



Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie

Masterarbeit

Entwicklung hoher Zinkauflagen auf  
kontinuierlich feuerverzinktem Breitband

Philipp Thomas Weilguni, BSc

Juni 2019

NICHTEISENMETALLURGIE  
MONTANUNIVERSITÄT  
A-8700 LEOBEN

Philipp Thomas Weilguni, Bsc.

Juni 2019

## Entwicklung hoher Zinkauflagen auf kontinuierlich feuerverzinktem Breitband

Beim Feuerverzinken von breitem Warmband kommt es zu charakteristischen Oberflächenfehlern, die erst ab einer Zinkauflage von  $600 \text{ g/m}^2$  und einer Bandbreite von über 800 mm vermehrt auftreten. Um diese Fehler zu minimieren, ist im ersten Schritt eine ausführliche Literaturstudie zu den bereits bekannten Untersuchungen zu Fehlern und Phänomenen an der Oberfläche der Zinkschicht durchzuführen. Ebenfalls Teil dieser Recherche soll die Charakterisierung des Strömungsverhältnisses und des Abstreifverhaltens sowie der Einfluss verschiedener Produktionsparameter auf die Zinkschichtdicke des Endprodukts sein.

Ziel dieser Arbeit ist es, aufgrund dieser Erkenntnisse die Fehler anhand von Probenblechen, die diese Phänomene abbilden, zu charakterisieren sowie Produktionsparameter auszuarbeiten, mit denen diese Fehler minimiert beziehungsweise verhindert werden können.

Mithilfe der Durchführung eines geeigneten Betriebsversuchs, der auf Basis der zuvor gewonnenen Erkenntnisse zu erstellen ist, soll die bewusste Provokation beziehungsweise Verhinderung der betreffenden Fehler an der Oberfläche möglich sein. Die in diesem Versuch gewonnenen Proben und Daten sind wiederum im Anschluss systematisch zu untersuchen und die so gewonnenen Ergebnisse sind aufzuarbeiten.

Leoben, Juni 2019

## Danksagung

Zu Beginn der Arbeit gilt es all jenen meinen Dank auszusprechen, die mit ihrer Unterstützung maßgeblich Einfluss auf das Folgende genommen haben.

Ein großes Dankeschön gilt der Firma Wuppermann, im Speziellen Herrn Dr.-Ing. Peter Jongenburger, für die Möglichkeit diese Arbeit zu verfassen und das in mich gesteckte Vertrauen, sowie die Bereitstellung der finanziellen Mittel und Anlagen.

Mein besonderer Dank gebührt der Abteilung Forschung und Entwicklung der Wuppermann Engineering GmbH, Herrn Dipl.-Ing. Dr. Rolf Brisberger, Herrn Dipl.-Ing. Christoph Steiner, Herrn Harald Vasold und Herrn Konstantin Fischak für die Unterstützung während der Erstellung dieses Textes und den damit verbundenen Versuchsdurchführungen und Analysen.

Außerdem darf ich mich bei allen beteiligten Personen der Wuppermann Hungary für die Mithilfe bei der Optimierung der durchgeführten Versuchsprogramme bedanken.

Zusätzlich möchte ich auch der Wuppermann Staal Nederland meinen Dank aussprechen. Besonders Herrn Pim Verdaasdonk für die Bereitstellung das Teilen seiner Erkenntnisse und seine Mithilfe.

Außerdem darf ich meinem Betreuer, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Helmut Antrekowitsch, für seine Anleitung und die Durchsicht meiner Arbeit meinen verbindlichsten Dank aussprechen.

Meinen größten Dank darf ich natürlich meiner Familie aussprechen, ohne deren Unterstützung mein Studium gar nicht möglich gewesen wäre.

## Abstract

The production of continuously hot-dip galvanized strip with a zinc coating of more than 600 g/m<sup>2</sup> and strip widths of more than 800 mm leads to the formation of characteristic defects in different areas of the zinc coating. The aim of this work is to investigate those defects and to identify and limit the causes for their development.

In order to gain a basic knowledge of the equipment used and the complex production parameters involved, a detailed literature study is carried out at the beginning. This research concerns the metallurgical fundamentals, the process used to adjust the coating thickness and various mathematical models and simulations representing the strip galvanizing process. In addition, a comparison of the errors already known and investigated in the literature with the existing ones is to be made.

To counteract these phenomena, the relevant defects will be systematically investigated and further a test program will be developed after the evaluation of the data obtained. This program is intended to illustrate the influence of the surface quality of the starting material on the quality of the metal coating on the final product.

The subsequent investigations include the metallographic evaluation of specimens under the light microscope as well as under the scanning electron microscope. In addition, various parameters such as surface roughness on the starting material and zinc coating thickness on the end product are measured. With these data and the observations from the production tests carried out, it is possible to isolate the causes of defects for both phenomena investigated.

## Kurzfassung

Bei der Erzeugung von kontinuierlich feuerverzinktem Band mit Auflagen über 600 g/m<sup>2</sup> und Bandbreiten von mehr als 800 mm kommt es zur Ausbildung von charakteristischen Phänomenen an verschiedenen Bereichen der Zinkschicht. Ziel dieser Arbeit ist es, diese Defekte zu untersuchen und die Ursachen für deren Entstehung aufzuzeigen und einzugrenzen.

Um Grundkenntnisse über die verwendeten Anlagen und die komplex zusammenwirkenden Produktionsparameter zu erhalten, erfolgt zu Beginn einer ausführlichen Literaturstudie. Im Speziellen betrifft diese Recherche die metallurgischen Grundlagen, den eingesetzten Abstreifprozess zur Schichtdickeneinstellung und verschiedenste den Bandverzinkungsprozess darstellende mathematische Modelle und Simulationen. Außerdem soll ein Vergleich der in der Literatur bereits bekannten und untersuchten Fehler mit den vorliegenden erfolgen.

Um diesen Phänomenen entgegenzuwirken, erfolgt weiters die systematische Untersuchung der betreffenden Fehler und nach der Auswertung der so gewonnenen Daten die Entwicklung eines Versuchsprogramms. Diese Experimente sollen den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit des Vormaterials auf die Qualität des Metallüberzugs am finalen Produkt veranschaulichen.

Die anschließenden Untersuchungen umfassen sowohl die metallographische Beurteilung von Schliffen unter dem Lichtmikroskop als auch im Rasterelektronenmikroskop. Außerdem erfolgt die Messung von verschiedenen Parametern wie Oberflächenrauigkeit am Vormaterial und Zinkschichtdicke am Endprodukt. Mit diesen Daten und den Beobachtungen aus den durchgeführten Produktionsversuchen ist eine Eingrenzung der Fehlerursachen für beide untersuchten Phänomene möglich.

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

## **Affidavit**

I declare in lieu of oath, that I wrote this bachelor thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

.....  
Philipp Thomas Weilguni, Bsc.

Leoben, Juni 2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TECHNISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>2</b>
2.1	Verfahren für das kontinuierliche Bandverzinken .....	2
2.1.1	Elektrolytisches Verzinken .....	2
2.1.2	Feuerverzinken .....	3
2.2	Klassifizierung der Beschichtung.....	6
2.2.1	Rein-Zink (Z).....	6
2.2.2	Galvannealed (ZF).....	10
2.2.3	Galfan® und Galvalume® (ZA und AZ).....	11
2.2.4	Elektrolytischer Zinküberzug (ZE) .....	11
2.2.5	Zink-Magnesium (ZM).....	11
2.3	Zinkbad.....	12
2.3.1	Aufbau .....	12
2.3.2	Badchemie.....	14
2.4	Oberflächenfehler .....	16
2.4.1	Fehlerquellen .....	16
2.4.2	Bananen .....	16
2.4.3	Christmastrees/Absacker .....	17
2.5	Air-Knife.....	19
2.5.1	Aufbau .....	19
2.5.2	Funktionsweise .....	20
2.5.3	Kantenüberhöhung .....	22
2.5.4	Simulation .....	26
2.5.5	Erkenntnisse .....	27
2.6	Simulation dünner Schichten.....	29
2.7	Schichtdickenmessung .....	30
2.7.1	Röntgenfluoreszenzverfahren .....	30
2.7.2	Magnetinduktives Verfahren.....	30
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN.....</b>	<b>32</b>
3.1	Evaluierung des „Status Quo“ vor den Untersuchungen.....	32
3.2	Analyse eines Absackers .....	32
3.3	Analyse eines Bananen-Defekts .....	34
3.4	Schichtdickenmessung .....	38
3.4.1	Durchführung der Schichtdickenanalyse .....	38
3.4.2	Messsystematik .....	39
3.4.3	Lichtmikroskopische Aufnahmen.....	40
3.5	Einfluss der Oberfläche.....	41
3.5.1	Vormaterial .....	41
3.5.2	Übersicht des gesamten Programms .....	42

---

3.5.3	Erzeugen einer definierten Oberfläche .....	42
3.5.4	Verzinken und Analyse .....	43
3.6	Analyse Zinkbad .....	46
3.6.1	Chemische Analyse .....	46
3.6.2	Einschlussanalyse .....	46
3.7	Highspeed-Videos.....	48
3.7.1	Gerätespezifikation .....	49
3.7.2	Beobachtete Bereiche.....	50
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>52</b>
4.1	Messdaten der Zinkschichtdickenmessung .....	52
4.2	Ergebnisse der Rauigkeitsmessung .....	54
4.3	Durchführung der Z600-Produktion mit dem gebeizten und dressierten Material .....	55
<b>5</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>69</b>
<b>10</b>	<b>ANHANG A .....</b>	<b>70</b>
<b>11</b>	<b>ANHANG B .....</b>	<b>72</b>
<b>12</b>	<b>ANHANG C .....</b>	<b>75</b>
<b>13</b>	<b>ANHANG D .....</b>	<b>77</b>

# 1 Einleitung

Durch die steigenden Anforderungen an den Korrosionsschutz in allen Anwendungsgebieten von beschichteten Stahlgütern gibt es fortwährend Bestrebungen diesen Schutz durch die Entwicklung neuer Prozesse oder die kontinuierliche Verbesserung bestehender Verfahren zu gewährleisten. Eine Möglichkeit ist es, die Schichtdicke des Überzugsmetalls zu erhöhen, um die Lebensdauer des finalen Produkts entsprechend zu verlängern. Aus diesem Grund wird bei Anlage der Firma Wuppermann in Judenburg (AUT) Schmalband mit Zinkauflagen von bis zu 1200 g/m<sup>2</sup> erzeugt, was einer Schichtdicke von etwa 84 µm pro Seite entspricht. [1]

Durch die Inbetriebnahme eines des Produktionsstandortes Wuppermann Hungary, im Folgenden WH genannt, für Breitband in Győr (HUN) ergibt sich die Herausforderung, dort ebenfalls Stahlband mit höheren Zinkauflagen zu produzieren. Bei der Wuppermann Staal Nederland, im Folgenden WSN genannt, in Moerdijk (NL) erfolgt bereits die Produktion von breitem Band mit Auflagen von 42 µm pro Seite beziehungsweise einer Gesamtauflage von 600 g/m<sup>2</sup>. Allerdings treten hier charakteristischen Phänomene auf, die auf die hohe Schichtdicke zurückzuführen sind.

Es gilt nun systematische Untersuchungen durchzuführen, um Lösungsansätze für die Beseitigung dieser fehlerhaften Bereiche zu ermitteln. Gleichzeitig sollen die gewonnenen Erkenntnisse dazu dienen, die Fehlerquote zu senken.

Als Basis für die nachfolgenden Untersuchungen erfolgt ein ausführliches Literaturstudium, wobei mehrere Aspekte des Gesamtprozesses im Fokus stehen. Wichtige Eckpunkte dieser Recherche sind die Ausbildung der Zinkschicht im Zuge des kontinuierlichen Feuerverzinkungsprozesses, der Einfluss der Zusammensetzung der Überzugslegierung und die Funktionsweise der verwendeten Abstreifdüsen. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die theoretische Aufarbeitung der bereits publizierten Untersuchungen und Berechnungen zur Schichtdickeneinstellung mit Abstreifdüsen. Auch die in diesem Zusammenhang angeführten typischen Fehler am erstarrten Überzug sollen in Verbindung mit den Defekten bei höheren Zinkauflagen gebracht werden.

Aufgrund verschiedenster Untersuchungen erfolgt eine Vorauswahl aller möglichen Einflussfaktoren für die Entstehung dieser Defekte. Diese Parameter führen in weiterer Folge zur Planung eines Versuchsprogrammes, dessen Durchführung im Zuge einer Produktionsbegleitung und die Auswertung der gesammelten Daten und Proben.

## 2 Technische Grundlagen

In diesem Kapitel sind die für die vorliegende Arbeit notwendigen theoretischen Hintergründe dargestellt. Um das Thema möglichst differenziert betrachten zu können, stehen sowohl anlagentechnische als auch materialwissenschaftliche und messtechnische Punkte im Fokus.

### 2.1 Verfahren für das kontinuierliche Bandverzinken

Zink wird aus zweierlei Gründen als Korrosionsschutz für Stahl verwendet. Einerseits wirkt die Zinkschicht wie eine Barriere als Schutz vor korrosiven Umgebungsmedien und andererseits, aufgrund der Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe, als galvanischer Korrosionsschutz indem Zink im leitenden Kontakt mit Stahl als Opferanode agiert. [2]

Um die gewünschte Zinkschicht auf den Grundwerkstoff aufbringen zu können, erfolgte die Entwicklung verschiedenster Verfahren und Zinklegierungen. Diesen Beschichtungstechniken liegen zwei verschiedene Mechanismen zu Grunde, das Feuerverzinken und das elektrolytische Verzinken. [3]

Bei zweiterem gibt es noch eine weitere Unterteilung. Es kommen hier sowohl diskontinuierliche als auch kontinuierliche Verzinkungsprozesse zum Einsatz. Die größten Anwendungsgebiete für verzinkten Stahl liegen in der Bau- und in der Automobilindustrie. Hier finden unter anderem verschiedenste Verfahren zur Profilierung Verwendung. Dementsprechend gibt es eine hohe Nachfrage nach verzinkten Stahlblechen als Vormaterial. Für die Produktion dieser Stahlbleche löst das kontinuierliche Feuerverzinken immer mehr das kontinuierliche elektrolytische Verzinken ab. Die anfänglichen Vorteile bezüglich Gleichmäßigkeit der Schichtdicke und die erreichbaren Toleranzfeldbreiten sind durch eine entsprechende Weiterentwicklung in der Anlagentechnik beim Feuerverzinken mittlerweile durchaus erreichbar. [2]

#### 2.1.1 Elektrolytisches Verzinken

Hierbei scheiden sich elektrochemisch feine Zinkkristalle am Stahlband ab. Durch diesen Prozess können Schichtdicken von 2,5–10 µm realisiert werden, wobei es durch dieses Verfahren zu keinen Änderungen im Gefüge des Stahls kommt. Bei den modernsten Anlagen sind Durchsatzgeschwindigkeiten von bis zu 180 m/min und Bandbreiten von 1950 mm bei Banddicken im Bereich von 0,4–3,0 mm derzeit das Maximum. Das Stahlband dient in diesem Prozess als Kathode und wird durch eine wässrige Lösung von Zink-Ionen geführt. Der Elektrolyt hat dabei eine Temperatur von 50–75 °C, wodurch es weder zu einer

Legierungsbildung von Eisen und Zink noch zu einer Wärmebehandlung des Stahls kommt. Die erreichbare Schichtdicke wird durch die Stromdichte und die Zeit im Kontakt mit der Lösung eingestellt. Abbildung 1 zeigt eine Anlage für das kontinuierliche elektrolytische Bandverzinken. [3–5]

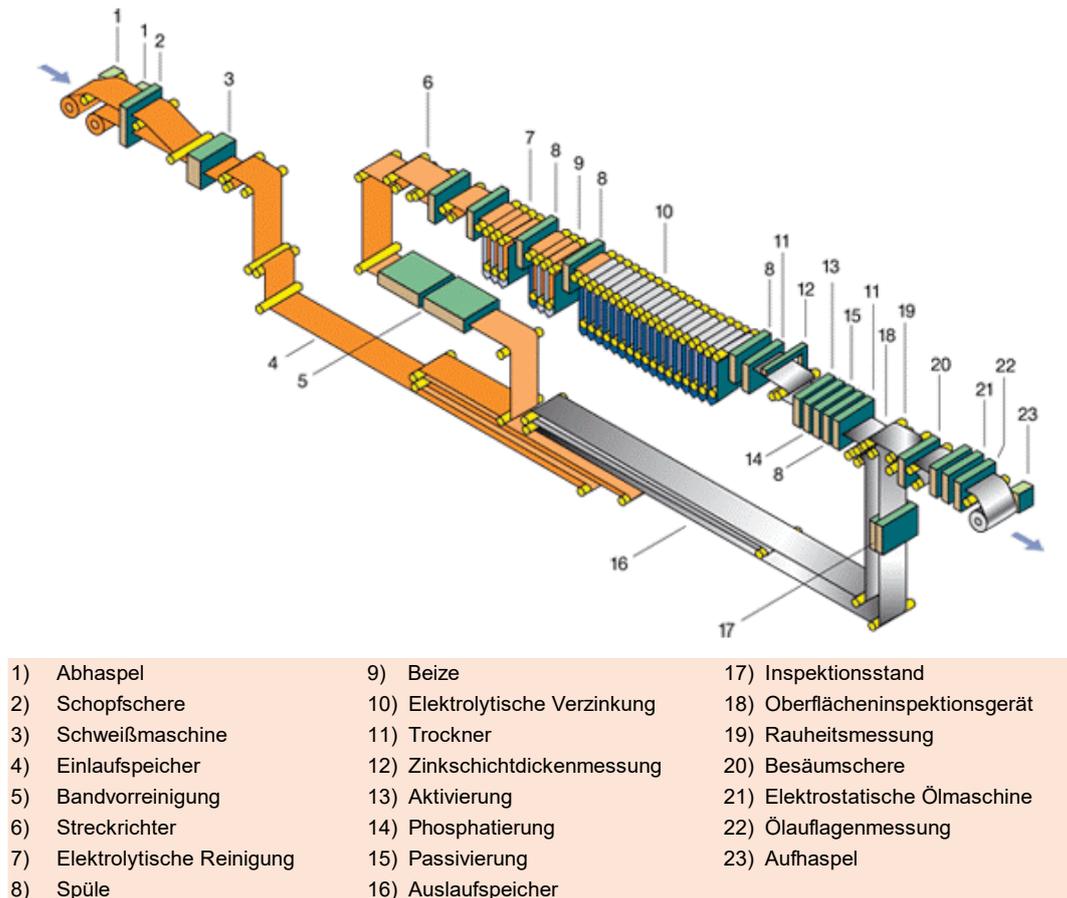


Abbildung 1: Kontinuierliche elektrolytische Bandverzinkungsanlage [5]

### 2.1.2 Feuerverzinken

Beim Feuerverzinken bildet sich die Zinkschicht durch das Eintauchen des Stahlbandes in ein Bad aus flüssigem Zink. Abhängig von der Legierungszusammensetzung des Bades kommt es zur Ausbildung verschiedener Phasen im erstarrten Metall. Eine nähere Betrachtung dieser Zusammenhänge erfolgt im Kapitel 2.2.

Für den Großteil des weltweit produzierten verzinkten Blechs dient kaltgewalztes Band als Vormaterial. Bei diesen Prozessen lassen sich Bandgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/min und hochwertigste Oberflächen und Maßgenauigkeiten realisieren. Die nach dem Abhaspeln zu einem Endlosband verschweißten kaltgewalzten Stahlbänder werden gerichtet, vorgereinigt und gebeizt. Danach muss eine Glühbehandlung bei etwa 650–700 °C in

reduzierender Atmosphäre erfolgen, um wieder eine optimale Gefügestruktur einzustellen. Außerdem erfolgt im Ofen durch die Reduktion des Eisenoxids auf der Bandoberfläche die Aktivierung des Bandes für den Verzinkungsprozess. Dieses Verfahren ist nur für niedriglegierte Stähle zulässig. Bei höherlegierten Stählen, insbesondere bei solchen, die Silizium, Mangan oder Aluminium enthalten, sind die Anforderungen an den Glüh- und Aktivierungsprozess umfassender. Da diese Stahlsorten für den Verzinkungsprozess bei Wuppermann und somit für die vorliegende Arbeit keine Bedeutung haben wird darauf nicht näher eingegangen. Nach dem Glühen und dem Abkühlen des Bandes auf etwa 450–460 °C taucht das Material in die Zinkschmelze. Im Anschluss erfolgt das Abkühlen und nach mehreren Qualitätskontrollen und Walzschritten die Auftrennung des Endlosbandes und das Aufhaspeln zu Ringen. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau einer kontinuierlichen Feuerverzinkungsanlage für kaltgewalztes Band. [2, 6]

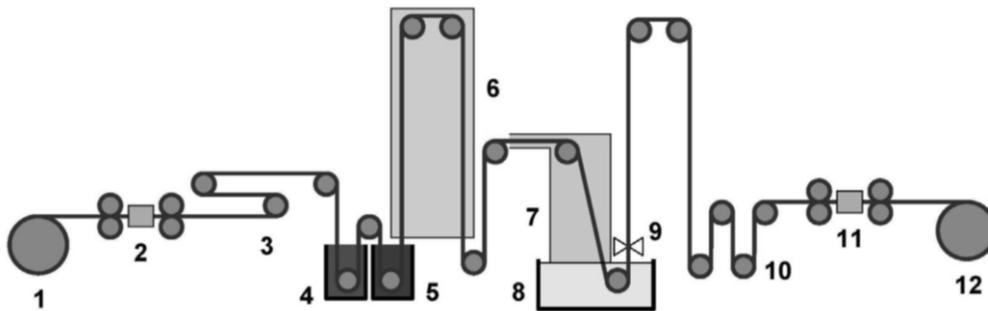


Abbildung 2: Kontinuierliche Feuerverzinkungsanlage für kaltgewalztes Band. 1. Abhaspel, 2. Schweißmaschine, 3. Streckrichter, 4. Entfettung, 5. Beize, 6. Glüheinrichtung, 7. Oberflächenaktivierung, 8. Zinkbad, 9. Abstreifdüsen, 10. Richten, 11. Schere, 12. Haspel [1]

Bei Wuppermann kommt jedoch nicht dieser Prozess zum Einsatz, denn hier dient warmgewalztes Band als Einsatzmaterial. Dadurch ist der Glühofen zur Einstellung eines rekristallisierten Gefüges obsolet, wodurch sich Einsparungen in der Anlagenkomplexität und in den Produktionskosten ergeben. Warmgewalzte Bleche haben zwar wesentlich breitere Dickentoleranzen, diese können aber durch ein entsprechendes Dressiergerüst im Prozess an die Toleranzbereiche von kaltgewalztem Material angenähert werden. Aufgrund dieser Tatsache ist der Einsatz von verzinktem Material auf der Basis von warmgewalztem Vormaterial nicht mehr auf die Baubranche beschränkt. Auch Strukturbauteile für die Automobilindustrie und weitere Anwendungen mit erhöhten Anforderungen an geometrische Toleranzen lassen sich somit realisieren. Damit tritt dieses Produkt in gewissen Märkten in Konkurrenz zur teureren kaltgewalzten Alternative, da die Produktionskosten im Vergleich um bis zu 30 % geringer sind. [7]

Im Heat-to-Coat Prozess ist vor dem Eintauchen des Bandes in die Zinkschmelze ebenfalls ein Ofen vorgesehen. Dieser dient aber nicht dazu die Gefügeeigenschaften des Stahls wesentlich zu ändern, sondern soll in einer  $H_2/N_2$ -Atmosphäre zum einen die Eisenoxide reduzieren und zum anderen das Band durch mehrere Induktionsspulen auf  $450\text{ °C}$  aufwärmen. Diese Temperatur ist so gewählt, dass sich gemeinsam mit der durch Zinkaustrag abgeführten Wärmemenge und der benötigten Erwärmungs- und Schmelzenergie für die kontinuierlich chargierten Zinkblöcke ein Temperaturgleichgewicht einstellt und so die Badtemperatur möglichst konstant bei etwa  $420\text{ °C}$  verweilt. Eine weitere Besonderheit ist, dass sich aus Platzspargründen Bandeinlauf und Bandauslauf auf derselben Seite des Zinkpots befinden. Somit lässt sich durch diese kompakte Bauweise die Länge der Anlage fast um die Hälfte reduzieren. In Abbildung 3 ist das genaue Design der seit Ende 2016 produzierenden Anlage bei Wuppermann Hungary zu sehen. [8]

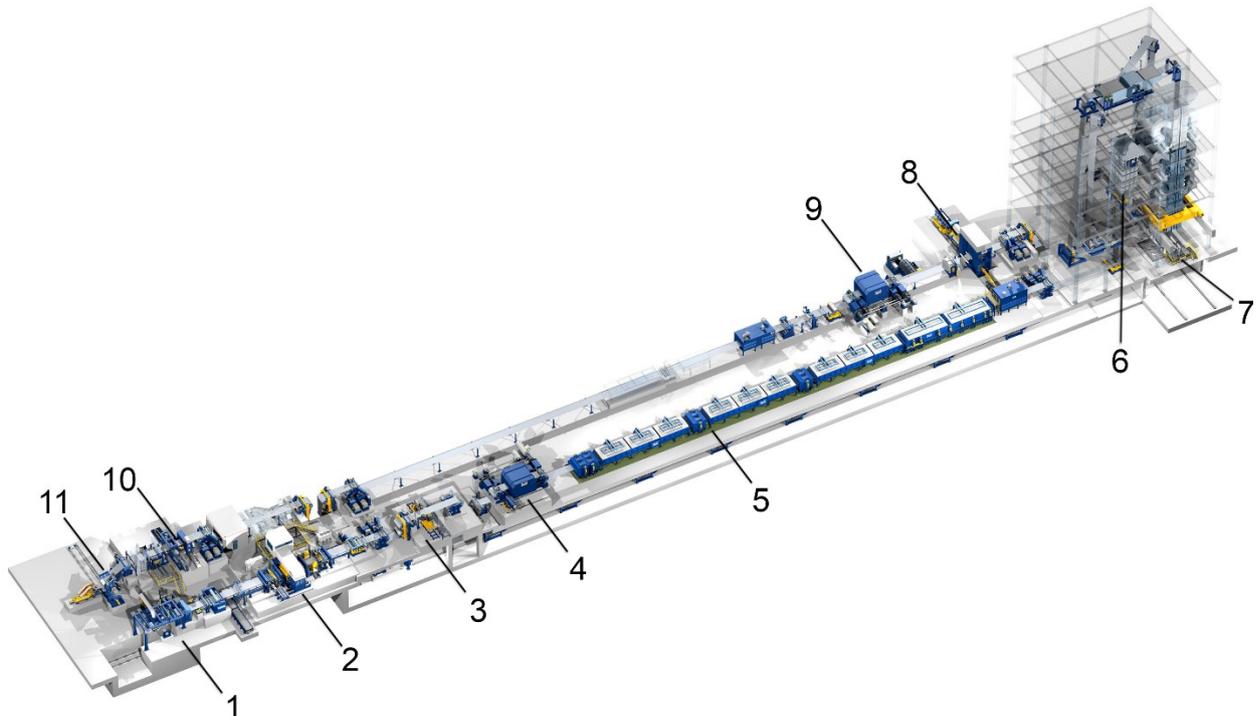


Abbildung 3: „Heat-to-Coat“-Beiz- und -Verzinkungsanlage von Wuppermann Hungary. 1) Abhaspel, 2) Schweißmaschine, 3) Streckrichter, 4) Zunderbrecher, 5) Beize, 6) Ofen, 7) Zinkbad, Düsenabstreifer, Kühlstrecke, 8) Dressiergerüst, 9) Passivierung, 10) Schere, 11) Haspel [8]

Die Bandvorbereitung dieser Anlage zeigt keine allzu großen Unterschiede im Vergleich zu den konventionellen Anlagen. Auch hier entsteht durch das Aneinanderschweißen einzelner Ringe ein Endlosband, welches entsprechend gerichtet, entzündert und gebeizt wird. Nach dem Schmelztauchverzinken erfolgt in der Luftkühlstrecke die Erstarrung des Materials. Im Bandauslauf kommt es nochmals zur Oberflächenveredelung und zur Passivierung des

Materials. Nach der Trenneinrichtung erfolgt die Beprobung, sowie das erneute Haspeln des Bandes und die Verpackung. [8]

## 2.2 Klassifizierung der Beschichtung

Seit den Anfängen des großtechnischen kontinuierlichen Bandverzinkens in den 1950er Jahren herrscht ein steter Wettbewerb zwischen den einzelnen Produzenten. Diese Konkurrenz umfasst weite Teile des gesamten Herstellungsverfahrens, wie den Prozess des Verzinkens an sich, die gesamte Anlagenperipherie und die Qualität des Endprodukts. Speziell in der Zeit von 1970 bis 1985 lag der Fokus vermehrt auf der Entwicklung von verschiedenen alternativen Überzugslegierungen, jedoch hatten alle diese Legierungen Zink als Basis. Die Entwicklung des kontinuierlichen Feuerverzinkens für kaltgewalztes Band brachte ab 1985 nochmals neue Legierungskonzepte mit sich, wobei bis heute nur mehr wenige technisch relevant sind. [9]

### 2.2.1 Rein-Zink (Z)

Da zwischen Zink und Eisen eine diffusionsgesteuerte Reaktion stattfindet, welche die Bildung verschiedener Fe-Zn-Phasen zur Folge hat – vgl. Galvannealed (ZF) – und diese sich negativ auf nachgeschaltete Umformprozesse auswirken, erfolgt eine Zugabe von etwa 0,2 Massen-% Aluminium. Durch diesen Legierungsbestandteil kommt es wiederum zur Bildung komplexer intermetallischen Phasen, welche unter anderem als Inhibitorschicht wirken. Direkt an der Oberfläche des Stahls bildet sich eine Eisen-Aluminium-Hemmschicht mit etwa 200 nm. Diese intermetallische Lage verhindert die Diffusion von Eisen in den Zinküberzug und somit die Bildung der unerwünschten Fe-Zn-Phasen. Abbildung 4 zeigt die auftretenden Phasen im ternären Phasendiagramm. [6, 9]

