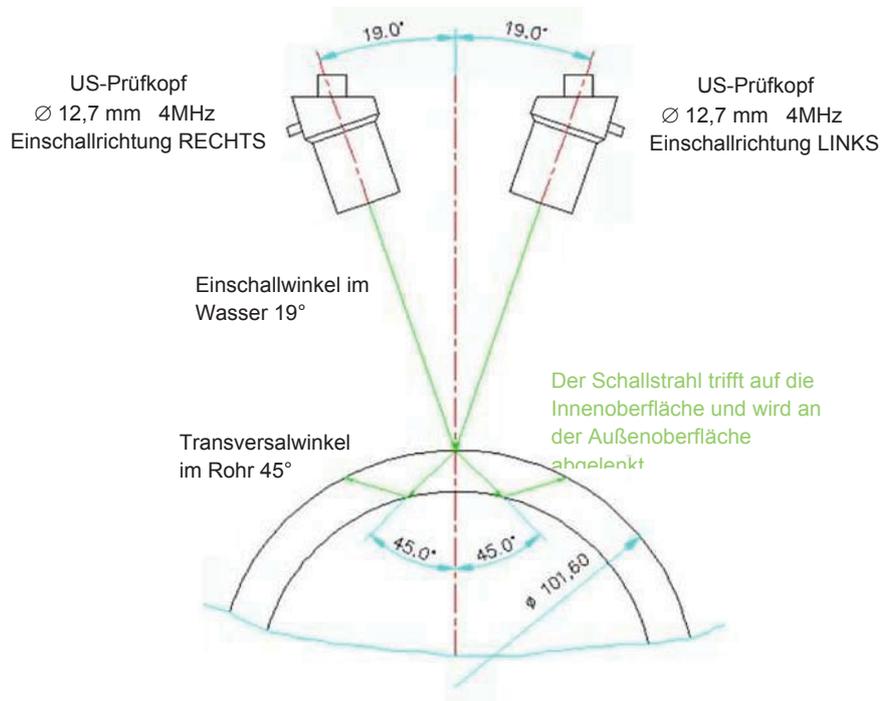


Abbildung 3-15: Anordnung der Prüfköpfe der Ultraschallprüfanlage

Weiters werden 4 Wanddickenprüfköpfe mit einem Durchmesser von jeweils 10 mm eingesetzt. Bei der automatisierten Ultraschallprüfanlage wurden für die einzelnen Fehler Grenzwerte definiert, die wie folgt lauten:

- Längsfehler – Innenfehler: 40%
- Längsfehler – Außenfehler: 60%
- Querfehler – Innenfehler: 60%
- Querfehler – Außenfehler: 60%
- Dopplung: 50 %

Überschreiten die Fehlersignale die definierten Grenzwerte, so wird der betreffende Rohrabschnitt markiert und entnommen. Diese Prozedur trifft jedoch nur auf Prüfungen von Versuchsstücken zu. Üblicherweise wird das fehlerhafte Rohrstück abgetrennt und verschrottet. Bei Innenfehlern, längs und quer, handelt es sich zumeist um Risse oder kleinere Ungängen. Querfehler-Außenfehler sind zumeist auf Fehler in der Herstellung der Probenkörper zurückzuführen und sind somit im Rahmen dieser Arbeit nicht von Interesse.

Da die Proben vor der Ultraschallprüfung nicht gerichtet und folglich nicht entzundert wurden, stellen die Anzeigen der Außenfehler keine eindeutigen, reproduzierbaren Fehler dar. Dopplungen werden durchwegs durch innenliegende Makroeingüsse erzeugt. Mittels Tauchtechnik werden die selektierten Proben nochmals händisch untersucht und die Größe und Lage der detektierten Ungängen analysiert. Die dazu verwendeten Utensilien sind in **Abbildung 3-16** dargestellt.



Abbildung 3-16: Einrichtung der Tauchtechnikprüfung

Die ausgewählten Proben im 130 mm Quadratformat werden bei Stahl Judenburg GmbH zu Stäben umgeformt. Vorblöcke aus der Stranggießanlage CC3 werden im nachgeschalteten Hubbalkenofen eingesetzt und zu Knüppeln mit 130 mm Quadratquerschnitt verformt. Diese Knüppel gelangen zu Stahl Judenburg und werden dort zu Stäben weiterverarbeitet. Dazu werden die Knüppel mit einer Trennschleifanlage auf eine Einsatzlänge von 3800 mm abgelängt und in einen erdgasbefeuerten Hubherdofen eingesetzt. Die Verweilzeit im Ofen beträgt annähernd 85 Minuten. Danach durchlaufen die Knüppel mit 1130 °C–1150 °C Walzanfangstemperatur eine 13-gerüstige Walzstraße, wo sie zu Stabstahl mit 27,2 mm Durchmesser umgeformt werden. In der Folge kühlen die Walzadern auf einem Rechenkühlbett ab und werden anschließend auf ca. 6000 mm abgelängt. Danach erfolgt ein

Richten der Stäbe auf einer Mehrwalzenrichtanlage und das Schalen auf einer Schumagschällinie „PM1“ auf 26 mm Durchmesser. Mittels einer Zweiwalzenrichtanlage werden die Stäbe gerichtet und gelangen zur Prüflinie. In **Abbildung 3-17** ist die Herstellung der Stäbe und die Bezeichnung der Knüppel exemplarisch dargestellt.

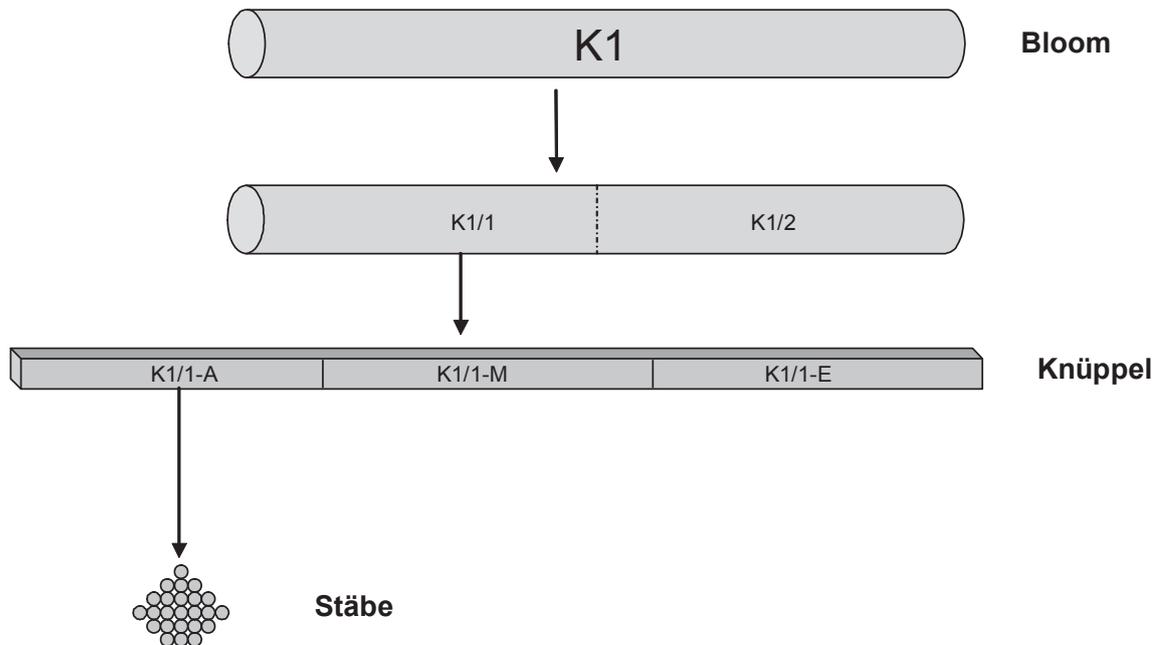


Abbildung 3-17: Herstellung der zu prüfenden Stäbe

In der Prüflinie wird mit einem Circograph auf Oberflächenlängsfehler, einem Defectomat auf Oberflächenquerfehler und mit einem Ultraschallprüfgerät mittels des Impuls-Echo Verfahrens und Wasser als Ankopplungsmedium auf Innenfehler geprüft. Eine Besonderheit der Ultraschallprüfanlage ist die „Phased Array“-Prüfelektronik. Durch 128 Prüfelemente und entsprechende Ansteuerung wird ein virtuelles bewegtes Schallfeld erzeugt. Auch hier werden detektierte Produktfehler lokalisiert und das betroffene Teilstück entnommen. Wie bei VA Tubulars Kindberg, werden fehlerhafte Stäbe gewöhnlich verschrottet.

Die mittels Ultraschallprüfung detektierten Einschlüsse werden bei VASD mit einem Rasterelektronenmikroskop auf deren Zusammensetzung untersucht. Dabei wird ein Elektronenstrahl auf die Probe gerichtet und es kommt zu Wechselwirkungen mit den Elektronen des Probenkörpers. Zur Abbildung wird das BSE (Backscattered Electrons) – Verfahren verwendet. Hierbei werden die vom Objekt reflektierten Elektronen, welche eine spezifische Energie besitzen, detektiert. Die Intensität des Signals ist von der Ordnungszahl der einzelnen Phasen des Probenkörpers abhängig. Elemente mit höherer Ordnungszahl verstärken diese Intensität, wodurch die betreffenden Bereiche hell erscheinen. Die dunkel

erscheinenden Bereiche beinhalten folglich leichtere Elemente. Um die Zusammensetzung der Einschlüsse zu charakterisieren, kommt die energiedispersive Röntgenstrahlen-Analyse (EDX) zum Einsatz. Damit kann die Elementverteilung in den einzelnen Einschlüssen mittels eines Röntgenspektrums ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im nachfolgenden **Kapitel 3.4** ausführlich protokolliert.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Ergebnisse der Ultraschallprüfung der Nahtlosrohrproben

Von Interesse sind vor allem Innen- und Außenfehler (Längsfehler) und Dopplungen. Zur Auswertung der Ergebnisse wird die Grenzwelle für die Fehlersignale bei 20 % festgelegt (siehe **Abbildung 3-18**). Signale, welche unter diesem Wert liegen, sind dem typischen Grundrauschen zuzuordnen. Dieses ergibt sich aufgrund der Oberflächenrauigkeit der Proben und der Ankopplung des Prüfkopfes. Alle Signale, welche diese Schwelle überschreiten, werden gezählt und tabellarisch erfasst. Somit ergibt sich für jedes Probenstück eine zugeordnete Fehlersignalanzahl. Überschreiten die Signale die vom System definierten 40 % bzw. 60 % (dies ist die Schwelle ab welcher im Normalfall verschrottet wird), so wird der entsprechende Probenabschnitt automatisch markiert. In **Abbildung 3-18** ist exemplarisch die Aufzeichnung des Ultraschallsignalverlaufes für ein gutes Rohr dargestellt. Auf der linken Seite sind jeweils die untersuchten Fehlersignale abzulesen. Die x-Achse beinhaltet die Längeneinheit in Meter. Somit können Fehleranzeigen dem Rohr zugeordnet werden. Es ist ersichtlich, dass lediglich 2 Signale über der Schwelle von 20 % liegen.

Die Vorgehensweise bei der Ultraschallprüfung und deren Ergebnisse werden nun anhand der Probe B8 (siehe **Tabelle 3-II**, grün markierter Bereich) erläutert. In **Abbildung 3-19** sind die Anzeigen der Ultraschallprüfung für ein Probenstück des Vorblockes B8 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass einige Signale die 20%-Schwelle überschreiten. Deren Anzahl wird gezählt und ergibt 11 Anzeigen bei den Längsfehler-Innenfehlern und 8 Überschreitungen der Schwelle bei den Dopplungen. Bei den Dopplungen wird sogar die Schwelle von 50% überschritten. Dieser Probenabschnitt wird markiert und entnommen. Mittels der in **Abbildung 3-16** dargestellten Tauchtechnik Prüfeinheit wird der Abschnitt nochmals händisch nachgeprüft.

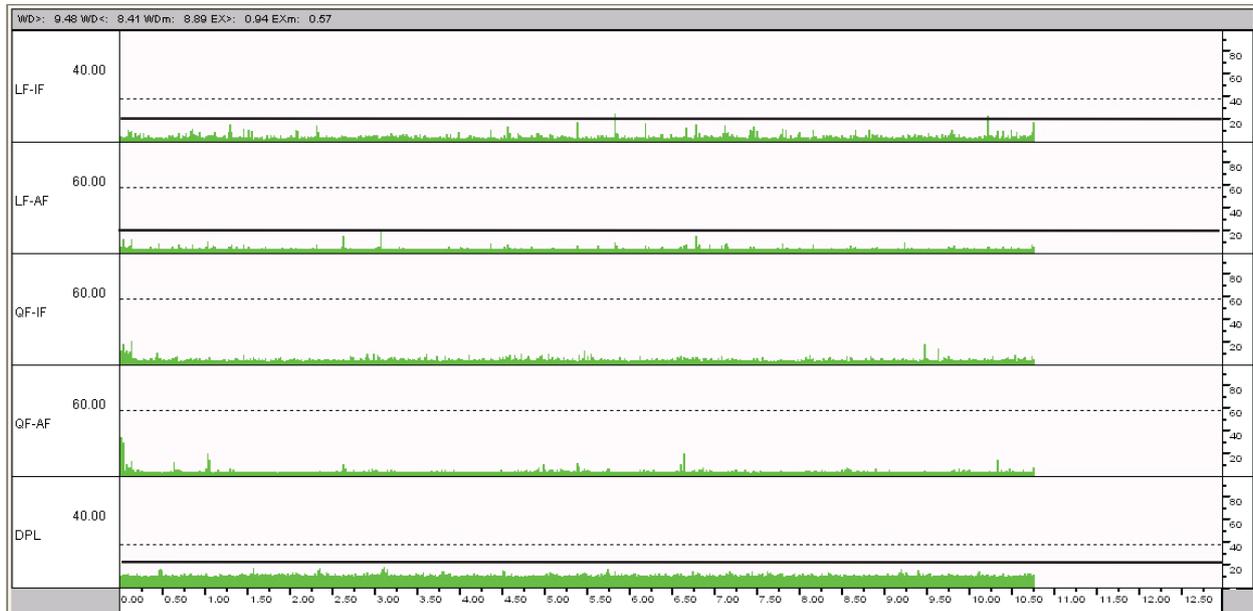


Abbildung 3-18: Aufzeichnung der Ultraschallprüfung eines guten Rohres



Abbildung 3-19: Aufzeichnung der Ultraschallprüfung der Probe B8

Durch diese weiterführende Überprüfung kann die ungefähre Größe und Lage der Ungänge festgestellt werden. In **Abbildung 3-20** ist die Anzeige der Handprüfung dargestellt. Die Signale auf der linken Seite kennzeichnen den Eintritt der Ultraschallwellen in die Probe. Auf der rechten Seite befindet sich das erste Rückwandecho, welches mit 1. RWE bezeichnet wird. An der Innenoberfläche des Rohres werden die Schallwellen reflektiert und es kommt zu einem Echosignal. Das mittlere Signal wird durch die Reflexion der Schallwellen an einer

Ungänze im Probenkörper ausgelöst. Dies wird als Dopplung bezeichnet. Durch die Lage dieses Signals kann an Hand des Abstands von Eintrittssignal und Rückwandecho die Lage der Ungänze in der Probe abgeschätzt werden. In diesem Fall befindet sich der Materialfehler, von der Mitte der Rohrwand aus gesehen, auf der zur Außenoberfläche hingewandten Seite.

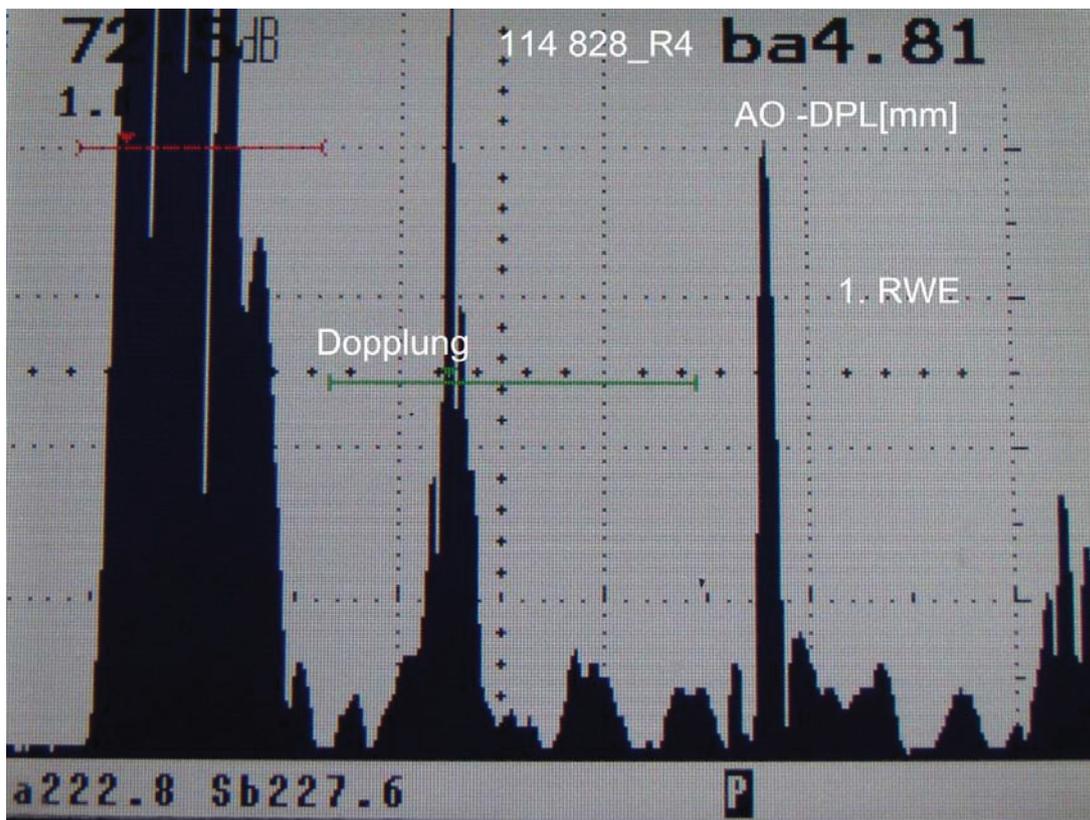


Abbildung 3-20: Anzeige der Tauchtechnikprüfung für „B8-4 R“

Wird der Prüfkopf im Gebiet dieses Signals bewegt, kann die ungefähre Größe der Ungänze bestimmt werden. So lange die Schallwellen durch eine Dopplung reflektiert werden, befindet man sich im Bereich der Ungänze. In **Abbildung 3-21** ist die ausgemessene Größe des Fehlers dargestellt. Es handelt sich um einen Fehler mit einer beträchtlichen Ausdehnung von 2 cm. In weiterer Folge wird ein Schliff angefertigt, und die Ungänze wird mittels Rasterelektronenmikroskop auf Morphologie und Zusammensetzung untersucht. Nach demselben Schema läuft auch die Untersuchung für die übrigen Proben ab.

