

Masterarbeit

Untersuchung des Einflusses der Geschwindigkeit in
unterschiedlichen Prozesssituationen auf die Voreilung
in einer Kaltwalz-Tandemstraße

angefertigt am

Fachgebiet für IT in Produktion und Logistik,

Fakultät Maschinenbau,

TU Dortmund

von

Jonas Kämper

(Matr.-Nr: 175580)

(Studiengang: Maschinenbau)

angemeldet am

25.05.2020

eingereicht am

8.11.2020

Erstgutachter/-in:

Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Anne Antonia Scheidler

Zweitgutachter/-in:

Dipl.-Ing. Rachid Barkouta

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	4
2 Aufbau einer Tandemstraße	8
2.1 Prozesskette des Flachwalzens	8
2.2 Funktionsweise und Aufgaben einer Tandemstraße	9
2.3 Aufbau verschiedener Walzgerüsttypen	11
3 Grundlagen des Kaltwalzens	13
3.1 Fließbedingung	13
3.2 Walzspaltgeometrie	14
3.3 Volumenkonstanz	16
3.4 Profil und Planheit	17
3.5 Veränderung der Fließgrenze	20
3.6 Veränderung der Reibung im Walzspalt	23
3.7 Walzenabplattung	24
3.8 Streifenmodell	26
3.9 Vor- und Nacheilung	35
4 Walztechnologische Steuerung und Regelung einer Tandemstraße	38
4.1 Wichtige Sensorik und Messgrößen	38
4.2 Steuerungs- und Regelungsstrategien	39
4.3 Einstellung der Banddicken und Bandzüge	40
4.4 Örtliche Verfolgung von Bandpositionen in einer Tandemstraße	46
4.5 Signifikanz der berechneten Voreilung im Prozess	50
5 Datenerfassung, Datenaufbereitung und Analysemöglichkeiten	53
5.1 Datennutzung im Wandel der Zeit	53

5.2	Aufzeichnung von Sensordaten in Walzanlagen	54
5.3	Nutzen von Prozessdaten in Walzwerken	55
5.4	Umfang der zur Verfügung stehenden Daten	56
5.5	Aufbereitung der Daten	57
6	Einfluss verschiedener Größen auf die Voreilung	59
6.1	Theoretische Zusammenhänge	59
6.2	Bestätigung der Zusammenhänge auf Datenbasis	61
6.3	Einfluss der Geschwindigkeit auf die Voreilung	71
6.4	Änderung der Voreilung beim Beschleunigen und Verzögern der Anlage . .	73
7	Konzept zur prozessoptimierten Nutzung der Daten im Sinne der Voreilung	76
7.1	Adaption der Voreilungen	76
7.2	Bestimmung der Voreilung über das Tracking der Schweißnaht	77
7.3	Ansätze zur Bestimmung der Voreilungsänderung bei Geschwindigkeitsänderung	81
8	Evaluierung des Konzepts	84
8.1	Verifikation und Validierung	84
8.2	Bewertung	89
9	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	92
	Literaturverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	V
	Tabellenverzeichnis	VIII
	Verwendete Formelzeichen	IX
	Anhang	XII

Kapitel 1

Einleitung

Hintergrund

Die Nachfrage nach Stahl steigt seit 2015 kontinuierlich an. 2019 wurden weltweit ca. 1767 Millionen Tonnen Stahl abgenommen. Innerhalb von vier Jahren entspricht das einen Anstieg um etwa 17,8%. Auf Grund der Corona-Krise ist Prognosen zu Folge jedoch ein Rückgang des Absatzes zu erwarten. [Statista, 2020] Bei unveränderten Produktionskapazitäten und einem Rückgang der Nachfrage ist die Produktqualität um so entscheidender für ein Unternehmen, um den Absatzrückgang zu minimieren. Darüber hinaus erhöhen sich die Qualitätsanforderungen bei der Herstellung von flachgewalztem Stahl kontinuierlich.

Kaltwalzwerke sind ein wesentlicher Bestandteil der Flachstahlherstellung. Das Walzen bei niedrigen Temperaturen bietet entscheidende Vorteile, wie die Möglichkeit die Materialeigenschaften und die Oberfläche einzustellen. Neben Reversierstraßen, in denen in zwei Richtungen gewalzt werden kann, sind Tandemstraßen der etablierteste Anlagentyp, um im Kaltwalzbereich einen großen Durchsatz zu erzielen. In dieser Arbeit wird sich auf solche Tandemstraßen beschränkt. Dabei dient eine vier Jahre alte, fünfgerüstige Straße als Referenzanlage.

Neben der Bandplanheit ist die konstante Banddicke innerhalb eines definierten Toleranzbereichs eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale des Endprodukts einer Tandemstraße. Wie gut die Grenzen eingehalten werden können ist von vielen Prozessparametern abhängig. Während eines stabilen Prozesszustandes können Toleranzen innerhalb weniger Mikrometer eingehalten werden. Dynamische Änderungen von Prozessgrößen können hingegen kurzzeitig zu deutlichen Abweichungen der Banddicke führen.

Die zentrale Herausforderung bei der Steuerung und Regelung einer Tandemstraße ergibt sich aus der gegenseitigen Abhängigkeiten der Zielgrößen. So beeinflussen sich die

Banddicke und der Bandzug, der Bandzug und die Bandgeschwindigkeit, die Bandgeschwindigkeit und die Banddicke und die Banddicke und die Planheit [Hu et al., 2018].

Motivation

Die Motivation für diese Arbeit geht aus Problemen bei der Einhaltung der Dickentoleranzen während Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen in Tandemstraßen hervor. Die Regelung von Banddicke und Bandzug bei sich ändernder Geschwindigkeit stellt auf Grund der gegenseitigen Abhängigkeit der Zielgrößen eine besondere Herausforderung dar. In diesem Fall ist die Wirksamkeit von Vorsteueralgorithmen entscheidend, um die Toleranzbereiche der Zielgrößen einhalten zu können. Die Voreilung, die den relativen Geschwindigkeitsunterschied zwischen Walze und Walzgut beschreibt, ist dabei eine entscheidende Prozessgröße in jedem Gerüst der Straße. Sie wird im Vorhinein mittels eines Walzmodells berechnet und zur Regelung der Banddicke und der Bandzüge genutzt.

Darüber hinaus wird die berechnete Voreilung bei der Produktumschaltung für das Tracking der Schweißnaht durch die Anlage genutzt. Bei einem Produktwechsel (Änderung der Breite, Dicke, Festigkeit, etc.) müssen die Prozessparameter umgeschaltet werden wenn sich die Schweißnaht im Walzspalt befindet. Je größer der Fehler der Voreilung ist, desto schlechter wird die Bandgeschwindigkeit und somit der Zeitpunkt, zu dem sich die Schweißnaht im Gerüst befindet, berechnet. Wenn sich die Prozessgrößen zu früh oder zu spät ändern, kann das im schlimmsten Fall zu einem Bandriss führen.

Die Güte des Voreilungssollwertes ist also sowohl für die Regelung der Banddicke beim Beschleunigen und Verzögern, wie auch bei der Produktumschaltung von großer Bedeutung. Ähnlich wie bei der Reibung, ist eine technologische Berechnung der Voreilung allerdings schwierig, da sie von vielen Prozessgrößen abhängt. Der entscheidende Vorteil gegenüber der Reibung ist, dass sie sich durch Messung der Umfangs- und Bandgeschwindigkeit nachträglich berechnen lässt.

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es diesen Vorteil zu nutzen und mit Hilfe von Messdaten eine verbesserte Vorhersage der Voreilung zu ermöglichen. Dazu werden die Abhängigkeiten der Voreilung von anderen technologischen Größen untersucht und mit Hilfe von Prozessdaten validiert. Darüber hinaus wird ein Konzept erarbeitet, um aus den Prozessdaten automatisch Informationen über die Voreilung zu generieren und diese der Anlage wieder zur Verfügung zu stellen.

Vorgehensweise

Dazu wird im ersten Abschnitt (Kapitel 2) die Tandemstraße als Teil eines Stahlwerks vorgestellt. Es werden die wichtigsten Eigenschaften und verschiedene Bauformen beschrieben.

Im dritten Kapitel werden die technologischen Grundlagen des Kaltwalzens erläutert. Es werden die wichtigsten Prozessgrößen, ihre Zusammenhänge und die Berechnung der Voreilung auf Basis des Streifenmodells beschrieben. Einige Teile des 3. Kapitels wurden bereits in der vorangegangenen Arbeit [Kämper, 2019] veröffentlicht. Sie werden an dieser Stelle hinterfragt und reorganisiert. Die Beschreibung der wesentlichsten Zusammenhänge ist in dieser Arbeit unumgänglich, da sie für das Verständnis notwendig sind.

Die Voreilung ist ein wichtiger Bestandteil der Vorsteuerung und Regelung von Banddicken und Bandzügen. In Kapitel 4 werden aus diesem Grund die gängigsten Steuerungs- und Regelungsstrategien in einer Tandemstraße erläutert und die Relevanz der Voreilungsgüte abgeleitet. Darüber hinaus wird die Verfolgung eines Bandabschnitts durch die Anlage (Tracking) beschrieben.

Aufgezeichnete Sensordaten dienen als Grundlage für diese Arbeit. Sie sollen hinsichtlich der Abhängigkeiten zwischen der Voreilung und anderen Prozessgrößen untersucht und als Basis für eine verbesserte Vorhersage der Voreilung genutzt werden. Deshalb wird die Aufzeichnung von Prozessdaten, ihr Nutzen und der zur Verfügung stehende Umfang in Kapitel 5 erläutert.

Darauf folgend werden in Kapitel 6 bekannte Zusammenhänge zwischen der Voreilung und anderen Prozessgrößen aus der Literatur beschrieben. Es werden Berechnungen mit Hilfe eines Stichplanprogramms gemacht und so die theoretischen Abhängigkeiten der Voreilung verdeutlicht. Zur Überprüfung der theoretischen Zusammenhänge werden die Prozessdaten verwendet und grafisch aufbereitet.

In Kapitel 7 wird ein Konzept erarbeitet, wie die datentechnischen Strukturen in einer Tandemstraße genutzt werden können, um automatisch Informationen bezüglich der Voreilung zu generieren, diese sinnvoll zu verarbeiten und somit durch die Nutzung der Daten einen Mehrwert für die Anlage zu schaffen. Zentraler Bestandteil sind dabei zum einen das in Kapitel 4 beschriebene Tracking und die Zusammenhänge zwischen der Voreilung der Geschwindigkeit aus Kapitel 6.

In Kapitel 8 wird das entwickelte Konzept anhand der zur Verfügung stehenden Daten evaluiert. Durch Randwertuntersuchungen und Plausibilitätsprüfungen werden die Ursachen für unerwartete Ergebnisse im Detail untersucht und dadurch Rückschlüsse auf die Güte des Konzepts gezogen. Zusätzlich werden die Ergebnisse aus weiteren Datensätzen stichprobenartig überprüft.

Im letzten Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung, es wird ein Fazit gezogen und im Ausblick weitere mögliche Untersuchungsansätze genannt.

Industriepartner

Die Arbeit wird in Kooperation mit der SMS Group GmbH und der Abteilung 'EA Process Technology Flat Rolling Mills' angefertigt. Die Ursprünge des Unternehmens gehen auf eine Schmiede zurück, die im Jahr 1871 gegründet wurde. Heute ist der Walzwerkbau, beginnend bei Gießanlagen bis hin zu Dünnbandwalzwerken, das Hauptgeschäft der SMS Group. In der Abteilung für Elektrik und Automation (EA) für das Flachwalzen werden die Steuerungs- und Regelungsstrategien für neue und bestehende Walzstraßen entwickelt und an den Anlagen weltweit in Betrieb genommen.

Im Zuge der Arbeit wird darüber hinaus mit weiteren Partnerunternehmen zusammengearbeitet. So wird Software der allpcccloud GmbH zur Modellierung eines Walzwerks und zur Stichplanberechnung genutzt. Außerdem wird ein Programm zur Auswertung von textbasierten Daten von Mathweis Engineering GmbH verwendet.

Kapitel 2

Aufbau einer Tandemstraße

2.1 Prozesskette des Flachwalzens

Die Prozesskette zur Erzeugung von Stahlflacherzeugnissen beginnt an einer Gießanlage, an der flüssiger Stahl durch eine Kokille gepresst und in Brammen gegossen wird. Es wird dabei zwischen zwei Verfahren unterschieden. Die konventionelle Anordnung besteht aus einer Stranggießanlage, in der Brammen von 200 mm bis 300 mm Dicke erzeugt werden. Es folgen ein Ofen, wahlweise ein Vorgerüst und eine Warmwalzstraße. Im Gegensatz dazu werden in einer Gießwalzanlage die beiden Prozessschritte kombiniert. Der flüssige Stahl wird in Brammen von 40mm bis 90mm gegossen. Die Dünnbrammen durchlaufen dann zum Temperatenausgleich einen Ofen, bevor sie unmittelbar danach in der Warmwalzstraße bearbeitet werden. Das erzeugte Warmband hat eine Dicke von 1mm bis 25mm. [Rosenthal et al., 2009]

Auf die Warmwalzstraße folgt häufig eine Beize, in der der korrosionsfördernde Walz-zunder von der Oberfläche entfernt wird. Nach der Oberflächenbehandlung folgen unterschiedliche Bearbeitungsschritte aus dem Bereich Kaltwalzen. Neben Tandemstraßen sind Reversierstraßen die gängigsten Anlagen, die zur Reduktion des Bandes unterhalb der Rekristallisationstempertur genutzt werden. Auf einem Reversiergerüst (Durchsatz zwischen 100.000 Tonnen und 600.000 Tonnen jährlich) wird das Band in mehreren Schritten und mit wechselnder Bandlaufrichtung gewalzt. Dazu wird es zwischen den Stichen auf beiden Seiten der Anlage an einem Haspel auf- und abgewickelt. Eine Reversierstraße besteht in der Regel aus einem oder zwei Gerüsten. Für größere Durchsätze (bis zu 2.5 Millionen Tonnen) wird eine Tandemstraße genutzt. Sie besteht aus bis zu 7 Gerüsten und wird nur in eine Walzrichtung betrieben. Es können Banddicken bis 0.15mm erreicht werden.

2.2 Funktionsweise und Aufgaben einer Tandemstraße

Bevor das Band in einer Tandemstraße gewalzt wird, läuft es zuvor in der Regel durch eine Beizlinie. Deshalb werden diese beiden Prozessschritte häufig verbunden. Das zu bearbeitende Band wird von einem Haspel abgewickelt, durchläuft erst die Beize, wird direkt im Anschluss in der Tandemstraße gewalzt und an einem weiteren Haspel aufgewickelt. Sind die beiden Bearbeitungsschritte getrennt, wird das Band vor dem ersten Gerüst abgewickelt. Abbildung 2.1 zeigt den allgemeinen Aufbau einer Tandemstraße (hier mit Quarto Gerüsten). Der Bridle ist das Verbindungselement zur Beize, die in dieser Abbildung nicht dargestellt ist.

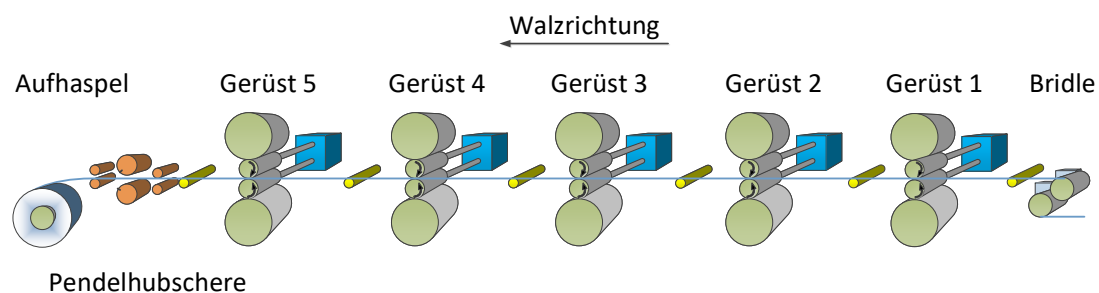


Abbildung 2.1 Exemplarischer Aufbau einer Tandemstraße

Der Automatisierungsgrad einer Tandemstraße kann sehr unterschiedlich sein. Eine wesentliche Eigenschaft ist der kontinuierliche Betrieb, der den Durchsatz deutlich erhöhen kann. Wird eine Straße nicht kontinuierlich betrieben, muss das Walzen zweier aufeinander folgender Bänder durch einen Coilwechsel unterbrochen werden. Im Gegensatz dazu wird das neue Coil im Konti-Betrieb vor der Straße mit dem sich im Prozess befindlichen Band verschweißt. Dafür ist ein sogenannter Schlingenspeicher nötig, in dem ein Teil des Bandes gespeichert wird. Während des Schweißprozesses wird der Bandspeicher geleert, damit sich die zu verbindenden Bandenden nicht bewegen. Zwischen den Schweißprozessen wird der Speicher wieder gefüllt.

Kurz bevor die Schweißnaht das erste Gerüst erreicht wird die Geschwindigkeit reduziert, um das Risiko eines Bandrisses zu minimieren und um im Geschwindigkeitsfenster für die Trommelschere zu liegen. Bei Geschwindigkeiten bis zu 250 m/min teilt die Schere das Band hinter dem letzten Gerüst im Bereich der Schweißnaht. Der Bandkopf wird in einen zweiten, freien Haspel eingefädelt und wenn der Bandzug aufgebaut ist wird die Anlage

wieder auf die Prozessgeschwindigkeit beschleunigt. [Pittner and Simaan, 2008]

Laut [Pittner and Simaan, 2011] kann der Durchsatz im kontinuierlichen Betrieb im Vergleich zum nicht kontinuierlichen Betrieb einer Tandemstraße um bis zu 100% höher sein. So könnten an einer Anlage statt 600.000 bis 800.000 Tonnen pro Jahr je nach Produktmix zwischen 1,2 und 1,5 Millionen Tonnen gewalzt werden.

Der kontinuierliche Betrieb einer Tandemstraße bringt viele zusätzliche Herausforderungen mit sich. Mit der Schweißnaht geht ein Produktwechsel einher. Sowohl die Banddicke, wie auch die Bandbreite können sich hier ändern. Analog dazu ändern sich auch die Zielgrößen und damit die Prozessgrößen sprunghaft, wenn die Schweißnaht den Walzspalt durchquert. Vorsteuer- und Regelalgorithmen sorgen für möglichst exaktes und schnelles Umschalten während des Produktwechsels.

Unabhängig davon, ob eine Tandemstraße kontinuierlich oder nicht kontinuierlich betrieben wird, sind die Aufgaben des Prozesses vielfältig. Zum einen müssen folgende Produktanforderungen eingehalten werden:

- Dicke muss im Toleranzbereich liegen
- Profil und Planheit müssen im Toleranzbereich liegen
- Oberfläche und Rauheit müssen im Toleranzbereich liegen
- Wickelspannung muss zum nachgeschalteten Prozess passen

Um diese Anforderungen einhalten zu können, muss auch das Vormaterial bestimmte Eigenschaften erfüllen:

- Soll-Dicke muss im Bereich der tatsächlichen Banddicke liegen
- Oberfläche muss ausreichend gebeizt sein
- Profil und Planheit müssen akzeptabel sein
- Form der Bandkante muss akzeptabel sein
- Schweißnaht muss korrekt ausgeführt sein sein (nur Kontistraße)
- Relative Position der Schweißnaht muss bekannt sein (nur Kontistraße)

Nur wenn das Eingangsmaterial zu den Produktanforderungen passt, kann die Tandemstraße die Walzaufgabe erfüllen. Im Prozess ergeben sich folgende Herausforderungen:

- (Zwischengerüst-) Bandzugspannungen nach vorausberechneten Sollwerten einstellen und regeln
- Dickenverteilung entsprechend der Strategie für eine ausgewogene Antriebslast und Walzkraft einstellen
- Walzspaltprofil muss zu dem eingehenden Profil passen (konstantes relatives Profil bedeutet Planheit)

- Einstellung der Oberflächeneigenschaften und der finalen Planheit mit Hilfe der Walzkraft in Gerüst 5
- Geschwindigkeiten einstellen, bis zu den Antriebsgrenzen, der Walzstabilität (Schleudern/Rattern) oder der maximalen Spalttemperatur
- Unproblematische Prozessübergänge (Geschwindigkeitswechsel, Produktwechsel) garantieren

Um die genannten Aufgaben umsetzen und so die Produkthanforderungen erfüllen zu können, ist die Sensorik ein wichtiger Bestandteil von Tandemstraßen. Über der gesamten Länge der Straße sind Messgeräte installiert, deren Signale zur Steuerung, Regelung und Überwachung der Anlage unerlässlich sind. So wird an jedem Gerüst die Walzkraft, die Drehzahl und die Walzenpositionierung, zwischen den Gerüsten der Bandzug und im Ein- und Auslauf sowie hinter dem ersten Gerüst die Banddicke gemessen. Die Bandgeschwindigkeit wird teilweise an allen Gerüsten, oftmals aber auch nur vor und nach dem ersten und sowie dem letzten Gerüst messtechnisch erfasst. [Pittner and Simaan, 2008]

2.3 Aufbau verschiedener Walzgerüsttypen

Die zentralen Elemente einer Walzstraße sind die Walzenstände, in denen sich die Walzen befinden. Es gibt verschiedene Walzenanordnungen, die verschiedene Eigenschaften mit sich bringen. Im allgemeinen bestimmt die gewünschte Banddicke, ob ein Gerüst für eine Walzaufgabe geeignet ist oder nicht. Je dünner das Band ist, desto kleiner muss der Walzenradius sein, damit überhaupt eine Reduktion stattfinden kann. Nur wenn eine hohe Kraft auf eine geringe Fläche wirkt ist der Druck für eine plastische Verformung groß genug. Je dünner die Walze und je größer die Walzkraft, desto größer ist gleichzeitig die Durchbiegung der Walzen. Um dem entgegen zu wirken werden die Arbeitswalzen (AW) durch weitere Walzen (Stützwalzen SW, Zwischenwalzen ZW) abgestützt. So ergeben sich je nach Walzaufgabe verschiedene Walzenanordnungen.

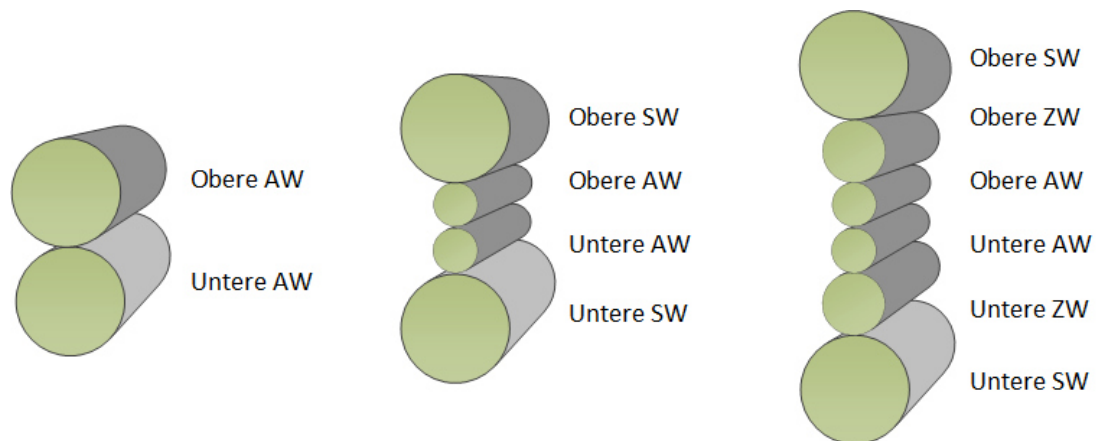


Abbildung 2.2 Walzenanordnung eines Duo-, Quarto- und Sexto-Gerüsts

In Abbildung 2.2 sind die Walzenstapel für ein Duo-, Quarto- und Sexto-Gerüst abgebildet. In Tandemstraßen werden Quarto- und Sexto-Gerüste verwendet. Darüber hinaus gibt es im Bereich des Folienwalzens Anordnungen mit 20 Rollen (siehe [Schwenzfeier et al., 1979] und [Weber, 1973]).

Kapitel 3

Grundlagen des Kaltwalzens

3.1 Fließbedingung

Die Temperatur des Walzguts spielt beim Walzen eine zentrale Rolle und beeinflusst den Prozess wesentlich. Beim Warmwalzen ist der Umformwiderstand durch die hohen Temperaturen geringer und das Band verfestigt nicht. Das Kaltwalzen findet unterhalb der Rekristallisationstemperatur statt. Die Fließspannung des Werkstoffs steigt mit dem Umformgrad an und der Widerstand des Werkstoffs wächst mit jedem Stich.

Um die Banddicke beim Walzen zu reduzieren muss ein plastischer Umformprozess stattfinden. Wenn die Spannungen in einem Werkstoff die Fließgrenze erreichen, sodass

$$\sigma_v = k_f \tag{3.1}$$

gilt, verformt sich ein Werkstoff plastisch. [Hinkfoth, 2002]. Die Vergleichsspannung versucht einen mehrachsigen Spannungszustand zu vereinfachen, indem ein einachsiger Spannungszustand definiert wird, der einer äquivalenten Materialbeanspruchung entspricht. Die bekanntesten Vorschriften werden von den Autoren in [Tresca, 1864] und [v. Mises, 1913] definiert:

$$\text{Tresca: } \sigma_v = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \tag{3.2}$$

$$\text{v. Mises: } \sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \tag{3.3}$$

Beim Flachwalzen kann nach [Hinkfoth, 2002] von einem mittelwertigen Spannungszustand ausgegangen werden. In diesem Fall gilt:

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.4)$$

Gleichungen (3.2) und (3.3) ergeben sich zu:

$$\text{Tresca: } \sigma_v = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (3.5)$$

$$\text{v. Mises: } \sigma_v = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3.6)$$

In der Praxis wird in den meisten Fällen die von Mises'sche Vergleichsspannung verwendet. Der Vergleich mit experimentellen Ergebnissen zeigt, dass sie eine bessere Übereinstimmung ergibt. [Wandinger, 2020]

Beim Walzen erfolgt plastisches Fließen nach diesem Ansatz folglich, sobald die Fließbedingung

$$\frac{2}{\sqrt{3}} k_f = \sigma_1 - \sigma_2 = k_e \quad (3.7)$$

erfüllt ist.

Im Prozess gibt es drei wesentliche Stellgrößen, die die Bandspannungen beeinflussen. Die Walzkraft mit der die Walzen auf die Oberfläche gedrückt werden, sorgt für Druckspannungen in vertikaler Richtung. Die Übertragung des Antriebsmoments sorgt neben dem Vorschub außerdem für Schubspannungen, die die Vergleichsspannung erhöht. Darüber hinaus wird in der Regel mit einem Bandzug in horizontaler Richtung gewalzt.

3.2 Walzspaltgeometrie

Die Umformzone in der die beiden Walzen mit dem Band im Kontakt stehen heißt Walzspalt. In Abbildung 3.1 sind die wichtigsten geometrischen und kinematischen Größen dieses Bereichs eingetragen. Durch die Koordinaten x und α lässt sich jeder horizontale Punkt im Walzspalt beschreiben. Es gilt der geometrische Zusammenhang:

$$x = -R \sin(\alpha) \quad (3.8)$$

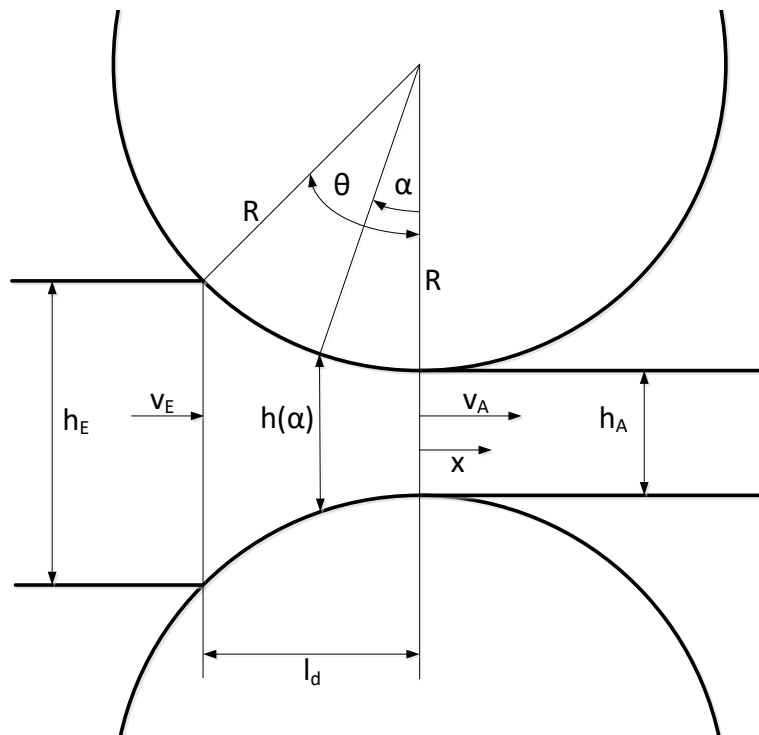


Abbildung 3.1 Grafik des Walzspaltes

Der Walzspalt umfasst den Bereich zwischen Walzguteintritt und der vertikalen Verbindungslinie der Walzendrehachsen. In radialer Richtung kann die Ausdehnung des Walzspaltes über den Walzwinkel

$$\theta = \arccos\left(\frac{R - \frac{\Delta h}{2}}{R}\right) \quad (3.9)$$

beschrieben werden. In horizontaler Richtung wird die Länge des Walzspaltes als gedrückte Länge bezeichnet. Sie ist definiert als:

$$l_d = \sqrt{R \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (3.10)$$

$$= \sqrt{R \Delta h} \quad (3.11)$$

[Türk, 2000]. Der quadratische Anteil der Reduktion fällt kaum ins Gewicht und wird häufig vernachlässigt. Δh ist die absolute Differenz der Banddicke vor und hinter dem Walzspalt. Es gilt:

$$\Delta h = h_E - h_A \quad (3.12)$$

Die Reduktion der Banddicke kann über den Zusammenhang

$$\varepsilon = \frac{h_E - h_A}{h_E} = \frac{\Delta h}{h_E} \quad (3.13)$$

auch als relative Größe berechnet werden.

Im Walzspalt verringert sich die Banddicke mit zunehmendem x und abnehmendem α . Über die Vorschrift

$$h(\alpha) = h_A + 2R(1 - \cos(\alpha)) \quad (3.14)$$

lässt sich die Banddicke in jedem Punkt im Walzspalt berechnen.

3.3 Volumenkonstanz

Die Volumenkonstanz ist das Grundgesetz der bildsamen Formgebung. Es besagt, dass sich die äußere Form eines Werkstoffs während eines Umformprozesses zwar ändern kann, dass das Gesamtvolumen aber gleich bleibt. Beim Walzen gilt also:

$$V_E = V_A \quad (3.15)$$

$$h_E b_E l_E = h_A b_A l_A \quad (3.16)$$

Wie in [Kämper, 2019] beschrieben, erfolgt beim Kaltwalzen nahezu kein Werkstofffluss, sodass $b = konst$ gilt. Aus dem Gesetz der Volumenkonstanz ergibt sich die Kontinuitätsgleichung, die sich für konstante Bandbreite vereinfachen lässt:

$$A_E v_E = A_A v_A = A(x) v(x) = A(\alpha) v(\alpha) \quad (3.17)$$

$$h_E v_E = h_A v_A = h(x) v(x) = h(\alpha) v(\alpha) \quad (3.18)$$

Auf Grund der Dickenreduktion folgt mit Gleichung (3.18), dass die Bandgeschwindigkeit hinter dem Walzspalt größer als vor dem Walzspalt ist:

$$v_E < v_A \quad (3.19)$$

Für jede Position im Walzspalt lässt sich die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von x und α berechnen:

$$v(x) = v_E \frac{h_E}{h(x)} = v_A \frac{h_A}{h(x)} \quad (3.20)$$

$$v(\alpha) = v_E \frac{h_E}{h(\alpha)} = v_A \frac{h_A}{h(\alpha)} \quad (3.21)$$

3.4 Profil und Planheit

Das Bandprofil und die -planheit sind wesentliche Qualitätsmerkmale eines gewalzten Produkts. Unter dem Bandprofil wird die Form des Walzguts im Querschnitt verstanden. Die Planheit hingegen beschreibt die Zugspannungsdifferenzen über die Bandbreite. Das einlaufende Bandprofil ist dabei die wichtigste Information, um den Walzspalt richtig einzustellen und die Planheit so garantieren zu können. Aus diesem Grund müssen das Profil und die Planheit immer gemeinsam betrachtet werden.

Auf Grund der hohen Temperaturen beim Warmwalzen entstehen beim Umformen keine Spannungen im Werkstoff. Beim Kaltwalzen sind die Temperaturen deutlich geringer und der Umformwiderstand des Bandes vergrößert sich mit jeder Umformung. Das Ziel beim Kaltwalzen ist eine konstante Reduktion (siehe Gleichung (3.13)) über der Bandbreite, sodass die Verlängerung ebenfalls konstant ist und keine Spannungen im Werkstoff entstehen. Je besser dieses Ziel erreicht wird, desto besser ist die Bandplanheit.

Wenn die Reduktion über der Bandbreite konstant sein soll, gibt es kein Stellglied, um das Bandprofil beim Kaltwalzen anzupassen. Aus diesem Grund muss das Bandprofil bereits beim Warmwalzen passend zum Zielprofil und der Reduktion beim Kaltwalzen eingestellt werden. Beim Warmwalzen ist ein Werkstoffquerfluss und somit die Veränderung des Bandprofils auf Grund der hohen Temperaturen noch möglich.

Planheitsfehler können sich auf verschiedene Arten bemerkbar machen. Wenn die Reduktion während der Kaltwalzvorgänge über der Breite nicht konstant ist, ist auch die Bandlänge nicht konstant. Ist eine Bandkante länger als die andere ergibt sich ein Säbel, dessen Ausprägung von der Bandlängendifferenz abhängt (Planheitsfehler erster Ordnung). Ist das Band in der Mitte länger oder kürzer als am Rand, entstehen in diesem Bereich Mitten- bzw. Randwellen (Planheitsfehler zweiter Ordnung). Darüber hinaus gibt es Fehler höherer Ordnung. In [Rieckmann, 1988] nennt der Autor eine Möglichkeit die Bandplanheit zu beschreiben. Durch den Vergleich einer Bandfaser mit der Bandfaser in der Mitte des Bandes, kann die relative Abweichung der Faserlänge bestimmt werden. Dieser bezogene Bandlängenunterschied kann als Maß für die Planheit genutzt werden.

Die Walzspaltform, die sich während des Walzvorgangs ausbildet, ist maßgeblich für die Güte der Planheit verantwortlich [Beisemann, 1987]. Mehrere Prozessgrößen beeinflussen diese Form:

Walzkraft

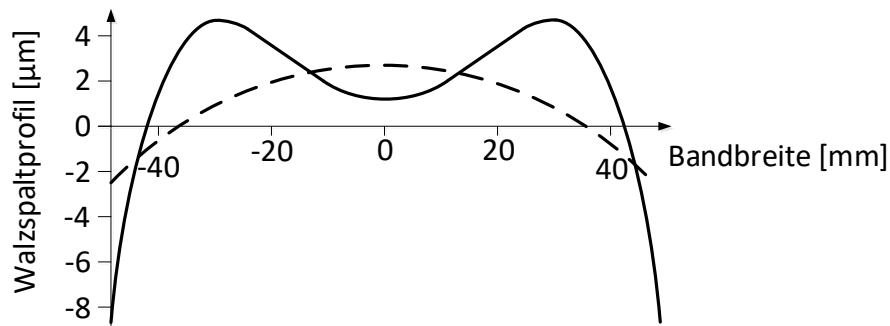


Abbildung 3.2 Verlauf der Oberfläche der oberen Arbeitswalze in Folge der a) Walzendurchbiegung (gestrichelt), b) Walzendurchbiegung mit überlagertem thermischen Ballen

Die Walzkraft wird mit Hilfe einer mechanischen Spindel und/oder hydraulischen Zylindern am äußeren Ende der Walzen über einen Zapfen in das System gebracht. Aus diesem Grund ergibt sich je nach Bandbreite ein Hebelarm bis zur Bandkante. Je größer der Hebelarm und die Walzkraft sind, desto größer ist die elastische Durchbiegung der Walzen, wodurch die Walzspaltform beeinflusst wird. Es ergibt sich eine konvexe Form der Arbeitswalze im Walzspalt (siehe Abbildung 3.2). In [Müller, 1981] leitet der Autor, unter der Annahme der konstanten Verteilung der Walzkraft über die Bandbreite, einen Ansatz zur Berechnung der Walzendurchbiegung her.