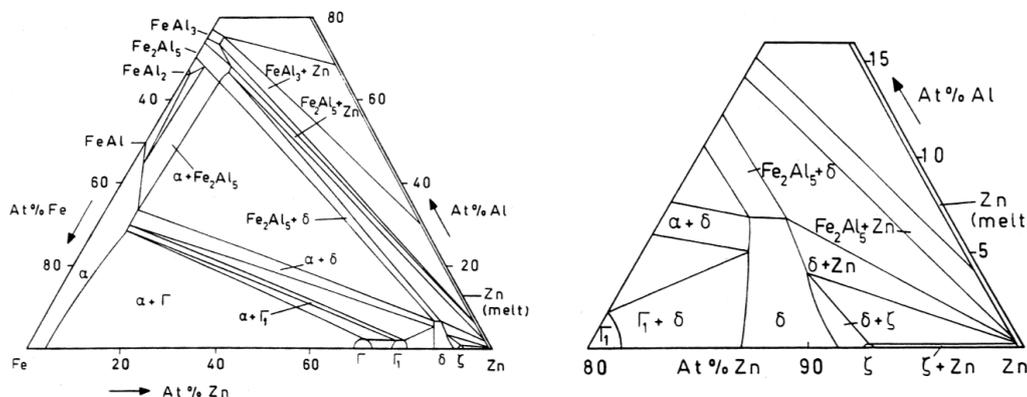


Abbildung 4: Isothermer Schnitt des ternären Zn-Fe-Al-Phasendiagramms (links) und die Zn-reiche Ecke (rechts) bei 450 °C [6]

Abhängig vom Aluminiumgehalt bilden sich zumeist Zeta- ( $\zeta$ ), Delta- ( $\delta$ ) oder  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ -Phasen als Hemmschicht. Am schnellsten erfolgt hierbei aufgrund der Reaktionskinetik die Formation der  $\zeta$ -Phase. Diese ist aber mit der  $\alpha$ -Fe-Phase nicht im Gleichgewicht, wodurch die Umwandlung beziehungsweise die Bildung der  $\delta$  und der  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ -Phase auch bei niedrigen Aluminiumgehalten begünstigt wird. Erst durch deren Bildung stabilisiert sich die Inhibitorschicht, wobei deren exakte Zusammensetzung von der in der Schmelze gelösten Menge an Aluminium abhängt. Die maximale Wirkung des Inhibitors wird in diesem Zusammenhang durch die Eta-Phase ( $\eta$ ) erreicht. Diese kann sich bei ausreichenden Aluminiumgehalten in der Schmelze in der kurzer Zeit ausbilden und gewährleistet so die geforderte Inhibition. Die entsprechende Nomenklatur für diese Phase ist  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_x$ . Um diese zu erhalten ist laut dem ternärem Phasendiagramm in Abbildung 5 eine Menge von etwa 0,15 Massen-% Aluminium nötig. [6]

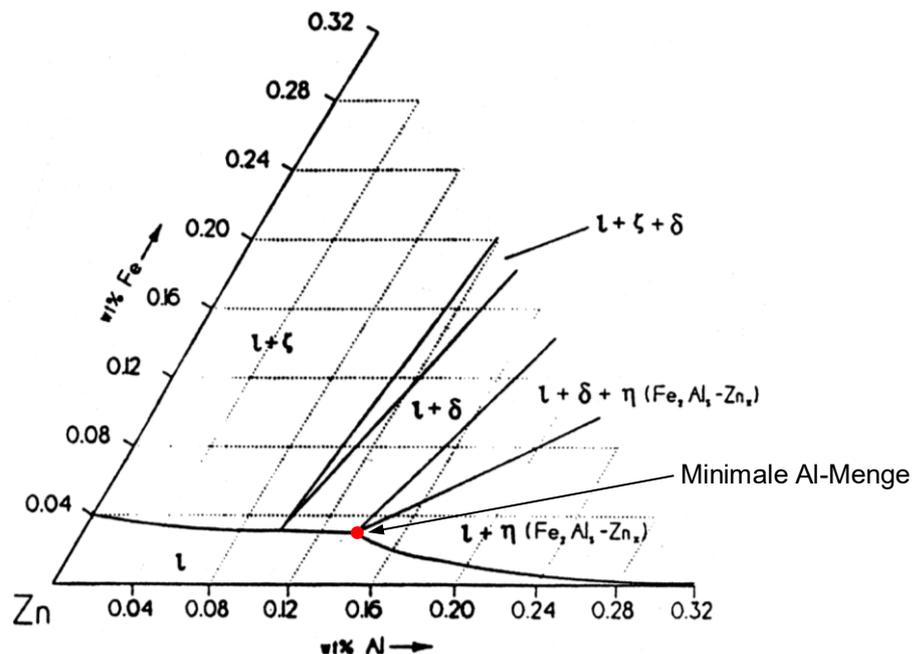


Abbildung 5: Isothermer Schnitt bei 460 °C im Bereich der Überzugslegierung des ternären Zn-Fe-Al-Phasendiagramms [6]

Dieser Wert ist allerdings unter den tatsächlichen Bedingungen nicht realistisch, da in der Produktion wesentlich höhere Abkühlraten herrschen und daher nicht von einer im Gleichgewicht erstarrten Schmelze auszugehen ist. Außerdem ist ein Teil des in der Schmelze vorliegenden Aluminiums bereits als Partikel in Form von intermetallischen Verbindungen ausgeschieden und steht daher nicht mehr für die Inhibitorschicht zur Verfügung. Ist der Aluminiumgehalt allerdings zu hoch, kommt es zu charakteristischen Oberflächendefekten und Einschränkungen in den Verformungseigenschaften des Endprodukts. So ergibt sich ein



Hier lässt sich erkennen, dass es in der Inhibitorschicht zu einer Anreicherung von Aluminium kommt. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 8 ein am Rasterelektronenelektroskop bei Wuppermann aufgenommenes Mapping der häufigsten Elemente im Bereich der Hemmschicht.

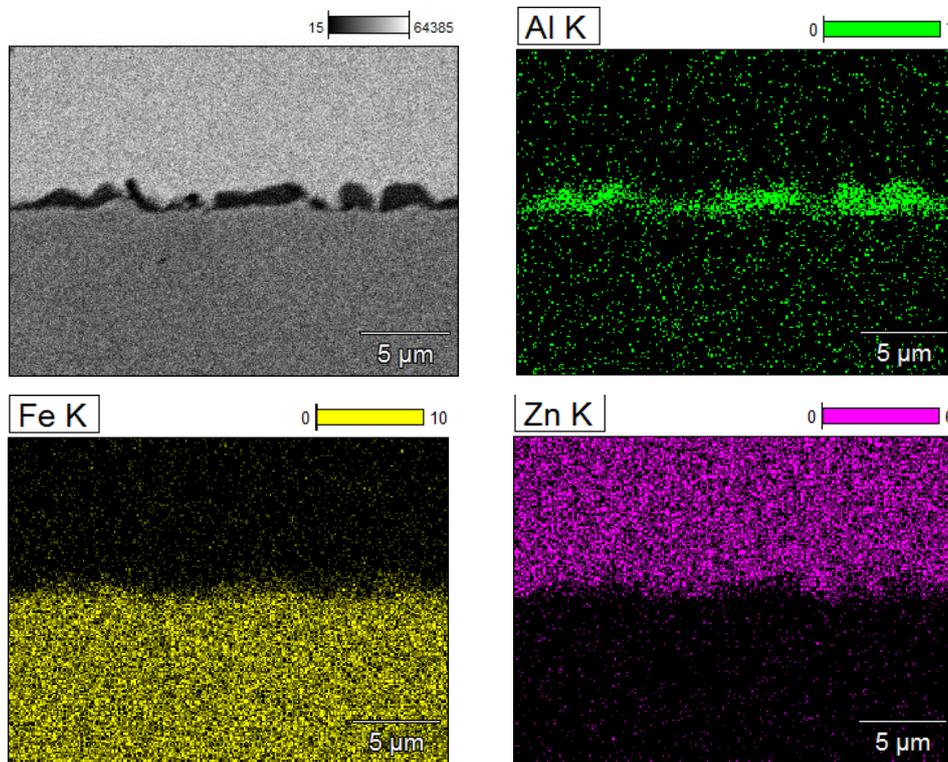


Abbildung 8: Mapping der Elemente Al, Fe und Zn im Bereich der Hemmschicht [13]

Auf dieser Hemmschicht erstarrt im Anschluss die Zinkschicht, deren Wachstumsgeschwindigkeit und Zusammensetzung ebenfalls von der Zusammensetzung der vorliegenden Schmelze abhängt. Diese Daten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. [6]

Tabelle 1: Zusammensetzung und Wachstumsgeschwindigkeit der auf der Hemmschicht aufwachsenden Überzugsstruktur [6, 12]

Massen-% Al	Gleichgewichtsphase	Chemische Formel	Vorliegende Phasen	Wachstumsgeschwindigkeit [µm/s]
< 0,100	ζ	FeZn <sub>13</sub>	ζ/δ/Γ'/ Γ	Bis zu 10
0,100–0,135	δ	FeZn <sub>10</sub>	ζ/δ/Γ'/ Γ	~1
0,135–0,140	η	Zn(Fe)	Großteils ζ	ζ ~ 0,5; η ~ 0,05
0,140–0,145	η	Zn(Fe)	ζ und η	ζ ~ 0,1; η ~ 0,05
0,145–0,150	η	Zn(Fe)	Großteils η	η ~ 0,05
> 0,150	η	Zn(Fe)	η	η ~ 0,05

Der Aluminiumgehalt in der Schmelze erhöht die Reaktionszeit zur Bildung von Fe-Zn-Partikeln und ermöglicht so erst ab einem Gehalt von 0,15 Massen-% Al in der Schmelze das Aufwachsen einer homogenen  $\eta$ -Phase. [6]

Die auf der Hemmschicht aufbauenden Strukturen bestehen oftmals aus sehr großen Körnern, den sogenannten Zinkblumen. Diese sind  $\eta$ -Dendriten und in ihrer Größe von den Abkühlbedingungen und den vorhandenen Legierungselementen abhängig. Da in manchen Anwendungen die Ausbildung dieser makroskopisch erkennbaren Effekte gewünscht ist, erfolgt bei diesen Produkten die Zugabe von bis zu 0,04 Massen-% Blei in die Zinkschmelze. Antimon und Wismut wirken sich ähnlich auf die Erstarrungsstruktur der finalen Oberfläche aus. Durch die Segregation dieser chemischen Elemente an der Erstarrungsfront vermindert sich die Oberflächenspannung des flüssigen Zinks signifikant, sodass es zum Wachstum dendritischer Strukturen mit Durchmessern von bis zu mehreren Zentimetern kommt. Beim kontinuierlichen Bandverzinken ist die Ausbildung dieser Zinkblumen jedoch unerwünscht und so wird von einer Behandlung der Schmelze mit den genannten Legierungselementen abgesehen. Die so entstehenden Zinkkörner sind dennoch im Lichtmikroskop durch entsprechende Präparation beziehungsweise durch den Einsatz eines Polarisationsfilters, wie in Abbildung 9 dargestellt, gut erkennbar [6]

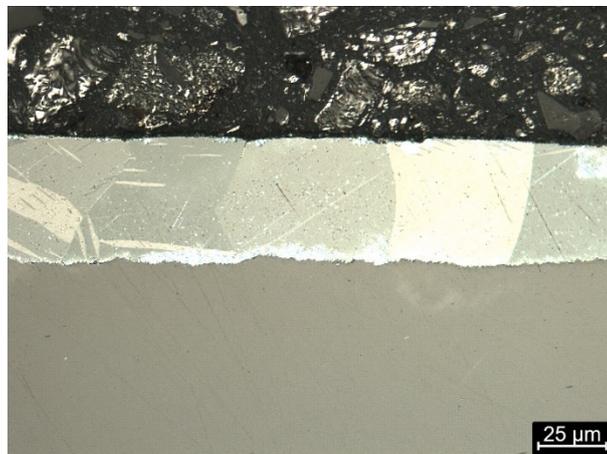


Abbildung 9: Zinkschicht eines Z600 Überzugs mit 500-facher Vergrößerung unter Verwendung eines Polarisationsfilters, aufgenommen im Zuge der durchgeführten Untersuchungen

### 2.2.2 Galvannealed (ZF)

Bei diesem Überzug erfolgt nach dem Verzinken für wenige Sekunden eine Wärmebehandlung des Bandes bei 500–530 °C, um die Zinkschicht zu einer Eisen-Zink-Schicht mit einem Eisengehalt von etwa 10–12 Massen-% umzuwandeln. Um

diese Reaktion in diesem kurzen Zeitraum zu gewährleisten, muss der Aluminiumgehalt der Schmelze im Bereich von 0,10–0,14 Massen-% liegen. Gehalte in diesem Bereich sind notwendig, um eine haftvermittelnde Schicht auf der Stahloberfläche zu bilden, diese darf allerdings die anschließende Diffusion des Eisens in die Zinkschicht im Zuge der Glühbehandlung nicht behindern. Die entstehende Fe-Zn-Schicht hat eine Dicke von etwa 10 µm. [9, 14]

Der „Galvannealed“-Überzug bietet Vorteile in der Lackierbarkeit, dem Korrosionsverhalten und bei der Schweißbarkeit. Allerdings ist diese intermetallische Schicht sehr spröde und neigt dadurch im Zuge von Umformungen zum Abplatzen. [9]

### 2.2.3 Galfan® und Galvalume® (ZA und AZ)

Durch Legierungsentwicklungen ab den 1960er Jahren experimentierte man auch mit höheren Aluminiumgehalten, was den Korrosionsabtrag im Vergleich zu Rein-Zink erheblich verringern sollte. Als erste Entwicklungsstufe fand so Galvalume® in einigen Produkten Anwendung. Diese Legierung besteht aus etwa 55 Massen-% Aluminium und hat zwar Vorteile bezüglich des Korrosionsabtrags, allerdings ist die Fernwirkung des Überzugs signifikant schlechter als bei reinem Zink. Durch eine Verminderung des Aluminiumgehaltes auf etwa 5 Massen-% – der Galfan® Legierung – wird ein zufriedenstellender Kompromiss aus Korrosionsabtrag und Fernschutzwirkung erreicht. [9]

### 2.2.4 Elektrolytischer Zinküberzug (ZE)

Dieser hat im Vergleich zum reinen Zinküberzug keine nennenswerten Gehalte an Legierungselementen. Auch bezüglich der Struktur, der Oberflächenqualität und dem Verhalten bei der Weiterverarbeitung ist die elektrolytisch aufgebraute Zinkschicht den feuerverzinkten Oberflächen überlegen. Gegen den elektrolytischen Überzug spricht allerdings das höhere Preisniveau. Aus diesem Grund hat sich der prozentuelle Anteil dieses Produkts in den letzten Jahren kontinuierlich vermindert, wobei jedoch die absolute Menge in etwa konstant bleibt. [9]

### 2.2.5 Zink-Magnesium (ZM)

Zink-Aluminium-Magnesium-Überzüge sind seit Ende der 1990er Jahre Gegenstand der Forschung. Durch die Verwendung von Magnesium als Zusatz kommt es zu einer Reihe neuer Herausforderungen in der Verarbeitung. Um diesen entgegenzuwirken, kam es in den letzten Jahren zur Entwicklung einer großen Zahl an neuen Überzugslegierungen, mit

verschiedensten Eigenschaften. Vor allem für die Automobilindustrie ist dieses neue Legierungskonzept durchaus von Interesse, da speziell die Korrosionsbeständigkeit positiv beeinflusst wird. Weitere Vor- und Nachteile lassen sich aufgrund der großen Anzahl verschiedener Zusammensetzungen nicht pauschal erkennen. Grundsätzlich kann man allerdings zwischen untereutektischen, eutektischen und übereutektischen Legierungen entscheiden. Der eutektische Punkt liegt im ternären System Zn-Mg-Al bei 93,6 Massen-% Zink, 3,9 Massen-% Aluminium und 2,4 Massen-% Magnesium. Ein Überblick der gängigen Legierungskonzepte ist in Tabelle 2 zu sehen. [2, 15]

Tabelle 2: Aufstellung der gängigen ZM-Legierungen [15]

Produktname	Massen-% Al	Massen-% Mg	Zusätzliche Elemente
Super Zinc®	4,5	0,1	
DYMAZINC®	0,2	0,5	
Super Dyma®	11	3	0,2 Massen-% Si
MagiZinc™	1-2	1-2	
ZAM®	6	3	

## 2.3 Zinkbad

Mit den gestiegenen Anforderungen an die Produkteigenschaften feuerverzinkter Bänder, insbesondere an die Oberflächenqualität, steht auch das korrekte Badmanagement im Zuge der Prozessüberwachung immer mehr im Fokus. Neben physikalischen Parametern, wie dem Aufheizverhalten und der Temperatureinstellung der flüssigen Schmelze, ist vor allem die chemische Zusammensetzung des flüssigen Metalls und die damit einhergehende Verbindungsbildung von fundamentaler Bedeutung [16]. Im Folgenden wird sowohl auf Anlagentechnik als auch auf die wichtigsten chemischen Reaktionen Bezug genommen.

### 2.3.1 Aufbau

Die Zinkbäder aller drei Anlagen bei Wuppermann haben dasselbe Design, dass in ähnlicher Form bei allen kontinuierlichen Feuerverzinkungsanlagen Verwendung findet. Lediglich die Anzahl der Rollen im Bad kann je nach Anlagentyp variieren. Abbildung 10 zeigt den grundsätzlichen Aufbau dieses Elements.

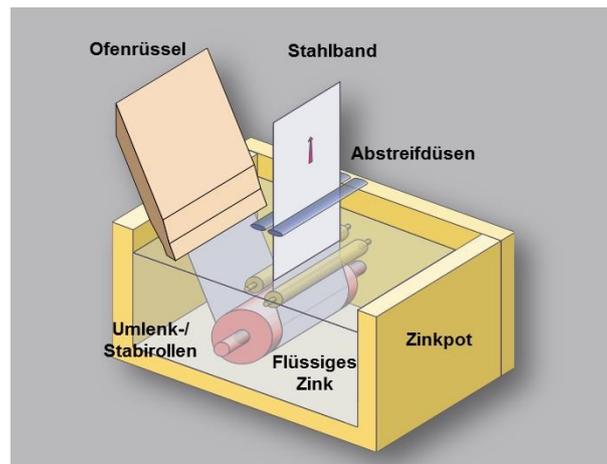


Abbildung 10: Aufbau eines Zinkbades [17]

- Ofenrüssel

Der Ofenrüssel stellt das Verbindungselement zwischen Ofen und Schmelze dar, da die metallische Bandoberfläche nicht in Kontakt mit der Umgebungsluft kommen darf. So wird die reduzierende Ofenatmosphäre bis zum Eintauchen aufrechterhalten, was so die Benetzbarkeit des Stahls gewährleistet. Durch diese Prozessbedingungen kann es aber auch zur Ausbildung verschiedenster Fehlerquellen kommen, die sich dann negativ auf die Oberfläche des Endprodukts auswirken. Die größte Fehlerquelle ist hierbei die Bildung von geringen Mengen an Zinkdampf unter den vorherrschenden Bedingungen. Dieser steigt im Ofenrüssel auf, resublimiert wieder an der Innenseite des Rüssels und kann dort in Form feiner Feststoffpartikel das Band kontaminieren, was in weiterer Folge zur Bildung von intermetallischen FeZn-Phasen und zu Oberflächenfehlern führt. Die Zusammensetzung dieses Staubs ist etwa 99,9 Massen-% Zink, 30–2500 ppm Aluminium und 50–140 ppm Eisen. [18, 19]

Eine mögliche Gegenmaßnahme ist die Erhöhung des Taupunktes im Ofenrüssel und dadurch die Bildung einer Zink-Oxid-Barriere, wodurch das Verdampfen des flüssigen Zinks gehemmt wird, wie in Abbildung 11 angedeutet. [18]

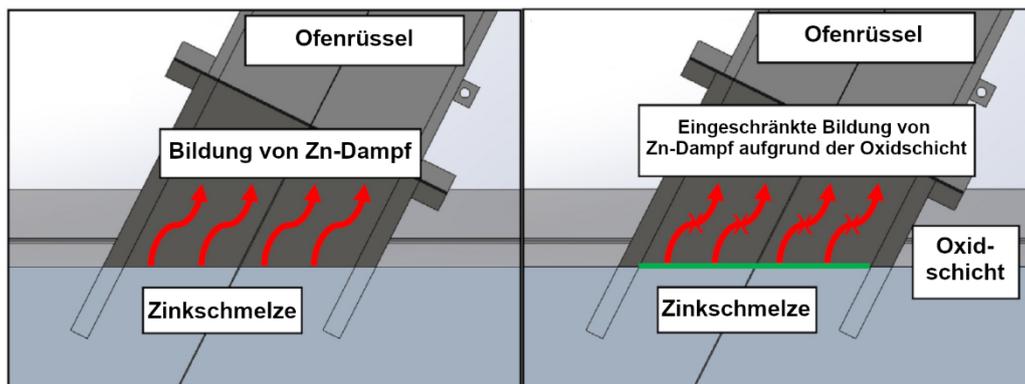


Abbildung 11: Unterschied in der Dampfbildung mit trockener (links) und feuchter (rechts) Ofenatmosphäre [18]

- Umlenkrolle/Stabilisationsrollen

Das untergetauchte Stahlband wird durch diese Rolle wieder in vertikale Richtung umgelenkt und für den nachfolgenden Abstreifprozess stabilisiert, da der gleichbleibende Abstand zwischen Düse und Band wesentlich für die Qualität der Beschichtung ist. Problematisch ist die Materialauswahl der im Bad befindlichen Rollen. Die geforderten Materialeigenschaften sind Härte, Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und chemische Beständigkeit. Diese ist bei Stahl als Rollenwerkstoff nicht gegeben, da dieser sich im Zinkbad löst, so die Lebensdauer der Rollen herabsetzt und das geschmolzene Zink mit Eisen kontaminiert. [2, 20]

- Abstreifdüsen

Für die Einstellung der gewünschten Zinkschicht sind diese die zentrale Anlagenkomponente. Diese wird im Kapitel 2.5 Air-Knife näher beschrieben.

### 2.3.2 Badchemie

Die chemischen Untersuchungen des Zinkbades fokussieren sich hauptsächlich auf die Einflüsse von Eisen und Aluminium. Diese bilden – gemeinsam mit Zink – Schlacken und Krätzen und beeinflussen so die ausgebildete Zinkschicht, sowohl bezogen auf die Qualität als auch auf die Korrosionseigenschaften. Ebenfalls wesentlich für die Prozessstabilität ist die dadurch resultierende verminderte Verfügbarkeit der Legierungselemente für Bildung der Hemmschicht. [16]

Vor allem der effektive Aluminiumgehalt, also die Menge gelöstes Aluminium in der Zinkschmelze, ist von großer Bedeutung und wirkt sich stark auf den Prozess aus. Dieser Wert ist von einer Vielzahl an Parametern abhängig, diese sind unter anderem: [21]

- Bandtemperatur
- Badtemperatur
- Banddicke
- Absoluter Al-Gehalt im Bad
- Chemische Zusammensetzung des Stahls
- Eintauchzeit
- Zinkschichtdicke

Ein weiterer wichtiger Parameter ist das im Bad gelöste Eisen. Dieses führt zur Ausbildung von intermetallischen Verbindungen in Form von ausgeschiedenen Partikeln. Die chemische Zusammensetzung dieser Partikel ist von der Legierungszusammensetzung abhängig, wobei aufgrund der höheren Aluminiumgehalte (vgl. Abbildung 5) meist die Ausscheidung von  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  erfolgt. Diese Verbindungsbildung vermindert den effektiven Aluminiumgehalt wie in Abbildung 12 dargestellt. [6]

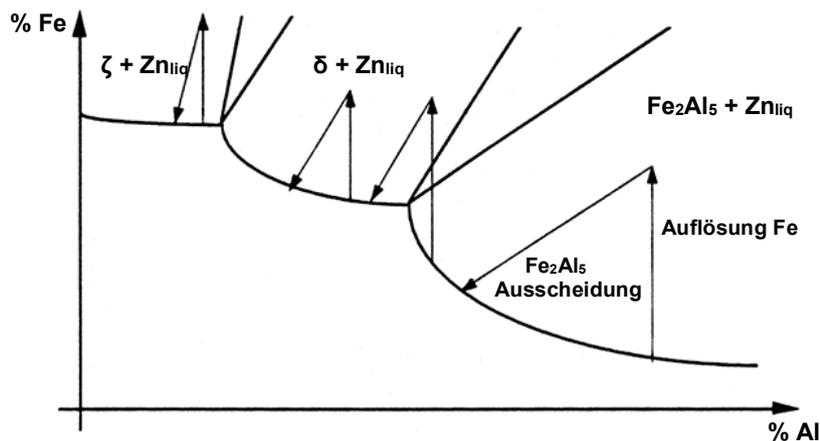


Abbildung 12: Veränderung der Badchemie durch Eisenauflösung [6]

Bei geringeren Aluminiumgehalten kommt es allerdings zur Verbindungsbildung von Eisen und Zink und so zur Ausscheidung von an Aluminium angereicherter  $\delta$ -Phase ( $\text{FeZn}_7$ ), außerdem bilden sich durch den Kontakt mit Umgebungsluft ebenfalls Aluminium- und Zinkoxide. [6]

Der wesentlichste Parameter zur Unterscheidung der einzelnen gebildeten Verbindungen ist deren Dichte, diese ist für  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  bei den typischen Prozesstemperaturen bei etwa  $4,17 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ . Im Vergleich zur Dichte der Zinkschmelze von  $6,55 \text{ [g/cm}^3\text{]}$  bei  $700 \text{ K}$  schwimmt diese Verbindung auf der Oberfläche auf und muss gemeinsam mit den ebenfalls aufschwimmenden oxidischen Zink- und Aluminiumverbindungen während des Prozesses abgezogen werden. Größere Probleme bereitet die  $\delta$ -Verbindung, da diese aufgrund deren

Dichte von  $7,25 \text{ [g/cm}^3\text{]}$  auf den Boden des Zinkbades absinkt und eine vollständige Entfernung während des Prozesses unmöglich macht. [6, 22–24]

## 2.4 Oberflächenfehler

Durch die gestiegenen Qualitätsanforderungen an schmelztauchveredeltes Band ergibt sich die Notwendigkeit, auftretende Fehler systematisch einordnen zu können. Durch diesen Schritt lassen sich konkretere Maßnahmen zur Vermeidung spezifischer Fehler setzen und zusätzlich erleichtert diese Katalogisierung die Kommunikation zwischen Hersteller und Kunden. In den 1990er Jahren entstanden so, ausgehend von den seit dieser Zeit gültigen Euronormen, im deutschsprachigen Raum erste Fehlerkataloge. [25]

### 2.4.1 Fehlerquellen

Bei der Produktion hoher Zinkauflagen auf Breitband kommt es neben den beim Verzinken typischen Fehlern noch zu charakteristischen Defekten in der Zinkschicht, die der Dicke der Schicht geschuldet sind. Die Gründe für deren Entstehung sind komplex und teilweise noch unzureichend untersucht. Mögliche Einflussfaktoren für Oberflächenfehler sind: [6, 14]

- Prozessparameter, wie Bandgeschwindigkeit, Bandtemperatur, Ofenatmosphäre, Einstellungen des Air-Knifes und Kühlbedingungen
- Materialeigenschaften, wie Stahlsorte, Oberflächengüte, inkonstante Blechdicke, unvollständige Reduktion der Oberfläche, Restzunder und unzureichende Bandreinigung
- Eigenschaften der Schmelze, wie Viskosität, intermetallische Ausscheidungen, Legierung und Badtemperatur

Im Zuge dieser Arbeit gilt es mitunter auch, durch geeignete Untersuchungsmethoden die zwei hauptsächlich auftretenden Phänomene (die Bildung von Bananen und Absackern) bei der Herstellung hoher Zinkauflagen zu analysieren, zu beschreiben und Aussagen zu tätigen, wie deren Vermeidung zu realisieren ist.

### 2.4.2 Bananen

Die betriebsinterne Nomenklatur dieses Phänomens verdanken die Bananen dem typischen Fehlerbild, wie in Abbildung 13 ersichtlich. Solche Fehler lassen sich nur bei hohen Auflagen und breitem Band beobachten. Die intern festgelegten Grenzwerte, ab der die Gefahr der

Bananenbildung erhöht ist, sind Auflagen von Z600 oder höher und mehr als 1000 Millimeter Bandbreite. [26]



Abbildung 13: Makroskopischer Dokumentation von zwei Blechstücken mit dem Bananen-Defekt, aufgenommen im Zuge der Untersuchungen bei Wuppermann Austria

Die Bandkante ist in dieser Darstellung links beim linken Bild und rechts bei der rechten Abbildung. Es lässt sich also erkennen, dass dieses Phänomen sich vom Rand des Stahlbandes zur Mitte hin ausbreitet. Bereits in dieser makroskopischen Darstellung sind massive Inhomogenitäten in der Schichtdicke, verdeutlicht durch Fließstrukturen, erkennbar. Neben der ungleichmäßigen Zinkschicht ist dieser Fehler besonders wegen seiner hervorstechenden Optik und den erreichbaren Dimensionen dieser Oberflächenstörung untragbar. Breiten von 200 Millimeter, gemessen von der Bandkante, bei Höhen ähnlicher Ausdehnung sind durchaus üblich. Für eine exakte Untersuchung des Bananen-Effekts sei auf das Kapitel 3 verwiesen.