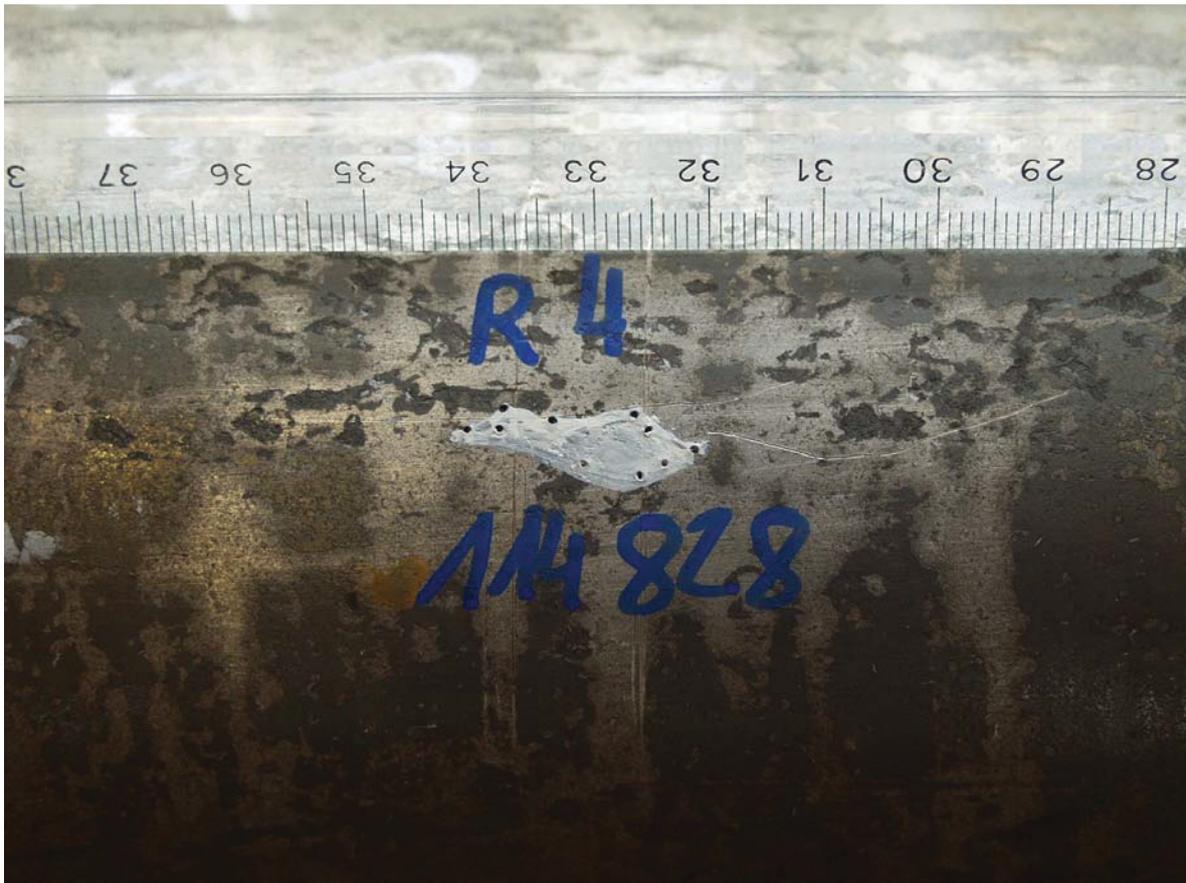


Abbildung 3-21: Darstellung der Größe des detektierten Fehlers der Probe „B8-4 R“

Da insbesondere der Einfluss von instationären Bedingungen beim Stranggießen auf Fehler im Vorblockmaterial von Interesse ist, sollen die Ergebnisse der Ultraschallprüfung mit den Aufzeichnungen der Gießparameter in Beziehung gesetzt werden. Um eine Korrelation der Gießspiegelverläufe, insbesondere den auftretenden Gießspiegelschwankungen, mit den Fehlern zu verifizieren, werden die erfassten Daten in Diagrammform dargestellt. Dazu wurden die Ergebnisse von fünf Vorblöcken der **Tabelle 3-II**, mit der Bezeichnung B2, B4, B9, B10 und B11, ausgewählt. Diese Diagramme enthalten die Verläufe des Gießspiegels, des Stopfens und der Gießgeschwindigkeit des untersuchten Vorblockes. Weiters ist die Anzahl der Fehlersignale für Längsfehler-Innenfehler (LF-IF), Längsfehler-Außenfehler (LF-AF) und Dopplungen (DPL) der Ultraschallprüfung für jedes Probenstück abgebildet. Exemplarisch sollen mit der **Abbildung 3-23** die dargestellten Daten an Hand des Vorblocks B2 erklärt werden. Der in **Abbildung 3-12** markierte Datenpunkt A stellt die Gradienten dieses Gießverlaufs dar. Diagramm a) zeigt den Gießverlauf der gesamten Charge, in Rahmen welcher der Vorblock B2 vergossen wurde. Auf der linken Ordinate ist die Gießspiegelhöhe in Millimeter und die Stopfenposition in Prozent aufgetragen. Die rechte Ordinate zeigt die Gießgeschwindigkeit in Meter pro Minute. Das Protokollierungssystem der

Stranggießanlage CC3 der VASD zeichnet die Daten jeweils für ein Segment auf. Ein Segment entspricht jeweils einem halben Meter. Die Berechnung der Daten für jedes einzelne Segment ist in **Abbildung 3-22** für den Wert des Gießspiegels exemplarisch dargestellt. Es wird der minimale Wert vom maximalen Wert innerhalb des Segmentes subtrahiert und ergibt somit den erfassten Datenpunkt.

Fehler!

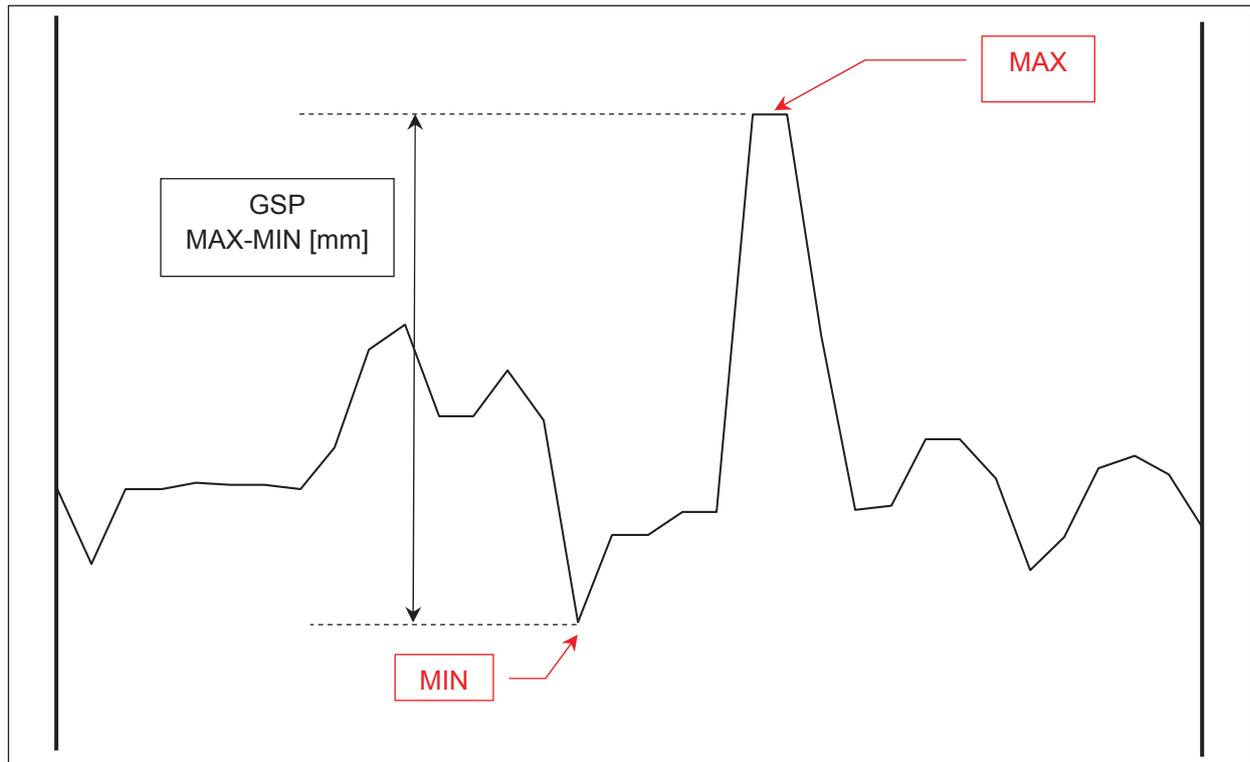


Abbildung 3-22: Berechnung des Gießspiegelwertes für ein Segment

Der grau schattierte Bereich in Diagramm a) der **Abbildung 3-23** markiert die untersuchten Segmente. Diagramm b) zeigt den zugehörigen Gießverlauf der betreffenden Segmente, also des untersuchten Vorblockes. Auf der rechten Ordinate sind Gießspiegel, Stopfenposition und Gießgeschwindigkeit aufgetragen und die linke Ordinate zeigt die Anzahl der Fehlersignale. Wie in **Abbildung 3-19** dargestellt, wird die Anzahl der Fehlersignale, welche die 20% Schwelle überschreiten, für die einzelnen Fehlerarten gezählt und in Säulenform dargestellt. Auf der Abszisse kann das jeweilige Probenstück abgelesen werden und somit ist jedes Fehlersignal dem betreffenden Abschnitt des Vorblockes, in diesem Fall B2-1 E bis B2-7 R, zuordenbar.

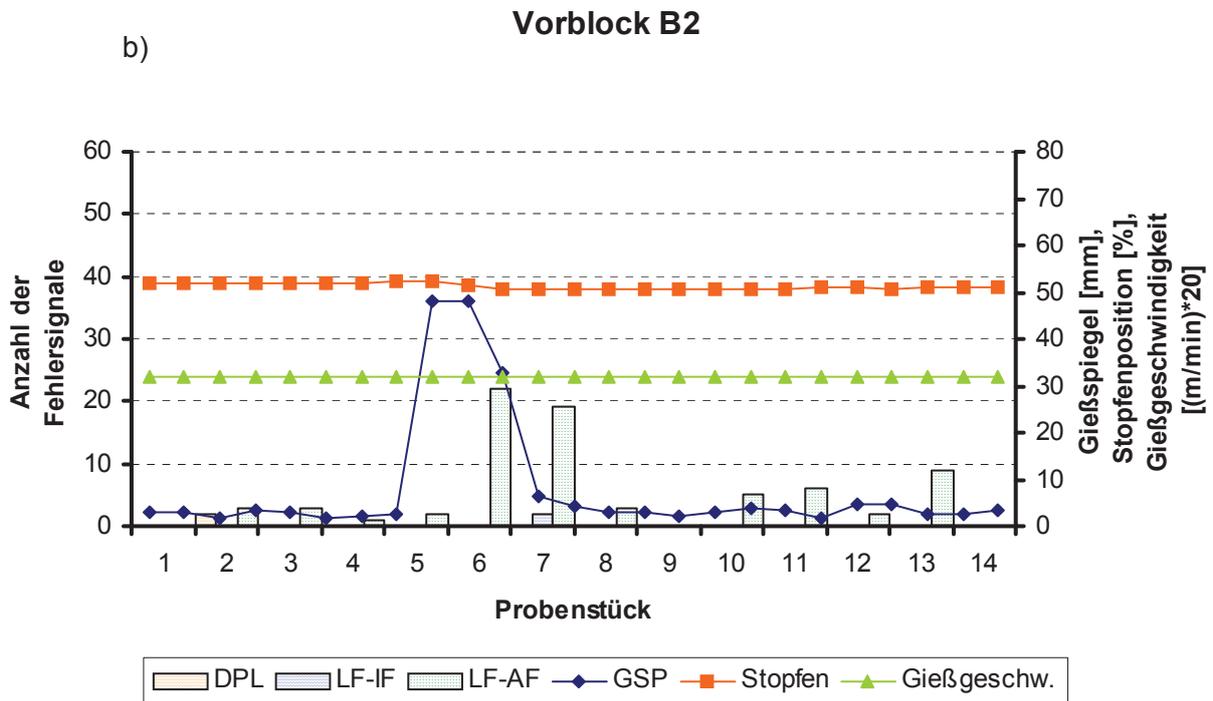
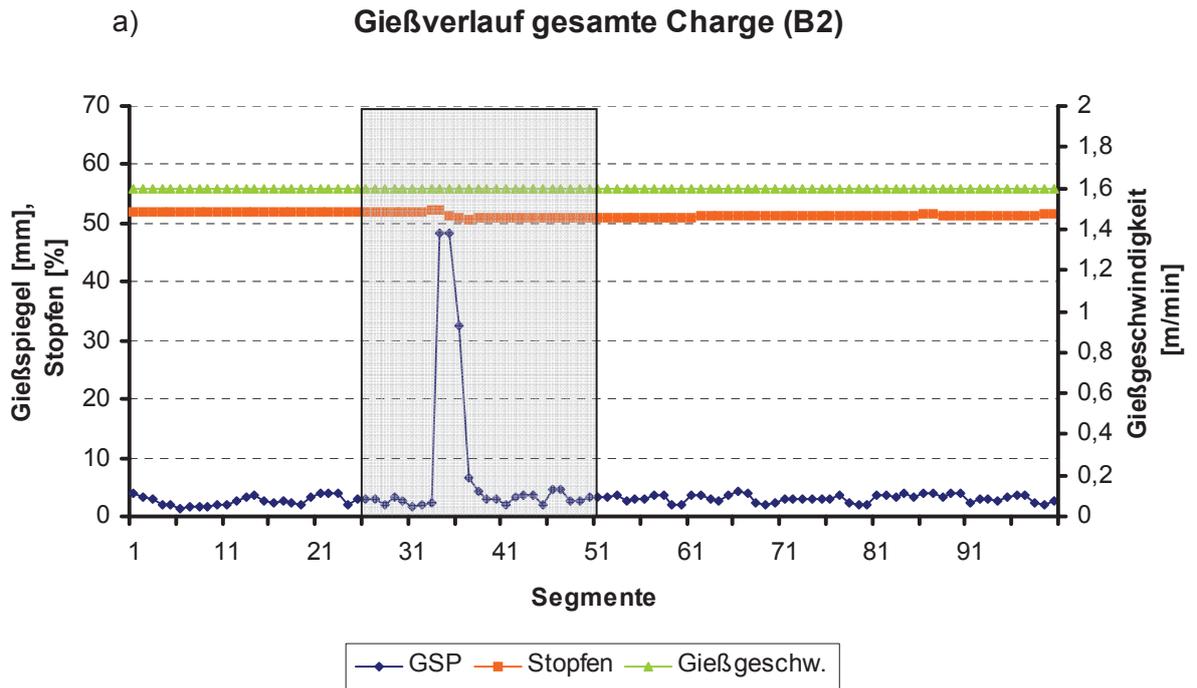


Abbildung 3-23: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Anzahl der Fehlersignale für die untersuchte Probe B2

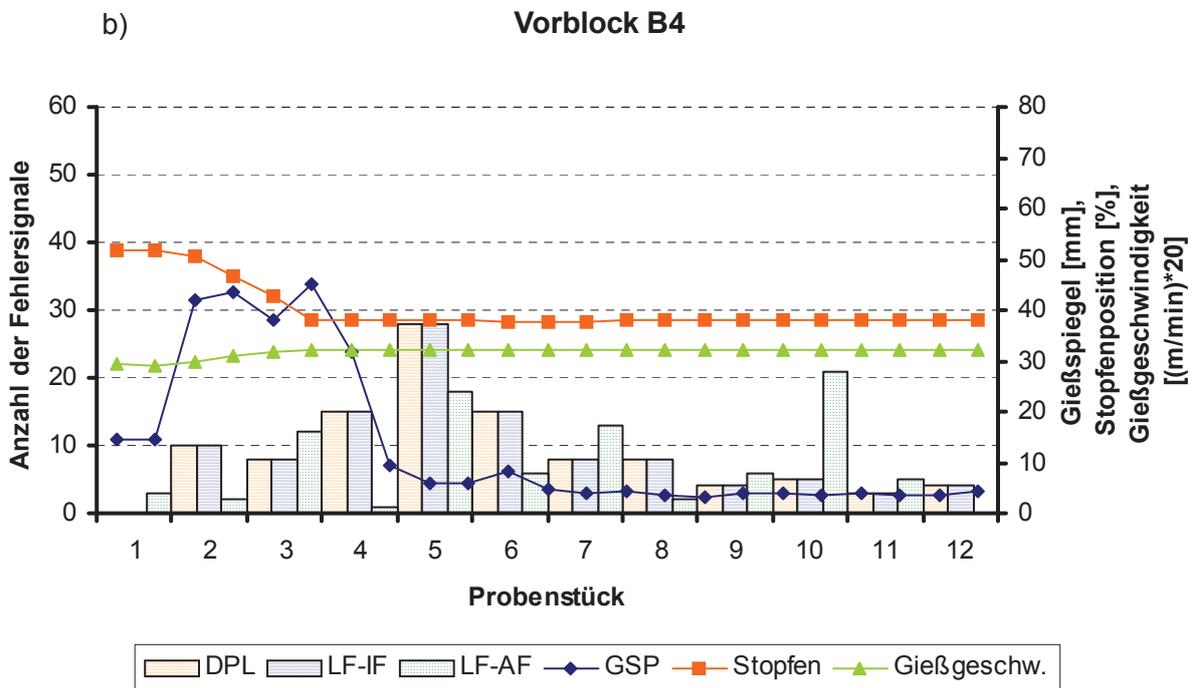
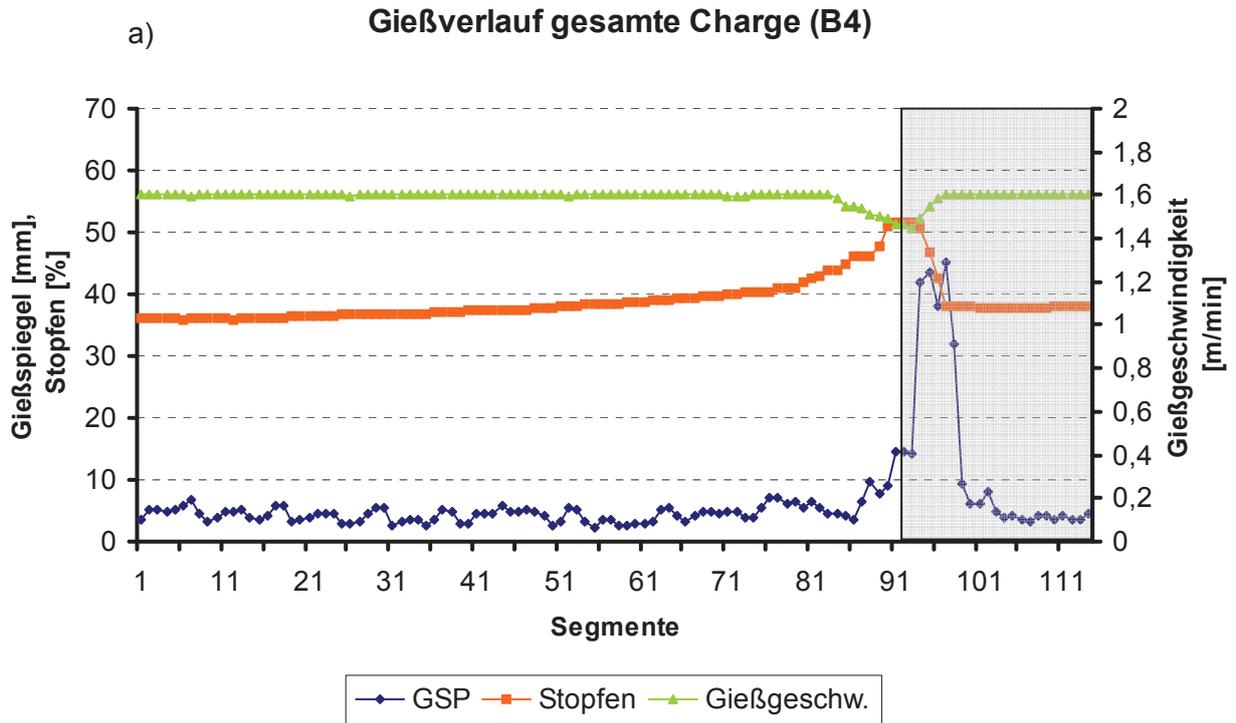