Temperaturverteilung

Die Temperatur kann auch beim Kaltwalzen schnell ansteigen. In [Bähr et al., 1970, S.236-264] hält der Autor Temperaturanstiege von bis zu 260°C innerhalb eines Sticks für theoretisch möglich. Unter der Berücksichtigung von Wärmeübertragungen an ein Kühlmittel und die Umgebung schätzt der Autor die maximale Coiltemperatur auf ca. 200°C. In [Hensel and Spittel, 1978] wird die Coiltemperatur ebenfalls berechnet und es ergibt sich ein Maximum von 178°C.

Die Umformarbeit, die für die Wärmeentwicklung in Band und Walzen verantwortlich ist, findet zwischen den beiden Bandkanten statt. Die Walzen sind allerdings breiter als das Band, sodass die Temperaturerhöhung über die Walzenlänge nicht konstant ist. Die

Walzen sind im Kontaktbereich zwischen Walzen und Walzgut am wärmsten. Die Ausdehnung der Walzen ist temperaturabhängig, sodass sich ein thermischer Ballen ergibt. Die Walzen dehnen sich also in der Mitte stärker als am Rand. Dieser Effekt beeinflusst die Walzspaltform maßgeblich. Verändert sich die Temperatur der Walzen im Prozess (zum Beispiel durch eine Veränderung der Walzgeschwindigkeit) kann der sich verändernde Ballen zu sichtbaren Planheitsfehlern (Wellen) führen.

Walzenverschleiß

Im Kontaktbereich zwischen Walzen und Walzgut verschleißt die Walze mit der Zeit. Vor allem die Arbeitswalzen, aber auch die Zwischen- und Stützwalzen müssen aus diesen Grund nach einer gewissen Laufleistung getauscht und nachgeschliffen werden. Das Profil der Walzen verändert sich je nach Walzhistorie und beeinflusst somit ebenfalls die Walzspaltform.

Neben den genannten Prozessgrößen gibt es einige Stellglieder, die direkt Einfluss auf die Walzspaltform nehmen:

Anstellung, Schenken

Die Anstellung ist für das Öffnen und Schließen des Walzspaltes und das Aufbringen der Walzkraft verantwortlich. Die Anstellung kann während des Prozesses angepasst werden und so zum Beispiel auf Banddickenschwankungen im Einlauf reagieren. Durch das einseitige Schließen oder Öffnen des Walzspaltes kann auf Dickenunterschiede über der Bandbreite reagiert werden.

Balliger Walzenschliff

Wie in Kapitel 2 beschrieben, werden Quarto- und Sextogerüste verwendet, um die Durchbiegung der Arbeitswalzen zu minimieren. Unabhängig vom Gerüst kann die Durchbiegung jedoch nie gänzlich verhindert werden. Aus diesem Grund werden die Walzen in der Regel ballig geschliffen, sodass sie in der Mitte dicker ist als außen (Mittenüberhöhung). Passen Balligkeit und Durchbiegung zueinander braucht es kein weiteres Stellglied, um die Planheit zweiter Ordnung gewährleisten zu können. Der ballige Walzenschliff ist ein statisches Stellglied, weil es sich während des Prozesses nicht ablassen lässt.

Axiale Verschiebung spezialbombierter Walzen

Um sich den Schliff der Walzen auch im Prozess zunutze machen zu können, werden axial verschiebbare Walzen genutzt. Dabei haben die Walzen einen S-förmigen Schliff.

Durch axiales Verschieben kann die Form des Walzspaltes stufenlos verändert werden. Das Verfahren wurde von der SMS Group GmbH Anfang der 80er Jahre entwickelt. In [Raquet, 1996] beschreibt der Autor die Funktionsweise des Prinzips und die Anwendung in einer Tandemstraße. In [Thamke, 2008] wird der Aufbau eines modernen CVC-Walzenverschiebesystems genauer erläutert.

Arbeits- und Zwischenwalzenbiegung

Bei Quarto-Gerüsten ist das Biegen der Arbeitswalze gegen die Stützwalze sehr verbreitet. Dabei ist der Kraftbedarf relativ gering bis die Kontaktfuge zwischen den Walzen geschlossen ist. Danach muss die Oberfläche der Walzen elastisch verformt werden, damit sich die Biegung auf die Walzspaltkontur auswirkt. Mit Hilfe der Arbeitswalzenbiegung, können Planheitsfehler zweiter Ordnung kompensiert werden. Darüber hinaus gibt es bei Sexto-Gerüsten die Möglichkeit, zusätzlich die Zwischenwalzen gegen die Stützwalzen zu biegen. Durch die Arbeits- und Zwischenwalzenbiegung können Planheitsfehler vierter Ordnung kompensiert werden. Auf Grund des geringeren Durchmessers hat die Arbeitswalzenbiegung nach [Berger, 1975] einen um den Faktor 10 höheren Einfluss auf die Walzspaltkontur als die Zwischenwalzenbiegung.

Zonenkühlung

Beim Kaltwalzen wird in der Regel Kühlmittel verwendet, um die Temperatur der Walzen und des Bandes zu senken. Dabei gibt es verschiedene Stellglieder, um die Wirkung zu beeinflussen. In [Wenig, 2014] wird die Auswahl des Kühlmittels im Hinblick auf die Kühl- und Schmierwirkung genauer untersucht. Darüber hinaus wird beschrieben, wie ein Kühlsystem als Stellglied für die Einstellung des Walzspaltes und damit der Planheit genutzt werden kann. Durch die Anordnung mehrerer Düsen, verteilt über die Breite des Bandes, kann die Temperatur der Walzen und das Walzgut selektiv verändert werden. Dadurch wird die Ausdehnung der Walzen in einem bestimmten Bereich (und dadurch die Form des Walzspaltes) beeinflusst.

3.5 Veränderung der Fließgrenze

Die Fließgrenze des Walzgutes ist eine wesentliche Prozessgröße beim Walzen. Sie beeinflusst beispielsweise die Walzkraft und die maximal mögliche Reduktion maßgeblich. Die Fließgrenze ist von mehreren Einflussgrößen abhängig, wobei der Werkstoff selbst die grundlegenden Eigenschaften vorgibt. Darüber hinaus hängt sie vom Umformgrad, der

Umformgeschwindigkeit und der Temperatur ab [Kopp and Wiegels, 1998]. Somit ist die Fließgrenze eine Funktion dieser vier Größen:

$$k_f = f(\text{Werkstoff}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (3.22)$$

Einfluss des Umformgrades

Bei Raumtemperatur führt die Umformung eines metallischen Werkstoffs zu einer Erhöhung der Versetzungsdichte, womit ein Anstieg der Fließgrenze einhergeht. In Abbildung 3.3 sind die Fließkurven ausgewählter Werkstoffe zu sehen. In [Bähr et al., 1970] merkt der Autor an, dass der Anstieg der Fließgrenze umso größer ist, je geringer der Umformgrad ist. Ist die Kaltverfestigung des Werkstoffs bereits weit fortgeschritten, so ist der Einfluss einer weiteren Umformung auf die Fließgrenze geringer.

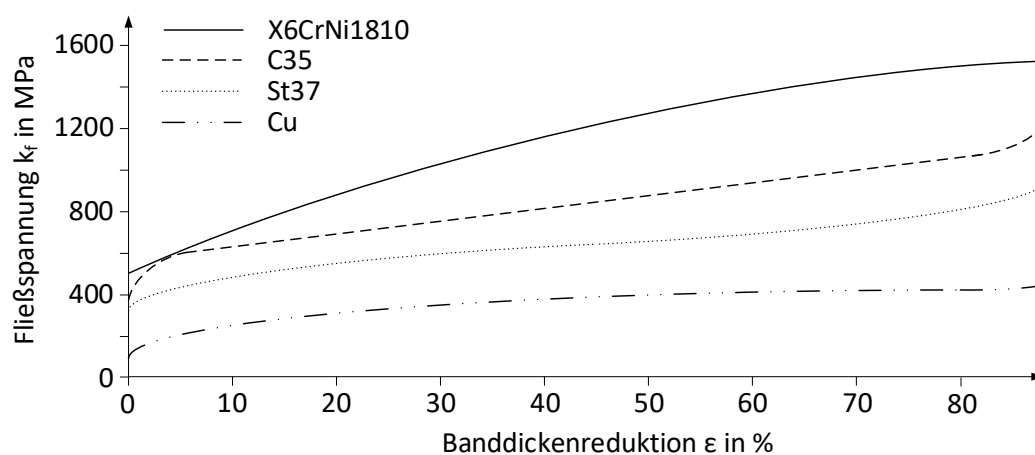


Abbildung 3.3 Ausgewählte Fließkurven von Stählen und NE-Metallen [Pawelski, 2017]

In der Literatur werden verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Fließkurven beschrieben. Dabei ist nicht jedes Verfahren gleichermaßen gut auf die Endprodukte der verschiedenen Umformprozesse anwendbar. In [Bähr et al., 1970, S.236-264] nennt der Autor den Zugversuch und den Flachstauchversuch als sinnvolle Verfahren zur Erstellung der Fließkurven kaltgewalzter Werkstoffe.

Einfluss der Temperatur

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Kaltverfestigung ist besonders bei niedrigen Temperaturen ausgeprägt. Bei ansteigenden Temperaturen überlagert sich der Effekt mit

einer Entfestigung des Materials, die durch Erholungs- und Entfestigungsvorgänge hervorgerufen werden. Beim Warmwalzen wird dieser Effekt genutzt, um dem Kraftbedarf bei der Umformung so gering wie möglich zu halten. Beim Walzen von Stahl müssen dabei die Phasenumwandlung und die Blausprödigkeit in gewissen Temperaturbereichen berücksichtigt werden.

Beim Kaltwalzen unterhalb von 200°C können zwar auch erste Entfestigungsvorgänge stattfinden, die sind gegenüber der Kaltverfestigung aber gering. Deshalb werden zwischengelagerte Glühvorgänge genutzt, um die Fließgrenze zu senken und die Umformbarkeit so zu erhöhen.

Einfluss der Umformgeschwindigkeit

Die beschriebene Entfestigung des Werkstoffs bei erhöhter Temperatur ist zusätzlich von der Umformgeschwindigkeit abhängig. Je schneller die Umformung stattfindet, desto weniger Zeit bleibt dem Werkstoff für die Entfestigungsvorgänge. Mit zunehmender Umformgeschwindigkeit steigt somit die Fließgrenze. [Kopp and Wiegels, 1998] Dabei ist der Einfluss umso größer je geringer die Geschwindigkeit ist [Herbertz et al., 2013].

Einfluss auf die Fließkurve beim Kaltwalzen

Beim Kaltwalzen ist der Umformgrad wegen der Kaltverfestigung von großer Bedeutung. In der Literatur gibt es allerdings unterschiedliche Meinungen, welchen Einfluss die Umformgeschwindigkeit und die Temperatur auf die Fließgrenze beim Kaltwalzen hat und inwieweit die beiden Größen berücksichtigt werden sollten.

In älteren Werken, wie in [Dahl, 1935, S.99-145], wird der Einfluss beider Größen teilweise als gering angesehen. Andere Autoren, wie in [Lippmann and Mahrenholtz, 1967], sehen den Einfluss der Umformgeschwindigkeit als vernachlässigbar klein an, wenn die Temperatur gering ist.

In [Bähr et al., 1970, S.236-264] und [Hensel and Spittel, 1978] untersuchen die Autoren die maximalen Temperaturen beim Kaltwalzen. Demnach können innerhalb eines Stiches Temperaturen von über 170°C erreicht werden. Bei mehreren Stichen sind Temperaturen oberhalb von 200°C somit durchaus realistisch. Beide Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Temperatur nicht vernachlässigt werden sollte.

In den aktuellsten Werken, in denen sich mit der Fließgrenze beim Kaltwalzen beschäftigt wird, wird die Umformgeschwindigkeit als vernachlässigbar klein eingeschätzt. Nach [Overhagen, 2018] wird bei der Umformung der meisten metallischen Werkstoffe keine Abhängigkeit der Fließgrenze von der Umformgeschwindigkeit beobachtet. Die Temperatur ist aber

nicht zu vernachlässigen, weil beim Kaltwalzen durch die entstehende Umformwärme bis zu 300°C erreicht werden können. Demnach lässt sich die Fließkurve nach [Overhagen, 2018] beim Kaltwalzen als Funktion von Umformgrad und Temperatur ausdrücken:

$$k_f = f(\text{Werkstoff}, \varepsilon, T) \quad (3.23)$$

3.6 Veränderung der Reibung im Walzspalt

Die Reibung im Walzspalt beeinflusst den Umformvorgang maßgeblich. Sie ist zum einen die Basis dafür, dass das Band durch die Walzen vorangetrieben wird. Die Reibung zwischen Walzen und Walzgut muss groß genug sein, damit die angetriebenen Walzen das Drehmoment beim Beschleunigen auf das Walzgut übertragen können. Dabei gilt, dass der Walzvorgang um so kritischer ist, je geringer die Reibungszahl ist. Andererseits ist die Reibung wesentlich für die benötigten Umformkräfte und -momente mitverantwortlich. Je größer die Reibung im Walzspalt, desto größer ist der benötigte Kraft- und Arbeitsbedarf.

Die Reibung im Walzspalt ist im Wesentlichen von drei Parametern abhängig. Neben der Walzenoberfläche und der Art der Schmierung ist die Walzgeschwindigkeit ein entscheidender Einflussfaktor. Hydrodynamische Effekte sorgen dafür, dass die Reibung im Walzspalt mit zunehmender Walzgeschwindigkeit abnimmt. Über die drei genannten Größen hinaus hängt die Reibung von vielen weiteren Parametern ab. In [Overhagen, 2018] nennt der Autor zusätzlich die Walzguttemperatur, die Walzstoffpaarung Walze-Walzgut und die Eigenschaften einer möglichen Zunderschicht als Einflussgrößen.

Eine exakte mathematische Beschreibung der Reibungsverhältnisse im Walzspalt ist auf Grund der komplexen Zusammenhänge somit nicht möglich. In [Becker et al., 1979] erläutert der Autor einen empirischen Ansatz zur Beschreibung der Reibung im Walzspalt. Somit lässt sich die Reibungszahl über den Zusammenhang

$$\mu = Q_6(Q_4 + Q_5) \ln(v_W) \quad (3.24)$$

berechnen, wobei Q_4 und Q_5 von der Schmierung und der Walzenoberfläche und Q_6 vom Walzgut abhängig ist. Für verschiedene Konstellationen lassen sich die entsprechenden Parameter als Tabellen ablesen (siehe [Becker et al., 1979]).

In der Praxis verhält sich die Reibung an jeder Anlage anders, sodass in der Regel Erfahrungswerte zur Beschreibung genutzt werden. Oftmals dienen Reibwertkurven als Hilfsmittel, um die Abhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit bei technologischen Berechnungen zu berücksichtigen.

3.7 Walzenabplattung

Die Zusammenhänge (3.8) bis (3.14) basieren auf der Annahme, dass die Walze während des Prozesses ihre zylindrische Form mit dem Radius R beibehält. Sowohl die Walzen, wie auch das Walzgut weisen unter Belastung jedoch ein elastisches Materialverhalten auf, sodass mit dieser Annahme ein gewisser Fehler einhergeht. In welcher Größenordnung dieser Fehler liegt hängt dabei maßgeblich von der Walzspaltgeometrie und den wirkenden Kräften ab.

Walzenabplattung nach Hitchcock

Die bekanntesten und grundlegendsten Theorien zum Kaltwalzen werden von den Autoren in [v. Karman, 1925], [Orowan, 1943] und [Bland and Ford, 1948] beschrieben. Karman berücksichtigt die elastische Deformation der Walzen nicht, sodass diese Theorie heute keine Verwendung mehr findet. Die Theorie von Bland und Ford hingegen basiert auf der Hitchcock Formel, die die Walzenverformung zu berücksichtigen versucht. In [Hitchcock, 1935] nimmt der Autor an, dass das verformte Walzenprofil ebenfalls ein Kreisbogen mit vergrößertem Radius ist. Die Formel

$$R' = R \left(1 + C_v \frac{F_R}{b (h_E - h_A)} \right) \quad \text{mit} \quad C_v = \frac{16}{\pi} \frac{1 - \nu^2}{E} \quad (3.25)$$

beschreibt den angepassten Walzenradius unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften, der Band- und Walzengometrie, sowie der Walzkraft. Es hat sich gezeigt, dass die Hitchcock-Formel in vielen Fällen eine ausreichend gute Möglichkeit bietet die Walzenabplattung zu berücksichtigen. Nach [Buchholz, 1976] ist die Verwendung des angepassten Radius bis zu einem Radiusverhältniss von $R'/R < 4$ hinreichend genau. In [Lippmann and Mahrenholtz, 1967] werden die Grenzen der Theorie in Abhängigkeit der Materialparameter und der Reibungsverhältnisse genauer definiert. Weil die Theorie nach Bland und Ford auf der Hitchcock Formel basiert stößt dieser Ansatz für dünne Bänder ebenfalls an seine Grenzen.

Ist die Bedingung erfüllt, kann der Kontaktbogen zwischen Walze und Walzgut ausreichend gut durch R' beschrieben und in den Gleichungen (3.8) bis (3.14) verwendet werden. Daraus ergibt sich, dass $l'_d > l_d$ gilt und sich die Ausdehnung des Walzspaltes in horizontaler Richtung somit vergrößert. Die Vergrößerung der Kontaktfläche erfordert wiederum eine höhere Walzkraft, sodass sich die beiden Größen also gegenseitig beeinflussen [Kramer, 1994].

In Abbildung 3.4 ist die Abplattung der Walze und die Verlängerung des Walzspaltes skizziert.

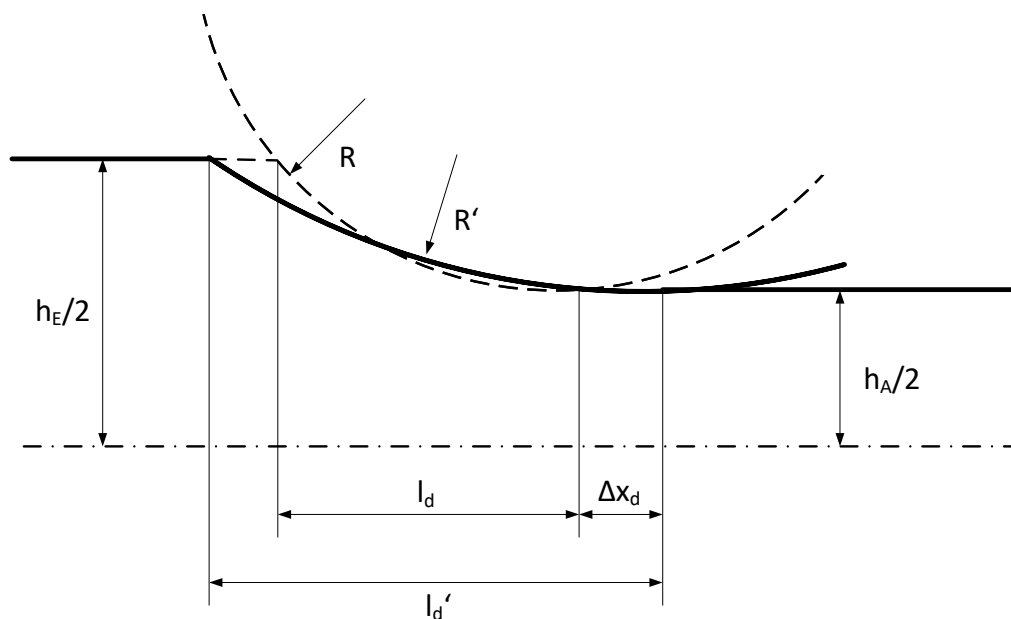


Abbildung 3.4 Abplattung der Walze nach Hitchcock

Walzenabplattung nach Fleck und Johnson

Die Grenzen der Theorie von Bland und Ford werden beim Walzen besonders fester und dünner Bänder erreicht. Im Bereich der Grenze von $R'/R \approx 4$ verändern sich die Verhältnisse im Walzspalt grundlegend. Das deformierte Walzenprofil kann nicht mehr durch einen angepassten Radius beschrieben werden, weil die Hitchcock Formel divergiert (siehe [Pawelski, 2017]). Wird in diesem Zustand beispielsweise die Walzkraft erhöht, flachen die Walzen ab, ohne dass es zu einer Streckung des Bandes kommt [Fleck et al., 1991]. In [Johnson and Bentall, 1969] haben die Autoren dieses Verhalten genauer untersucht und festgestellt, dass sich der Walzspalt mit zunehmender Walzkraft in zwei separate Zonen (eine unmittelbar hinter dem Walzspalteingang und eine direkt vor dem Ausgang) plastischer Verformung teilt. Im der dazwischen liegenden Transportzone ist die Banddicke konstant. In diesem Bereich findet also keine plastische Umformung statt.

Fleck und Johnson [Fleck and Johnson, 1986] haben einen Ansatz entwickelt, wie die Walzenabplattung beim Walzen dünner und hochfester Bänder besser berücksichtigt werden können. Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) werden die Einflüsse der wirkenden Kräfte auf die Walzspaltgeometrie berechnet und modelliert. In Abbildung 3.5 sind für verschiedene Banddicken (bei gleicher prozentualer Reduktion), die Walzspaltprofile

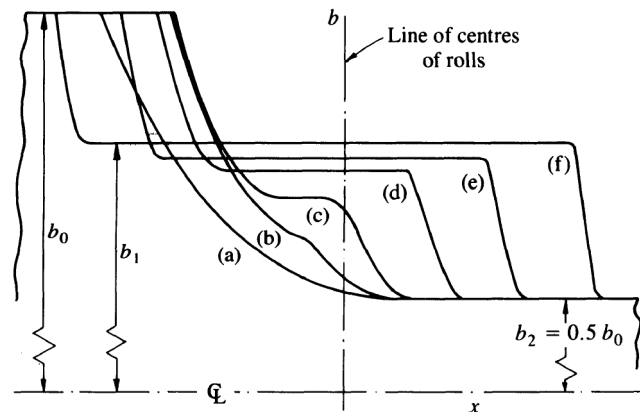


Abbildung 3.5 Einfluss der Banddicke die Verformung des Bandes im Walzspalt. Bei konstanter Reduktion von 50% nimmt die Einlaufdicke von a) ($h_0 = 0.14\text{mm}$) nach f) ($h_0 = 0.013\text{mm}$) ab. [Fleck et al., 1991]

zu erkennen, die sich aus diesem Ansatz ergeben. Im Vergleich zum Ansatz von Bland und Ford nimmt die Modellierung mittels FEM viel Rechenzeit in Anspruch ohne bessere Ergebnisse zu liefern. Für das Walzen dünner und fester Bänder liefert die Theorie von Fleck und Johnson heute aber den entscheidenden Ansatz, um den Walzspalt auch für diese Fälle physikalisch plausibel abbilden zu können.

3.8 Streifenmodell

Bereits in den 20er Jahren wurde versucht die plastomechanischen Vorgänge mathematisch zu beschreiben, um die Vorgänge im Walzspalt besser zu verstehen und die Vorsteuerung gewisser Größen zu ermöglichen. E. Siebel [Siebel, 1925] und T. von Karman [v. Karman, 1925] haben nahezu gleichzeitig das Streifenmodell entwickelt, wodurch sich die Vorgänge im Walzspalt vereinfacht beschreiben lassen. Die Theorie vereinfacht das allgemeine Umformproblem durch einige Vereinfachungen, die mit dem Kaltwalzprozess vereinbar sind. In [Lippmann and Mahrenholtz, 1967] beschreiben die Autoren die wesentlichen Vereinfachungen Siebels. Grundlegend ist die Annahme einer ebenen Umformung. Dazu wird eine Fließebene definiert, die in Abbildung 3.6 durch die Punkte ABCD aufgespannt wird. Jede zur Fließebene orthogonale Gerade verschiebt sich unter der Annahme ebenen Fließens ausschließlich parallel. Die Bandbreite verändert sich also während des Prozesses nicht und ist konstant ($b_E = b_A = b$). Gleichzeitig wird die Fließebene in Streifen eingeteilt und angenommen, dass sich diese ebenfalls nur parallel in Walzrichtung verschieben. Somit verschiebt sich jeder zur Fließebene senkrechte Werkstoffquerschnitt ebenfalls nur parallel. Wandert ein Streifen durch den Walzspalt verlängert er sich auf Grund der Volumenkon-

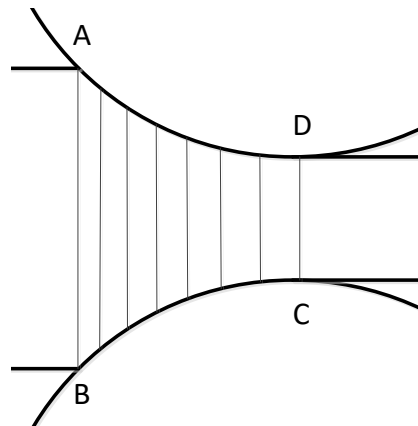


Abbildung 3.6 Aufteilung der Fließebene in Streifen

stanz (siehe Abschnitt 3.3) in Walzrichtung mit abnehmender Banddicke. [Lippmann and Mahrenholtz, 1967]

Durch die Aufteilung der Fließebene in infinitesimal schmale Streifen können diese als Trapez angesehen werden. Weil sich die Umformleistung eines Trapezes und eines Rechtecks für sehr schmale Streifen nicht unterscheidet und bei rechteckigen Streifen mit kleinem Walzwinkel von einer konstanten Fließspannung ausgegangen werden kann, ist diese Annahme auch für die trapezförmigen Streifen möglich und Teil des Streifenmodells. [Lippmann and Mahrenholtz, 1967]

Die ideale ebene Umformung ist zwar physikalisch nicht möglich, beim Kaltwalzen hat sich das Streifenmodell aber bewährt. In [Buchholz, 1976] werden die Grenzen für das Streifenmodell bezüglich der Walzspaltgeometrie untersucht. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass es sich für ein Verhältnis Dicke zu gedrückter Länge von bis zu 1:3 gut eignet, wenn die Kenntnisse über Werkstoffeigenschaften und Reibverhalten ausreichend gut sind.

Die Anwendung des Streifenmodells zur Modellierung des Walzspaltes wird in der Folge anhand der Vorgehensweise von [Pawelski and Pawelski, 2000] näher erläutert. Ausgangspunkt ist ein Werkstückstreifen, wie er in Abbildung 3.7 zu sehen ist. Unter der Annahme, dass symmetrische Verhältnisse im Walzspalt vorliegen gilt:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \quad (3.26)$$

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau \quad (3.27)$$

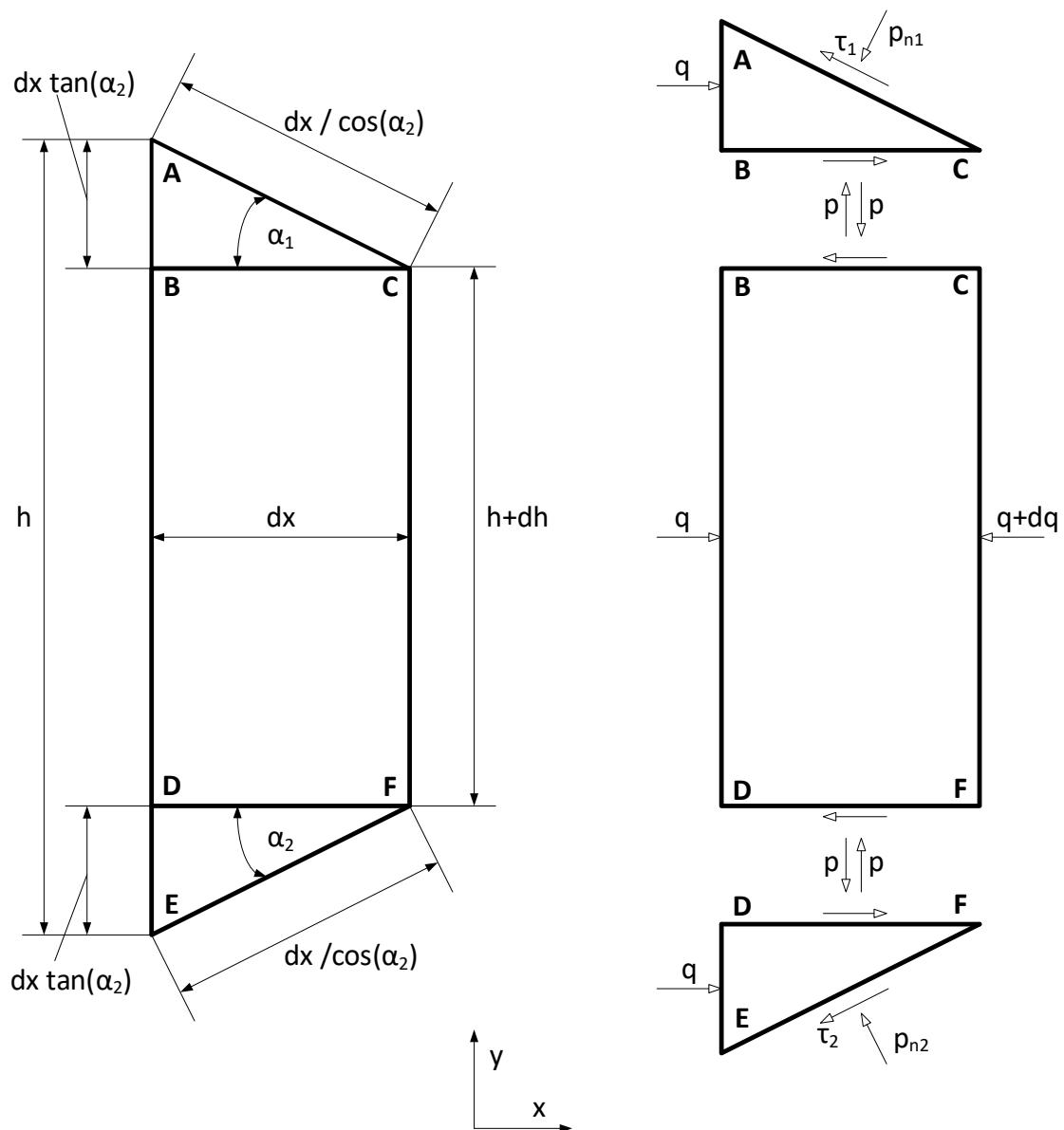


Abbildung 3.7 Mechanische Walzspaltgrößen am Werkstoffstreifen [Pawelski and Pawelski, 2000]

Anhand dessen wird das Kräftegleichgewicht in x Richtung an einem Streifen ACFE aufgestellt (siehe Abbildung 3.7):

$$qh = (q + dq)(h + dh) + 2 p_n \sin(\alpha) \frac{dx}{\cos(\alpha)} + 2 \tau \frac{dx}{\cos(\alpha)} \quad (3.28)$$

$$\Leftrightarrow 0 = h \frac{dq}{dx} + \frac{dh}{dx} q + 2 p_n \tan \alpha + 2 \tau \quad (3.29)$$

Für das Dreieck ABC bzw. DEF ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht in y-Richtung

$$p \, dx = (p_n \cos(\alpha) - \tau \sin(\alpha)) \frac{dx}{\cos(\alpha)} \quad (3.30)$$

$$\Leftrightarrow p_n = p + \tau \tan(\alpha) \quad (3.31)$$

Beim Walzen wird der Streifen gestaucht, sodass der Querdruck p positiv und der Längsdruck q negativ ist. Die im Kapitel 3 eingeführte Fließbedingung der ebenen Formänderung (siehe Gleichung (3.7)) nimmt somit die Form

$$p - q = k_e = \frac{2}{\sqrt{3}} k_f \quad (3.32)$$

an. Werden die Gleichungen (3.31) und (3.32) in (3.29) eingesetzt, ergibt sich eine Differentialgleichung erster Ordnung:

$$h \frac{dq}{dx} - k_e \frac{dh}{dx} + 2(1 + \tan^2(\alpha))\tau = 0 \quad \text{mit} \quad \frac{dh}{dx} = -2 \tan(\alpha) \quad (3.33)$$

Für den Eintritt und den Austritt aus dem Walzspalt müssen die Randbedingungen

$$q(\alpha_E) = q(x_E) = q_E = \frac{F_E}{bh_E} \quad (3.34)$$

$$q(\alpha_A) = q(x_A) = q_A = \frac{F_A}{bh_A} \quad (3.35)$$

erfüllt sein. Dabei entspricht α_E dem in Kapitel 3 eingeführten Walzwinkel θ . α_A beschreibt die Position der vertikalen Verbindungslinien zwischen den Walzendrehpunkten und ist somit null.

Beim Kaltwalzen wird in der Regel mit Bandzug gewalzt. Das Band wird zum Beispiel durch einen ein- und auslaufseitigen Haspel mit einer zusätzlichen Zugkraft belastet. q_E und q_A beschreiben den auf den Werkstoffquerschnitt bezogenen Bandzug, der durch die absoluten Kräfte F_E und F_A hervorgerufen wird. Das Walzen mit Bandzug bringt mehrere Vorteile im Prozess mit sich [Weber, 1973]:

- Straffes Aufwickeln des Bandes auf den Aufhaspel möglich
- Stabile Führung des Bandes durch die gesamte Anlage
- Zusätzlich eingebrachte Spannungen verringern den nötigen Walzdruck und somit die erforderliche Walzkraft
- Der Aufhaspelzug wirkt im gleichen Sinne wie das Antriebsmoment und entlastet so den Hauptantrieb

Nach dem Reibgesetz von Coulomb kann die Reibungsschubspannung τ über den Normaldruck p_n ausgedrückt werden:

$$\tau = \pm \mu p_n \quad (3.36)$$

Durch einsetzen von (3.31) kann τ als Funktion des Längsdrucks q ausgedrückt werden:

$$\tau = \frac{\pm \mu p}{1 \mp \mu \tan(\alpha)} \quad (3.37)$$

Durch einsetzen von (3.37) in die Differentialgleichung (3.33), ergibt sich die Karman'sche Differentialgleichung [Pawelski and Pawelski, 2000]:

$$\frac{h}{2} \frac{dq}{dx} + k_e \tan(\alpha) \pm \frac{\mu (q + k_e)(1 + \tan^2(\alpha))}{1 \mp \mu \tan(\alpha)} = 0 \quad (3.38)$$

Die beiden Randbedingungen (3.34) und (3.35) dienen als Startwerte am Walzspaltein- bzw. austritt zur Berechnung des Walzdrucks und der Schubspannungen im Walzspalt. Auf Grund des doppelten Vorzeichens (\pm bzw. \mp) ergeben sich zwei Gleichungen. Mit jeweils einem Startwert wird eine DGL beginnend am Walzspalteintritt bis in den Walzspaltaustritt und die andere vom Walzspaltaustritt bis in den Walzspalteintritt berechnet. Im Schnittpunkt der sich so ergebenden beiden Druckverläufe ist der Walzdruck im Walzspalt am höchsten. Die Berechnung des zugehörigen Schubspannungsverlaufs ergibt sich aus Gleichung (3.36). Die Berechnung des Integrals der beiden Größen liefert die resultierende Walzkraft und das Walzmoment:

$$F_R = b R \int_{\alpha_A}^{\alpha_E} p(\alpha) \cos(\alpha) dx \quad (3.39)$$

$$M_R = -b R^2 \int_{\alpha_A}^{\alpha_E} \tau(\alpha) dx \quad (3.40)$$

Durch die Multiplikation des Walzmoments mit der Walzenwinkelgeschwindigkeit ergibt sich die erforderliche Walzleistung pro Arbeitswalze.

Mit Hilfe der Streifentheorie werden die Vorgänge im Walzspalt modelliert und simuliert. Das ermöglicht die Berechnung von sogenannten Stichplänen, die alle über das Modell errechneten Informationen zu einem oder mehreren Stichen enthält. Dadurch kann das Überschreiten möglicher Ablagengrenzen bereits vor dem eigentlichen Umformprozess überprüft und wenn nötig durch die Anpassung des Stichplans verhindert werden.

Die finalen Stichpläne enthalten alle Soll-Werte für die Straße, die zur Steuerung- und Regelung des Prozesses benötigt werden.

Druckverlauf ohne Bandzug, Verfestigung und Abplattung

Wie beschrieben, ergibt sich durch das iterative Lösen der Karman'schen DGL der Druckverlauf p und der Schubspannungsverlauf q im Walzspalt. In Tabelle 3.1 wird ein Arbeitspunkt definiert, für den die Verläufe der beiden Größen in Abbildung 3.8 dargestellt sind. Zusätzlich ist die Fließspannung k_f (hier konstant ohne Verfestigung) abgebildet.