### 2.4.3 Christmastrees/Absacker

Ebenso charakteristisch für die Herstellung hoher Schichtdicken ist der Christmastree beziehungsweise Absacker Effekt. Dieser entsteht im Gegensatz zu den Bananen eher in der Bandmitte und ist immer in Bandlaufrichtung orientiert. Allerdings lässt sich aufgrund des Erscheinungsbildes zwischen zwei verschiedenen Arten von Absackern unterscheiden. Abbildung 14 zeigt diese zwei möglichen Erscheinungsarten eines Absackers. [27]

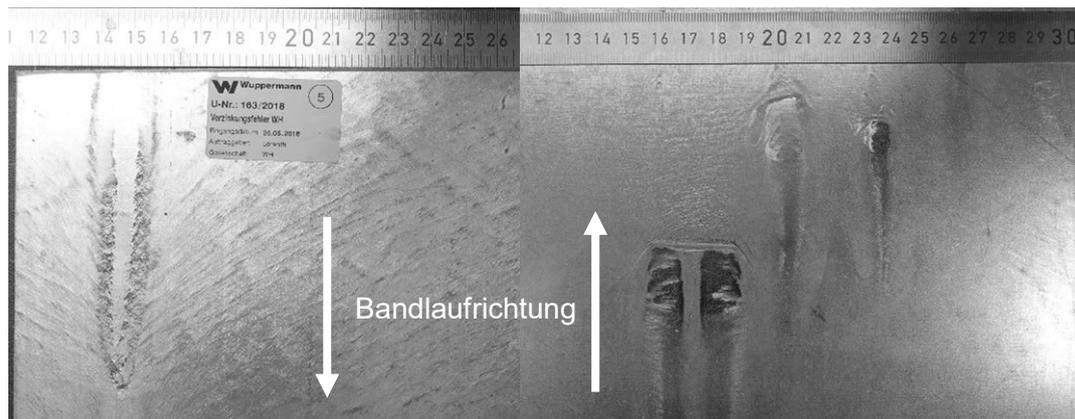


Abbildung 14: Im Zuge der Untersuchungen erstellte Aufnahmen von einem Christmastree (links) und mehreren Absackern (rechts)

Auch in der Literatur finden sich Defekte, die in ihrer optischen Erscheinung den Absackern ähneln. Als Hauptgrund für deren Auftreten gilt in diesem Zusammenhang eine langsame Bandgeschwindigkeit von unter 50 m/min. Da die Grundlage dieser Untersuchung die Produktion von dünneren Zinkschichten auf Kaltband bei dementsprechend höheren Bandlaufgeschwindigkeiten ist, muss vor allem mit Hinblick auf die einzustellende Zinkschichtdicke unterschieden werden. Diese vergleichsweise langsame Geschwindigkeit führt dazu, dass die Oberfläche des Zinkfilms bis zum Abstreifvorgang mehr Zeit zur Verfügung hat um zu oxidieren. Zusätzlich ist, ebenfalls bedingt durch die Reduktion der Geschwindigkeit, die abgestreifte Zinkmenge geringer und so sinkt auch die Wahrscheinlichkeit die gebildeten Oxidnester wieder in das Bad zurückzuspülen. Bleiben diese jedoch auch nach Durchqueren der Düsenebene an der Bandoberfläche, können sie zum in der Abbildung 15 dargestellten Fehlerbild führen. [28]

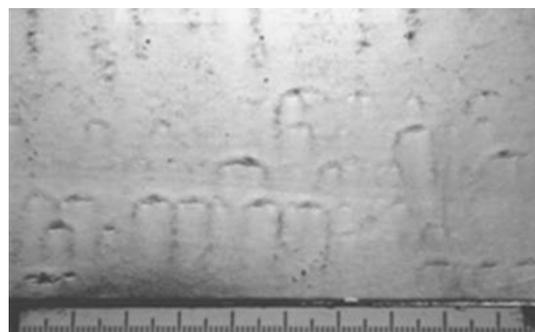


Abbildung 15: Horseshoe-Defekt [28]

## 2.5 Air-Knife

Zentrale Komponente einer Schmelztauchveredelungsanlage sind die Abstreifdüsen. Diese sollen einen konstanten Luftstrom mit definiertem Druck- und Geschwindigkeitsprofil über die gesamte Bandbreite erzeugen, um eine homogene Schichtdicke entsprechend den Kundenanforderungen einzustellen. [29–31]

### 2.5.1 Aufbau

Um eine ausreichende Prozessstabilität und Oberflächenqualität zu erreichen, ist neben der schon genannten Düse eine entsprechende Anlagenperipherie nötig. Am wichtigsten ist die konstante Zufuhr des gasförmigen Abstreifmediums. Dieses kann je nach Verfügbarkeit und geforderter Zinkschichtqualität entweder Luft oder Stickstoff sein. Weiters erfolgt eine permanente Messung der Prozessparameter und eine dementsprechende Regelung der Anlage. Durch diese Bestimmung von [29–33]

- Bandabstand zur Düse
- Bandgeschwindigkeit
- Zinkschichtdicke
- Bandbreite und
- Badtemperatur

erfolgt mit entsprechenden Justierungen eine signifikante Steigerung der Qualität. Mit Änderung von der Regelungsparameter

- Bandabstand zur Düse
- Bandgeschwindigkeit
- Gasmenge
- Düsenspalt
- Neigungswinkel der Düse
- Höhe der Düse über dem Badspiegel und
- Spaltbreite zwischen Band und den Kantenblechen

lassen sich die gewünschten Parameter zur Produktion des jeweiligen Produkts einstellen. Abbildung 16 zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Anlage und die wichtigsten Komponenten [34]. Durch die komplexen Zusammenhänge, mit denen die geregelten Parameter mit der Qualität des Endprodukts wechselwirken, können nur tendenzielle Aussagen über mögliche Auswirkungen einer Regelung auf spezifische Fragestellungen getätigt werden.

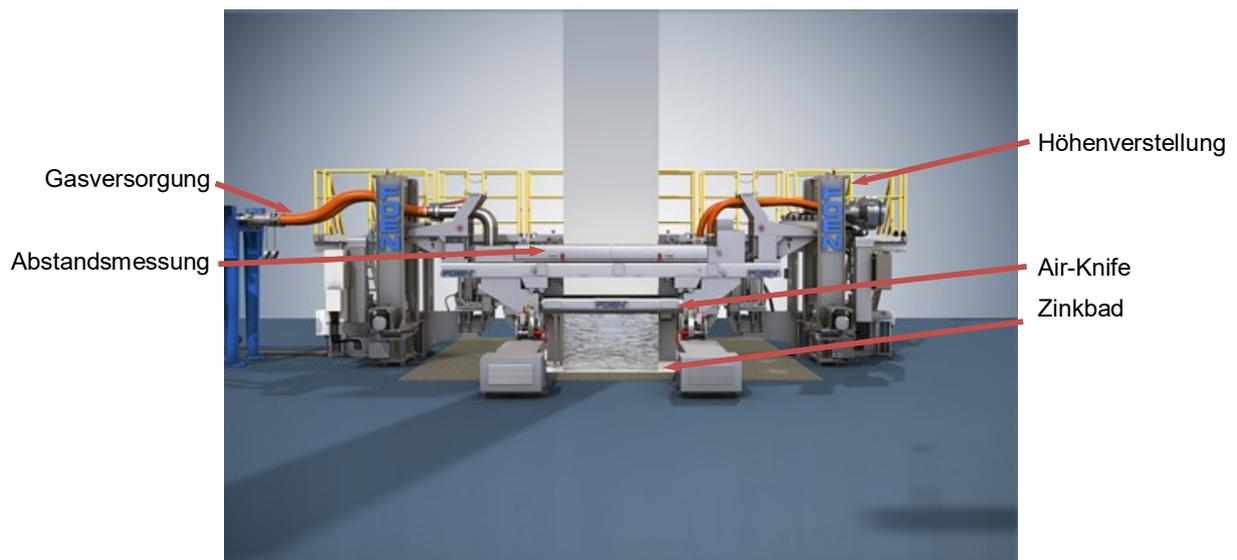


Abbildung 16: Aufbau einer Abstreifvorrichtung der Firma FOEN [34]

## 2.5.2 Funktionsweise

Beim Austreten des Bandes aus dem Metallbad wird, abhängig von den zuvor erwähnten Parametern, eine zu große Menge des flüssigen Überzugsmetalls mitgezogen. Um das überschüssige Metall abzustreifen und eine definierte Schichtdicke einzustellen kommen die Air-Knives zur Anwendung [35]. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 17 skizziert. [36]

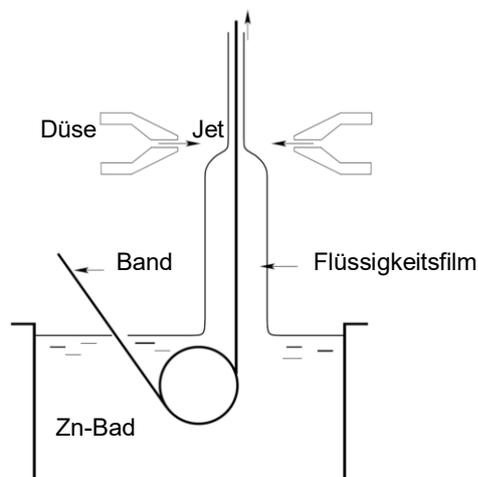


Abbildung 17: Prinzip des Abstreifens [36]

Diese Air-Knives kommen zum Einsatz, weil durch das Abstreifen mit Luft beziehungsweise reinem Stickstoff eine kontaktlose Einstellung der gewünschten Schichtdicke möglich ist. Nur so lassen sich höchste Oberflächenqualitäten mit minimalen Fehlern erzeugen. Mit der Technik des Gasabstreifens treten allerdings einige prozesstechnische Herausforderungen

auf, da dieser Prozess von einer Vielzahl von komplexen Zusammenhängen beeinflusst wird. Eine knappe Aufstellung der in unterschiedlichen Publikationen untersuchten Parametern des Abstreifens ist in Abbildung 18 dargestellt. [36]

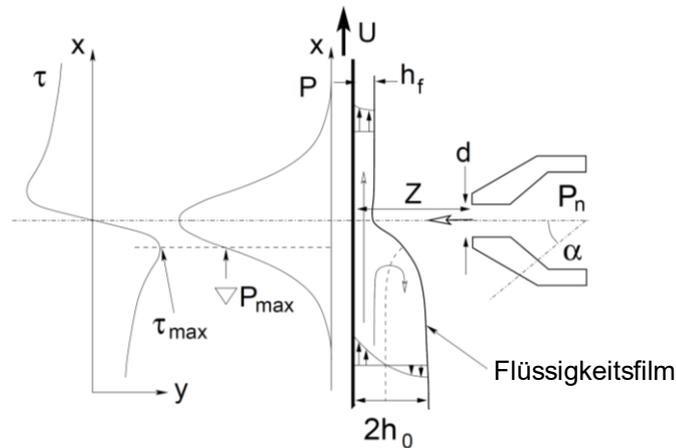


Abbildung 18: Beim Abstreifen wesentliche Parameter und auftretende Spannungen [36]

- $U$  .....Bandgeschwindigkeit [m/min]
- $h_f$  .....Schichtdicke nach dem Jet [ $\mu\text{m}$ ]
- $h_0$  .....Schichtdicke vor dem Jet [ $\mu\text{m}$ ]
- $Z$  .....Abstand zwischen Band und Düse [mm]
- $d$  .....Breite des Düsenpalt [mm]
- $P$  .....Druck des auftreffenden Gasstroms [Pa]
- $P_n$  .....Druck in der Düse [Pa]
- $\nabla P_{\max}$  .....Punkt des maximalen Druckgradienten
- $\alpha$  .....Neigungswinkel des Jets
- $\tau$  .....Scherspannung durch den auftreffenden Luftstrahl [Pa]
- $\tau_{\max}$  .....Maximale Scherspannung [Pa]

Für den Abstreifprozess ist die Wirkung der einzelnen Parameter auf die Oberflächenspannung von fundamentaler Bedeutung. Es treten im Flüssigkeitsfilm durch den auftreffenden Gasstrom sowohl Druck- als auch Scherspannungen auf. Der einfachste Erklärungsversuch dieses Prozesses fußt auf dem Ansatz, dass sobald die Summe beider Spannungen die Oberflächenspannung überschreiten, es zum Abfließen des überschüssigen Materials kommt. Ein für die Vergleichbarkeit und Klassifizierung des Prozesses wesentlicher Parameter ist das Verhältnis  $Z/d$ , das den Quotienten des Abstands Band-Düse und des Düsenpalt darstellt. Diese Kennzahl hat wesentliche Auswirkung auf die durch den Gasstrom auftretenden Scher- und Druckspannungen. Abbildung 19 zeigt die Veränderung der beiden Spannungen unterhalb und oberhalb des auftreffenden Gasstroms in Abhängigkeit

des  $Z/d$ -Verhältnisses. Negative Werte an der Abszisse zeigen den Bereich unterhalb der Düsenebene, positive den Bereich darüber an. [37]

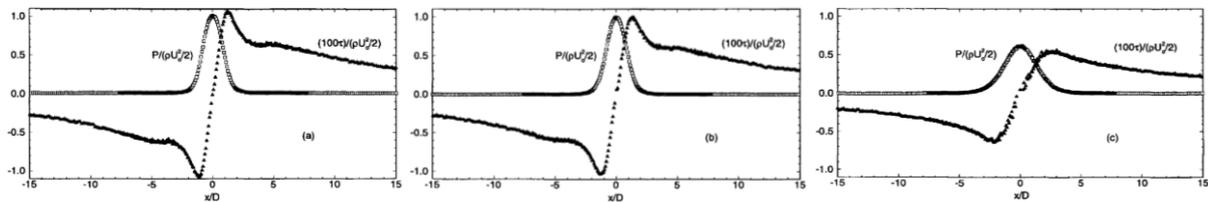


Abbildung 19: Verlauf der Druck- und der Scherspannung für  $Z/d = 2,0$  (links),  $Z/d = 4,0$  (Mitte) und  $Z/d = 12,0$  (rechts) [37]

In darauffolgenden Publikationen ist dieser stark vereinfachte Ansatz fortwährend erweitert worden, indem zum Beispiel auch die Viskosität der Flüssigkeit, die Bandgeschwindigkeit, die Bandbreite, Oberflächenparameter und die auf den Flüssigkeitsfilm wirkende Gravitationskraft Berücksichtigung fanden. Daraus resultiert eine immer größere Komplexität der mathematischen Betrachtungen [38]. Ein kurzer Abriss der momentanen Schwerpunkte der Simulation des Abstreifprozesses ist in Kapitel 2.5.4 dargestellt.

Viel schwerwiegender ist jedoch die Tatsache, dass diese theoretischen und praktischen Betrachtungen der Zinkschichtdickenregulierung nahezu ausschließlich vergleichsweise dünne Zinkschichten bei hohen Bandgeschwindigkeiten betreffen. Hier treten neben gänzlich verschiedenen Prozessparametern im Vergleich zu höheren Zinkauflagen auch andere typische Fehler auf, wenngleich die Fehlerursachen durchaus ähnlich sein können. [28, 39]

### 2.5.3 Kantenüberhöhung

Zu diesen Fehlern gehört das Phänomen der sogenannten Kantenüberhöhung. Damit bezeichnet man die Ausbildung einer höheren Zinkauflage im Randbereich des Bandes, verglichen zur Bandmitte. Abgesehen von einer potenziellen Quelle für die charakteristischen Oberflächenfehler, wie in Absatz 2.4.1 beschrieben, ist diese ungleichmäßige Dickenänderung außerdem auch bei der Weiterverarbeitung problematisch. Ein typisches Schichtdickenprofil und die Ausbildung der Überhöhung, gemessen im Zuge dieser Arbeit, zeigt Abbildung 20.

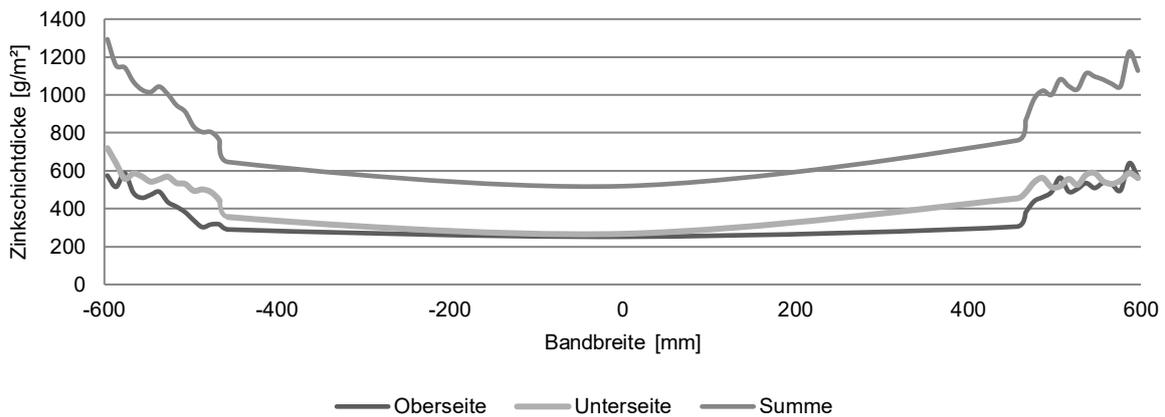


Abbildung 20: Schichtdicke der Z600 Probe 6\_2018 mit der Abmessung 1213x3,32

Die Überhöhung der Zinkschicht im Kantenbereich ist gerade bei der Produktion von breitem Band signifikant. Die Gründe für die Ausbildung dieses Phänomens sind auch hier wieder vielfältig. Durch das vorliegende Strömungsprofil, bei dem die Fließgeschwindigkeit des Flüssigkeitsfilms zum Rand des Bandes hin abnimmt, kommt es nach dem Auftauchen aus dem Metallbad bereits zur Ausbildung der Randüberhöhung. Ein weiterer Grund ist die in Abbildung 21 dargestellte Randschichtüberhöhung durch die Oberflächenspannung des flüssigen Metalls um die Bandkante. Diese führt ebenso zur Ansammlung von Zink am Rand des Stahls. Ebenfalls von großer Bedeutung ist der Einfluss, der von den zwei gegeneinander ausgerichteten Düsen und den daher aufeinanderprallenden Gasströmen an der Bandkante ausgeht. [40]

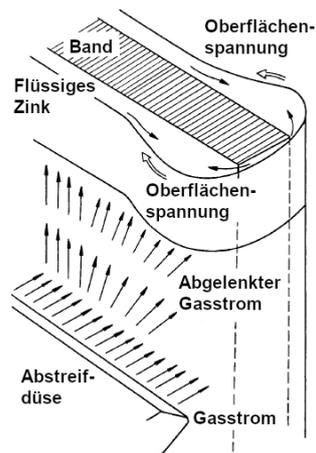


Abbildung 21: Oberflächenspannungsinduzierte Ausbildung einer Randschichtüberhöhung [40]

Auch wenn diese drei Phänomene meistens als Hauptgründe für die auftretenden Kantenüberhöhungen angeführt sind, kommen bei der Bandverzinkung noch weitere Faktoren

hinzu. Zum einen ist die Bandstabilität während des Prozesses nicht immer gewährleistet, was heißt, dass sich der Abstand Band-Jet kontinuierlich verändert. Dadurch entstehen entlang der von Gas umströmten Bandoberfläche Druckunterschiede, wodurch auch die Homogenität der Schichtdicke negativ beeinflusst ist. Zum anderen ist durch die Verarbeitung von Warmband aufgrund der höheren Toleranzfeldbreite des Vormaterials ohnehin eine Bandstabilität, wie sie bei Kaltbandverzinkungsanlagen üblich ist, nicht zu erreichen. [41]

All diese Faktoren gemeinsam führen zur Notwendigkeit, regelungstechnische oder konstruktive Maßnahmen zu setzen, um die vorliegenden Unregelmäßigkeiten in der Schichtdicke zu reduzieren. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei bei den Kantenblechen, deren Verwendung sich schon weitestgehend durchgesetzt hat. Diese sollen die gegenseitige Beeinflussung der aufeinandertreffenden Gasströme an der Kante reduzieren. Da diese Bleche trotzdem kontaktlos an der Bandkante geführt werden müssen, ist auch hier ein nicht unerheblicher regelungstechnischer Aufwand zu betreiben. Die aktuellsten Untersuchungen gehen hierbei im Wesentlichen in zwei Richtungen: [40, 42]

- Optimierung der Regelung des Abstands zur Bandkante. Wobei auch hier das Limit meist die Stabilität des Bandes während des Prozesses ist.
- Änderung der Geometrie der Kantenbleche. Auch hier gibt es eine große Anzahl an getesteten Formen, um die Ablenkrichtung des auftreffenden Gasstroms zu optimieren. Abbildung 22 zeigt eine Übersicht der aktuellen Entwicklungen bei den verwendeten Kantenblechen. Zumeist wird aufgrund der nicht wesentlich verbesserten Produktqualität mit einer aufwändigeren Kantenblechgeometrie lediglich auf planare Bleche zurückgegriffen.

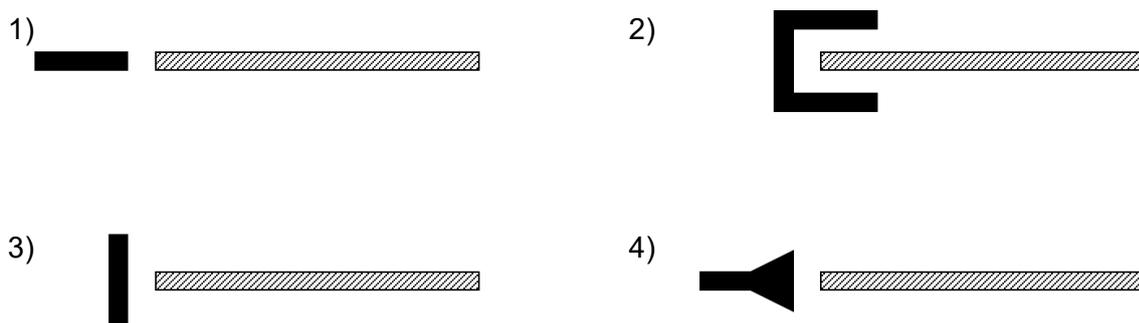


Abbildung 22: Verschiedene Formen von Kantenblechen. Parallel (1), Kantenmaske (2), senkrecht (3) und dreieckig (4) [40]

Weitere Optimierungsversuche werden in der Geometrie der verwendeten Schlitzdüsen unternommen. Hier gibt es im Allgemeinen drei Forschungsfelder, an denen fortwährend

gearbeitet wird. Der erste Punkt ist die Gewährleistung eines konstanten Gasdrucks und daraus resultierend eines konstanten Gasstroms beim Düsenauslass. Hier wird sowohl an eigens dafür errichteten Versuchsständen als auch mit Simulationssoftware gearbeitet, um im Bereich relevanter Prozessdrücke ein gleichmäßiges Druckprofil an der Bandoberfläche aufrecht zu erhalten. Große Unterschiede im Druckprofil ergeben sich durch die Anzahl der Versorgungsleitungen. Hier kommt es bei der einer einzelnen, mittigen Gasversorgung meist zu Druckabfällen am Rand des Jets beziehungsweise bei einer Versorgung mit zwei Zuleitungen an den Rändern des Jets zu einer Drucküberhöhung in der Mitte. [28, 33, 43] Ebenfalls fortwährend Gegenstand von Forschungen ist die Suche nach Alternativen zur gängigen Variante mit einem Düsen Schlitz. Abbildung 23 zeigt eine solche Düse mit drei Schlitzten und das Druckprofil, dass sich durch diese Geometrie ergibt. [30]

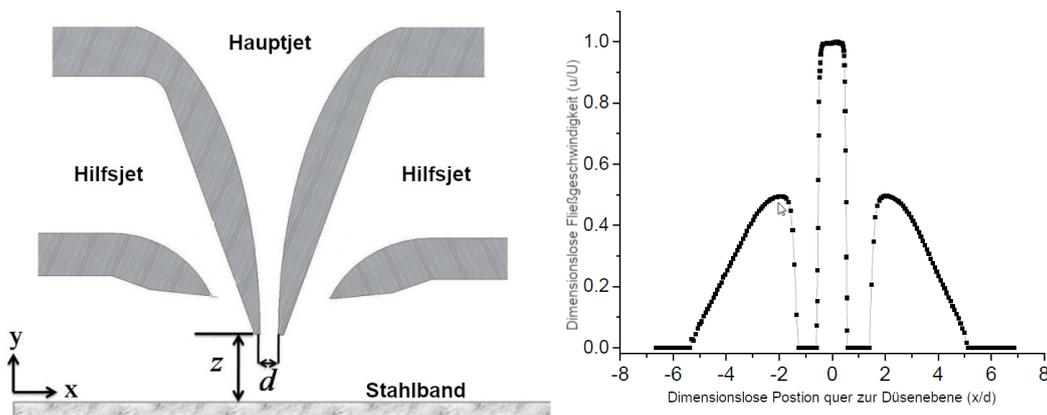


Abbildung 23: Skizze einer Düse mit drei Schlitzten und dem entsprechenden Geschwindigkeitsprofil [30, 31]

Von den alternativen Düsengeometrien ist diese die einzige, die Gegenstand grundlegender Untersuchungen ist. Die Idee hinter dieser Konstruktion ist die Stabilisation des mittigen Luftstroms, der für die Einstellung der Schichtdicke vorgesehen ist, mit den zwei seitlichen und schräg auftreffenden Strömen. Bisher erfolgten Tests dieser alternativen Düsengestaltung jedoch lediglich im Zuge von Simulationen und im Labormaßstab. [30, 31]

Eine weitere Option für die Optimierung des austretenden Luftstrahls und die damit verbundene Qualitätssteigerung bezogen auf die Homogenität der erzeugten Schichtdicke ist die Änderung der Geometrie des Austrittsspalts. Zusätzlich zu den noch immer hauptsächlich verwendeten linearen Düsen Schlitzten werden zunehmend solche eingesetzt, die zur Bandkante hin breiter werden. Der gesteigerte Luftstrom hat einen stärkeren Abstreifeffekt zur Folge und wirkt so gerade im Bereich der auftretenden Kantenüberhöhung dieser entgegen. Dieses Design vermindert zwar die auftretende Überhöhung, allerdings ist es bei variablen

Bandbreiten zu unflexibel und ein Tausch auf ein neues Düsenpaar beziehungsweise das Nachjustieren der vorhandenen Düsen aufgrund der häufigen Dimensionswechsel des Vormaterials zu umständlich und daher nicht praktikabel. [26]

## 2.5.4 Simulation

Wie bereits in Abschnitt 2.5.2 erwähnt, ist die realitätsnahe Simulation des Abstreifvorgangs fortwährend Gegenstand unterschiedlicher Untersuchungen. Die dazu verwendeten Simulationsmodelle weichen, abhängig vom geforderten Untersuchungsergebnis und der verfügbaren Rechenleistung, ebenfalls voneinander ab. Grundsätzlich gilt es, eine mathematische Beschreibung der Druckverteilung an der Kontaktfläche Gasstrom-Metall zu finden. Aufgrund dieser lassen sich dann Aussagen über mögliche Effekte auf das Abstreifverhalten tätigen. Aufgrund der Komplexität des Gesamtprozesses gibt es die Bestrebungen, immer einzelne Teilaspekte des Abstreifvorgangs zu untersuchen. Zusammenfassend lassen sich diese durchgeführten Untersuchungen auf drei Teilbereiche zuordnen. Zwei davon seien im Folgenden kurz erläutert und dem dritten Teilaspekt ist mit Kapitel 2.6 ein ganzer Abschnitt gewidmet. [41, 44–46]

- Einstellung der optimalen Prozessparameter

Ziel dieser Untersuchungen ist es, das optimale  $Z/d$ -Verhältnis für die gewünschte Schichtdicke zu ermitteln. Da diese Parameter vergleichsweise leicht an der Anlage einzustellen sind, ist hier auch mit entsprechendem Aufwand eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Simulation und realem Prozess gegeben. Eine dahingehende Optimierung ist notwendig, um für die geforderte Zinkauflage mit der Einstellung eines geeigneten Druckprofils an der Grenzfläche Gas–Metall einstellen zu können. [44, 45]

- Dynamische Wechselwirkungen

Wesentlich komplexer ist die Betrachtung verschiedener zeitlich unbeständigen Parameter, wie zum Beispiel die exakte Ausbildung des Luftstroms und dessen Fluktuation. Als Ursache für diese Schwankungen von Ort und Betrag des Maximaldrucks in Abhängigkeit von der Zeit gelten zwei verschiedene Phänomene. Diese sind an der Bandkante die sich gegenseitig beeinflussenden Luftströme und im Bereich der Bandmitte die Wechselwirkung auf das Strömungsprofil des Abstreifmediums durch das nicht planar abfließende flüssige Zink. [41, 46]

### 2.5.5 Erkenntnisse

Um weiterführende Experimente zu konzipieren und um eine ausreichende Übersicht über die Einflüsse der Anlagenparameter auf das Endprodukt zu gewährleisten, sind im Folgenden die aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse kurz dargestellt.

