



BMBF- Förderprogramm

Integrierter Umweltschutz in der Metallerzeugung

Einsparung an Rohstoffen und Reduzierung der Umweltbelastung durch Verbesserung des Ausbringens bei der Erzeugung von Stahlbändern

Schlussbericht

zu dem vom BMBF geförderten Verbundprojekt der Partner

Betriebsforschungsinstitut, VDEh-Institut für Angewandte Forschung GmbH (BFI)

und

EKO Stahl GmbH, Eisenhüttenstadt (EKO)

Laufzeit: 01.09.2002 – 31.08.2006

Autoren: Roger Lathe (BFI)
Frank Molder (EKO)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 01 RW 0172 und 01 RW 0173 gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Aufgabenstellung</i>	1
2	<i>Voraussetzungen</i>	2
3	<i>Planung und Ablauf des Vorhabens</i>	2
3.1	Bestimmung der Vorbandbreite	2
3.1.1	Versuche am Versuchswalzwerk	2
3.1.2	Ableitung eines Berechnungsmodells für die Vorausberechnung der Breite	2
3.1.3	Adaption an eine Warmbandstraße	3
3.2	Vermeidung von Unsymmetrien der Bandform in der Warmbandvorstraße	3
3.2.1	Betriebsmessungen	3
3.2.2	Auswertung und Analyse der Betriebsmessungen	3
3.2.3	Entwicklung eines Modells zur Voreinstellung der Walzstraße	3
3.2.4	Implementierung des Modells	3
3.2.5	Überprüfung der Geometrie des Fertigbandes	3
3.3	Installation und Inbetriebnahme von Meßsystemen	4
4	<i>Stand der Wissenschaft und Technik</i>	4
4.1	Bandbreite	4
4.2	Bandsäbel	4
4.3	Banddickenprofil	9
4.4	Schlussfolgerung	10
5	<i>Zusammenarbeit mit anderen Stellen</i>	11
6	<i>Genutzte Versuchseinrichtungen und industrielle Warmbandstraße</i>	11
6.1	Versuchswalzwerk für Plastilinproben	11
6.2	Versuchswalzwerk am MPI für Eisenforschung	12
6.3	Warmbreitbandstrasse der EKO-Stahl GmbH	13
7	<i>Ergebnisse</i>	19
7.1	Analytischen Breiungsmodells zur Vorausberechnung der Vorbandbreite	19
7.1.1	Versuche am Versuchswalzwerk	20
7.1.2	Ableitung einer empirischen Breiungsgleichung	24
7.1.3	Anpassung der Breiungsformel an die Warmbandvorstraße	29
8	<i>Laborversuche zur Untersuchung der Bandsäbelentstehung und -reduzierung</i>	34
8.1	Versuche mit Plastilinproben	34
8.1.1	Einfluss unsymmetrischen Stauchens auf die Säbelentstehung	35
8.1.2	Einfluss der Seitenführungen auf die durch Schwenken hervorgerufene Säbelentstehung	38

8.2	Versuche mit Bleiprobe	42
8.2.1	Vermessung der Proben	44
8.2.2	Einfluss unsymmetrischen Stauchens auf die Säbelentstehung	46
8.2.3	Einfluss des Walzenschwenkens auf die Säbelentstehung	49
8.2.4	Einfluss des Gegenschwenkens bei zuvor generierten Säbelproben	52
8.2.5	Einfluss des Walzens mit geradem Walzspalt bei zuvor generierten Säbelproben	54
8.2.6	Einfluss des leichten Walzenschwenkens bei zuvor generierten Säbelproben	55
8.2.7	Einfluss eines keilförmigen Dickenprofils auf die Säbelbildung	58
8.2.8	Einfluss der Seitenführungen bei der Generierung und dem Walzen von Säbelproben	59
9	<i>Betriebsuntersuchungen zur Säbelbildung an einer Warmbandvorstrasse</i>	64
9.1	Messsystem zur Erfassung des Bandsäbels	64
9.2	Bestimmung des Bandsäbels mit Hilfe der gemessenen Größen	66
9.2.1	Umrechnung der zeitbezogenen Werte in ortsbezogene Werte	66
9.2.2	Berechnung der Bandkrümmung unter Verwendung der Bandkantenpositions- und neigungswerte	66
9.2.3	Berechnung der Bandkrümmung ohne Verwendung der Bandkantenneigungswerte	68
9.2.4	Berechnung der Koeffizienten des die Bandmittenlinie beschreibenden Polynoms	70
9.2.5	Zusammenfassende Vorgehensweise bei der Bandkrümmungsbestimmung	72
9.3	Datenbasierte Modellierung der Bildung des Bandsäbels	74
9.3.1	Datenerfassung	74
9.3.1.1	Prozessparameter-Vorwalzen	74
9.3.1.2	Prozessparameter-Ofen	77
9.3.2	Bestimmung der relevanten Einflussgrößen	81
9.3.3	Anwendung der neuronalen Netze für die datenbasierte Modellierung	86
9.4	Bewertung der datenbasierten Modellierung	90
9.5	Installation und Verwendung des datenbasierten Modells zur Vorsteuerung des Horizontalgerüsts	91
10	<i>Weitere Maßnahmen zur Vermeidung des Bandsäbels</i>	93
10.1	Vermeidung von Bandsäbeln durch verbesserte Seitenführungen	96
11	<i>Voraussichtlicher Nutzen und Ergebnisauswertung</i>	97
11.1	Wirtschaftlichkeit und umweltentlastende Effekte am Beispiel der EKO-Stahl	97
12	<i>Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens</i>	98
13	<i>Geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse</i>	98
14	<i>Literaturverzeichnis</i>	99

1 Aufgabenstellung

Die ständige Verbesserung von Produktionsverfahren, so auch des Warmwalzprozesses bei der Herstellung von Stahlbändern, ist auch zukünftig eine ständige und unabdingbare Notwendigkeit für jedes Stahlunternehmen, um auf dem Weltmarkt bestehen zu können.

Eines der bei der Warmbänderzeugung bestehenden Probleme ist die z.T. unzureichende Einstellung von Vorband- und Fertigbandbreite. Deshalb sind Breitenzuschläge erforderlich mit der Folge von erhöhtem Material-, Rohstoff- und Energieverbrauch und somit verringerter Wirtschaftlichkeit.

Von gleicher Bedeutung für den Prozess und zusätzlich auf Produktqualität und Ausbringen ist die Vermeidung von so genannten Bandsäbeln. Dies sind Abweichungen von der Geradheit des Bandes, die sowohl die Gleichmäßigkeit des Banddickenprofils über der Bandlänge in der Fertigstraße nachteilig beeinflussen, als auch zu erheblichen Prozessstörungen bis hin zu den Bandbehandlungslinien, die sich dem Kaltwalzprozess anschließen, führen können.

Das Ziel der geplanten Arbeiten bestand darin, Strategien zu entwickeln und in Produktionsanlagen zu implementieren, die bereits in der Warmbandvorstraße zu einer günstigen Beeinflussung der Maßhaltigkeit der Bandbreite, des Banddickenprofils sowie der Geradheit des Bandes führen und damit Qualität und Ausbringen deutlich erhöhen.

Das sollte u.a. dadurch erreicht werden, dass die unterschiedlichen Erfahrungen aus dem Bereich der industriellen Bandherstellung und den Möglichkeiten der Forschung zusammengeführt werden. Als rein technologisches Ergebnis ist eine sichere Prozessführung bei der Herstellung von Bänderzeugnissen zu erwarten. Dies gilt vor allem hinsichtlich der geometrischen Genauigkeit der gewalzten Produkte als auch im Hinblick auf eine verbesserte Prozesssicherheit mit geringeren Störungen und höherem Materialausbringen. Als Folge einer Verbesserung der Prozessführung ergibt sich gleichzeitig ein geringerer Materialverbrauch verbunden mit deutlichen Energie- und Rohstoffeinsparungen.

Als Ziel wurde geplant, eine Erhöhung der Ausbringung von 0,1% bis 0,2% zu erlangen. Dies würde bei einer Vermeidung von 50% der Bandsäbelfehler und einer Verminderung der Breitenzuschläge von ca. 1mm erreicht werden. Ausgehend von einer jährlichen Warmbandproduktion der EKO-Stahl von 1,8 - 2 Mio. t ergäbe sich bei einer Ausbringungsverbesserung von 0,1% eine Einsparung von 1800-2000 t Warmband pro Jahr. Diese Einsparung entspricht nach einer Auswertung des Ausschusses „Energiewirtschaft europäischer Hüttenwerke“ eine jährliche Energieeinsparung von 32 400-36 000 GJ sowie eine jährliche Vermeidung der CO₂-Emission um 3200-3600 t.

2 Voraussetzungen

Voraussetzung für die Durchführung des Projektes war u.a. die Erfassung von Prozessdaten sowie der Bandgeometrie and der Vor- und Fertigstrasse der Warmbreitbandstrasse der EKO-Stahl. Die Prozessdaten sollten dabei sowohl online (für die später zu installierende Steuerung) als auch offline (für Analyse der Daten und die zu entwickelnden Programme) zur Verfügung stehen. Für die Erfassung der Bandgeometrie, insbesondere der Erfassung des Bandsäbels, war die Installation eines neuen Messsystems an der Vorstrasse erforderlich.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit des Betriebsforschungsinstituts und der EKO Stahl an der Warmbreitbandstrasse der EKO Stahl durchgeführt. Der im Folgenden kurz beschriebene Arbeitsplan ist in drei Themenschwerpunkte aufgeteilt, innerhalb derer die durchzuführenden Untersuchungsschritte aufgeführt sind.

3.1 Bestimmung der Vorbandbreite

Die Stichfolge am Reversier- und Vorgerüst ist immer eine Kombination aus mehreren Horizontal- und Vertikalstichen. Die für eine Onlineberechnung geeigneten veröffentlichten Berechnungsmodelle eignen sich nur für die Vorausberechnung der Breite eines Horizontalstichs und können deswegen nur bedingt für eine ausreichend genaue Breitungsberechnung für solche kombinierten Stichfolgen herangezogen werden.

3.1.1 Versuche am Versuchswalzwerk

Durch Modellversuche an einem Versuchswalzwerk wird das Breitungverhalten an Bandproben bei einer Folge von Horizontal- und Vertikalstichen ermittelt. Die Versuche werden mit Stahlproben unterschiedlichen Werkstoffs bei betriebsüblicher Walztemperatur und mit Bleiproben bei Raumtemperatur durchgeführt. (Das Fließverhalten von Bleiproben bei Raumtemperatur ist vergleichbar mit dem von Stahlproben bei Warmwalztemperatur. Bleiproben haben dabei den Vorteil einer wesentlich besseren Handhabung).

3.1.2 Ableitung eines Berechnungsmodells für die Vorausberechnung der Breite

Es wird eine Analyse der Versuchsergebnisse im Hinblick auf Abhängigkeiten und Einflussgrößen durchgeführt, die für das Breitungverhalten maßgeblich sind. Basierend auf diesen Ergebnissen wird ein Berechnungsmodell für die Vorausberechnung der Bandbreite für eine Folge von Horizontal- und Vertikalstichen entwickelt.

3.1.3 Adaption an eine Warmbandstraße

Das Berechnungsmodell wird in der Vorstraße einer Warmbandstraße zunächst off-line überprüft und für den Einsatz im Walzbetrieb optimiert. Anhand von Messungen der Bandbreite sowohl nach dem Vorgerüst als auch nach der Fertigstraße erfolgt eine Adaption der Modellparameter

3.2 Vermeidung von Unsymmetrien der Bandform in der Warmbandvorstraße

Bei der Walzung an einem Vorgerüst können zwei Arten von Formabweichungen auftreten. Und zwar ein über der Bandbreite unsymmetrisches (keilförmiges) Dickenprofil sowie Geradheitsabweichungen über der Bandlänge im Sinne von seitlichen Bandkrümmungen in der Bandebene (Bandsäbel).

3.2.1 Betriebsmessungen

Es werden Betriebsmessungen durchgeführt, bei denen sowohl alle verfügbaren Prozessdaten als auch die mit Hilfe neuer Messsysteme ermittelten Bandform erfasst und für die spätere Analyse gespeichert werden. Das Messsystem wird dabei so ausgelegt, dass eine online Anbindung an das zu entwickelnde Steuersystem möglich ist.

3.2.2 Auswertung und Analyse der Betriebsmessungen

Die in Betriebsmessungen aufgenommenen Messdaten werden ausgewertet und die Abhängigkeit der erzielten Vor- und Fertigbandgeometrie von unterschiedlichen Prozessparametern ermittelt und analysiert.

3.2.3 Entwicklung eines Modells zur Voreinstellung der Walzstraße

Algorithmen zur optimalen Voreinstellung der Vorstraße eines Warmbreitbandwalzwerks werden formuliert. Auf der Basis der Auswertungsergebnisse von Betriebsmessungen werden die Algorithmen an die Prozessbedingungen der Walzstraße adaptiert.

3.2.4 Implementierung des Modells

Das Modell zur optimalen Voreinstellung der Vorbandstraße wird betrieblich implementiert und getestet. Dabei sind Feinabstimmungen unter Betriebsbedingungen vorzunehmen.

3.2.5 Überprüfung der Geometrie des Fertigbandes

Eine Bewertung der implementierten Algorithmen zur gezielten Beeinflussung des Vorbandprofils wird anhand einer Beurteilung der Profilform des Bandes vorgenommen. Dazu wird die Geometrie

des Bandes vermessen. Zur Überprüfung wird ein Vergleich des Ist-Zustandes der Profilform vor und nach der Installation des Modells vorgenommen.

3.3 Installation und Inbetriebnahme von Meßsystemen

Für die Durchführung der Untersuchungen ist der Einsatz von bis dahin noch nicht installierten Messgeräten zur Erfassung der Geradheitsabweichungen über der Bandlänge (Bandsäbelmessung) erforderlich. Geeignete Installationsorte für die Messgeräte sind festzulegen. Die Umgebungsbedingungen erfordern eine Einhausung der Messgeräte. Die Einhausungen und Haltevorrichtungen werden konstruiert und gefertigt. Danach erfolgen der Einbau der Geräte und die Inbetriebnahme an der Walzstraße.

4 Stand der Wissenschaft und Technik

4.1 Bandbreite

Nach dem Stand der Technik wird die Bandbreite am Vorgerüst von Warmbandstraßen meist empirisch mit Hilfe der Erfahrung der Bedienmannschaften voreingestellt. Eine Reihe wissenschaftlicher und praktischer Untersuchungen hatten sich damit beschäftigt, die Breite über der Vorbandlänge möglichst konstant einzustellen, was inzwischen auch mit zufrieden stellendem Erfolg praktiziert wird [22, 23]. Weitere Untersuchungen hatten zum Ziel, die Brammenbreite in der Vorstraße nach einem Horizontalstich, z.T. auch mit einem vorangegangenen Vertikalstich, vorzubestimmen [18, 1, 11, 16]. Allerdings gab es noch keine zufrieden stellende Untersuchungen zu der wichtigen Frage, wie sich die absolute Vorbandbreite nach einer Folge mehrerer Horizontal-/Vertikalstichkombinationen einstellt. Gerade die ausreichende Kenntnis dieser Zusammenhänge ist Voraussetzung dafür, die sich tatsächlich einstellende Vorbandbreite und dann auch die Fertigbandbreite genauer bestimmen und einstellen zu können als dies bis dahin möglich war. Hierin liegt ein wichtiges Materialeinsparpotential.

4.2 Bandsäbel

Zu der anderen wichtigen Geometriegröße, dem so genannten Bandsäbel, waren eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt worden, die in [4] zusammenfassend ausgewertet wurden. Hierin wurden überwiegend die Auswirkungen von geometrischen Unsymmetrien, vor allem des Vorband-Dickenprofils und z.T. auch Säbeln in ihrer Auswirkung auf den Bandlauf und die sich in der Warmbandfertigstraße einstellenden Unsymmetrie des Dickenprofils über der Bandlänge beschrieben. In weiteren Untersuchungen [13] wurde aufgezeigt, dass eine nicht parallele Achsausrichtung von Ober- und Unterwalze unter Walzlast eine Säbelausbildung verursachen kann. Eindeutige Hinweise zur Vermeidung von Bandsäbeln an Vorbändern in der Warmbandvorstraße waren jedoch nur ansatzweise aber keineswegs genügend untersucht worden, um wirksame Maßnahmen zu deren Vermeidung treffen zu können.

Mit dem sogenannten „Bandsäbel“ wird eine längliche Krümmung des Bandes bezeichnet, welche entlang der gesamten Bandlänge auftritt. Im folgenden **Bild 1** ist ein Bandsäbel schematisch dargestellt. Zur Verdeutlichung ist die Krümmung übertrieben groß gezeichnet.

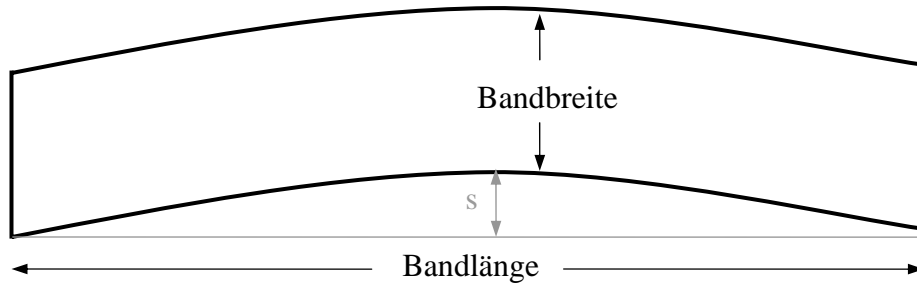


Bild 1: Schematische Darstellung eines Bandsäbels

In der Praxis wird die Größe eines Bandsäbels durch den maximalen Abstand der Bandkante von der Verbindungslinie der beiden Bandenden bezeichnet, im Bild 1 mit dem Buchstaben „s“ gekennzeichnet.

Als Bandhaken wird eine Bandkrümmung bezeichnet, welche nicht entlang der gesamten Bandlänge, sondern nur an den Bandenden auftritt (**Bild 2**). Hier unterscheidet man zwischen einem Kopf- und einem Fußhaken. Kennzeichnende Größen sind die Länge des Hakens sowie deren Größe, die ähnlich wie bei der Bandsäbelbestimmung durch den maximalen Abstand der Bandkante zu der Verlängerung der geraden Kante bezeichnet wird.

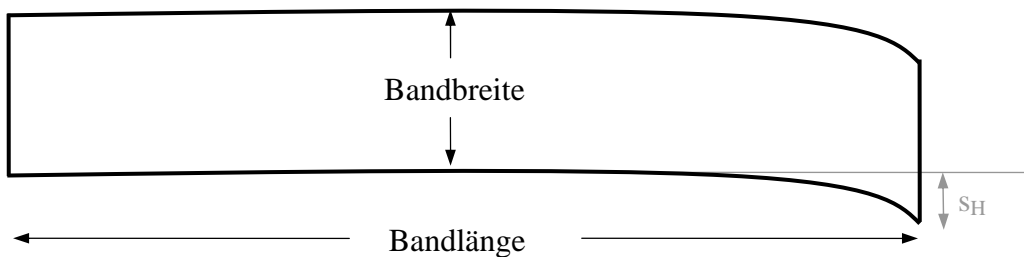


Bild 2: Schematische Darstellung eines Bandhakens

Als S-Form wird ein Geometriefehler bezeichnet, bei dem die Krümmung an beiden Bandenden auftritt und zwar in unterschiedlicher Richtung (**Bild 3**).

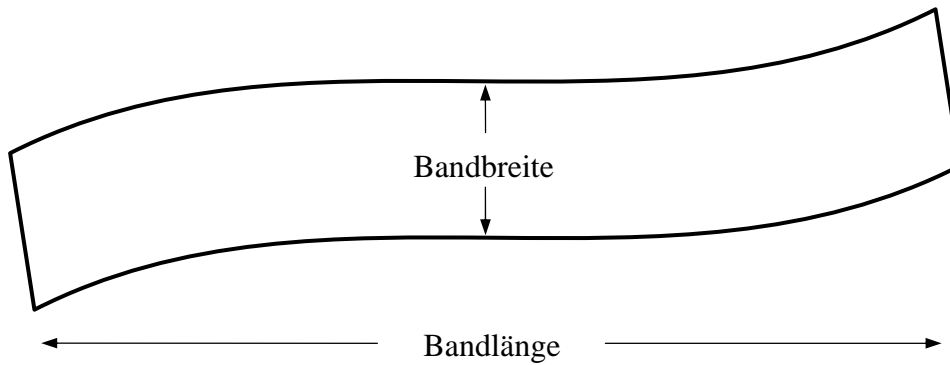


Bild 3: Schematische Darstellung eines S-förmigen Bandes

Entsprechend der Ähnlichkeit zum Bandsäbel sind auch die Einflussfaktoren beim Bandhaken sowie der S-Form prinzipiell dieselben, mit dem Unterschied, dass sie bei Entstehung des Bandhakens nur zu Beginn oder zu Ende des Walzstiches die Walzform beeinflussen. Dies kann mehrere Ursachen haben. Zum einen ist es möglich, dass die bestimmten Parameter nur zu Beginn oder zu Ende vorhanden sind oder wirken. Zum anderen kann die Gerüsteinstellung des Walzpersonals aufgrund der Fehlererkenntnis zur Kompensation des Fehlers führen, so dass nur zu Beginn des Bandes eine fehlerhafte Bandform vorhanden ist.

Zu der anderen wichtigen Geometriegröße, dem so genannten Bandsäbel, waren eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt worden, die in [4] zusammenfassend ausgewertet wurden. Hierin wurden überwiegend die Auswirkungen von geometrischen Unsymmetrien, vor allem des Vorband-Dickenprofils und z.T. auch Säbeln in ihrer Auswirkung auf den Bandlauf und die sich in der Warmbandfertigstraße einstellenden Unsymmetrie des Dickenprofils über der Bandlänge beschrieben. In weiteren Untersuchungen [13] wurde aufgezeigt, dass eine nicht parallele Achsausrichtung von Ober- und Unterwalze unter Walzlast eine Säbelausbildung verursachen kann. Eindeutige Hinweise zur Vermeidung von Bandsäbeln an Vorbändern in der Warmbandvorstraße waren jedoch nur ansatzweise aber keineswegs genügend untersucht worden, um wirksame Maßnahmen zu deren Vermeidung treffen zu können.

In mehreren Veröffentlichungen wurde auf die in der Vorstraße höhere Beeinflussbarkeit der Bandform und somit der Bandsäbelentstehung hingewiesen. [2, 3, 4, 13] Aufgrund der dünneren Banddicke, längeren Bandlänge sowie niedrigeren Bandtemperatur in der Fertigstraße ist die Querflussbehinderung erheblich, so dass die Bandform nicht mehr bedeutend verändert werden kann. Das Walzenschwenken (zur Vermeidung des Bandsäbels) in den Fertiggerüsten birgt außerdem die Gefahr der Entstehung eines unplanen Bandes. Es gilt also, das Band säbelfrei an die Fertigstraße zu übergeben. Die beste Einflussnahme auf die Vorbandform erfolgt nach Degner und Neuschütz [3] im vorletzten Stich an der Vorstraße. Im letzten Stich ist die Gefahr der Erzeugung eines unsymmetrischen Vorbanddickenprofils sehr hoch.

Folgende Bandsäbeleinflussgrößen werden genannt [2, 3, 4, 13]:

- Temperaturunterschiede über der Breite (Eine Temperaturdifferenz von 100°C zwischen den beiden Brammenseiten entspricht einer Walzkraftdifferenz von etwa 22%, was zu unterschiedlichen Dickenabnahmen an den beiden Gerüstseiten und damit zum Säbel führt.)
- Walzenschwenkung (Diese führt zu unterschiedlichen Abnahmen an den beiden Gerüstseiten und damit zum Säbel.)
- Außermittige Bandlage (Aufgrund der durch die Walzenbiegung verursachten Walzspaltgeometrie ist die Dickenabnahme an den beiden Gerüstseiten bei außermittiger Bandlage ebenfalls nicht gleich.)
- Unsymmetrisches Eingangsdickenprofil (Es führt zu unterschiedlichen Auffederung an den beiden Gerüstseiten, damit zu unterschiedlichen Dickenabnahme und damit zum Säbel.)
- Presäbel (Säbeligkeit des Bandes vor Eintritt in die Vorstrasse)
- Spiel zwischen den Walzen sowie zwischen den Walzen und dem Ständer (Es kann unsymmetrische Walzenverschränkung hervorrufen und damit einen Unterschied in der Abnahme und damit Säbel erzeugen.)
- Unterschiedliche E-Module der beiden Ständerseiten (Es führt zu unterschiedlichen Auffederung des Gerüsts an beiden Seiten, damit zu unterschiedlichen Abnahme und damit zum Säbel)
- Unterschiedliche Walzenabnutzung (Besonders im Fall einer unsymmetrischen Abnutzung führt diese zur Erzeugung unterschiedlicher Abnahmen und damit zum Säbel.)
- Unterschiedliche Rauheiten der Walzenoberflächen, wodurch sich unterschiedliche Reibungsverhältnisse ergeben (Dieses Ergebnis wurde bei einer statistischen Parameteranalyse erzielt.)
- Bandbreite (Ergebnis einer statistischen Parameteranalyse. Mit zunehmender Bandbreite ist die Beeinflussung der Bandform durch zunehmende Querflussbehinderung erschwert.)
- Bandlänge (Ergebnis einer statistischen Parameteranalyse. Mit zunehmender Bandlänge ist die Beeinflussung der Bandform durch zunehmende Querflussbehinderung erschwert.)
- Banddicke (Ergebnis einer statistischen Parameteranalyse. Mit abnehmender Banddicke ist die Beeinflussung der Bandform durch zunehmende Querflussbehinderung erschwert.)
- Asymmetrisches Verfahren der Stauchwalzen (Wurde bei Untersuchungen an einer Vorstrasse festgestellt. Kein Zusammenhang zwischen Gesamtstauchgrad und Säbelgröße konnte festgestellt werden.)

Die Unterschiede der E-Module der beiden Ständerseiten werden als besonders kritisch im Hinblick auf die Asymmetrie des Walzprozesses angesehen. [3]

Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass die Parameter die Bandsäbelentstehung nur gering beeinflussen, wenn sie alleine wirken. Viel einflussreicher sind dagegen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern. Folgende Wechselwirkungspaare wurden mittels Experimenten gefunden [2]:

- Bei stark unsymmetrischem Eingangsdickenprofil (Dickenkeil) kann die Säbelbildung durch Ausgleich der Temperaturunterschiede minimiert werden.
- Beim stark keilförmigen Band muss die Bandlage verschoben werden, um die Säbelentstehung zu minimieren. Die Mittenlage muss aber eingehalten werden, wenn das Eingangsdickenprofil symmetrisch ist.
- Beim keilförmigen Band müssen die Walzen geschwenkt werden, um die Säbelbildung zu vermeiden. Beim keilfreien Band dürfen die Walzen nicht geschwenkt werden. Dies ist eine sehr einflussreiche Wechselwirkung.
- Bei großen Temperaturunterschieden über der Breite müssen die Walzen geschwenkt werden, um die Säbelbildung zu vermeiden.
- Bei außermittig verschobener Bandlage dürfen die Walzen nicht geschwenkt werden, um ein säbelfreies Band zu erhalten.