Tabelle 3.1 Definierter Arbeitspunkt

Prozessparameter	Arbeitspunkt
Banddicke Einlauf	2.7 mm
Banddickenreduktion	32.5 %
Arbeitswalzendurchmesser	500 mm
Fließspannung	430 MPa (konstant)
Spezifischer Bandzug Einlauf	0 MPa
Spezifischer Bandzug Auslauf	0 MPa
Reibungszahl	0.1

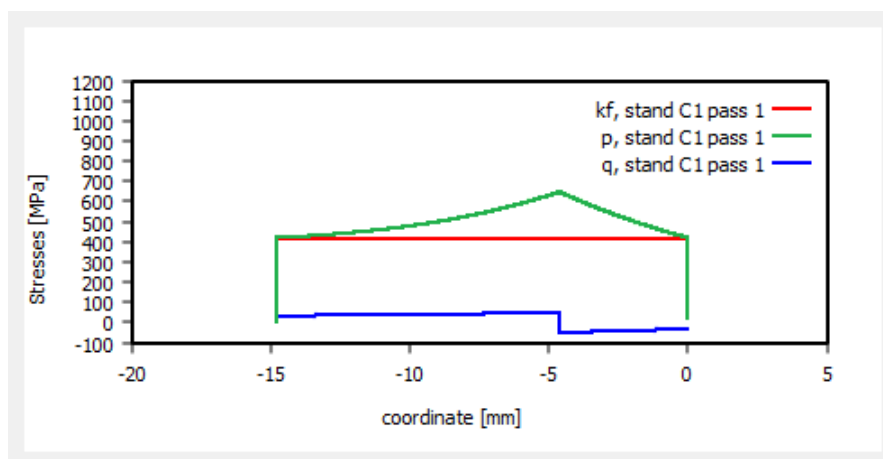


Abbildung 3.8 Exemplarischer Druck- und Scherspannungsverlauf im Walzspalt ohne Bandzug

Der Eintritt in Walzspalt bei der Koordinate -15 mm ist durch den Sprung im Druckverlauf gut erkennbar. Gleiches gilt für den Austrittspunkt, der genau bei der Koordinate 0 mm liegt. In beiden Punkten entspricht der Walzdruck der Fließspannung. Der dritte

Knick im Verlauf des Walzdrucks markiert die Fließscheide. Sie ist der Schnittpunkt der Druckverläufe, die sich durch das Lösen der beiden Differenzialgleichungen, einmal vom Walzspalteingang und einmal vom Walzspaltausgang, ergeben. Die beiden Kurven sind über den Schnittpunkt hinaus gestrichelt gekennzeichnet.

Einfluss des Bandzuges auf den Druckverlauf

In Abschnitt 3.8 werden die Vorteile, die das Walzen mit zusätzlichem Bandzug hat, bereits erläutert. In der Regel liegt der auslaufseitige spezifische Bandzug oberhalb des einlaufseitigen. Um den unterschiedlichen Effekt der beiden Bandzüge zu verdeutlichen, wird der spezifische Einlaufbandzug mit 70 MPa und der Auslaufbandzug mit 140 MPa gewählt. Für das ersten Gerüst der Tandemstraße sind das realistische Größen. In Tabelle 3.2 ist der gesamte Arbeitspunkt definiert.

Tabelle 3.2 Definiertes Arbeitspunkt

Prozessparameter	Arbeitspunkt
Banddicke Einlauf	2.7 mm
Banddickenreduktion	32.5 %
Arbeitswalzendurchmesser	500 mm
Fließspannung	430 MPa (konstant)
Spezifischer Bandzug Einlauf	70 MPa
Spezifischer Bandzug Auslauf	140 MPa
Reibungszahl	0.1

Ein wesentlicher Vorteil den der zusätzliche Bandzug mit sich bringt ist der geringere Kraftbedarf, was sich im Druckverlauf widerspiegelt. Durch die Zugkraft sinkt der Walzdruck im Walzspalteintritt um 70 MPa von 420 MPa auf etwa 350 MPa. Auf Grund des doppelten spezifischen Bandzuges im Austritt, sinkt der Walzdruck hier bis auf 280 MPa. Die gesamte Kurve verschiebt sich nach unten.

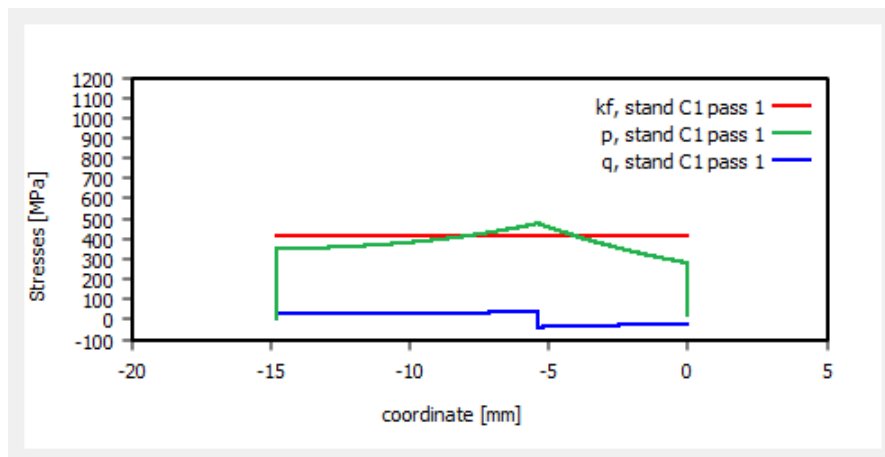


Abbildung 3.9 Exemplarischer Druck- und Scherspannungsverlauf im Walzspalt mit zusätzlichem Bandzug

Zusätzlich verschiebt sich die Fließscheide Richtung Walzspaltausgang. Die Ursache dafür wird durch die Skizze in Abbildung 3.10 deutlich. Durch die Erhöhung des einlaufseitigen Bandzuges sinkt der Walzdruck im Walzspalteintritt. Der Walzdruck wird dadurch bis zur Fließscheide geringer, was zu einer Verschiebung der Fließscheide Richtung Auslauf führt. Die Erhöhung des Bandzuges im Auslauf führt dementsprechend zu einer Verschiebung der Fließscheide Richtung Walzspalteingang.

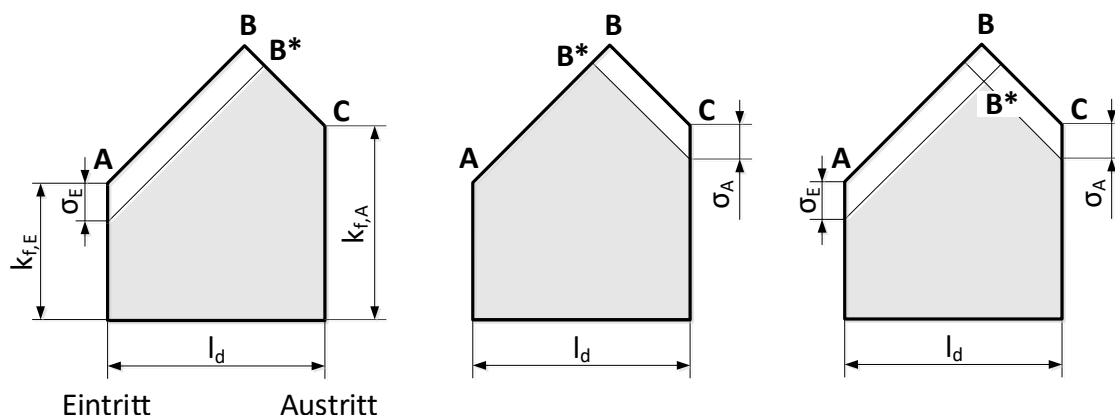


Abbildung 3.10 Einfluss der Bandzüge auf die Lage der Fließscheide im Walzspalt anhand des Walzdruckverlaufs [Weber, 1973]

In diesem Fall ist der Auslaufbandzug deutlich größer als der Einlaufbandzug. Deshalb verschiebt sich die Fließscheide in Abbildung 3.8 durch die zusätzlichen Bandzüge im Vergleich zu Abbildung 3.9 in Richtung Walzspalteingang.

Einfluss der Verfestigung auf den Druckverlauf

Die Annahme einer konstanten Fließspannung entspricht nicht der Realität. Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, nimmt der Materialwiderstand mit zunehmendem Umformgrad zu. Um dieses Verhalten zu modellieren wird im Streifenmodell eine Verfestigungskurve hinterlegt, sodass die ansteigende Fließgrenze im Walzspalt berücksichtigt wird. In Abbildung 3.11 sind der Verlauf des Walzdrucks und der Schubspannungen, unter Verwendung der Fließkurve aus Abschnitt 3.5, zu sehen.

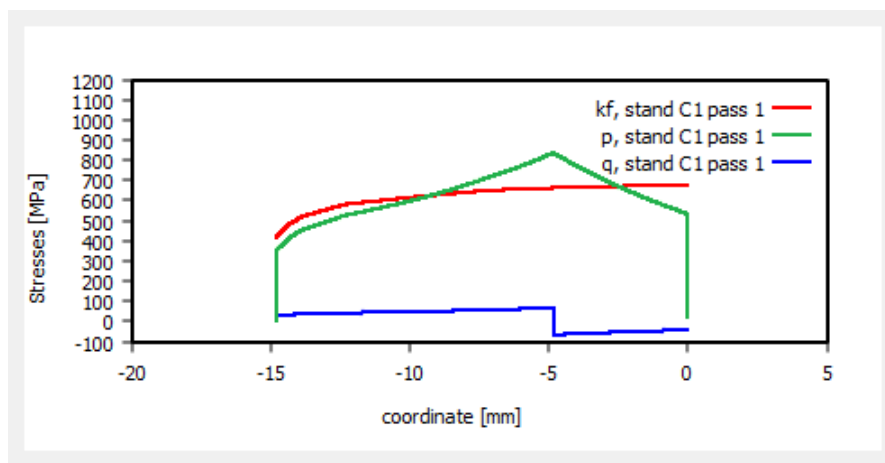


Abbildung 3.11 Exemplarischer Druck- und Scherspannungsverlauf im Walzspalt mit Bandzug und unter Berücksichtigung der Verfestigung

Auf Grund des erhöhten Materialwiderstandes steigt der benötigte Walzdruck an. Im Walzspaltaustritt entspricht er der zum Umformgrad gehörenden Fließspannung abzüglich des Bandzuges von 140 MPa. Außerdem verschiebt sich die Fließscheide durch die Verfestigung in Richtung Walzspaltausgang.

Einfluss der Abplattung auf den Druckverlauf

Eine wichtige Erweiterung der Theorien von Karman und Siebel ist die Walzenabplattung nach Hitchcock (siehe Abschnitt 3.7). In [Bland and Ford, 1948] beschreiben die Autoren die Streifentheorie unter Berücksichtigung der Abplattung.

Durch die Abplattung wird die Kontaktfläche zwischen Walzen und Walzgut vergrößert. Mit der Vergrößerung der gedrückten Länge l_d geht zusätzlich eine horizontale Verschiebung des (virtuellen) zu R' gehörenden Walzdrehpunktes einher. In [Bland and Ford, 1948] gehen die Autoren nicht näher auf die Berechnung dieser Verschiebung ein. Der gängigste Ansatz ist die gleichmäßige Aufteilung der zusätzlichen gedrückten Länge auf den Ein-

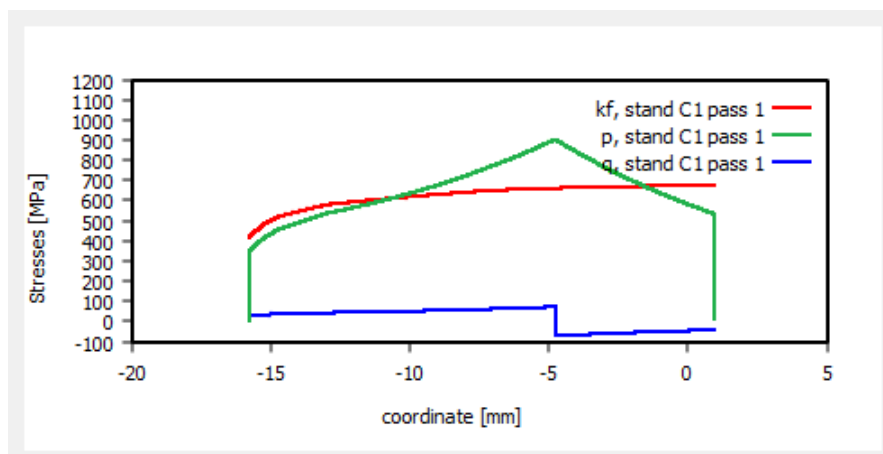


Abbildung 3.12 Exemplarischer Druck- und Scherspannungsverlauf im Walzspalt mit Bandzug, unter Berücksichtigung der Verfestigung und der Abplattung

und Auslauf. Über den Zusammenhang

$$\Delta x_d = \frac{1}{2}(l'_d - l_d) \quad (3.41)$$

kann somit die auslaufseitige Verschiebung berechnet werden. Im Druckverlauf in Abbildung 3.12 ist diese gleichmäßige Aufteilung der vergrößerten Kontaktfläche durch die gleichgroße Verlängerung des Walzspaltes in positive und negative Koordinatenrichtung zu erkennen.

3.9 Vor- und Nacheilung

Unabhängig davon, ob die Bandzüge, die Verfestigung und die Abplattung der Walzen berücksichtigt werden, ist im Druckverlauf etwa im Bereich von -5 mm ein Peak und im Schubspannungsverlauf ein Vorzeichenwechsel zu erkennen. Diese Eigenschaften sind charakteristisch und kennzeichnen die Fließscheide (auch neutraler Punkt genannt), in der die horizontale Walzenumfangsgeschwindigkeit mit der Bandgeschwindigkeit übereinstimmt. Hier gilt:

$$v_F = v_U = v_W \quad (3.42)$$

Auf Grund der Bandbeschleunigung des Bandes vom Walzspalteintritt bis zum -austritt muss es einen Punkt geben in dem diese Bedingung erfüllt ist.

Die Fließscheide trennt den Walzspalt in zwei Bereiche, die sich durch die relative Geschwindigkeit zwischen Walze und Walzgut charakterisieren. In der Nacheilzone (Eintritts-

ebene bis zur Fließscheide) ist die Bandgeschwindigkeit geringer als die Walzgeschwindigkeit, wodurch sich eine Scherspannung aufbaut. In der Voreilzone (Fließscheide bis Austrittsebene) liegt die Bandgeschwindigkeit oberhalb der Walzgeschwindigkeit. Diese Änderung der Relativgeschwindigkeit zwischen Band und Walze spiegelt sich im Verlauf der Schubspannung durch den Vorzeichenwechsel wider.

Zur Beschreibung der Ausprägung der beiden Zonen können die Nach- und die Voreilung berechnet werden. Sie beschreiben die prozentuale relative Abweichung zwischen der Walzgeschwindigkeit und der Bandgeschwindigkeit im Ein- bzw. Auslauf [Hoff and Dahl, 1955]. Es gilt

$$\kappa_N = \frac{v_U \cos(\alpha_F) - |v_E|}{v_U \cos(\alpha_F)} = \frac{v_U - |v_E|}{v_U} \quad (3.43)$$

$$\kappa_V = \frac{|v_A| - v_U \cos(\alpha_F)}{v_U \cos(\alpha_F)} = \frac{|v_A| - v_U}{v_U} \quad (3.44)$$

für die Nacheilung κ_N und die Voreilung κ_V . [Lippmann and Mahrenholtz, 1967] Oftmals wird für die Vereinfachung $\cos(\alpha_A) \approx 1$ angewendet. In der Folge wird sich auf die Voreilung, als charakteristische Größe, beschränkt.

Die Volumenkonstanz (siehe Abschnitt 3.3) kann genutzt werden, um die Voreilung in Abhängigkeit der Walzspaltgeometrie und der Fließscheidenlage zu beschreiben. Mit Gleichung (3.18) gilt in der Fließscheide:

$$h_A v_A = h_F v_U \cos(\alpha_F) \quad (3.45)$$

Dabei ist h_F die Banddicke in der Fließscheide, die mit Gleichung (3.14) berechnet werden kann. Mit dem Zusammenhang (3.45) ergibt sich für die Voreilung:

$$\kappa_V = \frac{h_F}{h_A} \cos(\alpha_F) - 1 = \frac{h_F}{h_A} - 1 \quad (3.46)$$

Die Güte der Berechnung der Voreilung hängt maßgeblich von der Richtigkeit der Banddicke in der Fließscheide h_F und damit der Fließscheidenlage selbst ab. Hinzu kommt, dass die Berücksichtigung der Walzenabplattung (siehe Abschnitt 3.7) ausreichend gut sein muss.

Unter Verwendung der Gleichung (3.14) kann die Voreilung auch in Abhängigkeit von α_F beschrieben werden:

$$\kappa_V = \frac{2R (1 - \cos(\alpha_F))}{h_A} \quad (3.47)$$

In [Overhagen, 2018] beschreibt der Autor eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der Voreilung. Laut dem Autor wird in [Ekelund, 1933] ein empirischer Ansatz beschrieben, nach dem für die Voreilung

$$\kappa_V = \frac{3}{4} \left[\frac{\psi_E^2}{2} \left(\frac{2R}{h_A} - 1 \right) \right] \quad (3.48)$$

$$\text{mit } \psi_E = \sqrt{\frac{\Delta h}{4R}} - \frac{1}{\mu} \frac{\Delta h}{4R} \quad (3.49)$$

gilt.

Kapitel 4

Walztechnologische Steuerung und Regelung einer Tandemstraße

4.1 Wichtige Sensorik und Messgrößen

Während des Betriebs einer Tandemstraße müssen ständig unzählige Funktionen überwacht und auf Veränderungen im Prozess automatisch reagiert werden. Dazu ist ein komplexes Informationsnetzwerk mit vielen Sensoren und Aktoren nötig. Zur Überwachung, Steuerung und Regelung der verschiedenen technologischen Größen werden unter anderem folgende Messwerte dauerhaft erfasst:

- Die Drehzahl des Abhaspels und des Aufhaspels
- Die Drehzahl der Arbeitswalzen (direkt oder indirekt über die Antriebsmotoren und die Übersetzung)
- Das Drehmoment, das über die Walzen in das System eingebracht wird
- Die Walzkraft
- Die Position der Arbeitswalzen (Anstellung)
- Die Drücke in Anstellungs- und Biegezyclindern
- Die Bandzüge vor und hinter dem ersten Gerüst und zwischen allen Gerüsten
- Die Banddicken
- Die Bandgeschwindigkeiten
- Die Bandplanheit

Darüber hinaus lassen sich weitere wichtige Größen aus diesen Messungen ableiten. Über die Drehzahl und den Walzenradius wird beispielsweise die Umfangsgeschwindigkeit der Walzen berechnet, die als Information in der Steuerung benötigt wird.

Auf Grund der hohen Kosten für die Sensorik werden die Banddicke, die Bandgeschwindigkeiten und die Planheit in der Regel nicht in jedem Zwischengerüstbereich gemessen. In [Roberts, 1978; Pittner and Simaan, 2008; Hu et al., 2018] werden verschiedene Straßen (auch) bezüglich ihrer Sensorik beschrieben. In diesem Kapitel wird davon ausgegangen, dass die Banddicke und die Bandgeschwindigkeit vor und hinter dem ersten und hinter dem letzten Gerüst gemessen werden. Die Planheitsmessung ist an dieser Stelle nicht relevant, sie findet aber in der Regel nur hinter dem letzten Gerüst statt.

4.2 Steuerungs- und Regelungsstrategien

In Abschnitt 2.2 werden die Herausforderungen beim Walzen in einer Tandemstraße erläutert. Daraus geht hervor, dass es verschiedene Zielgrößen gibt, die in einem gewissen Toleranzfenster liegen müssen. Gleichzeitig hat die Prozessstabilität immer oberste Priorität. Um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten muss die gegenseitige Kopplung von Banddicke und Bandzug, Bandzug und Bandgeschwindigkeit, Bandgeschwindigkeit und Banddicke, und Banddicke und Planheit, in Einklang gebracht werden [Hu et al., 2018].

Die Banddicke ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal des Endprodukts. Dennoch gibt es Betriebssituationen, in denen die Dicke bewusst vernachlässigt wird, damit die Prozesssicherheit gewährleistet werden kann, wie folgendes Beispiel zeigt.

Eine Erhöhung der Reduktion geht mit einem Anstieg der Walzkraft einher. Mit der Walzkraft steigt auch die Durchbiegung der Arbeitswalzen an, was ohne eine Reaktion durch die Walzenbiegung (und der CSV-Verschiebung) zu Unplanheiten führen würde (siehe Abschnitt 3.4). Der Arbeitsbereich der Walzenbiegeeinrichtung schränkt über diesen Zusammenhang die Walzkraft und schlussendlich die Reduktion ein.

Eine Überdicke kann in einem weiteren Bearbeitungsschritt durch erneute Reduktion entfernt werden. Planheitsfehler hingegen sind nicht so einfach zu entfernen und können im Extremfall zu einem Bandriss führen, sodass die Gewährleistung der Planheit eine höhere Priorität als das Einhalten der Banddicke hat.

Ein Bandriss wird im Wesentlichen durch das Überschreiten einer kritischen Bandzugkraft hervorgerufen. Dabei ist es ähnlich wie bei einem Zugversuch werkstoffabhängig, wann das kritische Verhältnis von Zugkraft zur Fläche erreicht wird. Im Gegensatz dazu kann auch der Einbruch des Bandzuges erhebliche Schäden verursachen, wenn dadurch beispielsweise eine Schlaufe in den Walzspalt gezogen wird. Deshalb hat die Überwachung und Einstellung der Bandzüge gegenüber der Banddicke ebenfalls immer Priorität. In [Hu et al., 2018] beschreibt der Autor die Kontrolle des Bandzuges als grundlegende Bedin-

gung einer kontinuierlich betriebenen Tandemstraße.

Zur Einstellung der Banddicke und des Bandzuges stehen in der Regel zwei Stellglieder zur Verfügung. Zum einen die Anstellung, mit der der Walzspalt eingestellt werden kann. Zum anderen die Antriebsmotoren, über die die Walzgeschwindigkeit gesteuert wird. Über den Zusammenhang der Volumenkonstanz stehen die beiden Größen direkt miteinander in Verbindung, sodass beide Stellglieder zur Einstellung beider Größen genutzt werden können. Nach [Hu et al., 2018] ist der konventionelle Weg, dass der Bandzug über die Anstellung und Banddicke über die Geschwindigkeit geregelt wird. In der Praxis wird aber auch der gegensinnige Ansatz genutzt, bei dem die Banddicke über die Anstellung und der Bandzug über die Antriebe eingestellt wird. In [Pittner and Simaan, 2008] werden beide Ansätze genauer beschrieben.

Neben der Banddicke und der Planheit sind die Oberfläche und die mechanischen Eigenschaften weitere wichtige Qualitätsmerkmale des Endproduktes. Die Einstellung erfolgt durch verschiedene Verfahren. Oftmals werden kaltgewalzte Coils nach dem Bearbeitungsprozess gegläht, um die Spannungen zu entfernen. Mit Hilfe eines nachgelagerten sogenannten Dressierprozesses, bei dem nur eine geringe Dickenreduktion stattfindet, werden dann sowohl die mechanischen Eigenschaften, wie auch die Oberfläche eingestellt [Koll et al., 2016]. In der Tandemstraße kann im letzten Gerüst dann eine Reduktion stattfinden, weil es an dieser Stelle noch keine besonderen Anforderungen an die Oberfläche gibt. Das Gerüst wird im Reduktionsmodus betrieben.

Ist das kaltgewalzte Produkt hingegen gleichzeitig das Endprodukt, muss die gewünschte Oberfläche bereits in der Tandemstraße eingestellt werden. Dazu werden speziell texturierte Walzen im letzten Gerüst verwendet [Paesold, 2006]. Damit sich eine gleichmäßige Oberfläche einstellt, wird das Gerüst dann mit konstanter Walzkraft (ab hier Kraftmodus genannt) betrieben. Durch die Einstellung einer konstanten Walzkraft wird das Oberflächenprofil der Walze gleichmäßig auf das Band übertragen.

4.3 Einstellung der Banddicken und Bandzüge

Wie in Abschnitt 4.2 bereits beschrieben, gibt es zwei Ansätze, wie mit Hilfe der Anstellung und den Antrieben, die Banddicke und die Bandzüge geregelt werden. Im Folgenden wird eine in der Industrie gängige Mischform näher erläutert. Grundsätzlich wird die Banddicke direkt über die Anstellung vorgesteuert und geregelt. Eine bewusste Anpassung der Anstellungsposition würde zu einer Änderung der Geschwindigkeiten und der Bandzüge führen. Deshalb werden erwartete Zugschwankungen durch eine Vorsteuerung der Antriebe verhindert. Im Gegensatz dazu werden unerwartete Zugschwankungen wie-

derum durch die Anstellung ausgeglichen. Durch diese Herangehensweise erhält die Anstellung eine Doppelfunktion, was dazu führt, dass unerwartete Zugschwankungen einen Dickenfehler hervorrufen können.

Allgemeiner Zusammenhang zwischen Banddicke und Bandzug

Die Banddicke hängt über den Zusammenhang der Volumenkonstanz direkt mit der Bandgeschwindigkeit zusammen. Die Regelung der Banddicke geht somit, unabhängig vom Stellglied, immer direkt mit einer Anpassung der Geschwindigkeiten einher. Andererseits stellen sich die Bandzüge auf Grund der Geschwindigkeitsverhältnisse ein. Die Walzgeschwindigkeiten müssen dementsprechend so eingestellt werden, dass die Bandzüge in jedem Bereich der Straße innerhalb eines gewissen Toleranzbereichs liegen, um einen Bandriss bzw. eine Schlaufe im Walzspalt zu verhindern (siehe Abschnitt 4.2).

Nach Gleichung (3.18) gilt in jedem Gerüst die Volumenkonstanz:

$$h_{Ex} v_{Ex} = h_{Ax} v_{Ax} \quad (4.1)$$

Die Einlaufdicke h_{Ex} ist unveränderlich und Auslaufdicke h_{Ax} ist die konstante Zielgröße. Schwankungen der Einlaufdicke führen somit zu Geschwindigkeits- und Zugänderungen im Einlauf und/oder Auslauf des Gerüsts, wenn der Walzspalt auf einer konstanten Position gehalten wird. In [Pittner and Simaan, 2008] wird gezeigt, dass eine Änderung der Anstellungsposition einen signifikanten Einfluss auf den Bandzug vor dem Gerüst hat. Der Einfluss auf den Bandzug hinter dem Gerüst ist dagegen geringer. Das hat zur Folge, dass Spaltänderungen zu Zugschwankungen in Einlaufrichtung führen würden und diese durch die Anpassung der Walzgeschwindigkeiten verhindert werden müssen. Andererseits müssen Bandzugschwankungen im Zwischengerüstbereich vom darauf folgenden Gerüst verhindert bzw. ausgeglichen werden. Das passiert entweder direkt durch den Antrieb des betreffenden Gerüsts (erwartete Bandzugschwankungen) oder indirekt durch die Änderung der Anstellungsposition (unerwartete Bandzugschwankungen), die eine Änderung der Einlaufgeschwindigkeit zur Folge hat.

Geschwindigkeitskaskade

Während unerwartete Schwankungen des Bandzuges durch die Anstellung minimiert werden (sofern kein technologisches Limit, wie die Walzkraft, erreicht wird), werden alle vorhersehbaren Bandzugschwankungen, zum Beispiel durch das Ausregeln der Banddicke oder die Änderung der Soll-Walzgeschwindigkeit, über die Anpassung der Walzgeschwindigkeiten ausgeglichen. Im Umkehrschluss ändern sich die Soll-Walzgeschwindigkeiten der

einzelnen Gerüste während des Betriebs dauerhaft. Jede Änderung der Walzgeschwindigkeit in einem Gerüst, muss entweder in allen vorangestellten Gerüsten oder in allen folgenden Gerüsten äquivalent berücksichtigt werden. Die Berechnung der einzelnen Vorgabewerte erfolgt deshalb gerüstweise über eine Kaskade unter Berücksichtigung der Einflussgrößen.

Den grundlegenden Sollwert liefert dabei das letzte Gerüst. Alle anderen Walzgeschwindigkeiten ergeben sich im ersten Schritt auf Grund der Abnahmeverteilung. Über die in Abschnitt 3.9 beschriebenen Zusammenhänge zwischen der Auslaufgeschwindigkeit, der Walzgeschwindigkeit und der Voreilung und den Zusammenhängen der Volumenkonstanz (siehe Abschnitt 3.3) lassen sich so schrittweise die Walzgeschwindigkeiten der einzelnen Gerüste über die Zusammenhänge

$$v_{Ex} = v_{Ux}(\kappa_{Vx} + 1) \frac{h_{Ax}}{h_{Ex}} \quad (4.2)$$

$$v_{A(x-1)} = v_{Ex} \quad (4.3)$$

$$v_{U(x-1)} = \frac{1}{1 + \kappa_{V(x-1)}} v_{A(x-1)} \quad (4.4)$$

berechnen. Auf diese Weise werden in jedem Programmzyklus die Soll-Werte der Walzgeschwindigkeiten für jedes Gerüst neu berechnet. Einer Änderung der (Master-) Geschwindigkeit im letzten Gerüst (beispielsweise beim Beschleunigen oder manuell durch den Bediener) folgt somit immer eine synchrone Anpassung aller Gerüstgeschwindigkeiten.

Die Steuerung und Regelung der Banddicke in den Gerüsten C1, C2 und C4 (bzw. C5) beeinflusst die Soll-Walzgeschwindigkeiten der einzelnen Gerüste, wie oben beschrieben. Jede Anpassung der Soll-Walzgeschwindigkeit muss dann wiederum bei der Berechnung im nächsten Gerüst gemäß der Gleichungen (4.2) bis (4.4) berücksichtigt werden. Der Einfluss einer Anstellungsänderung auf den Bandzug ist im Auslauf zwar geringer, dennoch müssen auch die folgenden Gerüste ihre Geschwindigkeiten anpassen. Die Walzgeschwindigkeiten berechnen sich gemäß der Zusammenhänge

$$v_{Ax} = (1 + \kappa_{Vx})v_{Ux} \quad (4.5)$$

$$v_{E(x+1)} = v_{Ax} \quad (4.6)$$

$$v_{U(x+1)} = v_{E(x+1)} \frac{1}{1 + \kappa_{V(x+1)}} \frac{h_{Ex}}{h_{Ax}} \quad (4.7)$$

Wird in einem Gerüst ein technologisches Limit erreicht, müssen die Walzgeschwindigkeiten ebenfalls angepasst werden. Die kaskadierte Berechnung der sich ergebenden Geschwindigkeiten erfolgt vom betreffenden Gerüst an vorwärts gemäß der Gleichungen (4.5) bis (4.7).

Die Gleichungen (4.2) bis (4.7) basieren auf der Kenntnis der Voreilung. Die Geschwindigkeit wird allerdings nicht hinter jedem Gerüst gemessen, sodass nicht an jeder Stelle ein Ist-Wert ermittelt werden kann. Stattdessen wird deshalb die berechnete Soll-Voreilung genutzt, die sich aus dem Walzmodell ergibt und Teil des Stichplans ist. Aus diesem Grund liegt die Abweichung zwischen der tatsächlichen und der berechneten Bandgeschwindigkeit in der Größenordnung des Voreilungsfehlers. Die Güte der prognostizierten Voreilungen ist also maßgeblich für die Güte der Auslaufgeschwindigkeiten. Da sich die Banddicken gemäß der Volumenkonstanz über Zusammenhang (4.1) einstellen, ergibt sich aus einem Voreilungsfehler auch eine Abweichung der Banddicke.

Bridle (Abhaspel) - Gerüst C1

Vor dem ersten Gerüst sorgt im Falle einer vorgeschalteten Beize (siehe Abschnitt 2.2) ein Bridle und ansonsten ein Haspel für den nötigen Bandrückzug. Dazu wird die Geschwindigkeit des Bridle (Haspel) mit Hilfe einer Geschwindigkeitsuntersteuerung geregelt. Das heißt die Soll-Geschwindigkeit ist so gering, dass vor Erreichen dieser Geschwindigkeit eine definierte Drehmomentgrenze ein weiteres Abbremsen des Bridle (Haspel) verhindert. Über diese indirekte Regelung des Drehmoments werden Bandzugschwankungen vor dem ersten Gerüst direkt ausgeglichen. [J. Pyrhonen, 2016]

Die Einlaufdicke h_{E1} wird durch ein Dickenmessgerät vor dem Gerüst erfasst. Die Abweichung bezüglich der Referenzdicke wird als Δh_{E1} bezeichnet. Sie wird zur Vorsteuerung genutzt und in ein Positionsoffset umgerechnet, das wiederum die Abweichung möglichst gut ausgleichen soll. Dabei müssen der Gerüstmodul C_m und der Bandmodul C_s berücksichtigt werden, weil sich mit der Änderung der Anstellungsposition auch die Walzkraft und somit die Auffederung des Gerüsts, sowie die Reduktion ändert. Die Positionsänderung Δs_1 ergibt sich also aus dem gemessenen Abweichung der Einlaufdicke, welche ausgeglichen werden soll, und einem Korrekturfaktor mit dem die prognostizierte Auffederung und die erwartete zusätzliche Reduktion berücksichtigt wird. Es gilt:

$$\Delta s_1 = \Delta h_{E1} \frac{C_s}{C_m} \quad (4.8)$$

Auf Grund des Abstandes zwischen Messgerät und Gerüst, muss die Positionskorrektur zur Banddickenmessung zeitlich verzögert geschehen. Dazu wird mit Hilfe der Bandge-

schwindigkeit die Dickenabweichung vom Messgerät bis in den Walzspalt getrackt.

Gerüst C1 - Gerüst C2

Hinter Gerüst C1 befindet sich ebenfalls ein Dickenmessgerät, das zur Regelung der Banddicke im ersten Gerüst genutzt wird. Dazu wird die Abweichung bezüglich des Soll-Werts ausgewertet und unter Berücksichtigung von Bandmodul und Gerüstmodul die nötige Positionsänderung berechnet. Durch dem Abstand zwischen dem Gerüst und dem Dickenmessgerät ergibt sich eine Totzeit, die bei der Reglerauslegung berücksichtigt werden muss. Auf Grund dieser verzögerten Reaktion des Reglers können nur Abweichungstendenzen, also Dickenfehler die über einen gewissen Zeitraum gemessen werden, ausgeregelt werden. Dickenschwankungen, die in höherer Frequenz auftreten, werden in Gerüst C2 mit Hilfe einer Vorsteuerung bestmöglich entfernt. Analog zur Vorsteuerung im ersten Gerüst wird der Dickenfehler vom Messgerät bis zum Gerüst verfolgt und so die entsprechende Anstellungskorrektur über den Zusammenhang

$$\Delta s_2 = \Delta h_{E2} \frac{C_s}{C_m} \quad (4.9)$$

zeitverzögert durchgeführt.

Durch diese Vorsteuerung in Gerüst C2 ergeben sich vorhersehbare Änderungen der Einlaufgeschwindigkeit, sodass die Walzgeschwindigkeit des ersten Gerüsts parallel angepasst wird. Diese Änderung wird über die Geschwindigkeitskaskade an das erste Gerüst weitergegeben, um den Bandzug im Zwischengerüstbereich C1-C2 konstant zu halten.

Gerüst C2 - Gerüst C3

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben befinden sich hinter den Gerüsten C2 und C3 in der Regel keine Dickenmessgeräte, sodass noch bestehende lokale Dickenabweichungen nicht erkannt und ausgeglichen werden können. Banddickenschwankungen im Vormaterial sollten also bereits in den Gerüsten C1 und C2 bestmöglich ausgeglichen werden. Gerüst C3 wird nur über die Walzgeschwindigkeit geregelt. Über den Zusammenhang der Volumenkonstanz wird die Banddicke deshalb nur indirekt über die Walzgeschwindigkeit eingestellt.

Unerwartete Bandzugschwankungen werden im Zwischengerüstbereich C2-C3 mit Hilfe der Anstellung ausgeregelt. Zwei Beispiele zeigen, dass diese Regelung der Bandzüge auch technologisch Sinn macht. So ist ein Einbruch des Zuges im Zwischengerüstbereich C2-C3 darauf zurückzuführen, dass die Reduktion in C3 zu gering ist. Gerüst C3 reagiert auf den geringen Zug indem der Walzspalt etwas geschlossen wird und gleicht so die Überdicke direkt aus (Beispiel 1). Analog dazu wird ein zu hoher Bandzug σ_{23} durch eine

erhöhte Reduktion in Gerüst C3 hervorgerufen, sodass das Öffnen des Walzspalts sowohl die Unterdicke, wie auch den Bandzug korrigiert (Beispiel 2).