- Höhe der Schlitzdüse über der Badoberfläche

Diese hat in den prozesstechnisch relevanten Dimensionen auf die zu erreichende Zinkschichtdicke keinen Einfluss, kann allerdings aufgrund des Strömungsprofils der abfließenden Zinkschicht und der Oxidation an der Oberfläche zu Fehlern führen. [28, 32]

- Düsenwinkel

Nur sehr geringer Einfluss auf die Schichtdicke, da nur minimale Verbesserung der Abstreifwirkung durch die Verstellung zu erreichen sind. Bei Abweichungen des Düsenwinkels von mehr als  $1,5^\circ$  von der Horizontalen wird der Abstreifeffekt sogar vermindert. [29]

- Düsenspalt

Geringere Spaltbreiten führen zu höheren Zinkauflagen. Bei breiteren Spalten ist dementsprechend auch der Gasfluss und der Bereich des überkritischen Drucks an der Kontaktfläche Gas-Zink größer, was wiederum geringere Schichtdicken zur Folge hat. Allerdings führt ein größerer Düsenspalt auch zu größeren Ungenauigkeiten im Druckprofil, was Inhomogenitäten in der erstarrten Schicht bewirkt. [28, 29, 43]

- Distanz Düse-Band

Bis zu einem  $Z/d$ -Verhältnis von weniger als 8 hat der Abstand nahezu keinen Einfluss auf die erreichbare Schichtdicke. Dieser  $Z/d$ -Bereich ist aber nur bei der Herstellung sehr geringer Auflagen relevant. Bei Werten über 8 sind die Scherspannungen in der Flüssigkeit nahezu normalverteilt, in diesem Bereich lässt sich dann mithilfe des Abstandes der Düse von der Bandoberfläche die Schichtdicke regeln. Bei größeren  $Z/d$ -Verhältnissen kann es allerdings zur Ausbildung einer unebenen Oberfläche kommen. [28, 37, 45]

Bei einem  $Z/d$ -Wert von weniger als 15 ist die Annahme zulässig, dass sich die maximale Scherspannung und der maximale Druckgradient an derselben Stelle befinden. Sollte dieser Wert überschritten werden, beginnt dieses System instabil zu werden. [28, 43]

- Viskosität der Überzugslegierung

Eine höhere Viskosität führt zu einer höheren Schichtdicke, da durch die geringere Fließfähigkeit mehr Metall mit dem Band aus dem Bad gezogen wird und dieses im Zeitraum bis zur Durcherstarrung nur geringfügig abfließen kann. [28, 43]

- Andere Effekte

Aluminiumgehalte von mehr als 0,21 Massen-% bewirken vor allem bei Bandgeschwindigkeiten unter 80 m/min die Ausbildung eines Rückflussprofils, das zu Kanteneffekten führt. Vor allem Schmelzen mit niedrigsten Gehalten an Antimon und Blei begünstigen aufgrund der verminderten Oberflächenspannung diesen Effekt. [28]

Gleichzeitig gibt es die Annahme, dass Blei und Antimon in der Schmelze die Bildung von Oxiden an der Oberfläche verringern und sich diese Legierungselemente somit auf die Anzahl der auftretenden Fehlerstellen auswirken. [28]

Je geringer der Abstand Düse-Band ist, desto näher müssen die Kantenbleche am Band positioniert werden. Außerdem lässt sich so der Druckabfall an der Bandkante reduzieren. Der positive Effekt durch die Verringerung des Spalts zwischen Band und Kantenblech ist ebenfalls Gegenstand von Untersuchungen. Abbildung 24 zeigt die Änderung der Druckmaximums in Abhängigkeit dieses Abstandes. [46]

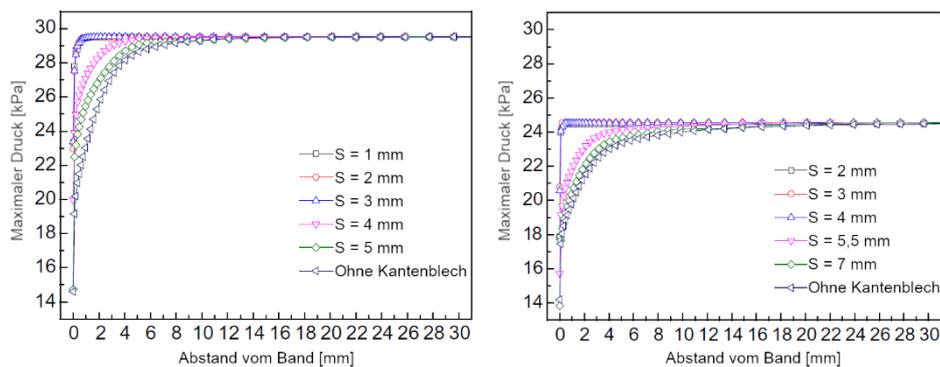


Abbildung 24: Erreichbares Druckmaximum in Abhängigkeit zur Distanz des Kantenblechs vom Stahlband. Der Abstand von der Schlitzdüse zum Blech ist 10 mm (links) beziehungsweise 14 mm (rechts) [46]

Entsprechend dieser Darstellung und den zugrundeliegenden Berechnungen lässt sich die durch Gleichung (1) dargestellte Näherung für den optimalen Abstand zwischen Kantenblech und Stahlband finden. [46]

$$S = 0,3 \cdot Z \quad (1)$$

S ..... Abstand zwischen Kantenblech und Stahlband [mm]

Z..... Abstand zwischen Düse und Stahlband [mm]

## 2.6 Simulation dünner Schichten

Von grundlegendem Interesse für die Erklärung der vorliegenden Phänomene beim Schmelztauchverzinken sind die strömungsmechanischen Vorgänge im Zuge des Prozesses. Das Hauptaugenmerk liegt in diesem Zusammenhang beim Fließverhalten der flüssigen Überzugslegierung bis zum Erstarren. Hierbei ist es jedoch im Vergleich zu den Simulationen des Abstreifvorganges, wie in Kapitel 2.5.4 beschrieben, schwieriger die mathematische Berechnungen durch reale Versuche zu verifizieren.

Die meisten Untersuchungen und Simulationen der Schichtausbildung befassen sich mit dem Schmelztauchverzinken von kaltgewalztem Band. Die Toleranzen bezüglich der Oberflächenqualität und Homogenität der erzeugten Schichtdicke sind hierbei wesentlich enger als beim „Heat-to-Coat“-Verfahren. Bereits geringste Ablaufstrukturen in longitudinale oder transversale Richtung sind daher zu verhindern. Um den Ursachen für deren Bildung auf den Grund zu gehen, kommen verschiedene mathematische und experimentelle Ansätze zur Anwendung. Abbildung 25 zeigt einen typischen Effekt, in der Literatur Sagline genannt. Hier lässt sich eine periodische Erhöhung der Zinkschicht im Bereich weniger Mikrometer erkennen. Insgesamt gibt es bei diesen Defekten eine Unterscheidung zwischen fünf verschiedenen Graden, abhängig von der makroskopischen Ausprägung der Oberfläche. [47]

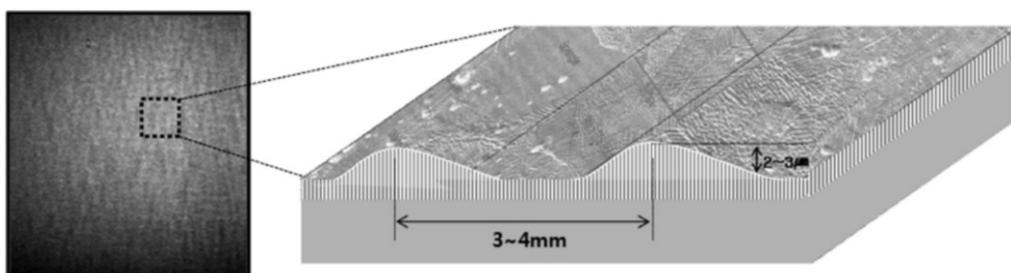


Abbildung 25: Dimension einer Sagline dritten Grades. [47]

Gemeinsames Merkmal dieser Untersuchungen ist die Tatsache, dass hauptsächlich Bereiche in ausreichender Distanz zur Bandkante im Fokus stehen, um zu den komplexen Systemen nicht auch noch Verwirbelungen durch aufeinanderprallende Gasströme hinzufügen zu müssen. [47, 48]

Durch diese Rahmenbedingungen ist ein Vergleich mit den vorliegenden Prozessbedingungen nur bedingt möglich beziehungsweise im Falle der Randschichtüberhöhung schlicht nicht zielführend.

## 2.7 Schichtdickenmessung

Die Messung der Zinkauflage erfolgt, um die Möglichkeit der Regelung des Prozesses zu gewährleisten, bereits während der Produktion. Um die Verteilung der Schichtdicke über die gesamte Bandbreite zu überprüfen, findet in Stichproben auch eine weitere Messung von Hand nach dem Aufhaspeln des Bands statt. Beide Messsysteme haben unterschiedliche Funktionsweisen, die den Anforderungen an die entsprechende Messung angepasst sind.

### 2.7.1 Röntgenfluoreszenzverfahren

Grundlage für dieses Verfahren ist die Anregung von Beschichtungswerkstoff und Grundmaterial mit Röntgenstrahlung. Die am Detektorsystem gemessene charakteristische Strahlung des Grundwerkstoffes verringert sich dabei mit steigender Schichtdicke kontinuierlich, während die charakteristische Strahlung der Beschichtung bis zur Sättigungsdicke zunimmt. Nach dem Emissionsverfahren erfolgt die Messung der Intensität der Strahlung des Schichtwerkstoffes, während nach dem Absorptionsmethode die Strahlungsintensität des Grundmaterials analysiert wird. Um in einem größeren Schichtdickenbereich verlässliche Messwerte zu erhalten, wird für die Bestimmung der Schichtdicke das Intensitätsverhältnis der beiden charakteristischen Strahlungen herangezogen. [49]

Dieses Verfahren findet an der bereits erstarrten Überzugslegierung Anwendung und dient so der „in-line“-Messung der erzeugten Schichtdicke und somit als entscheidende Regelungsgröße für den Prozess.

### 2.7.2 Magnetinduktives Verfahren

Für die nachträgliche Messung der Zinkauflage am Stahlband im Zuge der für diese Arbeit durchgeführten Untersuchungen kommt ein anders Verfahren zum Einsatz. Diese magnetinduktive Bestimmung bedarf eines wesentlich unkomplizierteren Messaufbaus und ist somit für mobile Messgeräte geeignet.

Das Messprinzip ist die Änderung der Induktivität einer Spule, wenn ein ferromagnetischer Gegenstand in deren Nahbereich gelangt. Aufgrund dessen erfolgt die Ermittlung der Distanz zwischen der Spule und dem Objekt. Diese Spulen sind bei den meisten Handmessgeräten in

Tastköpfe verbaut, die somit die Dicke einer unmagnetischen Schicht auf dem Grundwerkstoff ermitteln kann. Diese Messköpfe können, abhängig von den geforderten Eigenschaften, unterschiedlichste Geometrien und Anzahlen von Spulen aufweisen. Somit sind von lokalen Schichtdickenmessungen bis hin zur Analyse von ganzen Messbereichen viele Optionen möglich. [50]

### **3 Experimentelle Untersuchungen**

Aufgrund der Tatsache, dass den vorliegenden Phänomenen offensichtlich komplexe Zusammenhänge bezüglich der Produktionsbedingungen zugrunde liegen, sind an mehreren Stellen Untersuchungen durchgeführt worden. Diese sollen dazu führen zu einem Erkenntnis über diese Zusammenhänge zu gewinnen und zum anderen zukünftige Schritte diesbezüglich zu koordinieren.

#### **3.1 Evaluierung des „Status Quo“ vor den Untersuchungen**

Bei der Herstellung von warmgewalztem Stahlband mit einer Zinkauflage von  $600 \text{ g/m}^2$  kommt es zu charakteristischen Effekten, wobei es abhängig vom Standort an dem das betreffende Material hergestellt wurde Abweichungen gibt. Während es beim Betrieb in Ungarn meist zum Auftreten von Absackern in verschiedenen Ausprägungen kommt, sind es in der Produktionsstätte in den Niederlanden meist Bananen, die zu beobachten sind. Es gilt nun also allfällige Unterschiede aufzuzeigen, die die Bildung der jeweiligen Defekte begünstigen beziehungsweise diesen entgegenwirken.

#### **3.2 Analyse eines Absackers**

Das wichtigste Kriterium für die Beurteilung eines Defekts ist die Frage, ob der geforderte Korrosionsschutz noch gegeben ist. Einige Phänomene beim kontinuierlichen Feuerverzinken führen zwar zu optisch nachteiligen Erscheinungen, schränken aber die Korrosionseigenschaften nicht ein. Wesentlich für dessen Sicherstellung ist die Gleichmäßigkeit der geforderten Zinkauflage. Deshalb ist der erste Schritt der Analyse die Vermessung der Zinkschichtdicke, wie in Abbildung 26 dargestellt. Ob gewisse oberflächliche Effekte akzeptiert oder zumindest toleriert sind, kommt im Wesentlichen auf die Kundenanforderungen an. Da allerdings auch für verzinkte Produkte auf Basis von warmgewalztem Stahl die Einsatzmöglichkeiten immer vielfältiger werden und damit auch der Verarbeitung dieses Materials in sichtbaren Bauteilen mehr und mehr gegeben ist, erfolgt zunehmend eine Eingrenzung der tolerierten Effekte.

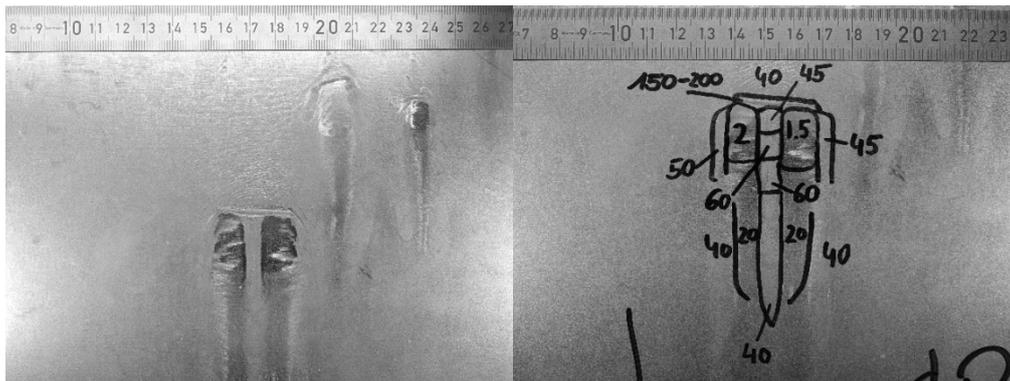


Abbildung 26: Detailaufnahme des analysierten Absackers (links) und gemessene Schichtdicke (rechts). Die Messwerte sind in Mikrometer.

Charakteristisch für diese Fehler ist eine Schichtüberhöhung, gefolgt von einem Bereich ohne nennenswerte Zinkauflage. Für eine Auflage von  $600 \text{ g/mm}^2$  ist eine homogene Schichtdicke von  $42 \text{ μm}$  nötig.

Um die Ursache für die Bildung solcher Absacker festzustellen ist es notwendig, die Zinkschicht abzulösen. Das geschieht im vorliegenden Fall mit Salzsäure, mit der die Probe gemäß Abbildung 27 gebeizt wird.

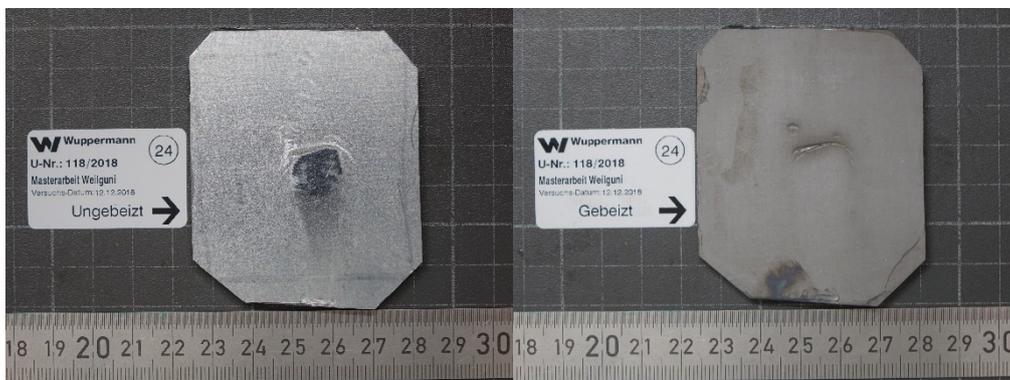


Abbildung 27: Unbehandelte und gebeizte Probe eines Absackers

Durch das Beizen kommt eine Beschädigung des Vormaterials im Bereich des Absackers zum Vorschein. Nun gilt es festzustellen, was die Ursache für die Entstehung dieser Fehler ist. Zu diesem Zweck bietet es sich an einen Schliff, der direkt im Bereich der Verformung liegt, im Lichtmikroskop zu betrachten. Durch eine Gefügeätzung der polierten Oberfläche des Querschliffs mit Nital in diesem Bereich ist es möglich, aufgrund einer möglichen Anisotropie in der Textur auf den Ursprung dieser Verformungen zu schließen. Die mikroskopischen Aufnahmen des Fehlerbereichs sind in Abbildung 28 dargestellt.

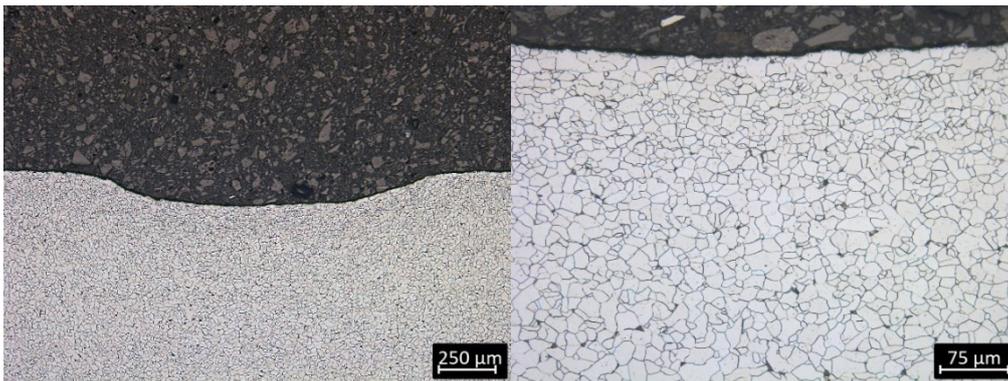


Abbildung 28: Querschliff durch die in Abbildung 27 dargestellte Beschädigung mit 50-facher Vergrößerung (links) und 200-facher Vergrößerung (rechts)

Das Gefüge in der Nähe der Verformung zeigt weiterhin eine globulare, gleichmäßige Struktur. Aufgrund der geringen Verformung in diesem Bereich ist allerdings auch nicht von gravierenden Änderungen in der Gefügestruktur auszugehen. Eine vorliegende Warmumformung ist in diesem Bereich grundsätzlich möglich, wobei sich hier der Prozessschritt, bei dem diese oberflächlichen Beschädigungen entstehen, nicht feststellen lässt. Durch das Beschädigen von Vormaterial mit Ritzen verschiedener Dimension und Orientierung konnten solche Absacker aber zumindest teilweise in ähnlicher Form reproduziert werden.

Auch eine Kaltumformung durch das Einwalzen von Absackern nach dem Verzinken als Grund für diese Oberflächenbeschädigung ist durchaus möglich, sodass diese Beschädigungen nicht als Ursache, sondern als Konsequenz anzusehen sind.

### 3.3 Analyse eines Bananen-Defekts

Auch hier erfolgte zuerst eine Untersuchung, ob der geforderte Korrosionsschutz noch gegeben ist, wobei hier ebenfalls, entgegen der Bandlaufrichtung betrachtet, Bereiche mit einer überhöhten Zinkauflage glänzende Flächen mit Auflagen im einstelligen Mikrometerbereich folgen. Durch die Dimension dieser Areale mit niedriger Schichtdicke gibt es sowohl Einschränkungen in der Korrosionsbeständigkeit des Endprodukts als auch Einschnitte im Verkaufspreis. Solche Oberflächen sind für den Einsatz in sichtbaren Bereichen ungeeignet und daher von den meisten Kunden unerwünscht. Um Erklärungsversuche zu liefern, erfolgt die Untersuchung von zwei dieser Bananen. Diese beiden betrachteten Probenplatten sind in Abbildung 29 dargestellt.

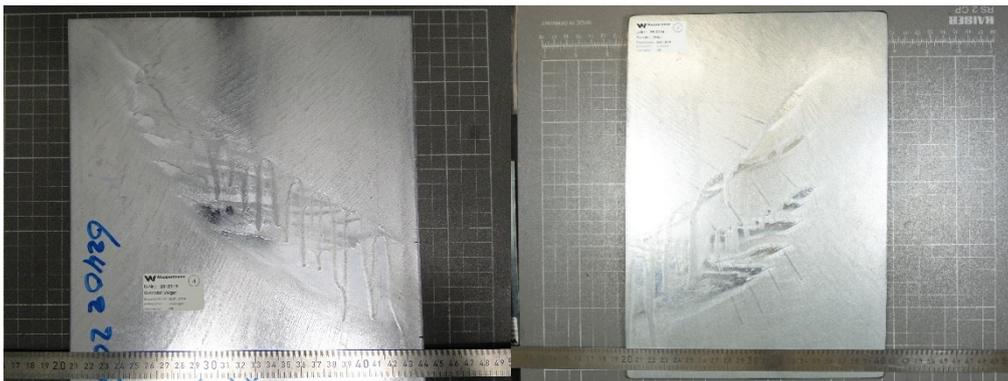


Abbildung 29: Darstellung der beiden untersuchten Bandfehler (Bananen-Defekt) mit der internen Probenbezeichnung 4 (links) und 7 (rechts)

Wie bei der Untersuchung der Absacker liegt auch bei der Analyse dieser Fehler der Fokus auf zwei verschiedenen Bereichen. An der linken in Abbildung 29 dargestellte Probenplatte erfolgt die Untersuchung von Zinkschichtüberhöhungen und Einflüssen des Stahlbands anhand von mehreren Querschliffen. Am rechten dargestellten Muster findet ein Abbeizen der gesamten Zinkschicht statt, um durch die möglicherweise topographische Ausbildung der Oberfläche ebenfalls Erkenntnisse zu erzielen. Abbildung 30 zeigt die Lage der Schlitze beziehungsweise die zur besseren Darstellung nachgezeichneten Eindrücke im Vormaterial nach dem Beizvorgang.



Abbildung 30: Lage der Schlitze der Probe 4 (links) und die makroskopischen Eindrücke nach dem Beizen von Probe 7 (rechts)

Mittels Rasterelektronenmikroskop erfolgt die Darstellung der Querschliffe 4.1 und 4.3. Diese beiden Proben ermöglichen die Betrachtung zweier unterschiedlicher Bereiche einer Banane. 4.1 zeigt einen abgesackten Bereich und die entsprechend dünne Zinkauflage, welche dort vorliegt. Auffallend für dieses Areal der Banane ist die inhomogene Zinkschichtdicke und die teils markant ausgeprägte  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ -Hemmschicht. Ebenfalls ist eine ziemlich topographische

Stahlbandoberfläche zu beobachten. Ersichtlich sind diese Phänomene in Abbildung 31. Um Aussagen die Zusammensetzung der Zinkschicht betreffend zu tätigen, erfolgte die EDX-Analyse von mehreren im Anhang A näher definierten Punkten. Die Messergebnisse sind in Form von Analysespektren dort zu finden.

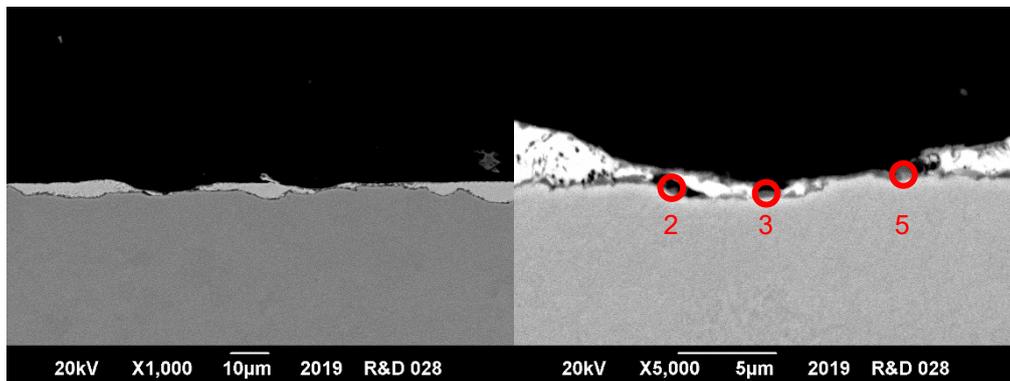


Abbildung 31: Darstellung des Querschliffs 4.1 im Rasterelektronenmikroskop bei 1000-facher Vergrößerung (links) und bei 5000-facher Vergrößerung (rechts)

In dieser Darstellung sind die hellen Bereiche als Zinkschicht zu identifizieren. Weiters sind die dunkleren Bereiche zwischen Beschichtung und Stahlband von Interesse. Die Analysen mittels EDX ergeben an den Messpunkte 2, 3 und 5 die in Tabelle 3 dargestellten Werte.

Tabelle 3: Messwerte der EDX-Analyse

Messpunkt	Atom-% O	Atom-% Al	Atom-% Fe	Atom-% Zn
2	12,4	18,8	36,3	32,6
3	13,6	41,6	26,3	18,5
5	16,1	40,1	32,4	11,4

Vor allem in den Messpunkten 3 und 5 lassen sich erhöhte Gehalte an Aluminium und Eisen feststellen, was auf eine unregelmäßige Ausbildung der  $Fe_2Al_5$ -Hemmschicht schließen lässt. Bei der Untersuchung der Fehler kommen, ähnlich wie bei den Absackern, unter der abgelösten Zinkschicht Verformungen zum Vorschein. Auch hier gilt es wieder zu bestimmen, bei welchen Prozessschritt diese womöglich entstanden sind. Deshalb erfolgt auch bei diesen Fehlern eine Betrachtung von Querschliffen derselben. Die betreffenden Schliffe mit den Nummern 7.1, 7.2 und 7.3 sind in Abbildung 32 dargestellt.



Abbildung 32: Schlifflage an der abgebeizten Probenplatte

Anhand der untersuchten Proben sollen Aussagen über die möglichen Ursachen der oberflächlichen Beschädigungen möglich sein. Daher ist es wieder notwendig, die eingebetteten und polierten Querschliffe zu ätzen und das Gefüge näher zu betrachten, da aufgrund von Parametern wie Homogenität und Korngrößenverteilung Rückschlüsse auf den Ursprung der Verformung getätigt werden können. Als klare Gegenüberstellung sind in Abbildung 33 zwei Bereiche des Schliffs 7.1 gezeigt.

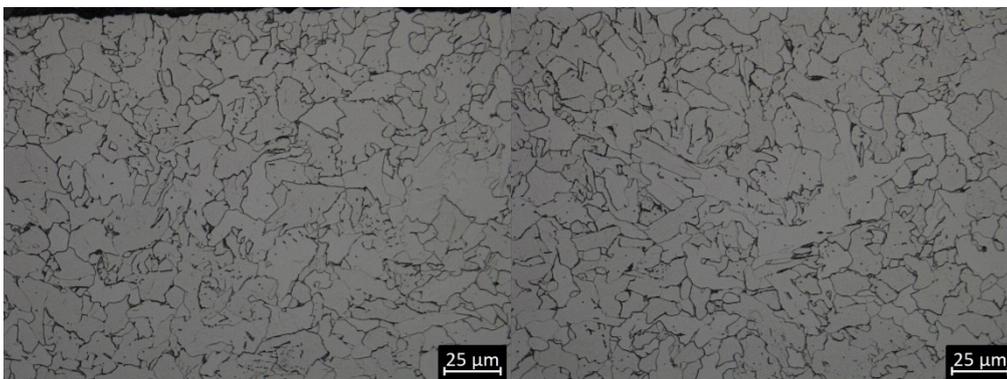


Abbildung 33: Bereich der Verformung von Schliff 7.1 (links) und die unverformte Mitte des Stahls (rechts). Beide Bereiche sind mit Nital geätzt und 500-fach vergrößert.

Es lassen sich in dieser Abbildung 33 keine allzu wesentlichen Unterschiede zwischen dem Bereich direkt unter der Beschädigung und der Mitte des Stahls feststellen. Die Korngrößenverteilung ist vergleichbar und auch eine mögliche Anisotropie im Verformungsbereich im Vergleich zur Mitte ist nicht zu sehen.

Aufgrund der Tatsache, dass die Verformungen, wie in Abbildung 30 dargestellt, deckungsgleich mit den Bereichen der Zinkschichtüberhöhung sind, muss eine andere Erklärung gefunden werden. Die beim Materialeinlauf operierende kontinuierliche und automatische Bandbeobachtung konnte bisher keinerlei vergleichbare

Vormaterial-Beschädigungen nachweisen. Es lässt sich also vermuten, dass diese Eindrücke aufgrund des dem Verzinkungsvorgangs nachgeschalteten Dressierprozesses entstehen. Die Eindrücke unter einer Banane lassen somit nicht auf die Ursache für die Entstehung dieses Defekts schließen.

### 3.4 Schichtdickenmessung

Wie bereits in Abschnitt 2.5.3 erwähnt, kommt es beim Abstreifvorgang mit Luft auch zur Kantenüberhöhung. Um einen eventuellen Einfluss dieser überhöhten Auflage auf die Ausbildung von Bananen zu aufzuzeigen, muss zuerst die Zinkauflage über die gesamte Bandbreite ermittelt werden. Da die „in-line“-Messungen während des Verzinkungsprozesses zwar entlang der Bandbreite oszillieren, jedoch den Bereich der überhöhten Auflage nicht mitmessen ist es nötig, diese Analyse anhand von Probenplatten des entsprechenden Materials durchzuführen. Die analysierten Proben, sowie deren wichtigste Spezifikationen sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Einteilung der durchgeführten Messungen

Messreihe	Datum	Banddicke [mm]	Bandbreite [mm]	Auflage	Anlage	Analysierte Proben
1	08.2018	2,42–5,00	1096–1262	Z600	WH	9
2	08.2018	2,92	1046	Z800	WH	2
3	09.2018	1,50	725	Z600	WH	3
4	09.2018	2,00	725	Z800	WH	4
5	09.2018	2,00	725	Z1000	WH	4
6	01.2019	3,00	1213	Z600	WSN	1
7	03.2019	2,20	1312	Z600	WH	3

#### 3.4.1 Durchführung der Schichtdickenanalyse

Diese Messungen erfolgen mit einem mobilen magnetinduktiven Messtaster. Dieser kann in kurzer Zeit die Dicke der Zinkauflage auf bis zu 0,1 µm genau ermitteln. Um reproduzierbare Messwerte zu erhalten, erfolgte zu Beginn jeder Messreihe eine Kalibration des Geräts. Die Anzahl der durchgeführten Messungen sowie die Größe der verschiedenen Probenplatten erfordert eine entsprechende Flexibilität und Schnelligkeit bei der Auswertung. Abbildung 34 zeigt das für die Schichtdickenmessung verwendete Gerät.



Abbildung 34: Das magnetinduktive Messgerät DELTASCOPE MP38/GA2H von Fischer

Um die Abweichung hierbei möglichst gering zu halten, wird die Zinkauflage an jedem am Blech angezeichneten Punkt in kleinen vertikalen Abständen dreimal ermittelt. Da aufgrund der Randüberhöhung die Schichtdicke quer zur Bandlaufrichtung mitunter stark variieren kann, müssen alle Messungen eines Messpunktes in einer Linie parallel zur Bandlaufrichtung liegen. In Abbildung 35 ist die Verteilung der einzelnen Messbereiche als Draufsicht dargestellt.