Abbildung 3-24: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Anzahl der Fehlersignale für die untersuchte Probe B4

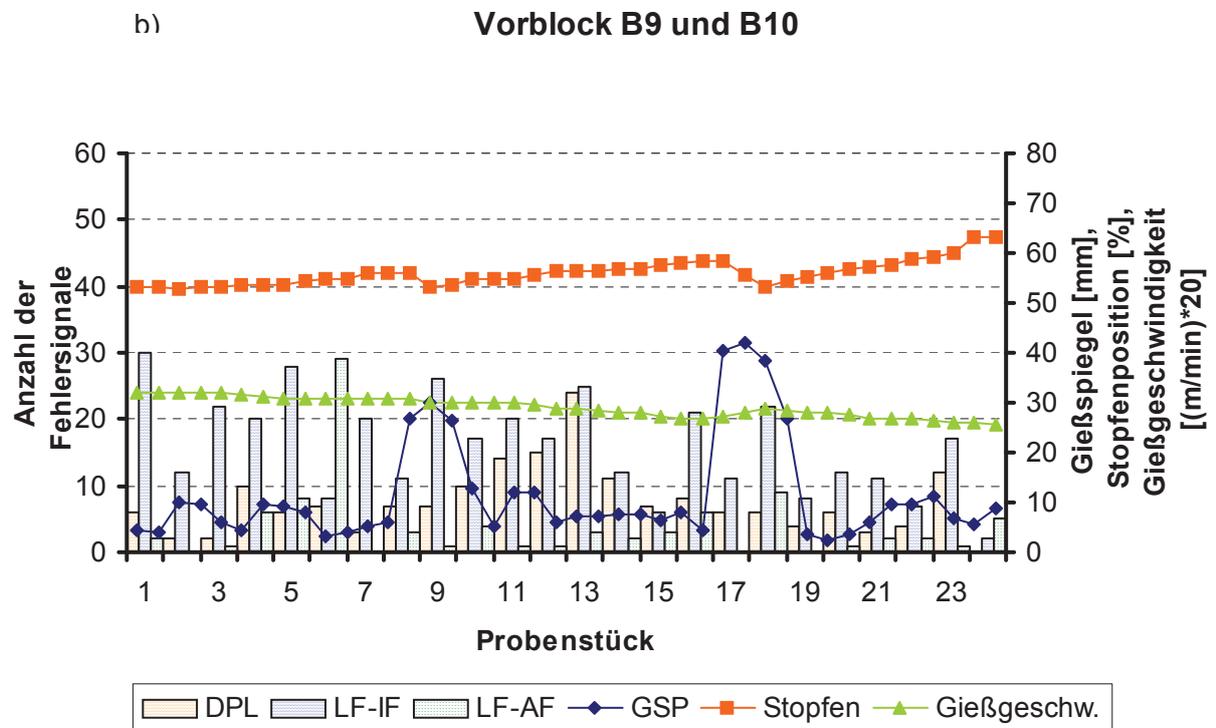
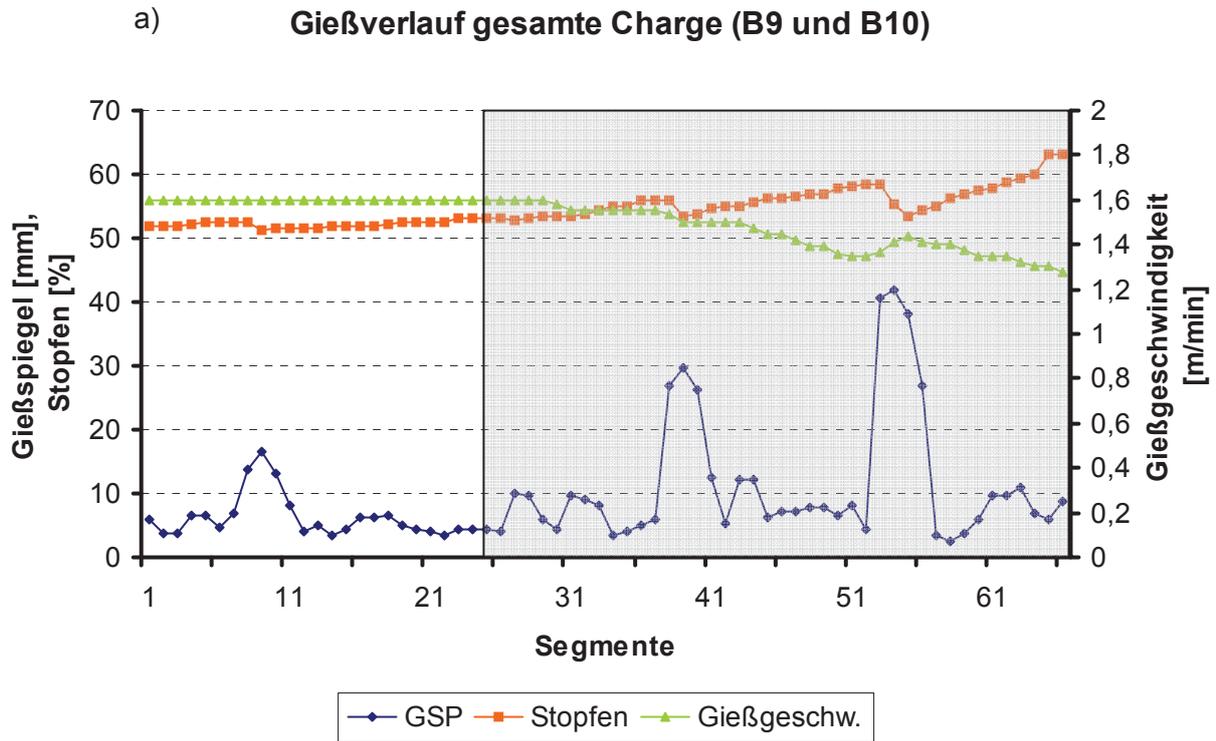


Abbildung 3-25: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Anzahl der Fehlersignale für die untersuchten Proben B9 und B10

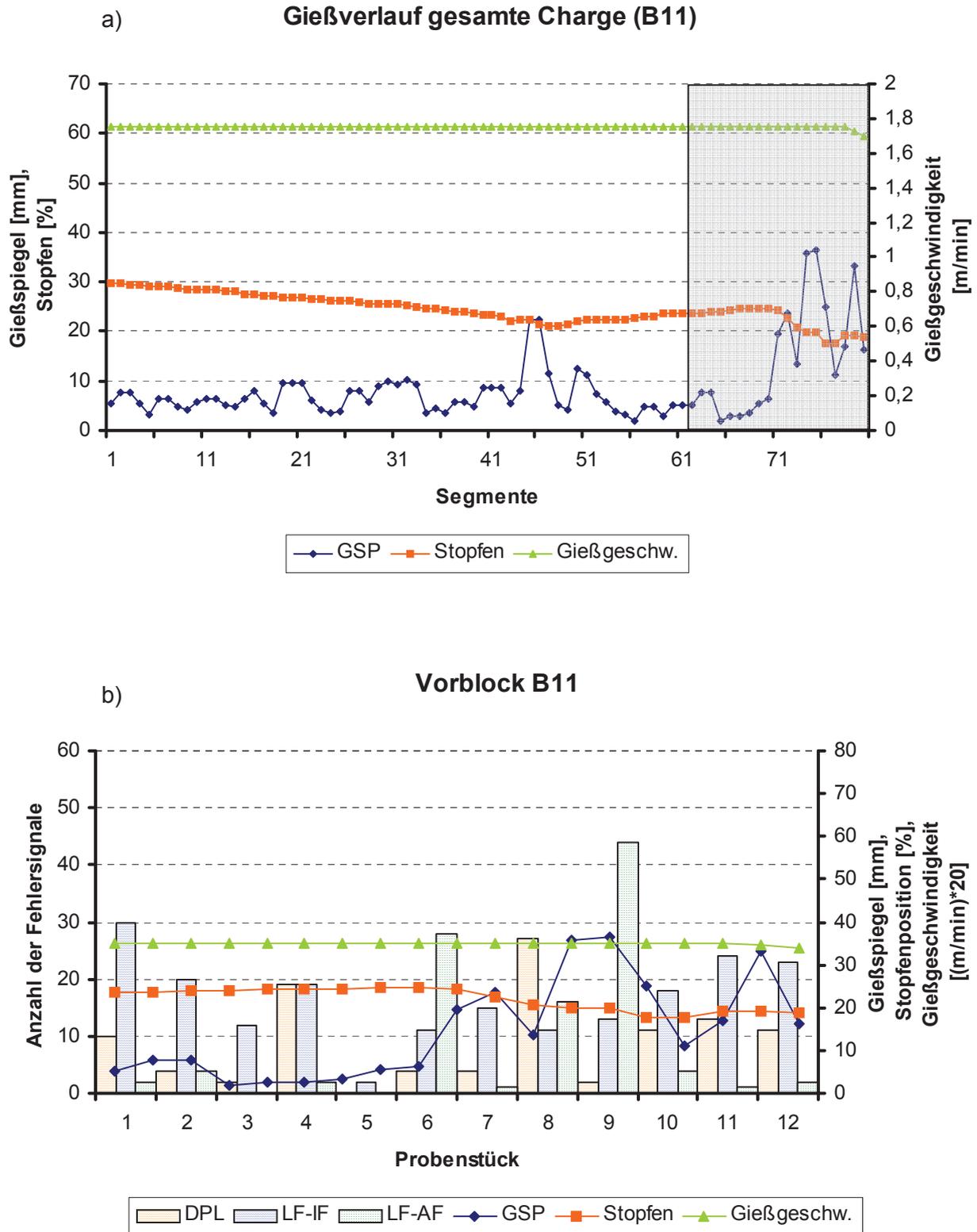


Abbildung 3-26: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Anzahl der Fehlersignale für die untersuchte Probe B11

Beim Vergleich der Gießspiegelverläufe mit den auftretenden Fehlersignalen kann keine eindeutige Aussage bezüglich einer Korrelation zwischen Gießspiegelschwankung und Fehlerauftreten getroffen werden. Zwar kann eine leicht steigende Tendenz der Außenfehler im Bereich der Gießspiegelschwankungen festgestellt werden, jedoch lässt sich auch diesbezüglich keine nachweisliche Schlussfolgerung anstellen. Vor allem muss hierbei bedacht werden, dass die Rohre vor der Ultraschallprüfung aus Zeit- und Kostengründen nicht gerichtet und folglich nicht entzündert wurden. Daher kann nicht von völlig reproduzierbaren, eindeutigen Fehlersignalen ausgegangen werden. Bei den Vorblöcken B9, B10 und B11 (**Abbildung 3-25** und **Abbildung 3-26**) wurde generell eine hohe Fehlerdichte der Außenfehler festgestellt. Dass diese mit den Unregelmäßigkeiten des Gießspiegelverlaufes zusammenhängt, kann nicht eindeutig daraus abgeleitet werden. Einen Überblick über die Detektierbarkeit von Fehlern soll das hier angefügte Flow-sheet liefern. Eine Gießspiegelschwankung kann verschiedenen Konsequenzen nach sich ziehen. In **Abbildung 3-27** sind die möglichen Folgen aufgelistet. Demnach können nur Fehler detektiert werden, welche der roten Linie folgen.

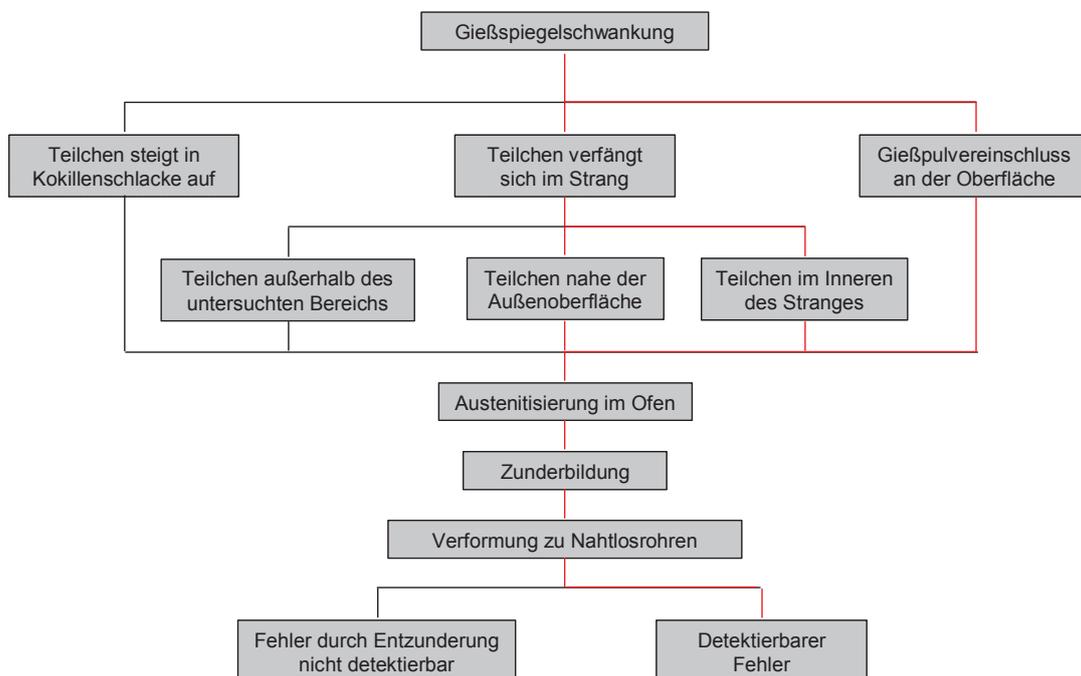


Abbildung 3-27: Detektierbarkeit von Fehlern an den Nahtlosrohrproben

Aus einigen untersuchten Vorblöcken wurden Proben entnommen und die Einschlüsse auf deren Zusammensetzung untersucht. Es wurden jene Proben ausgewählt, bei welchen Anzeigen der Ultraschallprüfung die Grenzwert von 40 % bei Innenfehlern,

beziehungsweise 50 % bei Dopplungen, überschritten haben. Grund für die Wahl dieser Schwelle ist, dass alle Proben, bei welchen die Anzeige diesen Wert übertrifft, als Schrott deklariert werden. Außerdem liegt die Wahrscheinlichkeit des genauen Lokalisierens dieser eindeutigen Ungängen sehr hoch. Wie bereits in **Abschnitt 3.3.2** erläutert, können die Auslöser der Fehlersignale genau lokalisiert und der betroffene Probenabschnitt entnommen werden. Aus den entnommenen Probenstücken wurden Schliffe angefertigt und diese, wie beschrieben, mittels Rasterelektronenmikroskop analysiert. Die Anzahl der gefertigten Schliffe und deren Bezeichnung sind der **Tabelle 3-II** zu entnehmen. Nachstehende Diagramme dienen dem Überblick über die betroffenen Vorblöcke und deren Gießverlauf, aus welchen die Proben entnommen wurden. Weiters ist der Abstand der Fehler zur Rohrinneoberfläche aufgetragen und es ist ersichtlich, welchem Probenstück die Schliffe zuzuordnen sind.