Beispiel 1: $\Delta h_3 \downarrow$ $\sigma_{23} \downarrow$ $\Delta s_3 \downarrow$

Beispiel 2: $\Delta h_3 \uparrow$ $\sigma_{23} \uparrow$ $\Delta s_3 \uparrow$

Gerüst C3 - Gerüst C4

Wird das letzte Gerüst im Reduktionsmodus betrieben, wird die Dicke in Gerüst C4, analog zum Gerüst C3, nur indirekt über die Geschwindigkeit geregelt. Wird das Gerüst C5 im Kraftmodus betrieben (siehe Abschnitt 4.2), muss die Auslaufbanddicke hinter Gerüst C4 zu der sich einstellenden Reduktion in Gerüst C5 passen. Dazu wird die Banddicke in Gerüst C4 mit Hilfe der gemessenen Banddicke hinter Gerüst C5 (teilweise wird die Banddicke auch hinter Gerüst 4 gemessen) geregelt. Mit den Vorteilen, die sich durch eine konstante Walzkraft im letzten Gerüst ergeben (siehe Abschnitt 4.2), gehen daher einige Herausforderungen einher:

- Aus dem Abstand zwischen Gerüst C4 und dem Dickenmessgerät ergibt sich für den Regelkreis eine nicht unwesentliche Totzeit und somit ein Schleppfehler.
- Die Reduktion im letzten Gerüst ist nicht genau bekannt, sodass nicht exakt zurückgerechnet werden kann.
- Die Auslaufbanddicke in Gerüst 4 wird (analog zu den Gerüsten C2 und C3) über die vorausberechnete Voreilung ermittelt und ist in gleicher Weise fehlerhaft.

Gerüst C4 - Gerüst C5

Im letzten Gerüst wird die Anstellung genutzt, um die Banddicke oder die Walzkraft zu regeln, sodass auch unerwartete Bandzugschwankungen über die Walzgeschwindigkeit eingestellt werden.

Gerüst C5 - Aufhaspel

Eine Änderung der Walzgeschwindigkeit im letzten Gerüst beeinflusst den Bandzug im Auslauf. Damit dieser ebenfalls konstant bleibt, muss die Geschwindigkeit des Aufhaspels angepasst werden. Dazu wird das Drehmoment analog zum Einlauf indirekt über eine Geschwindigkeitsübersteuerung geregelt. Das heißt der Geschwindigkeitsregler erreicht die Soll-Geschwindigkeit im Normalbetrieb nicht, weil das maximale Drehmoment begrenzt wird. Dadurch bleibt das Drehmoment und der Bandzug konstant. [J. Pyrhonen, 2016]

Absicherung der Bandzüge

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben ist ein Bandriss oder eine Schlaufe im Walzspalt in jedem Fall zu vermeiden. Die Anstellung ist auf Grund der technologischen Limits begrenzt, sodass sie nicht immer als Stellglied zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wird der Bandzug in den Zwischengerüstbereichen, in denen er über die Anstellung eingestellt wird, zusätzlich durch die Antriebe abgesichert (siehe Beispiel in Abschnitt 4.2). Am Beispiel:

Der Anstieg des Bandzuges zwischen zwei Gerüsten führt zunächst dazu, dass das folgende Gerüst den Walzspalt schließt, um den Zug zu reduzieren. Dadurch erhöht sich die Walzkraft und die Durchbiegung der Walzen verändert sich. Kann die Walzenbiegung diese zusätzliche Verformung nicht mehr ausgleichen, würde ein weiterer Anstieg der Walzkraft zu Unplanheiten, im schlimmsten Fall zu einem Bandriss führen (siehe Abschnitt 4.2). Der Ausgleich der Bandzugschwankungen durch die Anstellung ist an dieser Stelle also begrenzt. Zur Kompensation wird deshalb die Walzgeschwindigkeit reduziert.

Durch die parallele Überwachung der technologischen Grenzen (Walzkraft etc.) in Verbindung mit dem Bandzug wird die Anlage gegen Bandrisse abgesichert. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, hat die Verhinderung eines Bandrisses immer höchste Priorität, sodass der resultierende Dickenfehler in Kauf genommen wird, wenn eine technologische Grenze, wie die eines technologischen Walzkraftlimits, erreicht ist.

4.4 Örtliche Verfolgung von Bandpositionen in einer Tandemstraße

Durch die Ausregelung der Bandzüge mit Hilfe der Anstellung, gehen mit Zugschwankungen auch Dickenschwankungen einher. So können in jedem Gerüst Dickenfehler entstehen, welche jedoch erst hinter Gerüst C5 im Dickenmessgerät erkannt und aufgezeichnet werden. Zur näheren Untersuchung solcher Dickenfehler, muss die Dauer zwischen Fehlerentstehung im Gerüst und der Aufzeichnung der Dicke des gleichen Bandabschnitts hinter Gerüst C5 ermittelt werden. Sie ist zu einen von den Abständen zwischen den Gerüsten und dem Dickenmessgerät und zum anderen von den herrschenden Geschwindigkeiten abhängig. Die Geschwindigkeiten ändern sich während des Walzprozesses laufend. Die Berechnung der gewalzten Bandlängen und die Ermittlung der Zeitpunkte zu denen der Bandabschnitt das nächste Gerüst erreicht hat, erfolgt deshalb iterativ. Die Bandlänge werden über das Integral der Bandgeschwindigkeiten berechnet.

Vorgehensweise

Die Verfolgung eines Bandabschnitts durch die Straße wird anhand des Trackings der Schweißnaht erläutert. Dabei dienen während eines Walzprozesses aufgezeichnete Signale, die die Walzkraft der Gerüste über die Zeit und die Messung der Banddicke hinter dem letzten Gerüst aufzeigen, als visuelles Hilfsmittel. In Abbildung 4.1 sind diese zu sehen.

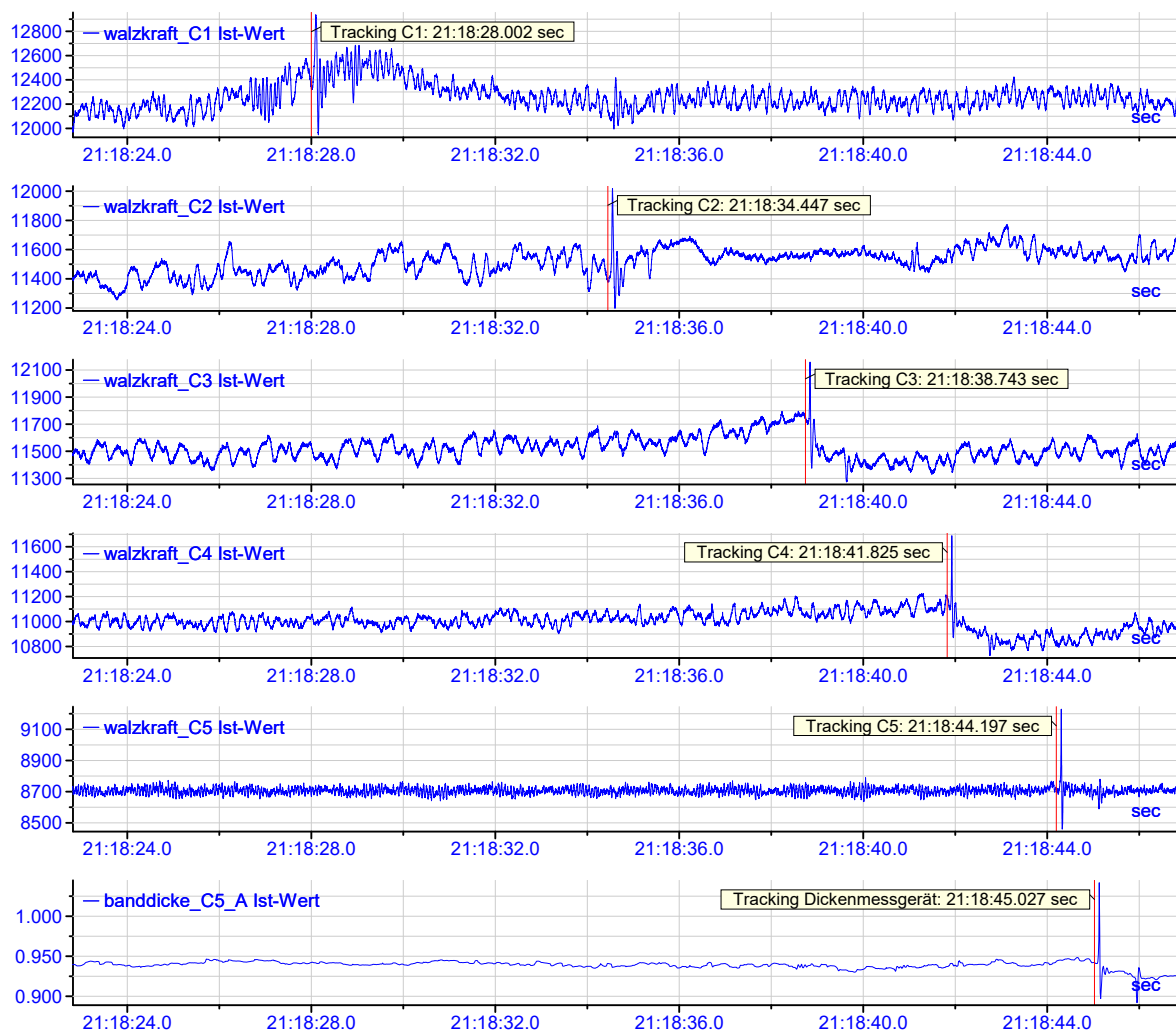


Abbildung 4.1 Tracking der Schweißnaht, die sich durch einen Peak in der Walzkraft jedes Gerüsts und in der aufgezeichneten Banddicke erkennen lässt

Die Schweißnaht bietet sich zur Validierung des Trackings an, weil sie im Signalverlauf der Walzkraft jedes Gerüsts als Peak erkennbar und der Zeitpunkt, zu dem sie sich in dem Gerüst befindet somit eindeutig ist. Der Marker 'Tracking C1' dient als Referenz und markiert den Zeitpunkt, zu dem sich die Schweißnaht in Gerüst C1 befindet. Er ist direkt vor den Peak im Signal 'walzkraft_C1 Ist-Wert' platziert. Über das Integral der

Bandgeschwindigkeit zwischen Gerüst C1 und C2 wird die gewalzte Bandlänge und damit die theoretische Position der Schweißnaht berechnet. Entspricht diese dem Abstand der beiden Gerüste, befindet sich die Schweißnaht rechnerisch in Gerüst C2. Dieser Zeitpunkt ist durch den Marker 'Tracking C2' gekennzeichnet. Auch in der Walzkraft des zweiten Gerüsts ist die Schweißnaht durch einen Peak erkennbar. Der Marker liegt wie erwartet genau vor dem Peak.

Mit Hilfe der Bandgeschwindigkeiten in den Zwischengerüstbereichen wird auf diese Weise für jedes Gerüst der Zeitpunkt berechnet, zu dem sich die Schweißnaht theoretisch im Walzspalt befindet. Mit Hilfe der Peaks bestätigen sich die Berechnungen. Im aufgezeichneten Signal des Dickenmessgeräts hinter Gerüst C5 ist die Schweißnaht ebenfalls als Peak zu erkennen.

Trackingfehler

Die Bandgeschwindigkeiten werden, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, in der Regel vor und hinter Gerüst C1, sowie hinter dem letzten Gerüst gemessen. In den Zwischengerüstbereichen C2-C3, C3-C4 und C4-C5 erfolgt keine Messung, sodass der Ist-Wert für die Bandgeschwindigkeit nicht zur Verfügung steht. Für das Tracking werden die Bandgeschwindigkeiten aus diesem Grund aus den Walzgeschwindigkeiten und den Soll-Werten der Voreilungen berechnet. Aus Gleichung (3.44) ergibt sich durch Umstellen für jedes Gerüst die Berechnungsvorschrift:

$$v_{Ax} = v_{Wx}(1 + \kappa_x) \quad \text{mit } x = \{2, 3, 4\} \quad (4.10)$$

Die Walzgeschwindigkeiten entsprechen den Umfangsgeschwindigkeiten der Walzen (siehe Gleichung (3.42)), die wiederum aus den gemessenen Drehzahlen und den Walzenradien berechnet werden können. Die Walzgeschwindigkeiten stehen somit als Ist-Werte zur Verfügung. Die Voreilungen ergeben sich aus dem Walzmodell (siehe Abschnitt 3.8) als Soll-Werte. Die Abweichungen von den tatsächlichen Voreilungen führen zu einem Geschwindigkeitsfehler und somit zu einem Trackingfehler. Für einen zu verfolgenden Bandabschnitt kann bei einem definierten maximalen Voreilungsfehler das Intervall berechnet werden in dem der tatsächliche Zeitpunkt liegt, zu dem der Abschnitt das Dickenmessgerät hinter Gerüst C5 erreicht.

Die Vorhersage der Voreilung mit Hilfe der Walzmodelle erweist sich in vielen Fällen als ungenau. In Abbildung 4.2 ist die Abweichung der Voreilung, also die Differenz zwischen berechneten Soll-Wert und dem tatsächlichen Wert, für Gerüst C1 durch ein Histogramm abgebildet. Der absolute Voreilungsfehler im ersten Gerüst beträgt bis zu 4%. Im be-

trachteten Fall wird die Abweichung der Voreilung in den Gerüsten C2 bis C4 auf dieser Grundlage mit $\pm 3\%$ definiert.

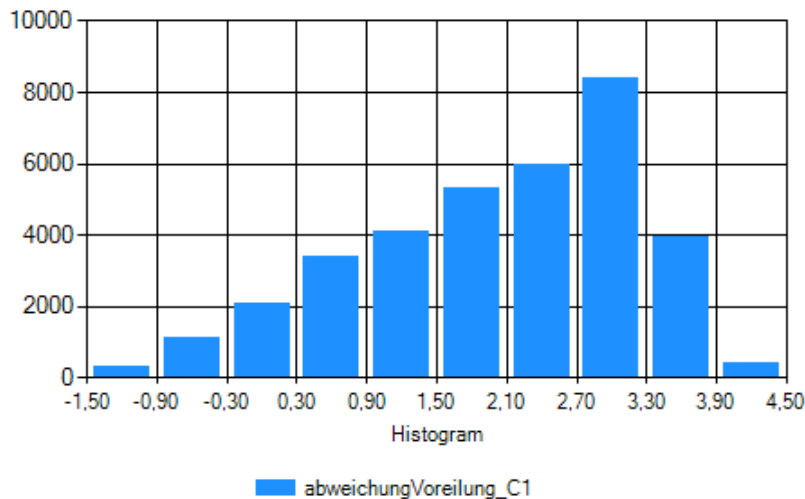


Abbildung 4.2 Histogramm über die Abweichung der Voreilung in Gerüst C1

Der Trackingfehler ist von der aktuellen Walzgeschwindigkeit abhängig. Bei geringen Geschwindigkeiten ist das Fehlerintervall größer als bei höheren Geschwindigkeiten, weil zum Walzen der gleichen Bandlänge mehr Zeit benötigt wird. In Abbildung 4.3 sind oben die Intervalle bei einer Walzgeschwindigkeit in Gerüst C5 von etwa 2.1 m/s abgebildet. Im unteren Bereich sind die Intervalle bei einer Walzgeschwindigkeit von 9.2 m/s bei gleicher relativer Zeitbasis zu sehen.

In den beiden Signalverläufen sind mehrere Intervalle abgebildet. Sie kennzeichnen jeweils den Fehlerbereich, der sich für die Verfolgung von Bandabschnitten aus den verschiedenen Gerüsten ergibt. Ein Bandabschnitt, der aus Gerüst C2 bis in das Messgerät hinter Gerüst C5 getrackt wird ist einem Voreilungsfehler länger ausgesetzt als ein Bandabschnitt, der nur aus Gerüst C4 bis hinter C5 verfolgt wird. Der Zeitpunkt, zu dem der betrachtete Bandabschnitt das Dickenmessgerät tatsächlich erreicht, liegt also in einem größeren Intervall.

Im betrachteten Fall (maximaler Voreilungsfehler $\pm 3\%$, Gerüstabstände 5500mm, Abstand zwischen C5 und Dickenmessgerät 1900mm) ergibt sich bei einer Walzgeschwindigkeit von ca. 2.21 m/s (9.29 m/s) ein maximales Intervall von 0.63 Sekunden (0.16 Sekunden), was einer Bandlänge von 1.4 Metern entspricht. Bei der Untersuchung von Dickenfehlern mit Hilfe des Trackings sollte das Fehlerintervall also immer berücksichtigt und die Ergebnisse dahingehend hinterfragt werden.

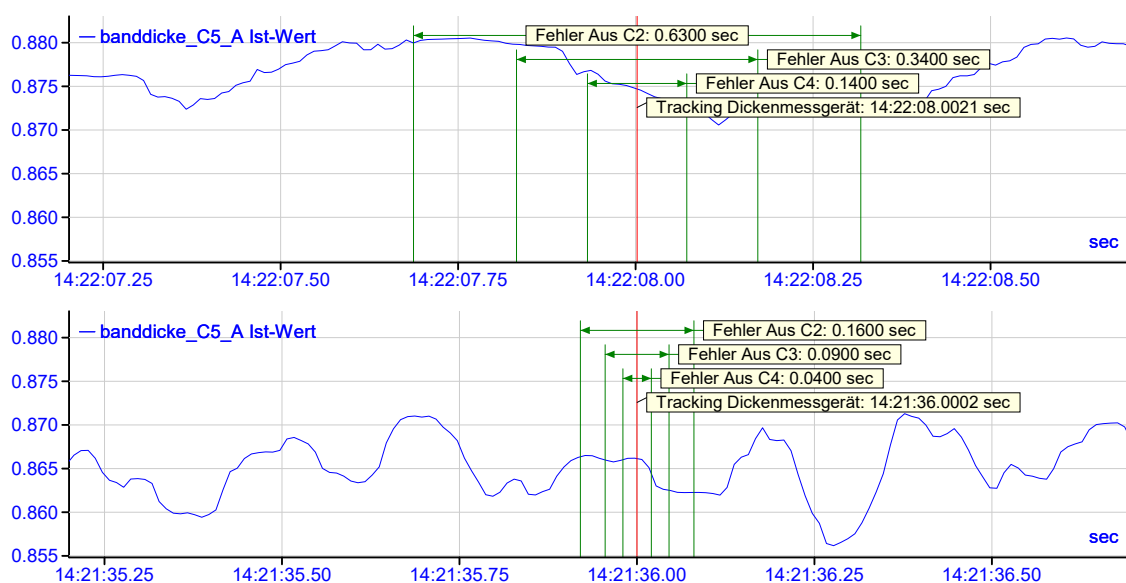


Abbildung 4.3 Gerüstabhängiger Trackingfehler am Dickenmessgerät hinter Gerüst C5. Oben: Walzgeschwindigkeit C5 = 2.21 m/s, Unten: Walzgeschwindigkeit C5 = 9.29 m/s

4.5 Signifikanz der berechneten Voreilung im Prozess

Mit Hilfe des zu Grunde liegenden Walzmodells wird für jeden Stich die theoretische Voreilung berechnet. Die ungenaue Kenntnis der Reibungsverhältnisse und Werkstoffeigenschaften, sowie gewisse Modellfehler führen dazu, dass die Vorhersage oftmals sehr fehlerhaft ist (siehe Abschnitt 4.4). Diese Abweichung zur sich einstellenden tatsächlichen Voreilung führt im Prozess zu verschiedenen Problemen.

Schweißnahttracking

Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, wird die Soll-Voreilung gemäß der Zusammenhänge (4.2) bis (4.7) verwendet, um die Soll-Walzgeschwindigkeiten der einzelnen Gerüste ständig zu berechnen. Die Güte der darüber berechneten Geschwindigkeiten hängt somit maßgeblich von der Güte der Soll-Voreilungen ab. Da die Geschwindigkeiten kaskadiert berechnet werden, werden die Geschwindigkeitsabweichungen an die anderen Gerüste weitergereicht. Bevor die Schweißnaht das erste Gerüste erreicht, wird die Walzgeschwindigkeit reduziert, sodass beim Durchqueren der Straße konstante Prozessbedingungen herrschen. In diesem Zustand sind die Geschwindigkeiten und Bandzüge ausgeregelt. Wenn mit der Schweißnaht kein Produktwechsel einhergeht, wird dieser Zustand für das nächste Coil übernommen und es entstehen trotz fehlerhaft berechneter Voreilung keine Geschwindigkeits- oder Dickenabweichungen.

Mit der Schweißnaht geht in diesem Bereich eine erhöhte Kerbwirkung einher, die beim Produktwechsel besonders ausgeprägt ist. Deshalb wird das Band an der Schweißnaht mit einer sogenannten Notch versehen. Dabei wird eine Trapezform mit abgerundeten Ecken aus dem Band gestanzt, sodass die Kerbe entschärft wird.

Durch die Notch ist die Bandbreite und damit der kritische Querschnitt im Zwischengerüstbereich kurzzeitig geringer. Damit der spezifische Bandzug nicht ansteigt, wird er vorgesteuert und die Zugkraft auf die Querschnittsänderung angepasst. Der Zeitpunkt der Anpassung der Zugkräfte basiert auf dem Tracking (siehe Abschnitt 4.4). Fehlerhaftes Tracking, ausgelöst durch die Abweichung der Voreilung, führt zu einer fehlerhaften Berechnung des Zeitpunktes, zu dem der Bandzug angepasst werden muss. Dadurch können kurzzeitige Zugpeaks entstehen, die im schlimmsten Fall zu Bandrissen führen.

Produktumschaltung

Wenn mit der Schweißnaht ein Produktwechsel einhergeht, ergeben sich zusätzliche Herausforderungen. In der Software wird ein neuer Stichplan und somit neue Soll-Werte für Banddicken, Bandzüge, Voreilungen und Geschwindigkeiten berechnet. Im Moment der Produktwechsels sind die Banddicke und die Bandzüge daher noch nicht ausgeregelt. Je größer die Abweichungen zwischen den berechneten und den sich einstellenden Voreilungen sind, desto asynchroner werden die Antriebe und damit die Bandzüge vorgesteuert. Je besser die sich aus dem Modell ergebende Voreilung ist, desto geringer sind die Zug- und Dickenabweichungen während der Produktumschaltung.

Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen

In einem stationären Prozesszustand (konstante Walzgeschwindigkeit, Banddicke und Bandzüge befinden sich im Toleranzfenster), sind die Geschwindigkeitsänderungen in Folge der Dickenregelung nur gering. Eine fehlerhafte Vorsteuerung der Geschwindigkeit, auf Grund der Abweichung der Voreilung, fällt somit nicht ins Gewicht. Deutliche Geschwindigkeitsänderungen, wie beim Beschleunigen und Verzögern, werden über die Kaskade hingegen direkt an alle Gerüste weitergeben. Da die Berechnung der Soll-Geschwindigkeiten in der Kaskade auf der Voreilung basiert, schlägt sich der Voreilungsfehler direkt in der Geschwindigkeit nieder. Daraus können sich Dickenfehler ergeben, die auf zwei Ursachen zurückzuführen sind:

- Die Vorsteuerung der Bandzüge mit Hilfe der Antriebe basiert auf der Geschwindigkeitskaskade. Passen die Walzgeschwindigkeiten der Gerüste auf Grund der fehlerhaften Voreilung nicht zusammen, ergeben sich unerwartete Zugschwankungen.

Diese werden mit den Anstellungen ausgeglichen und führen zu Dickenfehlern.

- Dickenschwankungen werden erst hinter dem letzten Gerüst gemessen. Auf Grund des Abstandes zwischen Gerüst C4 bzw. C5 und dem Messgerät kann der Fehler nur zeitverzögert ausgeglichen werden.

Globaler und lokaler Voreilungsfehler

Die Güte der Voreilungsberechnung ist wichtig für die Prozessstabilität. Zum einen spielt der Basiswert der Voreilung eine entscheidende Rolle, wenn die Schweißnaht durch die Straße läuft. Zum anderen muss die Änderung der Voreilung während der Beschleunigungs- und Verzögerungsphase möglichst gut vorhergesagt werden, damit die Antriebe synchron beschleunigen und so Zugschwankungen und Dickenfehler vermieden werden.

Zur Unterscheidung werden die Begriffe globaler und lokaler Voreilungsfehler definiert. Der globale Voreilungsfehler beschreibt die Abweichung des berechneten Voreilungssollwertes von der sich einstellen Voreilung bei konstanter Geschwindigkeit. Als lokaler Voreilungsfehler wird hingegen die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Wert der Voreilung während Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen beschrieben. Je geringer der globale Voreilungsfehler ist, desto geringer sind die Schwankungen der Bandzüge und der Banddicke im Bereich der Schweißnaht. Durch zusätzliche Minimierung des lokalen Voreilungsfehlers, werden Dickenfehler in Folge von Geschwindigkeitsänderungen bestmöglich verhindert.

Kapitel 5

Datenerfassung, Datenaufbereitung und Analysemöglichkeiten

5.1 Datennutzung im Wandel der Zeit

Daten gewinnen im Zuge der Industrialisierung in Produktionsprozessen immer mehr an Bedeutung, was sich anhand der jährlich, weltweit aufgezeichneten Daten erkennen lässt. So haben Wissenschaftler der Berkeley University of California in [Lyman and Varian, 2000] die erzeugte Datenmenge im Jahr 1999 berechnet. Laut der Studie wurden im letzten Jahr vor der Jahrtausendwende weltweit ca. 1.5 Exabyte (1.5 Milliarden Gigabyte) Daten generiert. Das exponentielle Wachstum der Datenmenge führt dazu, dass im Jahr 2025 einer Prognose zur Folge ca. 175 Zetabyte Daten erzeugt und gespeichert werden. Das heißt, dass in 2025 innerhalb von fünf Minuten weltweit mehr Daten generiert werden, als im gesamten Jahr 1999.

Mit der zunehmenden Datenmenge, hat sich auch der Nutzen mit der Zeit vergrößert. In Abbildung 5.1 wird die „Entwicklung des Wertbeitrages von Daten über der Zeit“ verdeutlicht [Möller et al., 2017]. Dabei legt der Autor in [Heistermann et al., 2017] den Fokus auf den direkten wirtschaftlichen Nutzen der Daten und die Entstehung neuer Geschäftsmodelle auf dessen Basis. Die in Abbildung 5.1 dargestellten Stufen lassen sich auf die Entwicklung der Datennutzung im industriell-technischen Bereich übertragen. In den 1970er Jahren wurden die ersten speicherprogrammierbaren Steuerungen entwickelt [Seitz, 2015], deren Nachfolger bis heute die Grundlage hoch-automatisierter Prozesse bilden. Durch diese Entwicklung haben sich Daten auch in der Automation als „Befähiger von technologischen Prozessen“ etabliert. Im Zuge des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 werden die Fertigungskomponenten der Produktionsprozesse heute zunehmend vernetzt. Durch die Verbindung der unternehmenseigenen Informationssysteme mit den datengenerieren-

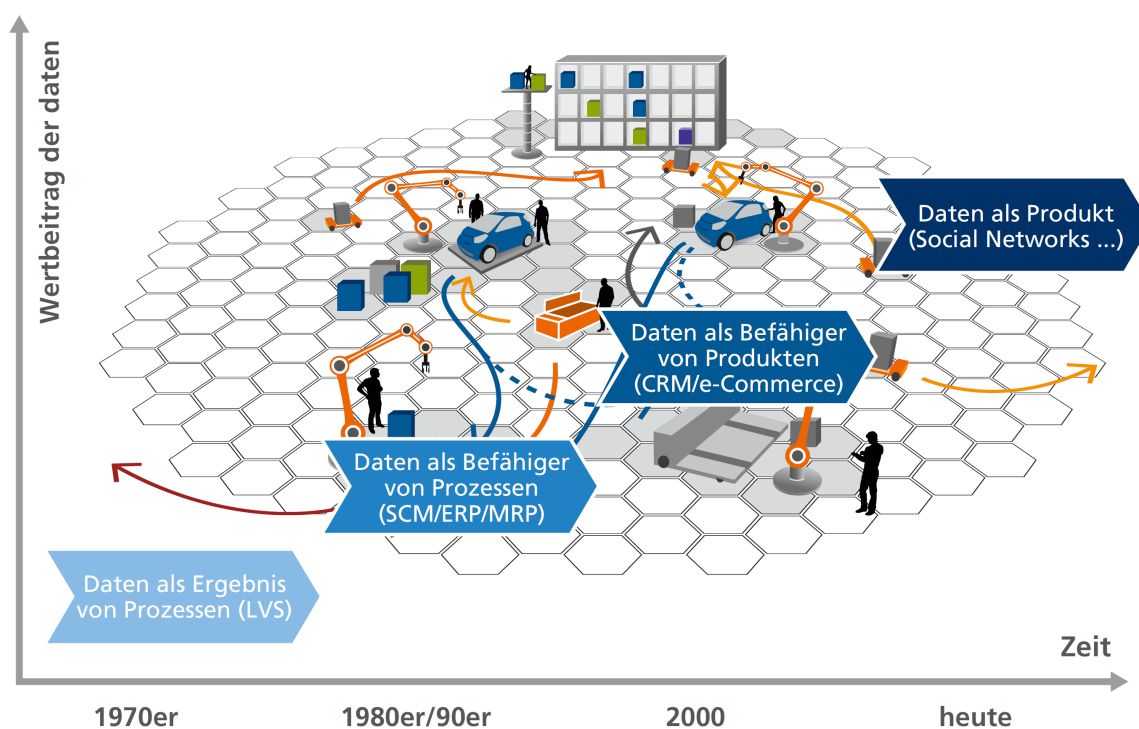


Abbildung 5.1 Die Rolle der Daten in der Digitalisierung [Heistermann et al., 2017]

den Automationsprozessen in der Fertigung, entstehen sogenannte digitale Zwillinge der Prozesse und Produkte. Sie ermöglichen den zentralen Zugriff auf alle zusammenhängenden Informationen aus Verwaltung, Produktion, Logistik etc. Die Daten werden somit zu wichtigen Bestandteilen der Produkte.

5.2 Aufzeichnung von Sensordaten in Walzanlagen

In einer modernen Tandemstraße sind tausende Sensoren und Aktoren verbaut, die Signale zur Verfügung stellen. Wie in Kapitel 4 beschrieben, werden die verschiedenen Signale in der Steuerung zu verschiedenen Zwecken genutzt. Darüber hinaus können die Informationen beispielsweise zur Prozessoptimierung oder Qualitätssicherung verwendet werden. Dazu werden die Daten aufgezeichnet und gespeichert.

Bei Walzanlagen erfolgt die Datenaufzeichnung heute häufig auf zwei verschiedene Arten, die sich im Informationsgehalt wesentlich unterscheiden. Eine detaillierte Aufzeichnung der Sensordaten erfolgt mit Hilfe eines Messsystems wie dem ibaPDA, das umfangreiche Messdateien erzeugt. Auf steuerungsebene erfolgt eine deutlich kompaktere Extraktion der wichtigsten Prozessinformationen oftmals in Form einer Textdatei.

Detaillierte Datenaufzeichnung mit ibaPDA

ibaPDA ist eine Software zur Aufzeichnung von Sensordaten aus verschiedenen Automatisierungsprozessen. Es ist Bestandteil des iba-Systems und wird von der iba AG vertrieben. Das ibaPDA wird weltweit in vielen Walzanlagen zur detaillierten Aufzeichnung von Sensordaten genutzt. Das Ergebnis einer Aufzeichnung sind .dat Messdateien, die mit Hilfe der Software ibaAnalyzer¹ geladen und analysiert werden können. Je nach Komplexität der technischen Prozesse und Anlagen zeichnet die PC-basierte Software tausende Signale mit Zeitbasen zwischen einer und 1000 Millisekunden auf. Durch diese große Menge von Signalen und die hohe Frequenz der Datenpunkte erreichen die Messdateien schon bei geringer Aufzeichnungsdauer schnell eine Größe von mehreren 100 Megabyte. So können in einer modernen Tandemstraße (bei einer Zeitbasis von einer Millisekunde) an einem Tag Messdateien mit einer Gesamtgröße von über 100 Gigabyte entstehen. Zur Analyse technologischer Auffälligkeiten ist die hohe Aufzeichnungsfrequenz oftmals nötig und die entstehenden Datenmengen dadurch gerechtfertigt.

Kompakte Datenspeicherung in einer Textdatei

In vielen Fällen, werden in nachgelagerten Prozessen nur die wesentlichsten Informationen zu einem Stich benötigt. Deshalb werden die wichtigsten technologischen Prozessgrößen zu einem Stich zusätzlich textbasiert (oftmals als .csv Datei) abgespeichert. Mit Hilfe von Triggern werden beim Eintreten definierter Systemzustände auf steuerungsebene zum Beispiel Mittelwerte, Minima und Maxima über einen bestimmten Bereich (örtlich oder zeitlich) ermittelt. Die Informationen zu einem Stich werden als Datensatz in Form einer Zeile in die Textdatei geschrieben. Im Gegensatz zur detaillierten Datenaufzeichnung mit Hilfe des ibaPDA bietet die textbasierte Speicherung der wichtigsten Prozessgrößen eine kompakte Grundlage für statistische Langzeitauswertungen.

5.3 Nutzen von Prozessdaten in Walzwerken

Die Verwendung der Informationen aus Sensoren und Aktoren ist vielfältig. Wie in Kapitel 4 erläutert, werden die Sensoren und ihre Signale zur Steuerung und Regelung der Anlage verwendet. Darüber hinaus werden die Daten wie beschrieben aufgezeichnet, wodurch sich weitere Anwendungsfelder ergeben:

¹Der ibaAnalyzer ist ein eigenständiges Software Tool, dass zur Analyse von Messdateien genutzt werden kann

- Manuelle Prozessüberwachung (z.B. durch Visualisierung der relevanten Prozessgrößen)
- Analyse der Messdateien bei Qualitätsmängeln zur Ursachenfindung
- Datenbasierte Anlagenoptimierung
- Statistische Auswertungen

Mit dem Zukunftsprojekt Industrie 4.0, rücken darüber hinaus Themen wie „Predictive Maintenance“, „Machine Learning“ und „Digital Twin“ in den Vordergrund, die auf der Grundlage bestehender Datensätze basieren. Konkret ergeben sich mit Hilfe der Daten aus einer Walzanlage in diesem Zusammenhang weitere Möglichkeiten:

- Die Datenaufzeichnung kann genutzt werden, um das Optimierungspotential der Anlage zu erkennen. „Gefundene Optimierungsmöglichkeiten können dann entweder angezeigt und verbessert werden, oder autonom durch Systeme wie 'Machine Learning' direkt implementiert werden“ [Rabe, 2020]
- Die Daten können genutzt werden, um Auffälligkeiten bei vorangegangenen Ausfällen der Anlage zu erkennen und mit den Echtzeitdaten zu vergleichen. Durch die Überwachung instandhaltungsrelevanter Größen und ihres Zusammenspiels können so Rückschlüsse auf mögliche Ausfälle gezogen und frühzeitig Wartungsempfehlungen ausgegeben werden.

5.4 Umfang der zur Verfügung stehenden Daten

In dieser Arbeit werden sowohl detaillierte Messdateien, wie auch Textdateien mit komprimierten Informationen zur Analyse genutzt. Die csv basierten Textdateien werden im ersten Schritt verwendet, um einen Überblick über die Zusammenhänge der Anlage zu erlangen. Wie beschrieben handelt es sich bei den gespeicherten Datensätzen um Mittelwerte, Minima und Maxima, sodass die Dateigrößen gering und Langzeitauswertungen möglich sind. In diesem Fall stehen die Daten zu einem Zeitraum von 15 Monaten und ca. 40.000 Coils zur Verfügung. Auf Grund der Dateigröße der Messdateien finden die detaillierten Untersuchungen hingegen nur auf einer Datenbasis von 6 Tagen statt, in denen ca. 1000 Coils an der Anlage gewalzt wurden.

Bei Untersuchungen und Analysen während dieser Arbeit haben sich Aufgabenstellungen ergeben, für die bestimmte Versuche und die resultierenden Daten sinnvoll sind. Deshalb wurden mehrere Versuche an einer Tandemstraße durchgeführt, bei denen verschiedene Prozessparameter variiert wurden. Über die bereits genannten Daten hinaus, stehen daher die Messdateien zu diesen Versuchen ebenfalls zur Verfügung.

5.5 Aufbereitung der Daten

Zur Validierung der textbasierten Daten werden die Attribute und ihre Attributwerte mit verschiedenen Ansätzen auf ihre Plausibilität geprüft. Dazu werden zunächst die relevanten Attribute extrahiert. Im zweiten Schritt werden alle Datensätze entfernt, in denen bei wichtigen Attributen der Attributwert fehlt. Daraufhin wird für alle Attribute der technologisch sinnvolle Wertebereich ermittelt. Alle Datensätze, dessen Attributwerte außerhalb dieses Bereichs liegen werden als fehlerhaft eingestuft und entfernt. Darüber hinaus gibt es logische Voraussetzungen, die innerhalb eines Datensatzes erfüllt sein müssen. So muss die Banddicke in jedem Stich geringer werden (oder gleich bleiben) und die Bandgeschwindigkeit wegen der Volumenkonstanz (siehe Abschnitt 3.3) in jedem Stich zunehmen. Bedingungen wie diese werden ebenfalls geprüft und offensichtlich fehlerhafte Datensätze entfernt.