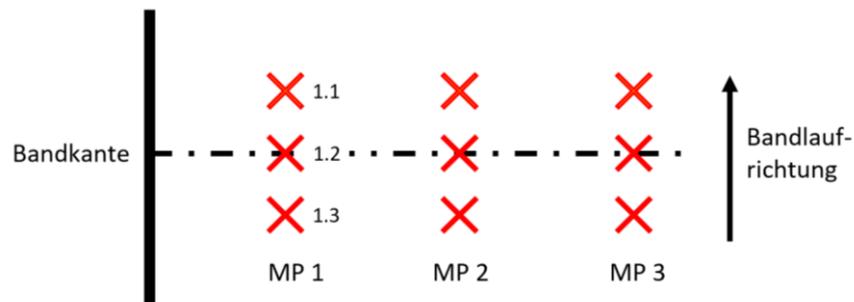


Abbildung 35: Die horizontal angeordneten Messpunkte (MP) unterteilen sich in jeweils drei vertikal ausgerichtete Einzelmessungen.

### 3.4.2 Messsystematik

Um wiederum eine Vergleichbarkeit zwischen den Messungen der einzelnen Probenbleche zu gewährleisten, erfolgt die Einteilung der Messpunkte nach demselben Schema. Wichtig hierfür ist außerdem die Blechspezifikation OS und US, für Oberseite und Unterseite und AS beziehungsweise BS für die Anlagenseite oder die Bedienerseite. Diese Bezeichnungen beziehen sich jeweils auf die Orientierung des Bandes bei der Probennahme vor dem Haspeln.

- Die Nummerierung der Messpunkte erfolgt von BS/OS aus, die Anzahl der Messpunkte ist von der Probenbreite abhängig.

- Im Bereich der Kantenüberhöhung ist der Abstand zwischen den Einzelmessungen 10 mm, dieser Wert nimmt zur Bandmitte hin zuerst auf 50 mm und dann auf 100 mm zu.
- Die Nummerierung der Messpunkte an der Unterseite erfolgt deckungsgleich mit denen an der Oberseite, entsprechen beginnend von BS/US.

Die Auswertung der Gesamtauflage erfolgt durch die Bildung des Mittelwertes der gegenüberliegenden Messwerte auf Oberseite und Unterseite. Ziel ist hierbei sowohl die Feststellung, ob die geforderte Zinkauflage auf der gesamten Bandbreite erreicht ist sowie der Abgleich dieser Daten mit den Messdaten der Anlage. Hauptaugenmerk bleibt aber die Analyse der Randschichtüberhöhungen. In Abbildung 36 ist die Lage der einzelnen Messpunkte anhand einer Probe der Messreihe 5 laut Tabelle 4 dargestellt. Durch die Probenbreite von lediglich 725 mm sind hier nur 18 Messpunkte pro Seite erforderlich, während bei breiterem Probenmaterial und zur Erhöhung der Auflösung teils bis zu 44 Messpunkte pro Seite zur Analyse nötig sind. Da das in Abbildung 36 dargestellte Blech per Definition kein Breitband-Muster ist, dient die Vermessung derselben lediglich als Vergleich. Daher ist die feine Auflösung der Messwerte von je 10 mm Abstand nur für die ersten 50 mm von der Bandkante gewählt. Bei den relevanten Proben ist für diesen Bereich eine Breite von 150 mm definiert.

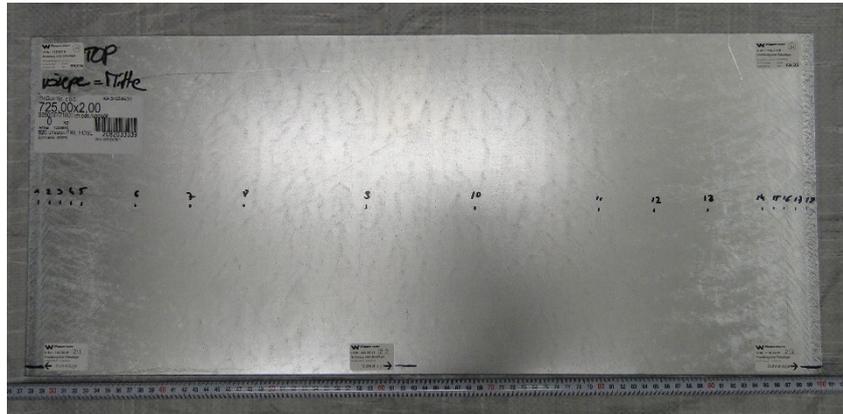


Abbildung 36: Oberseite der Probe aus der Messreihe 5 mit den angezeichneten Messpunkten

### 3.4.3 Lichtmikroskopische Aufnahmen

Um die erhobenen Messwerte zu verifizieren, erfolgt auch eine lichtmikroskopische Analyse des Randbereichs einer Probe der Messreihe 1 laut Tabelle 4. Die hierbei betrachteten Querschliffe in den Abständen von 30, 60, 90, 120, 150 und 180 mm von der Bandkante sollen

den Schichtdickenverlauf der Zinkauflage über den gesamten Bereich der Randschichtüberhöhung bis zum Bereich der homogenen Schichtdicke repräsentativ abbilden. Die zusammengefassten Ausschnitte dieser Aufnahmen sind in Abbildung 37 zu sehen.

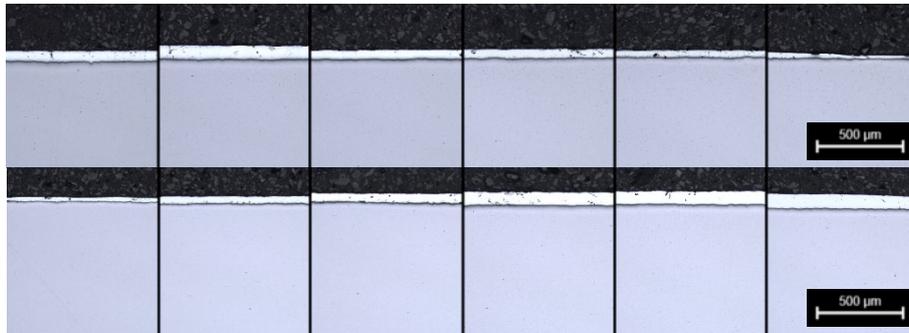


Abbildung 37: Ausschnitte der Querschliffe im Abstand von 30, 60, 90, 120, 150 und 180 mm von der linken Bandkante (oben) und dieselben Abstände von der rechten Bandkante (unten)

### 3.5 Einfluss der Oberfläche

Unter den zu analysierenden Fehlern lassen sich, wie in Abbildung 31 ersichtlich, mitunter erhebliche Topografien im Vormaterial erkennen. Es gilt also zu analysieren, ob diese Unebenheiten der Stahlbandoberfläche in direktem Zusammenhang mit dem Auftreten von Bananen oder Absackern stehen. Zu diesem Zweck erfolgte die Erstellung eines zweiteiligen Versuchsprogrammes, welches an der Anlage der Wuppermann Hungary durchgeführt wurde.

#### 3.5.1 Vormaterial

Als Vormaterial für die gesamte Versuchsreihe dienten zwei Coils der Stahlgüte DD11 mit einem Bandquerschnitt von 1312x2,20 und ein Coil, ebenfalls DD11, mit der Abmessung von 1300x2,29. Die Auswahl des Vormaterials erfolgte unter drei Aspekten:

- Das Band muss möglichst breit sein, da sich aus den Betriebsbeobachtungen bei der WSN bereits herausgestellt hat, dass die Anzahl der auftretenden Bananen mit der Bandbreite signifikant steigt.
- Außerdem sollte die Banddicke gering sein, da sich so die Produktionsbedingungen, vor allem Bandgeschwindigkeit und Prozessstabilität, besser kontrollieren lassen.
- Die Stahlgüte darf nur wenige Mikrolegierungselemente enthalten, da diese die Benetzung der Schmelze und daher die Haft der Zinkschicht negativ beeinflussen könnten und so den Einfluss der Oberflächenrauigkeit verfälschen.

### 3.5.2 Übersicht des gesamten Programms

Die Auftrennung des Versuchsprogrammes in zwei Teilprogrammen ist der Tatsache geschuldet, dass zwischen dem Dressierschritt und dem Verzinken einige Umbauarbeiten an der Anlage notwendig sind. Während der ersten Stufe, dem Beizen des schwarzen Vormaterials inklusive eines nachgeschalteten Dressiervorgangs zur Einstellung der gewünschten Oberflächenrauigkeit, die beiden Coils mit den Abmessungen 1312x2,20 eingesetzt werden, ist jenes mit der Abmessung 1300x2,29 erst im zweiten Teil des Versuchsprogramms wesentlich. Abbildung 38 zeigt die Zusammenfassung des durchgeführten Versuchsprogramms. Die zeitliche Trennung zwischen dem Dressierschritt und dem Verzinken ist durch die vertikale Linie dargestellt.

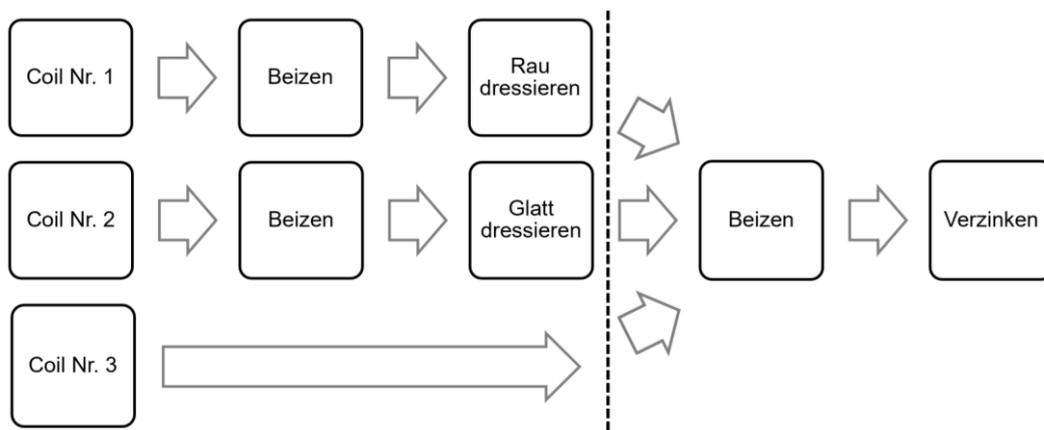


Abbildung 38: Übersicht der Versuchsdurchführung. Die Coils mit den Nummern 1 und 2 haben die Dimension 1312x2,20, das Coil Nummer 3 hat die Dimension 1300x2,29.

### 3.5.3 Erzeugen einer definierten Oberfläche

Da die Anlage der WH entweder zum Verzinken oder als reines Beizaggregat betrieben werden kann, erfolgt der erste Teil des Versuchsprogramms im Beizbetrieb. Das eingesetzte Band durchläuft die Anlagenteile Abwicklung, Schweißmaschine, Streckrichter, Zunderbrecher und Beize wie im Verzinkungsbetrieb. Allerdings erfolgt die Bandführung bis hin zum Dressiergerüst im Bypass zum Ofen und zum Metallbad.

Zentraler Prozessschritt dieses ersten Versuchsteils ist das Dressiergerüst, da hier innerhalb von etwa 20 Minuten die Dressierwalzen austauschbar sind. Dadurch ist aufgrund der Walzenrauigkeit die für die Versuchsdurchführung notwendige Oberflächenrauhigkeit einstellbar. Die verwendeten Walzen haben eine nominellen Mittenrauwert von 0,2  $\mu\text{m}$  und 2,5  $\mu\text{m}$ .

Um einen zusätzlichen Parameter zum Vergleich einzubringen erfolgt das Dressieren der beiden betreffenden Coils jeweils nur zur Hälfte. Der zweite Teil durchläuft zwar ebenfalls den vorhergehenden Beizschritt, allerdings bleibt die Oberfläche im Anschluss unbearbeitet. Das ermöglicht eventuell Aussagen über den Einfluss eines zweiten, zusätzlichen Beizschrittes auf die Haftungseigenschaften und die Qualität des Zinküberzugs.

### 3.5.4 Verzinken und Analyse

Im Zuge einer Z600-Kampagne erfolgt die Verzinkung aller drei für den Versuch bereitgestellten Ringe. Um sicherzustellen, dass die Prozessparameter während dieses Produktionsschrittes bereits stabil sind, sodass eine entsprechende Vergleichbarkeit zwischen den Testcoils hergestellt werden kann, sind diese erst am Schluss einer solchen Kampagne einzuplanen. Am Ende dieser Produktion ergeben sich aufgrund der durchgeführten Prozessschritte die in Tabelle 5 dargestellten Eigenschaften für die vorliegenden Proben.

Tabelle 5: Übersicht der Probenspezifikationen

Interne Probenbezeichnung	Abmessung [mm]	Gebeizt		Dressiert Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Verzinkt	
		1x	2x		Ja	Nein
8_2019	1312x2,20		X	2,5		X
9_2019	1312x2,20		X	-		X
10_2019	1312x2,20		X	0,2		X
11_2019	1312x2,20		X	-		X
13_2019	1300x2,29	X		-	X	
14_2019	1312x2,20		X	2,5	X	
16_2019	1312x2,20		X	0,2	X	

Neben einer Auflagenmessung aller verzinkten Proben ist für dieses Versuchsprogramm vor allem die Oberflächenrauigkeit ein zentraler Bestandteil. Hierbei gilt es zu ermitteln, ob das Dressieren mit unterschiedlichen Walzenrauigkeiten maßgeblich Einfluss auf die Oberfläche des Stahls genommen, beziehungsweise welche Rauwerte dieser nach dem Prozess angenommen hat. Weiters soll auch eine Aussage darüber getroffen werden, ob diese Topographie der Oberfläche über die gesamte Bandbreite konstant ist, oder ob sich zum Rand hin Unterschiede ergeben.

Zu diesem Zweck erfolgte mit einem mechanischen Handmessgerät des Herstellers Diavite die Messung des Mittenrauwertes Ra und der gemittelten Rautiefe Rz. Die Bestimmungen erfolgen über eine Gesamtmessstrecke von 4 mm pro Messpunkt in insgesamt sieben über die Bandbreite verteilte Bereiche. Jeder Messbereich wird hierbei mehrmals an Ober- und

Unterseite abgetastet, um die die auftretende Abweichung zu minimieren. Außerdem erfolgt an jedem Messpunkt eine Messung in Längs- und in Querrichtung, da aufgrund des Walzens von einer Anisotropie der Oberflächenrauigkeit auszugehen ist. Abbildung 39 zeigt das entsprechende Gerät des Herstellers DIAVITE [51] inklusive des verwendeten Messtasters.



Abbildung 39: DIAVITE Compact II mit Konturtaster [51]

Zusätzlich zur mechanischen Messung der Rauigkeit erfolgt auch eine stichprobenartige Kontrolle der Stahloberfläche anhand von Schlifffen. Zu diesem Zweck ergaben sich aus allen in Tabelle 5 dargestellten Proben vier Einbettungen, jeweils in der Bandmitte und an der Bandkante ein Längs- und ein Querschliff. Die Dokumentation dieser Schlitfe am Lichtmikroskop unter 500-facher Vergrößerung soll eine entsprechende Vergleichbarkeit sicherstellen. Von besonderem Interesse sind die Gegenüberstellungen der Oberflächenbeschaffenheit zwischen dem unbeschichteten und dem beschichteten Material. Als Beispiel für diesen Vergleich sind die Schlitfe in der Bandmitte, welche die Oberfläche quer zur Walzrichtung zeigen, in den Abbildung 40 bis Abbildung 42 dargestellt.

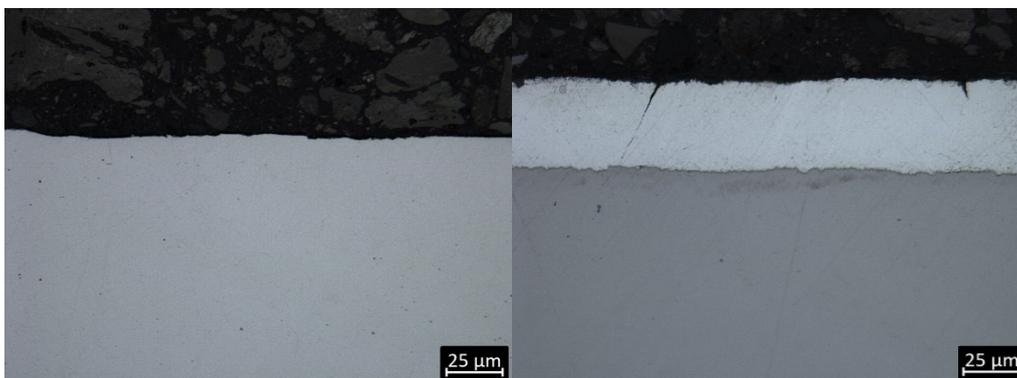


Abbildung 40: Darstellung der Querschliffe 8.2 (links) und 14.2 (rechts), bezogen auf die internen Probenbezeichnungen laut Tabelle 5

Bei den hier dargestellten Oberflächen der Proben 8 und 14 erfolgte die Bearbeitung mit der rauen Dressierwalze. Dabei ist keine gravierende Topographie sowohl im Vormaterial als auch im verzinkten Produkt zu erkennen. Die Zahl 2 nach der Probenbezeichnung bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Messrichtung, die bei den hier dargestellten Proben quer zur Walzrichtung verläuft. Bei den in Anhang B befindlichen Aufnahmen sind auch jene in Längsrichtung, mit der Ziffer 1 nach der Probennummer, zu finden.

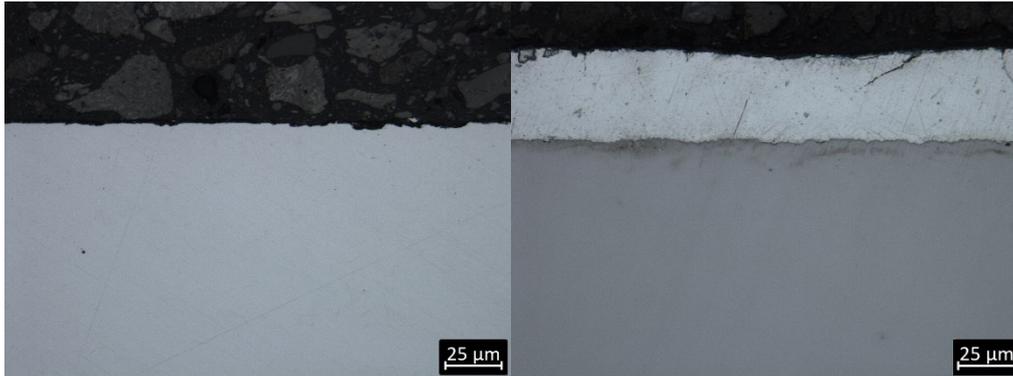


Abbildung 41: Darstellung der Querschliffe 10.2 (links) und 16.2 (rechts), bezogen auf die internen Probenbezeichnungen laut Tabelle 5

Die Querschliffe 10.2 und 16.2 zeigen das glatt dressierte Vormaterial und die daraus resultierende verzinkte Oberfläche. Hier lässt sich ebenso keine wesentliche Unebenheit feststellen, auch der Vergleich mit Abbildung 40 zeigt keinen signifikanten Unterschied.

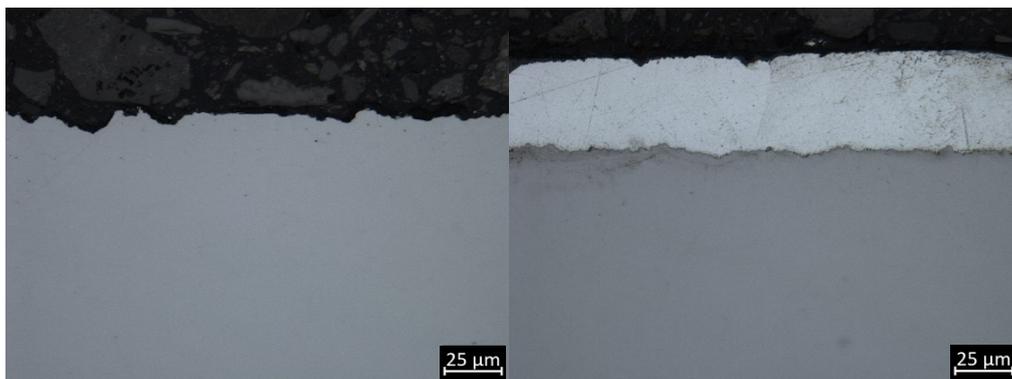


Abbildung 42: Darstellung der Querschliffe 11.2 (links) und 13.2 (rechts), bezogen auf die internen Probenbezeichnungen laut Tabelle 5

Die Querschliffe der Proben 11 und 13 zeigen den Unterschied zwischen der Oberfläche des undressierten Bereichs vor und nach dem Verzinkungsprozess. Der Verzicht auf diesen Prozessschritt führt zu einer deutlich stärker ausgeprägten Topographie sowohl im Vormaterial als auch im Endprodukt.

Im Zuge dieser Untersuchung erfolgte die lichtmikroskopische Auswertung von insgesamt 28 Einzelproben, die allesamt den Blechproben aus Tabelle 5 entnommen wurden. Eine detaillierte Aufstellung dieser Abbildungen ist dem Anhang B zu entnehmen.

### 3.6 Analyse Zinkbad

Zusätzlich zur Bandanalyse steht auch eine Untersuchung des Metallbades im Fokus. Hierbei sollen zwischen einigen Parametern der Schmelzen der Produktionsstandorte bei Wuppermann Hungary und Wuppermann Staal Nederland Vergleiche gezogen werden, um dadurch das Auftreten der zuvor definierten Fehler begründen zu können.

#### 3.6.1 Chemische Analyse

Als größtes Unterscheidungsmerkmal zwischen den verwendeten Überzugslegierungen ist die chemische Zusammensetzung derselben zu nennen. Durch funkenspektrometrische Analysen von während der Produktion entnommenen Badproben kann ein direkter Vergleich zwischen den betreffenden Legierungen gezogen werden. Als zusätzlicher Parameter sind in der nachfolgenden Tabelle 6 auch die wichtigsten Bestandteile der Metalllegierung der Wuppermann Austria aufgelistet.

Tabelle 6: Chemische Analyse der Badproben. Alle Werte sind in Massen-% angegeben.

	Al	Cu	Pb	Fe	Mn	Ni	Zn
WH	0,194	0,0029	0,0020	0,0150	0,0022	0,0019	99,78
WSN	0,192	0,0010	0,0023	0,2100	0,0016	0,0026	99,78
WA	0,215	0,0013	0,0022	0,0073	0,0008	0,0023	99,77

Wie zu erkennen ist, weichen die Legierungszusammensetzungen dieser Schmelzen nur sehr wenig voneinander ab. Sowohl die analysierte Badproben der WH als auch jene der WSN entstammen der Produktionsbegleitung einer Z600 Kampagne, wobei bei jener der WSN zumindest einige Bananen aufgetreten sind und bei der Produktion der WH gar keine.

#### 3.6.2 Einschlussanalyse

Da die die Legierungszusammensetzungen nur wenig voneinander abweichen, ist ein weiteres mögliches Unterscheidungsmerkmal heranzuziehen. Zu diesem Zweck wird wiederum eine lichtmikroskopische Untersuchung der erstarrten Badproben durchgeführt, um Verunreinigungen, Einschlüsse oder intermetallische Phasen zu detektieren. Dafür wird nach

dem Schleifen und Polieren die Probe noch zusätzlich mit einer OPS-Suspension aufpoliert, um eine bessere Probenfläche für die nachfolgende optische Auswertung zu erhalten.

Um einen möglichst großen Bereich abzudecken und so die durchschnittliche Fehleranzahl pro Fläche bestmöglich zu nähern, erfolgt die Analyse anhand von Aufnahmen von 3x3-Bildern mit 50-facher Vergrößerung. Zur besseren Visualisierung der gefundenen Einschlüsse sind in Abbildung 43 jeweils repräsentative Ausschnitte der analysierten Bilder dargestellt.

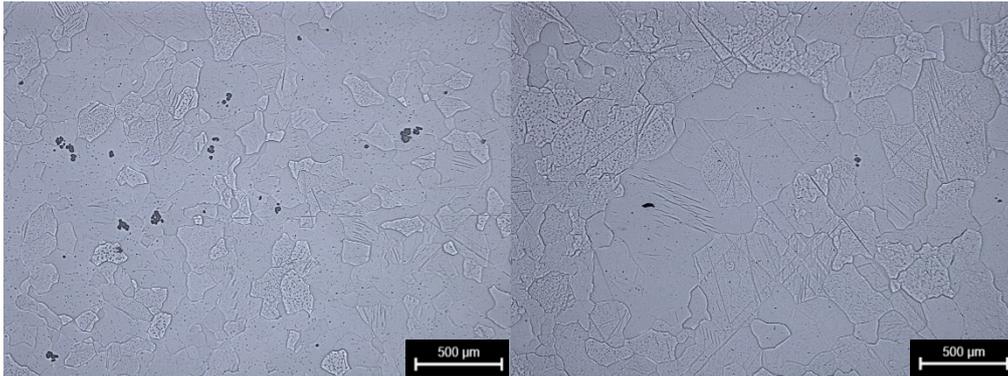


Abbildung 43: OPS-polierter Oberfläche der Badprobe der WH (links) und der WSN (rechts) jeweils mit 50-facher Vergrößerung

Deutlich erkennbar sind neben der Gefügestruktur die dunklen Einschlüsse im erstarrten Material. Bereits in diesem kleinen Abschnitt lässt sich erahnen, dass die Anzahl der Ausscheidungen pro Flächeneinheit bei der Badprobe der WH um ein Vielfaches größer ist als jene der WSN. Die optische Auswertung einer größeren Fläche von etwa 25 mm<sup>2</sup> auf jeder der beiden Proben kommt zu den in Tabelle 7 gezeigten Ergebnissen

Tabelle 7: Ergebnisse der optischen Auswertung

	Analysierte Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Gesamtfläche Einschlüsse [mm <sup>2</sup> ]	Anteil Einschlüsse [%]	Anzahl Einschlüsse	Durchschnittliche Größe der Einschlüsse [µm <sup>2</sup> ]
WH	24,98	0,128	0,511	254	502
WSN	25,37	0,011	0,044	37	301

Deutlich zu erkennen ist der höhere Anteil an Einschlüssen an der betrachteten Fläche der WH-Badprobe. Außerdem sind sowohl die Anzahl als auch die durchschnittliche Größe der einzelnen Partikel wesentlich größer als bei dem Vergleichsmuster der WSN.

Zusätzlich zur optischen Analyse erfolgt auch eine Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der eingeschlossenen Partikel. Die bereits eingebetteten und präparierten Proben werden dafür mittels EDX-Messung im Rasterelektronenmikroskop an mehreren

Einschlüssen analysiert. Abbildung 44 zeigt einen dafür verwendeten Bildausschnitt sowie die zur Bestimmung der Zusammensetzung herangezogenen Messpunkte.

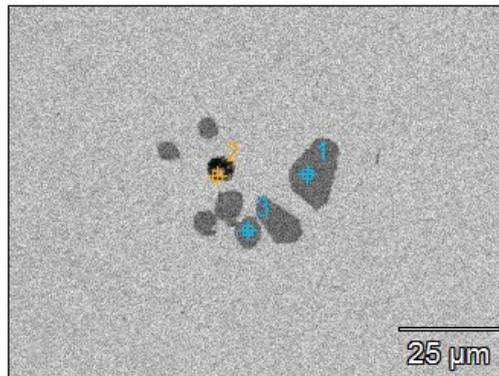


Abbildung 44: Einschlüsse der Badprobe unter 1000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop

Zusätzlich zur EDX-Analyse im eigenen Labor erfolgte noch eine Kontrollmessung eines Einschlusses in einer externen Untersuchungseinrichtung, wodurch sich die Ergebnisse, die in Tabelle 8 dargestellt sind, bestätigen lassen. Der Messpunkt 2 entspricht keinem typischen Einschluss und wird deshalb in der folgenden Tabelle 8 nicht beachtet.

Tabelle 8: Zusammensetzung eines Partikels

Messpunkt	Al [Massen-%]	Fe [Massen-%]	Zn [Massen-%]	Al [Atom-%]	Fe [Atom-%]	Zn [Atom-%]
1	44,0	37,7	18,2	63,1	26,1	10,8
3	42,3	35,8	21,8	61,7	25,2	13,1
Extern	42,5	36,4	21,1	61,8	25,6	12,6

Während das Aluminium für die Ausbildung der Hemmschicht notwendig ist, kann das Eisen hier als Verunreinigung gesehen werden. Sollte eine zu große Menge an Aluminium dadurch abgebunden sein, kann es zu Benetzungsstörungen oder zur Abnahme der Zinkschichtqualität kommen. Aufgrund der durchgeführten Spektralanalysen der vorliegenden Einschlüsse, ist mit großer Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass es sich bei den gebildeten Partikeln um  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ -Ausscheidungen handelt.

### 3.7 Highspeed-Videos

Um die Ursache für die Ausbildung der charakteristischen Fehler anhand von Beobachtungen des Prozesses auszumachen, wurden alle Begleitungen von Z600 Produktionen mit einer Highspeed-Kamera aufgezeichnet. Im Zuge dieser Produktionskampagnen erfolgt sowohl die

Dokumentation wesentlicher Parameter, die Beurteilung der Oberflächenqualität, die Probenahme und die Erstellung der Videoaufnahmen. Dadurch ist es möglich, die auftretenden Strömungsprofile sowohl in der Bandmitte als auch am Rand zu zeigen. Ein Überblick über die verwendete Kamera sowie die Bereiche, auf denen bei der Beobachtung ein besonderer Fokus liegt, ist im Folgenden erwähnt.