Zusätzlich konnten zwei drei-Faktor-Wechselwirkungen gefunden werden:

- Bandsäbeligkeit ist minimiert wenn Dickenkeil, Temperaturunterschiede und Walzenschwenkung am geringsten sind.
- Bei starkem Keil soll das Band mittig gelegen sein und die Walzen geschwenkt werden, um die Säbelbildung zu vermeiden [2].

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Banddicken im Verlauf der Jahre immer dünner gewalzt wurden, was im Durchschnitt zu mehr Problemen führt. Durch FEM-Simulationen konnte dargestellt werden, dass niedrige Temperaturen und hohe Walzkräfte häufig zu Bandlaufproblemen führen können [8].

Kocar und Varsavskij [12] haben den Walzprozess im Hinblick auf die horizontale Asymmetrie untersucht und mathematisch mit Hilfe der Schrankenmethode beschrieben. Zur Bestimmung des effektiven Geschwindigkeitsfeldes nutzen sie das Prinzip der minimalen Leistung. Sie berücksichtigen die Leistung der inneren Kräfte, Leistung der Reibungskräfte sowie die Leistung der äußeren Kräfte. Durch Bildung der partiellen Ableitung der Summe aller Leistungen und Gleichstellung mit Null ergibt sich ein Gleichungssystem mit dem die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes an den Grenzen des Walzgutes bei bekannten Kraftparametern an den Grenzen der Umformzone möglich ist. Mit Hilfe dieser Gleichungen wurde die Säbeligkeit sowie andere Parameter, wie zum Beispiel der Querverlauf des Bandes, berechnet. Die Abweichung zu im Experiment gemess-

nen Werten beträgt für die Säbeligkeit 25%. Für die anderen Parameter sind die Abweichungen zwischen Rechnung und Experiment ähnlich groß.

Die Online-Messung des Bandsäbels wurde ebenfalls untersucht. Die Messung des Bandsäbels ist eine wichtige Voraussetzung für eine automatische Bandsäbelregelung. Aufgrund fehlender Bandsäbelmessung erfolgt bis dato die Bandsäbelregelung immer noch manuell. In der Literatur werden Meßsysteme, bestehend aus optischen Geräten zur Erfassung der Bandkanten an verschiedenen Positionen der Bramme beschrieben [9, 7, 24, 10].

4.3 Banddickenprofil

Die Entstehung des Bandsäbels ist direkt verbunden mit der unsymmetrischen Veränderung des Dickenprofils. Die Einflussparameter des Dickenprofils können auch den Bandsäbel beeinflussen, sofern sie eine Unsymmetrie des Dickenprofils über der Breite hervorrufen. Im Bereich des Banddickenprofils im Warmwalzbereich werden in der Literatur [3, 13, 14, 15, 19, 21] folgende Einflussgrößen genannt:

- Eingangsdickenprofil (In Laborversuchen konnte festgestellt werden, dass der Einfluss des Eingangsdickenprofils mit steigender Banddicke sinkt. Ein keilfreies Dickenprofil des Fertigbandes kann jedoch nur mit einem geradem Vorband erreicht werden.)
- Banddicke (Mit abnehmender Banddicke steigt die Materialquerflussbehinderung, wodurch die Beeinflussung des Dickenprofils erschwert wird, unterhalb der Banddicke von 10mm ist eine Dickenprofiländerung nur noch schwer möglich. Es tritt lediglich eine Änderung der Bandplanheit auf. Die Kantenanschärfung kann auch bei dünnen Bändern beeinflusst werden, jedoch nicht das Banddickenprofil. Diese Ergebnisse wurden sowohl im Labor als auch im Betrieb erzielt.)
- Summenwalzkraft am letzten Gerüst der Fertigstrasse (Ergebnis einer Korrelationsanalyse)
- Temperaturunterschiede über der Breite (Wie bereits oben erwähnt, führt eine Temperaturdifferenz an den beiden Brammenseiten zu unterschiedlichen Dickenabnahmen. Der Einsatz von Isolierschildern wurde in diesem Zusammenhang als eine erfolgreiche Gegenmaßnahme beschrieben)
- Anstechprobleme / Erfüllung der Greifbedingung (Bei Anstechproblemen wird das vordere Bandende mit Hilfe der direkt vor dem Walzgerüst installierten Spritzvorrichtung länger gekühlt, was zur Festigkeitsunterschieden führt, was wiederum Dickenabweichungen verursacht. Es wurde gezeigt, dass die Greifbedingung durch den Einsatz von Bogenmessern in der Schopfschere im Einlauf der Fertigstrasse verbessert werden kann.)
- Walzenballigkeit (In einem Warmwalzwerk führte neben anderen Maßnahmen die Erhöhung der Ausgangsballigkeit der Walzen zur Verbesserung des Dickenprofils. In Zusammenhang mit

der Walzenbiegung beeinflusst die Walzenballigkeit die Walzspaltform und damit das Dickenprofil des Bandes.)

- Unterschiede der Walzgerüstmodule (Diese führen zur unterschiedlichen Auffederung an beiden Gerüstseiten und damit zu unterschiedlichen Abnahmen. Ein System zur Überwachung der Walzgerüstmodule wurde in einem Warmwalzwerk installiert und konnte zur Minderung des Dickenkeils genutzt werden.)
- Walzenbiegung (Es beeinflusst im Zusammenspiel mit der Walzenballigkeit die Walzspaltform und damit das Dickenprofil des Bandes.)
- Walzenschwenkung (Es führt zu unterschiedlichen Abnahmen an den beiden Gerüstseiten und damit zum ungleichmäßigen Dickenprofil.)
- Walzenverschränkung (Dickenunterschiede zwischen dem Bandzentrum und dem Bandrand nehmen mit zunehmender Walzenverschränkung sowie zunehmender Bandbreite ebenfalls zu.)
- Bandlage / Bandverlauf (Diese Abhängigkeit ist sehr stark. Das seitliche Verschieben des Walzgutes führt zur unterschiedlichen Auffederung der Ständerseiten, was zur Änderung der Einzelwalzkräfte führt. Untersuchungen an der Vorstrasse haben gezeigt, dass die Bandlage vom Temperaturquerprofil und der Ausbildung des Brammenkeils abhängig ist. Die Beeinflussung der Bandlage durch Schwenken hat eine große Wirkung, ist aber sehr langsam. Gezielte Schwenkeingriffe in der Vorstrasse können die Bandlage und die Keiligkeit des Fertigbandes optimieren.)

Der Einfluss folgender Größen auf die Keiligkeit des Fertigbandes wurde auf Grund von Korrelationsanalysen industrieller Prozessdaten als nicht existent oder vernachlässigbar dargestellt:

- Baustückbewegung. (Dieser Einfluss ist sowohl in der Vor- als auch Fertigstrasse nur zu Stichbeginn und Stichende bemerkbar.)
- Bandverlauftyp
- Unterscheidung nach Bandlage am Bandkopf, in der Bandmitte und am Bandende
- Endwalzdicke
- Endwalztemperatur
- Walzenbiegekraft am letzten Gerüst
- Schwenkbefehle am letzten Gerüst

4.4 Schlussfolgerung

Schlussfolgernd lässt sich zusammen fassen, dass bezüglich des Bandsäbels bereits einige Untersuchungen zur Bestimmung der Einflussparameter durchgeführt wurden. Hierbei wurden sowohl

Experimente als auch Korrelationsanalysen von Labor- und industriellen Prozessdaten durchgeführt. Einige der Einflussparameter wurden mit vereinfachten analytischen Formeln beschrieben. Es fehlt jedoch ein ganzheitliches Modell.

Die Regelung des Bandsäbels in der Warmwalzstrasse erfolgt immer noch manuell. Ein wichtiger Grund hierfür ist die bisher unzureichende Messung des Bandsäbels. Zur Vermeidung der durch Bandsäbel hervorgerufenen Störungen in den Folgeprozessen als auch zur Erreichung eines qualitativ hochwertigen Produktes ist ein möglichst säbel- und dickenkeilfreies Vorband nötig. Ziel ist es also, bereits in der Vorstrasse den Säbel als auch den Dickenkeil so weit wie möglich zu vermeiden.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten wurden zusammen von der EKO Stahl GmbH (EKO) und dem Betriebsforschungsinstitut (BFI) an der Vorstrasse der Warmbreitbandstrasse von EKO durchgeführt. Die Arbeitsschwerpunkte von EKO lagen dabei in der Installation und Inbetriebnahme der Messsysteme sowie in der Durchführung von Betriebsmessungen mit der anschließenden Aufbereitung der Messergebnisse. Der Arbeitsschwerpunkt des BFI lag in der Durchführung von Laborversuchen und deren Auswertung, in der Analyse der Betriebsmessungen sowie der Modellentwicklung. Die Umsetzung der Ergebnisse in eine Steuerung sowie die Inbetriebnahme der Steuerung wurde von beiden Projektpartnern durchgeführt.

Dritte Partner wurden nicht in die Arbeiten einbezogen.

6 Genutzte Versuchseinrichtungen und industrielle Warmbandstraße

6.1 Versuchswalzwerk für Plastilinproben

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden an einem Plastilinwalzwerk am Institut für bildsame Formgebung der RWTH Aachen durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein modular aufgebautes Walzwerk, das über verschiedene Walzen unterschiedlicher Durchmesser und Rauheiten verfügt. Sowohl das Vertikalwalzen (Stauchen) als auch das Horizontalwalzen (Dickenreduzierung) kann simuliert werden. Die Einstellung der Walzspalte erfolgt positionsgesteuert. **Bild 4** zeigt das Walzwerk mit der Anordnung mehrerer Gerüste in Folge.



Bild 4: Plastilin-Modellwalzwerk [IBF - RWTH Aachen]

Walzendurchmesser – Horizontalgerüst	70 – 90 mm
Walzendurchmesser – Stauchgerüst	70 – 90 mm
Walzenbreite	160 mm
Rollgangbreite	160 mm
Rollganglänge	3000 mm
Maximale Walzspaltanstellung	100 mm
Walzendrehzahl	5 – 28 & 280 min ⁻¹
Länge der eingesetzten Proben	170 mm
Probendicke	22 mm
Probenbreite	90 mm
Abnahme	5 - 10 mm

Tabelle 1: Technische Daten des Plastilin-Laborwalzwerkes [IBF, RWTH Aachen]

6.2 Versuchswalzwerk am MPI für Eisenforschung

Das genutzte Modelwalzwerk befindet sich in den Laboratorien des Max-Planck-Institutes für Eisenforschung (MPIE) in Düsseldorf. Das von der Firma SCHLOEMANN gebaute Walzwerk ist sowohl für Kalt- als auch Warmwalzversuche ausgelegt (**Bild 5**).

Glühofen	Zwei-Zonenofen Jede Zone bis auf max. 1400° einstellbar max. Probenlängen 1100 mm Schutzgaskammer auf Argongasbasis
Stauchgerüst	Walzendurchmesser: 120 mm max. Walzkraft: 200 kN max. Walzmoment: 4 kNm Walzgeschwindigkeit: 2-14 m/min Walzleistung : 8 kW Walzspaltanstellung : 20-150 mm Gerüstmodul : 910 kN/mm
Horizontalgerüst	Walzendurchmesser: 190 mm max. Walzkraft: 500 kN max. Walzmoment: 10 kNm Walzgeschwindigkeit: 0-29 m/min

Tabelle 2: Technische Daten des Versuchswalzwerks [MPIE, Düsseldorf]

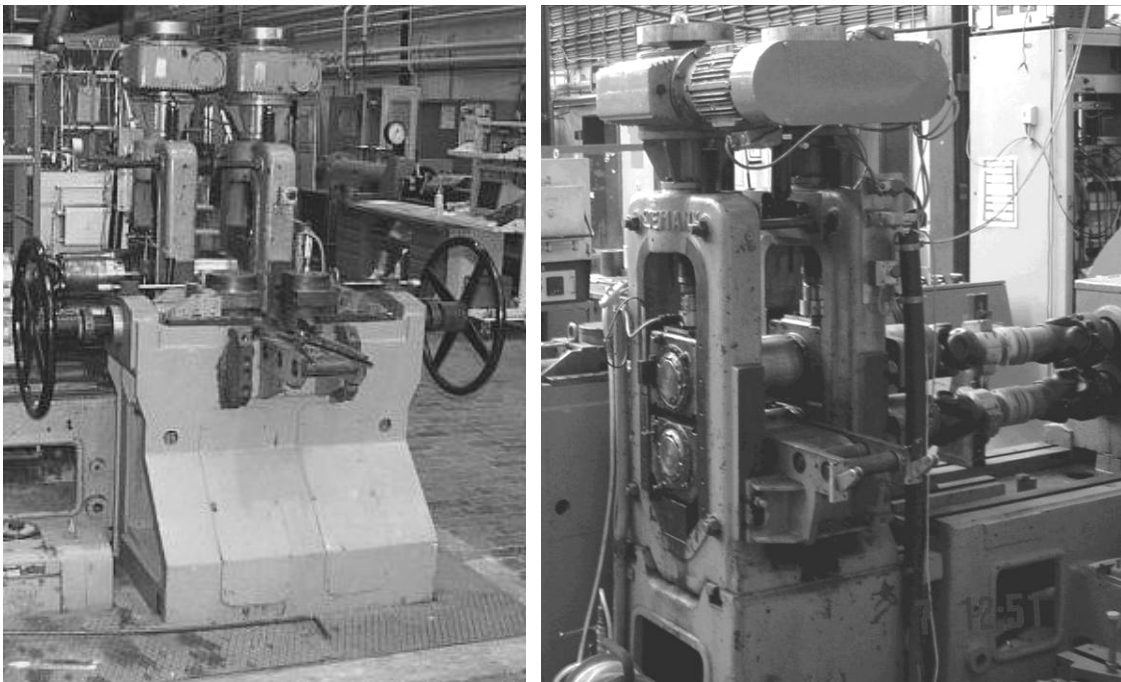


Bild 5: Versuchswalzwerk für Kalt- und Warmwalzversuche [MPIE Düsseldorf]

6.3 Warmbreitbandstrasse der EKO-Stahl GmbH

Die Forschungsarbeit wurde unter Verwendung der Prozessdaten der Warmbreitbandstrasse der EKO-Stahl und mit dem Ziel der Optimierung des Vorwalzprozesses durchgeführt. Daher soll an dieser Stelle das EKO-Warmwalzwerk, insbesondere die Vorstrasse, beschrieben werden.

- **Allgemeine Informationen**

Die auf der EKO-Stahl Warmwalzstrasse gewalzten Stahlgüten bestehen zu ca. 75% aus niedriggeköhlten Stahlsorten (inklusive IF-Güten) und zu ca. 25% aus im wesentlichen höherfesten Umformstählen, Baustählen und Dynamostählen. Die Qualität der hergestellten Bänder entspricht höchsten Anforderungen und ist für die Erzeugung hochwertiger kaltgewalzter Stahlflachprodukte geeignet. Die Hauptkunden der EKO-Stahl sind Unternehmen der Automobilbranche, die Haushaltsgerätehersteller, Verpackungsproduzenten sowie die Baubranche. In Deutschland werden ca. zwei Drittel der Erzeugnisse, in Westeuropa ein Viertel und in Osteuropa die restliche Menge abgesetzt [6].

Die Konfiguration der einzelnen Anlagen ist in **Bild 6** dargestellt. Die technischen Daten des Warmwalzwerkes sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Die Basisautomatisierung und Regelung der gesamten Walzstrasse ist mit einem einheitlichen System realisiert. Neben dem vollautomatischen Betrieb der Strasse wird auf diese Weise auch die Homogenität der Qualitätsparameter über die gesamte Bandlänge gewährleistet.

Der Prozessautomatisierung wird die Gewährleistung homogener Prozessparameter nicht nur entlang der Bandlänge sondern auch zu Anfang der Prozesse am Bandkopf zugewiesen. Hierzu gehören zum Beispiel die Materialverfolgung, die Stichplanberechnung für das gesamte Werk (Vor- und Fertigstrasse) und die Vorgaben für die Staucheranstellung am Bandkopf und -fuß (aufgrund des unterschiedlichen Materialflusses an den Bandenden und im Filetteil wird das sogenannte „short stroke“-Verfahren eingesetzt, bei welchem der Stauchgrad an beiden Enden für eine sehr kurze Zeit deutlich reduziert wird). Es werden mathematische Modelle, neuronale Netze und genetische Algorithmen angewandt.

Über ein Quertransportsystem ist Direkteinsatz der Brammen möglich. Hierbei werden die frisch gegossenen Brammen mit einer Temperatur von ca. 800 – 900 °C direkt zur Warmwalzstrasse geleitet, wodurch sich die Aufwärmung im Ofen erheblich verkürzt.

Der Hubbalkenofen ist erdgasbeheizt und mit einer Druckverdampfungskühlung versehen, welche es erlaubt, elektrische Energie mittels eines nachgeschaltetem Generators zu erzeugen.

Hubbalkenofen		
Maximale Brammenlänge		12 m
Brammendicke (zweireihige Ofenheizung ist möglich)		250 mm
Nennleistung		300 t/h
Stauchgerüst		
Walzkraft		6000 kN
Netto-Stauchabnahme pro Bramme		max. 100 mm
Vorgerüst		
Wasserdruck an den Zunderwäscher-Düsen		190 bar
Walzkraft		40 000 kN
Walzgeschwindigkeit		max. 5 m/s
Vorbanddicke nach der Vorstrasse		22 – 35 mm
Coilbox		
Vorbandtemperatur		900 – 1100 °C
Coildurchmesser		max. 2300 mm
Abwickelgeschwindigkeit		max. 4 m/s
Fertigstrasse		
Schnitt-Temperatur-Schopfschere		900 – 1050 °C
Scherkraft Schopfschere		max. 8550 kN
Walzkraften F1 – F5		35 000 kN
Walzgeschwindigkeit		max. 15 m/s
Warmband	Dicke	1.5 – 13 mm
	Breite	600 – 1640 mm
Bandkühlung		
Länge des Auslaufrollgangs		100.4 m
Länge des Kühlsystems		65.3 m
Wasserdurchflussmenge		je 3850 m ³ /h
Haspelanlage		
Wickelgeschwindigkeit		max. 15 m/s
Bundgewicht		max. 34 t
Wickeltemperatur		500 – 800 °C

Tabelle 3: Technische Daten des EKO-Stahl Warmwalzwerkes [8]

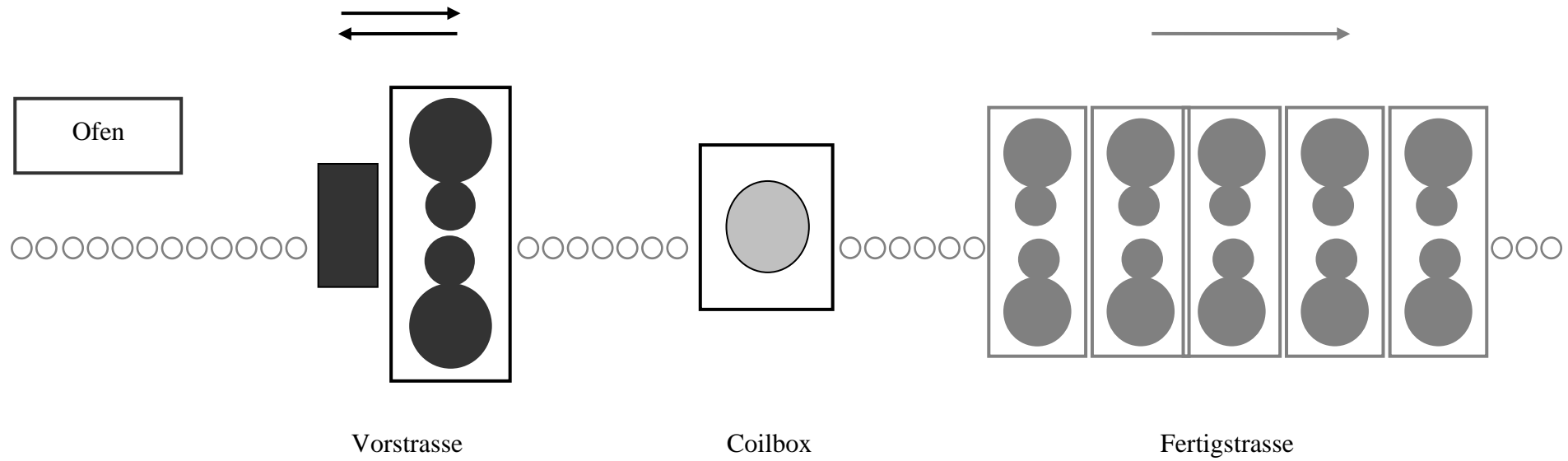


Bild 6: Konfiguration der Anlagen des Warmwalzwerkes der EKO-Stahl

- **Vorstrasse**

Die Vorstrasse, bestehend aus einem Stauch (Breitenreduzierung)- und einem Reduziergerüst (Dickenreduzierung), arbeitet reversierend in 5–9 Stichen. Hierbei werden in den ungeraden Stichen sowohl das Stauch- als auch das Reduziergerüst eingesetzt, in den geraden Stichen wird nur das Reduziergerüst eingesetzt. Breitenabweichungen bis zu 60 mm können mit Hilfe des Stauchgerüsts ausgeglichen werden. Folgende Tabelle zeigt die detaillierten technischen Daten des Vorgerüsts. Im **Bild 7** ist die Einlaufseite des Vorgerüsts dargestellt.

Stauchgerüst	
Abstand zum Reduziergerüst	3900 mm
Walzkraft	6000 kN
Nennleistung der Hauptantriebe	2 x 1500 kW
Stauchabnahme pro Stich	max. 80 mm
Netto-Stauchabnahme pro Bramme	max. 100 mm
Anstellgeschwindigkeit der mechanischen Walzenanstellung	max. 55 mm/s
Anstellgeschwindigkeit der hydraulischen Walzenanstellung	max. 100 mm/s
Arbeitswalzendurchmesser	1100 / 1000 x 650 mm
Reduziergerüst	
Walzkraft	40 000 kN
Nennleistung der Hauptantriebe	2 x 6000 kW
Drehzahl	± 45 / 100 min ⁻¹
Anstellgeschwindigkeit der elektromechanischen Anstellung	max. 50 mm/s
Anstellgeschwindigkeit der hydraulischen Walzenanstellung bei 23 000 kN Walzkraft	7.4 mm/s
Stützwalzendurchmesser	1450 / 1300 mm
Arbeitswalzendurchmesser	1200 / 1100 mm
Walzgeschwindigkeit	max. 5 m/s
Vorbanddicke nach der Vorstrasse	22 – 35 mm

Tabelle 4: Technische Daten des EKO-Stahl Warmwalzvorgerüsts [6]

Die Walzspalteinstellung im Stauch- sowie Reduziergerüst der Vorstrasse erfolgt elektromechanisch und hydraulisch. Die Elektromechanik sorgt für die grobe Positionseinstellung, die Hydraulik für die Feineinstellung und für die Regelung des Walzspaltes während des Walzens. Die Straße ist zusätzlich mit einer Breitenregelung (Automatic Width Control) für das Stauchgerüst (inklusive der „short stroke“-Regelung), sowie mit einer Lastwalzspaltregelung (Automatic Gauge Control) für das Reduziergerüst ausgestattet.

Zur Banddatenerfassung sind hinter der Vorstrasse ein Temperaturscanner sowie ein Breitenmesssystem installiert. Zusätzlich wurde ein Bandkantenerfassungssystem vor und hinter der Strasse installiert. Auf Grund der Relevanz dieses Systems für diese Arbeit, wird es gesondert im Kapitel 9 behandelt.

- **Fertigstrasse**

Zwischen der Vor- und der Fertigstrasse befindet sich eine Coilbox. Dadurch wird eine Vergleichmäßigung der Bandtemperatur erreicht, insbesondere im Hinblick auf die Auskühlung des Vorbandes, in Folge dessen die Temperatur zu Beginn des Fertigwalzprozesses höher ist als am Ende. Auf Grund dessen kann der Fertigwalzvorgang auf nur fünf Gerüsten erfolgen. Das Band wird dornlos in der Coilbox gewickelt, was den Einsatz von Isolierwänden zwecks Vermeidung der Kantenauskuhlung ermöglicht.

Vor der Fertigstrasse befindet sich eine Schopfschere (Doppelmesser-Trommelschere). Diese Schere wird zur Abtrennung des Bandkopf- und -fußes genutzt.

Ein vollhydraulisches Walzspalteinstellungssystem (HydraulicGaugeControl) zur Regelung der Banddicke ist im Einsatz. An den Gerüsten F1 bis F3 ist die CVC-Walztechnologie installiert. Weitere Planheitsstellglieder sind die hydraulisch betätigten Arbeitswalzenverschiebe- und -biegesysteme. Die Schlingenheber werden ebenfalls hydraulisch betätigt.

Der Fertigstrasse folgt eine Bandkühlung, welche oberhalb und unterhalb des Rollganges über ein laminares Kühlsystem verfügt. Weiterhin ist hier ein Messhaus angeordnet, in dem Geräte zur Messung des Profils, der Dicke, der Planheit, der Temperatur sowie der Breite des Bandes zur Verfügung stehen.

An der sich anschließenden Haspelanlage wird das Band zum Coil gewickelt und daraufhin über verschiedene Beförderungssysteme auf die Bahnwagen verladen. Über den Bahnweg gelangen die Coils zur Weiterverarbeitung ins Kaltwalzwerk [6].



Bild 7: Warmwalzwerk der EKO-Stahl, Vorstrasse [EKO-Stahl]

7 Ergebnisse

Die Ergebnisse unterteilen sich entsprechend der drei Themenschwerpunkte

- Bestimmung der Vorbandbreite
- Installation und Inbetriebnahme von Meßsystemen
- Vermeidung von Unsymmetrien der Bandform in der Warmbandvorstraße

7.1 Analytischen Brei­ tungsmodells zur Vorausberechnung der Vorbandbreite

Die Stichfolge am Reversier- und Vorgerüst einer Warmbandstraße ist immer eine Kombination aus mehreren Vertikal- und Horizontalstichen. Ziel der Untersuchungen war daher die Ableitung eines „online“ nutzbaren Rechenalgorithmus zur Beschreibung des Brei­ tungsverhaltens des Walzgutes unter abwechselnd breitenreduzierender (Vertikalstich) und dickenreduzierender (Horizontalstich) Walzbeanspruchung. Bestimmte Berechnungsverfahren wie z.B. FEM (Finite Element Methode) eignen sich aufgrund ihrer langen Berechnungszeit nicht für diese Aufgabe. Eine Literatursichtung ergab, dass bekannte empirische Berechnungsverfahren lediglich die dickenreduzierende Walzbeanspruchung des Horizontalstichs auf die Walzgutbrei­ tung berücksichtigen. In [17] wird ein Vergleich und eine Bewertung einer Vielzahl von Berechnungsmethoden zur Brei­ tung beim Warmwalzen auf der flachen Bahn vorgenommen.