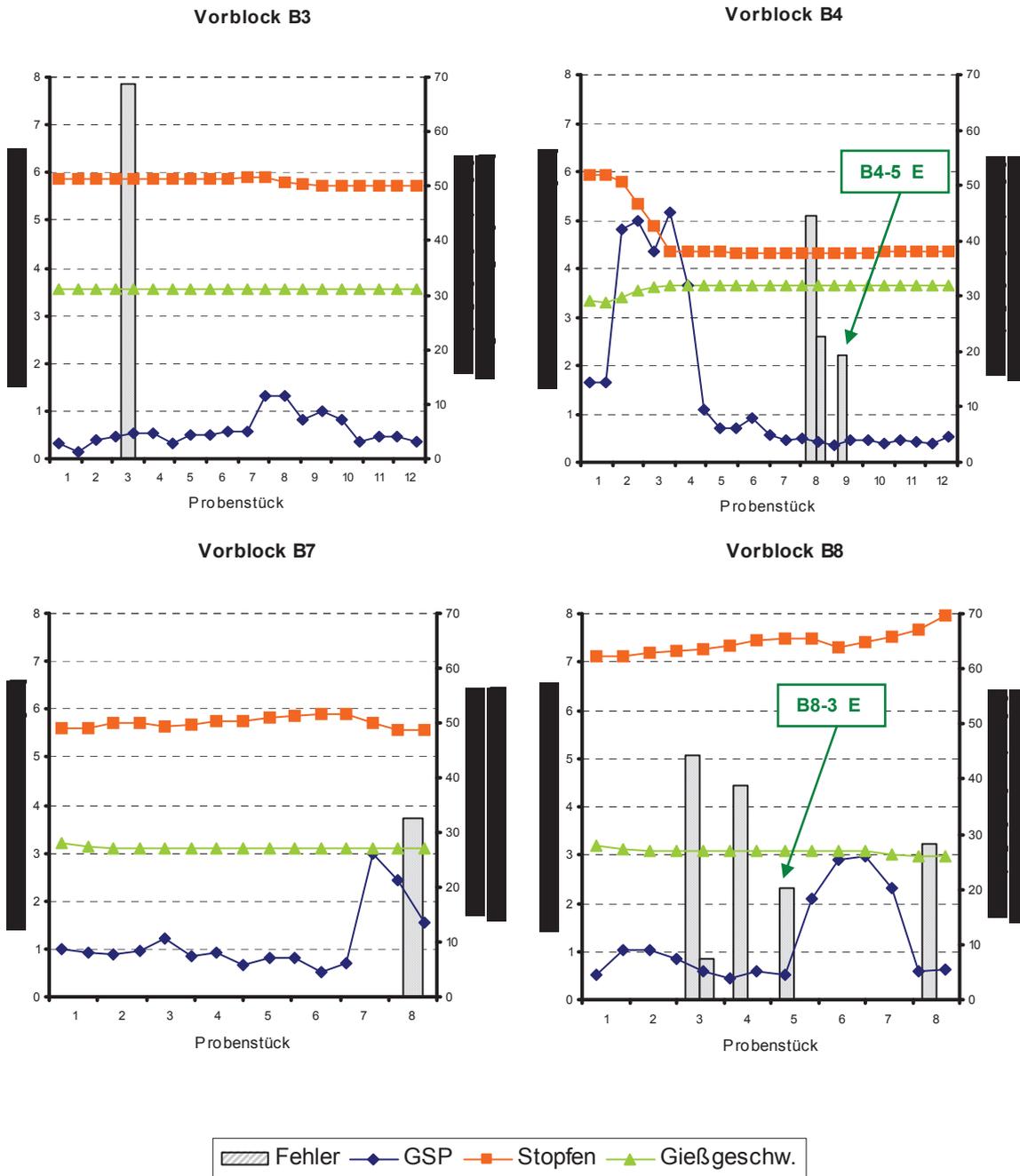


Abbildung 3-28: Lage der NME der Proben B3, B4, B7 und B8

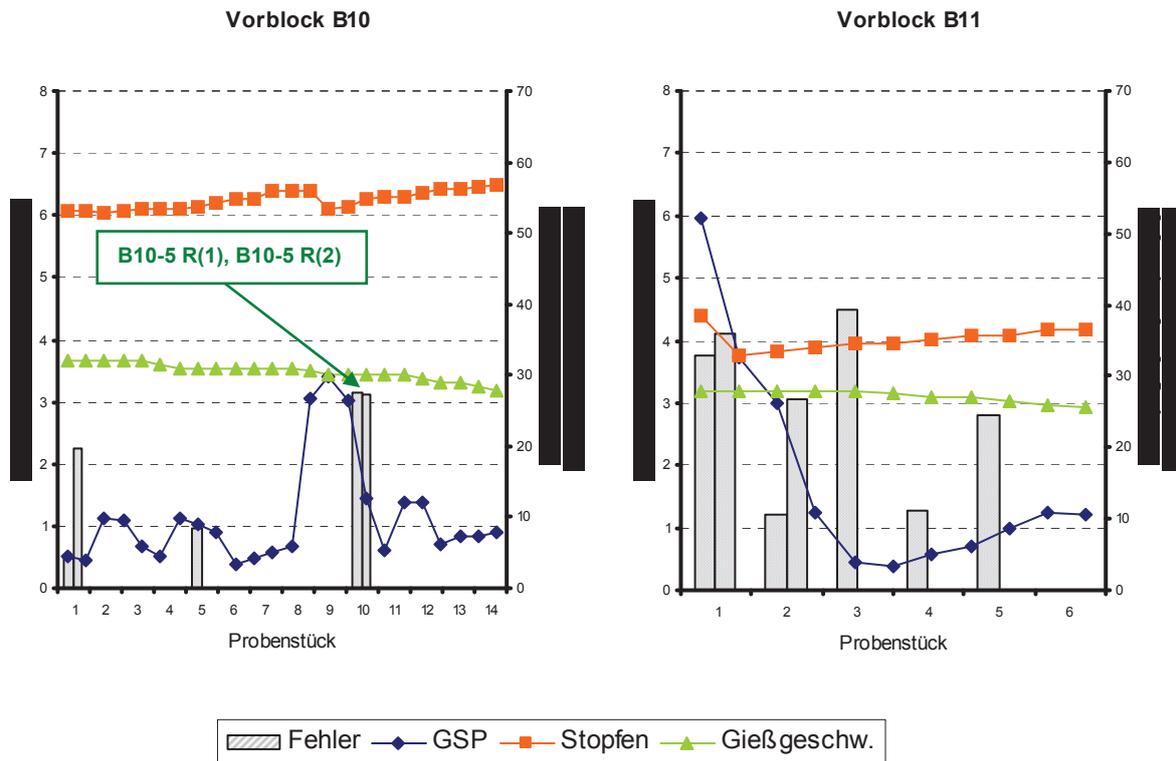


Abbildung 3-29: Lage der NME der Proben B10 und B11

Abbildung 3-28 zeigt die Gießspiegelverläufe der untersuchten Vorblöcke B3, B4, B7 und B8. Aus B3 wurde der Schliff B3-2 E angefertigt. Dieser nichtmetallische Einschluss liegt nahe der Außenoberfläche des Rohres. Wie bei den Schliffen der Proben B4 und B8 korrelieren auch hier die detektierten Produktfehler nicht eindeutig mit den Gießspiegelschwankungen. Lediglich der Schliff B7-4 R liegt im Bereich der maximalen Auslenkung. In **Abbildung 3-29** sind die Verläufe der Vorblöcke B10 und B11 dargestellt. Die gefundenen Produktfehler liegen größtenteils in der Mitte der Rohrwand und beim Vergleich mit der Auslenkung der Gießspiegel kann bei einigen Schliffen ein Zusammenhang festgestellt werden. Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchung der Schliffe sollen im folgenden Kapitel erörtert und diskutiert werden.

3.4.2 Ergebnisse der metallographischen Untersuchung der Nahtlosrohrproben

Bei VASD besteht ein umfangreiches Wissen hinsichtlich Analytik und Morphologien von nichtmetallischen Einschlüssen, die in diversen Untersuchungsmustern analysiert worden sind. Auch Analysen von Ungängen von calciumbehandelten Güten liegen vor. Die Form der nichtmetallischen Einschlüsse der gegenständlichen Proben entspricht nicht der sonst

beobachteten Morphologie. Vor allem bei den Nahtlosrohrproben gestaltet sich das Fehlerbild durchgängig aus einem Einschlusscluster, welcher aus zahlreichen 5-10 µm großen Partikeln besteht. Dieses Merkmal lässt sich als Indiz dahin deuten, dass diese Produktfehler durch besondere Bedingungen entstanden sind. Ein Zusammenhang mit Gießspiegelschwankungen und dem Auftreten von Clogging ist hierbei nicht auszuschließen. Die EDX-Analysen der einzelnen Partikeln weisen durchgängig hohe Aluminium-Gehalte auf. Sauerstoff und Calcium sind als weitere häufige Bestandteile zu nennen, wobei der Gehalt an Calcium zumeist variiert. Magnesium und Schwefel tritt nur vereinzelt in Spuren in wenigen Partikeln auf. Aus all diesen Gegebenheiten lässt sich darauf schließen, dass es sich vermutlich um schwach mit Calcium modifizierte Aluminiumoxide handelt. Als anschauliches Fehlerbeispiel ist nachfolgend die Darstellung eines nichtmetallischen Einschlusses, einschließlich des Röntgenspektrums eines Partikels, des Vorblocks B4 (vgl. **Abbildung 3-24**) abgebildet. Der Schliff B4-5 E ist im zugehörigen Diagramm in **Abbildung 3-28** gekennzeichnet. Darin ist auch abzulesen, dass sich der nichtmetallische Einschluss 2,21 mm unter der Innenoberfläche des Rohres befindet. Die Schliffe sind allesamt quer zur Rohrachse hergestellt worden. Somit stellen alle Abbildungen Querschnitte der Einschlüsse dar. Weiters ist die Lage der Einschlüsse in den Proben schematisch dargestellt.

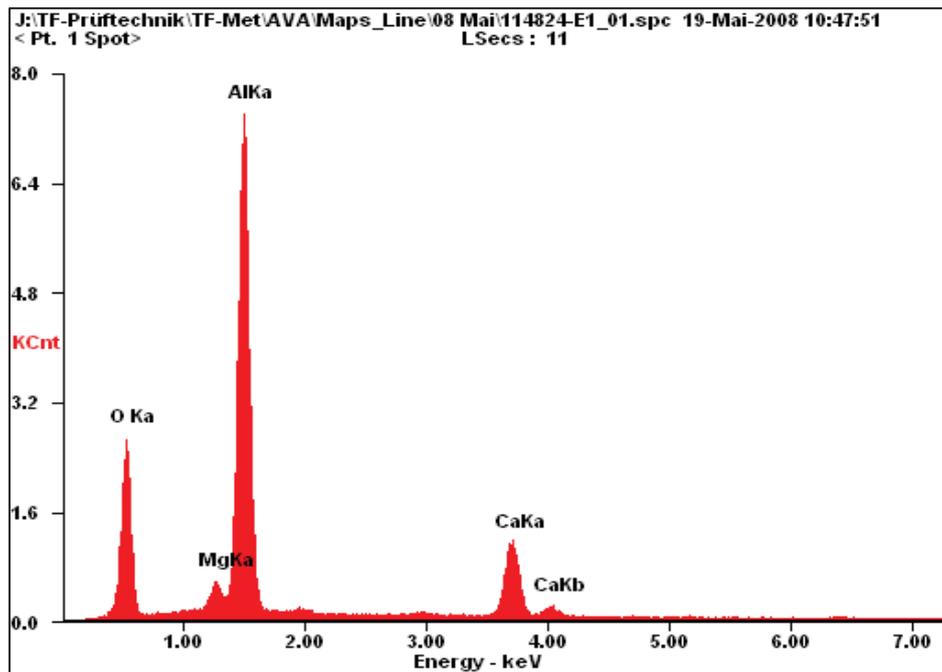
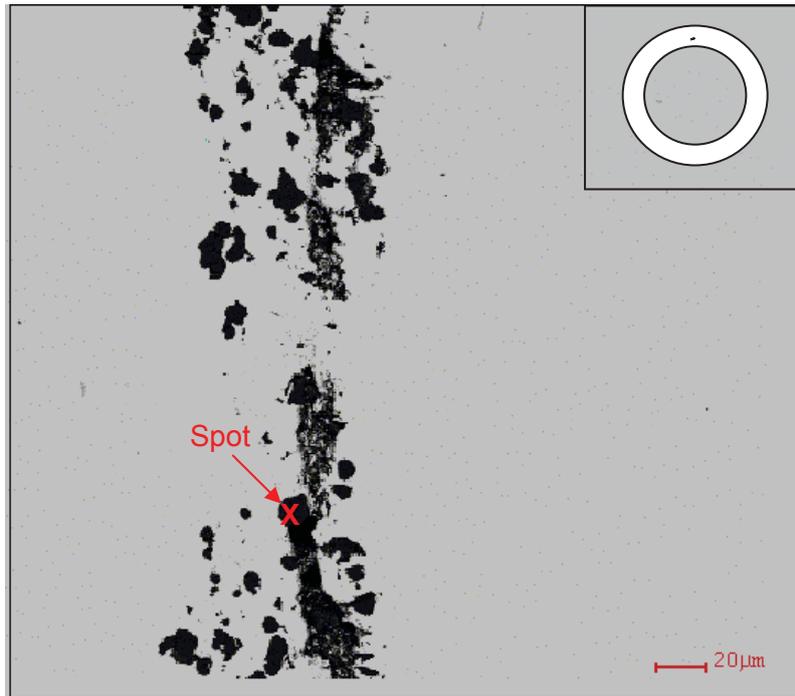


Abbildung 3-30: Aufnahme und Röntgenspektrum für B4-5 E

Die nächste Abbildung zeigt einen weiteren Einschluss (B8-3 E, **Abbildung 3-28**) mit der Analyse von einzelnen Partikeln. Die Bereiche 1, 5 und 6 enthalten geringe Gehalte an Magnesium. Dabei könnte es sich um exogene Einschlusspartikel handeln, welche, wie in

Kapitel 2.4.4 des Literaturteils beschrieben, vermutlich aus dem feuerfesten Material in die Schmelze gelangt sind. Jedoch sind die detektierten Gehalte so gering, dass die detektierten Gehalte eventuell auch auf die Unschärfe einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung zurückzuführen sind.

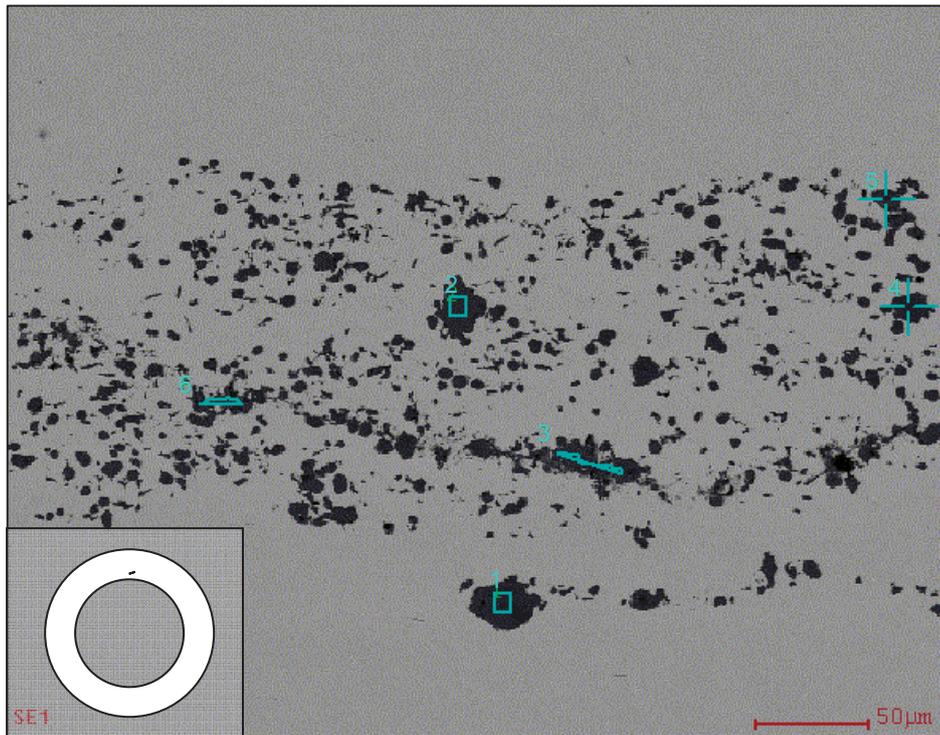


Abbildung 3-31: Aufnahme von B8-3 E und Markierungen der analysierten Bereiche

Tabelle 3-IV: Analyse der in Abbildung 3-31 markierten Bereiche

Element	Massenprozent					
	Spot 1	Spot 2	Spot 3	Spot 4	Spot 5	Spot 6
Al	42,19	42,3	46,48	46,67	41,61	40,63
O	44,62	43,9	44,97	45,39	43,97	46,64
Ca	10,25	13,8	8,55	5,35	13,93	11,77
Mg	2,93				0,49	0,96

Die beiden Diagramme unten zeigen die Aufnahmen der Schiffe B10-5 R(1) und B10-5 R(2) (**Abbildung 3-32** und **Abbildung 3-33**), enthalten die durchschnittliche Zusammensetzung der einzelnen Spots und sollen nochmals die Form der Einschlüsse und deren spezifischen Zusammensetzung in Massenprozent untermauern.

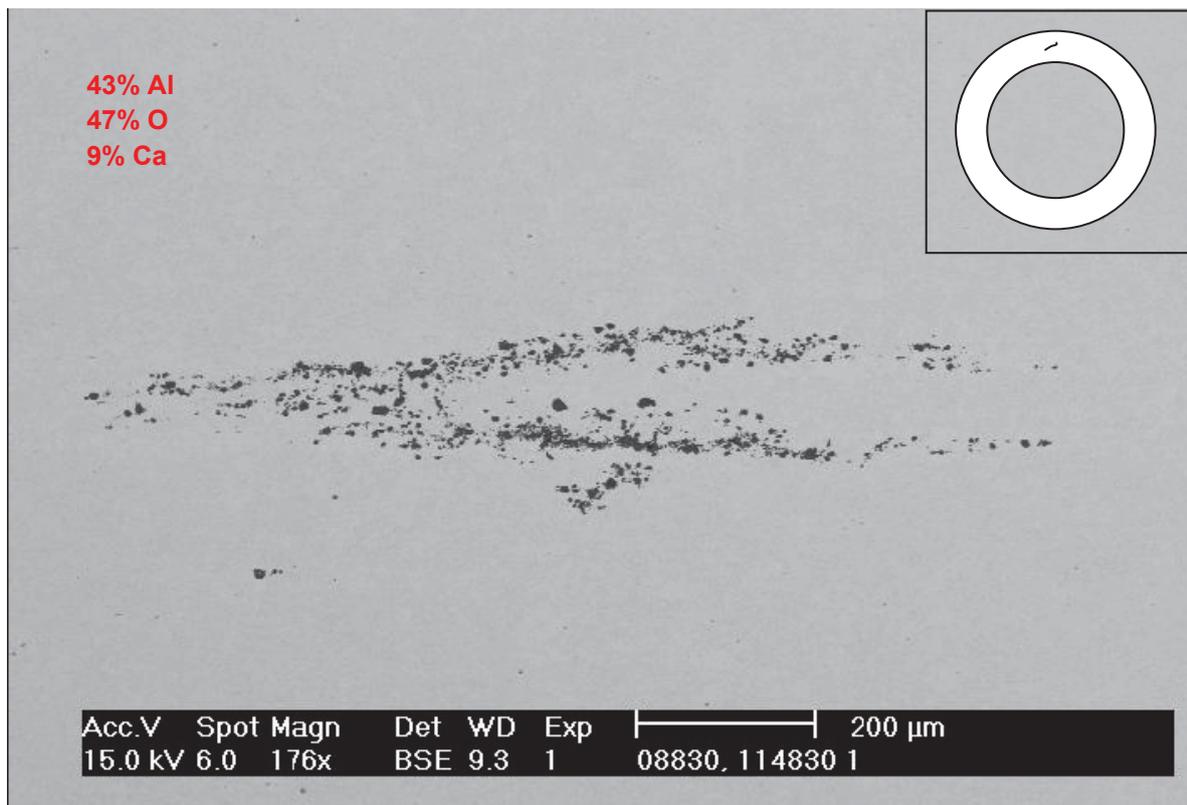


Abbildung 3-32: B10-5 R(1) mit mittlerer Zusammensetzung in Massenprozent

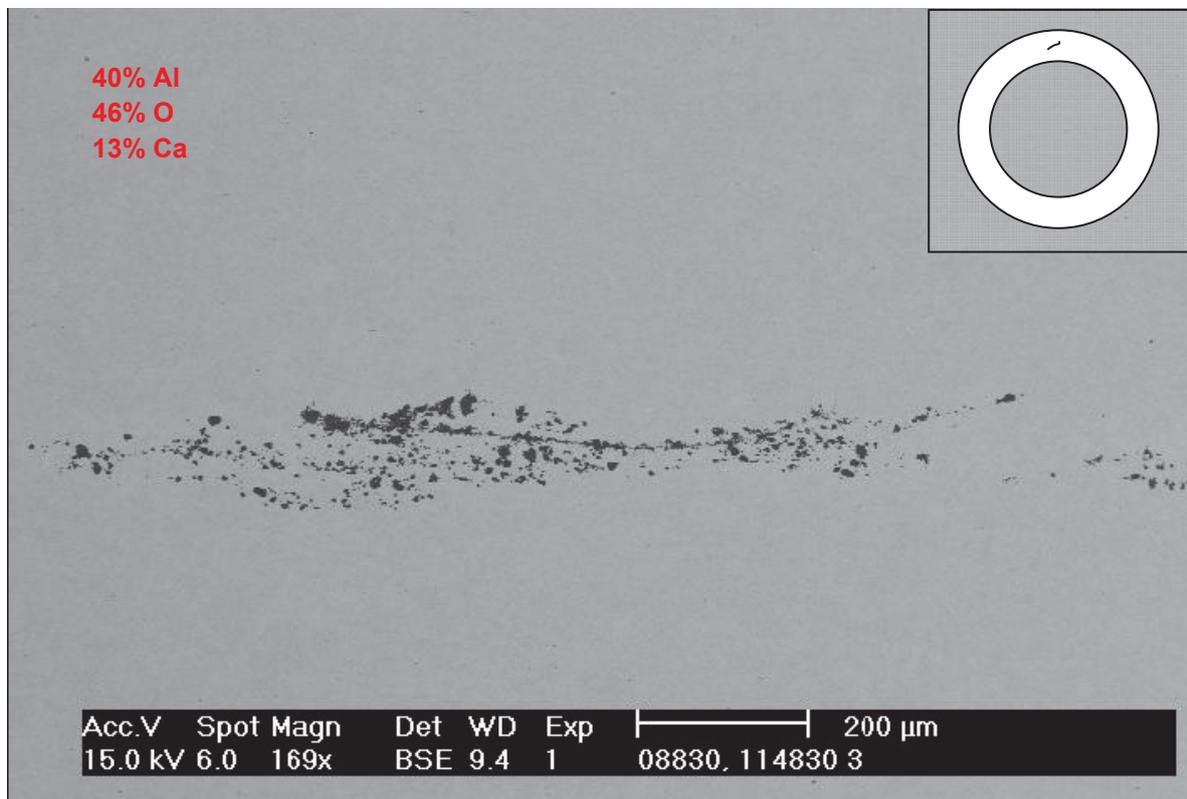


Abbildung 3-33: B10-5 (R2) mit mittlerer Zusammensetzung in Massenprozent

Stöchiometrisch gesehen entsprechen die Einschlüsse einer Modifikationsstufe, welche zwischen CA_6 und CA_2 liegt. Diese Calciumaluminatzeile weisen einen Schmelzpunkt über 1800°C auf, wonach diese Einschlüsse während des Gießprozesses in fester Form vorliegen. Wie im Literaturteil unter **Kapitel 2.5** erläutert, bilden schwach modifizierte Aluminiumoxide sehr feste Calciumaluminatzeile aus, welche noch stärker zum Clogging neigen als reine Aluminiumoxide. Weiters bilden diese Einschlüsse weitaus stabilere Ablagerungen aus, welche kaum zerbröckeln. An dieser Stelle wird das Phasendiagramm $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ der **Abbildung 2-14** aus dem Literaturteil aufgegriffen. Die analysierten Einschlüsse sind in **Abbildung 3-34** entsprechend ihrer Modifikation durch rote Linien eingetragen.