### 3.7.1 Gerätespezifikation

Die verwendete Kamera vom Typ Chronos 1.4 hat eine Aufnahmerate von 1,4 Gigapixel pro Sekunde. Das ergibt für eine Videoauflösung von 1280x1024 eine Bildrate von 1057 Bilder pro Sekunde. Durch Skalierungen der Bildgröße ist jedoch eine Erhöhung auf bis zu 38500 fps (frames per second) möglich. Die verwendete Variante hat einen internen Speicher von 32 GB und kann so etwa 16 Sekunden lange aufzeichnen. Abbildung 45 zeigt das verwendete Gerät vom Hersteller Kron Technologies. [52]



Abbildung 45: Darstellung der Kamera des Typs Chronos 1.4 [52]

Besonders hilfreich für die Beobachtung von kontinuierlichen Prozessen ist hierbei die Möglichkeit des Ringspeichers, den dieses Gerät bietet. Dadurch lässt sich aus einer kontinuierlichen Aufnahme und Sicherung im internen Speicher nach der Betätigung eines Triggers ein voreingestellter Zeitraum vom 0–16 Sekunden auslesen und abspeichern.

Mit der Netzfrequenz von 50 Herz und der vorhandenen Lichtstärke ist die vorhandene Hallenbeleuchtung der Produktionsstandorte für die Aufnahme von Hochgeschwindigkeitsvideos unzureichend. Daher kommt zusätzlich zur Kamera ein flimmerfreier LED-Flächenstrahler mit einer Strahlungsleistung 72 Watt zum Einsatz. Aufgrund der kurzen Verschlusszeiten muss eine Überbelichtung des zu filmenden Objekts bei ausreichender Gleichmäßigkeit des Lichtstrahls vorliegen.

### 3.7.2 Beobachtete Bereiche

Von besonderem Interesse im Zuge der Produktionsbegleitung ist die Beobachtung der Bandkante vom Auftauchen des Zinkbades bis zum Beginn der Kühlstrecke. Der Fokus liegt hierbei vor allem auf den Bereich direkt unter und über dem Airknife, da hier wahrscheinlich der Beginn der Bananen-Bildung zu suchen ist. Während an der Unterseite der Schlitzdüsen hauptsächlich das Strömungsprofil des abgestreiften Zinks zu sehen ist, zeigen die Aufnahmen oberhalb vor allem die Erstarrungsstruktur der sich bildenden Oxidschicht und das abfließende Metall. In der Auswertung gilt es nun herauszufinden, ob durch die vorhandenen Aufnahmen Rückschlüsse auf die Quelle der Fehler möglich sind. Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen jeweils typische Darstellung der Bandkante oberhalb des Jets mit den charakteristischen Strukturen.



Abbildung 46: Entwicklung einer typischen Erstarrungsstruktur bei Wuppermann Staal Nederland.  
Aufnahme mit Hilfe der Kamera vom Typ Chronos 1.4

Während die hier ersichtliche Erstarrung sich immer weiter zur Bandmitte hin ausbreitet, kann man zusätzlich auch das Abfließen des noch flüssigen Metalls darunter in den Videomitschnitten erkennen. Beim weiß markierten Bereich handelt es sich um dasselbe Phänomen. Zwischen den beiden Bildern liegt im realen Prozess eine Zeitspanne von etwa 0,15 Sekunden die mithilfe der Highspeed-Funktion auf drei Sekunden Videomaterial mit 60 Bildern pro Sekunde gestreckt werden konnten.

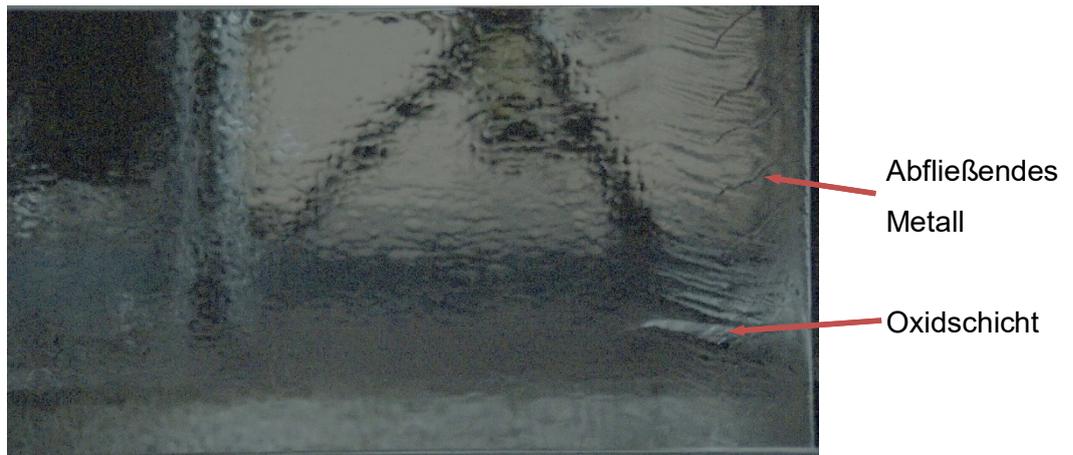


Abbildung 47: Erstarrungen am Rand und abfließende Überzugslegierung Wuppermann Hungary. Aufnahme mittels Highspeedkamera Chronos 1.4

Hier wird die Überlagerung dieser beiden Effekte noch deutlicher. Obwohl sich bereits eine erstarrte Schicht bildet, kommt es dennoch zum Abfließen der Zinkschicht. Dieses Phänomen lässt sich so nur an der Bandkante erkennen. In der Bandmitte kommt es zwar ebenfalls zum Abfließen des noch nicht erstarrten Überzugs, allerdings sind vor Erreichen der Kühlstrecke noch keine oberflächlichen Erstarrungen zu erkennen. Abbildung 48 zeigt typische an der Oberfläche erkennbare Phänomene bei der Herstellung eines Bands mit einer Z600-Auflage.



Abbildung 48: Aufnahme der Bandoberfläche direkt unterhalb der Kühlstrecke

In diesem Bereich knapp unterhalb der Kühlstrecke sind auftretende Bananen-Defekte bei der Bandbeobachtung auszumachen. Davon lässt sich auch mit den Videos keine Ursache für dieses Fehlerbild ausmachen, obwohl bei der Sichtung eines Fehlers sofort die letzten acht Sekunden des Videomaterials gespeichert wurden, und somit die Quelle eines solchen Fehlers durchaus am Video zu finden sein müsste.

## 4 Ergebnisse

Die durch die Untersuchungen gewonnenen Messdaten und Erkenntnisse sollen nun der nachfolgenden Diskussion dienen und sind daher nach den verschiedenen Teiluntersuchungen gegliedert und werden nachfolgend dargestellt.

### 4.1 Messdaten der Zinkschichtdickenmessung

Aufgrund der im Anhang befindlichen Schichtdickenmessungen der verschiedenen Proben lassen sich speziell bei der Ausbildung der Randschichtüberhöhung wesentliche Unterschiede feststellen. Abbildung 49 zeigt die Differenzen in der Ausbildung dieser Randschicht anhand der Schichtdickenauswertung verschiedener Produktionsstandorte und Produktionszeiten.

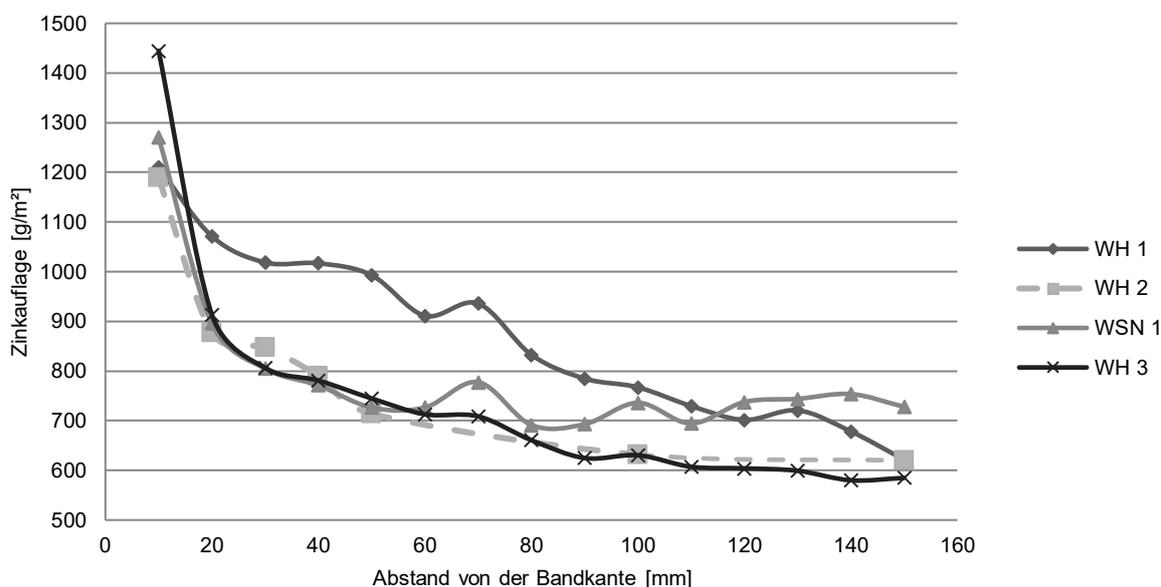


Abbildung 49: Schichtdickenverläufe an den Bandkanten von verschiedenen Z600-Produktionen bei WSN und WH

Die hier dargestellten Verläufe der Randschichtüberhöhung sind in der Tabelle 9 den entsprechenden Vormaterialspezifikationen zugeordnet. Die Messung WH 2 ist demnach als Referenz zu verstehen, da es sich hierbei nicht um Breitband handelt. Alle Messdaten entsprechen den Mittelwerten der Zinkschichtdickenmessungen von mehreren Proben derselben Produktionskampagne, wobei die Werte von Oberseite und Unterseite zusammengerechnet und gemittelt sind.

Tabelle 9: Übersicht der analysierten Bleche

Messreihe	Produktionsdatum	Bandbreite [mm]		Banddicke [mm]	
		Min.	Max.	Min.	Max.
WH 1	08.2018	1211	1213	3,72	4,12
WH 2	09.2018	725	725	1,50	1,50
WSN 1	01.2019	1213	1213	3,00	3,00
WH 3	03.2019	1300	1312	2,00	2,29

Grundsätzlich zeigen sich im Zuge dieser Messungen teils gravierende Randschichtüberhöhungen über einen Bereich von bis zu 150 mm von der Bandkante. Die dort gemessenen Zinkauflagen sind bis zu 2,5-mal höher als die nominelle Auflage des Materials. Das führt nicht nur beim Aufwickeln des Bandes zu Problemen, sondern verursacht bereits in der Produktionsphase bis zur Durcherstarrung des Überzugsmetalls Fehler.

Um die Korrektheit der Zinkauflagemessung zusätzlich zu verifizieren, erfolgte, wie in Abbildung 37 angedeutet, eine zusätzliche Messung anhand von Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop. In Abbildung 50 sind die Ergebnisse dieser Analyse im Vergleich zu den Resultaten des magnetinduktiven Messtasters dargestellt.

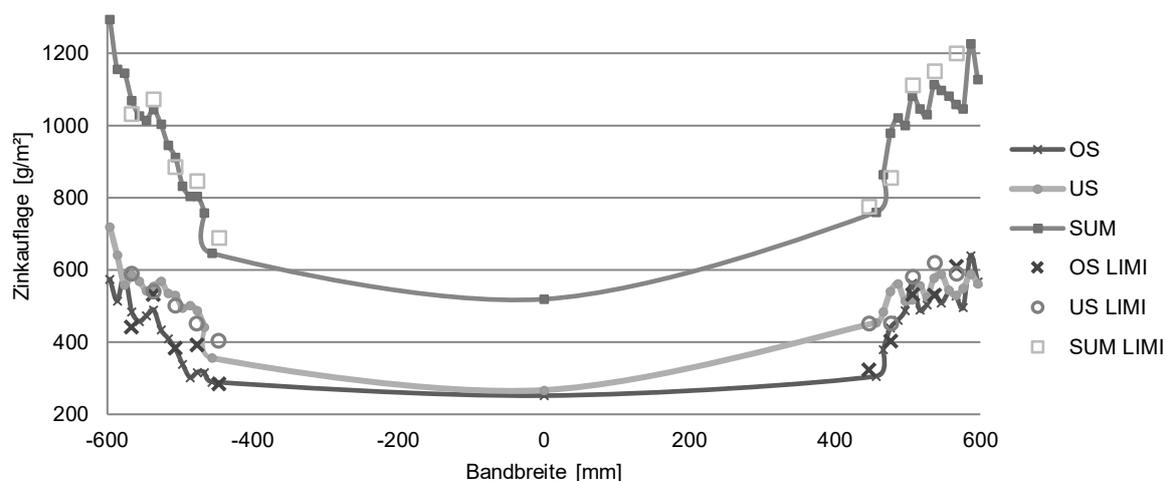


Abbildung 50: Vergleichsmessungen zwischen magnetinduktiven Messtaster und lichtmikroskopischer Untersuchung anhand der Probe 6\_2018

Es zeigt sich in diesen Aufnahmen sehr klar, dass die lichtmikroskopisch gemessenen Werte mit denen des Messtasters sehr gut korrelieren. Demnach ist bei regelmäßiger Kalibration des Geräts davon auszugehen, dass die ermittelten Messwerte für die Untersuchung der Randschichtüberhöhung ausreichen. Die weiteren Diagramme der ausgewerteten WH-Versuchsreihe mit der internen Probebezeichnung 13\_2019, 14\_2019, 16\_2019 und einer Vergleichsmessung der WSN-Probe mit der Nummer 6\_2019 befinden sich im Anhang C.

## 4.2 Ergebnisse der Rauheitsmessung

Diese Rauheitsmessungen erfolgten für die betreffenden Proben 8\_2019 – 11\_2019 sowohl in Längs- als auch in Querrichtung. Aus diesen Werten lassen sich die in Abbildung 51 und Abbildung 52 gezeigten Diagramme erstellen. Diese sollen die Gleichmäßigkeit der Rauigkeit über die gesamte Oberfläche zeigen und einen Vergleich zwischen der nominellen Rauheit der Walzenoberfläche und den tatsächlichen Rauheitswerten am gebeizten Material ermöglichen.

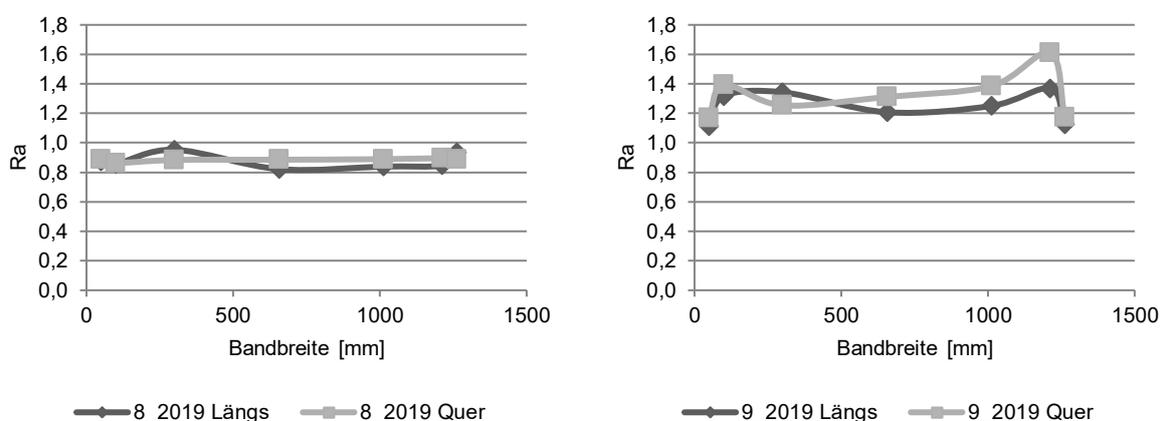


Abbildung 51: Messwerte für das rau dressierte Material mit Walzenrauigkeit Ra = 2,5 (links) und die Messwerte des ungewalzten Bereichs des Coils (rechts)

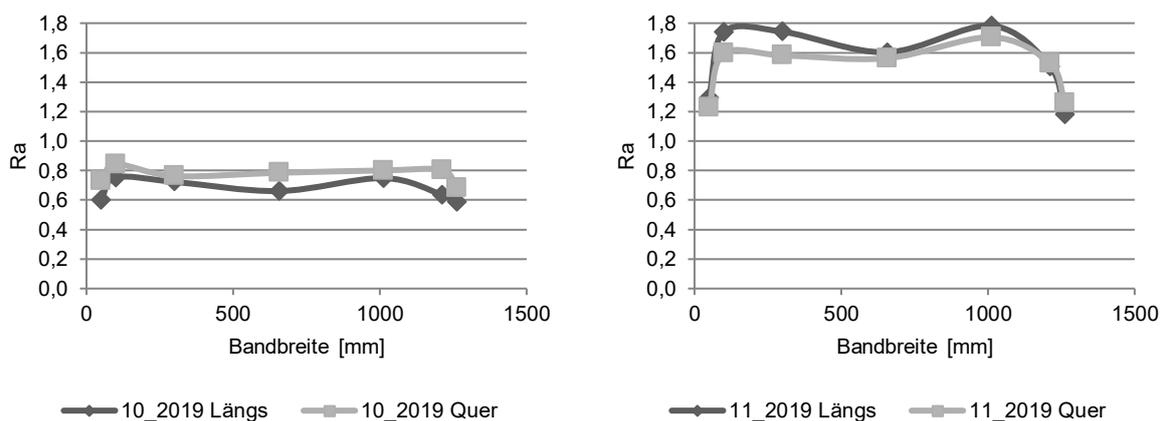


Abbildung 52: Messwerte für das glatt dressierte Material mit Walzenrauigkeit Ra = 0,3 (links) und die Messwerte des ungewalzten Bereichs des Coils (rechts)

Folgende Aussagen lassen sich aufgrund der vorliegenden Messungen der Oberflächenrauigkeit tätigen:

- Die Rauigkeit der dressierten Oberfläche entspricht nicht den nominellen Ra-Werten der Dressierwalzen. Es lässt sich zwischen den glatt und den rau dressierten Mustern nur ein minimaler Unterschied erkennen.
- Der Dressiervorgang führt allerdings zu gleichmäßigeren Ra-Werten über die gesamte Breite der analysierten Probe.
- Die Messwerte in Längs- und in Querrichtung korrelieren bei allen ausgewerteten Mustern und weichen nur geringfügig voneinander ab.
- Diese Aussagen sind allesamt für die Beschreibung der Rz-Werte ebenfalls zutreffend. Diese sind im Anhang D zu finden.

### 4.3 Durchführung der Z600-Produktion mit dem gebeizten und dressierten Material

Nach der Untersuchung der vorliegenden Proben auf deren Rauigkeit erfolgt die Verzinkung des betreffenden Materials. Ziel ist es sowohl mittels „in-situ“-Beobachtungen als auch durch nachgeschaltete metallographische Untersuchungen den Einfluss der Oberfläche auf die Ausbildung von Fehlstellen zu eruieren.

Um die Gleichmäßigkeit der Produktionsbedingungen zu gewährleisten, erfolgte der Einsatz des Materials inmitten einer Produktionskampagne nach dem Verzinken von zwei Z600 Ringen ähnlicher Dimension. Die Anwendung des Rohmaterials fand in der in Tabelle 10 dargestellten Reihenfolge statt. Außerdem sind die Nummern der daraus resultierenden Proben tafeln dort ebenfalls vermerkt.

Tabelle 10: Übersicht der Probenspezifikationen

Coil-Nr.	Abmessung [mm]	Oberflächenzustand vor dem Verzinken	Proben-Nr.
2080016934	1300x2,29	Unbehandelt	12_2019
			13_2019
2082040799	1312x2,20	Gebeizt	-
		Gebeizt und Ra=2,5 dressiert	14_2019
			15_2019
2082040803	1312x2,20	Gebeizt	-
		Gebeizt und Ra=0,2 dressiert	16_2019
			17_2019

Insgesamt neun Videosequenzen halten die rechte Bandkante im Bereich über dem Jet fest. Der Fokus lag hierbei bei der Dokumentation von normalen Produktionsbedingungen sowie

von Phänomenen, die sich im weiteren Prozessverlauf zu Fehlern entwickeln können. Während der Aufnahme- und Speichersequenzen erfolgte stichprobenartig an mehreren Punkten entlang der Anlage die Bandbeobachtung. Grundsätzlich lassen sich anhand der Aufzeichnungen folgende Aussagen über die Qualität treffen:

- Die erstarrten Bereiche an der Zinkoberfläche, die bereits vor der Kühlstrecke auftreten, sind an allen drei Vormaterialien in ihrer Ausdehnung ähnlich. Allerdings ist deren Ausdehnung nicht immer symmetrisch an beiden Bandkanten. Dies hat aber augenscheinlich nichts mit dem Vormaterial zu tun, sondern ist einem ungleichmäßigen Abstand vom Jet zum Band geschuldet.
- Die verzinkte Oberfläche zeigte keine gravierenden Oberflächenfehler. Auch zwischen den beiden Vormaterialhälften mit verschiedenen Rauigkeiten liegt kein wesentlicher Unterschied vor.
- Beim ersten eingesetzten Ring gibt es während der Produktion zuerst eine Zunahme des erstarrten Zinküberzugs im beobachtbaren Bereich unterhalb der Kühlstrecke. Zum Ende dieses Coils hin und mit Beginn des nächsten nehmen diese erstarrten Bereiche in ihrer Ausdehnung wieder ab. Die relevanten Prozessdaten für dieses Coil sind in Abbildung 53 dargestellt.

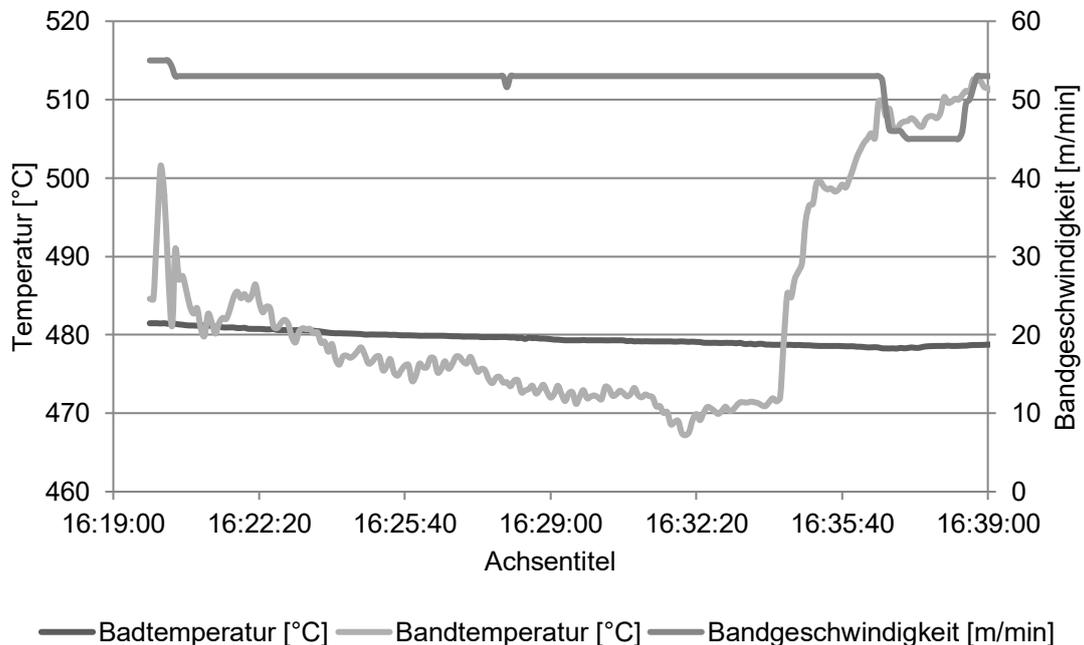


Abbildung 53: Auswertung der Prozessdaten des unbehandelten Vormaterials hinsichtlich der relevantesten Parameter

## 5 Diskussion

Wie im Zuge des Literaturstudiums bereits festgestellt, sind die vorliegenden Phänomene das Ergebnis multidimensionaler komplexer Zusammenhänge. Dennoch lassen sich aufgrund der gesammelten Daten einige Zusammenhänge erkennen und aufgrund dieser die nächsten Schritte koordinieren. Speziell die Problematik der Absacker ist nun besser verständlich und es sind nun entsprechende Gegenmaßnahmen zu setzen, um deren Entstehung entgegenzuwirken. Für die Bananen haben sich aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse zumindest die möglichen zugrundeliegenden Ursachen eingegrenzt.

- Absacker

Aufgrund der gesteigerten Produktionsgeschwindigkeit im Zuge der Inbetriebnahme der Anlage ist bereits ein Rückgang der Absacker zu beobachten. Das korreliert mit der Annahme, dass eine Verminderung der zur Oxidation vorhandenen Zeit vor dem Abstreifen sich positiv auf die Vermeidung dieser Fehler auswirkt. Der Einfluss der Jethöhe auf die Bildung von Absackern, wie ebenfalls in der Literatur postuliert, ist bei den vorliegenden Produktionsbedingungen zu vernachlässigen, da aufgrund früherer Prozessentwicklungen bei Wuppermann generell mit sehr geringen Abständen zwischen Bad und Jet gearbeitet wird.

- Bananen

Eine Erklärung für das Auftreten von Bananen in Kombination mit der Kantenüberhöhung ist die Gewichtskraft des noch flüssigen Metalls. Diese Kraft bewirkt eine Zugspannung in der erstarrten Oberfläche und kann diese Schicht zerstören, wenn die erzeugte Spannung zu groß ist. Es gilt also die resultierende Zugkraft durch die Reduktion der Kantenüberhöhung und damit der wirkenden Gewichtskraft zu vermindern. Eine weitere Möglichkeit ist die Förderung der raschen Ausbildung einer ausreichend dicken erstarrten Schicht. Da eine Primärkühlung in diesem Zusammenhang aber nur mit gasförmigen Medien möglich ist und diese bei zu großen Strömungsgeschwindigkeiten die Oberflächenqualität wiederum negativ beeinflussen, stellt dies keine prozesstechnisch relevante Möglichkeit dar.

Es gilt also durch eine entsprechende Prozessführung die entstehende Randschichtüberhöhung zu minimieren. Außerdem muss durch die Stabilisierung des Bandes und damit des Abstandes zwischen Düse und Band gewährleistet sein, dass sich diese Überhöhung an beiden Seiten annähernd gleich ausbildet.

- Oberflächenrauheit

Ein wesentlicher Einfluss der Oberflächenrauigkeit des Einsatzmaterials ist im getesteten Bereich nicht gegeben. Allerdings sind die erwarteten Unterschiede in der durch Dressieren aufgetragenen Rauheit nicht so entscheidend wie erwartet. Es könnte also bei größeren Vormaterialunterschieden durchaus visuelle Effekte im Endprodukt geben. Ausschlaggebend ist die Sicherstellung einer zunderfreien Oberfläche ohne Vormaterialbeschädigungen. Diese Fehlerquellen führen allerdings nicht nur bei hohen Zinkauflagen zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen.

- Prozessführung

Entscheidend für die Produktqualität sind allerdings die korrekten Prozessbedingungen. Wie in Abbildung 53 zu sehen ist, erfolgte beim ersten eingesetzten Coil gegen Ende hin die Erhöhung der Bandtemperatur bei gleichzeitiger Drosselung der Bandgeschwindigkeit. Obwohl diese Änderungen keine wesentlichen Qualitätsverluste nach sich zogen, da diese Parameter gleich mit Einsatz des nächsten Coils wieder auf den Ursprungswert geregelt wurden, ließ sich dennoch im Bereich zwischen Jet und Kühlstrecke ein Unterschied feststellen. Beobachteten Erstarrungsstrukturen verminderten sich durch die heißere Temperaturführung. Kurzfristig könnte eine solche Temperaturüberhöhung zu Qualitätsverlusten am Band führen und langfristig wäre eine Überhitzung des Zinkbads durch diese hohen Temperaturen ebenfalls möglich. Da eine Kühlung der Zinkschmelze vom Prozessprinzip nicht angedacht und auch nicht realistisch ist, wäre ein Prozessabbruch die logische Konsequenz.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Prozessführung bei der Produktion von warmgewalzten feuerverzinkten Bändern erweist sich aufgrund der immer höheren Qualitätsanforderungen an die Oberfläche der Beschichtung als äußerst schwierig. Es gilt die engen Bereiche, die sich für die verschiedensten Parameter finden, sehr präzise aufeinander abzustimmen, um ein hochwertiges Produkt zu erzeugen.

Ungemein schwieriger wird diese Abstimmung bei der Herstellung von Produkten mit neuem Vormaterial, höheren Auflagedicken oder neuen Überzugslegierungen. Im konkreten Fall dieser Arbeit konnten gewisse Parameter auf ihre Auswirkungen auf die Ausbildung von zwei speziellen Fehlern untersucht werden. Zu beachten ist allerdings, dass die meisten Parameter des Prozesses miteinander in irgendeiner Weise wechselwirken, was eine nicht gekoppelte Regelung von ausgewählten Prozessgrößen nahezu unmöglich macht. Es gilt also die aufgrund der Beobachtungen und Untersuchungen vermuteten Zusammenhänge aus diesen Wechselwirkungen zu extrahieren und nach Möglichkeit in weiteren Versuchsreihen zu verifizieren.