Für die Entwicklung einer Bestimmungsgleichung für die Breitenzunahme im Horizontalstich, dem ein Vertikalstich vorgeschaltet ist, wird eine Vorgehensweise gewählt, die von der in [17] ebenfalls behandelten konventionellen *Breitungsgleichung nach Pawelski* ausgeht. Die Anpassung der konventionellen Breitungsgleichung im Hinblick auf die Berücksichtigung des Einfluss des Vertikalstichs auf die Endbreite im Horizontalstich erfolgt mit Hilfe von Regressionsrechnungen, die auf Messdaten angewendet werden, die in praktischen Walzversuchen ermittelt wurden.

Die für die Entwicklung des neuen Rechenalgorithmus erforderlichen Arbeitsschritte teilen sich wie folgt auf:

- Versuche am Versuchswalzwerk
- Ableitung eines Berechnungsmodells für die Vorausberechnung der Breite
- Adaption an einer Warmbandstraße

7.1.1 Versuche am Versuchswalzwerk

Ausgehend von Stichplänen der Warmwalzstraße wurde ein Versuchsstichplan unter Berücksichtigung der geometrischen Ähnlichkeit aufgestellt. Ergänzend hierzu wurden die Versuchsstichpläne modifiziert durch:

- a) Verdoppelung des Stauchbetrages eines Stichplanes.
- b) Nachfahren eines Stichplanes ohne Stauchstiche.

Diese Vorgehensweise sollte sicherstellen, dass der gefundene Algorithmus möglichst allgemeingültig ist.

In den Horizontalstichen erzielten Breitungsbeträge zusammengestellt und zwar für die beiden Fälle, dass im vorgeschalteten Vertikalstich eine normale betriebsübliche sowie eine betragsmäßig doppelte Vertikalstichabnahme gewählt wurde.

- **Vorversuche mit Plastilinproben**

Zunächst wurden die Versuchsstichpläne mit Plastilinproben an einem Modellwalzwerk nachgefahren. In der nachfolgenden **Tabelle 5** sind die in den Horizontalstichen erzielten Breitungsbeträge zusammengestellt und zwar für die beiden Fälle, dass im vorgeschalteten Vertikalstich eine normale betriebsübliche sowie eine betragsmäßig doppelte Vertikalstichabnahme gewählt wurde.

Das Ergebnis zeigt deutlich, dass die Höhe der Stichabnahme im vertikalen Stich (Stauchstich) entscheidenden Einfluss auf die Breitung bei dem nachfolgenden Horizontalstich hat. Die Ursache liegt in einer höheren Aufwulstung im Bandkantenbereich, die umso größer ist je höher die Stichabnahme im Vertikalstich gewählt wird. Im sich anschließenden Horizontalstich fließt dieses „überschüssige Material“ bevorzugt in die Breite. Dieser Effekt ergibt sich aus einem in Breitenrich-

tung geringeren Fließwiderstand im Bereich der Bandkanten, verursacht durch die Möglichkeit der freien Breitung in diesen Bandzonen.

Stichnummer	1	2	3	4	5	6	7	8
Breitung nach "normaler" vertikaler Stichabnahme (mm)	4.0	3.1	3.5	2.9	3.1	3.3	2.6	2.2
Breitung nach doppelter vertikaler Stichabnahme (mm)	4.7	4.5	4.0	4.2	5.0	4.4	4.2	3.8

Tabelle 5: Breitungsbeträge nach dem Horizontalstich bei unterschiedlichen Stichabnahmen im vorgeschalteten Vertikalstich

Anhand dieser Ergebnisse zeigt sich, dass bei der Berechnung ein von der Höhe der vertikalen Stichabnahme abhängiger Wert addiert werden muss. Für die Beschreibung des Breitungsverhaltens bei abwechselnd vertikaler und horizontaler Walzung wird daher ein additiver Ansatz angenommen:

$$\Delta b_H = f_{horizontal}(\Delta h_H; h_1; l_{dH}; b_1) + f_{vertical}(\Delta b_V; b_0; l_{dV}; h_0) \quad (1)$$

mit:

$$l_{dH} = \sqrt{R \cdot \Delta h_H} \quad (2)$$

$$l_{dHV} = \sqrt{R \cdot \Delta b_V} \quad (3)$$

Hierin beschreibt die Funktion $f_{horizontal}(\Delta h; h_0; l_d; w_0)$ die Walzgutbreitung im Horizontalstich ohne Berücksichtigung der voran gegangenen Vertikalstichabnahme im Stauchgerüst. Diese wiederum kommt in der Form eines additiven Gliedes als $f_{vertical}(\Delta b; b_0; l_{dV}; h_0)$ zur Geltung.

In den Gleichungen bedeuten:

Indizes

H: Horizontalstich

V: Vertikalstich

0: vor dem Vertikalstich

1: nach dem Vertikalstich (bzw. vor dem Horizontalstich)

Geometrieparameter

h : Eingangsdicke der Bramme oder des Bandes [mm]

b : Breite der Bramme oder des Bandes [mm]

Δh : Dickenabnahme des Bandes [mm]

Δb : Breitenänderung des Bandes

l_{dH} : gedrückte Länge im Horizontalstich [mm]

l_{dV} : gedrückte Länge im Vertikalstich [mm]

R : Arbeitswalzenradius [mm]

Zur präzisen Formulierung der Gleichung und zur Anpassung der Koeffizienten ist ein hohes Maß an Genauigkeit bei der Vermessung der Proben erforderlich. Diese Messgenauigkeit war jedoch bei den Plastilinproben nicht erreichbar, weil für das Vermessen der weichen Plastilinproben keine geeigneten Messgeräte zur Verfügung standen. Daher wurden für die Folgeversuche Stahl- und Bleipproben verwendet.

• **Versuche mit Stahl- und Bleipproben**

Die Versuche wurden mit Stahlproben auf einem Laborwalzwerk am Max Planck Institut für Eisenforschung bei unterschiedlichen Walztemperaturen durchgeführt.

Jeder Versuchsstichplan wurde mit zwei verschiedenen Werkstoffproben gewalzt (Stahl C45 (EN 10088-2-1-3); Blei). Die Stahlproben wurden bei 1200°C, die Bleipproben bei Raumtemperatur gewalzt. Das Glühen und Abkühlen der Proben erfolgte zur Vermeidung von Zunderbildung in einer Argon-Schutzatmosphäre.

• **Versuchsauswertung**

Um die Einflussgrößen so genau wie möglich aufzeichnen und die Koeffizient möglichst gut anpassen zu können, wurde die Breite und die Dicke der gewalzten Proben im Bereich des stabilen Walzustands nach jedem Stich genau vermessen. .

Die Probenbreite wurde mit auf einem Messrahmen angeordneten Messinstrumenten mit einer Genauigkeit von $\pm 0,02$ mm gemessen.

Das Dickenprofil über die Breite wurde mit Hilfe von zwei Laser-Entfernungsaufnehmern ermittelt. Die Messgenauigkeit lag bei ± 0.02 mm. **Bild 8** zeigt die Messanordnung bei der Erfassung der Probenabmessungen.

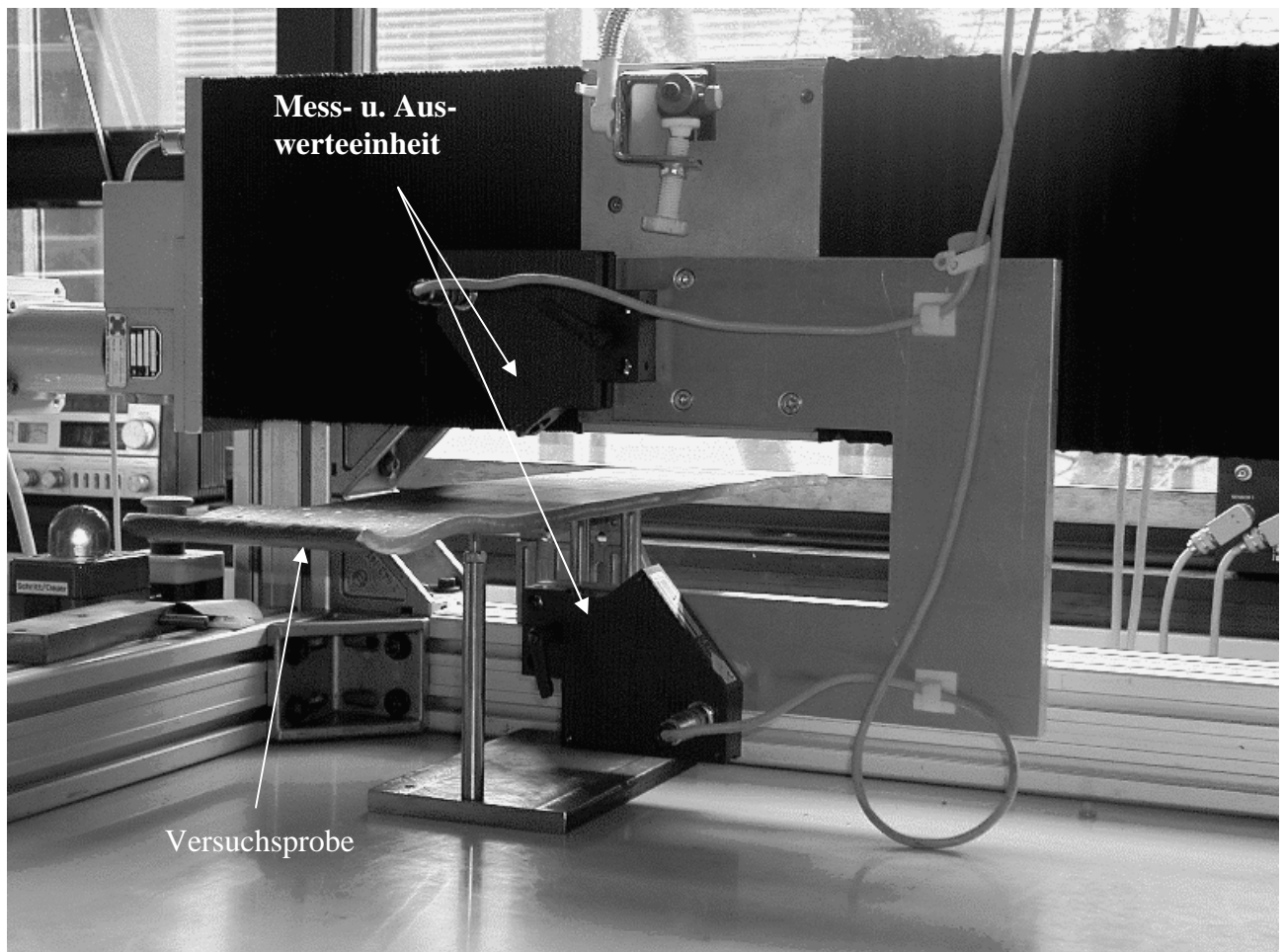


Bild 8: Laser-optische Messeinrichtung zur Erfassung des Dickenprofils

- **Versuchsergebnisse**

In **Bild 9** ist ein typisches über die Bandbreite gemessenes Dickenprofil dargestellt. Der obere Kurvenverlauf gibt das Dickenprofil nach einem Vertikalstich, der untere Kurvenverlauf nach einem Horizontalstich wieder. Die Auswertung aller gemessenen Dickenprofile hat ergeben, dass das Bandprofil nach jedem Horizontalstich in eine eckige Form zurückgeführt wird **Bild 9**. Daher müssen für die Entwicklung der Breitungsgleichung keine Profilabweichungen nach den Horizontalstichen berücksichtigt werden.

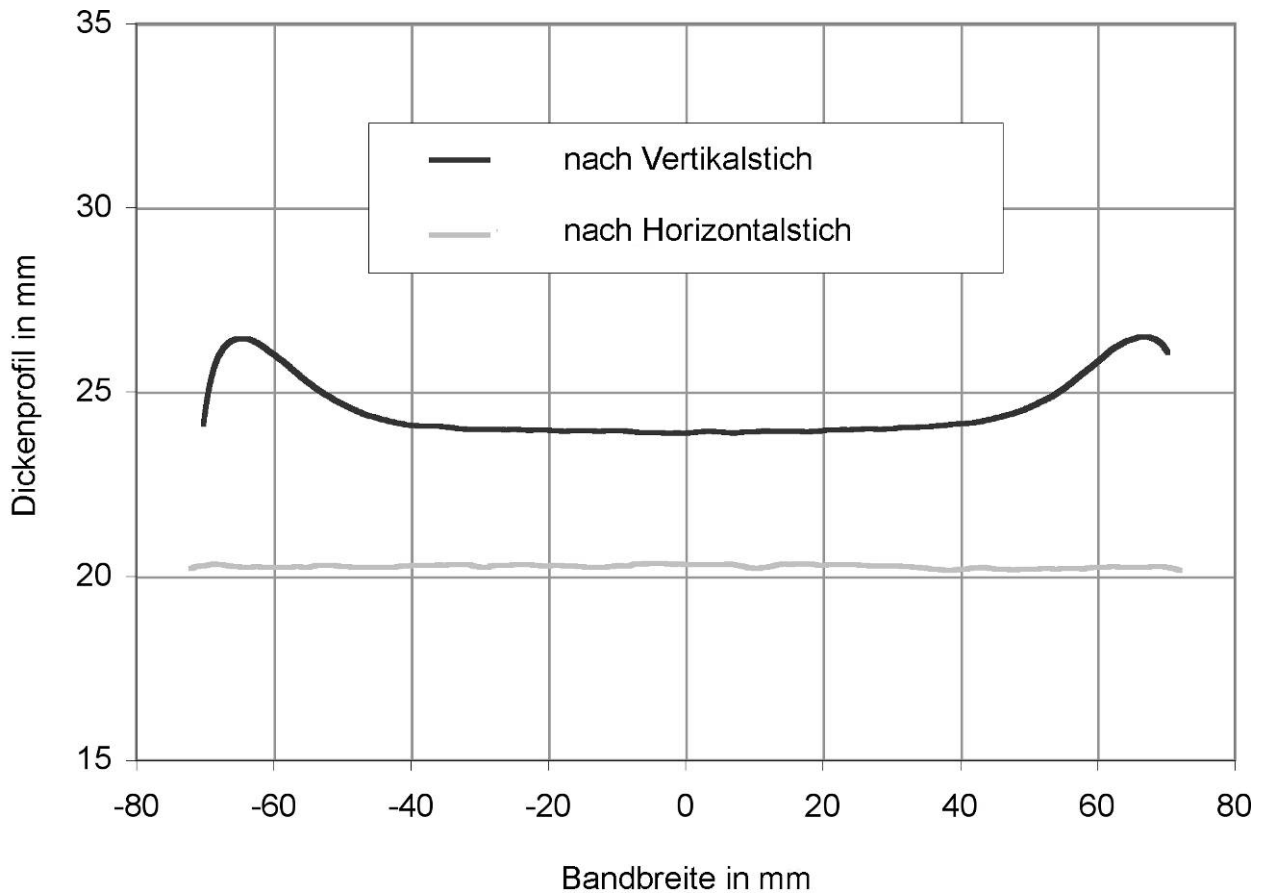


Bild 9: Dickenprofil nach einem Vertikal- und sich anschließendem Horizontalstich

Die Auswirkungen der Abnahme beim Vertikalstich auf das Dickenprofil zeigen sich im Kurvenverlauf der Dickenprofile, die in **Bild 10** aufgetragen sind. Dabei wird deutlich, dass die Profilabweichungen umso ausgeprägter sind, desto größer die Breitenabnahme (vertikale Stichabnahme) im Vertikalstich gewählt wird.

7.1.2 Ableitung einer empirischen Breitungsgleichung

Unter der Annahme, dass die Breitungsgleichung die Grundform entsprechend Gleichung (1) aufweist,

$$\Delta b_H = f_{horizontal}(\Delta h_H; h_1; l_{dH}; b_1) + f_{vertical}(\Delta b_V; b_0; l_{dV}; h_0) \tag{1}$$

wird die Berechnungsformel nach Pawelski um einen den Vertikalstich berücksichtigenden additiven Term erweitert

$$\Delta b_H = \underbrace{b_1 \cdot c_1 \cdot \left(\frac{\Delta h_H}{h_1}\right)^{c_2} \cdot \left(\frac{l_{dH}}{h_1}\right)^{c_3} \cdot \left(\frac{h_1}{b_1}\right)^{c_4}}_{\text{Pawelski'sche Breitungsgleichung}} + \underbrace{\Delta b_V \cdot d_1 \cdot \left(\frac{\Delta b_V}{b_0}\right)^{d_2} \cdot \left(\frac{l_{dV}}{b_0}\right)^{d_3} \cdot \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^{d_4}}_{\text{additiver Vertikalstich bezogener Term}} \tag{4}$$

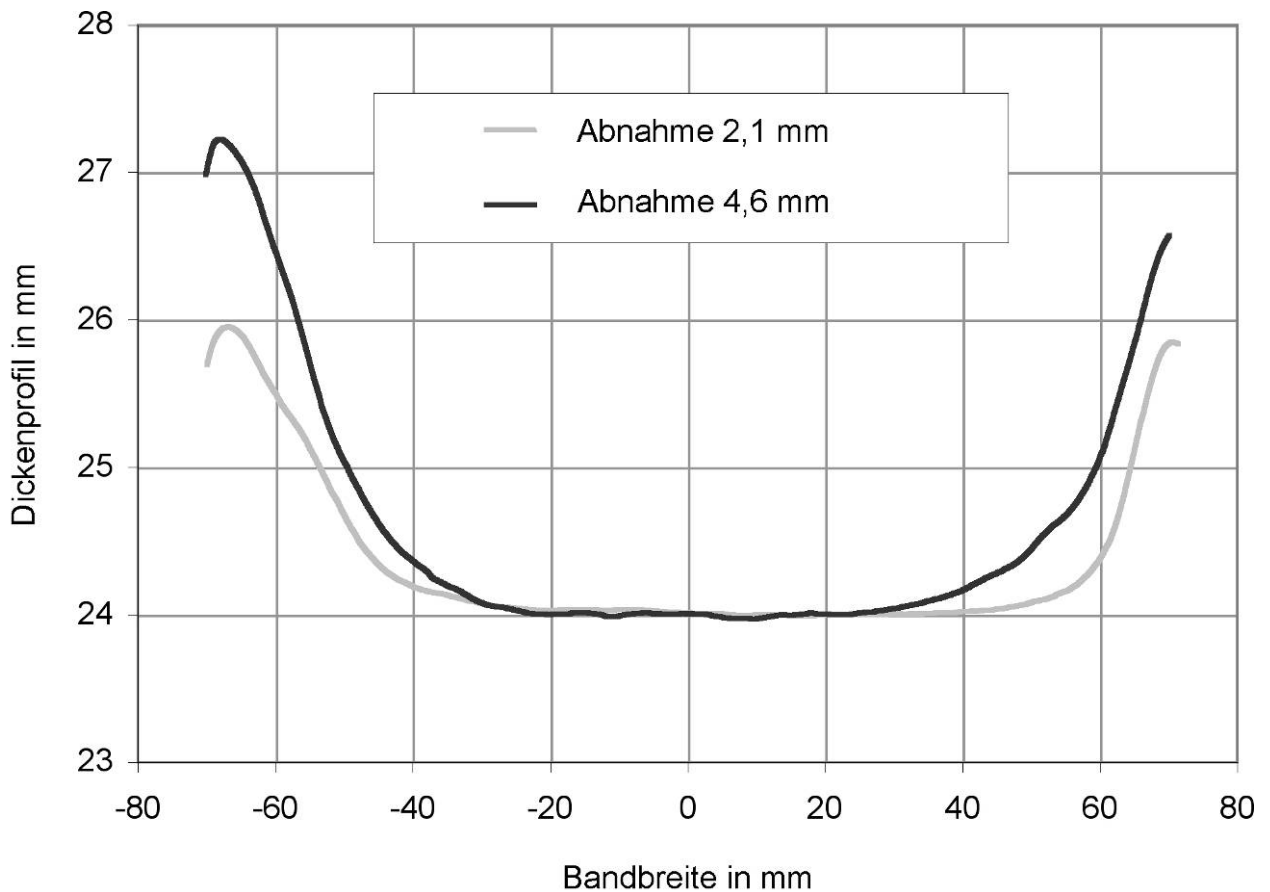


Bild 10: Einfluß der Vertikalstichabnahme auf das Banddickenprofil

Entsprechend Gleichung (4) wurde in die Formel ein Breitungsbetrag eingesetzt, der sich aus der Abnahme während des Horizontalstich ergibt und abhängig ist von dem Grad der Abnahme im vorausgegangenen Vertikalstich.

Die Walzgutbreite b_H nach einer Stichkombination aus Vertikalstich und Horizontalstich ergibt sich dann zu:

$$b_H = b_1 + \Delta b_H \tag{5}$$

Im nächsten Schritt wurde zur Anpassung der Koeffizienten c_1 bis c_4 und d_1 bis d_4 eine Regressionsgerade gebildet, die sicherstellt, dass die größtmögliche Korrelation zwischen den gemessenen und den berechneten Breitungswerten für die Sequenz von jeweils einem Vertikal- und einem Horizontalstich erreicht wird. Um sicherzustellen, dass die richtige Korrelation zu Grunde gelegt wird, wurde gefordert, dass die Koeffizienten $c_1 - c_4$ und d_1 positiv und die Koeffizienten $d_2 - d_4$ negativ sind. **Bild 11** zeigt die erhaltene Regressionsgerade.

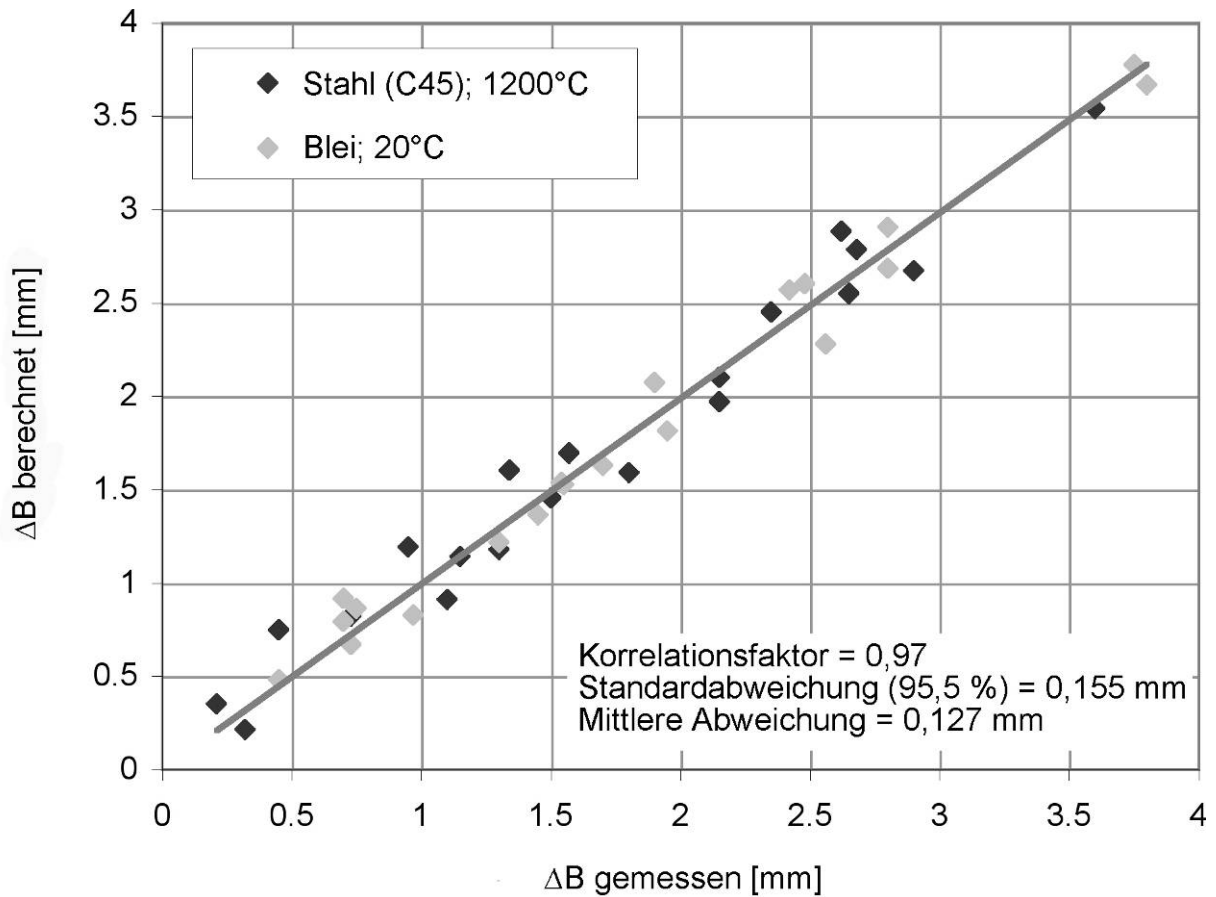


Bild 11: Vergleich der berechneten und gemessenen Breite von H/V-Stichfolgen

Die vorstehende Abbildung zeigt deutlich, dass mit Hilfe der verwendeten Breitungsgleichung (4) die Breite sehr gut vorhergesagt werden kann. Dies zeigt sich vor allem in den sehr niedrigen Werten der doppelten Standardabweichung und der mittleren Abweichung.

Die Ergebnisse lassen Aussagen über den Einfluss der Fließgrenze des Werkstoffs auf die Berechnung zu. Die Fließgrenze der eingesetzten Werkstoffe (Stahl C45 bei 1200°C gewalzt und Blei bei Raumtemperatur gewalzt) war sehr unterschiedlich. Bei einer Walztemperatur von 1200°C hatte C45 eine Fließgrenze von ca. 70 N/mm². Die Fließgrenze von Blei lag dagegen bei etwa 13 N/mm². Die Regressionsgerade gibt jedoch keinen Hinweis darauf, dass ein Bezug zwischen der Fließgrenze und den Breitungseigenschaften besteht. Für die Anwendung der Breitungsgleichung in der Praxis wird empfohlen, die Berechnungskoeffizienten getrennt nach den verschiedenen Kategorien von Walzwerkstoffen und den verschiedenen Stichplänen zu bestimmen.