Vor der Überprüfung der Messdateien werden diese vorverarbeitet. Im ersten Schritt werden die Dateien mit Hilfe des ibaExtraktors² komprimiert, indem nur die benötigten Signale und diese in einer geringeren Auflösung (100ms statt 1ms) extrahiert werden. Die Größe der Messdateien reduziert sich dadurch um über 99%. Zur Automatisierung dieses Prozesses wird der ibaDatCoordinator³ verwendet. Danach werden die komprimierten Daten zunächst mit Hilfe des ibaExtraktors zusammengefasst, sodass in der Folge zu jedem Tag eine komprimierte Messdatei mit den benötigten Daten zur Verfügung steht. Im letzten Schritt werden diese mit Hilfe des ibaDatCoordinators coilweise geteilt. Nach der Vorverarbeitung liegt somit für jedes gewalzte Coil eine Messdatei mit den relevanten Signalen und einer Zeitbasis von 100ms vor.

Die Überprüfung dieser Daten erfolgt dann analog zu den textbasierten Daten. Jedes in den Analysen genutzte Messsignal wird hinterfragt und auf seine Plausibilität hin geprüft. So können beispielsweise die Lasersensoren, die zur Aufzeichnung der Bandgeschwindigkeiten genutzt werden, anhand der Daten überprüft werden. Dazu wird der Anfahrvorgang nach einem Walzenwechsel genutzt, da in diesem Fall alle Gerüste geöffnet sind, keine Reduktion stattfindet und die Bandgeschwindigkeit hinter dem letzten Gerüst deshalb der Bandgeschwindigkeit hinter dem ersten Gerüst entsprechen muss.

Die detaillierte Analyse der iba Messdateien erfolgt in dieser Arbeit mit dem ibaAnalyzer. Das Tool bietet vielfältige Möglichkeiten, die Signale zu kombinieren, statistisch auszuwerten und grafisch darzustellen. Neben der Komprimierung der Messdateien, ermöglicht der

²Der ibaExtraktor ist eine Softwarekomponente, die in Verbindung mit dem ibaAnalyzer genutzt werden kann. Sie ermöglicht die Bearbeitung von Messdateien

³Der ibaDatCoordinator ist ein eigenständiges Software Tool zur automatischen Verarbeitung von Messdaten

ibaExtraktor auch die Extraktion von Daten in Form einer Textdatei. Die Funktion wird in dieser Arbeit genutzt, um die im Detail untersuchten Größen einer Analyse kompakt zu extrahieren. Mit Hilfe des ibaDatCoordinators kann diese Aufgabe automatisch auf viele Messdateien angewendet werden. Durch die Kombination aus detaillierter Analyse von einzelnen Messdateien, die Extraktion der wichtigen Informationen in eine Textdatei und die Automatisierung dieses Prozesses, können anwendungsspezifische Untersuchungen auf einer großen Menge von Messdaten durchgeführt und statistisch ausgewertet werden.

Kapitel 6

Einfluss verschiedener Größen auf die Voreilung

6.1 Theoretische Zusammenhänge

In Abschnitt 3.9 wird die Voreilung als Maß für den relativen Unterschied zwischen Walzgeschwindigkeit und Bandauslaufgeschwindigkeit in einem Walzgerüst definiert. Darüber hinaus wird der Zusammenhang zwischen Voreilung und Fließscheidenlage beschrieben und in Abschnitt 3.8 bereits der Einfluss des ein- und auslaufseitigen Bandzuges erläutert. Über die Bandzüge hinaus gibt es weitere technologische Größen, die die Lage der Fließscheide und damit die Voreilung beeinflussen können.

Tabelle 6.1 Liste der Prozessparameter und Arbeitspunkt [Pawelski, 2017]

Prozessparameter	Arbeitspunkt
Banddickenreduktion	30 %
Banddicke Einlauf	2 mm
Arbeitswalzendurchmesser	400 mm
Fließspannung	500 MPa
Spezifischer Bandzug Einlauf	50 MPa
Spezifischer Bandzug Auslauf	60 MPa
Reibungszahl	0.1

In [Pawelski, 2017] wird der Einfluss verschiedener Größen auf die Voreilung untersucht. Dazu definiert der Autor einen Arbeitspunkt (siehe Tabelle 6.1), in dem die Fließspannung als konstant angenommen wird. Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, steigt die Fließgrenze

mit zunehmendem Umformgrad an. Bei einer Reduktion von 30% kann sich die Fließgrenze mehr als verdoppeln (siehe Abbildung 3.3). In diesem Fall wird die Verfestigung innerhalb des Walzspaltes nicht berücksichtigt, was bei der Übertragung der sich ergebenden Zusammenhänge auf die Realität beachtet werden muss.

Die Berechnung der Voreilung im Arbeitspunkt erfolgt unter Verwendung des in Abschnitt 3.8 beschriebenen Streifenmodells. Dazu wird die Position der Fließscheide bestimmt und die Voreilung nach Gleichung (3.47) abgeleitet. Zur Untersuchung des Einflusses der einzelnen Größen auf die Voreilung, wird jeder Parameter einzeln variiert, während die übrigen konstant sind. Durch die grafische Darstellung der Punkte, die sich durch Variation eines Parameters ergeben, wird die Abhängigkeit der Voreilung von dieser Größe deutlich.

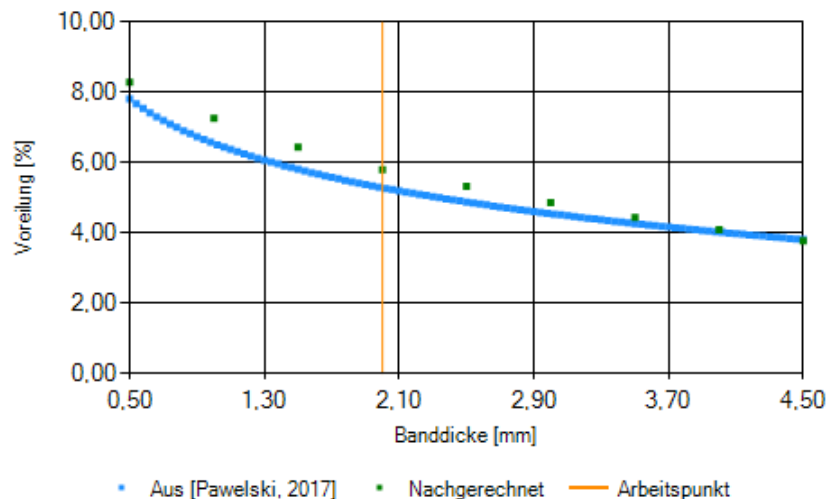


Abbildung 6.1 Einfluss der Einlaufbanddicke auf die Voreilung nach dem Streifenmodell

In Abbildung 6.1 ist exemplarisch die Abhängigkeit der Voreilung von der Einlaufbanddicke für den Arbeitspunkt zu sehen. In blau ist der Zusammenhang abgebildet, den der Autor in [Pawelski, 2017] ermittelt hat. Die grün markierten Datenpunkte wurden mit Hilfe eines Stichplanberechnungsprogramms anhand des Streifenmodells ermittelt, in dem die Abplattung nach Hitchcock (siehe Abschnitt 3.7) integriert ist.

Es ist zu erkennen, dass die Verläufe sehr ähnlich, aber nicht identisch sind. Die geringen Abweichungen sind mit einer Vereinfachung zu erklären, die in der Literatur gemacht wird. Wie in Abschnitt 3.7 beschrieben, geht mit der Walzenabplattung eine Vergrößerung der gerückten Länge einher. Der zum abgeplatteten Radius gehörende Walzendrehpunkt verschiebt sich Richtung Auslauf. Diese Verschiebung vernachlässigt der Autor in [Pawelski, 2017], womit ein gewisser Fehler einhergeht, der mit zunehmender Abplattung steigt. Da die Abplattung bei sinkender Banddicke zunimmt, passen die Abweichungen in Abbil-

dung 6.1 zu dieser Vereinfachung. In [Pawelski, 2017] wird die Berechnung nicht im Detail beschrieben, sodass weitere Fehlerursachen nicht ausgeschlossen werden können.

Im Anhang A ist die Abhängigkeit der Voreilung von allen Größen aus Tabelle 6.1 analog zu Abbildung 6.1 abgebildet. Der Autor fasst die allgemeinen Abhängigkeiten darüber hinaus tabellarisch zusammen (siehe Tabelle 6.2). Die Erhöhung der Einflussgröße kann zu einem Anstieg (+), zu einem Abfall (-) oder zu keiner Änderung (o) der Voreilung führen. Für manche Größen ist der Einfluss vom Arbeitspunkt selbst abhängig und somit nicht eindeutig. Die Abhängigkeit der Voreilung von der Reduktion ändert sich beispielsweise mit der Reibung.

Tabelle 6.2 Übersicht Tendenzen [Pawelski, 2017]

Erhöhung	Voreilung
Banddickenreduktion	+(-)
Banddicke Einlauf	-
Arbeitswalzendurchmesser	+
Fließspannung	o(+)
Spezifischer Bandzug Einlauf	-
Spezifischer Bandzug Auslauf	+
Reibungszahl	++

6.2 Bestätigung der Zusammenhänge auf Datenbasis

Die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Abhängigkeiten basieren auf dem Streifenmodell und sind somit rechnerische Ergebnisse. Es wird nun geprüft, inwieweit diese theoretischen Zusammenhänge auch in der Praxis gelten. Dazu werden die in Abschnitt 5.2 angeführten textbasierten Sensordaten verwendet. Zur Berechnung der Voreilung wird nach Gleichung (3.44) die Auslaufgeschwindigkeit benötigt, die jedoch nur hinter den Gerüsten C1 und C5 gemessen wird. In C5 ist die Reduktion nicht bekannt, weil sich kein Dickenmessgerät vor dem Gerüst befindet. Somit stehen nur im ersten Gerüst die benötigten Informationen zur Verfügung, um die Untersuchungen anhand der Daten durchzuführen.

Die Analyse der Walzdaten hinsichtlich der Voreilung erfolgt in Anlehnung an die Parameterstudie in [Pawelski, 2017]. Durch Variation immer einer Größe soll der Einfluss auch auf Datenbasis untersucht und grafisch dargestellt werden. Über die sechs Parameter (Banddickenreduktion, Einlaufbanddicke, Fließspannung, Reibwert, spezifischer Einlauf-

bandzug, spezifischer Auslaufbandzug) hinaus, wird zusätzlich der Einfluss der auslaufseitigen Bandgeschwindigkeit auf die Voreilung genauer untersucht.

Definition des Arbeitsbereichs

Zunächst wird mit Hilfe der Parameter ein Arbeitsbereich, in Analogie zum Arbeitspunkt, definiert. Für jedes Attribut wird ein Intervall festgelegt, das für diese Größe den Arbeitsbereich definiert. Nur die Datensätze, in denen alle Attributwerte der Parameter innerhalb der Intervalle liegen, gehören zum Arbeitsbereich. Dabei ergibt sich ein Zielkonflikt. Die Intervalle der einzelnen Parameter dürfen einerseits nicht zu groß sein, damit die damit einhergehende Streuung das Ergebnis nicht zu sehr beeinflusst. Andererseits darf der Arbeitsbereich nicht zu sehr eingeschränkt werden, da die Anzahl der Datenpunkte sonst zu gering ist, um die Zusammenhänge zu erkennen.

Für die Einlaufbanddicke, die Reduktion und die Auslaufbandgeschwindigkeit liegen die Messdaten direkt vor. Für jede der drei Größen wird ein Intervall definiert, das Teil des Arbeitsbereichs ist. Auch die Bandzüge werden gemessen und stehen als Attribut in den Daten zur Verfügung. Die Schwankungen der Bandzüge in der untersuchten Anlage liegen im Bereich von nur ca. 50 N/mm^2 . Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einfluss der Bandzüge in diesem Stichplan sowohl rechnerisch, wie auch in den Daten, dadurch gering ist. Deshalb wird für die Bandzüge kein Intervall definiert das den Arbeitsbereich einschränkt. Hinzu kommt, dass der Bandzug von der Fließspannung und der Geschwindigkeit abhängt und den Arbeitsbereich dadurch nicht weiter einschränkt.

Die Fließgrenze und der Reibwert können im Gegensatz zu den anderen Parametern nicht messtechnisch erfasst werden. Die Fließspannung ist in den Daten aber als Setz-Wert vorhanden, sodass sie trotzdem zur Definition des Arbeitsbereichs genutzt werden kann. Die Reibung wird hingegen über eine Ersatzgröße berücksichtigt. Es ist bekannt, dass die Reibung mit zunehmender Lebensdauer einer Walze abnimmt, weil die Oberfläche glatter wird. Deshalb dient die Laufleistung der Arbeitswalzen als Referenzgröße für die Reibung und wird zur Definition eines Intervalls genutzt.

Der Arbeitswalzendurchmesser ist an einer Anlage immer nahezu konstant. Somit muss kein Intervall für diese Größe festgelegt werden. Gleichzeitig ist dadurch aber keine Untersuchung hinsichtlich der Abhängigkeit der Voreilung vom Durchmesser der Arbeitswalze möglich.

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte wird so ein Arbeitsbereich definiert, der der Tabelle 6.3 entnommen werden kann.

Tabelle 6.3 Definierter Arbeitsbereich

Prozessparameter	Arbeitsbereich min	Arbeitsbereich max
Banddickenreduktion	31 %	34 %
Banddicke Einlauf	2,5 mm	2,8 mm
Fließspannung	315 N/mm ²	315 N/mm ²
Arbeitswalzenlaufleistung	50 km	100 km
Auslaufbandgeschwindigkeit	4 m/s	4.5 m/s

Definition des Arbeitspunktes

Für den Arbeitsbereich, wird ein dazu passender Arbeitspunkt definiert, der als Vergleich dient:

Tabelle 6.4 Definierter Arbeitspunkt

Prozessparameter	Arbeitspunkt
Banddickenreduktion	32.5 %
Banddicke Einlauf	2.7 mm
Arbeitswalzendurchmesser	500 mm
Fließspannung	
Spezifischer Bandzug Einlauf	70 MPa
Spezifischer Bandzug Auslauf	140 MPa
Reibungszahl	

Um die realen Verhältnisse im Walzspalt möglichst gut nachzubilden, müssen die Verfestigungskurve und die Reibungsverhältnisse bestmöglich beschrieben werden. Dazu werden für den gewählten Arbeitsbereich Histogramme über die Voreilungen, die Walzkräfte und die Walzmomente aus den Daten erzeugt. Alle drei Größen ergeben sich maßgeblich durch die Reibungsverhältnisse und den Materialwiderstand. Durch manuelle, wiederholte Adaption der Verfestigungskurve und des Reibwertes werden die beiden Größen solange angepasst, bis die mit dem Walzmodell berechneten Ergebnisse für Voreilung, Walzkraft und Walzmoment bestmöglich zu den Ist-Daten passen.

Um die Walzkraft und das Walzmoment als Validierungsgröße nutzen zu können, wird zusätzlich die Bandbreite eingeschränkt (zwischen 1224 mm und 1237 mm), da sie direkten Einfluss auf die beiden Größen hat. Anhand von 142 verbleibenden Datensätzen wird

die Verfestigungskurve für den Reduktionsbereich zwischen 0% und 40% ermittelt (siehe Abbildung 6.2).

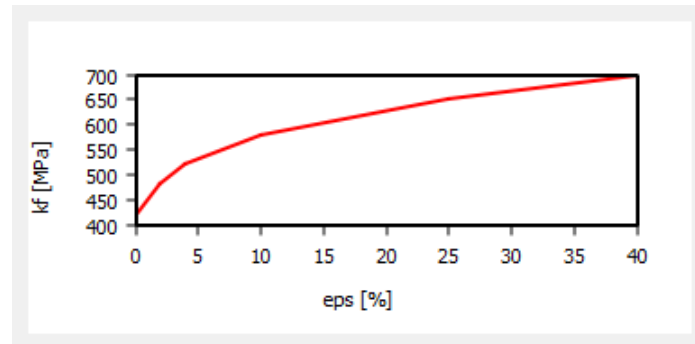


Abbildung 6.2 Fließkurve für die theoretischen Berechnungen

Für die abgebildete Verfestigungskurve werden mit Hilfe des Stichplanberechnungsprogramms die Voreilung, die Walzkraft und das Walzmoment (pro Arbeitswalze) berechnet. Dabei werden jeweils drei Rechnungen für die Reibwerte $\mu=0.03$, $\mu=0.04$ und $\mu=0.05$ durchgeführt, weil anhand der Ergebnisse alle drei Größen realistisch scheinen.

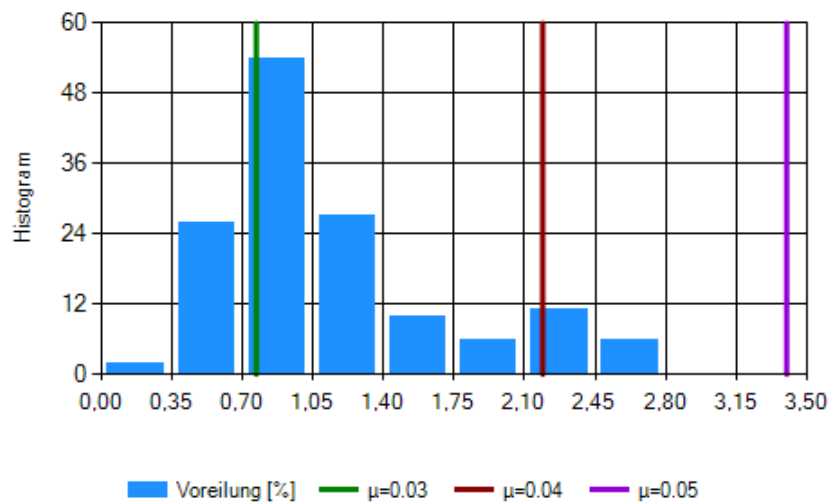


Abbildung 6.3 Histogramm über die Voreilung mit Markierungen der Berechnungswerte für verschiedene Reibwerte

Sowohl das Histogramm über der Voreilung (siehe Abbildung 6.3), wie auch das über das Walzmoment (siehe Abbildung 6.5), lassen den Schluss zu, dass der Reibwert im Bereich von $\mu=0.03$ liegt. Bezüglich der Walzkraft (siehe Abbildung 6.4) ist ein Reibwert im Bereich von $\mu=0.05$ realistischer.

Eine weitere Anpassung der Verfestigungskurve, zur Verbesserung der Ergebnisse ist an

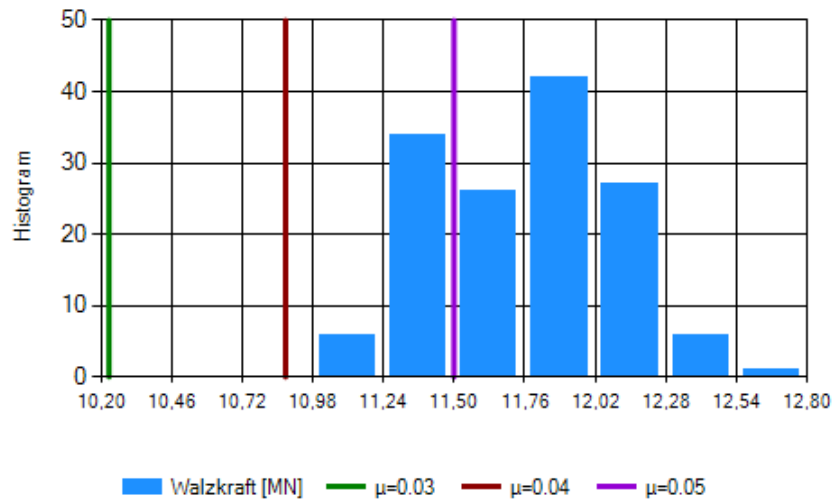


Abbildung 6.4 Histogramm über die Walzkraft mit Markierungen der Berechnungswerte für verschiedene Reibwerte

dieser Stelle nicht mehr zielführend. Walzkraft und Walzmoment hängen in ähnlicher Weise vom Materialwiderstand ab, sodass eine Verbesserung der Walzkraftberechnung mit einer schlechteren Walzmomentberechnung einher ginge. Die Abweichungen von den tatsächlichen Daten lassen sich durch das Modell erklären. Die in Abschnitt 3.8 beschriebenen Ansätze nach Bland und Ford basieren auf Annahmen, wodurch gewisse Abweichungen zwischen Theorie und Praxis entstehen.

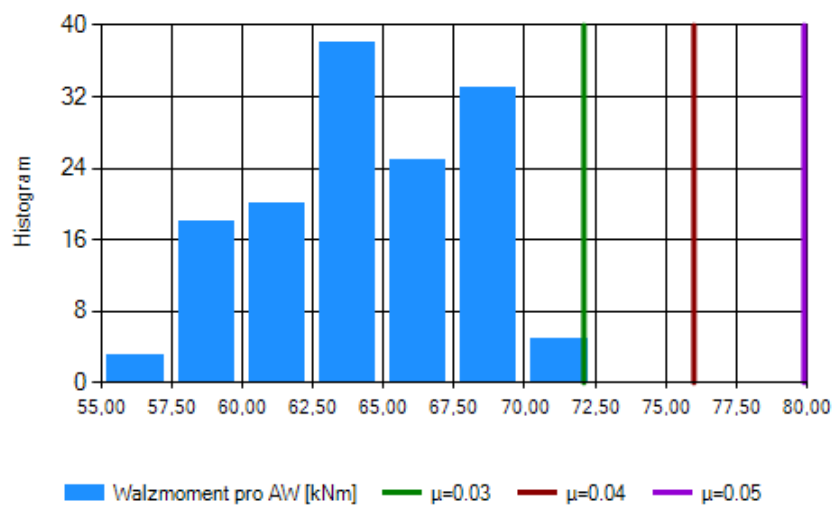


Abbildung 6.5 Histogramm über das Walzmoment pro Arbeitswalze mit Markierungen der Berechnungswerte für verschiedene Reibwerte

Da eine exakte Bestimmung des Reibwertes nicht möglich ist, werden alle folgenden Auswertungen immer anhand der drei Reibwerte $\mu=0.03$, $\mu=0.04$ und $\mu=0.05$ durchgeführt.

Nach der Definition von Arbeitsbereich und Arbeitspunkt, werden die Einflüsse der verschiedenen Größen auf die Voreilung in Analogie zur beschriebenen Vorgehensweise in Abschnitt 6.1 ermittelt. Durch Variation von immer genau einem Parameter wird der Einfluss dieser Größe auf die Voreilung sowohl in der Theorie, wie auch anhand der Sensordaten untersucht, sodass ein Vergleich möglich ist.

Einfluss der Reibung (Arbeitswalzenlaufleistung) auf die Voreilung

Die Arbeitswalzenlaufleistung wird zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Voreilung und der Reibung verwendet, weil der Reibwert selber nicht messbar ist. Es ist bekannt, dass die Oberfläche der Walzen mit der Zeit glatter wird und die Reibung im Walzspalt dadurch abnimmt. In Abbildung 6.6 ist zu erkennen, dass auch die Voreilung mit zunehmender Laufleistung der Arbeitswalzen sinkt. Ab einer Laufleistung von ca. 50 km nimmt die Voreilung nur noch geringfügig ab, wodurch der gewählte Arbeitsbereich begründet ist.

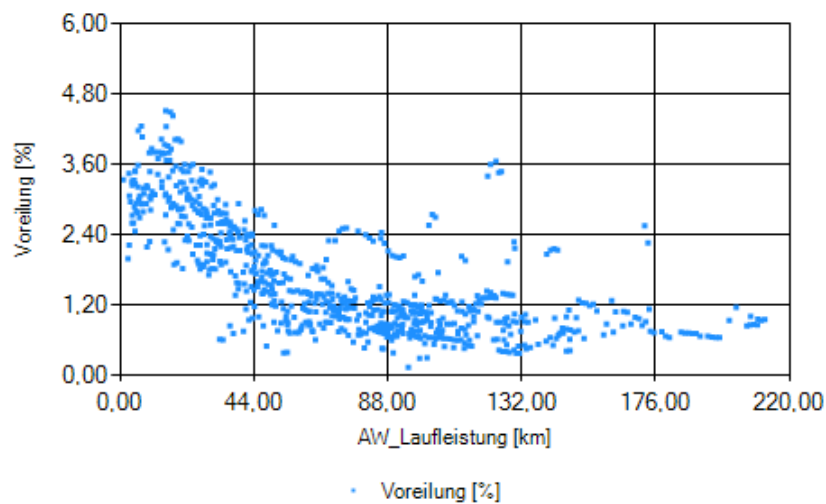


Abbildung 6.6 Einfluss der Arbeitswalzenlaufleistung auf die Voreilung

In die Berechnung mit Hilfe des Streifenmodells fließt die Reibung direkt als Reibwert ein. In Abbildung 6.7 sind die sich aus der Theorie von Bland und Ford ergebenden Voreilungen für verschiedene Reibwerte abgebildet. Der Verlauf der Kurven passt zu den Erkenntnissen aus den Daten. Ein abnehmender Reibwert bzw. eine zunehmende Laufleistung der Arbeitswalzen geht mit einer verringerten Voreilung einher.

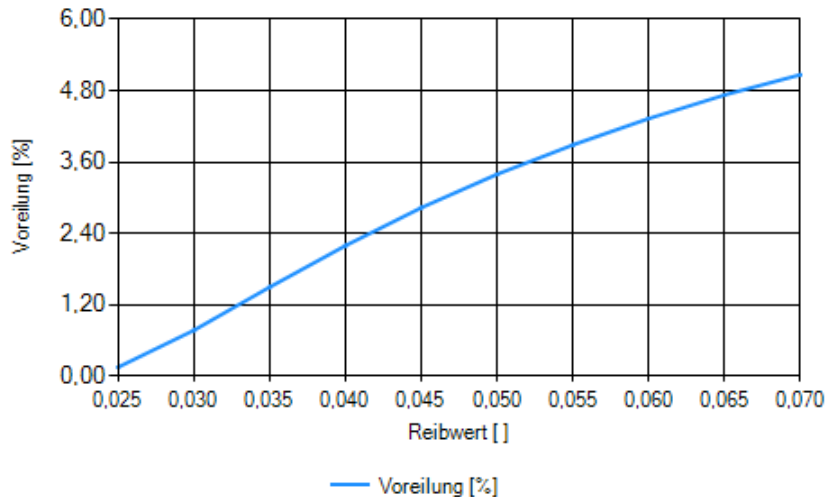


Abbildung 6.7 Einfluss der Reibung auf die Voreilung nach dem Streifenmodell

Darüber hinaus ist in Abbildung 6.6 eine weitere Auffälligkeit zu erkennen. Im Bereich von 0 km bis ca. 10 km Laufleistung weicht die Kurve leicht vom beschriebenen Verlauf ab. In diesem Bereich scheint eine zunehmende Laufleistung mit einer zunehmenden Voreilung einherzugehen. Auf Grund dieser Beobachtung ergibt sich die These, dass die Voreilung ebenfalls von der Temperatur abhängt. Beim Einbau einer neuen Walze (Arbeitswalzenlaufleistung = 0 km) sind die Walzen im Gegensatz zu regulären Betrieb kalt. Analog zur Laufleistung hat auch die Temperatur Einfluss auf die Reibung im Walzspalt und somit auf die Voreilung. Eine genauere Untersuchung dieses Einflusses ist wegen fehlender Informationen zur Temperatur nicht möglich. Die Temperatur wird an der Anlage nicht gemessen.

Einfluss der Banddickenreduktion auf die Voreilung

In der durchgeführten Parameterstudie in [Pawelski, 2017] steigt die Voreilung mit zunehmender Reduktion an. In der allgemeinen Zusammenfassung der Abhängigkeiten weißt der Autor allerdings darauf hin, dass diese Abhängigkeit vom Arbeitspunkt selbst abhängig ist und sich umkehren kann (siehe Tabelle 6.2). Diesen Effekt kann man anhand der Kurvenscharen mit variablem Reibwert in Abbildung 6.8 (unten) grafisch erkennen. Die Steigungen der Kurven verändern sich mit dem Reibwert. Für geringe Reibwerte nimmt die Voreilung also mit zunehmender Reduktion ab.

Im Reduktionsbereich von ca. 20 bis 35% ist die Abhängigkeit der Voreilung von der Reduktion in der Theorie allerdings relativ gering (siehe Abbildung 6.8). Der linear abfallende

Verlauf ist daher auch in den Daten kaum erkennbar. Auf Grund des Voreilungsniveaus liegt der zum Streifenmodell und den Daten passende Reibwert zwischen $\mu=0.03$ und $\mu=0.04$.

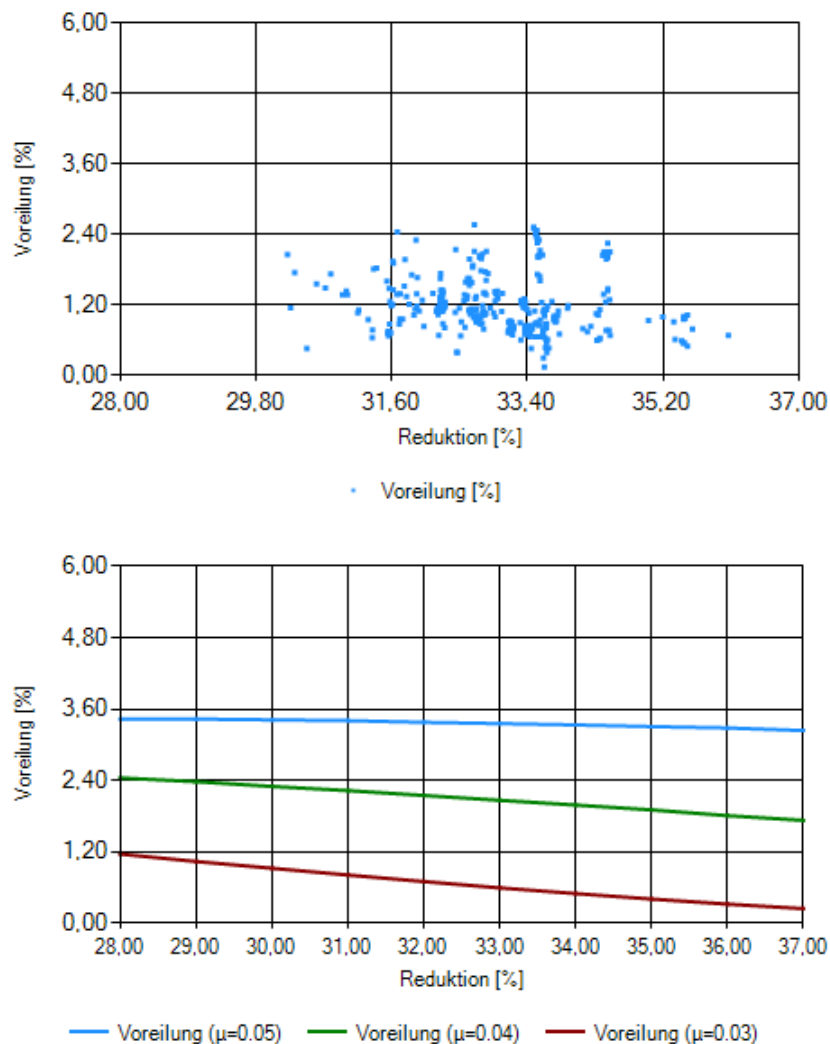


Abbildung 6.8 Einfluss der Banddickenreduktion auf die Voreilung (oben: Auf Datenbasis, unten: Nach der Streifentheorie)

Einfluss der Einlaufbanddicke auf die Voreilung

Der Einfluss der Einlaufbanddicke auf Basis des Datensatzes und der Modellberechnung ist in Abbildung 6.9 zu sehen. Mit zunehmender Einlaufbanddicke sinkt die Voreilung. Auch in diesem Fall beschreibt das Streifenmodell die Daten mit einem Reibwert zwischen $\mu=0.03$ und $\mu=0.04$ am besten.

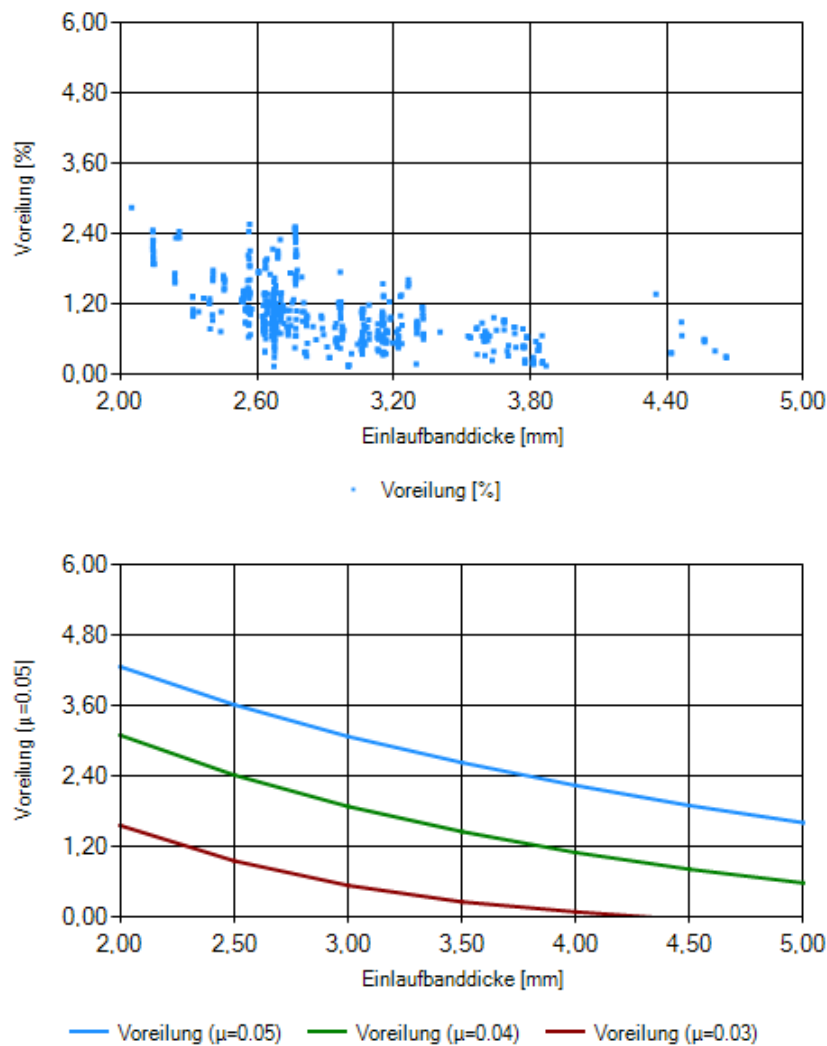


Abbildung 6.9 Einfluss der Einlaufbanddicke auf die Voreilung (oben: Auf Datenbasis, unten: Nach der Streifentheorie)

Einfluss der Bandzüge auf die Voreilung

Wie bereits beschrieben ist die Untersuchung des Einflusses der Bandzüge auf die Voreilung anhand der Daten schwierig. Die Sollwerte der Bandzüge sind Funktionen der Fließspannung und der Bandgeschwindigkeit und somit bereits durch die Intervalle dieser Größen berücksichtigt. Im gesamten Datensatz erstrecken sich die Bandzüge nur über einen Bereich von ca. 50 N/mm^2 . Im definierten Arbeitsbereich schwanken die Bandzüge sogar nur um ca. 10 N/mm^2 , sodass auf der Datenbasis keine Abhängigkeit erkennbar ist.