In dieser Arbeit konnte so unter anderem die Untersuchung der Wirkung der Oberflächenrauheit auf die Produktqualität von kontinuierlich feuerverzinktem warmgewalztem Breitband erfolgen. Diese zeigt in den untersuchten Rahmenbedingungen allerdings keine wesentlichen Einflüsse, sodass zukünftige Versuchsreihen auf Basis anderer Annahmen durchzuführen sind. Das Ziel dieser Experimente muss das Vermindern der entstehenden Randschichtüberhöhungen sein, entweder durch das Adaptieren vorhandener Prozesse beziehungsweise der verwendeten Anlagen. Das kann durch verbesserte Abstreifbedingungen, Bandtemperaturen und Badtemperaturen erfolgen. Nur so lassen sich in weiterer Folge noch höhere Auflagen mit entsprechend zufriedenstellender Qualität erreichen.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Kuklík V. und J. Kudláček: Hot-dip galvanizing of steel structures. Elsevier, Oxford (2016).
- [2] Hackl A.: Entwicklung von Zn-Al-Mg-Legierungen für das kontinuierliche Feuerverzinken von Warmband mittels CVGL®-Technologie. Dissertation, Montanuniversität, Leoben (2010).
- [3] Winand R.: Continuous strip coating: New zinc alloy tailored coatings. *Surface and Coatings Technology*, 37 (1989), 65–87.
- [4] Stahlinstitut VDEh: Oberflächenveredelung von Bandstahl. Internet: [www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/oberflächenveredelung/](http://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/oberflächenveredelung/) (Zugriff: 24.10.2018).
- [5] Salzgitter Flachstahl GmbH: Elektrolytisch verzinkte Stahlsorten. Internet: [www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/szfg/informationmaterial/produktmagazin\\_und\\_broschueren/deu/SAL\\_Z\\_elekt\\_Stahlsorten.pdf](http://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/szfg/informationmaterial/produktmagazin_und_broschueren/deu/SAL_Z_elekt_Stahlsorten.pdf) (Zugriff: 24.10.2018).
- [6] Marder A. R.: The metallurgy of zinc-coated steel. *Progress in Materials Science*, 45 (2000), 191–271.
- [7] Angerbauer A. und J. Berschl: Combined pickling and hot strip galvanising lines: trends and developments. *Steel World*, 1999, 39–43.
- [8] SMS group GmbH: Heat-to-Coat Pickling and Hot-dip Galvanizing Line. Internet: [www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/system-expertise-in-strip-processing-lines-from-a-single-source-337/](http://www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/system-expertise-in-strip-processing-lines-from-a-single-source-337/) (Zugriff: 24.10.2018).
- [9] Faderl J.: Kontinuierliche Bandverzinkung gestern-heute-morgen. *Schriftenreihe der GDMB* (2006), 103–118.
- [10] Jordan C. E. und A. R. Marder: Fe-Zn phase formation in interstitial-free steels hot-dip galvanized at 450°C: Part II 0.20 wt% Al-Zn baths. *Journal of Materials Science*, 32 (1997), 5603–5610.
- [11] Shukla S. K. et al.: Effect of Process Parameters on the Structure and Properties of Galvanized Sheets. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19 (2010), 650–655.

- 
- [12] Inagaki J.-i., Sakurai Michitaka und Watanabe Toyofumi: Alloying Reactions in Hot Dip Galvanizing and Galvannealing Processes. *ISIJ International*, 35 (1995), 1388–1393.
- [13] Steiner C. M.: Charakterisierung der Eigenschaften eines neuen Verbundwerkstoffes. Masterarbeit, Montanuniversität, Leoben (2018).
- [14] Brisberger R., W. Bechem und L. Leyhe: Einflussgrößen in der Produktion auf die Qualität von Galvannealed-Feinblech. *Stahl und Eisen* (2001), 49–56.
- [15] Brunner M.: Charakterisierung von Zn-Al-Mg-Legierungen für das kontinuierliche Feuerverzinken. Masterarbeit, Montanuniversität, Leoben (2010).
- [16] Anderson G. N. und N. Y. Tang: Aluminum distribution in a CGL bath. Vortrag, Galvanizers Association Proceedings, Chicago, USA 1996.
- [17] Hackl A. et al.: Entwicklung von Zn-Al-Mg-Legierungen zum Verzinken von Warmband mittels CVGL®-Technologie. *BHM* (2009), 398–402.
- [18] Berry L. J., C. H. Phillips und D. J. Penney: Understanding the role of snout contamination in the formation of an oxide based defect in hot dip galvanised coating. *Surface and Coatings Technology*, 306 (2016), 397–407.
- [19] Kim H.-Y. und J.-S. Kim: On Decreasing Zinc Dust in Snout Equipped CGL. Vortrag, Galvanizers Association Proceedings 2011.
- [20] Koutsaris C.: Metallic Foam Formation During Continuous Hot-Dip Galvanizing of Steel Sheet. Diplomarbeit, École Polytechnique de Montréal, Montréal (2011).
- [21] Tang N. Y.: Characteristics of Continuous-Galvanizing Baths. *Metallurgical and Materials Transactions* (1999), 145–148.
- [22] Assael M. J. et al.: Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Cadmium, Cobalt, Gallium, Indium, Mercury, Silicon, Thallium, and Zinc. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 41 (2012), 33101.
- [23] Gast-Bray A., M. Bretez und J. Y. Dauphin: Aluminum and Dross Repartition in Continuous Hot-Dip Galvanizing Baths. Vortrag, The Galvanizers Association Conferende 1993.
- [24] Kurobe J. und M. Iguchi: Size Effect on Dynamic Behavior of Dross in Model Hot Dip Plating Bath. *Material Transactions*, 44 (2003), 885–892.

- [25] Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) (Hg.): Oberflächenfehler an schmelztauchveredeltem Feinblech. Stahleisen, Verlag GmbH, Dusseldorf (1998).
- [26] Pim Verdaasdonk: White Paper on Bananas, Wuppermann Austria (08.06.2018).
- [27] Rolf Brisberger: Christmastree WSN, Wuppermann Austria (08.06.2018).
- [28] Dubois M. und F. E. Goodwin: Review on Wiping: A Key Process Limiting CGL Productivity. Vortrag, AISTech Conference 2012.
- [29] R. Wilhelm, D. Maas und A. Hueve: Evaluating Air Knife Adjustments with the Aid of a Coating Weight Model. Vortrag, Galvanizers Association Proceedings, Portland, USA 9.2001.
- [30] McDermid J. R. et al.: Modelling and Measurement of Novel Air-Knife Designs. Vortrag, Galvanizers Association Proceedings, Jackson, USA Oktober 2014.
- [31] Alibeigi S.: Experimental Investigation of Air-Knife Geometry in Continuous Hot-Dip Galvanizing, McMaster University, Hamilton, Ontario (2013).
- [32] E. A. Elsaadawy et al.: Air Knife Coating Weight Models - Improvements at Near Knife to Strip Distances. Vortrag, AISTech Conference, Charlotte, NC Mai 2005.
- [33] Loth J., P. Browning und B. Lester: On Line Actuator Adjustable Airknife from Bow to Fan Flow. Vortrag, Galvanizers Association Proceedings, Baltimore, USA Oktober 2008.
- [34] Fontaine Engineering und Maschinen GmbH: Basic Equipment. Internet: <https://www.foen-gmbh.de/de/foen/basic-equipment> (Zugriff: 07.11.2018).
- [35] Association for Iron and Steel Technology: AISTech 2012 (2012) online Proceedings.
- [36] Gosset A. und J.-M. Buchlin: Hot-Dip Galvanization and Jet Wiping Technique. Vortrag, 2006 ASME Joint U.S. - European Fluids Engineering Summer Meeting, Miami, USA (17.07.2006).
- [37] Tu C. V. und D. H. Wood: Wall pressure and shear stress measurements beneath an impinging jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 13 (1996), 364–373.
- [38] Jo C. M. et al.: A suggestion of a new method for the calculation of the coating thickness in continuous hot-dip galvanizing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25 (2011), 2781–2786.

- 
- [39] Myrillas K. et al.: Technique for delaying splashing in jet wiping process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50 (2011), 466–470.
- [40] Takeishi Y. und H. Morino: Mechanism and Prevention of Edge Over Coating in Continuous Hot-Dip Galvanizing. *ISIJ International*, 40 (2000), 1127–1133.
- [41] Mendez M. A. et al.: Experimental Characterization of the Jet Wiping Process. *EPJ Web of Conferences*, 180 (2018), 2064.
- [42] Kim S. J. et al.: Numerical Analysis of Edge Over-coating in Continuous Hot-dip Galvanizing. *ISIJ International*, 43 (2003), 1495–1501.
- [43] Dubois M.: Measuring The Pressure Uniformity at a Nozzle. Vortrag, Galvanizers Association Proceedings, Point Clear, USA 2011.
- [44] Naphade P., A. Mukhopadhyay und S. Chakrabarti: Mathematical Modelling of Jet Finishing Process for Hot-dip Zinc Coatings on Steel Strip. *ISIJ International*, 45 (2005), 209–213.
- [45] Gosset A. et al.: Modelling of Gas-Jet Wiping at Small Standoff Distances. Vortrag, Proc. of Euroocean Coating Symposium, University of Bradford September 2005.
- [46] Bao C., Y. Kang und Y. A.N. Li: Numerical Analysis of Edge Over Coating and Baffle Effect on Hot-Dip Galvanizing. *Surface Review and Letters*, 24 (2017), 1750010.
- [47] So H., H. G. Yoon und M. K. Chung: CFD Analysis of Sag Line Formation on the Zinc-coated Steel Strip after the Gas-jet Wiping in the Continuous Hot-dip Galvanizing Process. *ISIJ International*, 51 (2011), 115–123.
- [48] Tu C. V. und C. H. Ellen: Stability of Liquid Coating in the Jet Stripping Process. Vortrag, Fluid Mechanics Conference, Auckland Dezember 1986.
- [49] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 3497. Schichtdickenmessung Röntgenfluoreszenz-Verfahren (2001).
- [50] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 2178. Nichtmagnetische Überzüge auf magnetischen Grundmetallen - Messen der Schichtdicke - Magnetverfahren (2016).
- [51] Diavite AG: Compact II – Einfach, vielseitig und ausbaubar. Internet: <https://www.diavite.com/index.php/home.html> (Zugriff: 23.04.2019).
- [52] Kron Technologies Inc.: Chronos 1.4 - Datasheet. Internet: <https://www.krontech.ca/wp-content/uploads/2019/03/FM-ENGR-50001-Chronos-1.4-Datasheet-Rv4-1.pdf> (Zugriff: 29.04.2019).



## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kontinuierliche elektrolytische Bandverzinkungsanlage [5] .....	3
Abbildung 2:	Kontinuierliche Feuerverzinkungsanlage für kaltgewalztes Band. 1. Abhaspel, 2. Schweißmaschine, 3. Streckrichter, 4. Entfettung, 5. Beize, 6. Glüheinrichtung, 7. Oberflächenaktivierung, 8. Zinkbad, 9. Abstreifdüsen, 10. Richten, 11. Schere, 12. Haspel [1].....	4
Abbildung 3:	„Heat-to-Coat“-Beiz- und -Verzinkungsanlage von Wuppermann Hungary. 1) Abhaspel, 2) Schweißmaschine, 3) Streckrichter, 4) Zunderbrecher, 5) Beize, 6) Ofen, 7) Zinkbad, Düsenabstreifer, Kühlstrecke, 8) Dressiergerüst, 9) Passivierung, 10) Schere, 11) Haspel [8].....	5
Abbildung 4:	Isothermer Schnitt des ternären Zn-Fe-Al-Phasendiagramms (links) und die Zn-reiche Ecke (rechts) bei 450 °C [6] .....	6
Abbildung 5:	Isothermer Schnitt bei 460 °C im Bereich der Überzugslegierung des ternären Zn-Fe-Al-Phasendiagramms [6].....	7
Abbildung 6:	Ausbildung der Hemmschicht bei Schmelzen mit 0,20 Massen-% Al bei $t_0 = 0$ [s]; $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ [10] .....	8
Abbildung 7:	Diffusionspfad im metastabilen ternären Zn-Al-Fe-Zustandsdiagramm bei 450 °C [10] .....	8
Abbildung 8:	Mapping der Elemente Al, Fe und Zn im Bereich der Hemmschicht [13] .....	9
Abbildung 9:	Zinkschicht eines Z600 Überzugs mit 500-facher Vergrößerung unter Verwendung eines Polarisationsfilters, aufgenommen im Zuge der durchgeführten Untersuchungen .....	10
Abbildung 10:	Aufbau eines Zinkbades [17] .....	13
Abbildung 11:	Unterschied in der Dampfbildung mit trockener (links) und feuchter (rechts) Ofenatmosphäre [18].....	14
Abbildung 12:	Veränderung der Badchemie durch Eisenauflösung [6] .....	15
Abbildung 13:	Makroskopischer Dokumentation von zwei Blechstücken mit dem Bananen-Defekt, aufgenommen im Zuge der Untersuchungen bei Wuppermann Austria.....	17
Abbildung 14:	Im Zuge der Untersuchungen erstellte Aufnahmen von einem Christmastree (links) und mehreren Absackern (rechts) .....	18
Abbildung 15:	Horseshoe-Defekt [28].....	18
Abbildung 16:	Aufbau einer Abstreifvorrichtung der Firma FOEN [34].....	20

Abbildung 17:	Prinzip des Abstreifens [36] .....	20
Abbildung 18:	Beim Abstreifen wesentliche Parameter und auftretende Spannungen [36] .....	21
Abbildung 19:	Verlauf der Druck- und der Scherspannung für $Z/d = 2,0$ (links), $Z/d = 4,0$ (Mitte) und $Z/d = 12,0$ (rechts) [37] .....	22
Abbildung 20:	Schichtdicke der Z600 Probe 6_2018 mit der Abmessung 1213x3,32 .....	23
Abbildung 21:	Oberflächenspannungsinduzierte Ausbildung einer Randschichtüberhöhung [40] .....	23
Abbildung 22:	Verschiedene Formen von Kantenblechen. Parallel (1), Kantenmaske (2), senkrecht (3) und dreieckig (4) [40] .....	24
Abbildung 23:	Skizze einer Düse mit drei Schlitzten und dem entsprechenden Geschwindigkeitsprofil [30, 31] .....	25
Abbildung 24:	Erreichbares Druckmaximum in Abhängigkeit zur Distanz des Kantenblechs vom Stahlband. Der Abstand von der Schlitzdüse zum Blech ist 10 mm (links) beziehungsweise 14 mm (rechts) [46] .....	28
Abbildung 25:	Dimension einer Sagline dritten Grades. [47] .....	29
Abbildung 26:	Detailaufnahme des analysierten Absackers (links) und gemessene Schichtdicke (rechts). Die Messwerte sind in Mikrometer. ....	33
Abbildung 27:	Unbehandelte und gebeizte Probe eines Absackers .....	33
Abbildung 28:	Querschliff durch die in Abbildung 27 dargestellte Beschädigung mit 50-facher Vergrößerung (links) und 200-facher Vergrößerung (rechts) .....	34
Abbildung 29:	Darstellung der beiden untersuchten Bandfehler (Bananen-Defekt) mit der internen Probenbezeichnung 4 (links) und 7 (rechts) .....	35
Abbildung 30:	Lage der Schlitze der Probe 4 (links) und die makroskopischen Eindrücke nach dem Beizen von Probe 7 (rechts) .....	35
Abbildung 31:	Darstellung des Querschliffs 4.1 im Rasterelektronenmikroskop bei 1000-facher Vergrößerung (links) und bei 5000-facher Vergrößerung (rechts) .....	36
Abbildung 32:	Schlifflage an der abgebeizten Probenplatte .....	37
Abbildung 33:	Bereich der Verformung von Schliff 7.1 (links) und die unverformte Mitte des Stahls (rechts). Beide Bereiche sind mit Nital geätzt und 500-fach vergrößert .....	37
Abbildung 34:	Das magnetinduktive Messgerät DELTASCOPE MP38/GA2H von Fischer .....	39

---

Abbildung 35:	Die horizontal angeordneten Messpunkte (MP) unterteilen sich in jeweils drei vertikal ausgerichtete Einzelmessungen. ....	39
Abbildung 36:	Oberseite der Probe aus der Messreihe 5 mit den angezeichneten Messpunkten.....	40
Abbildung 37:	Ausschnitte der Querschliffe im Abstand von 30, 60, 90, 120, 150 und 180 mm von der linken Bandkante (oben) und dieselben Abstände von der rechten Bandkante (unten) .....	41
Abbildung 38:	Übersicht der Versuchsdurchführung. Die Coils mit den Nummern 1 und 2 haben die Dimension 1312x2,20, das Coil Nummer 3 hat die Dimension 1300x2,29.....	42
Abbildung 39:	DIAVITE Compact II mit Konturtaster [51] .....	44
Abbildung 40:	Darstellung der Querschliffe 8.2 (links) und 14.2 (rechts), bezogen auf die internen Probenbezeichnungen laut Tabelle 5 .....	44
Abbildung 41:	Darstellung der Querschliffe 10.2 (links) und 16.2 (rechts), bezogen auf die internen Probenbezeichnungen laut Tabelle 5 .....	45
Abbildung 42:	Darstellung der Querschliffe 11.2 (links) und 13.2 (rechts), bezogen auf die internen Probenbezeichnungen laut Tabelle 5 .....	45
Abbildung 43:	OPS-polierete Oberfläche der Badprobe der WH (links) und der WSN (rechts) jeweils mit 50-facher Vergrößerung .....	47
Abbildung 44:	Einschlüsse der Badprobe unter 1000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop .....	48
Abbildung 45:	Darstellung der Kamera des Typs Chronos 1.4 [52] .....	49
Abbildung 46:	Entwicklung einer typischen Erstarrungsstruktur bei Wuppermann Staal Nederland. Aufnahme mit Hilfe der Kamera vom Typ Chronos 1.4.....	50
Abbildung 47:	Erstarrungen am Rand und abfließende Überzugslegierung Wuppermann Hungary. Aufnahme mittels Highspeedkamera Chronos 1.4.....	51
Abbildung 48:	Aufnahme der Bandoberfläche direkt unterhalb der Kühlstrecke .....	51
Abbildung 49:	Schichtdickenverläufe an den Bandkanten von verschiedenen Z600-Produktionen bei WSN und WH .....	52
Abbildung 50:	Vergleichsmessungen zwischen magnetinduktiven Messtaster und lichtmikroskopischer Untersuchung anhand der Probe 6_2018 .....	53
Abbildung 51:	Messwerte für das rau dressierte Material mit Walzenrauigkeit Ra = 2,5 (links) und die Messwerte des ungewalzten Bereichs des Coils (rechts) .....	54

---

Abbildung 52:	Messwerte für das glatt dressierte Material mit Walzenrauigkeit $R_a = 0,3$ (links) und die Messwerte des ungewalzten Bereichs des Coils (rechts) .....	54
Abbildung 53:	Auswertung der Prozessdaten des unbehandelten Vormaterials hinsichtlich der relevantesten Parameter .....	56
Abbildung 54:	Analysespektrum der EDX-Untersuchung des Bereichs 2 .....	70
Abbildung 55:	Analysespektrum der EDX-Untersuchung des Bereichs 3 .....	70
Abbildung 56:	Analysespektrum der EDX-Untersuchung des Bereichs 5 .....	71
Abbildung 57:	Längsschliff der Proben 8_2019 (links) und 14_2019 (rechts) jeweils in der Bandmitte .....	72
Abbildung 58:	Längsschliff der Proben 8_2019 (links) und 14_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante .....	72
Abbildung 59:	Querschliff der Proben 8_2019 (links) und 14_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante .....	72
Abbildung 60:	Längsschliff der Proben 10_2019 (links) und 16_2019 (rechts) jeweils in der Bandmitte .....	73
Abbildung 61:	Längsschliff der Proben 10_2019 (links) und 16_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante .....	73
Abbildung 62:	Querschliff der Proben 10_2019 (links) und 16_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante .....	73
Abbildung 63:	Längsschliff der Proben 11_2019 (links) und 13_2019 (rechts) jeweils in der Bandmitte .....	74
Abbildung 64:	Längsschliff der Proben 11_2019 (links) und 13_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante .....	74
Abbildung 65:	Querschliff der Proben 11_2019 (links) und 13_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante .....	74
Abbildung 66:	Schichtdickenverlauf der Probe 6_2019 .....	75
Abbildung 67:	Schichtdickenverlauf der Probe 13_2019 .....	75
Abbildung 68:	Schichtdickenverlauf der Probe 14_2019 .....	76
Abbildung 69:	Schichtdickenverlauf der Probe 16_2019 .....	76
Abbildung 70:	Rz-Werte für das rau dressierte (links) und die Messwerte des ungewalzten Bereichs des Coils (rechts) .....	77
Abbildung 71:	Rz-Werte für das rau dressierte Material und die Messwerte des ungewalzten Bereichs des Coils (rechts) .....	77

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammensetzung und Wachstumsgeschwindigkeit der auf der Hemmschicht aufwachsenden Überzugsstruktur [6, 12] .....	9
Tabelle 2:	Aufstellung der gängigen ZM-Legierungen [15] .....	12
Tabelle 3:	Messwerte der EDX-Analyse .....	36
Tabelle 4:	Einteilung der durchgeführten Messungen .....	38
Tabelle 5:	Übersicht der Probenspezifikationen .....	43
Tabelle 6:	Chemische Analyse der Badproben. Alle Werte sind in Massen-% angegeben. ....	46
Tabelle 7:	Ergebnisse der optischen Auswertung .....	47
Tabelle 8:	Zusammensetzung eines Partikels .....	48
Tabelle 9:	Übersicht der analysierten Bleche .....	53
Tabelle 10:	Übersicht der Probenspezifikationen .....	55
Tabelle 11:	Ra-Werte der Messungen in Längsrichtung .....	78
Tabelle 12:	Ra-Werte der Messungen in Querrichtung .....	79
Tabelle 13:	Rz-Werte der Messungen in Längsrichtung .....	80
Tabelle 14:	Rz-Werte der Messungen in Querrichtung .....	81

## 10 Anhang A

Hier sind die mittels EDX-Analyse ermittelten Spektren der in Abbildung 31 Absatz 3.3 gezeigten Messpunkte dargestellt. Die daraus resultierenden Zusammensetzungen der analysierten Bereiche sind in Tabelle 3 ersichtlich.

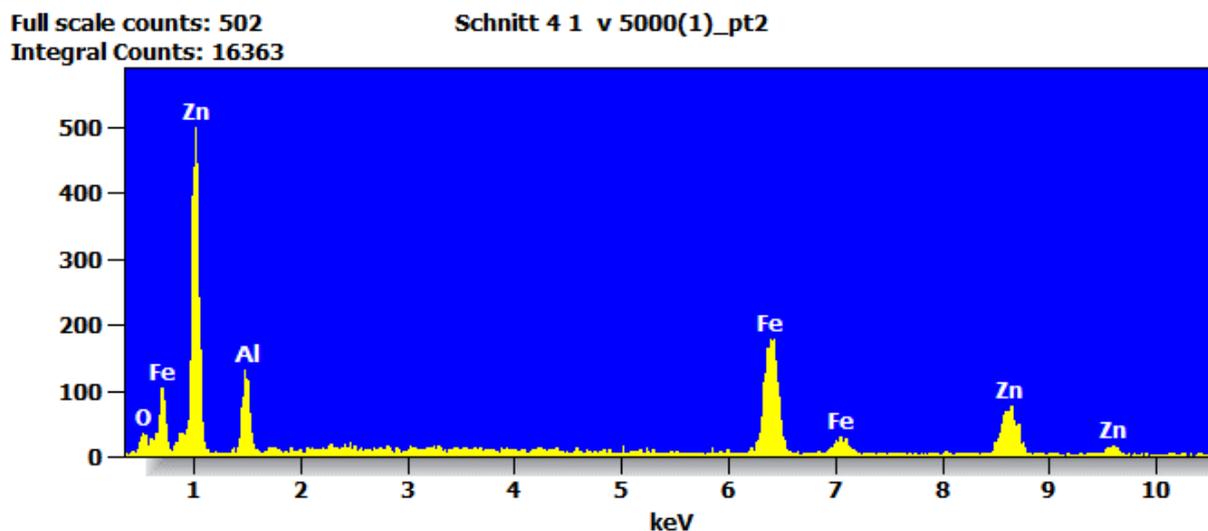


Abbildung 54: Analysespektrum der EDX-Untersuchung des Bereichs 2

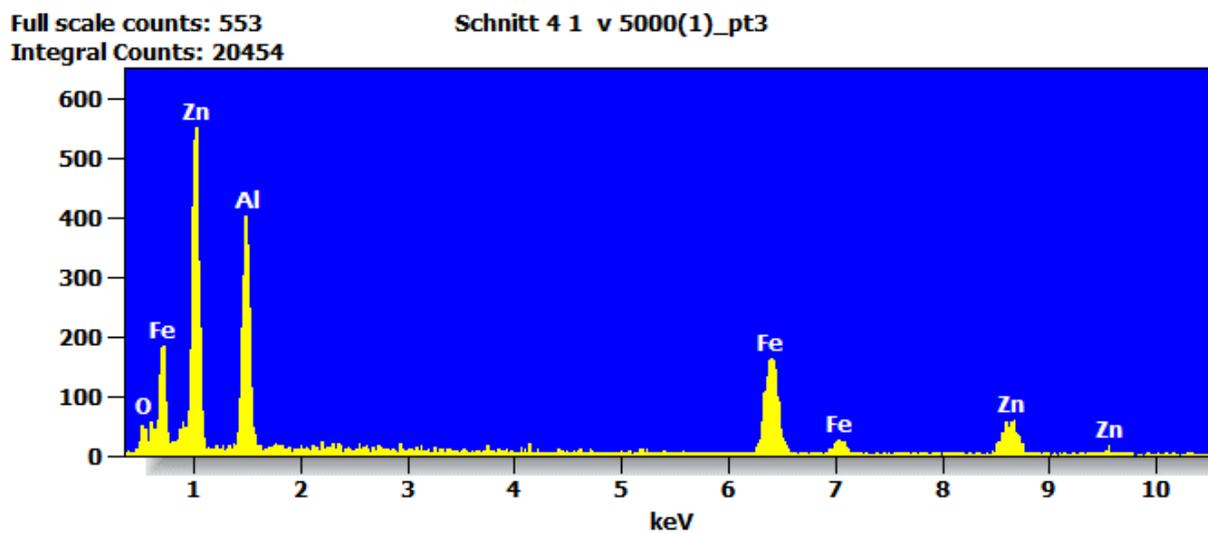


Abbildung 55: Analysespektrum der EDX-Untersuchung des Bereichs 3

Full scale counts: 413  
Integral Counts: 18953

Schnitt 4 1 v 5000(1)\_pt5

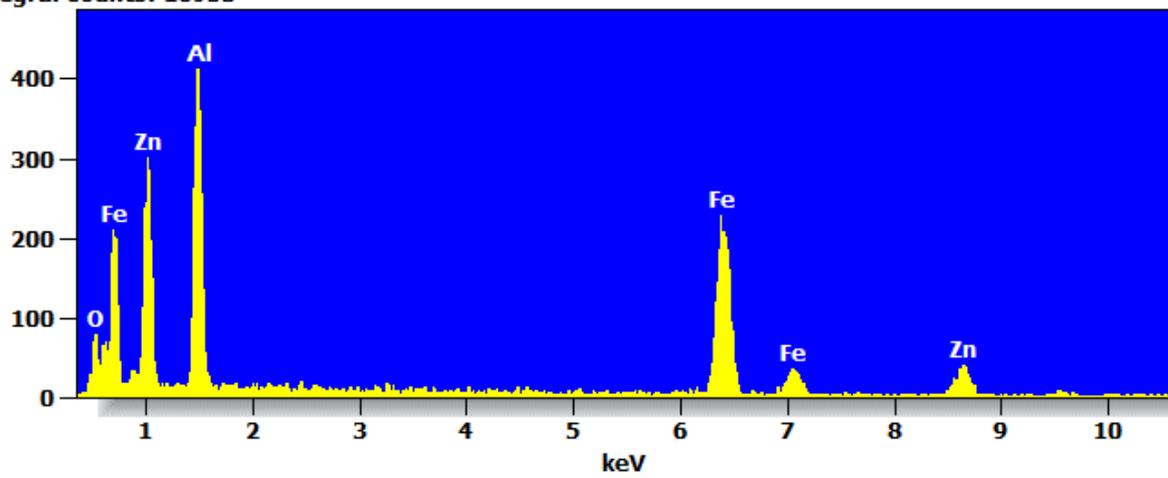


Abbildung 56: Analysespektrum der EDX-Untersuchung des Bereichs 5

## 11 Anhang B

Die hier gegenübergestellten lichtmikroskopischen Aufnahmen sollen dem Vergleich zwischen Vormaterial und verzinktem Produkt dienen. Damit wird so sichergestellt, dass die präparierte Oberfläche auch im Endprodukt noch die gewünschte Oberflächenrauigkeit hat.