Die durch Regression erhaltenen Koeffizientenwerte sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
3.811	1.594	0	2.013	0.483	0	0	-0.135

Tabelle 6: Durch Regressionsrechnung bestimmte Koeffizienten

pass	Gemessene Werte						Berechnete Werte		
	w ₀	h ₀	w ₁	h ₁	w ₂	h ₂	w ₀	w ₁	w ₂
Stahl / k _{fm} = 70 N/mm ²									
1V;2H	145.00	23.96	144.00	24.02	145.30	20.88	145.00	144.00	145.18
3V;4H	145.30	20.88	144.00	20.81	145.15	18.61	145.18	143.88	145.02
5V;6H	145.15	18.61	144.40	18.61	145.13	16.18	145.02	144.27	145.10
7V;8H	145.13	16.18	141.62	16.19	144.27	14.04	145.10	141.59	144.14
9V;10H	144.27	14.04	143.35	13.99	144.45	11.65	144.14	143.22	144.13
11V;12H	144.45	11.65	143.70	11.55	144.15	9.47	144.13	143.38	144.13
13V;14H	144.15	9.47	144.08	8.06	144.40	7.64	144.13	144.06	144.27
15V;16H	144.40	7.64	144.09	7.53	144.30	5.98	144.27	143.96	144.32
1V;2H	144.95	23.99	143.05	24.04	145.20	20.17	144.95	143.05	145.02
3V;4H	145.20	20.17	143.28	20.10	144.85	17.24	145.02	143.10	144.80
5V;6H	145.20	17.24	143.60	17.26	144.94	13.85	144.80	143.20	144.80
7V;8H	144.94	13.85	143.35	13.85	145.15	10.40	144.80	143.21	144.81
9V;10H	145.15	10.40	143.50	10.38	145.00	7.72	144.81	143.16	144.61
11V;12H	145.00	7.72	143.55	7.62	144.50	5.89	144.61	143.16	144.36
lead / k _{fm} = 13 N/mm ²									
1V;2H	144.95	23.89	140.40	23.92	144.00	20.29	144.95	140.40	143.94
3V;4H	144.00	20.29	140.23	20.14	142.85	17.31	143.94	140.17	143.05
5V;6H	142.85	17.31	139.45	17.28	142.13	13.88	143.05	139.65	142.44
7V;8H	142.13	13.88	138.92	13.78	141.82	10.46	142.44	139.23	141.90
9V;10H	141.82	10.46	139.25	10.46	141.40	7.74	141.90	139.33	141.43
11V;12H	141.40	7.74	138.20	7.66	140.55	5.87	141.43	138.23	140.68
lead / k _{fm} = 13 N/mm ²									
1V;2H	144.90	24.11	143.65	24.13	145.10	20.93	144.90	143.65	145.02
3V;4H	145.10	20.93	144.20	20.98	144.90	18.55	145.02	144.12	145.03
5V;6H	144.90	18.55	144.10	18.51	145.07	16.25	145.03	144.23	145.06
7V;8H	145.07	16.25	144.30	16.27	145.00	13.97	145.06	144.29	145.09
9V;10H	145.00	13.97	144.10	13.96	144.85	11.75	145.09	144.19	145.05
11V;12H	144.85	11.75	143.45	11.74	144.75	9.43	145.05	143.65	144.86
13V;14H	144.75	9.43	144.07	8.01	144.80	7.39	144.86	144.18	144.86
15V;16H	144.80	7.39	144.30	7.44	144.75	5.77	144.86	144.36	144.84
1V;2H	144.80	24.04	142.70	24.05	144.60	20.28	144.80	142.70	144.77
3V;4H	144.60	20.28	142.90	20.19	144.60	17.09	144.77	143.07	144.70
5V;6H	144.60	17.09	143.00	17.06	144.55	14.00	144.70	143.10	144.63
7V;8H	144.55	14.00	143.13	14.02	144.67	10.33	144.63	143.21	144.75
9V;10H	144.67	10.33	142.50	10.33	144.45	7.66	144.75	142.58	144.39
11V;12H	144.45	7.66	141.54	7.61	144.10	5.57	144.39	141.48	143.76
1V;2H	144.85	24.01	140.20	24.00	144.00	20.22	144.85	140.20	143.87
3V;4H	144.00	20.22	140.60	20.20	143.40	17.11	143.87	140.47	143.15
5V;6H	143.40	17.11	140.20	17.10	142.62	14.00	143.15	139.95	142.52
7V;8H	142.62	14.00	139.62	14.02	142.10	10.30	142.52	139.52	142.13
9V;10H	142.10	10.30	138.35	10.31	141.15	7.64	142.13	138.38	141.28
11V;12H	141.15	7.64	136.15	7.61	139.90	5.54	141.28	136.28	140.06

Tabelle 7: Berechnete Breitenwerte (V = Vertikalstich; H = Horizontalstich)

pass	Gemessene Werte						Berechnete Werte		
	w ₀	h ₀	w ₁	h ₁	w ₂	h ₂	w ₀	w ₁	w ₂
Stahl / k _{fm} = 70 N/mm ²									
1V;2H	145.00	23.96	144.00	24.02	145.30	20.88	145.00	144.00	145.18
3V;4H	145.30	20.88	144.00	20.81	145.15	18.61	145.18	143.88	145.02
5V;6H	145.15	18.61	144.40	18.61	145.13	16.18	145.02	144.27	145.10
7V;8H	145.13	16.18	141.62	16.19	144.27	14.04	145.10	141.59	144.14
9V;10H	144.27	14.04	143.35	13.99	144.45	11.65	144.14	143.22	144.13
11V;12H	144.45	11.65	143.70	11.55	144.15	9.47	144.13	143.38	144.13
13V;14H	144.15	9.47	144.08	8.06	144.40	7.64	144.13	144.06	144.27
15V;16H	144.40	7.64	144.09	7.53	144.30	5.98	144.27	143.96	144.32
1V;2H	144.95	23.99	143.05	24.04	145.20	20.17	144.95	143.05	145.02
3V;4H	145.20	20.17	143.28	20.10	144.85	17.24	145.02	143.10	144.80
5V;6H	145.20	17.24	143.60	17.26	144.94	13.85	144.80	143.20	144.80
7V;8H	144.94	13.85	143.35	13.85	145.15	10.40	144.80	143.21	144.81
9V;10H	145.15	10.40	143.50	10.38	145.00	7.72	144.81	143.16	144.61
11V;12H	145.00	7.72	143.55	7.62	144.50	5.89	144.61	143.16	144.36
lead / k _{fm} = 13 N/mm ²									
1V;2H	144.95	23.89	140.40	23.92	144.00	20.29	144.95	140.40	143.94
3V;4H	144.00	20.29	140.23	20.14	142.85	17.31	143.94	140.17	143.05
5V;6H	142.85	17.31	139.45	17.28	142.13	13.88	143.05	139.65	142.44
7V;8H	142.13	13.88	138.92	13.78	141.82	10.46	142.44	139.23	141.90
9V;10H	141.82	10.46	139.25	10.46	141.40	7.74	141.90	139.33	141.43
11V;12H	141.40	7.74	138.20	7.66	140.55	5.87	141.43	138.23	140.68
lead / k _{fm} = 13 N/mm ²									
1V;2H	144.90	24.11	143.65	24.13	145.10	20.93	144.90	143.65	145.02
3V;4H	145.10	20.93	144.20	20.98	144.90	18.55	145.02	144.12	145.03
5V;6H	144.90	18.55	144.10	18.51	145.07	16.25	145.03	144.23	145.06
7V;8H	145.07	16.25	144.30	16.27	145.00	13.97	145.06	144.29	145.09
9V;10H	145.00	13.97	144.10	13.96	144.85	11.75	145.09	144.19	145.05
11V;12H	144.85	11.75	143.45	11.74	144.75	9.43	145.05	143.65	144.86
13V;14H	144.75	9.43	144.07	8.01	144.80	7.39	144.86	144.18	144.86
15V;16H	144.80	7.39	144.30	7.44	144.75	5.77	144.86	144.36	144.84
1V;2H	144.80	24.04	142.70	24.05	144.60	20.28	144.80	142.70	144.77
3V;4H	144.60	20.28	142.90	20.19	144.60	17.09	144.77	143.07	144.70
5V;6H	144.60	17.09	143.00	17.06	144.55	14.00	144.70	143.10	144.63
7V;8H	144.55	14.00	143.13	14.02	144.67	10.33	144.63	143.21	144.75
9V;10H	144.67	10.33	142.50	10.33	144.45	7.66	144.75	142.58	144.39
11V;12H	144.45	7.66	141.54	7.61	144.10	5.57	144.39	141.48	143.76
1V;2H	144.85	24.01	140.20	24.00	144.00	20.22	144.85	140.20	143.87
3V;4H	144.00	20.22	140.60	20.20	143.40	17.11	143.87	140.47	143.15
5V;6H	143.40	17.11	140.20	17.10	142.62	14.00	143.15	139.95	142.52
7V;8H	142.62	14.00	139.62	14.02	142.10	10.30	142.52	139.52	142.13
9V;10H	142.10	10.30	138.35	10.31	141.15	7.64	142.13	138.38	141.28
11V;12H	141.15	7.64	136.15	7.61	139.90	5.54	141.28	136.28	140.06

Tabelle 8: Berechnete Breitenwerte (V = Vertikalstich; H = Horizontalstich)

Die Koeffizienten c_3 und d_3 haben den Wert 0, da die entsprechenden Glieder in Gleichung (4) die Abhängigkeit vom Walzenradius darstellen, der jedoch im Laufe der Versuche nicht verändert wurde. Der Koeffizient d_2 ist der Exponent des Terms, der die Abhängigkeit zwischen der Breitenabnahme und der Einlaufbreite darstellt. Auch dieser Koeffizient hat den Wert 0, da die Einlaufbreite bei allen Versuchen konstant war und die Abhängigkeit der Breitenabnahme bereits durch Einbeziehung von Koeffizient d_1 berücksichtigt wird.

Um die Genauigkeit der verwendeten Gleichung bei der Breitungsvorausberechnung für eine Stichfolge zu überprüfen, wurden die Breitenwerte mit Hilfe der Koeffizienten in **Tabelle 6** für jeden vollständigen Versuchsstichplan berechnet. Der Breitenwert nach Stich 1 wurde zur Berechnung der Breite nach Stich 2 verwendet, der Wert nach Stich 2 für die Berechnung der Breite nach Stich 3, usw. Die Ergebnisse aus diesen Berechnungen sind in **Tabelle 7** aufgeführt, wobei die gemessenen und berechneten Breitenwerte nach den letzten Stichen jeweils besonders hervorgehoben wurden. Die Korrelation dieser Werte ist sehr gut ebenso wie die Korrelation zwischen den gemessenen und berechneten Werten der einzelnen Stichfolgen innerhalb eines Stichplans (**Bild 11**).

7.1.3 Anpassung der Breitungformel an die Warmbandvorstraße

Zur Anpassung der genannten Breitungformel wurden Prozessdaten der EKO-Stahl verwendet. Zunächst wurden mit Hilfe der gemessenen Prozessdaten die folgenden Parameter bestimmt:

- Walzkraft beim Horizontalstich
- Walzkraft beim Vertikalstich (Stauchstich)
- Stauchspalt
- Vorbandbreite beim Auslauf aus dem Horizontalgerüst

Im folgenden **Bild 12** sind die genannten Daten über eine Walzfolge von 7 Stichen dargestellt.

Anhand dieser Prozessdaten wurden die Zonen mit stabilem Walzverlauf bestimmt. Die Werte aus diesen Zonen wurden standardisiert und den entsprechenden Stichen zugeordnet. Da am Auslauf des Vertikalstichs die Breite nicht gemessen wurde, musste dieser Parameter berechnet werden. Hierzu wurden als Berechnungsdaten die Walzkraft und der Walzspalt beim Stauchstich sowie der Gerüstmodul des Stauchgerüsts verwendet.

Darüber hinaus konnte auf eine Prozessdatenbank zurückgegriffen werden, die die folgenden Daten enthielt:

- Nummer des warmen Vorbandes
- Anzahl der Stiche
- Brammenbreite
- Brammentemperatur
- Vorbanddicke errechnet mit Hilfe der Walzkraftdaten beim Horizontalstich, des Gerüstmoduls und der vorgegebenen Daten des Horizontalgerüsts
- Vorbandtemperatur am Auslauf des Horizontalgerüsts

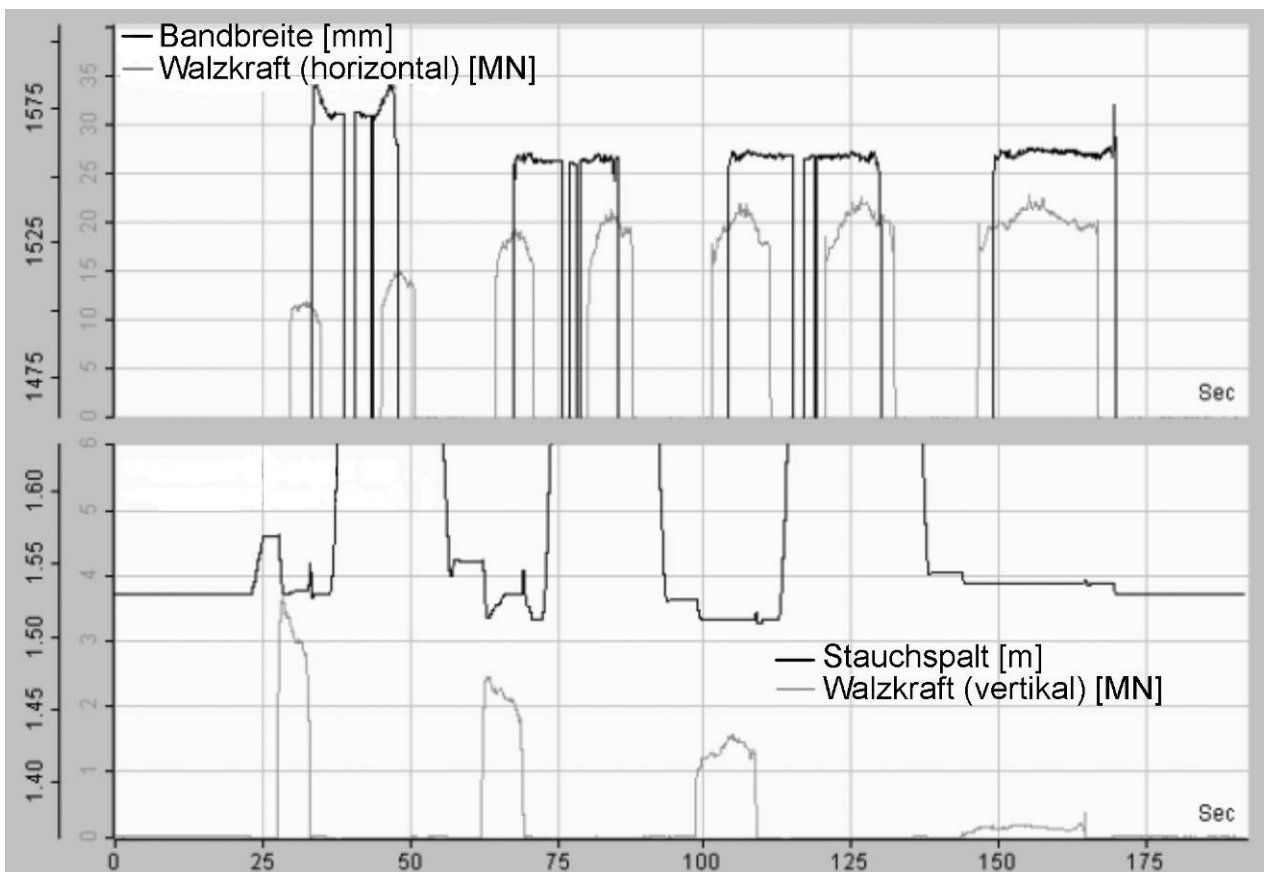


Bild 12: Prozessdaten für die Anpassung der Breitenformel

Für die Auswertung wurden Prozessdaten aus Walzungen mit sieben Stichen und normalen Walzverfahren verwendet. Unter normalen Walzverfahren werden hier solche verstanden, bei denen bei einer ungeraden Stichzahl eine Kombination aus Horizontal- und Vertikalwalzen und bei gerader Stichzahl nur das Horizontalwalzen zum Einsatz kommt.

Die ausgewählten Daten wurden erfasst und für die Breitenauswertung genutzt. Die folgende Tabelle ist ein Auszug aus dieser Datenbank. Die Pfeile geben an, auf welche Breitenwerte die jeweilige Breitenberechnung beruht.

Brammen-Nr.	Stich-Nr.	Einlaufbreite	Einlaufdicke	Arbeitswalzenradius (vertikal)	Zwischenbreite	Arbeitswalzenradius (horizontal)	Auslaufdicke	Auslaufbreite (gemessen)	Auslaufbreite (berechnet)
010902	1209	1345	225.0	525	1272	575	215.2	1313	1317
010902	1209	1313	215.2			575	186.5		1316
010902	1209	1316	186.5	525	1247	575	149.0	1279	1285
010902	1209	1279	149.0	etc.		575	108.8		1294
010902	1209	1294	108.8	525	1232	575	73.5	1276	1275
010902	1209	1276	73.5			575	46.3		1288
010902	1209	1288	46.3	525	1257	575	28.2	1279	1282
010902	7210	1322	225.0	525	1251	575	215.2	1289	1295
010902	7210	1289	215.2			575	186.5		1292
010902	7210	1292	186.5	525	1265	575	149.0	1284	1287
010902	7210	1284	149.0			575	108.8		1298
010902	7210	1298	108.8	525	1240	575	73.5	1280	1282
010902	7210	1280	73.5			575	46.3		1292
010902	7210	1292	46.3	525	1256	575	28.2	1282	1284

Tabelle 9: Datenbankauszug für die Breitenauswertung

Die normalisierten Daten wurden in zwei Gruppen aufgeteilt. Die eine Datengruppe wurde dazu genutzt, die Koeffizienten der Breitungsgleichung so zu bestimmen, dass die Abweichung zwischen Messwerten und berechneten Werten entsprechend der Methode der kleinsten Fehlerquadrate minimiert wird. Der zweite Teil der Daten wurde zur Überprüfung der gefundenen Koeffizienten eingesetzt. Die ermittelten Koeffizienten sind in **Tabelle 9** aufgeführt:

c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
7.84	2.70	0	1.40	0.19	-7E-6	-0.14	-0.26

Tabelle 10: Ermittelte Koeffizienten der Breitungsgleichung auf der Basis der Fehlerquadratmethode

Bild 13, Bild 14, Bild 15 und **Bild 16** zeigen eine Gegenüberstellung der für die Anpassung der Formel bzw. für die Überprüfung der Koeffizienten berechneten und gemessenen Breitenwerte. Außerdem wird die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Breitenwerten dargestellt.

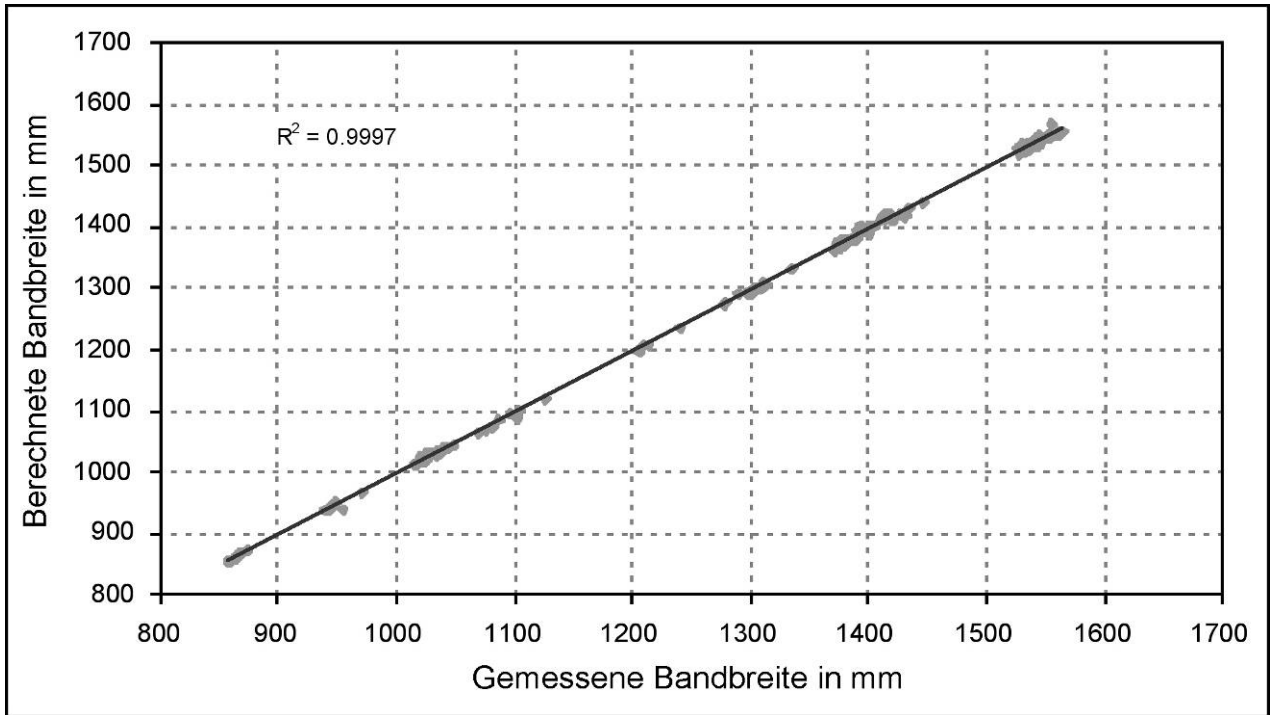


Bild 13: Vergleich der berechneten und gemessenen Walzgutbreiten (Daten für die Anpassung der Berechnungsformel)

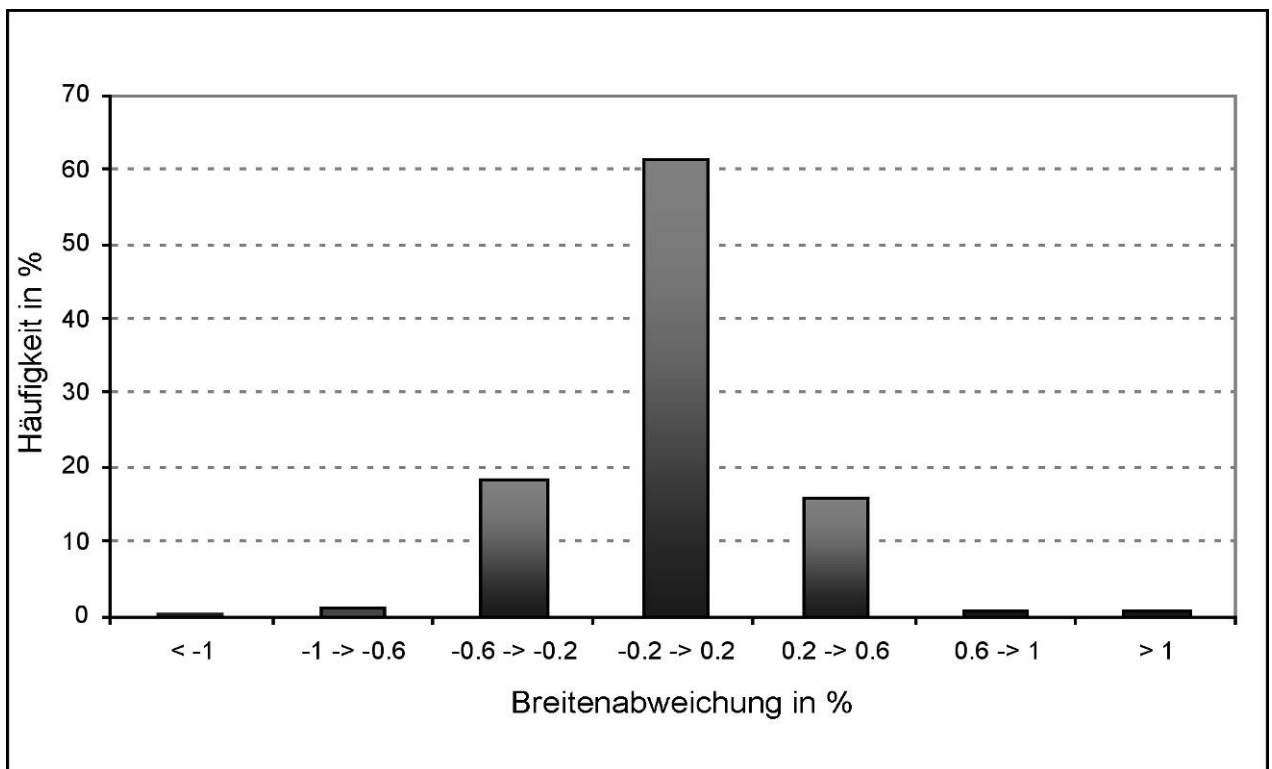


Bild 14: Verteilhäufigkeit der Abweichungen zwischen gemessener und berechneter Breite (Daten für Anpassung der Berechnungsformel)