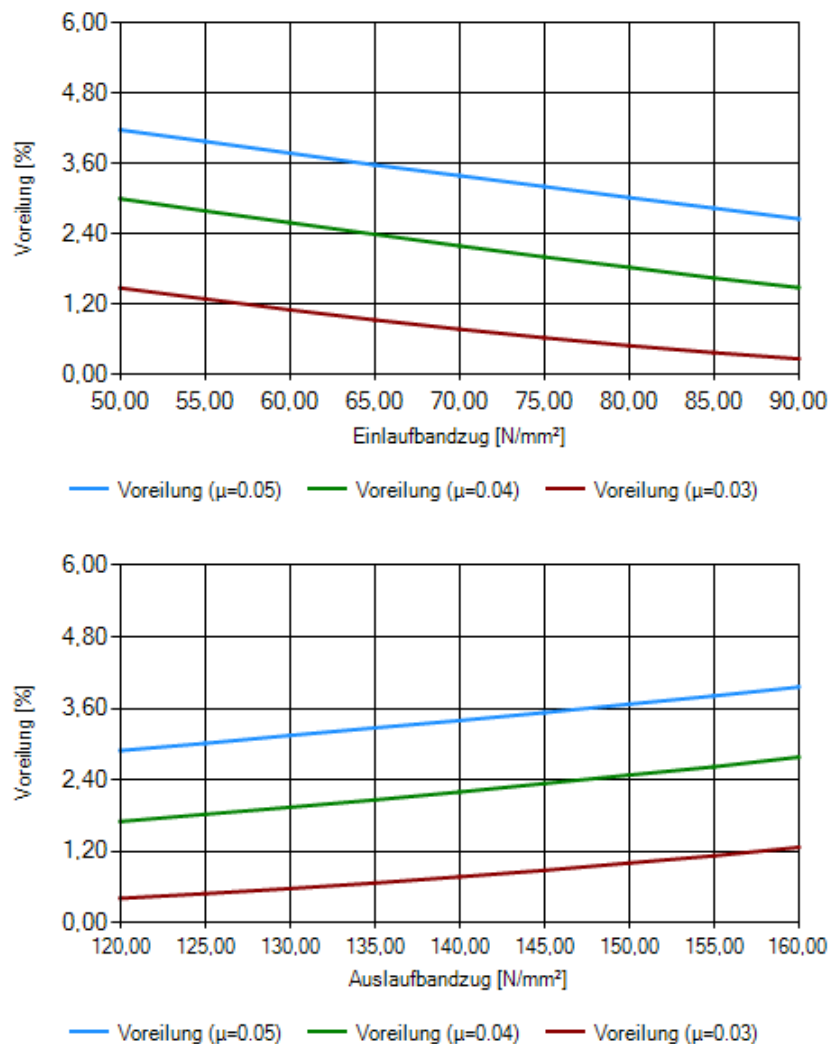


Abbildung 6.10 Einfluss des einlaufseitigen (oben) und auslaufseitigen (unten) spezifischen Bandzuges auf die Voreilung nach dem Streifenmodell

Die Abhängigkeiten, die sich aus den Berechnungen mit dem Streifenmodell ergeben, sind in Abbildung 6.10 zu sehen.

Einfluss der Fließgrenze auf die Voreilung

Die Fließgrenze kann im Prozess nicht gemessen werden und liegt in den Daten nur als Basiswert in Abhängigkeit der Materialgüte vor. Durch den geringen Produktmix ergeben sich so nur wenige verschiedene Fließgrenzen in den Daten. Darüber hinaus liegt die zu den Walzkraften und Walzmomenten passende Fließkurve deutlich oberhalb der Basiswerte aus den Daten. Durch diese Einschränkungen ist eine Untersuchung der Abhängigkeit der Voreilung von der Fließgrenze auf Datenbasis nicht möglich. Die theoretischen Zu-

sammenhänge sind in Abbildung 6.11 zu sehen.

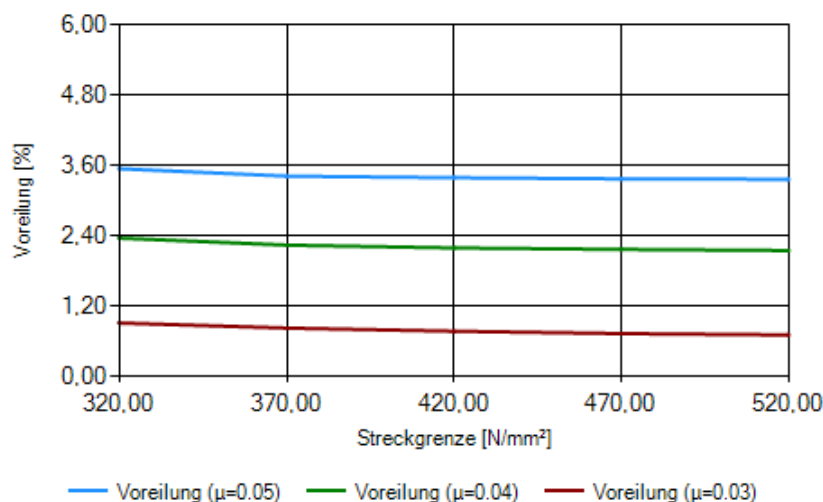


Abbildung 6.11 Einfluss der Fließgrenze auf die Voreilung nach dem Streifenmodell

6.3 Einfluss der Geschwindigkeit auf die Voreilung

Die Voreilung beschreibt den relativen Geschwindigkeitsunterschied zwischen der Walz- und der Bandauslaufgeschwindigkeit (siehe Gleichung (3.44)). Wie in Abschnitt 3.9 bereits beschrieben, kann die Berechnung auf Grund der Volumenkonstanz aber auch geometrisch über die Auslaufbanddicke, den Walzenradius und die Fließscheidenlage erfolgen. Im Streifenmodell wird die Fließscheidenlage über den Walzdruck berechnet (siehe Abschnitt 3.8), sodass für diesen zweiten Ansatz alle Größen vorhanden sind. Die Auslaufbandgeschwindigkeit ergibt sich dann durch Umstellen von Gleichung (3.44) als Ergebnis der Voreilung. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeit in der Streifentheorie keinen direkten Einfluss auf die Voreilung hat.

In den Abschnitten 3.5 und 3.6 sind die Abhängigkeit der Fließgrenze und der Reibung von der Geschwindigkeit beschrieben. Bezüglich der Fließgrenze wird der Einfluss in der Literatur allerdings als gering eingeschätzt. Hinzu kommt, dass der Einfluss der Fließgrenze auf die Voreilung, wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, ohnehin gering ist. Die Abhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit ist dagegen größer. Hinzu kommt, dass die Reibung die Voreilung maßgeblich beeinflusst. Über diesen Zusammenhang beeinflusst die Geschwindigkeit also auch die Voreilung indirekt. Durch die Beschreibung der Reibung als Funktion der Geschwindigkeit, kann der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Voreilung auch in den theoretischen Berechnungen berücksichtigt werden.

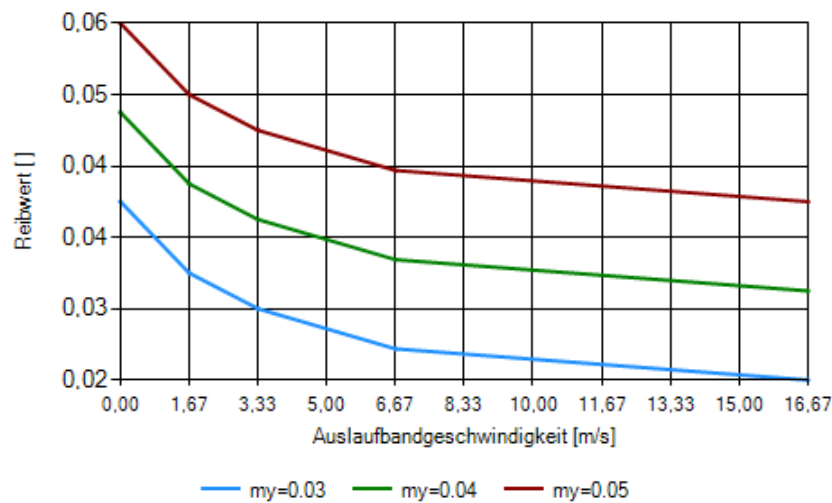


Abbildung 6.12 Reibwertkurven, die die Abhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit beschreiben

In Analogie zu den bisherigen Untersuchungen werden für die drei grundlegenden Reibwerte $\mu=0.03$, $\mu=0.04$ und $\mu=0.05$ deshalb Reibwertkurven definiert, die in Abbildung 6.12 zu sehen sind.

Es konnte bereits gezeigt werden, dass die Voreilung um so kleiner ist, je geringer der Reibwert ist. Nimmt die Reibung mit zunehmender Geschwindigkeit ab (wie durch die Reibwertkurven beschrieben), muss also auch die Voreilung mit zunehmender Geschwindigkeit geringer werden. In Abbildung 6.13 wird dieser Zusammenhang sowohl auf Datenbasis, wie auch in der Theorie grafisch verdeutlicht. Ähnlich wie in Abschnitt 6.2, kann durch den Vergleich zwischen Daten und Theorie auf einen Basisreibwert zwischen $\mu = 0.03$ und $\mu = 0.04$ geschlossen werden.

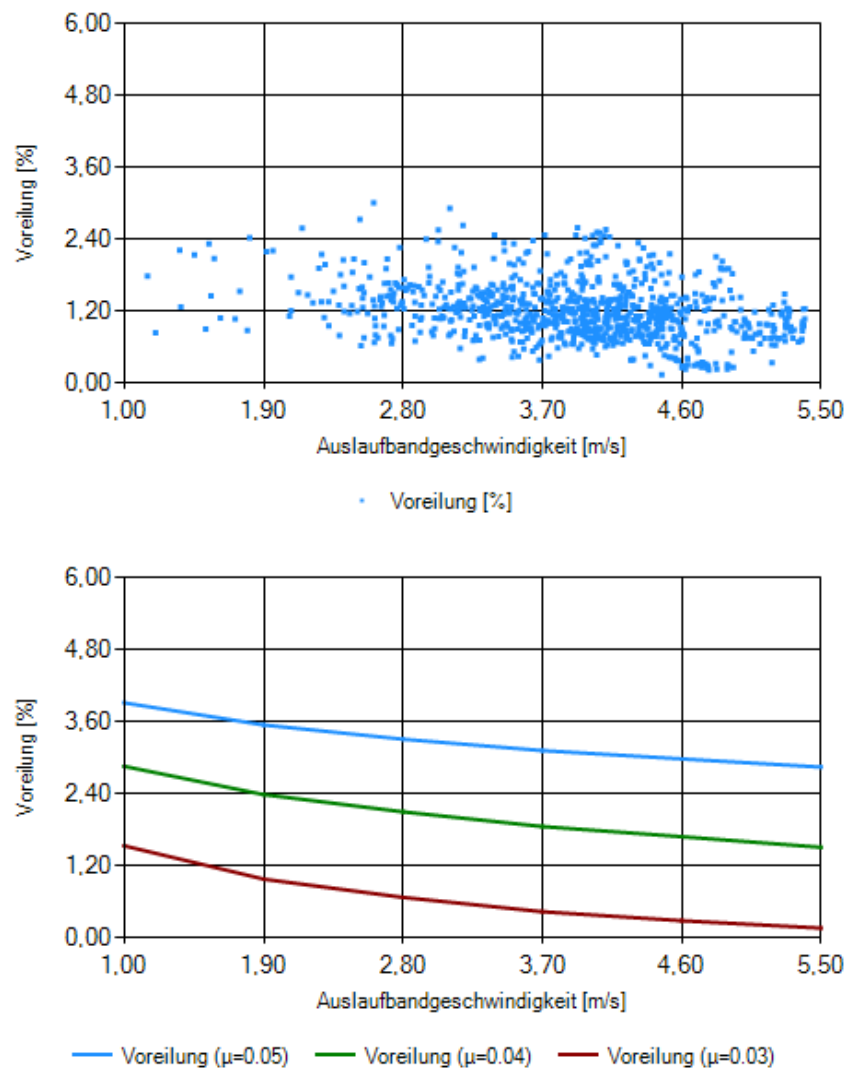


Abbildung 6.13 Einfluss der Geschwindigkeit auf die Voreilung (oben: Auf Datenbasis, unten: Nach der Streifentheorie)

6.4 Änderung der Voreilung beim Beschleunigen und Verzögern der Anlage

Im vorherigen Abschnitt konnte die Abhängigkeit der Voreilung von der Geschwindigkeit bereits anhand der Daten bestätigt werden. Dieser Zusammenhang lässt sich auch bei der detaillierten Untersuchung einzelner Stiche erkennen. Während der Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen verändert sich die Voreilung. Dabei wird ab hier zwischen zwei unterschiedlichen Änderungen unterschieden.

- Globale Voreilungsänderung: Die Differenz zwischen der Voreilung vor der Geschwindigkeitsänderung und der sich einstellenden Voreilung nach der Geschwindigkeitsänderung. Diese Größe ist unabhängig vom Verlauf der Voreilung während der Beschleunigungs- oder Verzögerungsphase.
- Lokale Voreilungsänderung: Beschreibt den Verlauf der Voreilung während der Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsphase

Globale Voreilungsänderung

Die globale Voreilungsänderung wird anhand der Messdateien untersucht. Dazu werden alle Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen herangezogen, vor und nach denen 10 Sekunden mit konstanter Geschwindigkeit gewalzt wird. Es werden die mittleren Voreilungen vor und nach der Geschwindigkeitsänderung bestimmt und die Differenz ermittelt. Zusätzlich wird die Dauer der Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsphase abgeleitet.

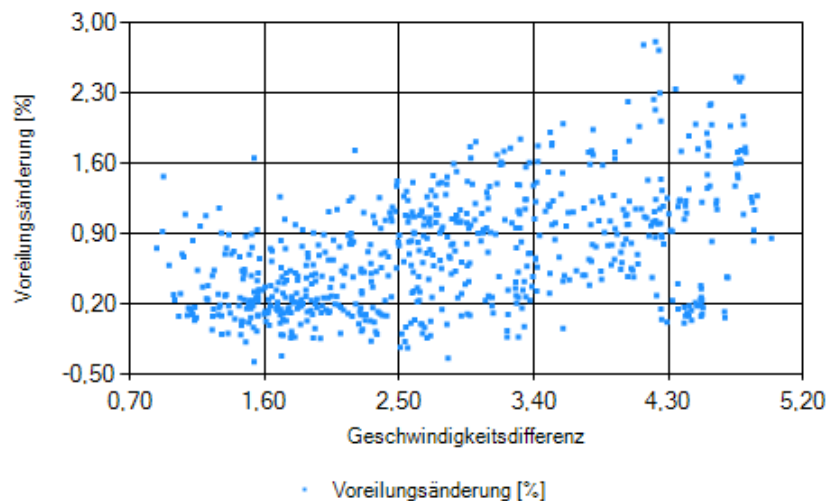


Abbildung 6.14 Globale Voreilungsänderung anhand von 698 Verzögerungsphasen

In Abbildung 6.14 sind exemplarisch die Datenpunkte für 698 Verzögerungsphasen abgebildet. Dem Diagramm kann der Zusammenhang zwischen Voreilungsänderung und Geschwindigkeitsdifferenz entnommen werden. Je größer die Geschwindigkeitsdifferenz ist, desto mehr nimmt auch die Voreilung zu. Diese Erkenntnis passt zu den Ergebnissen aus Abschnitt 6.3.

Lokale Voreilungsänderung

Während die globale Voreilungsänderung für jeden Stich durch die Differenz eindeutig berechnet werden kann, handelt es sich bei der lokalen Voreilungsänderung um den Signalverlauf über den Zeitraum der Geschwindigkeitsänderung. Sie kann allenfalls als eine Funktion über der Geschwindigkeit beschrieben werden. Deshalb ist eine Darstellung mit Hilfe von Datenpunkten, ähnlich zu Abbildung 6.14, nicht möglich.

Anhand der Ergebnisse aus Abschnitt 6.3, und der Erkenntnisse zur globalen Voreilungsänderung, wird erwartet, dass sich die Voreilung während einer Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsphase gemäß der jeweiligen Geschwindigkeit einstellt. Technologisch macht es Sinn, wenn der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Voreilung auch während der Geschwindigkeitsänderung gilt.

Die Untersuchung von Voreilungsverläufen während der Geschwindigkeitsänderungen erfolgt stichprobenartig und manuell anhand der Messdaten und unter Verwendung des iba-Analyzers. Dabei hat sich herausgestellt, dass sich die Voreilung an dieser Anlage oftmals deutlich anders verhält als erwartet. Während der Beschleunigung steigt die Voreilung erst sprunghaft an, bevor sie sinkt. Während der Verzögerung sinkt die Voreilung erst, bevor sie wie erwartet ansteigt.

Vor diesem Hintergrund haben weitere Untersuchungen ergeben, dass diese technologisch nicht erklärbaren Voreilungen mit dem Dickenfehler während Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen (siehe Abschnitt 4.5) zusammenhängen. Die Ursache dafür liegt in beiden Fällen in den fehlerhaften Soll-Werten der Voreilung, die in der Vorsteuerung der Antriebe beim Beschleunigen zu Asynchronitäten führen. Die unsinnigen Voreilungen, die sich während der Geschwindigkeitsänderungen kurzzeitig einstellen, sind also eine Folge der fehlerhaften Soll-Voreilungen.

Kapitel 7

Konzept zur prozessoptimierten Nutzung der Daten im Sinne der Voreilung

7.1 Adaption der Voreilungen

Die Berechnung der theoretischen Voreilungen hat hohe Relevanz. In Abschnitt 4.5 werden verschiedene Prozesssituationen genannt für die die Berechnungswerte benötigt werden. Daraus geht hervor, dass der Prozess durch eine gute Vorhersage der Voreilung zum einen stabiler wird und die Qualität des Endprodukts gleichzeitig verbessert werden kann.

Gerüste mit nachfolgender Bandgeschwindigkeitsmessung

In der Regel ergibt sich die Voreilung als Ergebnis der Stichplanberechnung mit einem Walzmodell. In Abschnitt 3.8 wird die Vorgehensweise anhand der Streifentheorie erläutert. In den meisten Anlagen befindet sich hinter Gerüst C1 eine Geschwindigkeitsmessung des Bandes, sodass die tatsächliche Voreilung für das erste Gerüst berechnet und zur Validierung genutzt werden kann. Wie in Abschnitt 4.4 anhand des Histogramms in Abbildung 4.2 beschrieben, weichen berechnete und tatsächliche Voreilungen in Gerüst C1 deutlich voneinander ab. Diese Abweichungen sind zum einen durch Modellvereinfachungen und zum anderen durch die fehlerhafte Vorhersage der Reibungsverhältnisse zu erklären. Bereits geringe Änderungen des Reibwertes haben großen Einfluss auf die Voreilung (siehe Abschnitt 6.2).

Die Berechnung der tatsächlichen Voreilung ermöglicht die Schlussfolgerung, dass die berechnete Voreilung oftmals deutlich abweicht. Wenngleich es in der Theorie keine bessere

Möglichkeit zur Vorhersage der Voreilung gibt, so steht die Information über die tatsächliche Voreilung zumindest nach einem Stich zur Verfügung. Wenn diese Information gespeichert wird, kann sie zu einem späteren Zeitpunkt bei ähnlichen Prozessbedingungen als verbesserter Soll-Wert für die Voreilung dienen.

Gerüste ohne nachfolgende Bandgeschwindigkeitsmessung

In den Gerüsten C2 bis C4 kann die tatsächliche Voreilung, wegen fehlender Messungen, in der Regel nicht direkt bestimmt werden. Die Fehlerquellen bei der Berechnung der Soll-Werte sind jedoch die gleichen, sodass auch hier von teils großen Abweichungen auszugehen ist. Um die Voreilungen in diesen Gerüsten trotzdem ermitteln können, wird in diesem Abschnitt ein neuer Ansatz beschrieben, in dem die automatische Schweißnahterkennung die Grundlage für die Voreilungsberechnung ist.

7.2 Bestimmung der Voreilung über das Tracking der Schweißnaht

In Abschnitt 4.4 wird das Tracking von bestimmten Bandpositionen durch eine Tandemstraße beschrieben. Die Schweißnaht ist in den Signalen der Walzkraft in jedem Gerüst als Peak erkennbar und dient zur Validierung des Trackings. Darüber hinaus wird der Trackingfehler beschrieben, der durch die fehlerhaften Voreilungen in den Gerüsten C2 bis C4 hervorgerufen wird. Eine falsche Voreilung liefert falsche Bandgeschwindigkeiten und somit falsche Zeitpunkte. Je größer der Voreilungsfehler, desto größer ist der Trackingfehler.

Ansatz

Der Zusammenhang zwischen Voreilungsfehler und Trackingfehler kann mathematisch beschrieben werden (siehe Abschnitt 4.4). Die auslaufseitige Bandgeschwindigkeit ergibt sich direkt als Funktion der Walzgeschwindigkeit und der Voreilung eines Gerüsts. Durch Integration der Bandgeschwindigkeit lässt sich die zurückgelegte Strecke und dadurch der Zeitpunkt berechnen, zu dem zum Beispiel die Schweißnaht das nächste Gerüst erreicht. Die Abweichung dieses theoretisch berechneten Zeitpunktes vom tatsächlichen Zeitpunkt (Trackingfehler) hängt dadurch direkt von der Abweichung der Voreilung (Voreilungsfehler) ab. Wenn der Trackingfehler bekannt ist, ist auch der Voreilungsfehler bekannt und die korrekte Voreilung lässt sich berechnen.

Wenn also die Schweißnaht und die damit einhergehenden Peaks in den Walzkraften zur

Validierung des Trackings (und damit des Trackingfehlers) genutzt werden können, dann muss anhand der Peaks auch der Trackingfehler, somit der Voreilungsfehler und dann die korrekte Voreilung berechnet werden können.

Automatische Identifikation der Schweißnaht

Wenn die Peaks in der Walzkraft, die durch die Schweißnaht hervorgerufen werden, zur Bestimmung der Voreilung genutzt werden sollen, müssen diese zunächst zuverlässig, automatisch erkannt werden. Die Vorgehensweise wird anhand von Abbildung 7.1 erläutert.

Ausgangspunkt ist immer der Zeitpunkt, zu dem sich die Schweißnaht im vorherigen Gerüst befindet. In Gerüst C1 kann dieser Zeitpunkt über die Einlaufbandgeschwindigkeit und eine Messung der Schweißnahtposition vor dem ersten Gerüst eindeutig berechnet werden. Für alle weiteren Gerüste ergibt sich der Ausgangspunkt als Ergebnis der vorherigen Schweißnahtidentifikation. Im ersten Schritt wird mit Hilfe der Soll-Voreilung und einem maximalen Voreilungsfehler $\Delta\kappa_f$ ein Intervall berechnet, in dem der tatsächliche Zeitpunkt liegt, zu dem sich die Schweißnaht im nächsten Gerüst befindet. Dazu wird definiert:

$$\kappa_{x,min} = \kappa_{x,soll} - \Delta\kappa_{x,f} \quad (7.1)$$

$$\kappa_{x,max} = \kappa_{x,soll} + \Delta\kappa_{x,f} \quad (7.2)$$

Über den Zusammenhang zwischen der Walzgeschwindigkeit und der Voreilung lässt sich zu beiden Voreilungen die zugehörige Auslaufbandgeschwindigkeit berechnen:

$$v_{Ax,min} = v_{Wx}(1 + \kappa_{x,min}) \quad (7.3)$$

$$v_{Ax,max} = v_{Wx}(1 + \kappa_{x,max}) \quad (7.4)$$

Durch Integration der Bandgeschwindigkeit ergibt sich die zurückgelegte Strecke der Schweißnaht. Unter der Annahme, dass die verwendete Voreilung korrekt ist, erreicht die Schweißnaht das nächste Gerüst, wenn die Strecke dem Abstand zum nächsten Gerüst $s_{x,x+1}$ entspricht. Für die beiden Voreilungen $\kappa_{x,min}$ und $\kappa_{x,max}$ ergibt sich so das Intervall

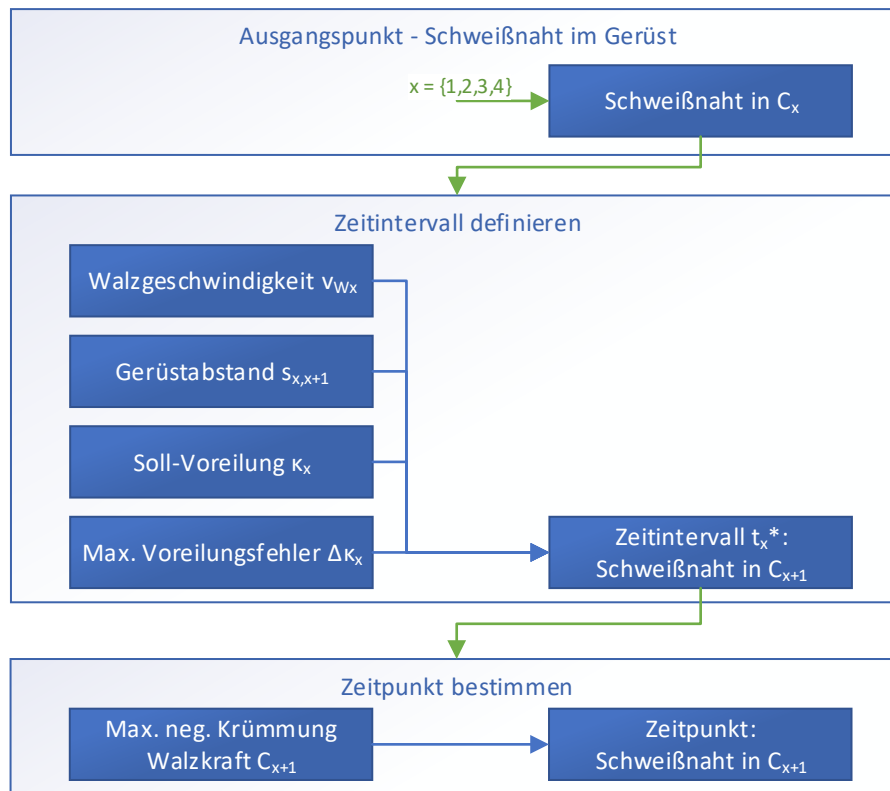


Abbildung 7.1 Konzept zur automatischen Identifikation der Schweißnaht anhand der Walzkraft

$[t_{x,min}^*, t_{x,max}^*]$ mit:

$$t_{x,min}^* = t_Y \quad \text{wenn} \quad \int_0^{t_Y} v_{Ax,min} dt = s_{x,x+1} \quad (7.5)$$

$$t_{x,max}^* = t_Z \quad \text{wenn} \quad \int_0^{t_Z} v_{Ax,max} dt = s_{x,x+1} \quad (7.6)$$

Unter der Voraussetzung, dass die tatsächliche Voreilung im Intervall zwischen $\kappa_{x,min}$ und $\kappa_{x,max}$ liegt, befindet sich der Zeitpunkt, zu dem die Schweißnaht im nächsten Gerüst ist, im Intervall $[t_{x,min}^*, t_{x,max}^*]$.

Durch die Schweißnaht ergibt sich im Walzkraftsignal ein Peak. Beim Eintritt in den Walzspalt führt die Überdicke zu einem Anstieg der Walzkraft. Beim Verlassen des Walzspalts sinkt die Walzkraft wieder. Zur Identifikation dieses Peaks wird die Krümmung der Kurve verwendet. Es wird festgelegt, dass sich die Schweißnaht zu dem Zeitpunkt im Gerüst befindet zu dem die Krümmung im Intervall $[t_{x,min}^*, t_{x,max}^*]$ minimal (rechts gekrümmt) ist.

Dieser Zeitpunkt lässt sich über den Zusammenhang

$$t_{x,SN} = t(\min(F_R''(t_x^*))) \quad \text{mit} \quad t_x^* \in [t_{x,min}^*, t_{x,max}^*] \quad (7.7)$$

berechnen.

Die Definition eines Intervalls, in dem der korrekte Zeitpunkt gesucht wird, hat sich durch die Untersuchung von Stichproben ergeben. Zur Minimierung der Kerbwirkungen wird im Bereich der Schweißnaht oftmals eine Notch in das Band gestanzt (siehe Abschnitt 4.5). Durch die Definition des Intervalls $[t_{x,min}^*, t_{x,max}^*]$ wird der Zeitraum bereits so eingeschränkt, dass durch die Notch ausgelöste Signalschwankungen in der Walzkraft nicht in diesen Suchbereich fallen.

Berechnung der Voreilung

Durch die beschriebene Vorgehensweise ergeben sich nach und nach die Zeitpunkte, zu denen sich die Schweißnaht in den einzelnen Gerüsten befindet. Gleichzeitig können aus den Differenzen der Zeitpunkte die Zeiträume $\Delta t_{x,x+1}$ ermittelt werden, die die Schweißnaht von einem zum nächsten Gerüst benötigt. Da die Gerüstabstände $s_{x,x+1}$ Fixgrößen sind, kann über den Zusammenhang

$$v_{Ax,avg} = \frac{s_{x,x+1}}{t_{x,x+1}} \quad (7.8)$$

die mittlere Auslaufbandgeschwindigkeit berechnet werden. Zusätzlich wird der Mittelwert über das aufgezeichnete Signal der Walzgeschwindigkeit im Zeitraum $\Delta t_{x,x+1}$ berechnet, in dem sich die Schweißnaht zwischen den Gerüsten C_x und C_{x+1} befindet. So lässt sich final die mittlere Voreilung $\kappa_{x,avg}$ durch

$$\kappa_{x,avg} = \frac{v_{Ax,avg} - v_{Wx,avg}}{v_{Wx,avg}} \quad (7.9)$$

berechnen. In Abbildung 7.2 ist die Vorgehensweise konzeptuell dargestellt.

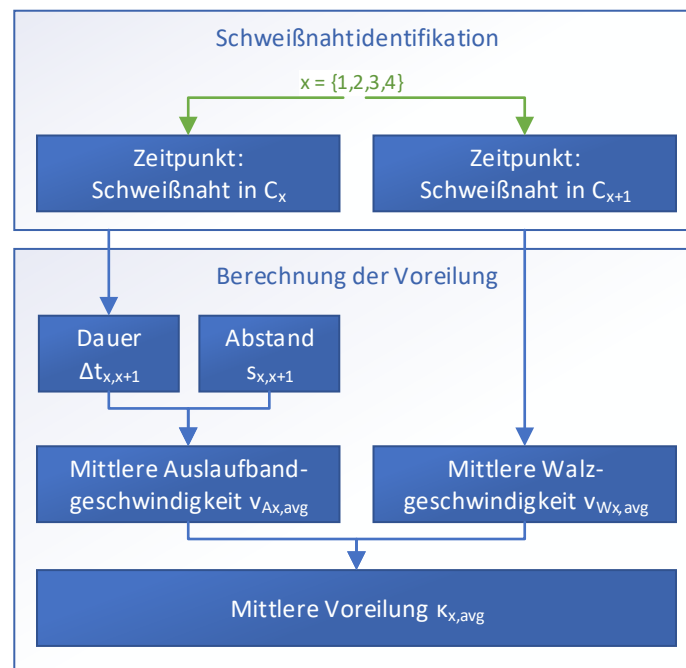


Abbildung 7.2 Konzept zur Berechnung einer mittleren Voreilung auf Grundlage der Schweißnahtidentifikation

7.3 Ansätze zur Bestimmung der Voreilungsänderung bei Geschwindigkeitsänderung

Die Schweißnaht durchquert die Anlage bei vergleichsweise geringer Geschwindigkeit, so dass die Bestimmung der Voreilung anhand der Schweißnaht ebenfalls bei diesem Niveau erfolgt. In Abschnitt 6.3 wird der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Voreilung sowohl theoretisch als auch auf Datenbasis beschrieben. Die Abhängigkeit der beiden Größen ist gering aber offensichtlich vorhanden.

Durch die automatische Schweißnahterkennung kann die Voreilung auch in Gerüsten ermittelt werden, in denen keine auslaufseitige Geschwindigkeitsmessung angebracht ist. Für die betrachtete Straße (Geschwindigkeitsmessung vor und hinter Gerüst C1 und hinter Gerüst C5) stehen somit in jedem Gerüst die Voreilungen bei geringer Geschwindigkeit zur Verfügung. Für das erste und letzte Gerüst kann sie darüber hinaus rechnerisch ermittelt werden. Dadurch lässt sich für die beiden Gerüste auch die Änderung der Voreilung $\Delta\kappa_1$ und $\Delta\kappa_5$ mit der Geschwindigkeit berechnen. In Abbildung 7.3 ist ein Überblick über die bekannten und unbekanntenen Größen dargestellt, wenn hinter den Gerüsten C2 bis C4 keine Geschwindigkeitsmessung vorhanden ist.

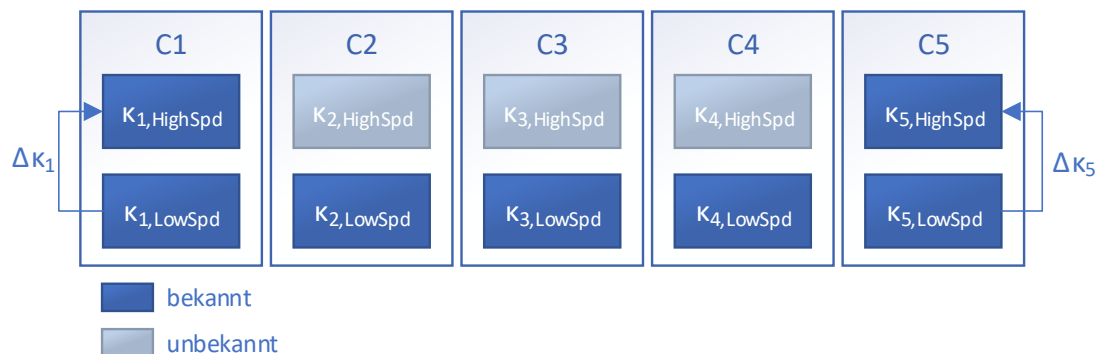


Abbildung 7.3 Überblick über die bekannten und unbekanntenen Voreilungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Konstante Voreilung

In der Streifentheorie wird der Stichplan für eine bestimmte Walzgeschwindigkeit berechnet. Somit ergibt sich die Voreilung auch nur für einen Arbeitspunkt und die Veränderung der Voreilung bei Änderung der Walzgeschwindigkeit wird nicht berücksichtigt. Auch in der untersuchten Anlage ist die Soll-Voreilung konstant. Wenn die Voreilung bei geringer Geschwindigkeit durch die Schweißnahterkennung erfolgt, ist dieser Ansatz natürlich ebenfalls möglich. Im einfachsten Fall wird die Voreilungsänderung also nicht berücksichtigt und der ermittelte Wert gilt unabhängig von der Geschwindigkeit.

Voreilungsänderung aus C1 übernehmen

In Gerüst C1 kann die Voreilungsänderung bei Geschwindigkeitsänderung bestimmt werden. Wenngleich sich die Voreilung auf Grund der Reibungsverhältnisse in den anderen Gerüsten unterschiedlich verhält, ist die Änderung über der Geschwindigkeit ähnlich. Ein möglicher Ansatz ist es also die Voreilungsänderung aus Gerüst C1 auf die Gerüste C2 bis C4 zu übertragen. Die Voreilungen würden sich demnach über den Zusammenhang

$$\kappa_{2,HighSpd} = \kappa_{2,LowSpd} + \Delta\kappa_1 \quad (7.10)$$

$$\kappa_{3,HighSpd} = \kappa_{3,LowSpd} + \Delta\kappa_1 \quad (7.11)$$

$$\kappa_{4,HighSpd} = \kappa_{4,LowSpd} + \Delta\kappa_1 \quad (7.12)$$

berechnen lassen.

Voreilungsänderung zwischen C1 und C5 linear interpolieren

Analog zu Gerüst C1, kann die Voreilung auf Grund der auslaufseitigen Geschwindigkeitsmessung auch in Gerüst C5 ermittelt werden. Wenn das Gerüst im Kraftmodus betrieben wird ist die Reduktion gering und die Voreilungen nicht auf die anderen Gerüste übertragbar. Wird das Gerüst im Reduktionsmodus genutzt, sind die Verhältnisse im Vergleich zu den anderen Gerüsten ähnlich und die Voreilungsänderung kann in Verbindung mit der Voreilungsänderung aus dem ersten Gerüst zur Interpolation genutzt werden. Unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs (siehe Abbildung 7.4) lässt sich die Voreilung in den Gerüsten C2 bis C4 somit über

$$\kappa_{x,HighSpd} = \kappa_{x,LowSpd} + \frac{\Delta\kappa_5 - \Delta\kappa_1}{4} (x - 1) \quad \text{mit} \quad x = \{2, 3, 4\} \quad (7.13)$$

berechnen.

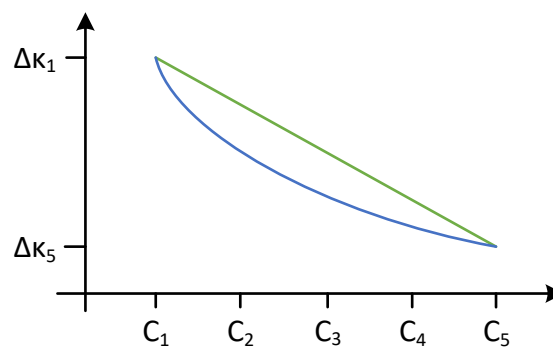


Abbildung 7.4 Interpolation der Voreilungsänderung (linear: grün, nicht linear: blau)

Berücksichtigung der theoretischen Voreilungsänderung

Es wird angenommen, dass der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Reibung im Walzspalt mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Aus diesem Grund werden die Reibwertkurven mit Hilfe der $1/x$ Funktion beschrieben. In Abschnitt 6.3 werden diese Reibwertkurven genutzt, um den Einfluss der Geschwindigkeit auf die Voreilung mittels Streifentheorie zu modellieren. Daraus ergibt sich, dass auch der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Voreilung mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt.