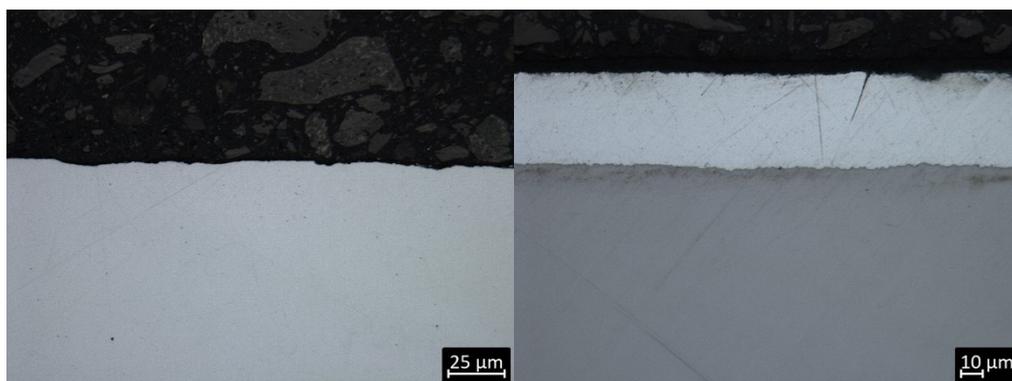


Abbildung 57: Längsschliff der Proben 8\_2019 (links) und 14\_2019 (rechts) jeweils in der Bandmitte

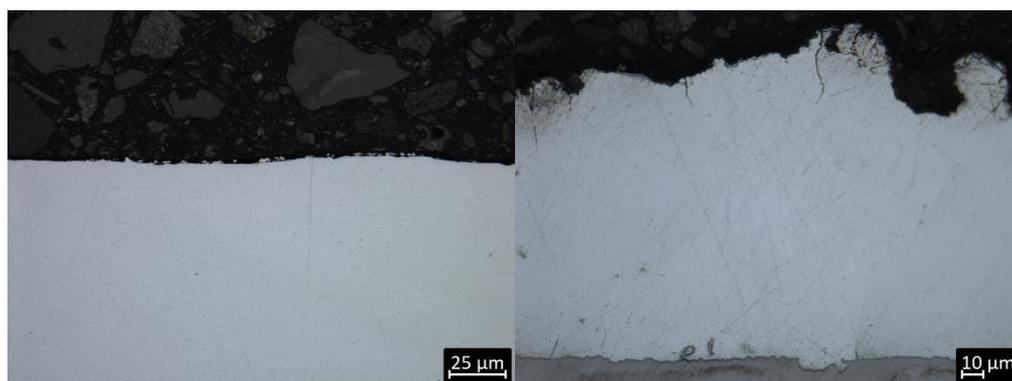


Abbildung 58: Längsschliff der Proben 8\_2019 (links) und 14\_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante

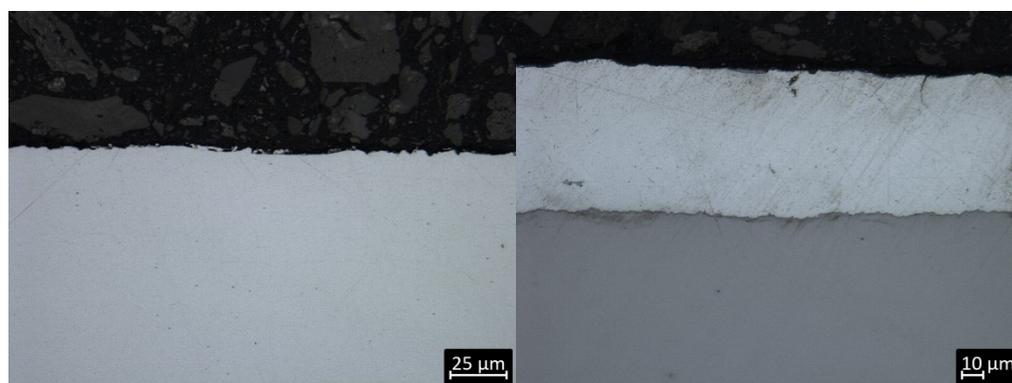


Abbildung 59: Querschliff der Proben 8\_2019 (links) und 14\_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante

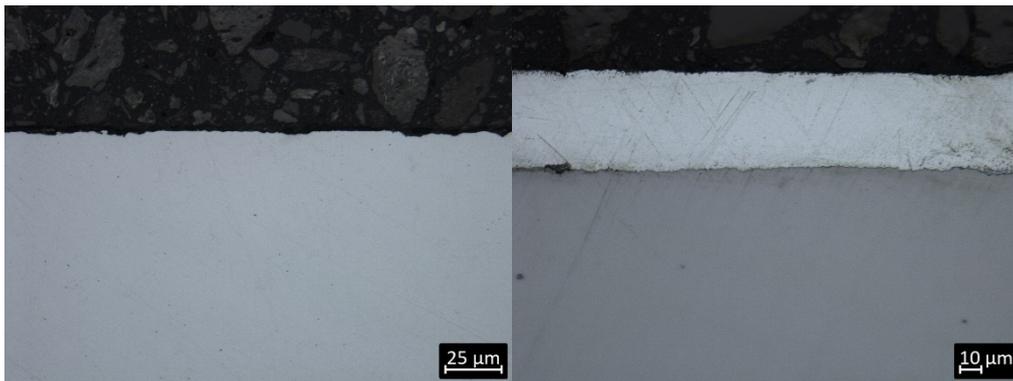


Abbildung 60: Längsschliff der Proben 10\_2019 (links) und 16\_2019 (rechts) jeweils in der Bandmitte

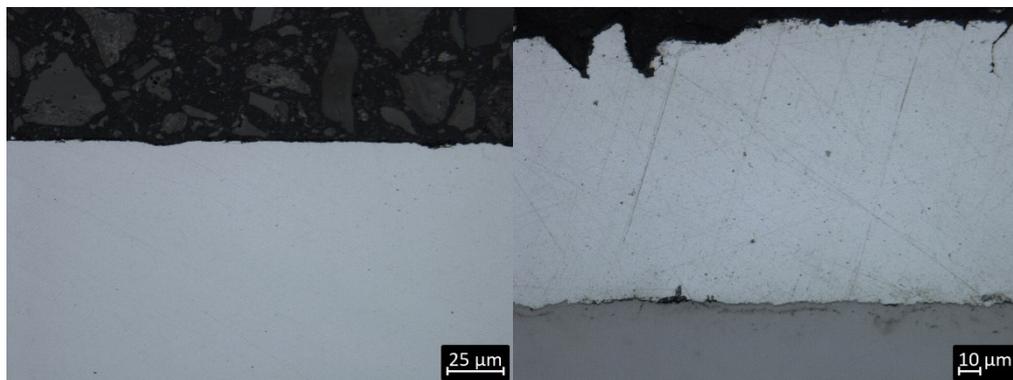


Abbildung 61: Längsschliff der Proben 10\_2019 (links) und 16\_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante

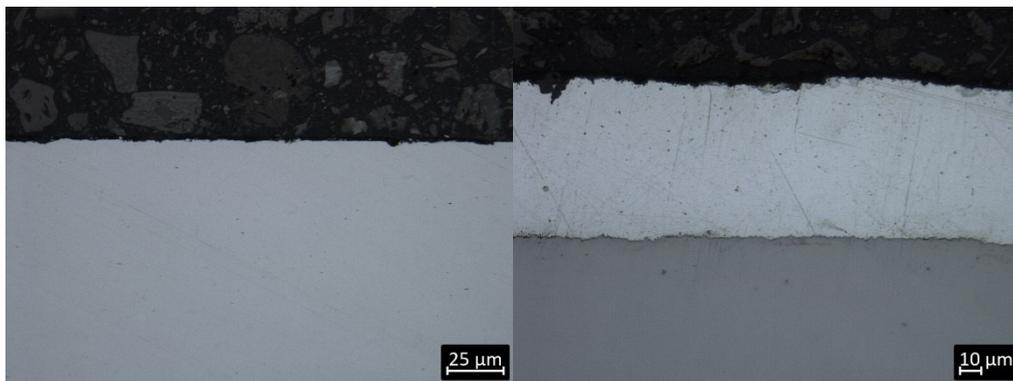


Abbildung 62: Querschliff der Proben 10\_2019 (links) und 16\_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante

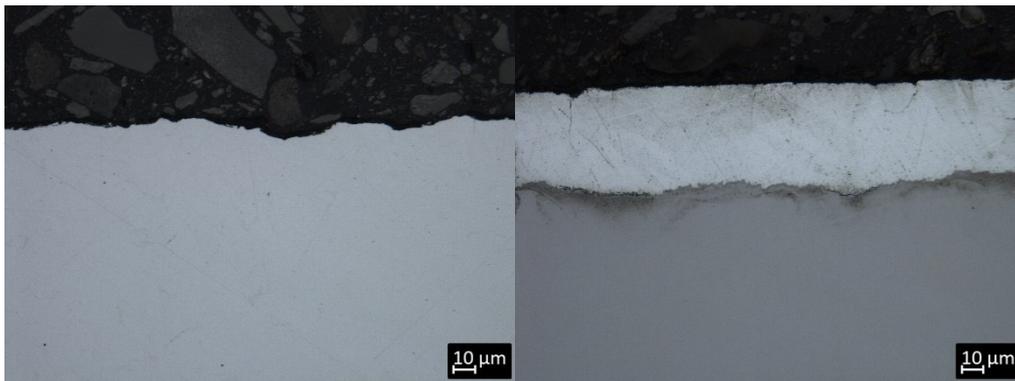


Abbildung 63: Längsschliff der Proben 11\_2019 (links) und 13\_2019 (rechts) jeweils in der Bandmitte

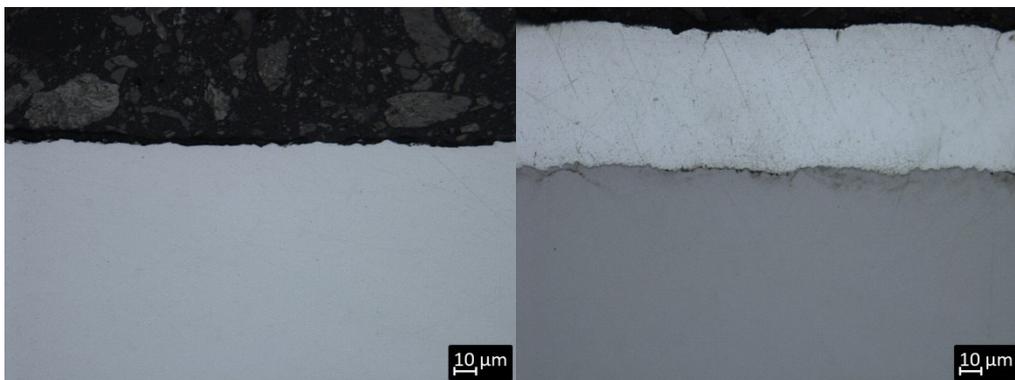


Abbildung 64: Längsschliff der Proben 11\_2019 (links) und 13\_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante

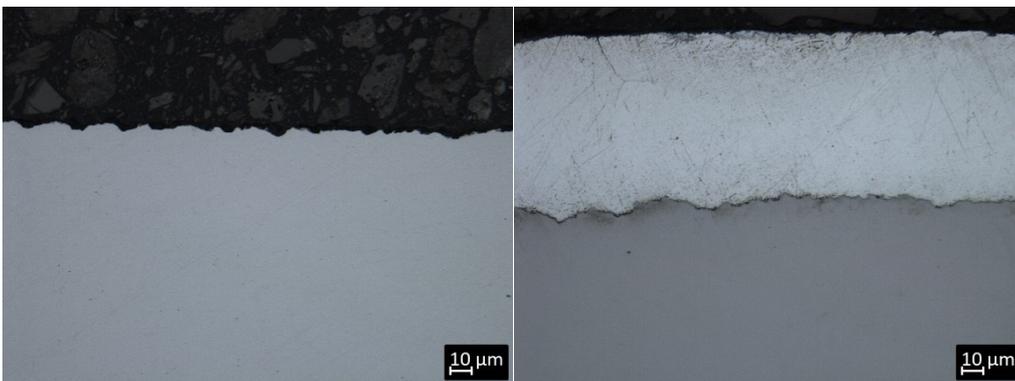


Abbildung 65: Querschliff der Proben 11\_2019 (links) und 13\_2019 (rechts) jeweils an der Bandkante

## 12 Anhang C

Darstellung der Zinkschichtdickenmessungen der Bleche aus dem Versuchsprogramm mittels induktivem Messtaster. Als Vergleich der Proben 13, 14 und 16 (WH) ist ebenfalls der Schichtdickenverlauf der Z600-Probe 6 der WSN abgebildet.

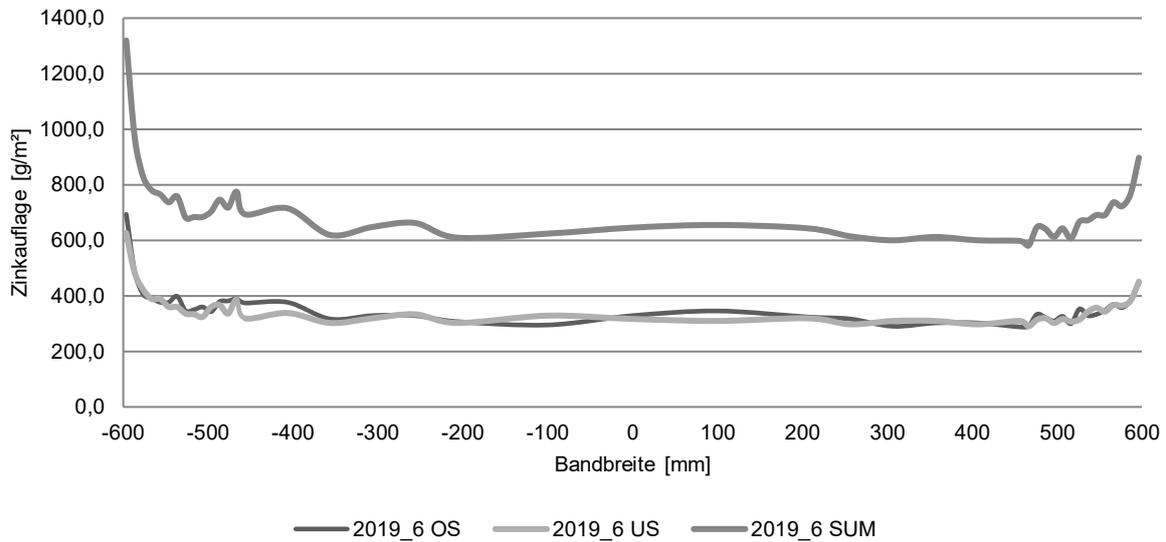


Abbildung 66: Schichtdickenverlauf der Probe 6\_2019

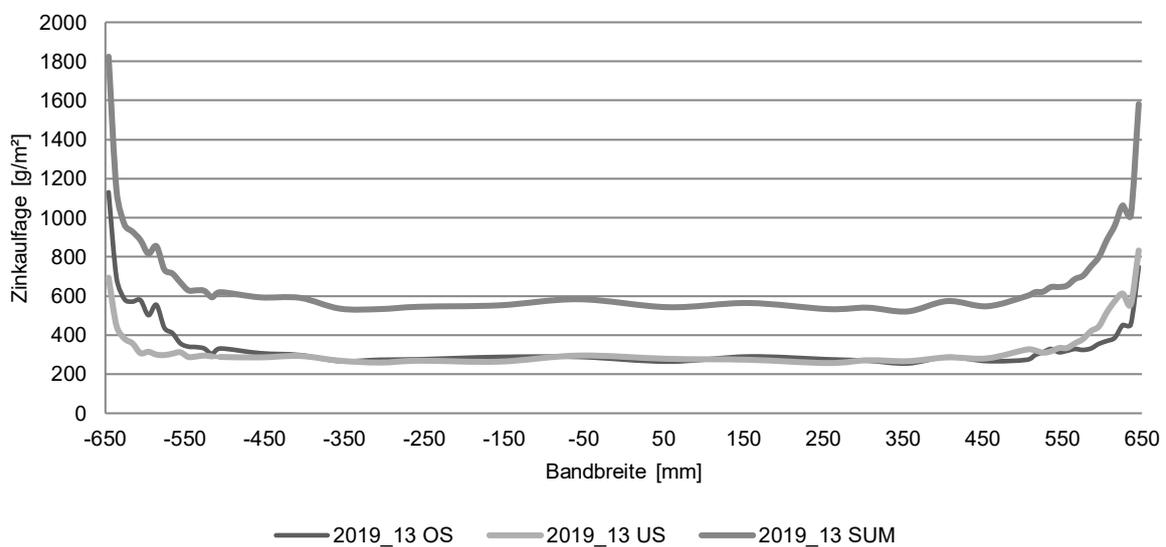


Abbildung 67: Schichtdickenverlauf der Probe 13\_2019

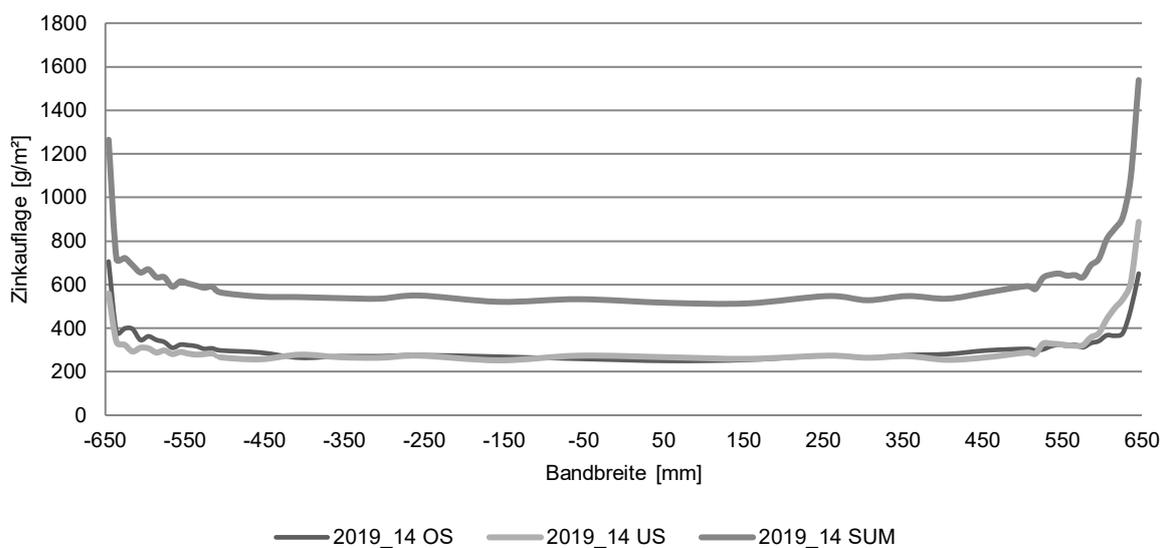


Abbildung 68: Schichtdickenverlauf der Probe 14\_2019

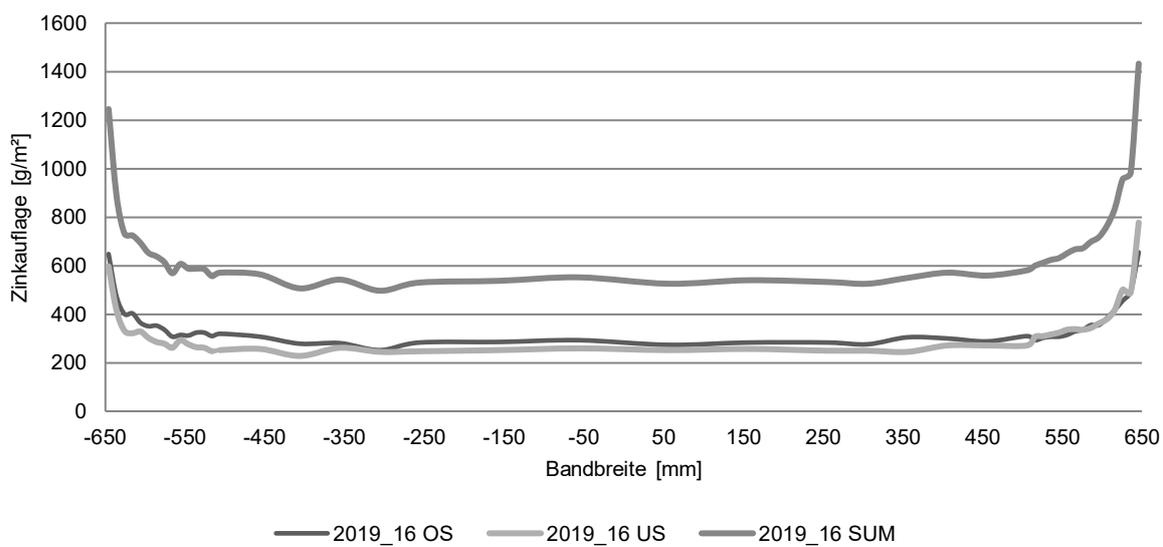


Abbildung 69: Schichtdickenverlauf der Probe 16\_2019

## 13 Anhang D

Hier sind die Ergebnisse der Analyse des arithmetischen Mittelrauwertes ( $R_a$ ) und der Rautiefe ( $R_z$ ) wiedergegeben. Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen komplementär zu den Grafiken im Kapitel 4.2, die grafische Auswertung der in den Tabellen Tabelle 11 – Tabelle 14 dargestellten Daten.

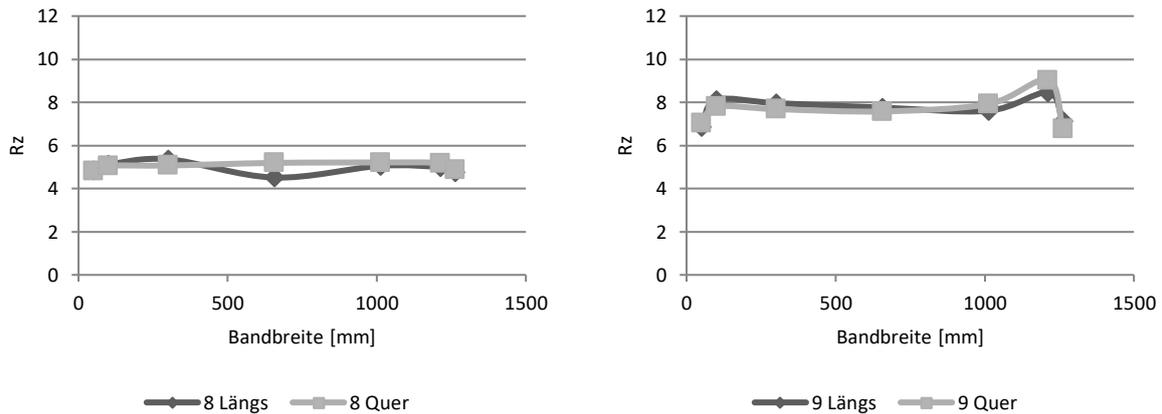


Abbildung 70:  $R_z$ -Werte für das rau dressierte (links) und die Messwerte des ungewalzten Bereichs des Coils (rechts)

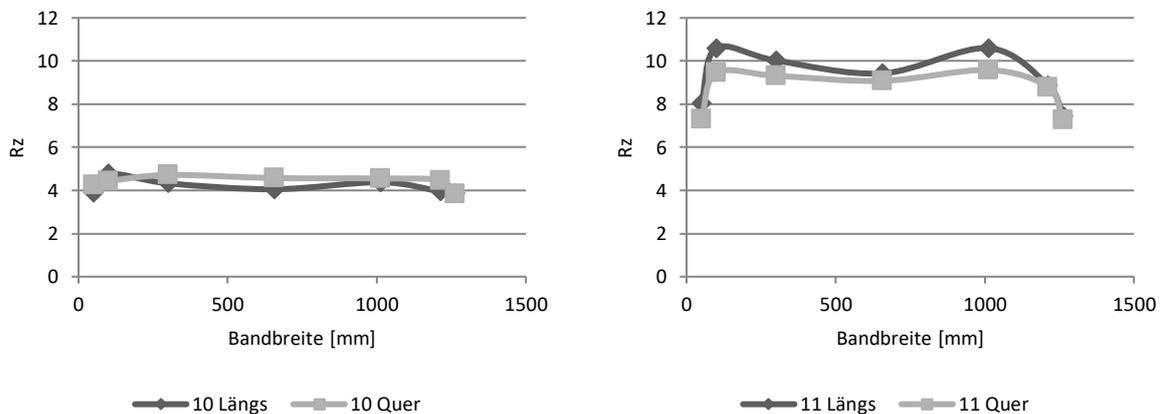


Abbildung 71:  $R_z$ -Werte für das rau dressierte Material und die Messwerte des ungewalzten Bereichs des Coils (rechts)

Tabelle 11: Ra-Werte der Messungen in Längsrichtung

Probe Nr	Lage	Abstand von Bandkante [mm]						
		50	100	300	656	1012	1212	1262
8	OS	0,879	0,937	0,809	0,825	0,814	0,942	0,993
		0,841	0,906	1,379	0,844	0,839	0,851	0,914
		0,810	0,811	0,873	0,830	0,805	0,787	0,846
	US	0,831	0,835	0,864	0,863	0,855	0,932	1,029
		0,881	0,879	0,896	0,747	0,864	0,787	0,839
		1,005	0,766	0,898	0,820	0,856	0,781	0,983
9	OS	0,898	1,217	1,430	1,043	1,359	1,167	1,015
		0,991	1,082	1,087	1,047	1,067	1,623	1,011
		1,255	1,336	1,624	1,096	1,120	1,438	1,077
	US	1,075	1,579	1,382	1,214	1,145	1,263	1,255
		1,151	1,327	1,244	1,291	1,373	1,172	1,288
		1,313	1,365	1,290	1,552	1,437	1,544	1,101
10	OS	0,757	0,879	0,718	0,755	0,824	0,625	0,610
		0,708	0,824	0,838	0,673	0,875	0,574	0,525
		0,602	0,693	0,752	0,627	0,709	0,678	0,569
	US	0,545	0,692	0,635	0,666	0,745	0,554	0,578
		0,511	0,714	0,722	0,602	0,619	0,753	0,632
		0,476	0,720	0,677	0,644	0,723	0,626	0,599
11	OS	1,529	1,734	2,004	1,560	1,555	1,853	1,019
		1,301	1,958	2,106	1,479	1,781	1,703	1,041
		1,470	1,989	1,392	1,580	1,771	1,612	1,308
	US	1,293	1,750	1,505	2,074	1,760	1,594	1,215
		1,189	1,854	1,997	1,918	1,965	1,024	1,317
		0,987	1,155	1,450	1,004	1,861	1,245	1,173

Tabelle 12: Ra-Werte der Messungen in Querrichtung

Probe Nr	Lage	Abstand von Bandkante [mm]						
		50	100	300	656	1012	1212	1262
8	OS	0,998	0,878	0,924	1,002	0,787	0,880	0,842
		0,970	0,834	0,867	0,868	0,953	0,859	0,916
		0,897	0,888	0,886	0,868	0,872	0,942	0,924
	US	0,760	0,878	0,851	0,829	0,898	0,999	0,884
		0,842	0,838	0,848	0,899	0,852	0,886	0,844
		0,865	0,862	0,926	0,846	0,972	0,806	0,918
9	OS	1,106	1,295	1,069	1,279	1,246	1,636	1,023
		1,082	1,397	1,367	1,250	1,428	1,742	1,288
		1,067	1,177	1,381	1,195	1,381	1,751	1,300
	US	1,373	1,548	1,220	1,427	1,525	1,619	0,920
		1,181	1,440	1,191	1,199	1,347	1,426	1,281
		1,194	1,503	1,294	1,518	1,384	1,485	1,223
10	OS	0,686	0,874	0,785	0,800	0,840	0,781	0,717
		0,776	0,714	0,834	0,909	0,920	0,800	0,676
		0,804	0,880	0,744	0,739	0,818	0,896	0,726
	US	0,694	0,870	0,729	0,760	0,731	0,807	0,675
		0,801	0,867	0,826	0,802	0,744	0,825	0,583
		0,620	0,855	0,661	0,700	0,753	0,712	0,706
11	OS	1,355	1,609	1,696	1,380	1,588	1,575	1,243
		1,285	1,621	1,548	1,483	1,529	1,556	1,241
		1,233	1,841	1,739	1,558	1,663	1,714	1,376
	US	1,205	1,600	1,554	1,542	1,885	1,486	1,109
		1,173	1,409	1,442	1,886	1,902	1,543	1,219
		1,115	1,485	1,512	1,523	1,659	1,283	1,370

Tabelle 13: Rz-Werte der Messungen in Längsrichtung

Probe Nr	Lage	Abstand von Bandkante [mm]						
		50	100	300	656	1012	1212	1262
8	OS	4,95	5,69	4,56	5,05	4,95	5,34	5,22
		4,90	5,69	7,06	4,55	4,94	5,48	5,46
		5,23	5,56	5,32	4,92	5,48	5,53	4,77
	US	4,46	4,55	4,62	4,17	4,65	4,91	4,50
		4,82	4,40	5,15	4,33	5,40	4,48	4,38
		4,70	4,75	5,47	4,06	4,92	4,20	4,24
9	OS	5,77	7,27	8,87	6,80	8,52	7,32	6,21
		6,01	7,06	6,76	7,12	6,22	10,31	6,40
		7,85	8,07	8,67	7,28	6,93	9,88	6,72
	US	7,04	9,37	8,81	8,09	7,44	7,29	7,69
		6,79	8,33	6,91	7,39	8,04	6,85	7,90
		7,65	8,56	7,77	9,86	8,51	9,10	7,91
10	OS	4,39	5,36	4,16	4,75	5,05	3,68	4,04
		4,78	4,66	5,08	3,88	4,99	3,73	3,49
		3,96	4,46	4,29	3,69	4,26	4,18	3,42
	US	3,67	4,58	4,14	4,15	4,09	3,84	4,00
		3,40	5,30	4,21	4,07	3,76	4,59	4,25
		3,18	4,27	4,10	3,78	4,11	3,72	4,05
11	OS	10,38	11,06	10,87	9,22	9,31	10,83	6,66
		7,50	11,52	12,26	9,30	11,38	9,16	6,44
		8,98	12,00	8,07	10,39	11,49	9,76	8,69
	US	7,32	10,85	9,12	10,86	9,87	9,45	8,03
		7,07	10,96	10,66	10,41	10,41	6,16	7,70
		6,98	7,20	9,15	6,37	11,13	7,81	7,19

Tabelle 14: Rz-Werte der Messungen in Querrichtung

Probe Nr	Lage	Abstand von Bandkante [mm]						
		50	100	300	656	1012	1212	1262
8	OS	5,28	5,11	5,39	6,37	4,79	5,45	5,30
		5,77	5,28	5,57	5,32	5,32	5,08	4,85
		4,98	5,99	5,14	4,98	5,37	5,66	5,55
	US	4,03	4,73	4,73	4,99	5,27	5,30	4,67
		4,22	4,64	4,58	4,80	5,08	4,71	4,42
		4,63	4,60	5,02	4,69	5,44	4,90	4,45
9	OS	6,46	7,47	6,63	6,36	7,48	9,18	5,66
		6,23	8,23	8,25	7,04	7,75	10,12	7,15
		6,85	6,71	8,02	7,00	8,08	9,58	6,99
	US	8,09	8,47	7,91	9,11	8,34	9,13	5,91
		7,10	7,80	7,49	7,43	7,57	8,26	7,47
		7,54	8,12	7,82	8,54	8,31	7,92	7,47
10	OS	3,72	4,43	4,19	4,47	4,64	4,53	4,42
		4,09	3,62	5,67	5,49	4,76	4,42	4,00
		5,20	4,80	4,39	4,14	4,67	5,03	3,81
	US	4,30	4,50	4,52	4,07	4,46	4,26	3,72
		4,45	4,94	5,01	5,38	4,48	4,77	3,25
		3,75	4,25	4,51	3,88	4,31	3,81	3,86
11	OS	8,44	9,76	9,04	8,87	8,91	8,74	7,12
		7,96	10,21	9,03	8,93	9,26	8,90	8,17
		7,56	9,64	10,76	9,62	8,92	10,22	7,55
	US	6,41	9,60	9,55	8,53	10,84	8,53	5,93
		6,97	8,71	9,29	9,55	10,44	8,98	7,42
		6,38	8,77	8,22	8,97	9,12	7,37	7,39