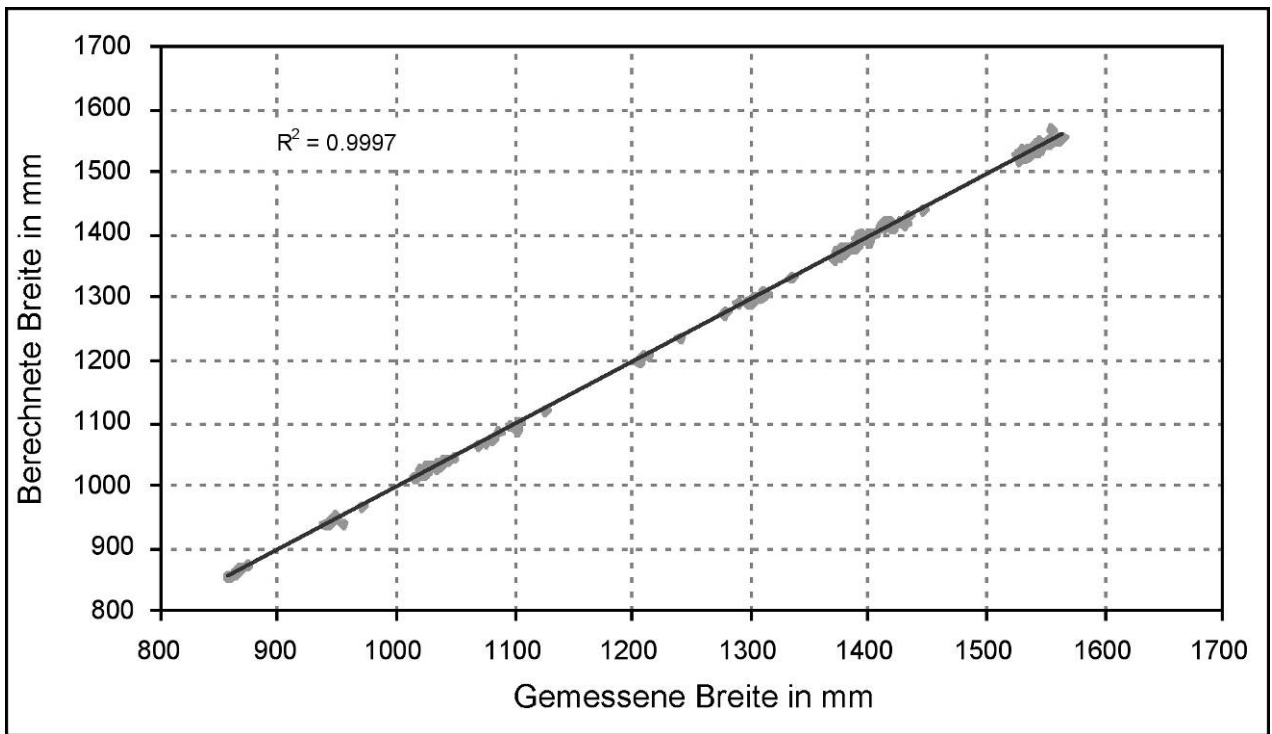


Bild 15: Vergleich von berechneter und gemessener Breite, Überprüfungsdaten

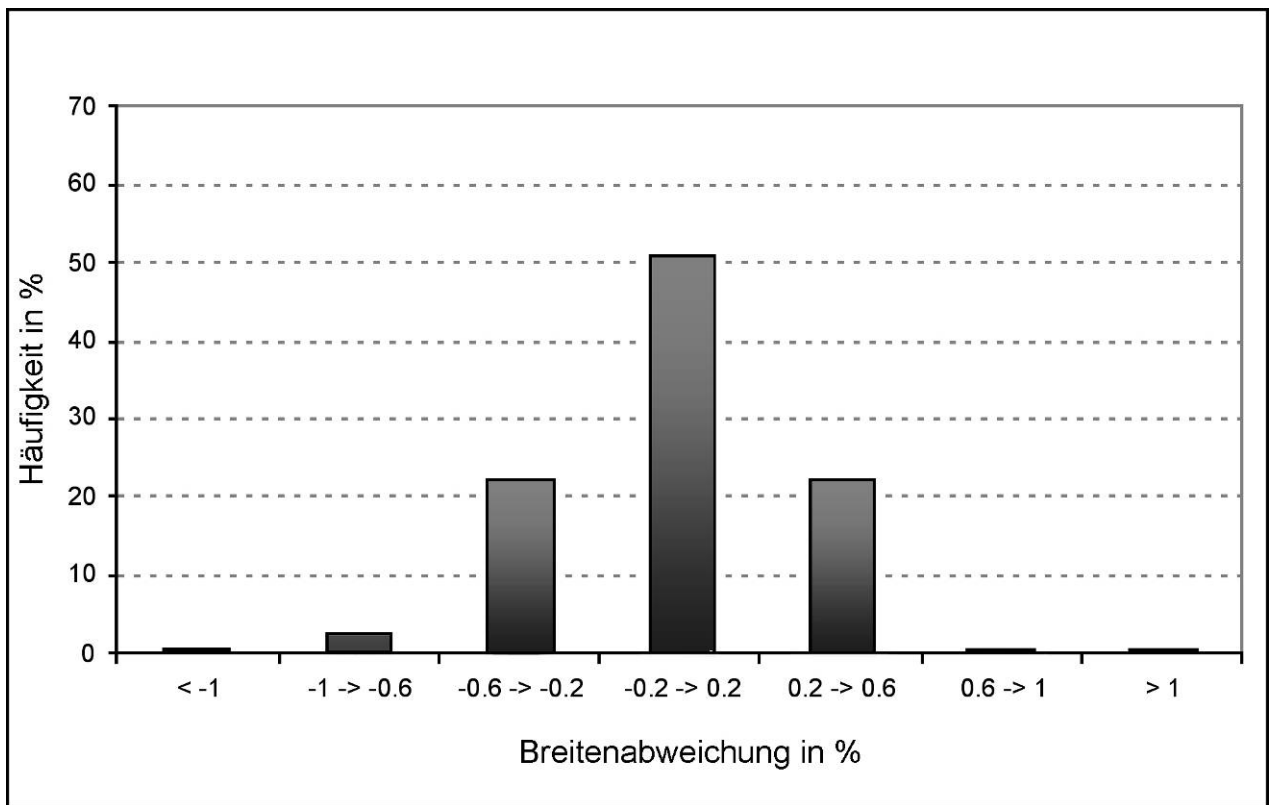


Bild 16: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen gemessener und berechneter Breite (Überprüfungsdaten)

Die Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Breitenwerte hat ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis geliefert. Mehr als 50 % der berechneten Werte weichen weniger als 0,2 % von den gemessenen Werten ab.

8 Laborversuche zur Untersuchung der Bandsäbelentstehung und -reduzierung

Viele Bandsäbeleinflussfaktoren sind bereits bekannt und in der Literatur beschrieben. Lediglich der in der Industrie oft zitierte Einfluss des Stauchens ist bisher nicht näher untersucht worden. Daher wurden im Rahmen der Arbeit Laborversuche zur Bestimmung der möglichen, die Säbelentstehung beeinflussenden Faktoren des Stauchens, durchgeführt.

In weiteren Versuchen war die Untersuchung der Regenerierung einer geraden, säbel- und dickenkeilfreien Form das Ziel. Im folgenden werden die Versuche detailliert beschrieben.

8.1 Versuche mit Plastilinproben

Auf Grund der mechanischen Eigenschaften eignet sich Plastilin gut zur Simulation des Stahlverhaltens bei Warmwalztemperaturen. Besonders vorteilhaft ist die einfache Handhabung der Proben. Etwas schwieriger gestaltet sich die genaue Vermessung der Proben, da sich diese sehr leicht verformen und dadurch nur eine Handmessung direkt nach dem durchgeführten Versuch ermöglichen. Um jedoch das grundsätzliche Verhalten des Materials sowie erste Erkenntnisse zu gewinnen, eignen sich Plastilinversuche sehr gut.

Die Versuche wurden auf einem Plastilinwalzwerk (Beschreibung s. Kap. 6.1) am Institut für bildsame Formgebung der RWTH Aachen durchgeführt.

Die durchgeführten Versuche sowie die Versuchsbedingungen sind in **Tabelle 10** zusammengefasst. Jeder Versuch wurde dreimal mit drei gleichen Proben durchgeführt. Die Breitenreduktion im Vertikalstich und die Dickenreduktion im Horizontalstich betragen 5 mm in allen Experimenten. Im folgenden Text sind die Versuche detailliert beschrieben.

Versuch	Stich	Säbel
<i>Asymmetrisches Stauchen</i>		
Unterschiedliche Walzendurchmesser / d ₁ =70mm, d ₂ =90mm	Vertikal + Horizontal	Nein Ja
Außermittige Probenlage / 5 mm	Vertikal + Vertikal (Versatz zur anderen Seite)	Ja Nein
Schräges Kopfende	Vertikal + Horizontal	Ja Nein
Schräges Kopf- und Fußende	Vertikal + Horizontal	Ja Ja
Unterschiedliche Rauheit der Walzenoberfläche	Vertikal + Horizontal	Nein Nein
<i>Seitenführungen</i>		

Walzenschwenken (4mm / bezogen auf die Walzenbreite)	Horizontal	Ja
Walzenschwenken + Seitenführungen	Horizontal	Ja
Walzenschwenken + Seitenführungen zur Hälfte des Versuches	Horizontal	Ja

Tabelle 11: Versuche mit Plastilinproben

8.1.1 Einfluss unsymmetrischen Stauchens auf die Säbelentstehung

Verschiedene Hinweise aus der Industrie zielen auf einen möglichen Einfluss des Stauchers bez. der Säbelentstehung. So wird genannt, dass der Stauchprozess nicht symmetrisch verläuft. Eine Staucherwalze wird deutlich zeitlich versetzt berührt, so dass der Umformprozess auf einer Bandkante früher beginnt. Die Länge der sogenannten Kopf- und Fußhaken (siehe Kapitel 4.2) entspricht den industriellen Hinweisen nach häufig dem Abstand zwischen den Staucher- und Horizontalwalzen. Hinzu wird vermutet, dass durch den Einsatz der „short stroke“-Technologie eine ungenaue Führung hervorgerufen wird. Bei diesem Verfahren wird der Stauchprozess an den beiden Enden für eine sehr kurze Zeit deutlich reduziert.

Zur Untersuchung des unsymmetrischen Stauchens wurde zunächst das Walzen mit verschiedenen großen Durchmessern der Stauchwalzen simuliert. Hierbei entstanden nach dem Stauchstich unterschiedlich große Wulste an den Kanten der Proben (unsymmetrisches Hundeknochenprofil). Dieser Zusammenhang ist im folgenden **Bild 17** dargestellt. Das Längsprofil wies keine Säbel nach dem Stauchstich auf. Im nachfolgenden Flachstich bildete sich ein deutlicher Säbel aus. Das beim Stauchen entstandene unsymmetrische Dickenprofil führte beim Flachstich zu verschiedenen großen Abnahmen an den beiden Probenseiten, was zu unterschiedlichen Längungen entlang der Probenbreite führte und damit zum Säbel. Dieses Verhalten der Proben entspricht dem Verhalten einer geraden Probe, welche mit geschwenkten Walzen gewalzt wird. Dieser Sachverhalt ist in **Bild 20** dargestellt.

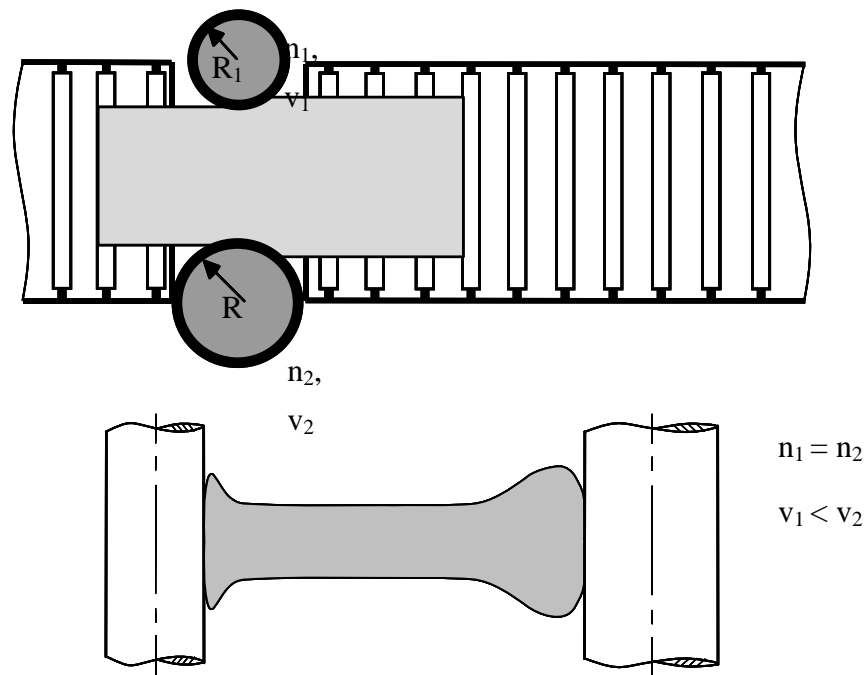


Bild 17: Unterschiedliche Durchmesser der Stauchwalzen führen zur Entstehung eines unsymmetrischen Dickenprofils und damit zum Säbel im nachfolgenden Flachstich

Außermittige Lage beim Stauchen der Plastilinproben führte zur Entstehung einer Krümmung bereits beim Stauchprozess, wie schematisch in **Bild 18** dargestellt. Die Probenbrammen wurden von einer Stauchwalze zuerst gegriffen und auf dem Rollgang gedreht, wodurch der Stauchprozess auf beiden Seiten einer Probe ungleich war und dadurch eine leicht unterschiedliche Längung der Probe auf den beiden Kantenseiten stattfand, wodurch ein leichter Kopfhaken entstand. Die Länge des Kopfhakens entsprach ca. 1/3 der gesamten Probenlänge. Danach wurden die Proben um den gleichen Betrag auf der anderen Probenkante versetzt gestaucht, wodurch der Kopfhaken nahezu vollständig aufgehoben wurde. Neben der unterschiedlichen Längung ist zu vermuten, dass auch das beim versetzten Stauchen entstehende Hundeknochenprofil unsymmetrisch ist. Bei Proben, welche im Anschluss an den versetzten Stauchprozess im Horizontalgerüst gewalzt wurden, bildete sich ein deutlicher Säbel aus (Verhalten der Probe wie im **Bild 20** dargestellt). Dies weist darauf hin, dass beim versetzten Stauchen nicht nur eine leichte unsymmetrische Längung, sondern auch ein unsymmetrisches Dickenprofil entsteht.

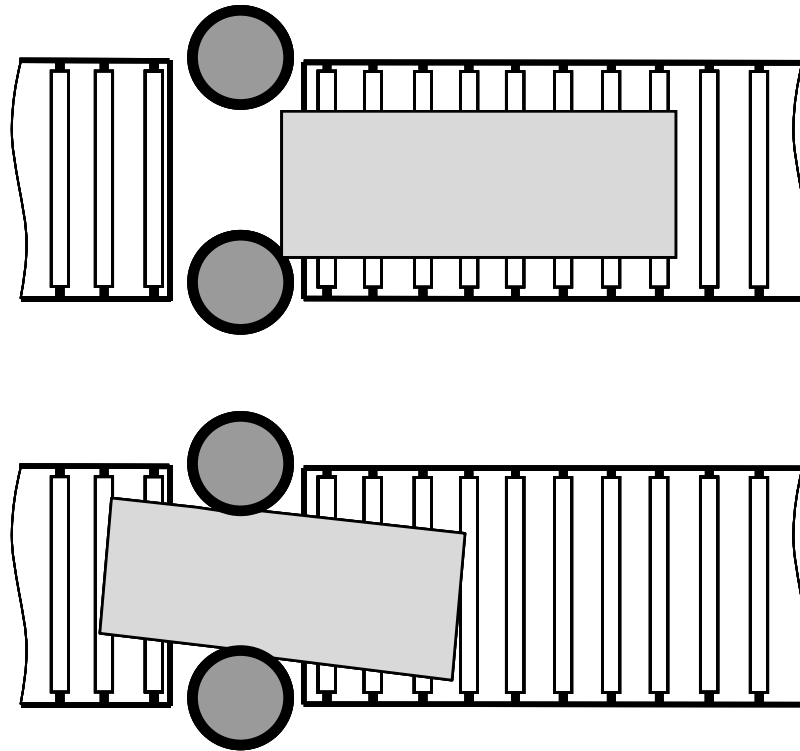


Bild 18: Außermittige Probenlage führte zu einem versetzten Stauchprozess und damit zu einem leichten Kopfhaken. Im anschließenden Reduzierwalzen entwickelte sich ein deutlicher Säbel

Bei Versuchsproben mit angeschrägtem Kopfende war nach dem Stauchstich eine Krümmung festzustellen, die sich in Richtung der kürzeren Bandkanten ausbildete **Bild 19**. Durch den Stauchvorgang wurde zusätzlich eine Aufwulstung der Bandkanten hervorgerufen, die sich an der kürzeren Bandseite weitaus deutlicher ausprägte (unsymmetrisches Hundeknochenprofil). Im sich anschließenden Horizontalstich führte dieser Effekt zu einem Krümmungsausgleich und zwar derart, dass sich der Bandsäbel nahezu vollständig zurückbildete. In der Mehrzahl der Walzversuche erwies sich dieses Verhalten als reproduzierbar.

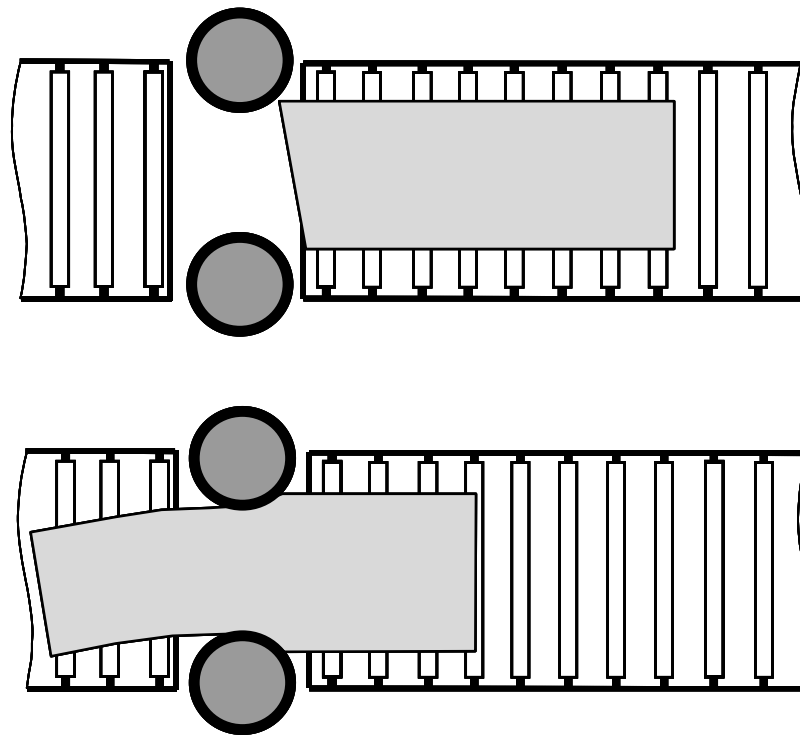


Bild 19: Schräges Kopfende führte zu einem Säbel nach dem Stauchstich. Beim nachfolgenden Horizontalstich wurde der Säbel aufgehoben

Des weiteren wurde der Einsatz von Stauchwalzen mit verschiedenen Oberflächen, dadurch sehr unterschiedlichen Rauheiten der Walzenoberfläche untersucht. Hierbei wurde keine Säbelbildung beobachtet. Auch das anschließende Flachwalzen führte zur fehlerfreien, geraden Probe.

Allgemein konnte beobachtet werden, dass nur mittels des Stauchvorganges existierende Säbel nicht immer aufgehoben werden konnten, jedoch beim Flachwalzen die Säbeligkeit oft und effektiv aufgehoben werden konnte. In den meisten Fällen wurden Längssäbel, selten Fuß- und Kopfhaken, beobachtet.

8.1.2 Einfluss der Seitenführungen auf die durch Schwenken hervorgerufene Säbelentstehung

In der industriellen Fertigung sind vor und hinter der Vorstraße Seitenführungen installiert. Diese Seitenführungen dienen vor dem Walzen zur Zentrierung des Bandes, werden während des Walzens jedoch wieder um einen bestimmten Betrag aufgefahren, um ein Festklemmen des Bandes durch Breitenschwankungen sowie Beschädigungen der Seitenführungen zu vermeiden.

In den im folgenden beschriebenen Versuchen sollte der Einfluss der Seitenführungen auf das Verhalten der Probenbramme und die Ausbildung eines Säbels untersucht werden. Die Walzen wurden um 4 mm geschwenkt (bezogen auf die Walzenbreite, 2,25 mm bezogen auf die Probenbreite), um einen Säbel zu generieren. Die Abnahme betrug bei allen Versuchen 5 mm (22mm – 17mm). Zunächst wurden 3 gerade und keilfreie Proben ohne Seitenführungen gewalzt, um das Verhalten der Probenbramme zu untersuchen und Referenzproben zu erhalten. Beim Walzen war bei allen Proben

eine Drehung der Proben auf der Einlaufseite des Gerüsts zu beobachten. Die Proben drehten stets zu der Seite, an welcher weniger abgenommen wurde. Am Auslauf war die Generierung des Säbels deutlich sichtbar. Die durch die unterschiedliche Abnahme entstandene Krümmung wurde in allen Versuchen in gleicher Weise reproduziert. **Bild 20** zeigt schematisch das Verhalten der Probe beim Walzen mit geschwenkten Walzen.

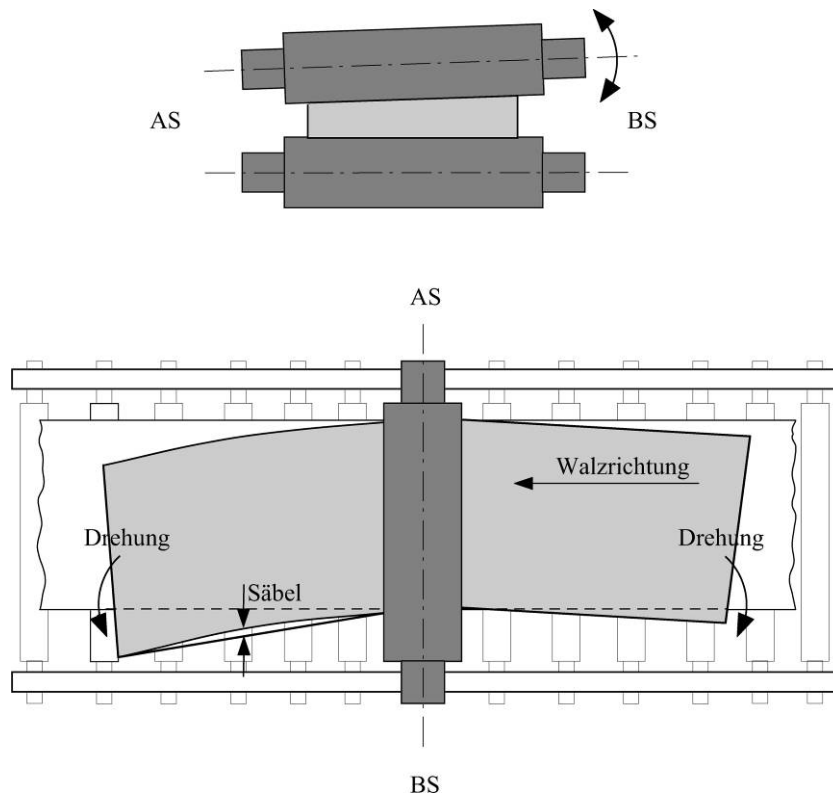


Bild 20: Walzenschwenken führt zu einer Drehung der Probe sowie zum Säbel

In **Bild 21** ist eine Probe mit einem deutlich sichtbaren Säbel zu sehen.



Bild 21: Typische beim Walzen mit geschwenkten Walzen und ohne Seitenführungen generierte Probenform

Im zweiten Schritt wurden 3 Proben mit Verwendung von Seitenführungen gewalzt. Hierbei waren die Seitenführungen während der gesamten Walzung mit der Probe in Kontakt. Als Seitenführungen dienten aus Stahlblech gebogene Winkel, die am Modelwalzgerüst montiert wurden.

Die in diesen Versuchen generierten Säbel wiesen im Vergleich zu den durch das Walzen ohne Seitenführungen generierten Säbel eine deutlich geringere Krümmung auf. Durch die Seitenführungen wurde die Entstehung der Krümmung zurückgedrängt. Hierbei wurde eine Kraft von den Seitenführungen auf die Probenkanten ausgeübt. An der Einlaufseite versucht sich die Probe zu der Seite zu drehen, an welcher weniger abgenommen wird (die kürzere Seite der entstandenen Probe, siehe **Bild 20**). Diese Drehung wird von den Seitenführungen unterbunden. Auf der Auslaufseite möchte sich ein Säbel ausbilden, der ebenfalls mit einer Drehung zu der kürzeren Seite der Probe verbunden ist. Diese Bewegung wird auch hier von den Seitenführungen weitestgehend unterbunden. Dies bewirkt einen Materialstau im Walzspalt an der Seite, an der eine größere Dickenabnahme erzielt wird. Im folgenden **Bild 22** ist dieser Zusammenhang schematisch dargestellt. Hier wäre an der Antriebsseite (AS) des Gerüsts mit einem Materialstau auf Grund der Verhinderung der Säbelentstehung durch die Seitenführungen zu rechnen.

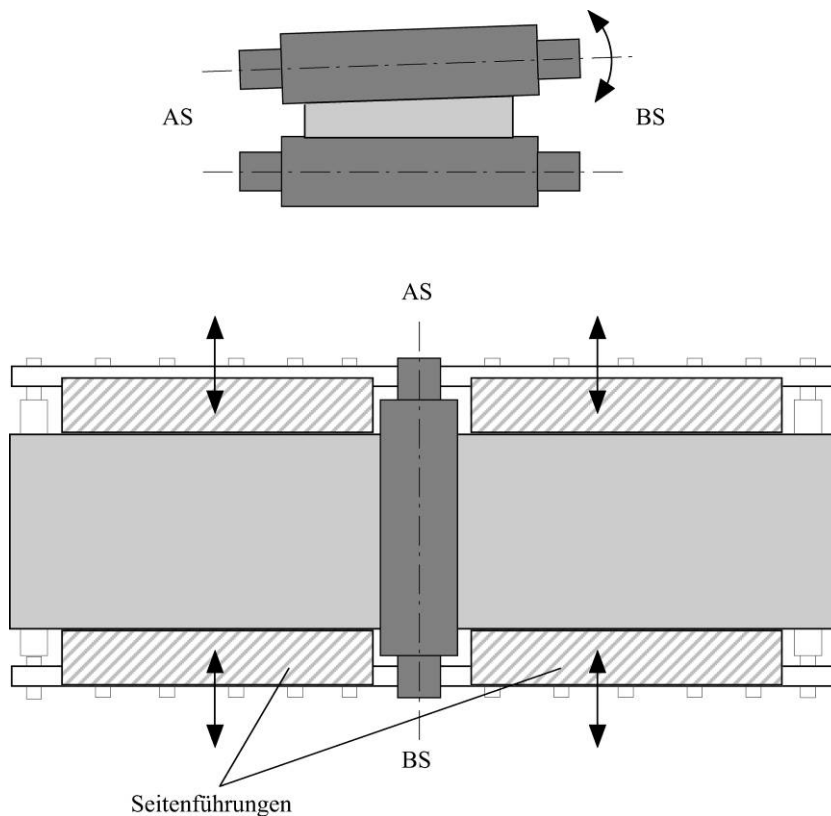


Bild 22: Unterbindung der Drehung und Säbelentstehung durch Verwendung der Seitenführungen

Sei-

Wie oben beschrieben beeinträchtigen die am Walzgut anliegenden Seitenführungen den Materialfluss in Bandlängsrichtung (Materialstau). In einer weiteren Versuchsserie war nun die Frage zu klären, in welchem Maße ein erhöhter Fließwiderstand in Bandlängsrichtung zu einer im Gegensatz

zum Walzen ohne seitliche Führung größeren Walzgutbreitung oder aber einer gerüstauffederungsbedingten Zunahme der örtlichen Banddicke führt **Bild 24**.

Hierzu wurden Bandproben gewalzt, und zwar der Bereich Kopf bis zur halben Probenlänge unter Einwirkung der Seitenführungen, die restliche Bandlänge ohne Führungsschienen. Die Drehung und Säbelentstehung wurde zunächst unterbunden und konnte sich in der zweiten Hälfte der Walzung frei ausbilden. Die Abnahmen und Schwenkbeträge entsprachen denen der vorherigen Versuchen (Abnahme = 22mm - 17 mm; Schwenkbetrag 4 mm, bezogen auf die Walzenbreite).