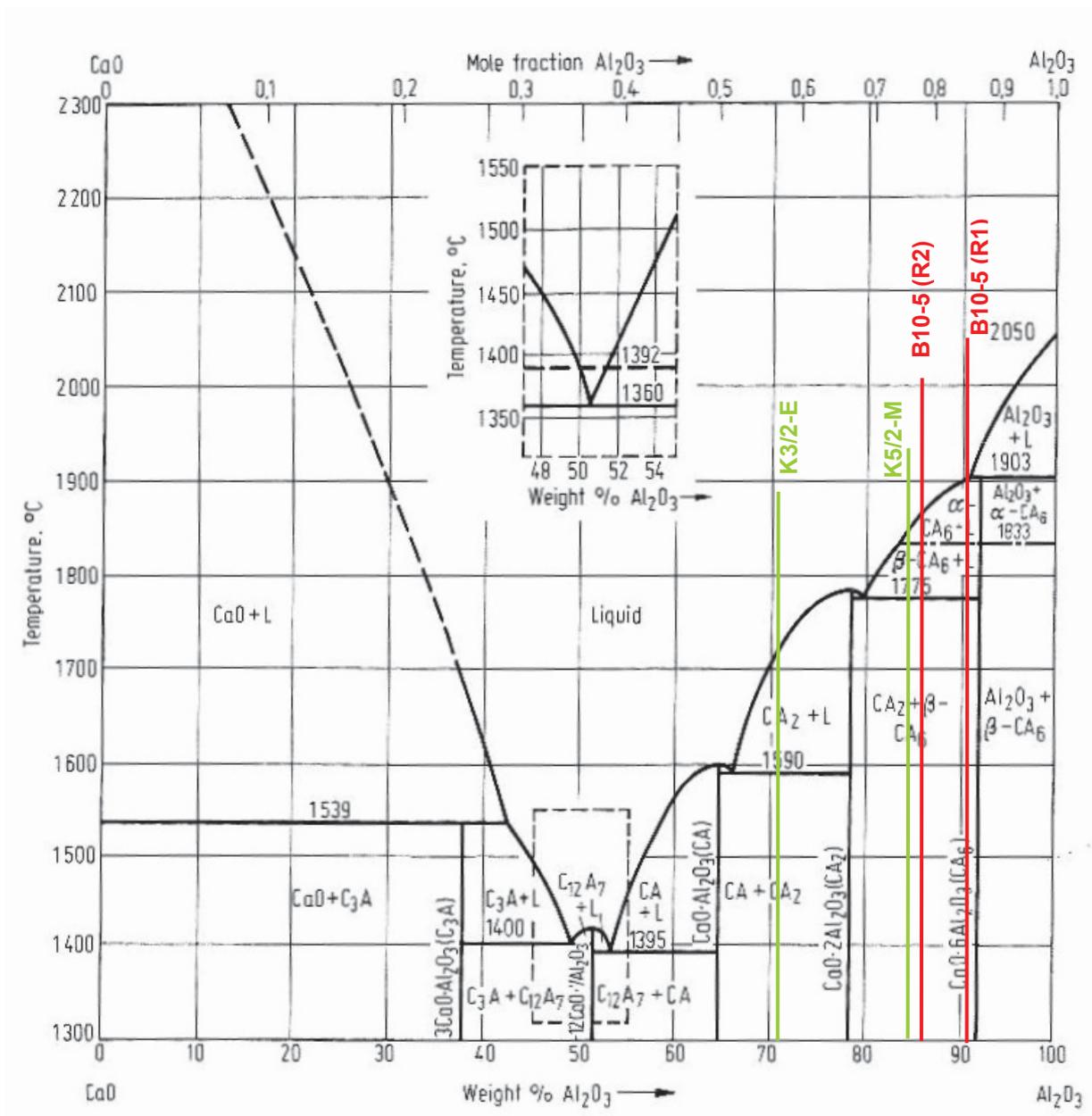


Abbildung 3-34: Phasendiagramm $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ mit den detektierten Einschlüssen

Die niedrige Modifikationsstufe der Calciumaluminat kann somit das Auftreten des Cloggings ausgelöst haben und somit durch ein Loslösen der Ablagerungen zu Einschlüssen im Rohr führen. Dies würde auch die partikelförmige Form der Einschlüsse erklären. Durch die stabile Ablagerung ist ein fester Einschluss entstanden, welcher in Folge der Verformung zerbröckelt ist. Es ist aber auch denkbar, dass der Einschluss bereits im Vorkblock aus einem Agglomerat aus feinen Partikeln besteht, welches durch die Umformung gestreckt wurde.

Die ausgewählten Knüppel K1 bis K5 wurden, wie bereits erwähnt, bei Stahl Judenburg auf mögliche Produktfehler überprüft. Die Ergebnisse dieser Prüfung werden im nachfolgenden Kapitel dargelegt.

3.4.3 Ergebnisse der Ultraschallprüfung der Knüppel

Bei der Stahl Judenburg AG wurden insgesamt 5 Knüppel, bei welchen starke Gießspiegelschwankungen aufgetreten sind, auf deren makroskopischen Reinheitsgrad überprüft. Die Grenzwerte sind wie folgt definiert:

- Oberflächennahe Fehler: 49,6 %
- Oberflächenfehler: 50 %
- Kernfehler: 50,4 %

Auch hier muss die Detektierbarkeit von Produktfehlern, die im Zusammenhang mit Gießspiegelschwankungen entstanden sind, beachtet werden. Das Flow-sheet in **Abbildung 3-35** zeigt über die rote Linie die detektierbaren Fehler an. Wie zu **Abbildung 3-27** erläutert, gibt es mehrere mögliche Folgen von Gießspiegelschwankungen. Es hängt von der weiteren Verfahrenslinie ab, ob Produktfehler detektiert werden können oder nicht. Bei den Stäben muss im Speziellen angemerkt werden, dass diese vor der Ultraschallprüfung geschält werden und somit noch mehr von der Oberfläche entfernt wird, als bei reiner Entzunderung. Es traten lediglich bei 4 Stäben Fehlersignale, welche den Knüppeln K2/1, K3/2, K4/2 und K5/2 zuzuordnen sind, über der Grenzwerte auf. Der Probenumfang der geprüften Stäbe beläuft sich auf 361 Stück. Die Anzahl der gegenständlichen Ausschussrate befindet sich demnach im üblichen Bereich.

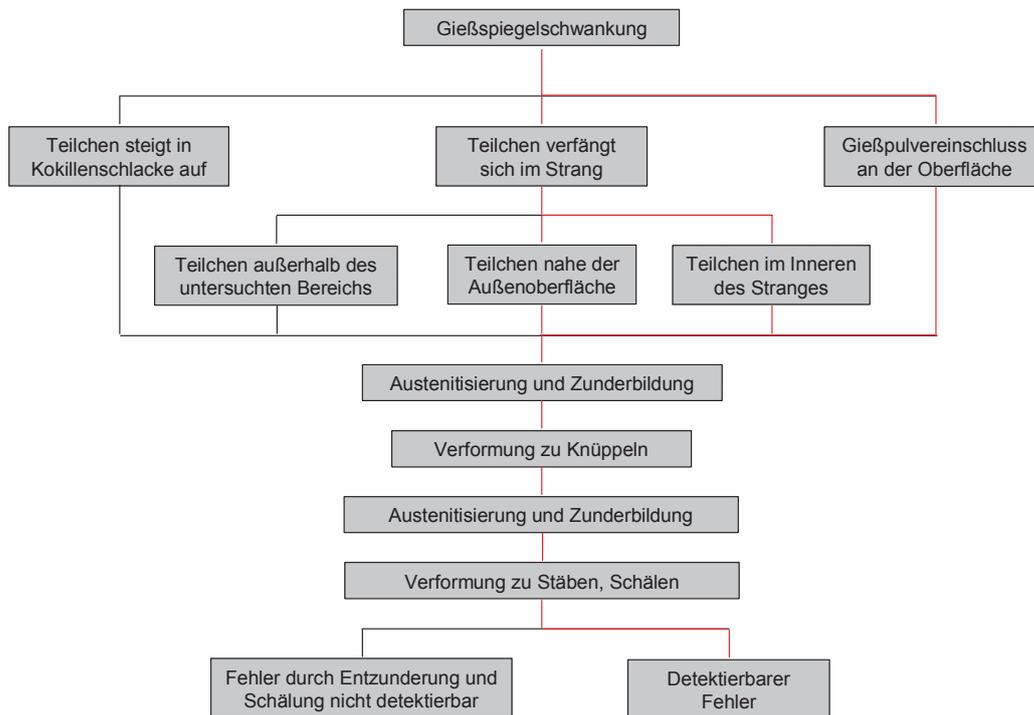


Abbildung 3-35: Detektierbarkeit von NME an den Stäben

Die nachstehenden Diagramme (**Abbildung 3-36** bis **Abbildung 3-39**) zeigen den Gießverlauf der Chargen dieser 4 Stäbe, den Gießverlauf des gesamten Vorblocks, aus welchem die Knüppel gewalzt wurden, und kennzeichnen den Bereich, in welchem die Fehler detektiert wurden. Anhand der **Abbildung 3-36** sollen die einzelnen Darstellungen erläutert werden. Diagramm a) zeigt die Aufzeichnung des Protokollierungssystems mit den Daten für Gießspiegel, Stopfen und Gießgeschwindigkeit für eine gesamte Charge. Der graue Bereich markiert den ausgewählten Block, welchem die zu untersuchenden Knüppel zuzuordnen sind. Die Herstellung der Stäbe für die Ultraschallprüfung und deren Rückverfolgung zu den Bezeichnungen der Vorblöcke ist in **Abbildung 3-17** bildlich dargestellt. In Diagramm a) der **Abbildung 3-36** ist der Vorblock, aus welchem der untersuchte Knüppel stammt, mit der Bezeichnung K2 eingezeichnet. Aus diesem Vorblock entstehen zwei Knüppel, wobei nur der erste Knüppel mit der Bezeichnung K2/1 untersucht wurde. Diagramm b) zeigt die Gießparameter des betreffenden Vorblockes und der Bereich, in welchem Anzeigen der Ultraschallprüfung die Grenzwerte überschritten haben, ist grau schraffiert. Der Stab, welcher diesem Bereich zuzuordnen ist, weist einen Oberflächenfehler auf. Es handelt sich in diesem Fall um das mittlere Stück des ersten Knüppels des Vorblocks K2. Das betreffende Teilstück wird mit K2/1-M bezeichnet.

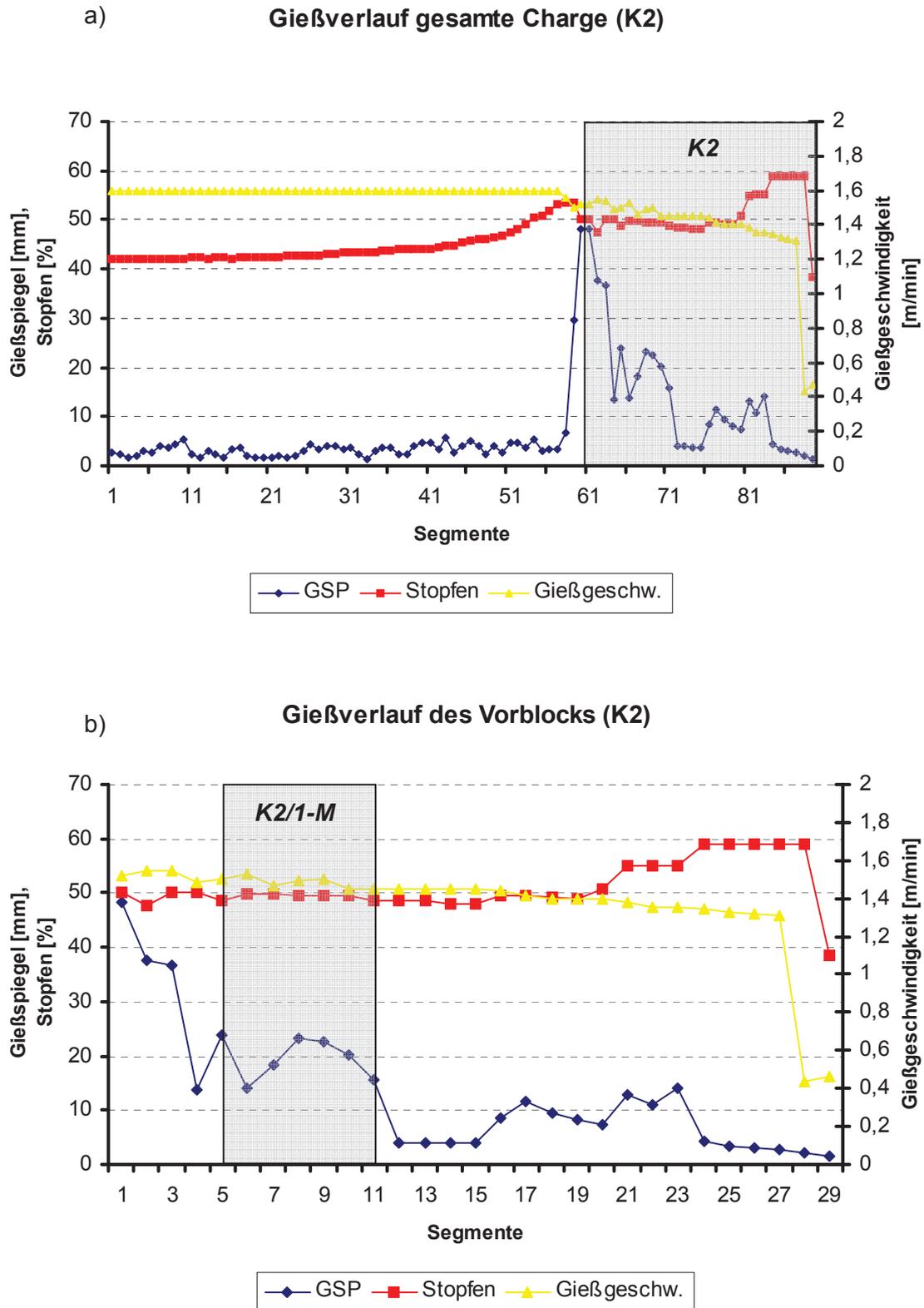


Abbildung 3-36: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Fehlerbereich der untersuchten Probe K2

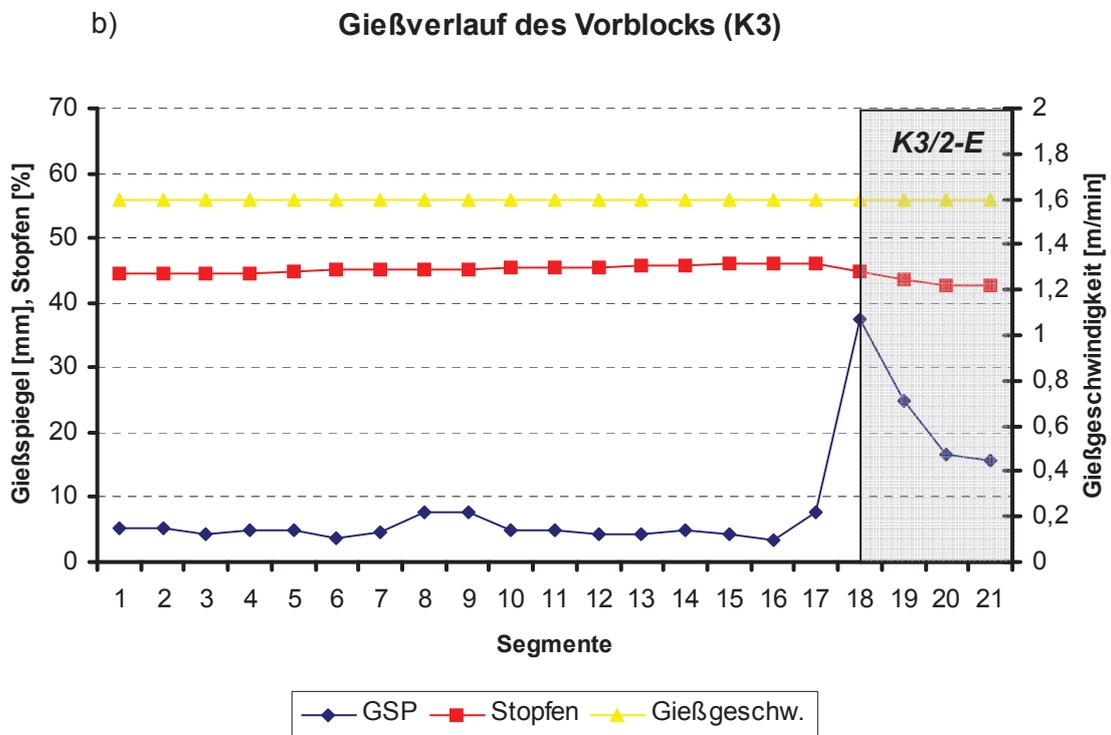
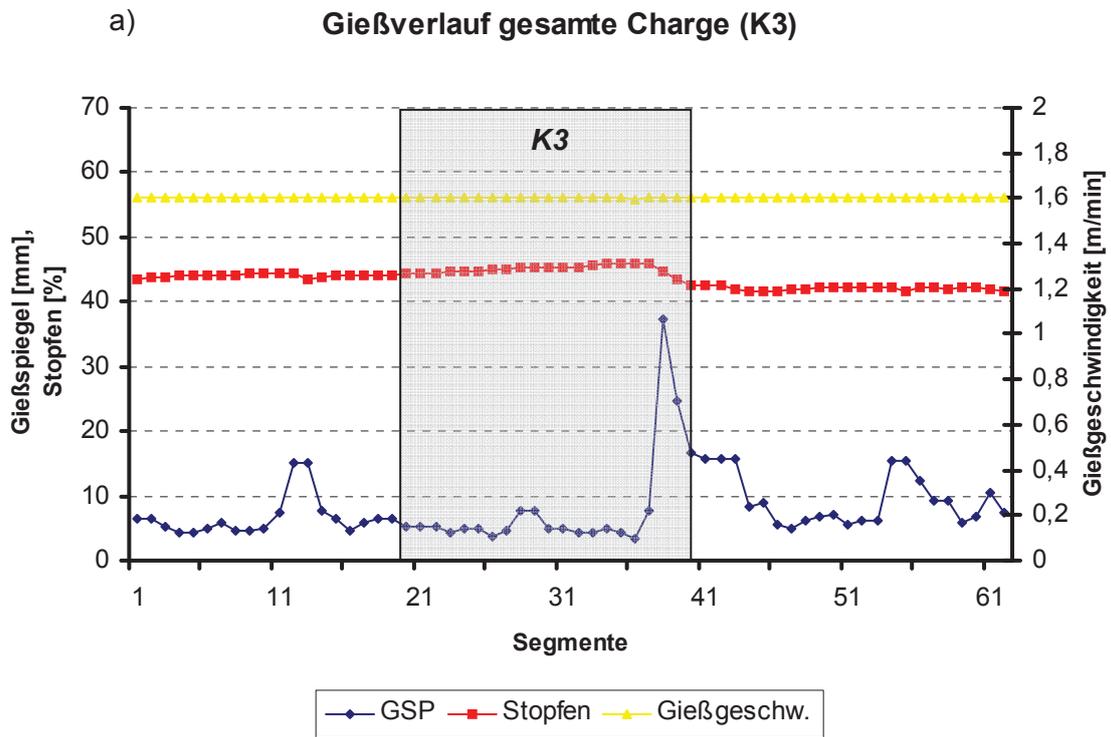