Vor diesem Hintergrund kann die Interpolation zwischen der Voreilungsänderung in Gerüst C1 und Gerüst C5 auch nicht linear und in Anlehnung an eine Reibwertkurve erfolgen (siehe Abbildung 7.4).

Kapitel 8

Evaluierung des Konzepts

8.1 Verifikation und Validierung

In Abschnitt 7 wird ein Konzept vorgestellt, mit dem durch die Nutzung der Prozessdaten eine verbesserte Vorhersage der Voreilung möglich ist. Zentraler Bestandteil des Konzepts ist die Bestimmung der Voreilung über das Tracking der Schweißnaht (siehe Abschnitt 7.2). Es wird ein Ansatz beschrieben, in dem die Schweißnaht anhand des Walzkraftsignals automatisch erkannt wird, wodurch die Berechnung einer mittleren Voreilung möglich ist.

Zur Überprüfung dieses Ansatzes wird der in Abschnitt 7.2 beschriebene Algorithmus im ibaAnalyzer implementiert. Mit Hilfe des integrierten Reportgenerators kann zu jedem Schweißnahtdurchlauf eine Zusammenfassung der generierten Informationen als PDF-Datei erzeugt werden. Im Anhang B sind diese exemplarisch für zwei Auswertungen zu finden. Die Zusammenfassung ist immer gleich aufgebaut und enthält Informationen über das betreffende Datum, die Uhrzeit und die Bandgeometrie vor und hinter der Schweißnaht. Für jedes Gerüst ist ein Ausschnitt des Walzkraftsignals abgebildet, in dem zum einen der Zeitpunkt gekennzeichnet ist, zu dem sich die Schweißnaht unter Verwendung der Soll-Voreilung im nächsten Gerüst befindet (roter Marker) und zum anderen der Zeitpunkt, der durch den Algorithmus ermittelt wird (grüner Marker). Zusätzlich werden Informationen über die Soll-Voreilung und die sich aus dem Tracking der Schweißnaht ergebende Voreilung tabellarisch dargestellt. Die Zusammenfassung dient als Hilfsmittel zur Überprüfung der Schweißnahterkennung. Zusätzlich können die wesentlichen Informationen (Soll-Voreilung, getrackte Voreilung) in einer Textdatei gespeichert werden.

Der ibaDatCoordinator bietet die Möglichkeit die Erstellung von Reporten und die Extraktion von Textdateien für ausgewählte Messdateien zu automatisieren. Die Funktionen werden in diesem Fall genutzt, um für 837 Schweißnahtdurchläufe die Zusammenfassungen

zu erstellen und die wichtigsten Informationen gleichzeitig in einer Textdatei zu speichern. Dadurch werden statistische Auswertungen ermöglicht.

Fehlerursachen, die nicht auf den Algorithmus zurückzuführen sind

Bei der Überprüfung des Ansatzes haben sich drei Fehlerursachen herausgestellt, die nicht durch den Algorithmus hervorgerufen werden. Sie werden kurz beschrieben und mit einer Kurzbeschreibung versehen:

- Eine Ursache findet sich in der Qualität der Daten. Fehlstellen in den Messdaten führen zu einer Verfälschung der Ergebnisse. (Fehlerhafte Daten)
- Eine zweite Ursache liegt in einer speziellen Prozesssituation, in der die gesamte Straße angehalten wird, während sich die Schweißnaht zwischen Gerüst C1 und Gerüst C5 befindet. Dieser Sonderfall hat Auswirkungen auf das mechanische Verhalten von Bauteilen, die Aufnahme der Messdaten und die anschließenden Berechnungen. Darüber hinaus ist das Anfahren einer Straße aus dem Stillstand ohnehin ein Sonderfall, der in dieser Arbeit nicht näher betrachtet wird. Diese spezielle Prozesssituation und die zugehörigen Ergebnisse werden nicht näher untersucht. (Anlage angehalten)
- Die dritte Ursache geht vom Schweißprozess aus. Es kommt vor, dass der Schweißvorgang nicht korrekt durchgeführt wird, die beiden Bänder wieder geteilt und erneut verschweißt werden. Dadurch kommt es zu Abweichungen bei der Schweißnahterkennung vor dem Gerüst. Wenn aus diesem Grund der Zeitpunkt nicht stimmt, zu dem sich die Schweißnaht im ersten Gerüst befindet, so wird der Peak der Walzkraft im falschen Intervall gesucht und die Schweißnaht kann nicht erkannt werden. Voraussetzung für die Erkennung der Schweißnaht in den Gerüsten ist also die korrekte Information über den Zeitpunkt, zu dem sich die Schweißnaht in Gerüst C1 befindet. (Schweißnaht in C1 falsch)

Alle drei Ursachen lassen keine Schlüsse über die Güte des Algorithmus zu. Wenn der Ansatz in eine Steuerung eingebaut wird, muss sichergestellt werden, dass die nötigen Sensordaten zur Verfügung stehen, Sonderfälle abgefangen werden und dass die Information über den Zeitpunkt der Schweißnaht in C1 richtig ist.

Vergleich der Voreilungen in Gerüst C1

Mit Hilfe der Schweißnahterkennung anhand des Peaks in der Walzkraft werden die Voreilungen in den Gerüsten C1 bis C4 ermittelt. Die Messung der Geschwindigkeit hinter Gerüst C1 bietet zusätzlich die Möglichkeit die Voreilung im ersten Gerüst zu berechnen.

Das ermöglicht den Vergleich zwischen der tatsächlichen Voreilung und der mit Hilfe des Algorithmus bestimmten mittleren Voreilung. In Abbildung 8.1 ist die Differenz der beiden Voreilungen für die 837 Fälle als Histogramm zu sehen.

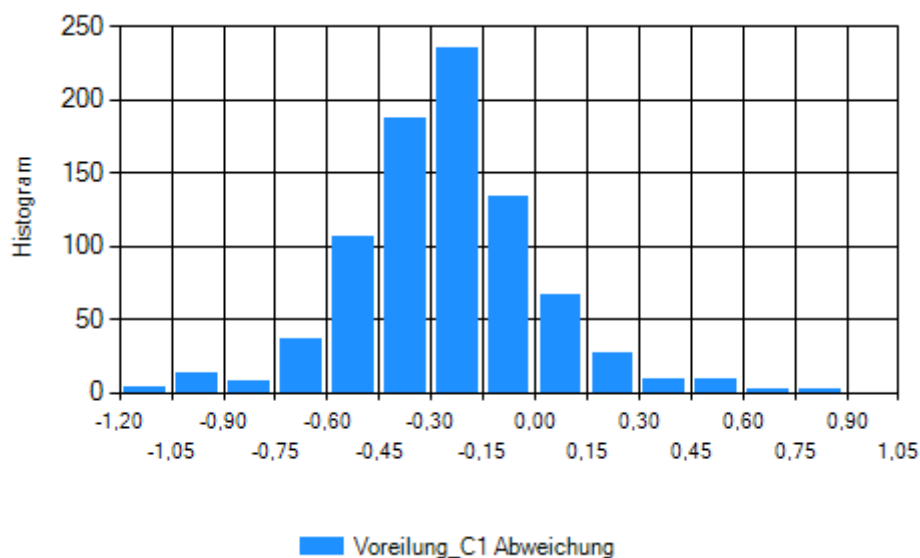


Abbildung 8.1 Histogramm zur Abweichung der durch das Tracking ermittelten Voreilung zur berechneten Ist-Voreilung

Für das Tracking können die Voreilungen nur als Mittelwert über den Zeitraum berechnet werden, in dem sich die Schweißnaht zwischen den Gerüsten befindet. Um die Voreilungen vergleichen zu können, wird deshalb auch die Ist-Voreilung gemittelt. Durch diese Umrechnung sind geringe Abweichungen zu erwarten.

Das Histogramm zeigt in etwa eine Normalverteilung der Abweichungen. Die Randwerte (im Bereich kleiner $-0,7\%$ und größer $0,5\%$) werden genauer untersucht und die Ursache der Abweichung hinterfragt. In Anhang D sind die Details zu der Untersuchung von 45 Schweißnahtdurchläufen in einer Tabelle zusammengefasst.

Es stellt sich heraus, dass die Erkennung der Schweißnaht in Gerüst C2 schwieriger ist als in den hinteren drei Gerüsten. Tatsächlich ist die Schweißnaht in einigen Fällen (4 von 45) auch bei der manuellen Überprüfung nicht eindeutig zu erkennen. Grund dafür ist die Vorsteuerung der Anstellung im zweiten Gerüst bei einem Produktwechsel, die in den hinteren Gerüsten nicht stattfindet. In diesem Fall überlagert sich der Peak in der Walzkraft mit der Änderung der Walzkraft auf Grund der Vorsteuerung. Darüber hinaus ist der Peak im Gerüst ohnehin nicht so stark ausgeprägt wie in den hinteren Gerüsten, wodurch die eindeutige Erkennung zusätzlich erschwert wird.

In vielen Fällen (32 von 45) wird die Schweißnaht anhand des Trackings richtig erkannt.

Die Abweichung wird demnach durch eine fehlerhaft berechnete Voreilung hervorgerufen. Da sich die Voreilung aus den gemessenen Walz- und Bandgeschwindigkeiten ergibt, liegt die Ursache in den Geschwindigkeitsmessungen. Darüber hinaus fällt auf, dass die Schweißnaht oftmals bereits in C1 nicht exakt richtig ist. Auch vor dem ersten Gerüst wird die Bandgeschwindigkeit genutzt, um den Zeitpunkt zu bestimmen, zu dem sich die Schweißnaht in Gerüst C1 befindet. Die Abweichungen der Bandgeschwindigkeitsmessungen vor und hinter Gerüst C1 führen bei der Berechnung der Voreilungen in Gerüst C2 zu Fehlern. Überlagern sich diese Fehler, kann die berechnete Voreilung offenbar um bis zu ± 1 % von der mit Hilfe des Tracking ermittelten Voreilung abweichen. Die korrekte Schweißnahterkennung in Gerüst C2 ist wichtig, weil das Schweißnahttracking damit synchronisiert wird.

In den 45 Fällen hat der Algorithmus die Schweißnaht fünf mal eindeutig falsch identifiziert. Wenn der Schweißvorgang nicht wiederholt werden muss (4 von 45 Fälle) wird die Schweißnaht bei dieser Randwertuntersuchung also in 32 der übrigen 41 Fällen (78 %) eindeutig richtig erkannt.

Untersuchung der Randwerte

Im Anhang C sind die Histogramme zu den sich aus dem Tracking ergebenden Voreilungen aller Gerüste abgebildet. In den Diagrammen lassen sich in jedem Gerüst die Randwerte der ermittelten Voreilungen erkennen, die deutlich vom statistischen Mittel abweichen. Die zu diesen Datensätzen gehörenden Daten werden genauer untersucht. Anhand der Zusammenfassung und/oder der detaillierten Analyse der Messdatei wird die Ursache des Randwerts ermittelt und daraufhin eine Schlussfolgerung im Hinblick auf die Güte des Algorithmus gezogen.

Insgesamt werden 44 Schweißnahtdurchläufe als Randwerte bewertet und auf dieser Grundlage genauer untersucht. In Anhang D findet sich eine Tabelle zu dieser Untersuchung in der der jeweilige Randwert und die Ursache in Form einer Tabelle aufgelistet sind. Daraus geht hervor, dass in 14 Fällen eine der drei oben genannten Ursachen (Fehlerhafte Daten, Anlage angehalten, Schweißnaht in C1 falsch) für die Randwerte verantwortlich sind. In 26 Fällen wird die Schweißnaht in allen Gerüsten richtig erkannt und der Algorithmus funktioniert korrekt. Vier Schweißnähte werden hingegen falsch anhand der Walzkraft identifiziert. Unter der Voraussetzung, dass die Daten keine Fehler aufweisen, dass die Anlage nicht angehalten wird und dass die Schweißnaht in C1 richtig ist, erkennt der Algorithmus die Schweißnaht in ca. 85 % (26 von 30) der Fälle. Dabei muss berücksichtigt werden, dass an dieser Stelle Randwerte untersucht werden. Auf dem gesamten Datensatz

wird eine zusätzliche Verbesserung erwartet.

Plausibilitätsprüfung

Durch die Überprüfung von Randwerten werden Ausreißer untersucht. Im nächsten Schritt werden die berechneten Voreilungen im Kontext interpretiert. Anhand von Erfahrungswerten wird dazu für jedes Gerüst ein Akzeptanzintervall definiert, in dem die ermittelten Werte erwartet werden. Alle Datensätze, für die eine der ermittelten Voreilungen außerhalb des zugehörigen Intervalls liegen, werden genauer untersucht (sofern nicht bereits bei der Randwertuntersuchung geschehen). Für die einzelnen Gerüste werden folgende Intervalle festgelegt. Sie sind in den in Anhang C abgebildeten Histogrammen markiert.

Tabelle 8.1 Akzeptanzintervalle zur Überprüfung der Voreilungen

Gerüst	Untere Intervallgrenze	Obere Intervallgrenze
C1	-1.00 %	5.00 %
C2	-1.00 %	4.00 %
C3	-1.00 %	4.00 %
C4	-1.00 %	6.00 %

Im ersten Gerüst liegen 35 der ermittelten Voreilungen außerhalb des Intervalls. Die Untersuchung der zugehörigen Schweißnahtdurchläufe anhand der Zusammenfassungen ergibt, dass die Schweißnaht in allen Fällen korrekt erkannt wird. Die vergleichsweise hohen Voreilungen ergeben sich zum einen durch die geringe Einlaufbanddicke und zum anderen wegen der Reibverhältnisse. Die Datensätze fallen in einen Zeitraum von ca. zwei Stunden vor dem die Arbeitswalzen in Gerüst C1 gewechselt wurden. Dadurch ist die Reibung und in der Folge auch die Voreilung hoch (siehe Kapitel 6).

In Gerüst C2 liegen die ermittelten Voreilungen in 13 der 837 Fälle außerhalb des Intervalls, davon wurden bereits acht bei der Randwertuntersuchung überprüft. In den übrigen vier Fällen liegen die Voreilungen nur knapp außerhalb und die Überprüfung hat ergeben, dass der Algorithmus die Schweißnaht korrekt bestimmt hat.

Auch in Gerüst C3 werden die meisten Voreilungen, die außerhalb des Akzeptanzintervalls liegen und bei der Randwertuntersuchung noch nicht hinterfragt wurden, korrekt bestimmt. In vier von 46 Fällen führen Leerstellen in den Datensätzen oder die fehlerhafte Schweißnahterkennung vor dem ersten Gerüst zu den Randwerten. 41 der ermittelten Voreilungen liegen im Bereich zwischen 4 % und 6 % und sind eindeutig korrekt, nur eine

Schweißnaht wird falsch erkannt. Ein Großteil dieser Fälle gehört zu der bereits erwähnten Charge mit geringer Banddicke, die kurz nach einem Walzenwechsel gewalzt wurden. Diese Verhältnisse führen in Gerüst C3 zu Voreilungen von bis zu 6 % und sind plausibel.

In Gerüst C4 ergibt sich ein unerwartetes Bild. 163 ermittelte Voreilungen liegen nicht im Akzeptanzintervall. Sie werden stichprobenartig überprüft. In einigen wenigen Fällen sind die bereits beschriebenen Ursachen (Fehlerhafte Daten, Anlage angehalten, Voreilung in C1 falsch) der Grund. Die meisten Schweißnähte werden in den Gerüsten aber anhand der Walzkraft offensichtlich richtig erkannt. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Voreilungen entweder tatsächlich korrekt und damit höher als erwartet sind oder dass die Bestimmung der Voreilung möglicherweise mit einem Fehler einhergeht.

Das Konzept zur Bestimmung der Voreilung (siehe Abbildung 7.2) basiert auf der Schweißnahtidentifikation. Diese ist offensichtlich korrekt, sodass als konkrete Fehlerursache nur die zusätzlich einfließenden Größen, der Gerüstabstand und die Walzgeschwindigkeit bleiben. Die Abstände sind überprüft, sodass die Fehlerursache auf die Messung der Walzgeschwindigkeit in Gerüst C4 beschränkt werden kann. Die Überprüfung der Geschwindigkeiten im Zuge dieser Arbeit ist nicht möglich, da die nötigen Informationen zu den Walzendurchmessern nicht in den Messdaten vorhanden sind.

Überprüfung weiterer Stichproben

Durch die Untersuchungen der Voreilungsabweichungen in Gerüst C1, die Untersuchung der Randwerte und die Plausibilitätsprüfung konnten die Ursachen für unerwartete Ergebnisse abgeleitet werden. Um die Güte der automatischen Schweißnahterkennung bewerten zu können, werden zusätzlich 50 Schweißnahtdurchläufe überprüft, die nicht Teil der bisherigen Untersuchungen waren. Dabei hat sich ergeben, dass die Schweißnahterkennung in Gerüst C2 in zwei Fällen nicht eindeutig ist. Wenn die Schweißnaht in Gerüst C1 richtig ist, wird die Schweißnaht ansonsten in allen Gerüsten richtig erkannt.

8.2 Bewertung

Im vorherigen Abschnitt konnten fünf wesentliche Ursachen für die fehlerhafte Schweißnahterkennung anhand der Walzkraft und abweichende Voreilungen ermittelt werden:

- Fehlerhafte Daten
- Besondere Prozesssituationen, wie ein kurzzeitiger Anlagenstillstand
- Zeitpunkt der Schweißnaht in Gerüst C1 ist falsch
- Schweißnaht ist nicht eindeutig identifizierbar (im wesentlichen nur in Gerüst C2)

- Geschwindigkeiten möglicherweise nicht genau richtig

Sowohl fehlerhafte Prozessdaten, als auch ein kurzzeitiger Stillstand der Straße sind Sonderfälle. Wenn der Algorithmus in einer Anlage eingebaut wird, müssen diese berücksichtigt werden. Um falsche Voreilungen zu vermeiden, können wie in Abschnitt 8.1 Akzeptanzintervalle definiert werden, die die ermittelten Voreilungen automatisch überprüfen. Der richtige Zeitpunkt, zu dem sich die Schweißnaht in Gerüst C1 befindet, ist eine maßgebliche Voraussetzung für den Algorithmus. In den Messdaten ist der Zeitpunkt für den Regelfall dadurch eindeutig markiert. Es kommt allerdings vor, dass die Schweißnaht fehlerhaft ist, ein kurzer Teil entfernt und die Bänder erneut verschweißt werden. In der Steuerung wird die Verkürzung des Bandes als Korrekturgröße berücksichtigt, in den Messdaten liegt der Wert jedoch nicht vor. Wird der Schweißvorgang vor der Anlage wiederholt, stimmt daher der Zeitpunkt zu dem sich die Schweißnaht in Gerüst C1 befindet nicht und die Schweißnahterkennung auf Datenbasis ist falsch. Wird der Algorithmus in der Steuerung eingebaut, liegt der Korrekturwert vor und der richtige Zeitpunkt lässt sich berechnen.

In Gerüst C2 ist die Schweißnahterkennung anhand der Walzkraft nicht immer eindeutig. Durch die Messung der Geschwindigkeit vor der Anlage kann die Voreilung von Gerüst C1 aber zusätzlich berechnet und das Suchintervall dadurch wesentlich eingeschränkt werden. Die Abweichung der beiden Größen liegt im Bereich von -1.2 % bis +0.8 %.

Sowohl für die Berechnung der Voreilung in C2, als auch für die Ermittlung der Voreilung mit Hilfe der Schweißnaht, wird die Walzgeschwindigkeit der Gerüste verwendet. Diese ergibt sich aus dem Walzenradius und der Drehzahl, die direkt gemessen wird. Bei der Berechnung der Voreilung wird zusätzlich die mit einem Laser aufgezeichnete Bandgeschwindigkeit genutzt. Die Messgenauigkeit der Messinstrumente spiegelt sich in der Güte der Voreilung wieder. Ein Beispiel zeigt den Einfluss eines Geschwindigkeitsfehlers auf die Voreilungsberechnung. Für eine Walzgeschwindigkeit von 2 m/s und eine Auslaufbandgeschwindigkeit von 2.1 m/s ergibt sich eine Voreilung von 5 %. Weicht die Auslaufbandgeschwindigkeit um +1 % ab ($v_A = 2.121$ m/s) so erhöht sich die Voreilung auf 6.05 %. Der relative Messfehler der Geschwindigkeit führt also zu einem absoluten Voreilungsfehler in gleicher Größenordnung. Damit lassen sich die Streuung der Voreilungsabweichungen in Gerüst C1 teilweise begründen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der korrekte Zeitpunkt der Schweißnaht in Gerüst C1 die wichtigste Voraussetzung für die Schweißnahterkennung in den weiteren Gerüsten ist. Ist dieser Aspekt erfüllt, funktioniert die Schweißnahterkennung anhand der Walzkraft in den Gerüsten C3 bis C5 nahezu ohne Einschränkung richtig. In Gerüst C2 ist der kennzeichnende Peak im Walzkraftsignal nicht so deutlich ausgeprägt und die

Schweißnaht dadurch in seltenen Fällen nicht eindeutig identifizierbar. Ist die Schweißnaht in allen Gerüsten identifiziert, können die mittleren Voreilungen berechnet werden. Dabei muss beachtet werden, dass der Fehler dieser Berechnung in der Größenordnung des Toleranzbereichs der Drehzahlmessung liegt.

Kapitel 9

Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Innerhalb dieser Arbeit wird die Tandemstraße als komplexe Walzanlage vorgestellt und besondere Herausforderungen hinsichtlich ihrer Steuerung beschrieben. Dabei spielt die Voreilung eine entscheidende Rolle. Sie wird mit einem Walzmodell berechnet, steht somit als theoretischer Soll-Wert im Stichplan zur Verfügung und wird in verschiedenen Regelkreisen als Parameter zur Umrechnung zwischen Walz- und Bandgeschwindigkeit verwendet. Es hat sich gezeigt, dass die Berechnung des Soll-Wertes oftmals fehlerhaft ist und die Abweichungen zum einen zu Problemen beim Schweißnahtdurchlauf und zum anderen zu Abweichungen der Banddicke beim Beschleunigen und Verzögern führen können. Vor diesem Hintergrund war das Ziel dieser Arbeit die Voreilung hinsichtlich verschiedener Abhängigkeiten, insbesondere der Geschwindigkeit, genau zu untersuchen und darauf aufbauend ein Konzept zu entwickeln, mit dem die Prozessdaten zur verbesserten Vorhersage der Voreilung genutzt werden können.

Zusammenfassung

Nach einer kurzen Einleitung (Kapitel 1), wird die Tandemstraße in Kapitel 2 als Walzanlage vorgestellt. Ihre Funktion in einem Stahlwerk und die Zielgrößen des Prozesses werden beschrieben.

In Kapitel 3 werden die Grundlagen des Kaltwalzens erläutert. Insbesondere die Veränderung der Werkstoffeigenschaften und der Reibungsverhältnisse im Walzspalt haben Einfluss auf die Voreilung und werden daher genauer beschrieben. Der zentrale Abschnitt dieses Kapitels ist die Vorstellung des Streifenmodells unter Berücksichtigung der Walzenabplattung, welches sich zur Stichplanberechnung in der Industrie etabliert hat. Es wird insbesondere die Berechnung der Fließscheidenlage und darauf aufbauen die Ermitt-

lung der Voreilung geschildert.

Auf diese Grundlagen aufbauend werden in Kapitel 4 Strategien zur Steuerung und Regelung von Bandzügen und Banddicken vorgestellt. Die örtliche Verfolgung von bestimmten Bandpositionen (Tracking) ist dabei von besonderer Bedeutung, weil das spätere Konzept darauf basiert. Außerdem wird aus den Steuerungs- und Regelungsstrategien sowie aus dem Tracking die Signifikanz der Güte der berechneten Voreilung abgeleitet.

In Kapitel 5 werden die verfügbaren Daten vorgestellt. Dabei ist die Unterscheidung zwischen textbasierten, komprimierten Prozessdaten für statischen Auswertungen über mehrere tausend Stiche und spezifischen Messdateien für detaillierte Untersuchungen von Sensordaten im Millisekundenbereich besonders interessant. Zusätzlich wird die Aufbereitung der Daten für die verschiedenen Untersuchungszwecke beschrieben.

Die angesprochenen textbasierten Prozessdaten werden in Kapitel 6 genutzt, um die Abhängigkeit der Voreilung von anderen Prozessgrößen auf Datenbasis zu untersuchen. Insbesondere die Abhängigkeit der Voreilung von der Geschwindigkeit wird genauer analysiert, weil in der Literatur keine Untersuchungen dahingehend zu finden sind.

In Kapitel 7 wird ein Konzept eingeführt, mit dem die Messdaten prozessoptimierend genutzt werden können. Dabei wird das in Kapitel 4 erläuterte Tracking zur Voreilungsbestimmung genutzt. Darüber hinaus werden die Erkenntnisse aus Kapitel 6 verwendet, um Strategien zur Berechnung der Voreilungsänderung beim Beschleunigen und Verzögern zu entwickeln.

Zur Evaluierung des Konzepts in Kapitel 8 werden wiederum die Messdaten verwendet. Mit Hilfe des ibaAnalyzers werden die Vorschriften aus dem Konzept implementiert, sodass die Schweißnahterkennung und Voreilungsberechnung anhand der Prozessdaten möglich ist. Durch eine automatische Zusammenfassung der wichtigsten Informationen zu einem Schweißnahtdurchlauf wird eine detaillierte Überprüfung einzelner Voreilungen ermöglicht. Zusätzlich werden die Voreilungen automatisch in eine Textdatei extrahiert, sodass statische Überprüfungen anhand von 837 Datensätzen möglich sind. In einer abschließenden Bewertung werden die Ergebnisse eingeordnet und Rückschlüsse auf die Güte des Konzepts gezogen.

Fazit

Die Abhängigkeit der Voreilung von verschiedenen Größen wird in der Literatur nur vereinzelt beschrieben. Bekannte Zusammenhänge konnten sowohl in der Theorie wie auch anhand der Daten bestätigt werden. Darüber hinaus haben die Prozessdaten die Abhängigkeit der Voreilung von der Geschwindigkeit offengelegt, wobei eine mathematische Beschreibung des Zusammenhangs auf Grund der Streuung der Datenpunkte nicht

möglich ist.

Das Tracking ist eine wichtige Funktion in einer Tandemstraße, um die Schweißnaht durch die Anlage zu verfolgen und Soll-Werte zum richtigen Zeitpunkt anzupassen. Indem die Schweißnaht anhand der Walzkraft erkannt wird, kann das Tracking umgekehrt zur Berechnung der Bandgeschwindigkeit und somit der Voreilung genutzt werden. Die Validierung anhand von Prozessdaten zeigt eindeutig, dass dieser Ansatz in den meisten Fällen funktioniert und sich zur Ermittlung der Voreilung eignet.

Durch die Kombination der Voreilungsbestimmung anhand der Schweißnaht bei geringer Geschwindigkeit und der Erkenntnisse zur Änderung der Voreilung beim Beschleunigen und Verzögern, konnte in Kapitel 7 ein Konzept erstellt werden, mit dem eine verbesserte Ermittlung des Soll-Wertes für die Voreilung möglich ist. Durch die Umsetzung dieses Ansatzes in einer Tandemstraße ergeben sich einige Vorteile:

- Der Schweißnahtdurchlauf und die rechtzeitige Umschaltung der Prozessgrößen wird verbessert
- Es stehen die Voreilungen aller Gerüste zu Analysezwecken zur Verfügung, wodurch eine verbesserte Reibwertadaption möglich ist
- In der Geschwindigkeitskaskade sind verbesserte Soll-Werte die Grundlage für eine optimale Regelung der Bandzüge und der Banddicke.

Ausblick

In Abschnitt 6.2 wurde unter anderem der Einfluss der Reibung auf die Voreilung untersucht. Dabei hat sich anhand der Daten bestätigt, dass die Temperatur der Arbeitswalzen Einfluss auf die Reibung im Walzspalt und somit auch auf die Voreilung hat. Die Abhängigkeit der Voreilung von der Temperatur kann an dieser Anlage nicht untersucht werden, weil keine Temperaturmessungen vorhanden sind. Um den Einfluss einzuordnen, sollte dieser Zusammenhang noch näher untersucht werden.

Die Abweichung der Banddicke beim Beschleunigen und Verzögern war Teil der Motivation für diese Arbeit. Durch die verbesserten Soll-Werte für die Voreilung wird die Grundlage geschaffen, um die Dicke auch in dynamischen Prozesssituationen optimal regeln zu können. Im Zuge dieser Arbeit haben sich diesbezüglich weitere mögliche Ursachen ergeben, deren Untersuchung jedoch über das Thema hinaus gehen. So führen beispielsweise verschiedene Taktzeiten in der SPS womöglich zu Asynchronitäten in den Drehzahlen. Um den Dickenfehler zu eliminieren, müssen somit weitere Untersuchungen folgen.

Das Konzept in Kapitel 7 wurde anhand von aufgezeichneten Prozessdaten entwickelt

und validiert. Im nächsten Schritt müssen die Zusammenhänge in die Steuerung einer Tandemstraße eingebaut und die Funktionsweise im laufenden Betrieb getestet werden. Insbesondere die verschiedenen Ansätze zur Beschreibung der Voreilung beim Beschleunigen und Verzögern müssen verglichen und ihr Nutzen bei der Dickenregelung bewertet werden.

Literaturverzeichnis

- Becker, H., Hinkfoth, R., Guericke, W., König, B., and Müller, H.-K. (1979). *Walzwerke, Maschinen und Anlagen* . VEB deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Beisemann, G. (1987). *Theoretische Untersuchung der mechanisch einstellbaren Bereiche für die Walzspaltform an unterschiedlichen Walzwerksbauarten* . Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf.
- Berger, B. (1975). *Die elastische Verformung der Walzen von Quarto-Walzgerüsten und die Beeinflussung der Walzspaltform durch Walzenbiegeeinrichtungen* . PhD thesis, Technische Universität Clausthal.
- Bland, D. R. and Ford, H. (1948). Calculation of roll force and torque in cold strip rolling with tensions. *Institution of Mechanical Engineers*, page 144.
- Buchholz, F.-G. (1976). *Berechnung und Optimierung von Stichplänen für den stationären Betrieb kontinuierlicher Kalt- und Warmwalzstraßen* . PhD thesis, Technische Universität München.
- Bähr, A., Claussen, F., Dembeck, H., Funke, P., Gattinger, H., Lenze, F. J., Montens, A., Müller, H.-G., Pawelski, O., Plümer, L., Spendlè, E. A., and Steidl, A. (1970). *Herstellung von kaltgewalztem Band* . Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf.
- Dahl, T. (1935). Vorgänge im Walzspalt, besonders über die Lage der Fließscheide und die Größe der Voreilung beim Walzen . *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, pages 15–21.
- Ekelund, S. (1933). Analysis of Factors Influencing Rolling Pressure and Power Consumption in the Hot Rolling of Steel . *Journal of Engineering Materials and Technology* 117, Nr.1, page 75.
- Fleck, N. A. and Johnson, K. (1986). Towards a new theory of cold rolling thin foil . *International Journal of Mechanical Sciences* 29, pages 507–524.

- Fleck, N. A., Johnson, K., Mear, M. E., and Zhang, L. C. (1991). Cold rolling of foil . *Journal of Engineering Manufacture*, pages 119–131.
- Heistermann, F., Mellè, T., and ten Hompel, M. (2017). Digitalisierung in der Logistik: Antworten auf Fragen aus der Unternehmenspraxis . Technical report, Bundesvereinigung Logistik.
- Hensel, A. and Spittel, T. (1978). *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren* . VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Herbertz, R., Hermanns, H., and Labs, R. (2013). *Massivumformung kurz und bündig* . Industrieverband Massivumformung e.V., Hagen.
- Hinkfoth, R. (2002). *Massivumformung* . Wissenschaftsverlag Mainz, Aachen.
- Hitchcock, J. H. (1935). *Roll Neck Bearings, Appendix 1* . ASME Report of special research committee, New York.
- Hoff, H. and Dahl, T. (1955). *Grundlagen des Walzverfahrens* . Verlag Stahleisen, Düsseldorf.
- Hu, Y.-J., Sun, J., Wang, Q.-L., Yin, F.-C., and Zhang, D.-H. (2018). Characteristic analysis and optimal control of thickness and tension system on tandem cold rolling . *The International Journal of Advance Manufacturing Technology*, pages 2297–2312.
- J. Pyrhonen, V. Hrabovcova, R. S. S. (2016). *Electrical Machine Drives Control* . Wiley, Chichester, West Sussex, United Kingdom.
- Johnson, K. L. and Bentall, R. H. (1969). The onset of yield in the cold rolling of thin strip . *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, page 253.
- Koll, T., Bretschneider, M., Klinkberg, T., Luther, F., and Maas, B. (2016). Optimierter Dressierprozess verbessert die Eigenschaften verzinkter Stahloberflächen . *Stahl und Eisen Heft 10*, pages 53–57.
- Kopp, R. and Wiegels, H. (1998). *Einführung in die Umformtechnik* . Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen.
- Kramer, A. (1994). *Untersuchungen zum Kaltwalzen von dünnem Band und Folie nach dem Verfahren der Ähnlichkeitstheorie* . Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf.
- Kämper, J. (2019). *Produktions- und Prozesstechnische Bewertung der Produktivität von Kaltwalzwerken* . B.S. Thesis, Technische Universität Dortmund.

- Lippmann, H. and Mahrenholtz, O. (1967). *Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe, Band 1*. Springer, Berlin and Heidelberg and New York.
- Lyman, P. and Varian, H. R. (2000). How much Information . Technical report, School of Information Management and Systems (SIMS), Berkeley University of California.
- Möller, F., Spiekermann, M., Burmann, A., Pettenpohl, H., and Wenzel, S. (2017). Bedeutung von Daten im Zeitalter der Digitalisierung . Technical report, Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik IML.
- Müller, H.-D. (1981). *Beitrag zur Erstellung von Stichplänen zum Kaltwalzen dünner Bänder und Folien*. PhD thesis, Technische Universität Clausthal.
- Orowan, E. (1943). Graphical calculation of roll pressure with the assumptions of homogeneous compression and slipping friction . *Institution of Mechanical Engineers*, page 141.
- Overhagen, C. (2018). *Modelle zum Walzen von Flach- und Vollquerschnitten*. PhD thesis, Universität Duisburg-Essen.
- Paesold, D. (2006). Texturierverfahren bei der Herstellung kaltgewalzter Stahlbänder . *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik 37, No 7*, pages 619–622.
- Pawelski, H. (2017). Walzwerktechnik und Prozesskette des Walzens . Technical report, RWTH Aachen.
- Pawelski, O. and Pawelski, H. (2000). *Technische Plastomechanik*. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf.
- Pittner, J. and Simaan, A. (2008). Control of a continuous tandem cold metal rolling process . *Control Engineering Practice 16*, pages 1379–1390.
- Pittner, J. and Simaan, A. (2011). *Tandem Cold Metal Rolling Mill Control*. Springer, London.
- Rabe, M. (2020). Materialflusssimulation, Simulation in der Praxis . Technical report, TU Dortmund.
- Raquet, E. (1996). Verbesserung der Bandplanheit in Tandemstraßen durch axial verschiebbare Arbeitswalzen mit Spezialbombierung . *Technische Forschung Stahl*.
- Rieckmann, J. (1988). *Berechnung von Bandprofil und Planheit beim Kaltwalzen auf Sechs-Walzen-Walzwerken*. Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf.