Eine zusätzliche Breitung (ca. 1 mm) an der entstandenen, längeren Probenseite der Phase der Walzung mit Seitenführungen konnte beobachtet werden. Diejenigen Probenhälften, die ohne Seitenführungen gewalzt wurden, wiesen eine Breitung von ca. 1 mm auf. Die Probenhälften, welche mit Seitenführungen gewalzt wurden wiesen eine etwa doppelt so hohe Breitung auf. Die zusätzliche Breitung schien nur auf der längeren Seite der Proben aufzutreten. Die kürzere Seite der Proben blieb ohne sichtbare Breitungsänderung.

Durch den Seitenführungskontakt entsteht offensichtlich eine unterschiedliche Spannungsverteilung entlang der Probenbreite, das Spannungsniveau ändert sich vom Druck an der Probenseite mit der höheren Abnahme zum Zug an der Probenseite mit der geringeren Abnahme, wie schematisch im **Bild 23** dargestellt. Diese unterschiedliche Spannungsverteilung bildet sich lokal in der unterschiedlichen Breitung aus und wirkt dadurch der Säbelentstehung entgegen.

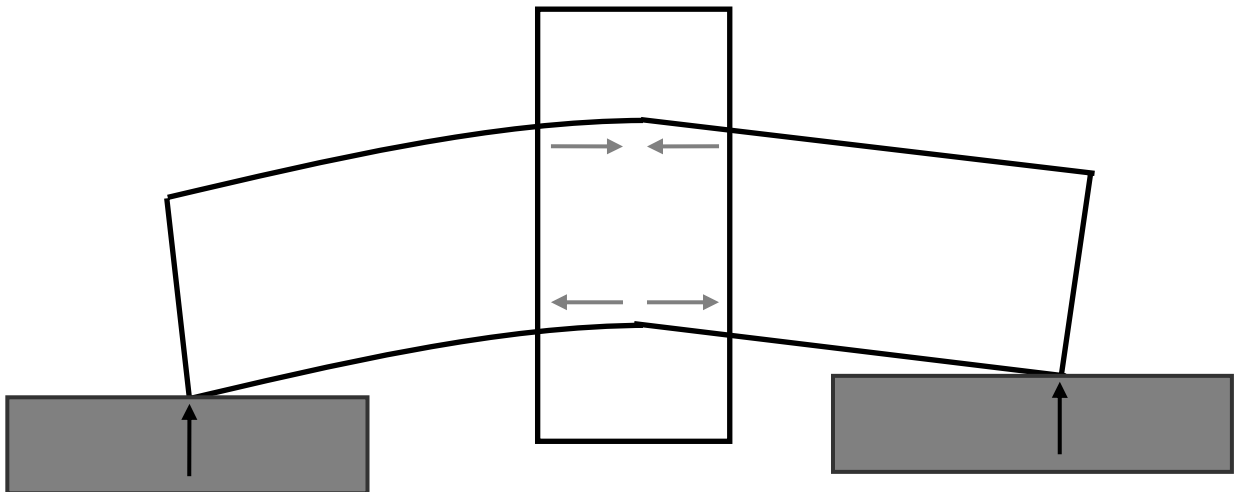


Bild 23: Unterschiedliches Spannungsniveau an den Probenkanten, hervorgerufen durch die Kraft der Seitenführung

Eine Dickenänderung konnte beim Vermessen der Proben nicht festgestellt werden. Entlang der gesamten Probenlänge war die Probe gleich dick. Die Probendicke entsprach exakt dem eingestellten Walzspalt. Dies zeigt, dass allgemein keine Auffederung des Modellgerüsts beim Walzen mit Plastilin stattfindet. Hierbei unterscheidet sich das Plastilinwalzen deutlich vom industriellen Stahlwalzprozess, wodurch die Gegebenheiten beim Stahlwalzen bez. der Auffederung des Gerüsts nicht exakt simuliert werden können. Es ist zu vermuten, dass beim Stahlwalzprozess eine zusätzli-

che Auffederung der Walzen an der Gerüstseite, an welcher die Abnahme und damit auch die Walzkraft höher sind, stattfindet und damit einen selbstregulierenden Prozess hervorruft. Sofern an dieser Seite das Gerüst auffedert, verringert sich der Unterschied in der Abnahme an den beiden Gerüstseiten, wodurch die Säbelentstehung reduziert wird.

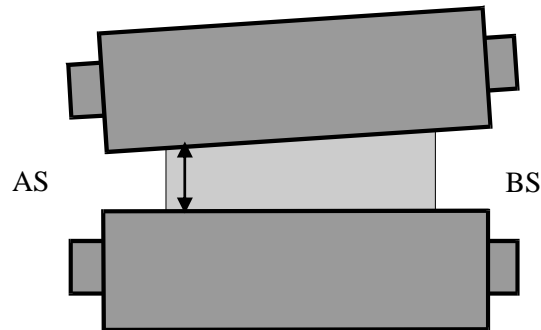


Bild 24: Reduzierung der Säbelentstehung durch mögliche Auffederung der Walzen, welche durch die Seitenführungen hervorgerufen ist (siehe Bild 22)

Wie oben bereits erwähnt, gestaltet sich eine genaue Vermessung der Plastilinproben schwierig. Auf Grund dessen konnten mittels Plastilin nur tendenzielle Erkenntnisse gewonnen werden. Diese wurden auf einem Modellwalzwerk unter Nutzung von Bleiprobe weiter untersucht.

8.2 Versuche mit Bleiprobe

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Kaltwalzversuche mittels Bleiprobe durchgeführt. Die wichtigste Überlegung hierbei war die gute Vergleichbarkeit vom Bleiumformverhalten bei Raumtemperatur und dem Stahnumformverhalten bei hohen Warmwalztemperaturen. Im folgenden **Bild 25** ist die Fließkurve von Blei bei Raumtemperatur dargestellt.

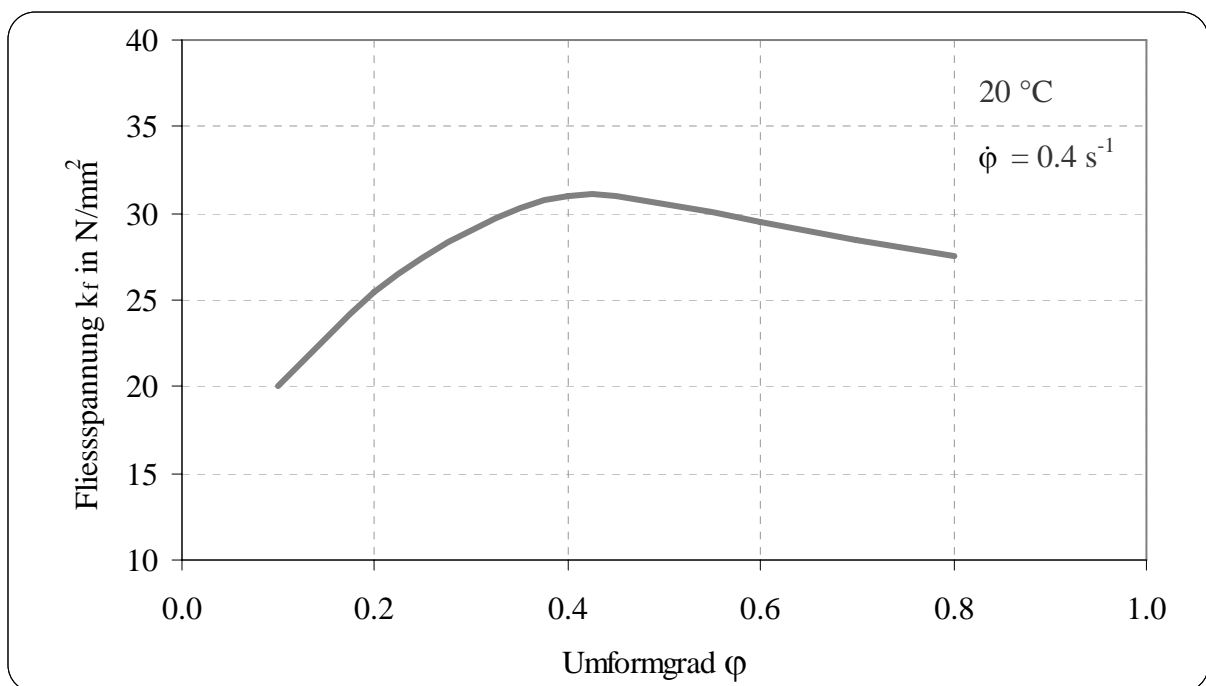


Bild 25: Fließkurve von Blei (Pb 99.9), [5]

Weitere Vorteile durch Verwendung von Blei sind folgende:

- das Arbeiten bei Raumtemperatur ist deutlich günstiger, da teure Aufheizkosten entfallen
- die Arbeit mit kalten Proben gestaltet sich deutlich einfacher und ist sicherer
- die Vermessung der Proben ist genauer, da die im Walzprozess entstandene Probengeometrie durch eventuelle asymmetrische Abkühlung nicht verändert wird

Die Versuche sind in **Tabelle 11** zusammengefasst und im folgenden Text detailliert beschrieben. Alle Versuche wurden zwei- bzw. dreimal mit jeweils gleichen Proben durchgeführt.

Versuch	Ver- suchs- No.	Stichtyp [Stich No.]	Schwenk- betrag	Schwenken im vorherigen Stich / Ein- gangsdicken- keil	Ein- gangs- dicke	Walz- spalt
[---]	[---]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Außermittige Proben- lage / 5 mm	V 1.1	ver.[1]+hor.[1]	---	---	25	17.5
	V 1.2	ver.[1]+hor.[1]	---	---	50	35
Säbelbildung durch Walzenschwenken	V 2.1	horizontal [1]	0.25	---	25	17.5
	V 2.2	horizontal [1]	0.5	---	25	17.5
	V 2.3	horizontal [2]	0.5	---	35	30
	V 2.4	horizontal [1]	0.5	---	50	35
	V 2.5	horizontal [1]	0.75	---	50	35
	V 2.6	horizontal [1]	0.5	---	50	45
	V 2.7	horizontal [1]	0.75	---	50	45
	V 2.8	horizontal [1]	1.5	---	50	40
Säbelreduzierung durch Gegenschwenken	V 3.1	horizontal [2]	---	0.25	17.5	14
	V 3.2	horizontal [2]	-0.5	0.5	17.5	14
Säbelreduzierung durch geraden Walzspalt	V 4.1	horizontal [2]	---	1.5	40	32
Säbelreduzierung durch sehr leichtes Schwenken	V 5.1	horizontal [3]	0.1	-0.5	14	11
	V 5.2	horizontal [3]	0.1	---	32	26
Säbelbildung durch Walzen von keiligen Proben	V 6.1	horizontal [1]	---	2	23	16.5
Vermeidung / Re- duzierung der Säbel- entstehung durch Sei- tenführung	V 7.1	horizontal [1]	---	2	23	16.5
	V 7.2	horizontal [1]	0.5	---	25	17.5
	V 7.3	horizontal [2]	0.5	---	35	30

Tabelle 12: Zusammenfassung der Versuche mit Bleiprobe

8.2.1 Vermessung der Proben

Allgemeine geometrische Daten der verwendeten Bleiprobe sind:

- Länge: 500 mm
- Dicke: 25 mm u. 50 mm
- Breite: 100 mm

Die Vermessung der Proben erfolgte im BFI. Im **Bild 26** ist die Vermessung der Proben schematisch dargestellt. Das Längsprofil, die längliche Form der Probe, wurde durch eine seitliche Abstandsmessung zu beiden Kanten der Probe (l_{AS} , l_{BS}) bestimmt. Das Dickenprofil wurde mittels einer oberhalb und unterhalb der Probe durchgeführten Abstandsmessung entlang der Probenbreite (d_o , d_u) an fünf Stellen entlang der Probenlänge (d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5) durchgeführt. Zur Messung wurde je nach Verfügbarkeit eine Laserabstandsmessung als auch eine Kontaktmessung verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Meßmethoden unterscheiden sich die gemessenen Signale im Verlauf voneinander. Die Messgenauigkeit beträgt in beiden Fällen $1\mu\text{m}$.

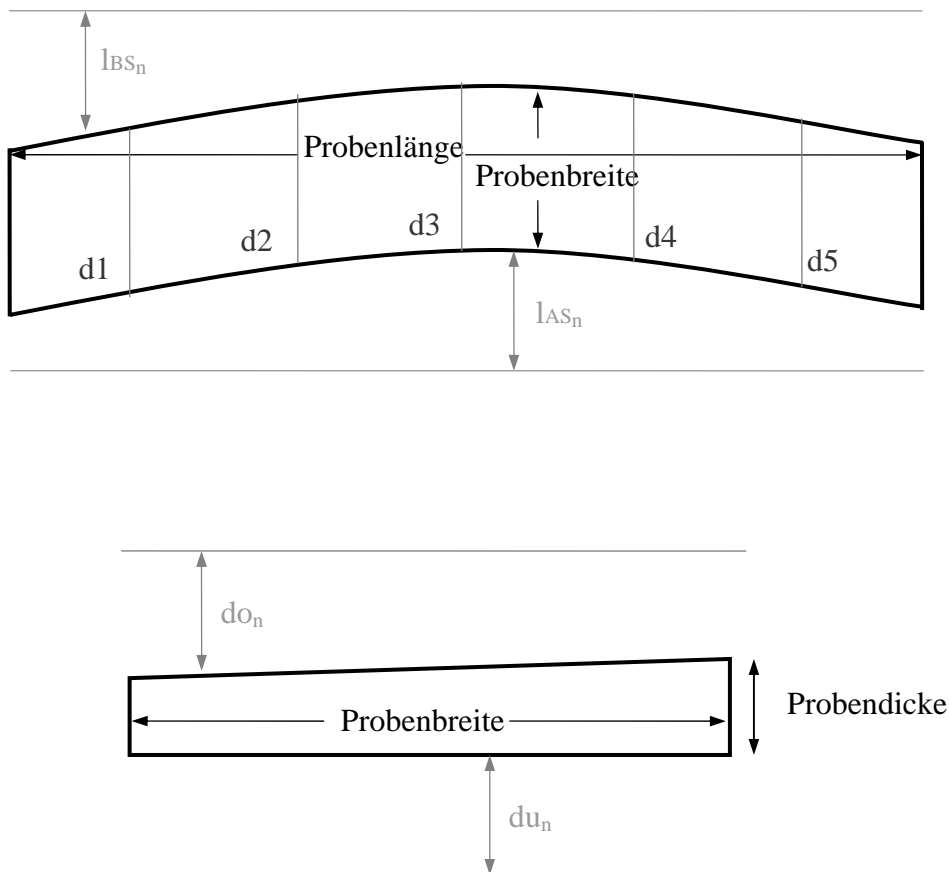


Bild 26: Vermessung der Proben

Die jeweiligen gemessenen Spuren der beidseitigen Längs- als auch beidseitigen Dickenmessung wurden gemittelt und dadurch zu einer Kurve vereint. An Hand dieser Kurven kann das Dicken- als auch das Längsprofil abgelesen werden.

Im Vorfeld der Versuche wurde das Dickenprofil aller Proben vermessen. Hiermit konnte sicher gestellt werden, dass die Proben keinen Dickenkeil enthalten, welcher zum Säbel führt und damit die Ergebnisse der Versuche verfälschen kann. Des weiteren wurde sicher gestellt, dass auch die Dicke der Probe entlang der Länge gleichmäßig ist. Alle geraden Proben wiesen ein gleichmäßiges Dickenprofil sowohl über der Breite als auch über der Länge der Probe auf. Die maximalen Abweichungen innerhalb der Schriebe haben 0.05 mm betragen. Bei keiner der Proben konnte ein Dickenkeil festgestellt werden. Im Bild 27 sind als Beispiel die Dickenprofile einer Probe dargestellt. Die maximalen Abweichungen innerhalb der Probe betragen 0.04 mm, die einzelnen Spuren zeigen kaum Unterschiede zueinander.

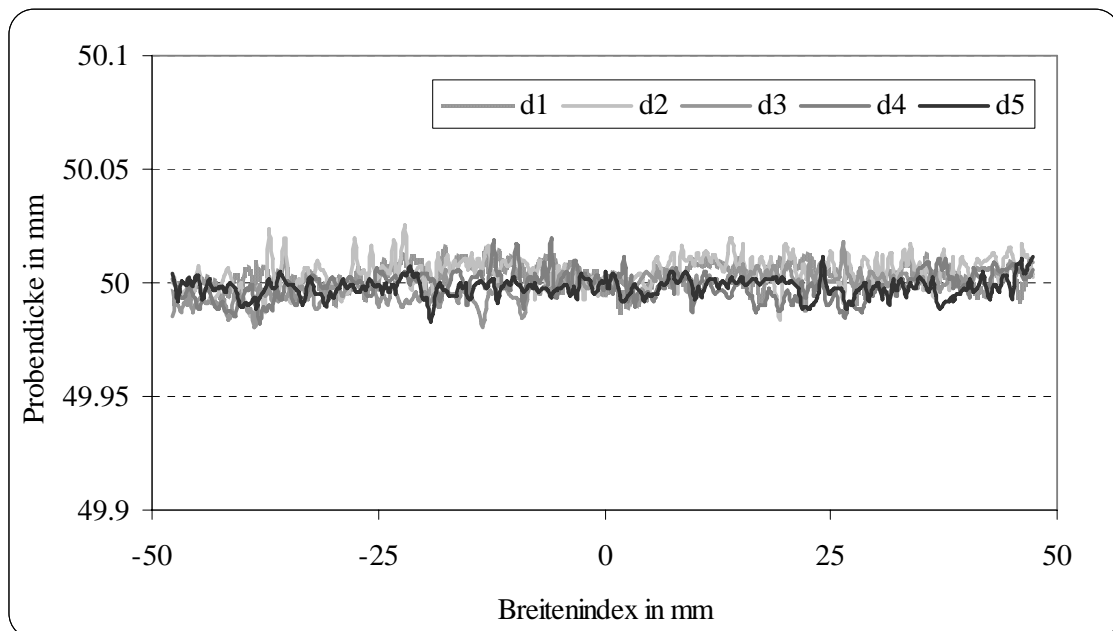


Bild27: Eingangsdickenprofile einer 50 mm dicken Probe

Zusätzlich hierzu wurden drei Proben so präpariert, dass sie einen Dickenkeil über der Probenbreite aufwiesen. Eine Seite der Proben wurde um 2 mm genau abgefräst. Mit diesen Proben wurde die Generierung des Bandsäbels bei Brammen mit einem Eingangsdickenkeil simuliert. Folgendes **Bild 28** zeigt die Dickenprofile einer dieser Proben. Alle drei Proben wurden genau mechanisch bearbeitet und wiesen damit gleiche Dickenprofile auf.

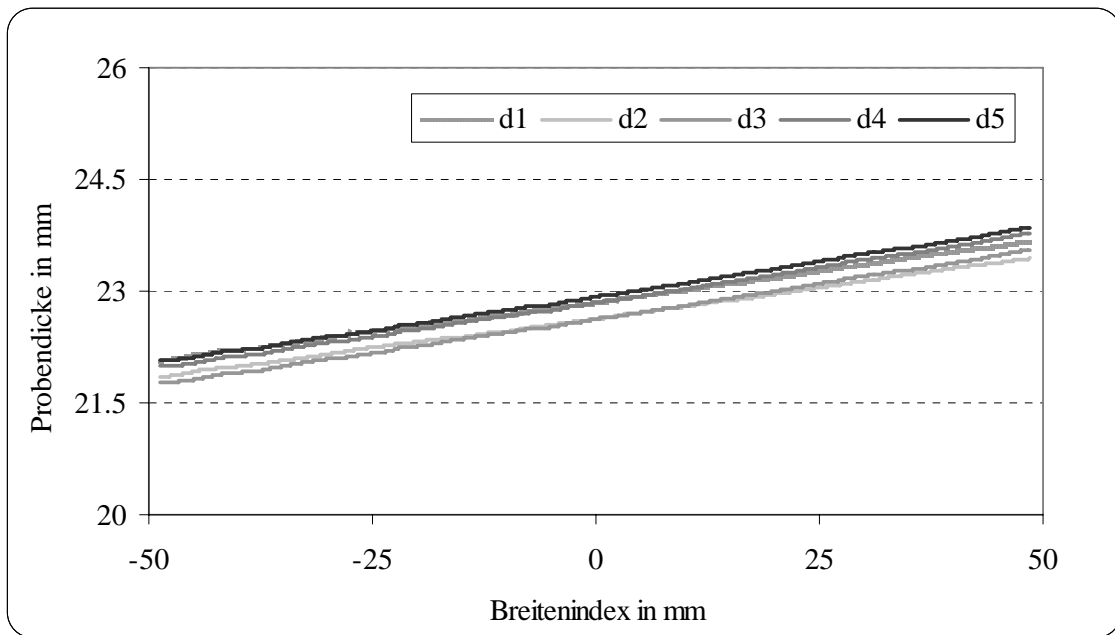


Bild 28: Eingangsdickenprofile einer keiligen Probe

8.2.2 Einfluss unsymmetrischen Stauchens auf die Säbelentstehung

Der Stauchprozess mittels verschiedener Durchmesser der beiden Stauchwalzen konnte am Bleimodellwalzwerk nicht durchgeführt werden, da nur ein Satz gleicher Stauchwalzen zur Verfügung stand. Hier können die auf dem Plastilinwalzwerk erzielten Erkenntnisse nicht verifiziert werden. Auch der Stauchvorgang mit verschiedenen rauen Walzenoberflächen konnte dadurch nicht simuliert werden. Dieser führte jedoch schon beim Plastilinwalzen zu keiner Säbelentstehung.

Die Außermittigkeit der Proben beim Stauchprozess wurde zunächst untersucht. Hierfür wurden 3 Bleiprobe n der Dicke 25 mm sowie 3 Bleiprobe n der Dicke 50 mm um 5 mm versetzt gestaucht. Die Stauchabnahme betrug immer 10 mm.

Versuch	Versuchs-No.	Stichtyp [Stich No.]	Eingangsdicke	Walzspalt
[---]	[---]	[---]	[mm]	[mm]
Außermittige Probenlage / 5 mm	V 1.1	ver.[1]+ hor. [1]	25	17.5
	V 1.2	ver.[1]+ hor. [1]	50	35

Tabelle 13: Stauchen mit Versatz

Eine ausgeprägte Säbelentstehung bereits nach dem Stauchvorgang, ähnlich wie beim Plastilinwalzen, konnte nicht beobachtet werden. Die Proben waren nahezu gerade, die Schwankung der Längsform betrug bei allen Proben maximal 0.8 mm. Dem Stauchvorgang folgte ein Horizontalwalzstich,

wobei die Walzen nicht geschwenkt wurden. Die Proben wurden nahezu säbelfrei gewalzt, in den meisten Fällen entstand jedoch ein leichter Fußhaken, Größenordnung ca. 1 - 2 mm.

Wie oben bereits erläutert, wurden das Längsprofil sowie das Dickenprofil der Proben anschließend an fünf Stellen entlang der Probenlänge gemessen. Beispielhaft sind die Ergebnisse einer Längsprofilmessung in **Bild 29** dargestellt.

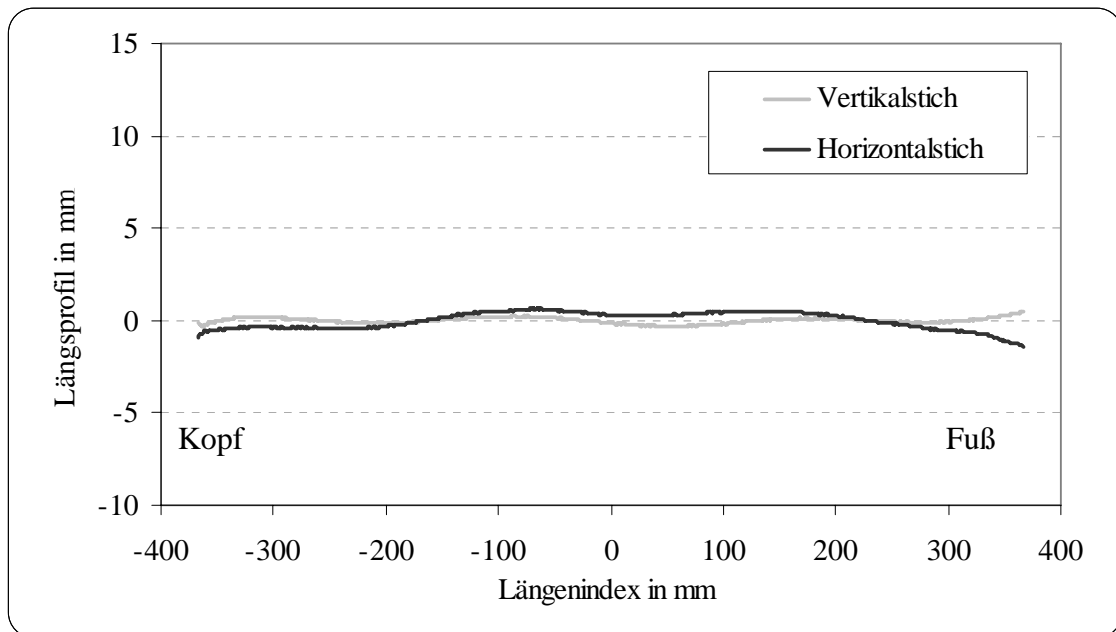


Bild 29: Längsprofil einer versetzt gestauchten Probe (V 1.2)

Die in der Abbildung dargestellte helle Kurve zeigt das Längsprofil, welches nach dem Vertikalstich einer Probe gemessen wurde. Wie oben bereits erwähnt, konnte keine Säbelentstehung nach dem Stauchvorgang beobachtet werden. Auch in diesem Beispiel ist sichtbar, dass die Probe nahezu gerade geblieben ist. Die maximale Ausschwenkung beträgt gerade mal 0.5 mm. Nach dem anschließenden Horizontalstich konnte häufig eine leichte Fußhakenentstehung beobachtet werden, so auch in diesem Beispiel. Die dunkle Kurve zeigt das Längsprofil der gleichen Probe nach dem anschließenden Horizontalstich.

Im folgenden **Bild 30** sind die Dickenprofile der gleichen Probe, gemessen nach dem Vertikalstich, dargestellt. Es ist sichtbar, dass nahezu alle Spuren das gleiche Dickenprofil aufweisen. Bis auf die letzte Spur am Fuß der Probe. Hier ist die durch die Stauchung hervorgerufene Dickenüberhöhung deutlich geringer und zu dem unsymmetrisch. Die geringere Dickenüberhöhung kann durch den zusätzlichen Freiraum und dadurch ermöglichten Materialfluss am Ende des Stauchvorganges erklärt werden. Zu beachten ist jedoch, dass zu Anfang der Walzung ebenfalls ein zusätzlicher Freiraum nach vorn existiert, die Kopfspur jedoch nicht von den mittleren Spuren abweicht.

Für die Säbelentstehung ist die Unsymmetrie der Spur interessant. Das unsymmetrische Dickenprofil führt zu einem Säbel im anschließenden Horizontalstich. Dies ist am Beispiel dieser Probe im

oben dargestellten **Bild 29** sichtbar. Am Fuß der Probe bildete sich im Horizontalstich ein leichter Fußhaken aus.