Abbildung 3-37: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Fehlerbereich der untersuchten Probe K3

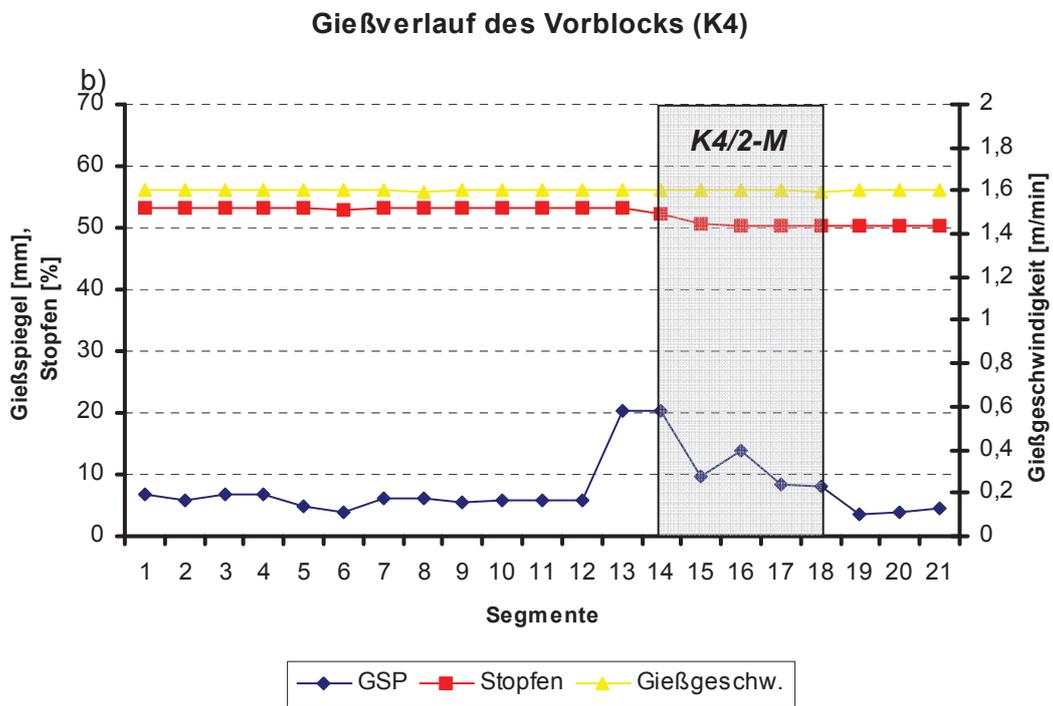
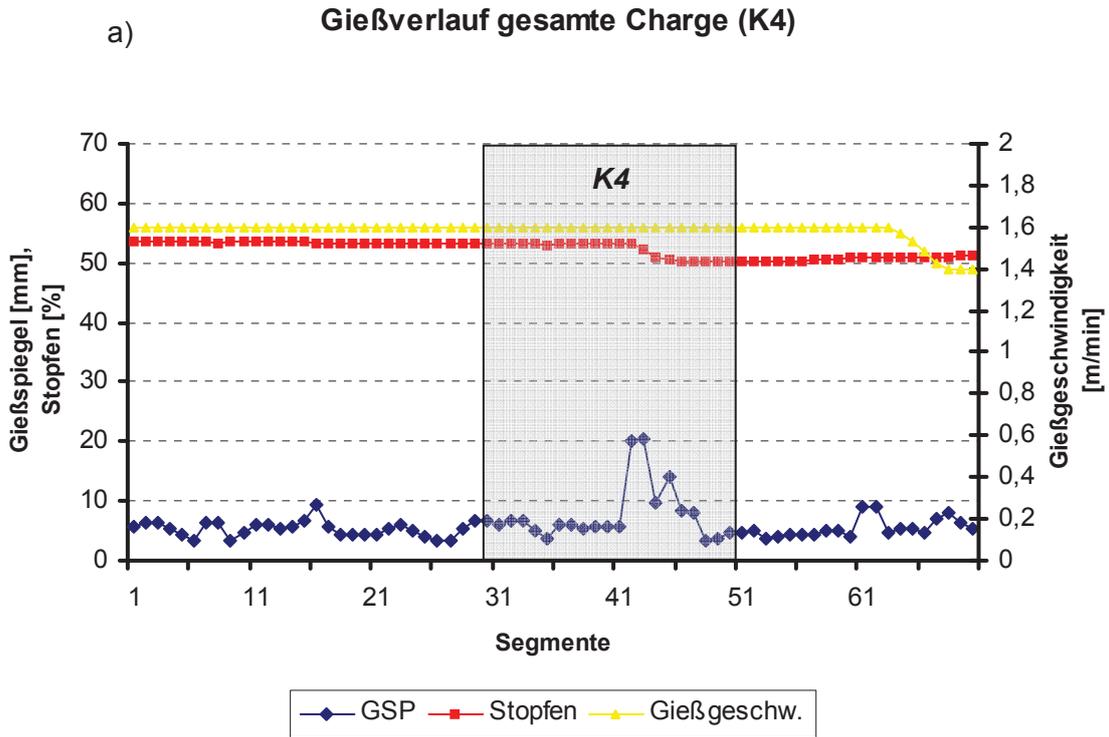
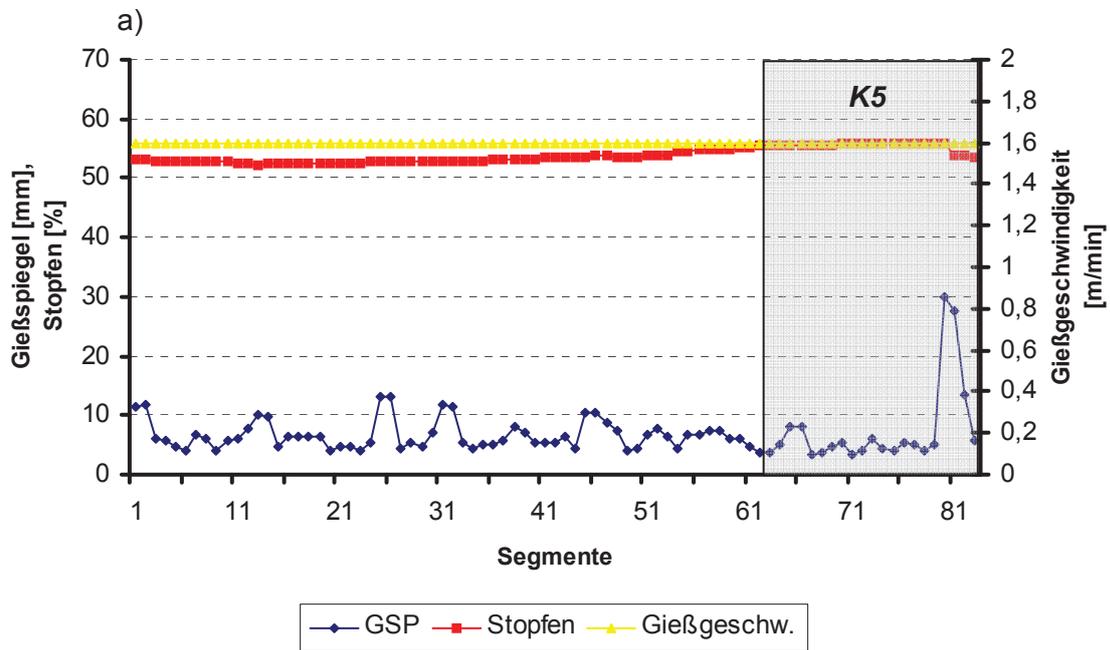


Abbildung 3-38: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Fehlerbereich der untersuchten Probe K4

Gießverlauf gesamte Charge (K5)



Gießverlauf des Vorblocks (K5)

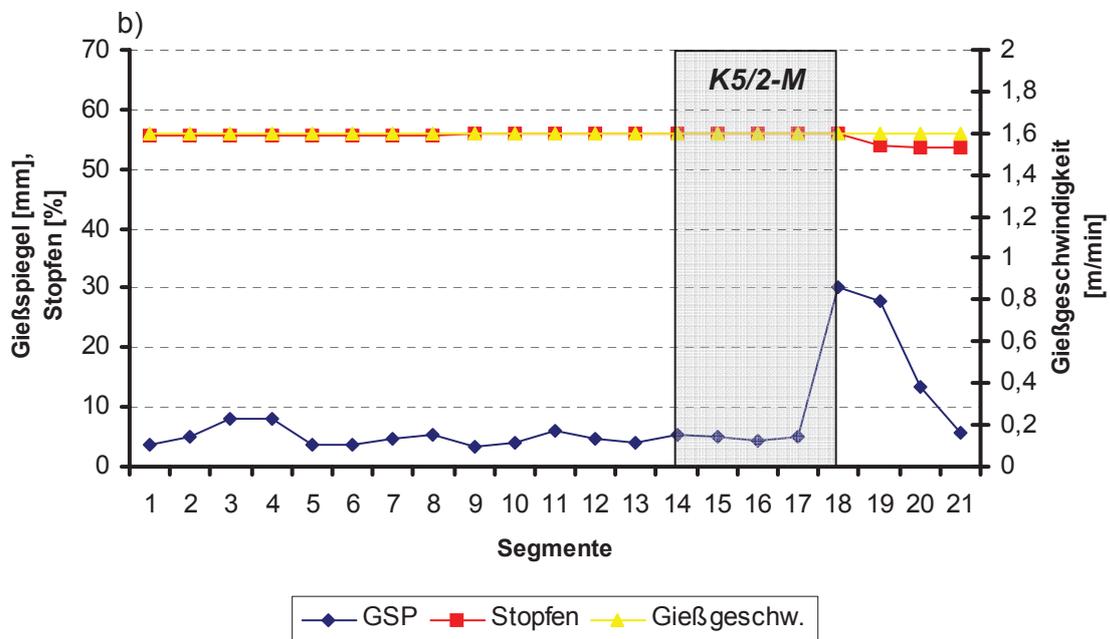


Abbildung 3-39: a) Gießverlauf der gesamten Charge und b) Gießverlauf bzw. Fehlerbereich der untersuchten Probe K5

Abbildung 3-37 zeigt den Gießverlauf der Vorblocks K3. Hierbei wurde der zweite Knüppel K3/2 untersucht. Im Teilstück K3/2-E ist ein Riss detektiert worden. In **Abbildung 3-38** sind die Daten und der fehlerhafte Bereich für K4 dargestellt. Es wurde der zweite Knüppel des Vorblocks untersucht und im Abschnitt K4/2-M wurde ebenfalls ein Riss detektiert. **Abbildung 3-39** zeigt die Gießparameter für den Vorblock K5, wobei auch hier der zweite Knüppel daraus Ultraschall geprüft wurde. Im mittleren Teilstück K5/2-M wurde ein Kernfehler lokalisiert. Vergleicht man die Fehlerbereiche mit den aufgetretenen Gießspiegelschwankungen, so ist ersichtlich, dass sich die Fehler jeweils im Bereich der maximalen Auslenkung des Gießspiegels befinden. Die betroffenen Stäbe wurden separiert und deren Ungängen bei VASD metallographisch untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im folgenden Kapitel erläutert.

3.4.4 Ergebnisse der metallographischen Untersuchung der Stäbe

Bei den 4 separierten Proben im Stabstahlformat stellte sich heraus, dass zwei der Oberflächenfehler auf Fehler in der mechanischen Bearbeitung, zurückzuführen sind. Dies betrifft die Proben K2/1-M und K4/2-M. Die Ursachen für diese Fehler sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Somit beläuft sich das Ergebnis der Beprobung an den Stäben auf einen Fehler im Kernbereich, K5/2-M, und einen Riss an der Oberfläche, K3/2-E. Die Lage der nichtmetallischen Einschlüsse in den Proben ist jeweils in den Abbildungen schematisch dargestellt. Die Darstellung und Analyse einzelner Bereiche des detektierten Kernfehlers in Stab K5/2-M ist in **Abbildung 3-40** angeführt.

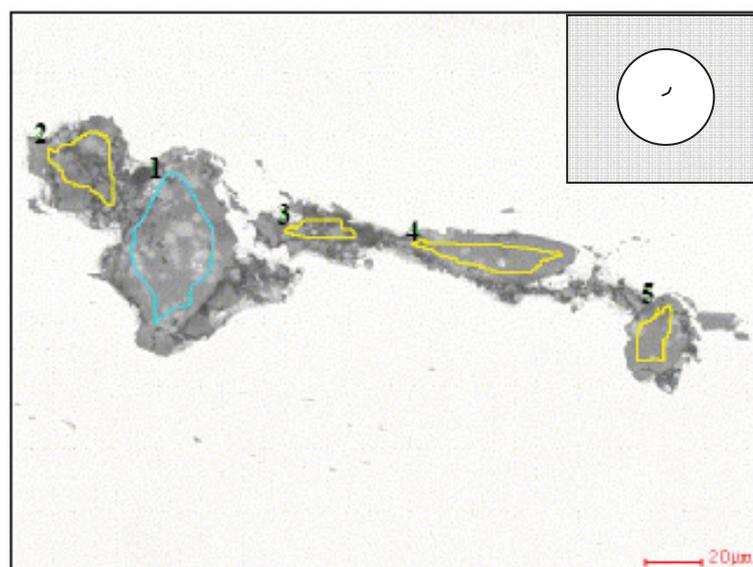


Abbildung 3-40: Darstellung und Analyse einzelner Bereiche des Kernfehlers (K5/2-M)

Tabelle 3-V: Analyse der in Abbildung 3.40 markierten Bereiche

Element	Massenprozent				
	Spot 1	Spot2	Spot 3	Spot 4	Spot 5
Al	30,04	30,18	26,36	34,02	33,66
O	29,29	36,44	33,77	33,09	35,62
Ca	27,80	22,27	33,28	28,09	20,91
S	12,06	5,61	5,05	3,23	4,88
Mg	0,81	4,55	-	1,57	4,93

Dieser Fehler weist im Vergleich zu den Einschlüssen der Nahtlosrohrproben keine derart ausgeprägte Partikelstruktur auf.

Nachstehende **Abbildung 3-41** zeigt die Analyse des Risses, welcher dem Stab K3/2-E zuzuordnen ist. Dieser Riss wurde durch einen oberflächennahen Einschluss ausgelöst. Es handelt sich auch hier um ein Calciumaluminat mit ähnlicher Zusammensetzung den bereits diskutierten Einschlüssen.

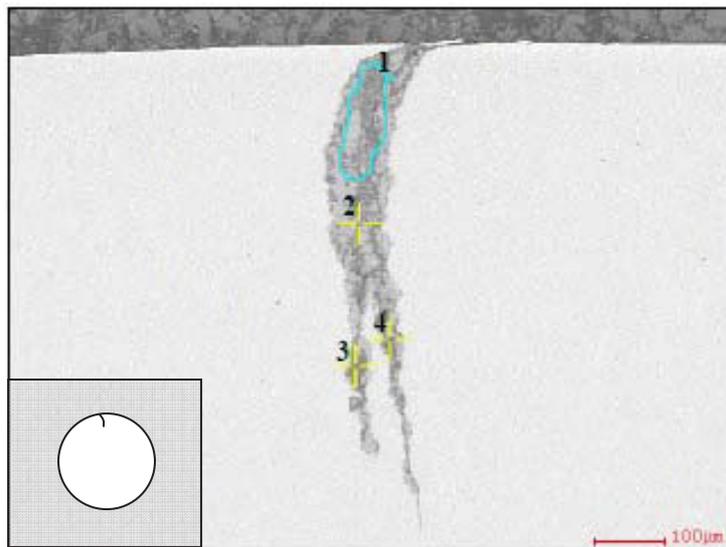


Abbildung 3-41: Darstellung und Analyse einzelner Bereiche des Oberflächenfehlers (K3/2-E)

Tabelle 3-VI: Analyse der in Abbildung 3.41 markierten Bereiche

Element	Massenprozent			
	Spot 1	Spot2	Spot 3	Spot 4
Al	17,43	20,99	10,72	11,95
O	54,64	45,91	66,64	63,74
Ca	16,33	25,28	14,86	17,25
S	1,07	1,26	1,38	-
Mg	3,30	1,72	1,26	1,04
Si	7,23	4,83	5,14	6,01

Bei den Analysen der nichtmetallischen Einschlüsse der Stäbe lässt sich feststellen dass diese stärker mit Calcium modifiziert sind, als die analysierten Aluminiumoxide der Nahtlosrohrproben. In **Abbildung 3-34** sind die Modifikationsstufen der Einschlüsse der Schliche K5/2-M und K3/2-E durch grüne Linien eingetragen. Diese entsprechen jeweils den Gehalten von Spot 1 des Einschlusses. K3/2-E entspricht einer Modifikation welche wiederum zwischen CA_6 und CA_2 liegt. K5/2-M ist höher modifiziert und entspricht ungefähr einer Modifikationsstufe von CA. Auch diese Calciumaluminat sind sehr hart und spröde, unterliegen jedoch einer geringeren Verformung als die Einschlüsse der Nahtlosrohrproben. Infolge dessen wird die kompaktere Form beibehalten und es ergibt sich keine partikelartige Struktur. Die Schmelzpunkte der Calciumaluminat liegen allerdings noch immer über Gießtemperatur und eine Verflüssigung der Partikel ist somit nicht gegeben.

3.5 Diskussion der Ergebnisse

Zu Beginn der Arbeit wurden in **Kapitel 3.2.2** verschiedene Gießspiegelschwankungen durchleuchtet, die einzelnen Typen definiert und mit Typ I bis Typ IV benannt. Weiterfolgend wurde die Reaktion des Regelsystems der Stranggießanlage CC3 der VASD auf instationäre Bedingungen untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Stopfen umso stärker reagieren muss, je größer die Auslenkung des Gießspiegels ist, um den erforderlichen Stahldurchfluss gewährleisten zu können. Vorblöcke, bei welchen starke Gießspiegelschwankungen aufgetreten sind, wurden gesammelt, den einzelnen Gießspiegelschwankungs-Typen zugeordnet und auf deren makroskopischen Reinheitsgrad überprüft. In **Abbildung 3-42** sind die berechneten Gradienten $\Delta s/\Delta t$ aufgetragen und die Vorblöcke, bei welchen Produktfehler aufgetreten sind, gekennzeichnet.