- Roberts, W. L. (1978). *Cold Rolling of Steel*. Marcel Dekker, Inc, New York and Basel.
- Rosenthal, D., Kraemer, S., Klein, C., Geerkens, C., and Mueller, J. (2009). 20 years of CSP: Success story of an extraordinary technology. *Stahl und Eisen Vol. 129, Heft 11*, pages 73–89.
- Schwenzfeier, W., Herzog, A., and Hohenwarter, J. (1979). *Walzwerktechnik*. Springer, Wien and New York.
- Seitz, M. (2015). *Speicherprogrammierbare Steuerungen für die Fabrik- und Prozessautomation*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, Leipzig.
- Siebel, E. (1925). *Kräfte und Materialfluss bei der bildsamen Formänderung*. Verlag Stahleisen.
- Statista (2020). Geschätzte Stahlnachfrage in Industrie- und Schwellenländern in den Jahren 2012 bis 2021.
- Thamke, I. (2008). *Konstruktive Gestaltung und Auslegung eines koaxialen CVC-Walzenverschiebesystems*. PhD thesis, Universität Siegen.
- Tresca, H. (1864). *Mémoire sur l'écoulement des solides à de forte pressions*. Gauthier-Villars Verlag, Paris.
- Türk, M. (2000). *Optimierung des Walzprozesses und der Anlagenauslastung durch moderne Diagnoseverfahren und vernetzte Überwachungssysteme*. PhD thesis, RWTH Aachen.
- v. Karman, T. (1925). Beitrag zur Theorie des Walzvorgangs. *Angewandte Mathematik und Mechanik* 5, pages 139–141.
- v. Mises, R. (1913). Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, page 582 and 592.
- Wandinger, J. (2020). Ebene Elastizitätstheorie. Technical report, Hochschule München.
- Weber, K. H. (1973). *Grundlagen des Bandwalzens*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Wenig, H. (2014). General aspects of roll cooling for hot and cold rolling mills. *Seaisi Quarterly Journal, Band 43, Heft 2*, pages 49–56.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Exemplarischer Aufbau einer Tandemstraße	9
2.2	Walzenanordnung eines Duo-, Quarto- und Sexto-Gerüsts	12
3.1	Grafik des Walzspaltes	15
3.2	Verlauf der Oberfläche der oberen Arbeitswalze in Folge der a) Walzen- durchbiegung (gestrichelt), b) Walzendurchbiegung mit überlagertem ther- mischen Ballen	18
3.3	Ausgewählte Fließkurven von Stählen und NE-Metallen [Pawelski, 2017] . .	21
3.4	Abplattung der Walze nach Hitchcock	25
3.5	Einfluss der Banddicke die Verformung des Bandes im Walzspalt. Bei kon- stanter Reduktion von 50% nimmt die Einlaufdicke von a) ($h_0 = 0.14\text{mm}$) nach f) ($h_0 = 0.013\text{mm}$) ab. [Fleck et al., 1991]	26
3.6	Aufteilung der Fließebene in Streifen	27
3.7	Mechanische Walzspaltgrößen am Werkstoffstreifen [Pawelski and Pawelski, 2000]	28
3.8	Exemplarischer Druck- und Scherspannungsverlauf im Walzspalt ohne Band- zug	31
3.9	Exemplarischer Druck- und Scherspannungsverlauf im Walzspalt mit zusätz- lichem Bandzug	33
3.10	Einfluss der Bandzüge auf die Lage der Fließscheide im Walzspalt anhand des Walzdruckverlaufs [Weber, 1973]	33
3.11	Exemplarischer Druck- und Scherspannungsverlauf im Walzspalt mit Band- zug und unter Berücksichtigung der Verfestigung	34
3.12	Exemplarischer Druck- und Scherspannungsverlauf im Walzspalt mit Band- zug, unter Berücksichtigung der Verfestigung und der Abplattung	35
4.1	Tracking der Schweißnaht, die sich durch einen Peak in der Walzkraft jedes Gerüsts und in der aufgezeichneten Banddicke erkennen lässt	47
4.2	Histogramm über die Abweichung der Voreilung in Gerüst C1	49

4.3	Gerüstabhängiger Trackingfehler am Dickenmessgerät hinter Gerüst C5. Oben: Walzgeschwindigkeit $C5 = 2.21$ m/s, Unten: Walzgeschwindigkeit $C5 = 9.29$ m/s	50
5.1	Die Rolle der Daten in der Digitalisierung [Heistermann et al., 2017]	54
6.1	Einfluss der Einlaufbanddicke auf die Voreilung nach dem Streifenmodell	60
6.2	Fließkurve für die theoretischen Berechnungen	64
6.3	Histogramm über die Voreilung mit Markierungen der Berechnungswerte für verschiedene Reibwerte	64
6.4	Histogramm über die Walzkraft mit Markierungen der Berechnungswerte für verschiedene Reibwerte	65
6.5	Histogramm über das Walzmoment pro Arbeitswalze mit Markierungen der Berechnungswerte für verschiedene Reibwerte	65
6.6	Einfluss der Arbeitswalzenlaufleistung auf die Voreilung	66
6.7	Einfluss der Reibung auf die Voreilung nach dem Streifenmodell	67
6.8	Einfluss der Banddickenreduktion auf die Voreilung (oben: Auf Datenbasis, unten: Nach der Streifentheorie)	68
6.9	Einfluss der Einlaufbanddicke auf die Voreilung (oben: Auf Datenbasis, unten: Nach der Streifentheorie)	69
6.10	Einfluss des einlaufseitigen (oben) und auslaufseitigen (unten) spezifischen Bandzuges auf die Voreilung nach dem Streifenmodell	70
6.11	Einfluss der Fließgrenze auf die Voreilung nach dem Streifenmodell	71
6.12	Reibwertkurven, die die Abhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit beschreiben	72
6.13	Einfluss der Geschwindigkeit auf die Voreilung (oben: Auf Datenbasis, un- ten: Nach der Streifentheorie)	73
6.14	Globale Voreilungsänderung anhand von 698 Verzögerungsphasen	74
7.1	Konzept zur automatischen Identifikation der Schweißnaht anhand der Walz- kraft	79
7.2	Konzept zur Berechnung einer mittleren Voreilung auf Grundlage der Schweiß- nahtidentifikation	81
7.3	Überblick über die bekannten und unbekanntes Voreilungen bei unter- schiedlichen Geschwindigkeiten	82
7.4	Interpolation der Voreilungsänderung (linear: grün, nicht linear: blau)	83

8.1	Histogramm zur Abweichung der durch das Tracking ermittelten Voreilung zur berechneten Ist-Voreilung	86
9.1	Einfluss der Reduktion auf die Voreilung	XII
9.2	Einfluss der Einlaufbanddicke auf die Voreilung	XIII
9.3	Einfluss der Fließspannung auf die Voreilung	XIII
9.4	Einfluss des Einlaufzuges auf die Voreilung	XIII
9.5	Einfluss des Auslaufzuges auf die Voreilung	XIV
9.6	Einfluss der Reibung auf die Voreilung	XIV
9.7	Histogramm über die anhand des Schweißnahttrackings ermittelten Voreilungen in C1	XVIII
9.8	Histogramm über die anhand des Schweißnahttrackings ermittelten Voreilungen in C2	XVIII
9.9	Histogramm über die anhand des Schweißnahttrackings ermittelten Voreilungen in C3	XIX
9.10	Histogramm über die anhand des Schweißnahttrackings ermittelten Voreilungen in C4	XIX

Tabellenverzeichnis

3.1	Definierter Arbeitspunkt	31
3.2	Definierter Arbeitspunkt	32
6.1	Liste der Prozessparameter und Arbeitspunkt [Pawelski, 2017]	59
6.2	Übersicht Tendenzen [Pawelski, 2017]	61
6.3	Definierter Arbeitsbereich	63
6.4	Definierter Arbeitspunkt	63
8.1	Akzeptanzintervalle zur Überprüfung der Voreilungen	88
9.3	Auswertung der Abweichung zwischen berechneter und getrackter Voreilung XX	
9.3	Auswertung der Abweichung zwischen berechneter und getrackter Voreilung (Fortsetzung)	XXI
9.4	Auswertung der Randwerte	XXI
9.4	Auswertung der Randwerte (Fortsetzung)	XXII

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen

Zeichen	Erklärung
A	Bandquerschnitt
a	Beschleunigung
b	Bandbreite
C_m	Gerüstmodul
C_s	Bandmodul
D	Walzendurchmesser
E	Elatizitätsmodul
F_E	Bandzugkraft einlaufseitig
F_A	Bandzugkraft auslaufseitig
F_R	Walzkraft
h	Banddicke
k_f	Fließspannung
k_e	ebene Fließspannung
l	Bandlänge
l_d	gedrückte Länge
M_R	Walzmoment
p	vertikaler Druck am Streifenelement
p_n	Normaldruck am Streifenelement
q	horizontaler Druck am Streifenelement
R	Walzenradius
R'	angepasster Radius nach Hitchcock
s	Gerüstabstand
T	Temperatur
t	Zeit
V	Bandvolumen
v	Geschwindigkeit

Formelzeichen (Fortsetzung)

Zeichen	Erklärung
v_W	Walzgeschwindigkeit
x	Koordinatenrichtung
α	Koordinatenwinkel
Δh	absolute Dickenabnahme
$\Delta \kappa$	Voreilungsänderung
ε	relative Dickenabnahme (Reduktion)
$\dot{\varepsilon}$	Umformgeschwindigkeit
θ	Walzwinkel
κ_A	Voreilung
κ_E	Nacheilung
μ	Reibungszahl
ν	Poissonzahl
σ	Spannung
σ_v	Vergleichsspannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
τ	Schubspannung

Tiefgestellte Indizes

Zeichen	Erklärung
E	Walzspalteingang
A	Walzspaltausgang
F	Fließscheide
1	Gerüst 1
2	Gerüst 2
3	Gerüst 3
4	Gerüst 4
5	Gerüst 5
x	Gerstnummer
'	angepasste Größen unter Berücksichtigung der Hitchcockschen Walzenabplattung
max	Maximum
min	Minimum

Tiefgestellte Indizes (Fortsetzung)

Zeichen	Erklärung
<i>soll</i>	Soll-Wert
<i>avg</i>	Mittelwert
<i>HighSpd</i>	Hohe Geschwindigkeit
<i>LowSpd</i>	Niedrige Geschwindigkeit

Anhang

A: Einfluss ausgewählter Größen auf die Voreilung nach [Pawelski, 2017]

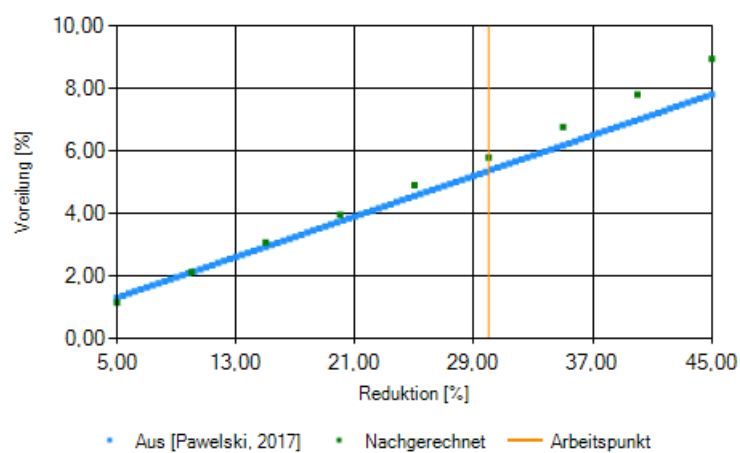


Abbildung 9.1 Einfluss der Reduktion auf die Voreilung

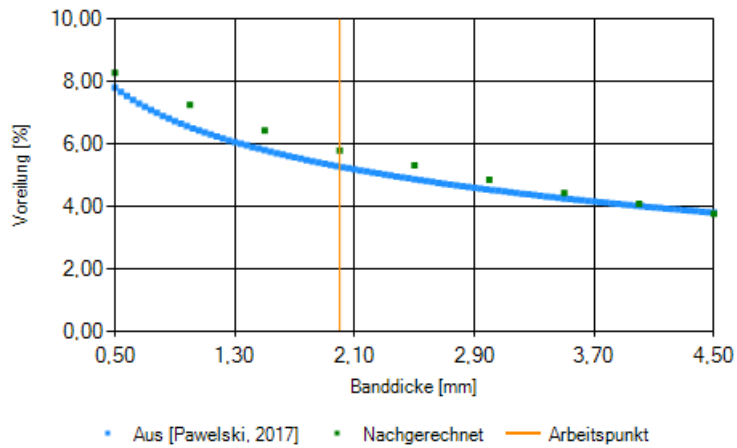


Abbildung 9.2 Einfluss der Einlaufbanddicke auf die Voreilung

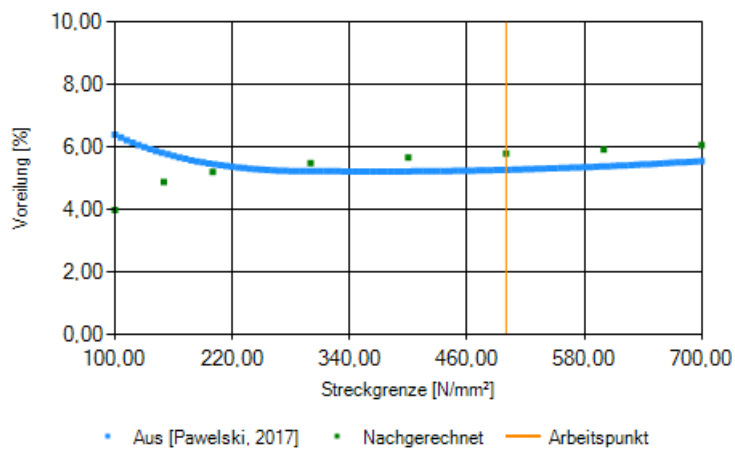


Abbildung 9.3 Einfluss der Fließspannung auf die Voreilung

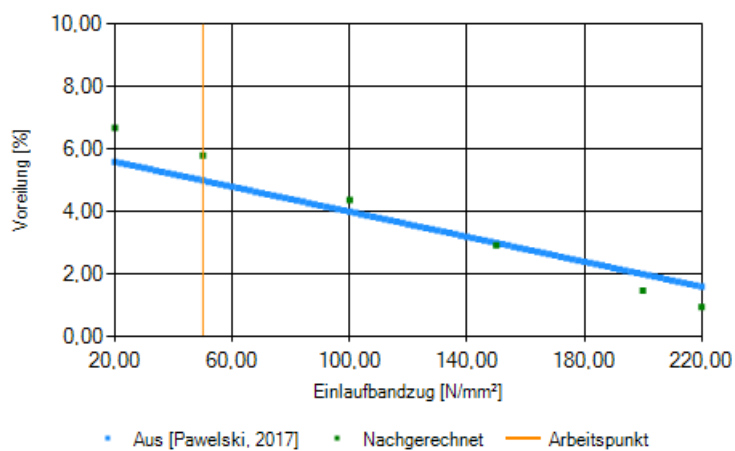


Abbildung 9.4 Einfluss des Einlaufzuges auf die Voreilung

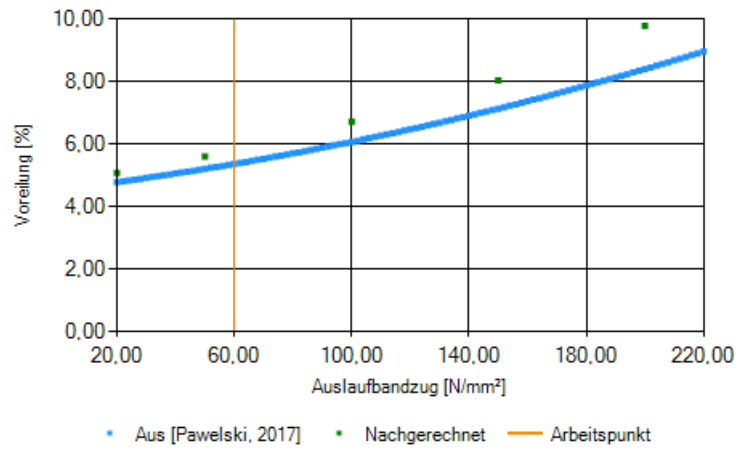


Abbildung 9.5 Einfluss des Auslaufzuges auf die Voreilung

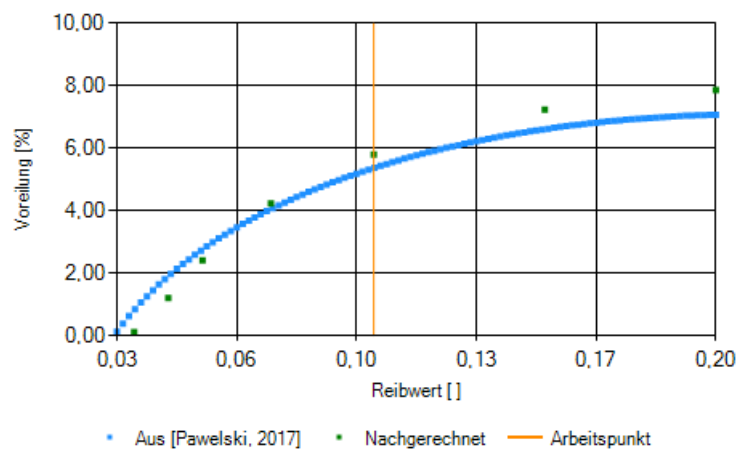


Abbildung 9.6 Einfluss der Reibung auf die Voreilung

B: Exemplarische Zusammenfassungen der Schweißnahterkennung und Voreilungsbestimmung anhand der Walzkraft

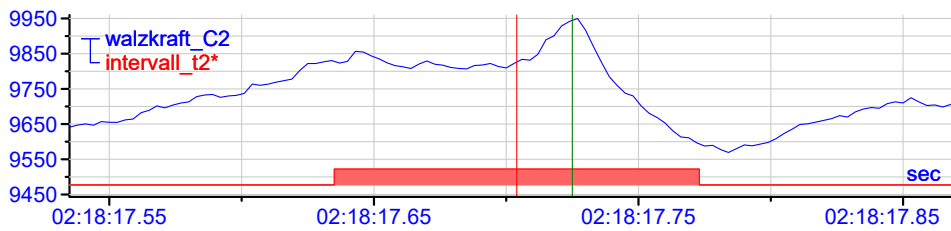
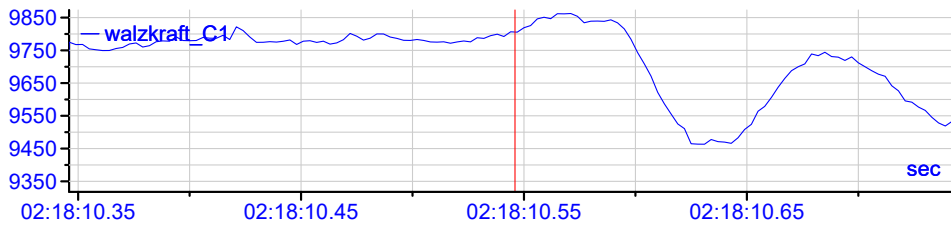
Produktwechsel:

Breite [mm]: 1099 → 1099
 Einlaufdicke [mm]: 2,30 → 2,30



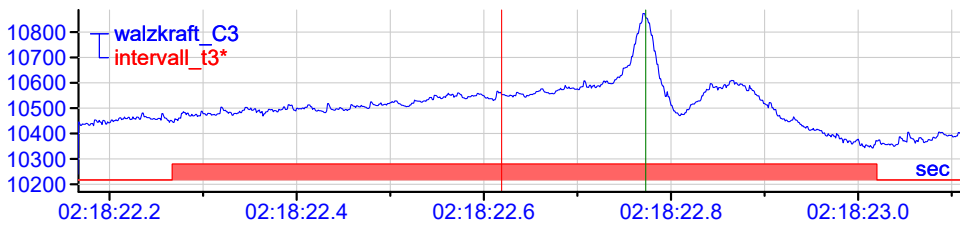
Informationen:

Datum: 05.08.2018
 Beginn: 02:16:23



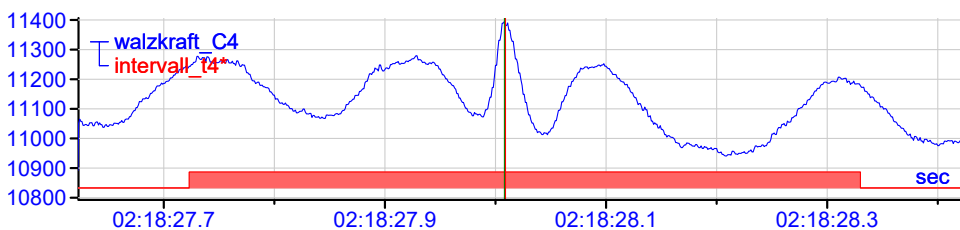
Voreilungen C1:

Ist-Wert: 2,35%
 Tracking-Wert: → 2,01%



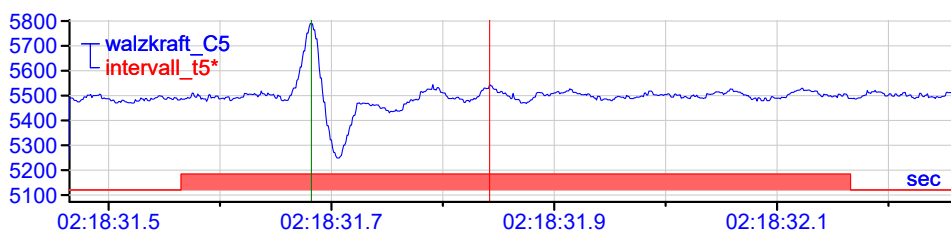
Voreilungen C2:

Soll-Wert: 3,01%
 Tracking-Wert: → 1,00%



Voreilungen C3:

Soll-Wert: 4,16%
 Tracking-Wert: → 4,16%



Voreilungen C4:

Soll-Wert: 2,57%
 Tracking-Wert: → 7,01%

Zusammenfassung	C1	C2	C3	C4
Δk	1,00 %	5,00 %	6,00 %	8,00 %
k min	-1,00 %	-1,00 %	-1,00 %	-1,00 %
k max	5,00 %	4,00 %	4,00 %	6,00 %
k Soll-Wert	2,35 %	3,01 %	4,16 %	2,57 %
k Tracking-Wert	2,01 %	1,00 %	4,16 %	7,01 %

Legende:

roter Marker: Zeitpunkt der Schweißnaht im nächsten Gerüst unter Verwendung der Soll-Voreilung
 grüner Marker: Zeitpunkt der Schweißnaht im nächsten Gerüst durch das Walzkraftsignal

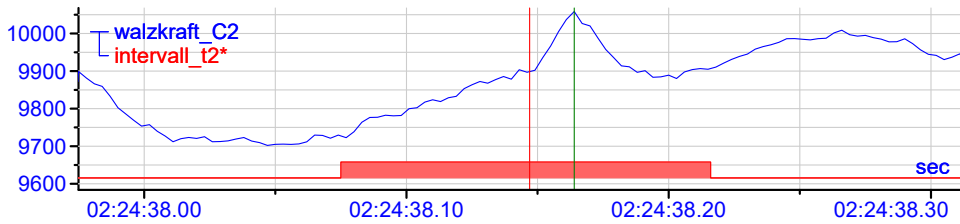
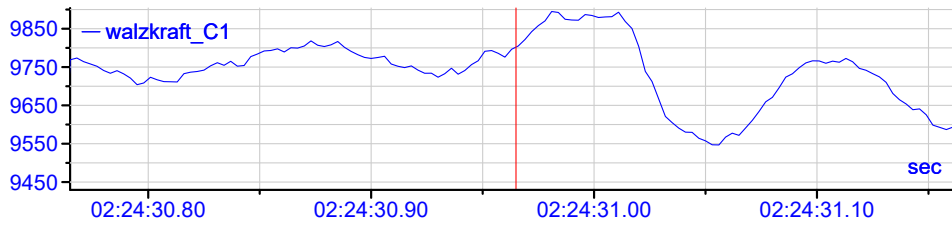
Produktwechsel:

Breite [mm]: 1099 → 1099
 Einlaufdicke [mm]: 2,30 → 2,30

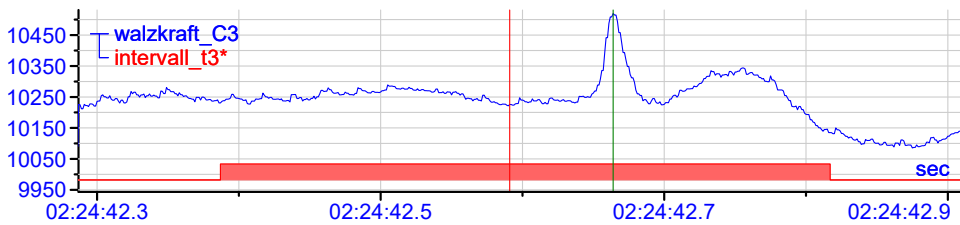


Informationen:

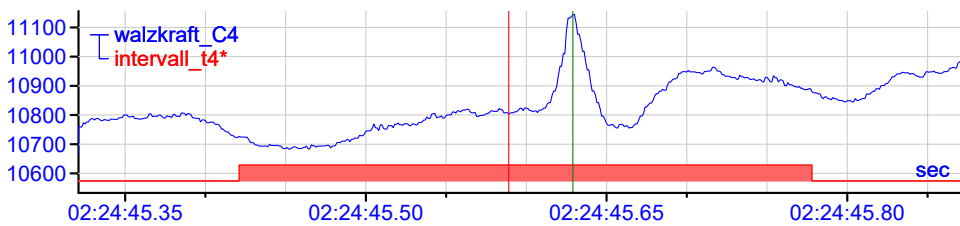
Datum: 05.08.2018
 Beginn: 02:21:23



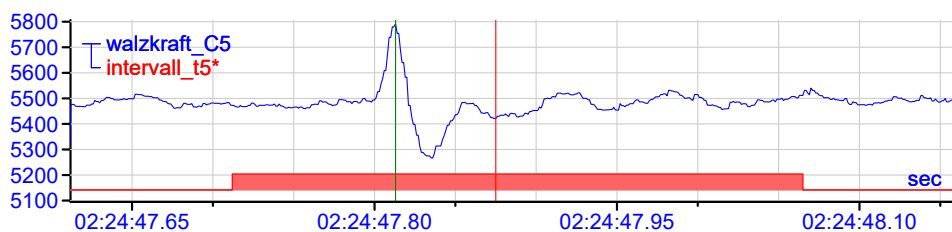
Voreilungen C1:
 Ist-Wert: 2,22%
 Tracking-Wert: → 1,91%



Voreilungen C2:
 Soll-Wert: 2,98%
 Tracking-Wert: → 1,29%



Voreilungen C3:
 Soll-Wert: 3,86%
 Tracking-Wert: → 2,49%



Voreilungen C4:
 Soll-Wert: 2,42%
 Tracking-Wert: → 5,27%

Zusammenfassung	C1	C2	C3	C4
Δk	1,00 %	5,00 %	6,00 %	8,00 %
k min	-1,00 %	-1,00 %	-1,00 %	-1,00 %
k max	5,00 %	4,00 %	4,00 %	6,00 %
k Soll-Wert	2,22 %	2,98 %	3,86 %	2,42 %
k Tracking-Wert	1,91 %	1,29 %	2,49 %	5,27 %

Legende:

roter Marker: Zeitpunkt der Schweißnaht im nächsten Gerüst unter Verwendung der Soll-Voreilung
 grüner Marker: Zeitpunkt der Schweißnaht im nächsten Gerüst durch das Walzkraftsignal

C: Histogramme über die anhand der Schweißnaht ermittelten Voreilungen

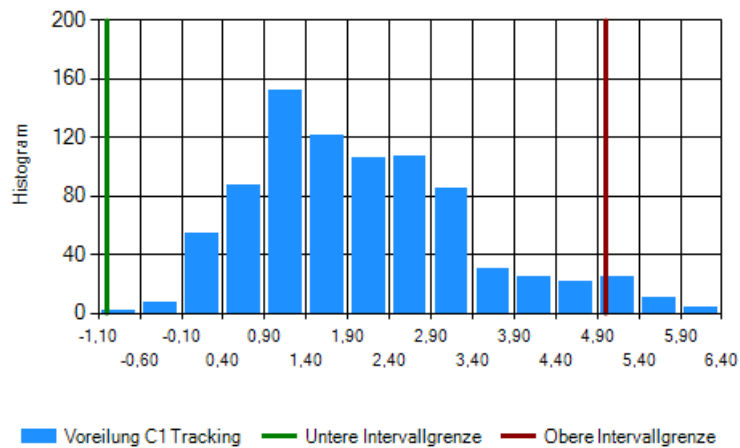


Abbildung 9.7 Histogramm über die anhand des Schweißnahttrackings ermittelten Voreilungen in C1

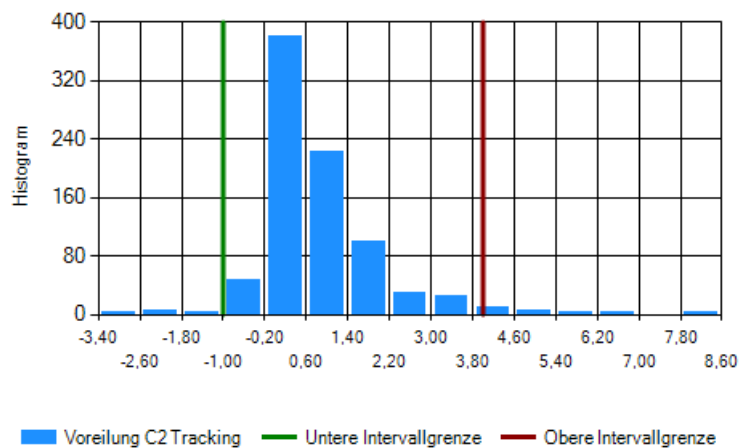


Abbildung 9.8 Histogramm über die anhand des Schweißnahttrackings ermittelten Voreilungen in C2

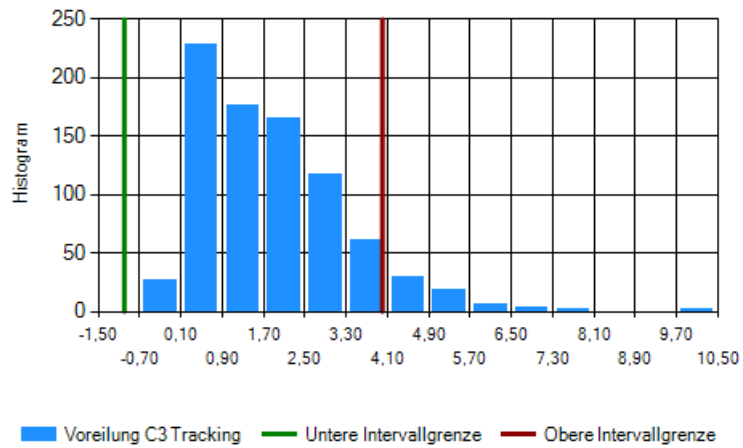


Abbildung 9.9 Histogramm über die anhand des Schweißnahttrackings ermittelten Voreilungen in C3

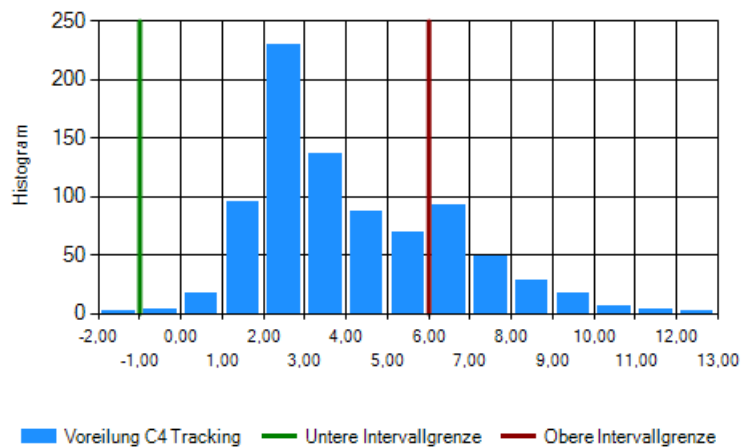


Abbildung 9.10 Histogramm über die anhand des Schweißnahttrackings ermittelten Voreilungen in C4

D: Tabellen zur Verifikation und Validierung des Konzepts

Tabelle 9.3 Auswertung der Abweichung zwischen berechneter und getrackter Voreilung

Nr.	Abweichung	Ursache
1	$\Delta\kappa_1 = -0.87 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
2	$\Delta\kappa_1 = +0.90 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
3	$\Delta\kappa_1 = -0.92 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
4	$\Delta\kappa_1 = +0.50 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
5	$\Delta\kappa_1 = -1.02 \%$	Schweißnaht in C2 nicht eindeutig
6	$\Delta\kappa_1 = -0.75 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
7	$\Delta\kappa_1 = -0.88 \%$	Schweißnaht in C2 nicht eindeutig
8	$\Delta\kappa_1 = +0.53 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
9	$\Delta\kappa_1 = +0.57 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
10	$\Delta\kappa_1 = -0.81 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
11	$\Delta\kappa_1 = +0.51 \%$	Schweißnaht falsch erkannt
12	$\Delta\kappa_1 = -0.94 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
13	$\Delta\kappa_1 = -0.81 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
14	$\Delta\kappa_1 = -1.00 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
15	$\Delta\kappa_1 = -0.71 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
16	$\Delta\kappa_1 = -0.81 \%$	Schweißnaht falsch erkannt
17	$\Delta\kappa_1 = -0.99 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
18	$\Delta\kappa_1 = -0.72 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
19	$\Delta\kappa_1 = -1.03 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
20	$\Delta\kappa_1 = -0.70 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
21	$\Delta\kappa_1 = -0.73 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
22	$\Delta\kappa_1 = -0.71 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
23	$\Delta\kappa_1 = -0.71 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
24	$\Delta\kappa_1 = -0.74 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
25	$\Delta\kappa_1 = -0.71 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt
26	$\Delta\kappa_1 = -0.91 \%$	Schweißnaht falsch erkannt
27	$\Delta\kappa_1 = -0.70 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
28	$\Delta\kappa_1 = -0.97 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
29	$\Delta\kappa_1 = -0.71 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
30	$\Delta\kappa_1 = -0.75 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1

Tabelle 9.3 Auswertung der Abweichung zwischen berechneter und getrackter Voreilung (Fortsetzung)

Nr.	Abweichung	Ursache
31	$\Delta\kappa_1 = -1.07 \%$	Schweißnaht in C2 nicht eindeutig
32	$\Delta\kappa_1 = -1.07 \%$	Schweißnaht falsch erkannt
33	$\Delta\kappa_1 = -1.01 \%$	Schweißnaht falsch erkannt
34	$\Delta\kappa_1 = -1.01 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
35	$\Delta\kappa_1 = +0.58 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
36	$\Delta\kappa_1 = +0.65 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
37	$\Delta\kappa_1 = -0.71 \%$	Schweißnaht in C2 nicht eindeutig
38	$\Delta\kappa_1 = -0.87 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
39	$\Delta\kappa_1 = -0.51 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
40	$\Delta\kappa_1 = -0.86 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
41	$\Delta\kappa_1 = -1.01 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
42	$\Delta\kappa_1 = -0.98 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
43	$\Delta\kappa_1 = -1.13 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
44	$\Delta\kappa_1 = -0.78 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1
45	$\Delta\kappa_1 = -0.89 \%$	Schweißnaht korrekt erkannt - Abweichung aus C1

Tabelle 9.4 Auswertung der Randwerte

Nr.	Auffälligkeit	Ursache
1	$\kappa_4 = 11.48 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
2	$\kappa_4 = 10.26 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
3	$\kappa_4 = 9.06 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
4	$\kappa_2 = 5.65 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
5	$\kappa_4 = 11.24 \%$	Fehlerhafte Daten
6	$\kappa_4 = 10.20 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
7	$\kappa_4 = 10.62 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
8	$\kappa_4 = 9.51 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
9	$\kappa_4 = 10.29 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
10	$\kappa_4 = -1.86 \%$	Anlage angehalten
11	$\kappa_3 = 6.85 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
12	$\kappa_2 = -3.35 \%$	Schweißnaht in C2 falsch erkannt

Tabelle 9.4 Auswertung der Randwerte (Fortsetzung)

Nr.	Auffälligkeit	Ursache
13	$\kappa_2 = -1.72 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
14	$\kappa_4 = 10.40 \%$	Fehlerhafte Daten
15	$\kappa_3 = 7.02 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
16	$\kappa_2 = -1.31 \%$	Schweißnaht in C2 falsch erkannt
17	$\kappa_4 = 9.67 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
18	$\kappa_4 = 9.39 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
19	$\kappa_4 = 9.34 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
20	$\kappa_4 = 11.99 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
21	$\kappa_4 = 9.53 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
22	$\kappa_4 = 9.01 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
23	$\kappa_4 = 9.05 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
24	$\kappa_4 = 9.33 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
25	$\kappa_4 = 9.15 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
26	$\kappa_4 = 9.84 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
27	$\kappa_2 = 8.61 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
28	$\kappa_4 = 12.65 \%$	Schweißnaht in C4 falsch erkannt
29	$\kappa_4 = 9.24 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
30	$\kappa_2 = -2.17 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
31	$\kappa_2 = -1.47 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
32	$\kappa_2 = -2.21 \%$	Schweißnaht in C2 falsch erkannt
33	$\kappa_2 = 7.97 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
34	$\kappa_4 = 9.08 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
35	$\kappa_4 = 9.15 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
36	$\kappa_4 = 9.15 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
37	$\kappa_4 = 9.14 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
38	$\kappa_2 = -1.82 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
39	$\kappa_4 = 9.82 \%$	Anlage angehalten
40	$\kappa_2 = -1.65 \%$	Schweißnaht in C1 falsch
41	$\kappa_2 = -2.53 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
42	$\kappa_2 = -2.91 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
43	$\kappa_2 = -2.71 \%$	Schweißnahterkennung korrekt
44	$\kappa_2 = -2.08 \%$	Schweißnahterkennung korrekt

E: Eidesstattliche Versicherung