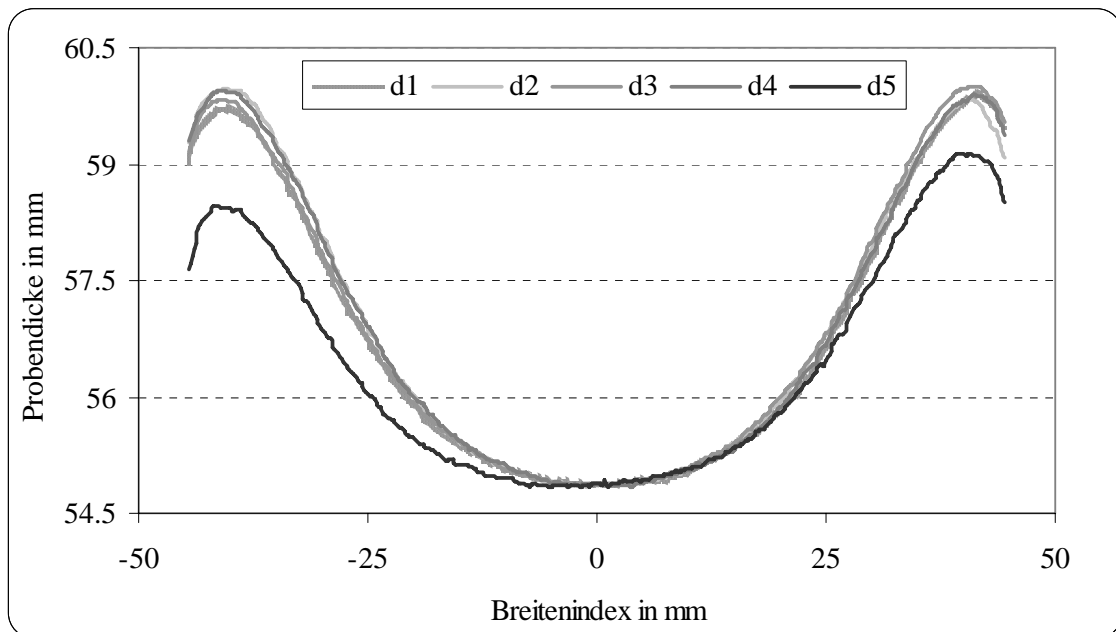


Bild 30: Dickenprofil einer versetzt gestauchten Probe (V 1.2)

Die Fußspur weist an der Versatzseite (die Seite, zu der die Probe außermittig verschoben wurde) eine größere Dickenüberhöhung auf. Dieses Verhalten konnte bei allen Proben beobachtet werden und ist Ursache für die im anschließenden Horizontalstich erzeugten Fußhaken. Die Unsymmetrie bei den 25 mm dicken Proben war bei gleichem Stauchgrad (10 mm) nicht so deutlich wie bei den doppelt so dicken Proben.

Nach den anschließenden Horizontalstichen wurden auch die Dickenprofile der Proben erneut vermessen. **Bild 31** zeigt das Dickenprofil der Probe, dessen Daten bereits in den oberen Bildern beispielhaft dargestellt wurden. Nach dem Horizontalstich ist die Probe überall nahezu gleich dick, auch die letzte Fußspur zeigt keine Unterschiede zu den übrigen Dickenprofilen. Eine leichte Unsymmetrie konnte jedoch bei allen Proben beobachtet werden. Alle Proben wiesen eine leichte Dickenüberhöhung (<0.1 mm) auf der Antriebsseite aus. Diese ist jedoch wahrscheinlich durch die Anlagenkonfiguration des Modellwalzwerkes zu erklären.

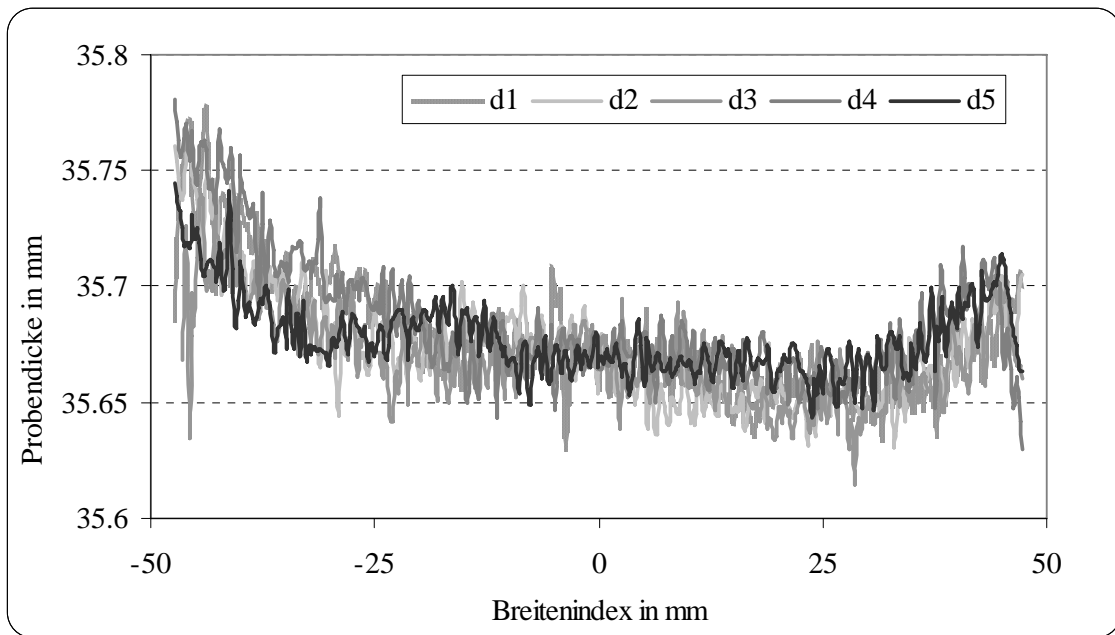


Bild 31: Dickenprofil einer versetzt gestauchten Probe nach dem anschließenden Horizontalstich (V 1.2)

8.2.3 Einfluss des Walzenschwenken auf die Säbelentstehung

Das Walzenschwenken ist ein Haupteinflussmittel auf die Säbelentstehung als auch Reduzierung. In Versuchen wurde zunächst die Entstehung des Säbels durch Walzenschwenken simuliert. Daraufhin wurde versucht, die entstandenen Säbel zu reduzieren oder die gerade Form vollständig zu reproduzieren. Hierbei wurde nicht nur die Längsform sondern auch das Dickenprofil beachtet. Sowohl vollkommen gerade als auch keilige (Dickenkeil über der Breite) Proben wurden eingesetzt.

Die Generierung des Säbels durch Walzenschwenken konnte problemlos durchgeführt werden. In der **Tabelle 13** sind die Daten der Walzenstiche angegeben:

Versuch	Versuchs-No.	Stichtyp [Stich-No.]	Schwenk- betrag	Eingangs- dicke	Walzspalt
[---]	[---]	[---]	[mm]	[mm]	[mm]
Säbelbildung durch Walzenschwenken	V 2.1	horizontal [1]	0.25	25	17.5
	V 2.2	horizontal [1]	0.5	25	17.5
	V 2.3	horizontal [2]	0.5	35	30
	V 2.4	horizontal [1]	0.5	50	35
	V 2.5	horizontal [1]	0.75	50	35
	V 2.6	horizontal [1]	0.5	50	45
	V 2.7	horizontal [1]	0.75	50	45
	V 2.8	horizontal [1]	1.5	50	40

Tabelle 14: Generierung des Bandsäbels

In allen Fällen bildete sich ein deutlicher Säbel aus. **Bild 32** zeigt beispielhaft das Längsprofil zweier 25 mm dicker Proben. In diesem Beispiel wurde der Schwenkbetrag zwischen 0.5 mm und 0.25 mm variiert, die Abnahme betrug 30%. Die Ausbildung des Säbels ist deutlich sichtbar. Der höhere Schwenkbetrag führt, wie erwartet, zu größeren Säbeln.

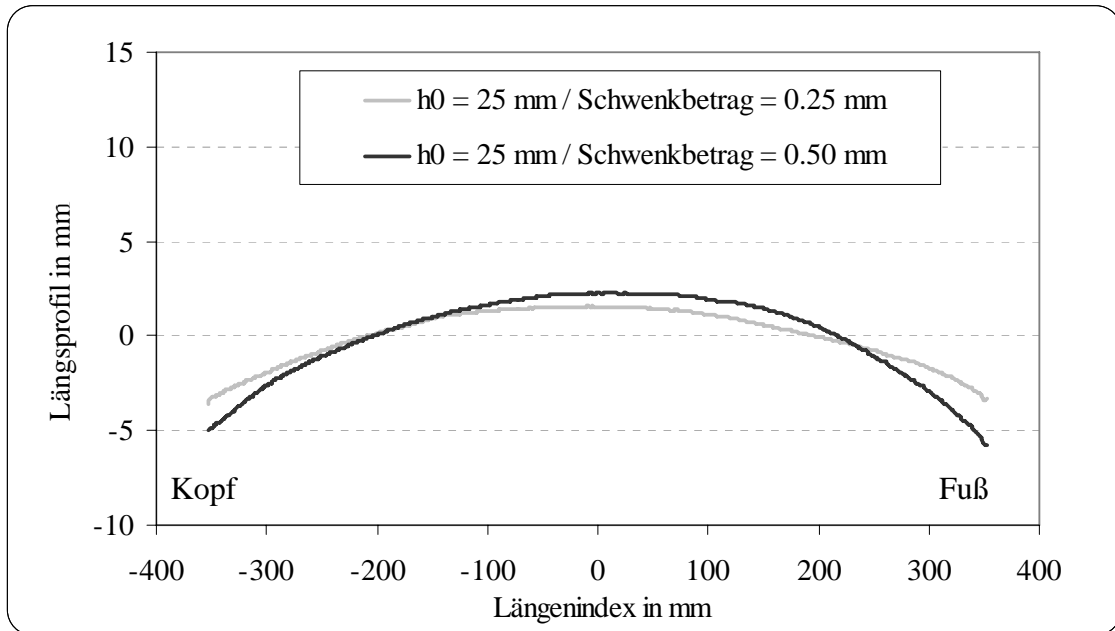


Bild 32: Längsprofile von mit geschwenkten Walzen gewalzten Proben (V 2.1, V 2.2)

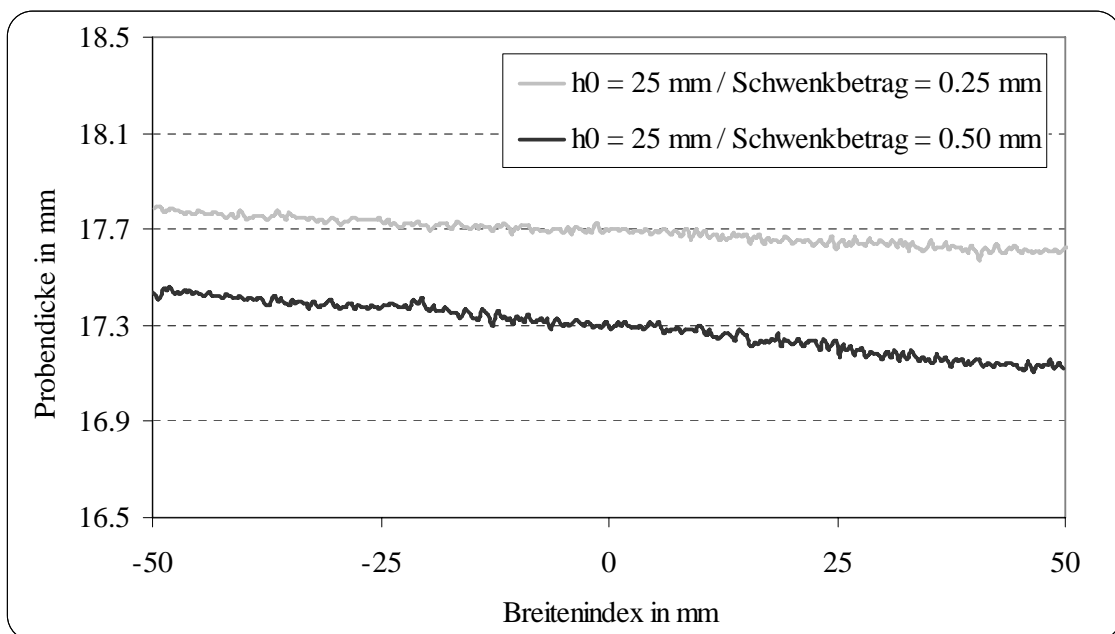


Bild 33: Dickenprofile von mit geschwenkten Walzen gewalzten Proben (V 2.1, V 2.2)

Die gemessenen Dickenprofile zeigen in allen Fällen einen deutlichen Dickenkeil. Die jeweiligen Dickenprofile stimmen sehr gut überein und zeigen sowohl innerhalb einer Probe als auch für verschiedene gleich gewalzte Proben kaum Abweichungen. Wegen einer besseren Übersicht werden in den nachfolgenden Diagrammen nur die Dickenprofile einer Spur pro Probe dargestellt. **Bild 33**

zeigt beispielhaft die Dickenprofile der mit geschwenkten Walzen gewalzten Proben, dessen Längsprofile im oberen **Bild 32** dargestellt sind.

Zum Vergleich sind im **Bild 34** und **Bild 35** Längs- und Dickenprofile von 50 mm dicken Proben, welche mit 10% Abnahme und Schwenkbeträgen zwischen 0.75 mm und 0.50 mm gewalzt wurden, dargestellt.

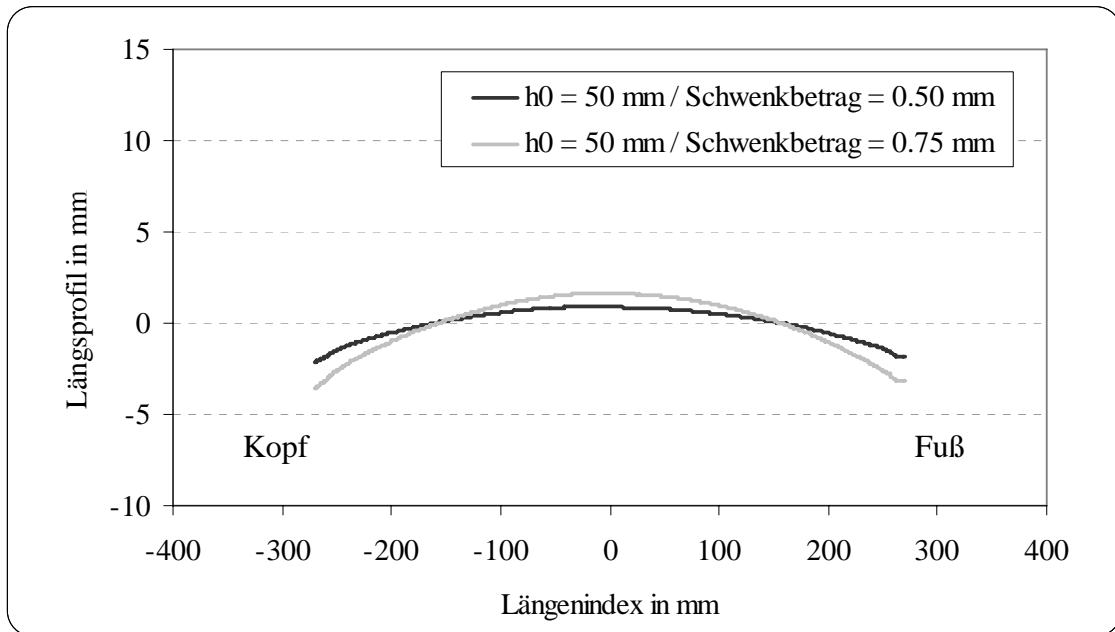


Bild 34: Längsprofile von mit geschwenkten Walzen gewalzten Proben (V 2.6, V 2.7)

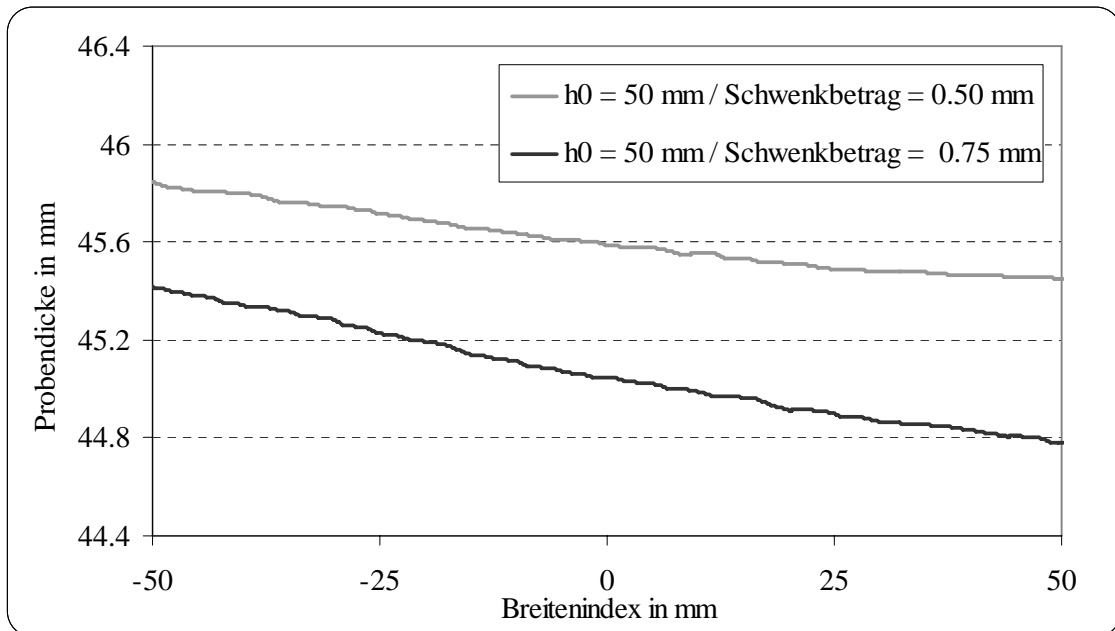


Bild 35: Dickenprofile von mit geschwenkten Walzen gewalzten Proben (V 2.6, V 2.7)

• **Auffederung des Gerüstes**

Wie aus den Diagrammen ablesbar ist, sind die gemessenen Dickenkeiligkeiten etwas geringer als der eingestellte Schwenkbetrag. Dies kann durch die Auffederung des Gerüstes hervorgerufen sein. Allerdings ist Blei sehr weich, eine messbare Auffederung wurde nicht vermutet. Neben der Auffederung während des Walzens können auch eine fehlerhafte Anzeige der Walzspalteinstellung oder stark abgenutzte Walzen zu diesen Unstimmigkeiten führen. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Stiche gefahren, bei welchen die Walzspalteinstellung mit Hilfe von Endmassen überprüft wurde. Diese Überprüfung stimmte jedoch vollständig mit der Anzeige überein, woraus gefolgert werden konnte, dass beim Bleiwalzen am oben genannten Walzwerk eine Auffederung der Walzen stattfindet. Ein Vergleich zwischen den mit Endmassen bestimmten Walzspalteinstellungen und den im Anschluss an den Walzspalt gemessenen Dickengrößen zeigte, dass eine Auffederung von etwa 0.3 bis 0.7 mm stattfindet.

8.2.4 Einfluss des Gegenschwenkens bei zuvor generierten Säbelproben

Nach dem die Generierung des Säbels erfolgreich war, wurde der schwierigeren Aufgabe Beachtung gewidmet, dem Zurückbilden einer säbel- und keilfreien Form. Hierzu wurden zunächst Versuche unternommen, bei denen ein Schwenkbetrag eingestellt wurde, welcher entgegen dem im Vorstich eingestellten Schwenkbetrag gerichtet war. In allen Fällen war der Walzspalt gleich eingestellt. Diese Einstellung entsprach im Versuch V 3.2 dem im vorherigen Stich eingestellten Schwenkbetrag, im Versuch V 3.1 war der vorheriger Schwenkbetrag (V 2.1) nur halb so groß. Im **Bild 37** sind die Dickenprofile der beiden Proben dargestellt. Trotz unterschiedlicher Vorgeschichte zeigen beide Dickenprofile nahezu den gleichen Verlauf.

Versuch	Versuchs-No.	Stichtyp [Stich No.]	Schwenkbetrag	Schwenken im vorherigen Stich / Eingangsdickenkeil	Eingangsdicke	Walzspalt
[---]	[---]	[---]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Säbelbildung durch Walzenschwenken	V 2.1	horizontal [1]	0.25	---	25	17.5
	V 2.2	horizontal [1]	0.5	---	25	17.5
Säbelreduzierung durch Gegenschwenken	V 3.1	horizontal [2]	-0.5	0.25	17.5	14
	V 3.2	horizontal [2]	-0.5	0.5	17.5	14

Tabelle 15: Gegenschwenken bei Walzung von Säbelproben

Die Längsprofile dieser Proben sind im **Bild 36** nach dem ersten und dem zweiten Stich dargestellt. Die Krümmung der Probe ist nach dem zweiten Stich zu der Gegenseite der Eingangskrümmung (im Bild die längeren Kurven) gerichtet. Während der Versuche konnte dieser Effekt beobachtet werden. Der im ersten Stich generierte Säbel wurde nun überkompensiert. Es entstand wiederum ein Säbel, allerdings in die Gegenrichtung gekrümmt. Durch die Längenzunahme der Proben sind die Absolutbeträge der Säbelauslenkung deutlich höher als zuvor.

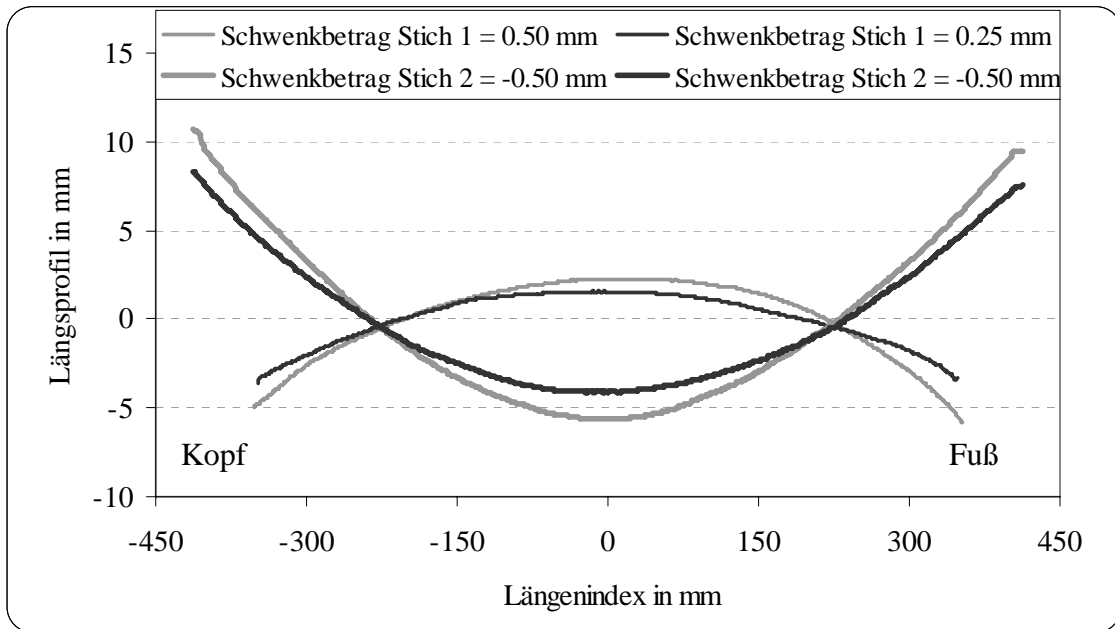


Bild 36: Längsprofile von mit entgegen geschwenkten Walzen gewalzten Proben (V 2.1, V 2.2, V 3.1, V 3.2)

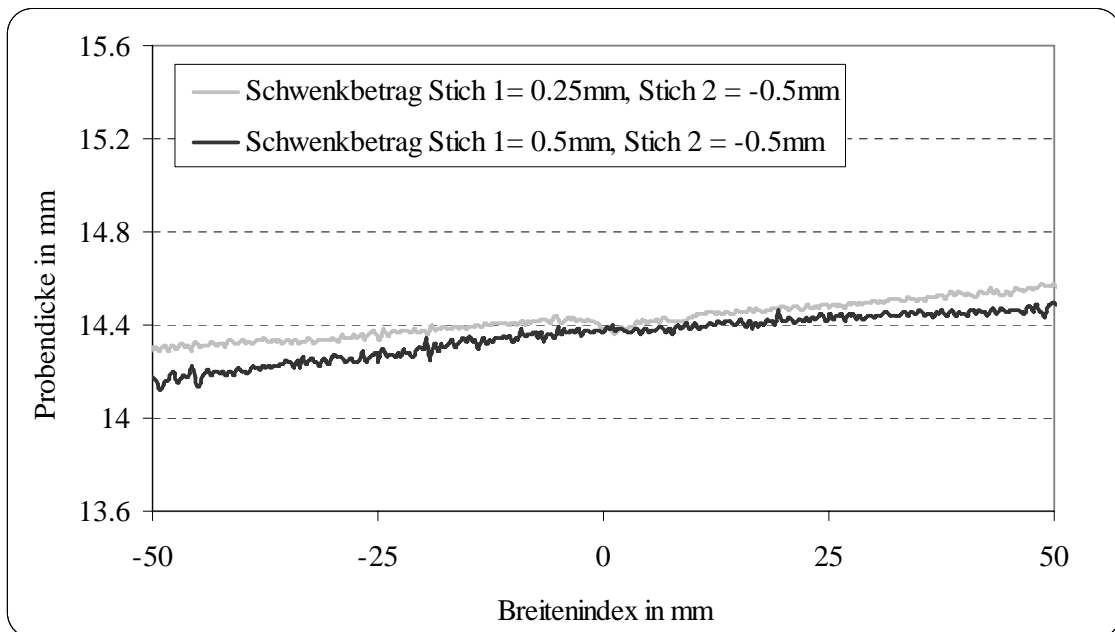


Bild 37: Dickenprofile von mit entgegen geschwenkten Walzen gewalzten Proben (V 3.1, V 3.2)

8.2.5 Einfluss des Walzens mit geradem Walzspalt bei zuvor generierten Säbelproben

In weiteren Versuchen wurden die im ersten Stich zu Säbeln gewalzten Proben nun mit einem gerade gestellten Walzspalt gewalzt. Hierbei wurden dicke Proben und sehr hohe Schwenkbeträge im ersten Stich eingesetzt.