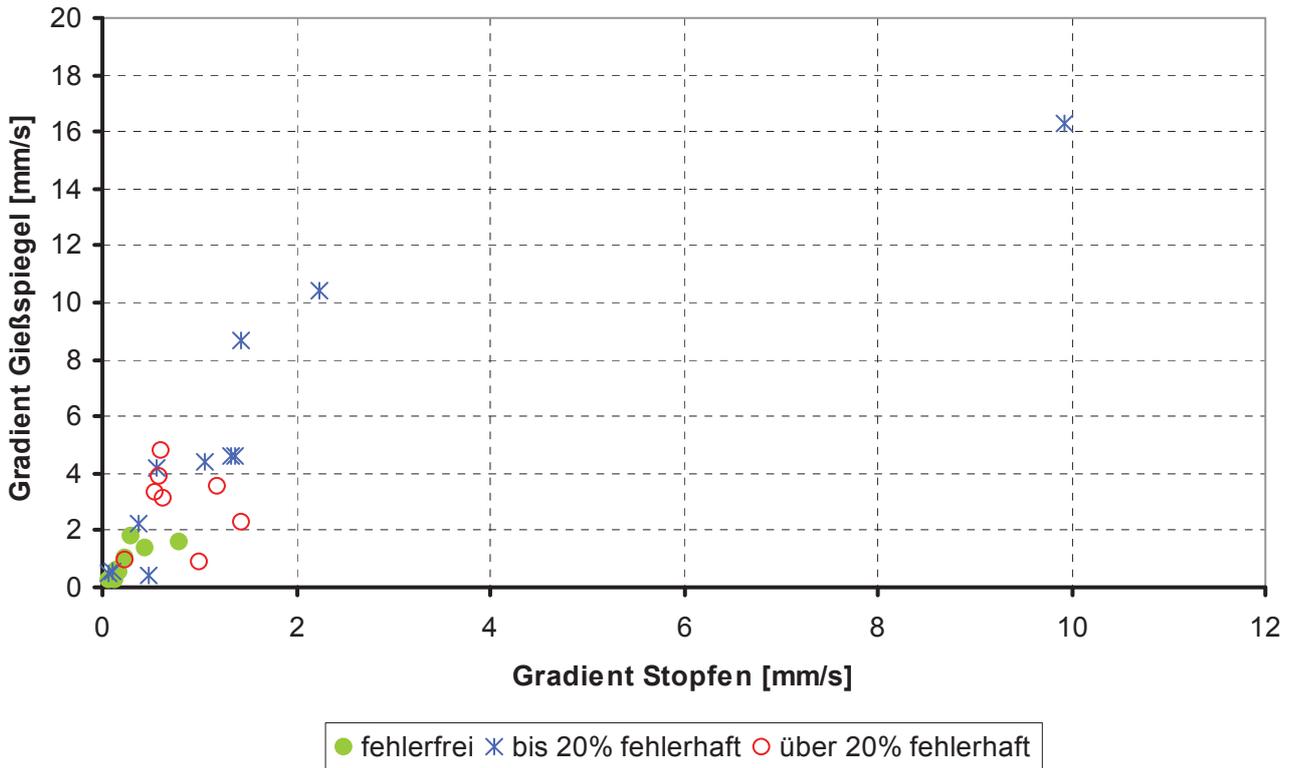


Abbildung 3-42: Fehleranteil der Proben

Wie der **Abbildung 3-42** zu entnehmen, führen alle Proben, deren Gradienten des Gießspiegels Werte größer 2 mm/s aufweisen, zu Fehlern im Produkt. Bei Gradienten kleiner 2 mm/s kann es zu Beeinträchtigungen kommen, jedoch müssen nicht zwingend Produktfehler aus den Gießspiegelschwankungen resultieren. Ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Größe der Gradienten und dem Anteil an fehlerhaften Produkten besteht nicht. Jedoch ist deutlich erkennbar, dass alle Proben, welche hohe Werte in den Gradienten aufweisen, mit Produktfehlern behaftet sind. Weiters wurden die Ergebnisse der Prüfungen mit den Gießspiegelschwankungs-Typen verglichen. Es wurde jedoch kein Vorblock, welcher Typ IV, Gießspiegelschwankungen, typisch für einen bestimmten Durchmesser des ETAs, zuzuordnen ist, ausgewählt. Der Grund dafür ist, dass bei Qualitäten, welche durch diesen ETA vergossen werden, Bedenken gegenüber der Umformeignung zu Nahtlosrohren oder Stäben bestanden haben.

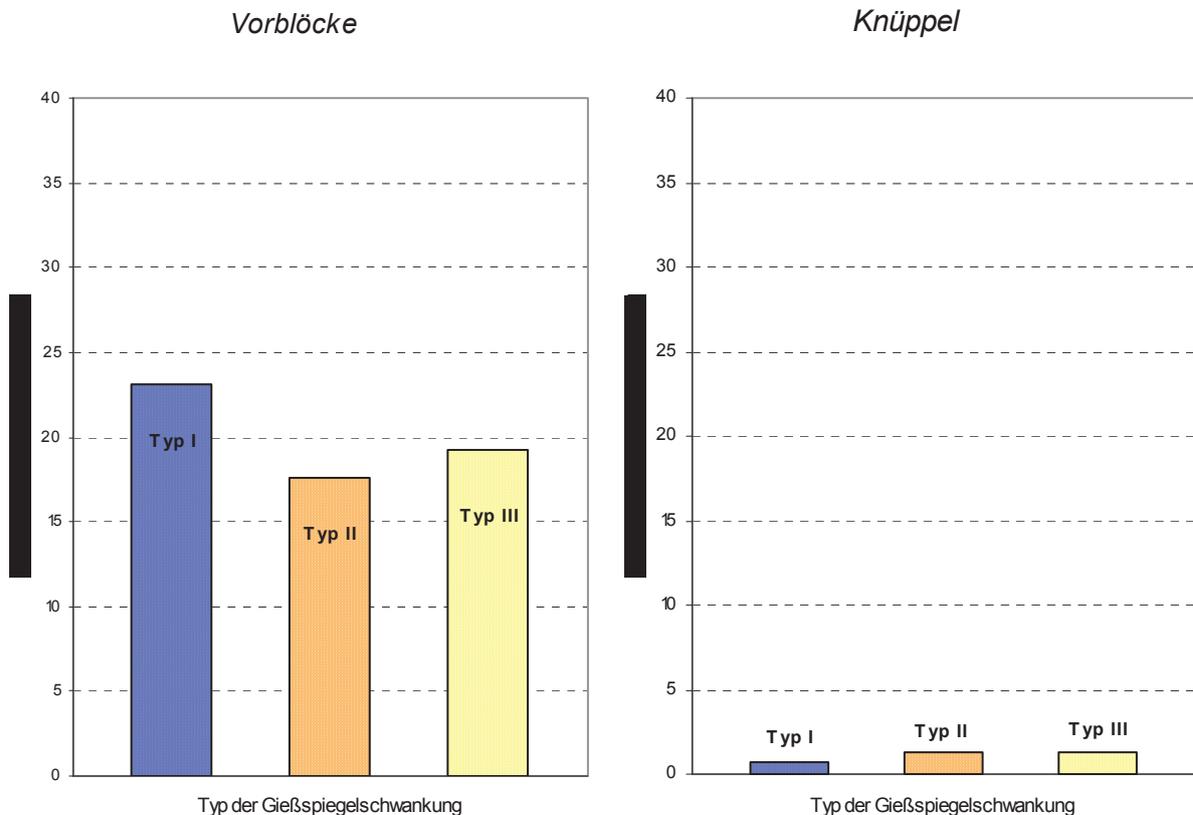


Abbildung 3-43: Anteil an fehlerhaften Proben für jeden Typ

In **Abbildung 3-43** ist der Anteil an fehlerhaften Proben für jeden Typ der Gießspiegelschwankung für die untersuchten Vorblöcke und Knüppel aufgetragen. Bei den Vorblöcken weisen 23% der untersuchten Proben, welche Typ I, Zuschmieren des Gießkanals durch Clogging, zuzuordnen sind, Ungängen auf. 18% der Proben des Typs II, starke Gießspiegelschwankungen durch Clogging, sind fehlerhaft. Ein geringfügig höherer Fehleranteil gilt für Vorblöcke des Typs III, plötzliches Absenken des Stopfens. Die untersuchten Knüppel weisen generell einen geringen Fehleranteil auf. Für Typ I und II liegt ein annähernd gleicher Fehleranteil von 1,3% vor. Es wurde lediglich 1 fehlerhafter Stab aus den geprüften Knüppeln aussortiert, welcher dem Typ I entspricht. An dieser Stelle sei nochmals auf die Weiterverarbeitung der Knüppel verwiesen. Durch Entzunderung und Materialabtrag beim Schälen der Stäbe können oberflächennahe Ungängen entfernt worden sein und sind somit nicht mehr nachweisbar. Auf Basis der Diagramme kann nicht festgelegt werden, welche Art einer Gießspiegelschwankung den größten Einfluss auf den makroskopischen Reinheitsgrad des Produktes ausübt. Weiters ist in **Tabelle 3-II** die maximale Auslenkung des Gießspiegels für jede Probe angeführt. Ein Zusammenhang der

Stärke der Gießspiegelschwankung mit dem Fehleranteil soll anhand von **Abbildung 3-44** überprüft werden.

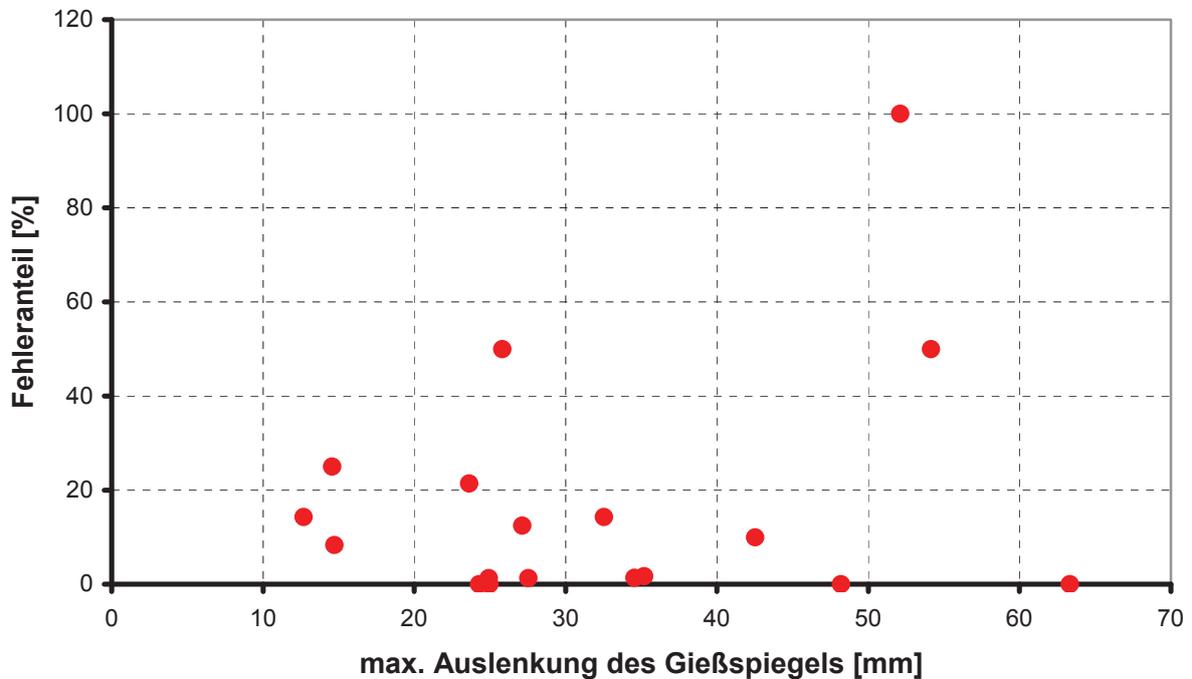


Abbildung 3-44: Zusammenhang der Auslenkung des Gießspiegels und den Anteil fehlerhafter Proben

Auf der Ordinate ist der Anteil der fehlerhaften Probenstücke aufgetragen. Die Abszisse zeigt die maximale Auslenkung des Gießspiegels für jedes Probenstück. Wie aus dem Diagramm hervorgeht, weisen die Proben mit geringen Gießspiegelschwankungen einen Fehleranteil bis zu 50 % auf, während der Fehleranteil der Proben größerer Schwankungen deutlich höhere Werte annehmen kann. Liegen die Auslenkungen des Gießspiegels über 50 mm, so müssen dadurch nicht unbedingt Produktfehler entstehen. Ist dies jedoch der Fall, so kann dies zu enormem Fehlerbefall führen, was einen erheblichen Ausschussanteil nach sich zieht. Weiters wird überprüft, ob die Stahlsorte einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die größte Anzahl der Proben ist Stahlsorte D zuzuweisen. Vergleicht man an Hand der **Tabelle 3-II** die Anzahl der fehlerhaften Proben eines Typs, so kann kein Anzeichen bezüglich eines Einflusses der Stahlsorte festgestellt werden. Ein interessanter Aspekt ist jedoch, dass bei allen Proben verschiedenster Stahlsorten schwach modifizierte Calciumaluminat ähnlicher Zusammensetzung detektiert wurden. Dies widerspricht der Annahme, dass Legierungselemente einer Stahlsorte zu einer spezifische Zusammensetzung der nichtmetallischen Einschlüsse führt. Jedoch muss an dieser Stelle nochmals betont werden,

dass es sich bei allen untersuchten Proben um aluminiumberuhigte und calciumbehandelte Qualitäten handelt. Die Zusammensetzung nichtmetallischer Einschlüsse von Stahlsorten, welche nicht auf diese Weise behandelt werden, wird von den Einschlüssen der gegenwärtigen Proben deutlich abweichen.

Unterschiedliche Produkte stellen unterschiedliche Anforderungen an die Qualität des Werkstoffes. Je nach Verarbeitungsart und Anwendung spielt der makroskopische Reinheitsgrad eine mehr oder weniger bedeutende Rolle. Betrachtet man die Auswirkungen von Gießspiegelschwankungen auf den makroskopischen Reinheitsgrad, so spielt die Weiterverarbeitung des Halbzeugs eine zentrale Rolle. Vor der Überwalzung zu den Probenkörpern erfährt das Halbzeug einen Wiedererwärmungsprozess, wodurch es angesichts der hohen Temperaturen zur Zunderbildung an der Oberfläche kommt. Dessen ungeachtet muss zusätzlich beachtet werden, dass die Stäbe vor der Prüfung geschält wurden und dadurch, mitsamt der Entzunderung, oberflächennahe Ungenzen entfernt wurden und nicht mehr detektierbar sind. Die Proben, deren Zusammensetzung der Stahlsorte C (vgl. **Tabelle 3-III**) entsprechen, wurden sowohl zu Nahtlosrohren, als auch zu Stäben weiterverarbeitet. Weiters trat bei all diesen Proben eine Gießspiegelschwankung des Typs III auf. Die Ergebnisse der Ultraschallprüfung der Rohrprobe ergeben einen Fehleranteil von 25%. Bei den geprüften Stäben errechnet sich ein Fehleranteil von 1,3%. Die maximale Auslenkung des Gießspiegels weist bei den Stäben einen höheren Wert auf. Damit ist die Theorie bekräftigt, dass die gegenwärtigen Materialfehler im Rohrformat leichter nachgewiesen werden konnten, da diese Proben nur einen Erwärmungsprozess und keinen Schälprozess durchliefen. In **Abbildung 3-12** ist der Datenpunkt A markiert, welcher sehr hohe Werte in den Gradienten aufweist. Die maximale Auslenkung des Gießspiegels beträgt für diesen Vorblock 32,5 mm und die Gießspiegelschwankung wurde durch plötzliches Absenken des Stopfens (Typ III) hervorgerufen. Bei der Ultraschallprüfung wurden 2 von 14 Rohren als fehlerhaft befunden. Jedoch erreichte keine Anzeige den Grenzwert, ab welcher das Rohr zu verschrotten wäre. Die Annahme, dass eine solch beträchtliche Auslenkung des Gießspiegels zwingend zum Verschrotten des betroffenen Produktes führen muss, konnte daher nicht bestätigt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Literatur über den Stranggießprozess geht generell von einem schädlichen Einfluss von extremen Gießspiegelschwankungen auf die Produktqualität aus. Auslöser von solchen Gießspiegelschwankungen kann unter anderem das Ablösen von Anlagerungen im Ausgusssystem sein, wodurch plötzlich mehr Stahl in die Kokille fließt. Die gelösten Partikel können in weiterer Folge als makroskopische Einschlüsse im Gussprodukt verbleiben. Durch die Gießspiegelschwankungen kann es zusätzlich zum Einziehen von Gießpulverschlacke und damit zur Bildung von oberflächennahen nichtmetallischen Einschlüssen kommen. Ob ein eindeutiger quantitativer Zusammenhang zwischen Gießspiegelschwankung und Produktqualität besteht, wurde in der Literatur bisher noch nicht gezeigt.

Auch in der industriellen Praxis liegen nur unzureichende Kenntnisse über die Auswirkungen von Gießspiegelschwankungen vor. Um Reklamationen zu vermeiden, wird Halbzeug, bei dessen Vergießen auffällige Gießspiegelschwankungen aufgetreten sind, nicht an den Kunden ausgeliefert. Im Rahmen der gegenständlichen Diplomarbeit, in Zusammenarbeit zwischen voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG und dem Lehrstuhl für Metallurgie an der Montanuniversität Leoben, sollte der Zusammenhang zwischen auffälligen Störungen des Gießspiegels beim Vergießen und dem resultierenden makroskopischen Reinheitsgrad der umgeformten Vorblöcke untersucht werden.

In einem ersten Schritt wurden die Daten des Protokollierungssystems der Stranggießanlage CC3 über einen Zeitraum beobachtet und ausgewertet. Aus den aufgezeichneten Positionen des Gießspiegels und des Stopfens konnten über eine breite Palette von Stahlsorten vier charakteristische Typen von Gießspiegelschwankungen identifiziert werden:

- Typ I: Zuschmieren des Gießkanals durch Clogging
- Typ II: Starke Gießspiegelschwankungen durch Clogging
- Typ III: Plötzliches Absenken des Stopfens
- Typ IV: Gießspiegelschwankungen, typisch für einen bestimmten Durchmesser des ETAs

Tritt eine Störung des Gießspiegels vom Typ I auf, so ist dies immerzu mit einem Gießabbruch verbunden. Eine Verschlechterung des Reinheitsgrades, vor allem der zuletzt vergossenen Vorblöcke, ist sehr wahrscheinlich. Dem Typ II werden starke, wiederkehrende Gießspiegelschwankungen durch Clogging zugeordnet. Es besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit für die Beeinträchtigung des Reinheitsgrades. Bei Typ III wird ein einmaliges, plötzliches Absenken des Stopfens beobachtet. Daraus resultierende Beeinträchtigungen des Reinheitsgrades sind denkbar. Bei Eintauchausgüssen mit 45 mm Durchmesser werden durchwegs stärkere Störungen des Gießspiegels in Form von regelmäßigen Gießspiegelschwankungen beobachtet. Um den Einfluss der einzelnen Typen auf den makroskopischen Reinheitsgrad zu untersuchen, wurden 13 Vorblöcke und 5 überwalzte Knüppel, bei deren Vergießen es zu starken Gießspiegelschwankungen gekommen ist ausgewählt. Das Halbzeug wurde in weiterer Folge zu Nahtlosrohren bzw. Stäben verwalzt, Ultraschall geprüft und der Befall mit Ungäenzen quantifiziert. Einige detektierte Produktfehler wurden schließlich noch mittels Rasterelektronenmikroskop auf deren Morphologie und Zusammensetzung untersucht. Die Fehlerhäufigkeit der untersuchten Stäbe liegt im üblichen Bereich. Bezüglich der geprüften Rohre kann diesbezüglich kein Vergleich mit Proben aus stationären Bedingungen angestellt werden, da die geprüften Qualitäten im Normalfall nicht alle zu Nahtlosrohren ausgewalzt und einer vergleichbaren Überprüfung unterzogen werden. Bei den Ergebnissen der Ultraschallprüfung wurde erwartet, dass die Fehlersignale im Bereich der Auslenkungen des Gießspiegels sichtlich zunehmen. Es konnte jedoch vor allem bei den geprüften Nahtlosrohren kein direkter Zusammenhang von Gießspiegelschwankungen mit auftretenden Fehlern im Produkt nachgewiesen werden. Die geprüften Stäbe weisen generell keinen hohen Fehleranteil auf. Jedoch liegen die detektierten Ungäenzen jeweils im Bereich der Gießspiegelschwankung. Vor allem im Bereich der Oberfläche konnten keine Produktfehler, wie Gießpulver- oder andere nichtmetallische Makroeingüsse, festgestellt werden. Eine maßgebliche Größe für den Anteil an fehlerhaften Produkten stellt demnach die Weiterverarbeitung dar: bei der Warmverformung zu Nahtlosrohren dürfte es, bedingt durch die relativ hohe Vorwärmtemperatur von über 1300°C, zu einer starken Zunderbildung kommen. Durch diese Verzunderung der Oberfläche verschwinden oberflächennahe Fehler

noch vor der Ultraschallprüfung. Die gewalzten Rohre weisen dennoch einige detektierbare Fehler auf. Bei der Verformung zu Stäben sind zwei Erwärmungsprozesse notwendig: einerseits werden die Vorblöcke vor dem Überwalzen zu Knüppeln wiedererwärmt und anschließend durchlaufen die Knüppel vor der Verformung zu Stäben ein zweites Mal einen Erwärmungsprozess. Weiterführend werden die Stäbe vor der Ultraschallprüfung geschält, sodass durch den zusätzlichen Materialabtrag nur mehr wenige Fehler an den Stäben erkennbar sind. Demnach spielt die Weiterverarbeitung des Halbzeugs eine zentrale Rolle, wenn die Auswirkungen von Gießspiegelschwankungen auf den makroskopischen Reinheitsgrad betrachtet werden.

Denkbar ist auch das vollständige Abscheiden von Cloggingprodukten in die Kokillenschlacke. Besonders große Partikel besitzen große Auftriebskräfte und können somit in die Kokillenschlacke aufsteigen und sind im Produkt nicht auffindbar. Jedoch liegen, wie im Literaturteil erwähnt, keine genauen Kenntnisse über das Verhalten von großen Einschlüssen vor. Überdies wurden die Proben im direkten Bereich der Schwankung, das heißt der betroffene Vorblock mit 9 m Länge, ausgewählt. Es muss auch die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass Partikel sehr tief in den Strang geraten und dort in der Schale hängen bleiben. Diese würden in der gegenständlichen Auswahl der Probenkörper nicht erfasst werden.

Im Hinblick auf die einzelnen Typen von Gießspiegelschwankungen konnten keine signifikanten Unterschiede im makroskopischen Reinheitsgrad beziehungsweise im Fehlerbefall der gewalzten Proben erkannt werden. Bezüglich der Typen I und II wurde die erwartete negative Auswirkung auf das Produkt bestätigt. Ein interessanter Aspekt ist, dass auch bei Gießspiegelschwankungen vom Typ III Produktfehler in Form von nicht ausreichend modifizierten Calciumaluminaten gefunden wurden. Dies ist insofern außergewöhnlich, da dieser Typ nicht unmittelbar in Zusammenhang mit Clogging steht. Durch eine einmalige Auslenkung des Gießspiegels und das plötzliche Absenken des Stopfens sollten die Fehler in erster Linie im Bereich des Meniskus entstanden sein und zu einer gleichwertigen Beeinträchtigung der Produktqualität führen.

Um das Ausmaß einer Gießspiegelschwankung zu definieren, wurden als Kenngrößen der Gradient des Gießspiegels und der Gradient des Stopfens bestimmt. Vergleicht man die Größe der Gradienten mit dem Fehlerbefall der untersuchten Proben, so führen vor allem starke Gießspiegelschwankungen immer zu Fehlern am Produkt. Geringe Störungen des Gießspiegels haben hingegen nicht unbedingt einen Einfluss auf die Produktqualität. Aber es können dennoch Schädigungen am Produkt entstehen. Das Ausmaß der Schädigung ist nicht direkt proportional dem Fehlerausmaß am Produkt. Allerdings muss diese Erkenntnis angesichts des eingeschränkten Probenvolumens bezüglich einer statistisch belegten

Aussage mit aller Vorsicht gesehen werden. Jedoch kann folglich keinesfalls davon ausgegangen werden, dass Gießspiegelschwankungen keine negativen Auswirkungen auf das Produkt haben. Daher wurde die gegenwärtige Praxis, auffällige Vorblöcke nicht an die Kunden auszuliefern, bestätigt. Vereinzelt wird als Kriterium für die Entscheidung über eine Auslieferung die maximale Auslenkung des Gießspiegels herangezogen. Auch hier sind die Ergebnisse angesichts der eingeschränkten Probenanzahl mit Vorsicht zu sehen. Jedoch führt eine starke Auslenkung des Gießspiegels offensichtlich mit höherer Wahrscheinlichkeit zu einem hohen Anteil an Ausschuss. Allerdings muss eine starke Störung nicht unbedingt zur Bildung von qualitätsmindernden Ungängen führen. Deshalb ist es kaum möglich, eine bestimmte Auslenkung als Grenzwert, ab welchem zu verschrotten ist, zu definieren. Wenn, müsste dies vor allem, aufgrund von unterschiedlichen Anforderungen an den makroskopischen Reinheitsgrad, produktspezifisch und weiterverarbeitungsspezifisch erfolgen. Ein Überdenken der gängigen Praxis wäre daher nur für Qualitäten sinnvoll, welche keine hohen Anforderungen an den makroskopischen Reinheitsgrad stellen.

Für die metallographischen Untersuchungen an detektierten makroskopischen Einschlüssen wurden Vorblöcke ausgewählt, bei welchen es zu auffallend starken Anzeigen in der Ultraschallprüfung gekommen ist. Die gefundenen Einschlüsse weisen eine beachtliche Länge von mehreren Hundert μm auf. Die Zusammensetzung der Einschlüsse in den Nahtlosrohren liegt im Bereich zwischen $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA6) und $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA2). Die Einschlüsse sind in diesem Fall trotz der erfolgten Calciumbehandlung nur geringfügig modifiziert. Die spröden Makro-Einschlüsse wurden durch die starke Verformung zerstört und liegen im verformten Rohr als langgezogenes Konglomerat einzelner, kleiner Einschlüsse vor. Wie im Literaturteil beschreiben, neigen schwach modifizierte Calciumaluminat noch stärker zum Clogging als reine Aluminiumoxide. Demnach ist der Schluss daraus zulässig, dass die unvollständige Modifikation der Aluminiumoxide zum Auftreten von Clogging geführt hat und somit die gefundenen nichtmetallischen Einschlüsse durch die Ablösung von Anlagerungen entstanden sind. Im Fall der Einschlüsse in den gewalzten Stäben liegen Calciumaluminat mit etwas höherem CaO-Anteil vor. Jedoch sind auch diese Einschlüsse nicht vollständig modifiziert und können somit wiederum das Auftreten von Clogging ausgelöst haben. Um das Auftreten von Clogging zu vermindern, sollten die Prozessparameter hinsichtlich der Calciumbehandlung besser optimiert werden. Da eine Modifizierung von Einschlüssen jedoch nicht als vollständig beherrschbarer Prozess angesehen werden kann, ist die Perfektion des Prozesses nur bedingt erreichbar. Die gegenwärtige Situation stellt sich so dar, dass die Prozessparameter eigentlich so weit als möglich optimiert sind, allerdings kann nicht in jedem Fall eine vollständige Modifizierung der Einschlüsse eingestellt werden. Im Rahmen der metallographischen Untersuchungen

konnten keine Hinweise auf Gießpulverschlacken in den untersuchten Makro-Einschlüsse gefunden werden.

Die durchgeführte Arbeit konnte erstmals quantitativ Zusammenhänge zwischen Gießspiegelschwankungen und dem makroskopischen Reinheitsgrad aufzeigen. Angesichts des großen Aufwands für die durchgeführten Untersuchungen ist der Umfang der Probenanzahl eingeschränkt. Dadurch war angesichts der eingeschränkten statistischen Gesamtheit ein konkretes Beantworten aller Fragestellungen nicht möglich. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Gießspiegelschwankungen Produktfehler auslösen können, aber nicht in jedem Fall. Es ist nicht zulässig die Theorie anzustellen, dass Gießspiegelschwankungen negative Auswirkungen auf einen definierten Bereich haben. Es konnten jedoch Hinweise auf bestehende Zusammenhänge abgeleitet und die gängige Praxis der Nichtauslieferung von Vorblöcken, bei deren Vergießen es zu auffälligen Gießspiegelschwankungen kommt, als richtig bestätigt werden. Wie bereits diskutiert, ist die Ableitung eines konkreten Grenzwertes, ab welchem eine Gießspiegelschwankung zu erheblichen Produkteinbußen führt, wenn überhaupt, nur produktspezifisch und unter Berücksichtigung der Weiterverarbeitung möglich. Dies bietet in Hinblick auf besonders sensible Stahlsorten auch einen Ansatzpunkt für weiterführende Arbeiten.

Literaturverzeichnis

- [1] Müller, P., T. Gröling und R. Rumpf: Einsatz unterschiedlich beschichteter Tauchausgüsse, *Stahl und Eisen* 127 (2007), 10, 41-45
- [2] Javurek, M.: Strömung von Flüssigstahl und Transport von Einschlüssen in einer Stahl-Stranggießanlage, Dissertation, Johannes-Kepler-Universität Linz, 2006
- [3] Jung, H.-P. et al.: Metallurgische und verfahrenstechnische Grundlagen des Knüppelstranggießens von Edelstählen, *Stahl und Eisen* 104 (1984), 4, 197-204
- [4] Vom Erz zum Werkstoff Stahl, Broschüre der voestalpine Stahl GmbH
- [5] Thomas, B. G.: Fluid flow in the mould, *The Making, Shaping & Treating of Steel, Casting Volume*, 11th Edition (2003), The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, 1-41
- [6] Thomas, B. G. et al.: Flow dynamics and inclusion transport in continuous casting of steel, NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference, Tuscaloosa, (2003), 2328-2362
- [7] Thomas, B. G. et al.: Transient fluid-flow phenomena in the continuous steel-slab casting mould and defect formation, *JOM* (2006)
- [8] Thomas, B. G. und L. Zhang: Inclusions in continuous casting of steel, 24th National Steelmaking Symposium, Morelia, Mexico, (2003), 138-183
- [9] Chakraborty, S. und W. Hill: Improvements in steel cleanliness at Great Lakes No. 2 continuous caster, *Steelmaking Conference*, Nashville, Tennessee, (1995), 401-413
- [10] Wolf, M.: The free meniscus problem, *Steel Times International* 16:2 (1992), 37-38
- [11] Lange, R. F.: Untersuchungen zur Bildung und Vermeidung von Ansätzen in Tauchrohren, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technischen Hochschule Aachen, 1995, 1-148
- [12] Schade, J. et al.: Tundish Operations, *The Making, Shaping & Treating of Steel, Casting Volume*, 11th Edition (2003), The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, 1-70

- [13] Rackers, K. G. und B. G. Thomas: Clogging in continuous nozzles, 78th Steelmaking Conference, Nashville, (1995), 723-734
- [14] Cramb, A. W., R. Rastogi und R. L. Maddalena: Nozzle Clogging, The Making, Shaping & Treating of Steel, Casting Volume, 11th Edition (2003), The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, 1-17
- [15] Lechner, H.: Die Kontaktwinkelmessung: Ein Verfahren zur Bestimmung der freien Grenzflächenenergie von Festkörpern, Broschüre der KRÜSS GmbH
- [16] Young, T.: An essay on the cohesion of fluids, Philosophical Transaction of the Royal Society of London (1995), 1-65
- [17] Butt, H. J., K. Graf und M. Kappl: Physics and chemistry of interfaces, Wiley-VHY GmbH Co. KGaA, 2nd Edition (2006)
- [18] Salamang, H. und H. Scholze: Keramik Teil 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften, Springer-Verlag, 1982
- [19] Nadif, M. et al.: Control of steel reoxidation and cc nozzle clogging, IISI Study on Clean Steel, 87-164
- [20] Miki, Y. und B. G. Thomas: Model of inclusion removal during RH degassing of steel, Iron and Steelmaker 24 (1997), No. 8, 31-38
- [21] Thomas, B. G. und H. Bai: Tundish nozzle clogging - Application of computational models, Iron and Steel Society, 18rd Process Technology Division Conference, Baltimore (2001), 895-912
- [22] Tsai, H. T.: Water modeling on the pressure profile in the tundish shroud at Flo-Con, Report No. P86.402 at Inland Steel, Indiana (1986), 1-15
- [23] Heaslip, L. J.: Model study of fluid flow and pressure distribution during SEN injection- Potential for reactive metal additions during continuous casting
- [24] Basu, S., S. K. Choudhary und N. U. Girase: Nozzle clogging behaviour of Ti-bearing Al-killed ultra low carbon steel, ISIJ International 44 (2004), No. 10, 1653-1660
- [25] Burty, M., P. Dunand und J. P. Pitt: Control of DWI steel cleanliness by lanthanum tracing of deoxidation inclusions, ladle slag treatment and a methodical approach, Iron and Steel Society, 80th Steelmaking Conference (1997) , Warrendale, 647-653
- [26] Hayden, R. H. und T. G. Barnes: Tundish sealing with fiberboard panels, 79th Steelmaking Conference (1996), 383-386
- [27] Bai, H. und Thomas B. G.: Effects of clogging, argon injection and continuous casting conditions on flow and air aspiration in submerged entry nozzles, Metallurgical and Materials Transactions B 32B (2001), No. 4, 702-722
- [28] Javoiskij, V. I., S. A. Blisnukov und A. F. Vischkaröv: Nichtmetallische Einschlüsse und Gase in den Stählen, Izdatelstwo, Metallurgiy (1979)

- [29] Ovtchinnikov, S.: Kontrollierte Erstarrung und Einschlussbildung bei der Desoxidation von hochreinen Stahlschmelzen, Dissertation, Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2002, 1-139
- [30] Zhan, L., W. Pluschke und B. G. Thomas: Nucleation and growth of alumina inclusions during steel deoxidation, Iron and Steel Society, 85th Steelmaking Conference, Nashville (2002), 463-476
- [31] Zhang, L. und B. G. Thomas: Alumina inclusion behaviour during steel deoxidation, Associazione Italiana di Metallurgia, 7th European Electric Steelmaking Conference, Venice (2002), 2.77-2.86
- [32] Steinmetz, E. und H.-U. Lindenberg: Oxide morphology during Mn and Mg-Si deoxidation, Arch. Eisenhüttenwesen 47 (1976), 71-76
- [33] Jacobi, H. und K. Wünnenberg: The quantity and distribution of inclusions in cast product, IISI Study on Clean Steel, 209-274
- [34] Juvonen, P.: Effects of nonmetallic inclusions on fatigue properties of calcium treated steels, Dissertation, University of Technologie Helsinki, 2004, 1-102
- [35] Trent, E. M., ISIJ Spec. Report 94 (1967), 11-18, 77-87, 179-184
- [36] Shaw, M. C., N. H. Cook und P. A. Smith: Free machining steel, Trans. ASME, Engin. for Industry 83 (1961), 163-179
- [37] Rubenstein, C., ISIJ Spec. Report 94 (1967), 49-53
- [38] Kiessling, R. und N. Lange: Non-metallic inclusions in steel, Part III, (1997), 74-110
- [39] Buchmayr, B. und J. Mayerhofer: Werkstoffkunde der Stähle, Skriptum an der Montanuniversität Leoben, WS 2000/01
- [40] Duckworth, W. E. und E. Ineson, ISIJ Spec. Report 77 (1963), 87-103
- [41] Wolf, M, Trans. ISIJ 20, (1980), 718-724
- [42] Branion, R. V.: Mold Fluxes for Continuous Casting Iron and Steelmaker 13 (1986), No. 9, 41-50
- [43] Riboud, P.: Eigenschaften und Aufgaben von Stranggießschlacken, Metallurgie des Stranggießens, K. Schwerdtfeger, Stahl und Eisen, 1992, 252-253
- [44] Huemer, K., A. Sormann und G. Frank: Auswirkungen einer Kalziumbehandlung auf die Entstehung und Zusammensetzung von nichtmetallischen Einschlüssen bei der Erzeugung von aluminiumberuhigten Stählen für Langprodukte, BHM 150 (2005), No. 7, 237-242
- [45] Verein deutscher Eisenhüttenleute: Schlackenatlas, 2. Auflage, (1995)
- [46] Krieger, W. und C. Bernhard: Allotherme Stahlerzeugung, Sekundärmetallurgie, Skriptum an der Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Metallurgie, SS 2005

- [47] Lind, M.: Mechanism and kinetics of transformation of alumina inclusions in steel by calcium treatment, Dissertation, University of Technologie Helsinki, 2006, 1-89
- [48] Lind, M. et al.: Mechanism and kinetics of transformation of alumina inclusions in steel by calcium treatment, Acta Metallurgica Sinica 19 (2006), No. 1, 1-8
- [49] Krieger, W. und C. Bernhard: Spezielle metallurgische Prozesstechnik, Skriptum an der Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Metallurgie, SS 2006
- [50] Huemer, K., A. Sormann und G. Wolf: Optimisation of the metallurgical treatment of steel with calcium, EOSC, Aachen, (2006), 257-264
- [51] Andersson, M. et al: Some aspects on grain refining additions with focus on clogging during casting, ISIJ International 46 (2006), No. 6, 814-823
- [52] Baosteel: Influence of calcium treatment on castability of continuous casting molten steel, Technical Report at Baosteel (2007), www.baosteel.com/english_n/tech020702.htm, 24.04.2007
- [53] Reuter: Werkstoffprüfung: Einführung in die Ultraschallprüfung, Veröffentlichung Firma devotec, www.devo-tec.de/data/pdf2/devotec_ultraschall_grundlagen.pdf, 26.03.2008
- [54] Ultraschall-Tauchtechnik, Skriptum an der Universität Stuttgart, IKT-Zerstörungsfreie Prüfung
- [55] Weißbach, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, 12. Auflage
- [56] Schlengermann, U.: Taschenbuch: Ultraschall Werkstoffprüfung, 3. Auflage, Vulkan Verlag, 1992
- [57] Schuurmanns, J. und A. J. J. Van der Weiden: Continuous casting and mould level control, Corus Ijmuiden, Delft Center for Systems and Control
- [58] Spitzer, K.-H.: Prozesskontrolle und Automatisierung beim Stranggießen, Metallurgie des Stranggießens, K. Schwerdtfeger, Stahl und Eisen, 1992, 533-570
- [59] Berthold Industrial Systems: Mould Level Gauge LB 352 - continuous casting mould level measurement, www.berthold.com.au/industrial_pages/LB352.html, 7.02.2008