Die Abnahme betrug ca. 20 %. Wie schon bei den Versuchen zuvor konnte ein Verlaufen der Proben zur Bedienseite (längere Seite der Eingangsprobe) beobachtet werden, allerdings nur sehr leicht. Bei allen Proben entstand ein leichter Säbel in die entgegengesetzte Richtung. Der Eingangssäbel wurde wie zuvor „überkompensiert“, allerdings nicht so stark. Im folgenden **Bild 38** sind die Längsprofile einer der gewalzten Proben nach der ersten Walzung mit geschwenkten Walzen sowie nach der zweiten Walzung mit geradem Walzspalt beispielhaft dargestellt. Wie im dargestellten Beispiel waren alle entstandenen Säbel deutlich kleiner als die in zuvor beschriebenen Versuchen.

Versuch	Versuchs-No.	Stichtyp [Stich No.]	Schwenkbetrag	Schwenken im vorherigen Stich / Eingangsdickenkeil	Eingangsdicke	Walzspalt
[---]	[---]	[---]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Säbelbildung durch Walzenschwenken	V 2.8	horizontal [1]	1.5	---	50	40
Säbelreduzierung durch geraden Walzspalt	V 4.1	horizontal [2]	---	1.5	40	32

Tabelle 16: Walzung von Säbelproben mit einem gerade gestellten Walzspalt

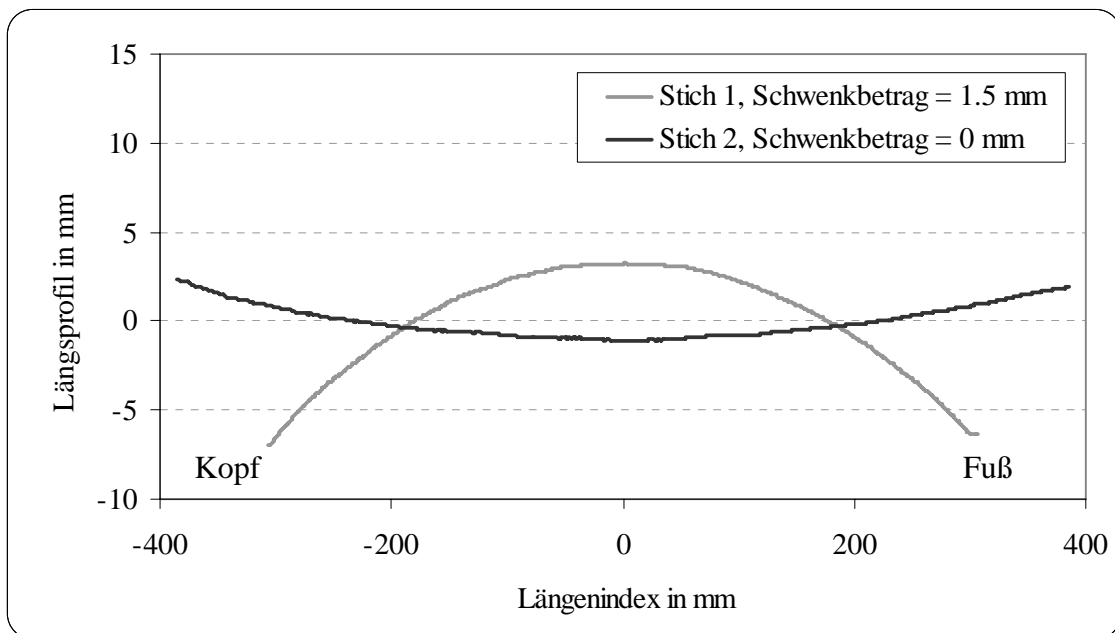


Bild 38: Längsprofile einer zunächst mit geschwenkten Walzen und anschließend mit gerade gestellten Walzen gewalzten Probe (V 2.8, V 4.1)

Die gemessenen Dickenprofile (aufgrund der unterschiedlichen Dicke nach dem ersten und dem zweiten Stich im **Bild 39** als relative Dickenprofile dargestellt) zeigen nach der Walzung mit gerade gestellten Walzen ein nahezu gerades Profil. Ein geringer Keilanteil konnte bei allen Proben beobachtet werden. Wie oben bereits beschrieben, ist dieser Keilanteil höchstwahrscheinlich durch die Auffederung des Gerüsts an der Seite, an der die Abnahme und damit auch die Kraft höher ist oder, wie bereits beim **Bild 31** vermutet, durch die Anlagenkonfiguration hervorgerufen.

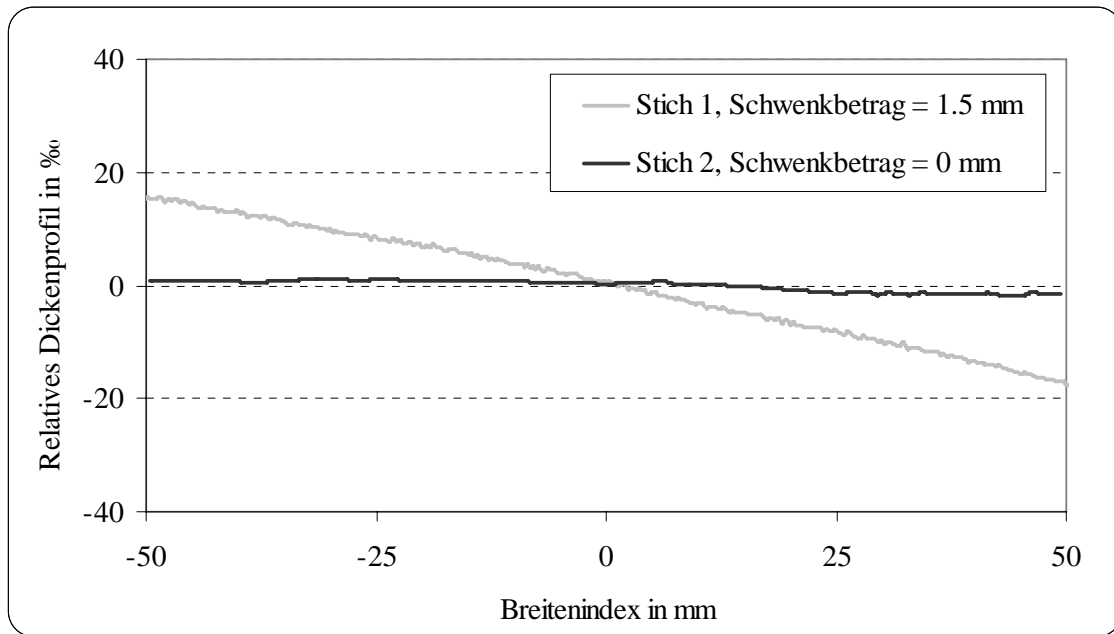


Bild 39: Relative Dickenprofile einer zunächst mit geschwenkten Walzen und anschließend mit gerade gestellten Walzen gewalzten Probe (V 2.8, V 4.1)

8.2.6 Einfluss des leichten Walzenschwenkens bei zuvor generierten Säbelproben

Die oben beschriebenen Gegenschwenkversuche von säbeligen Proben haben den zuvor generierten Säbel überkompensiert. Walzungen von dicken Proben mit einem hohen im ersten Stich angestellten Keilanteil haben beim zweiten Stich, mit gerade gestellten Walzen, auch zum Säbel in die entgegengesetzte Richtung geführt. Nun wurden die bereits in zwei Stichen gewalzten Proben erneut mit einem sehr leichten Schwenkbetrag gewalzt. Dabei entstand ein gerades, nahezu keilfreies Probenband.

Versuch	Versuchs- No.	Stichtyp [Stich No.]	Schwenk- betrag	Schwenken im vorherigen Stich / Eingangs- dickenkeil	Eingangs- dicke	Walz- spalt
[---]	[---]	[---]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Säbelbildung durch Walzen- schwenken	V 2.2	horizontal [1]	0.5	---	25	17.5
	V 2.8	horizontal [1]	1.5	---	50	40
Säbelreduzierung durch Gegen- schwenken	V 3.2	horizontal [2]	-0.5	0.5	17.5	14
Säbelreduzierung durch geraden Walzspalt	V 4.1	horizontal [2]	---	1.5	40	32
Säbelreduzierung durch sehr leich- tes Schwenken	V 5.1	horizontal [3]	0.1	-0.5	14	11
	V 5.2	horizontal [3]	0.1	0	32	26

Tabelle 17: Walzung von Säbelproben mit einem leichten Schwenkbetrag

Bild 40 zeigt die Längsprofile einer Beispielprobe nach allen drei Walzstichen. Das Längsprofil nach dem dritten Stich ist nahezu säbelfrei.

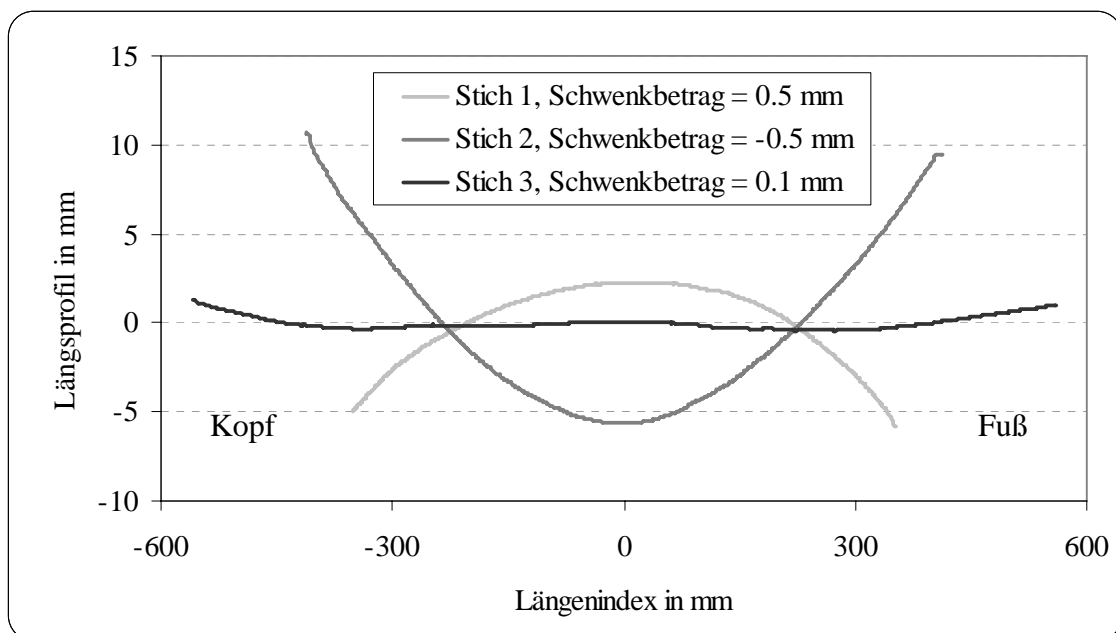


Bild 40: Längsprofile einer zunächst mit geschwenkten Walzen, danach mit entgegen gesetzt geschwenkten Walzen und anschließend mit leicht wiederum entgegen gesetzt geschwenkten Walzen gewalzten Probe (V 2.2, V 3.2, V 5.1)

Im folgenden **Bild 41** sind die relativen Dickenprofile der Beispielprobe nach allen drei Walzungen dargestellt. Auch das Dickenprofil nach dem dritten Stich ist symmetrisch und zeigt keinen Dickenkeil.

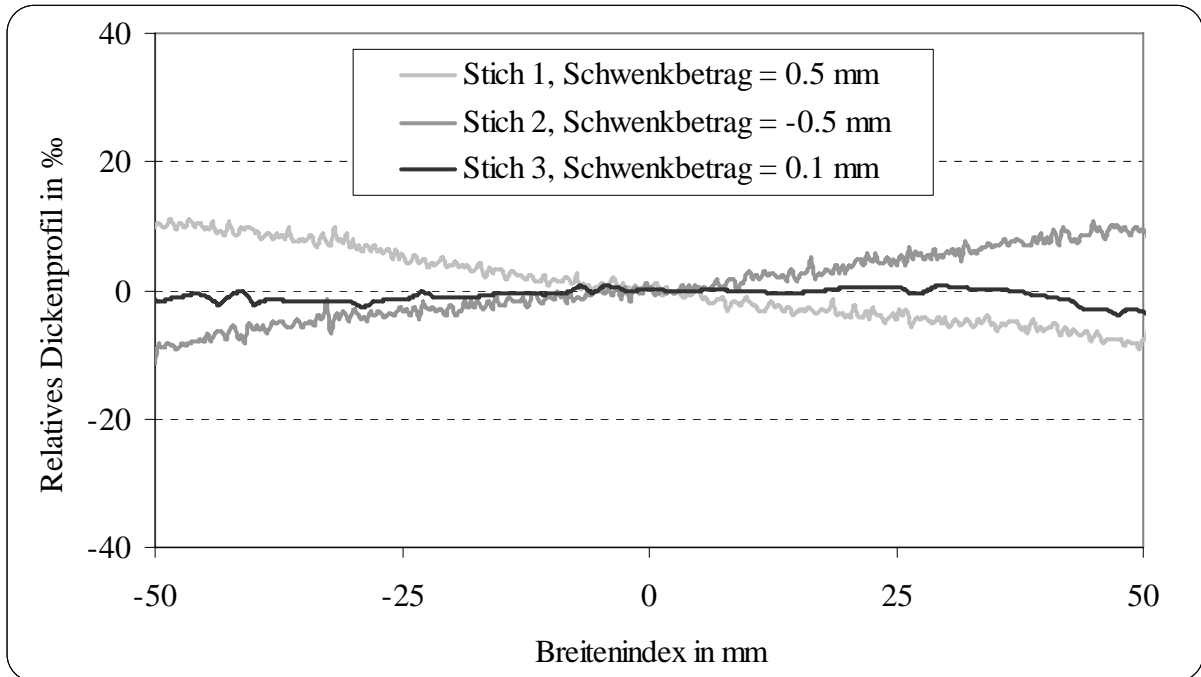


Bild 41: Relative Dickenprofile einer zunächst mit geschwenkten Walzen, danach mit entgegen gesetzt geschwenkten Walzen und anschließend mit wiederum leicht entgegen gesetzt geschwenkten Walzen gewalzten Probe (V 2.2, V 3.2, V 5.1)

Mit diesen Versuchen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, nur mit Hilfe des Walzenschwenkens, säbel- und dickenkeilfreie Proben zu einer Säbelprobe zu walzen und danach die gerade Form zu regenerieren. Der bei der Säbelgenerierung eingestellter Schwenkbetrag der Walzen war fünfmal so groß wie der bei der Regenerierung der geraden Form eingestellter Betrag. Hierbei muss beachtet werden, dass in den Laborversuchen viele im Werk vorhandene Einflüsse ausgeschaltet werden konnten. Der wichtigste dieser Einflüsse ist die Temperatur der Bramme. In den Versuchen wurden kalte Bleibrammen gewalzt, deren Temperatur und damit die Festigkeit in der gesamten Probe gleich war und damit auch nicht zu ungleichen Bedingungen während des Walzens führte. Diese Idealbedingungen sind im Werk nicht gegeben. Die Brammentemperatur unterliegt Schwankungen auf Grund vieler Ursachen. Diese Schwankungen führen zu unterschiedlichen Bedingungen während des Walzens, damit möglicherweise zu unterschiedlichen Abnahmen an der Antriebs- und der Bedienseite, wodurch ein Säbel entsteht.

8.2.7 Einfluss eines keilförmigen Dickenprofils auf die Säbelbildung

In vorherigen Kapiteln wurden Walzversuche mit säbel- und keilfreien Eingangsproben beschrieben. Neben diesen wurden auch Versuche mit keiligen Eingangsproben durchgeführt. Die Proben wurden mechanisch bearbeitet, so dass der Dickenkeil 2 mm über der Breite betrug. Ein Beispiel für die Eingangsdickenprofile einer der Proben ist oben im **Bild 28** dargestellt.

Die Proben wurden mit einem gerade angestellten Walzspalt gewalzt. Wie zu erwarten, bildete sich ein deutlicher Säbel aus. Das Verhalten der Probenbramme entsprach dem Verhalten der geraden Probenbrammen, welche mit geschwenkten Walzen gewalzt wurden. Im Auslauf bildete sich ein kontinuierlicher Säbel aus, im Einlauf drehte sich die Probe, wie bereits vorher beschrieben, zu der kürzeren Seite.

Versuch	Versuchs No.	Stichtyp [Stich No.]	Schwenk-betrag	Schwenken im vorherigen Stich / Eingangsdickenkeil	Eingangsdicke	Walzspalt
[---]	[---]	[---]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Säbelbildung durch Walzen von keiligen Proben	V 6.1	horizontal [1]	---	2	23	16.5

Tabelle 18: Walzung von Proben mit einem keiligen Dickenprofil

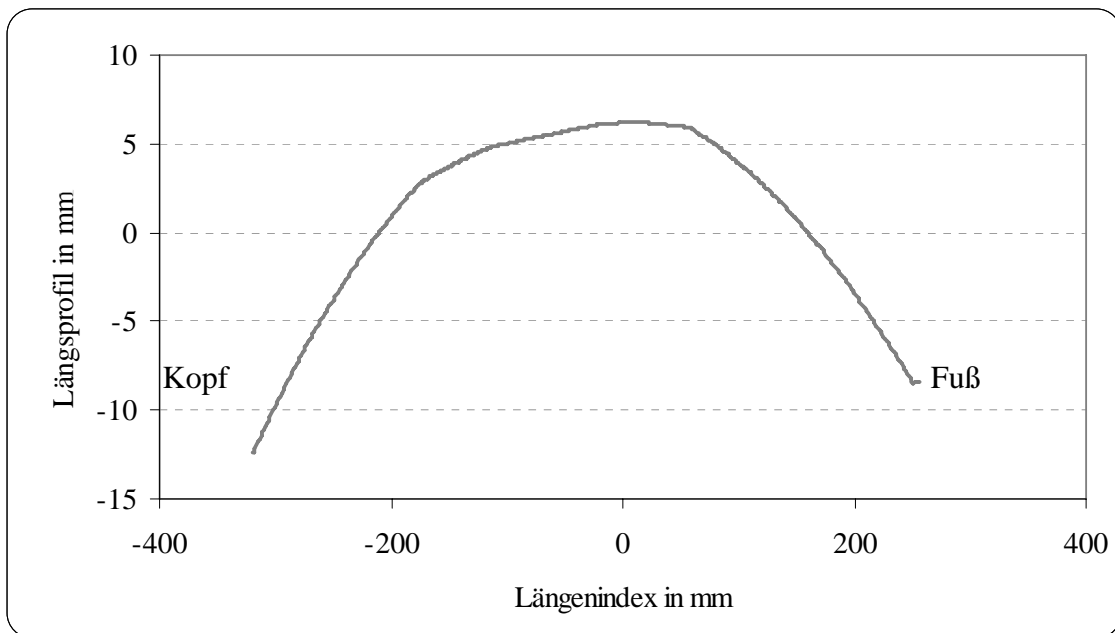


Bild 42: Längsprofil einer bei geradem Walzspalt gewalzten keiligen Eingangsprobe (V 6.1)

Bild 42 zeigt beispielhaft das Längsprofil einer der gewalzten Proben.

Im **Bild 43** sind die relativen Dickenprofile vor und nach dem Walzen dieser Probe dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass ein Ausgleich des Dickenkeils stattgefunden hat. Auf Grund des Keils fand jedoch eine unterschiedliche Auffederung der Walzen an den beiden Gerüstseiten statt, wodurch die Probe nach dem Walzen einen leichten Keil aufweist. Der Ausgleich des Dickenkeils fand auf Kosten der Säbelausbildung statt. Wie bereits in oben beschriebenen Versuchen dargestellt wurde, kann ein Säbel durch Walzenschwenken reduziert werden. Im Fall einer keiligen Eingangsprobe, welche nach dem ersten Stich ein nahezu keilfreies Dickenprofil zeigt, würde dies jedoch bedeuten, dass ein erneuter Dickenkeil entsteht. Um sowohl den Säbel als auch den Dickenkeil zu reduzieren, ist ein weiteres Stellglied nötig. In weiteren Versuchen wurde daher der Einfluss der Seitenführungen auf die Säbelentstehung untersucht.

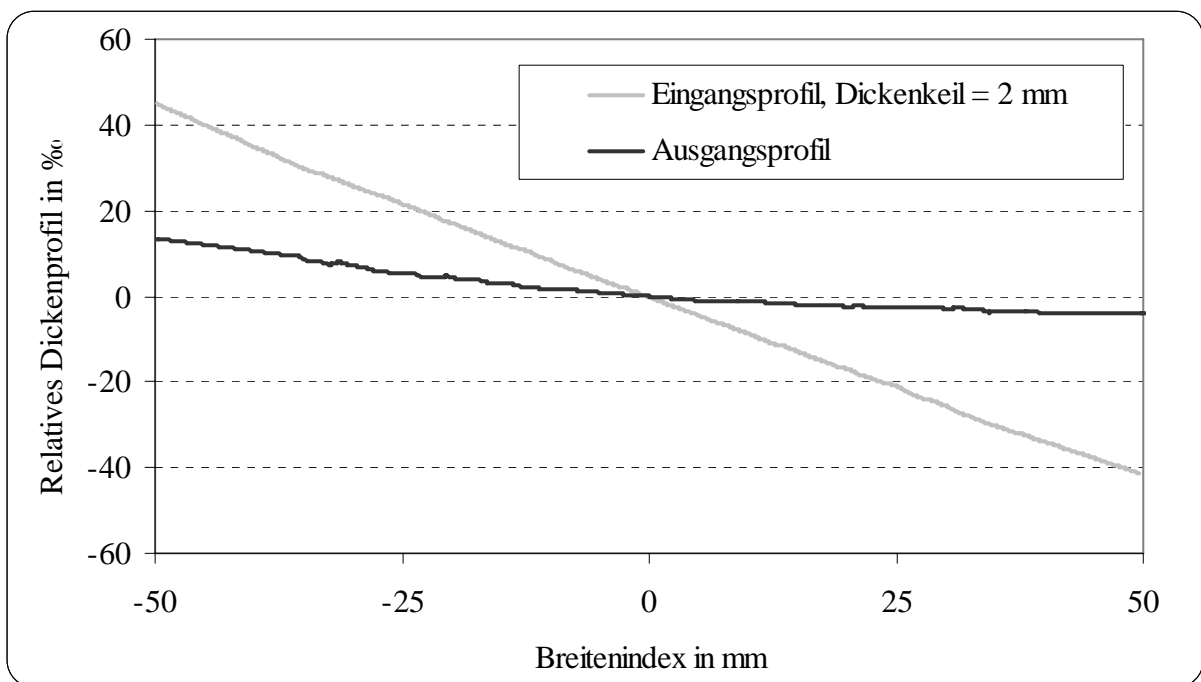


Bild 43: Relative Dickenprofile einer bei geradem Walzspalt gewalzten dickenkeiligen Eingangsprobe (V 6.1)

8.2.8 Einflusses der Seitenführungen bei der Generierung und dem Walzen von Säbelproben

Um den Einfluss der Seitenführungen bei der Säbelentstehung zu untersuchen, wurden in Versuchen gleiche Proben mit und ohne Kontakt zu Seitenführungen gewalzt. Hierbei wurden paarweise gleiche Walzbedingungen, wie Abnahme und Schwenkbetrag, gewählt. Tabelle 19 zeigt die Daten der durchgeführten Versuche.

Versuch	Versuchs- No.	SF	Stichtyp [Stich No.]	Schwenk- betrag	Schwenken im vorherigen Stich/ Ein- gangsdickenkeil	Eingangs- dicke	Walz- spalt
[---]	[---]	[---]	[---]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Säbelbildung durch Wal- zenschwen- ken / Redu- zierung durch SF	V 2.2	Nein	horizontal [1]	0.5	---	25	17.5
	V 7.2	Ja	horizontal [1]	0.5	---	25	17.5
	V 2.3	Nein	horizontal [2]	0.5	---	35	30
	V 7.3	Ja	horizontal [2]	0.5	---	35	30
Säbelbildung durch keiliges Dickenprofil /Reduzierung durch SF	V 6.1	Nein	horizontal [1]	---	2	23	16.5
	V 7.1	Ja	horizontal [1]	---	2	23	16.5

Tabelle 19: Walzung von Proben mit und ohne Kontakt zu Seitenführungen (SF)

In allen drei Fällen konnte ein deutlicher, positiver Einfluss der Seitenführungen beobachtet werden. Die ausgebildeten Säbel bei Walzung ohne Seitenführungen sind deutlich größer. In den folgenden Abbildungen **Bild 44 - Bild 46** sind die Längsprofile der mit und ohne die Seitenführungen gewalzten Proben dargestellt.

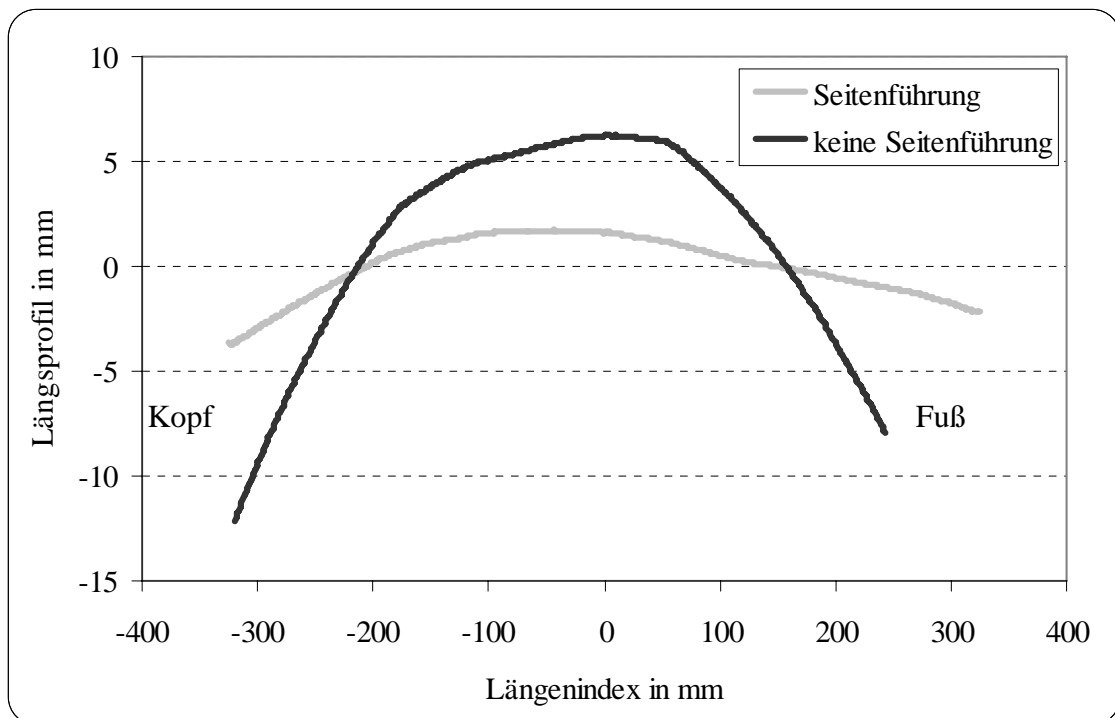


Bild 44: Längsprofile von Versuchsproben, ohne und mit Seitenführung gewalzt
2.2, V 7.2)

(V

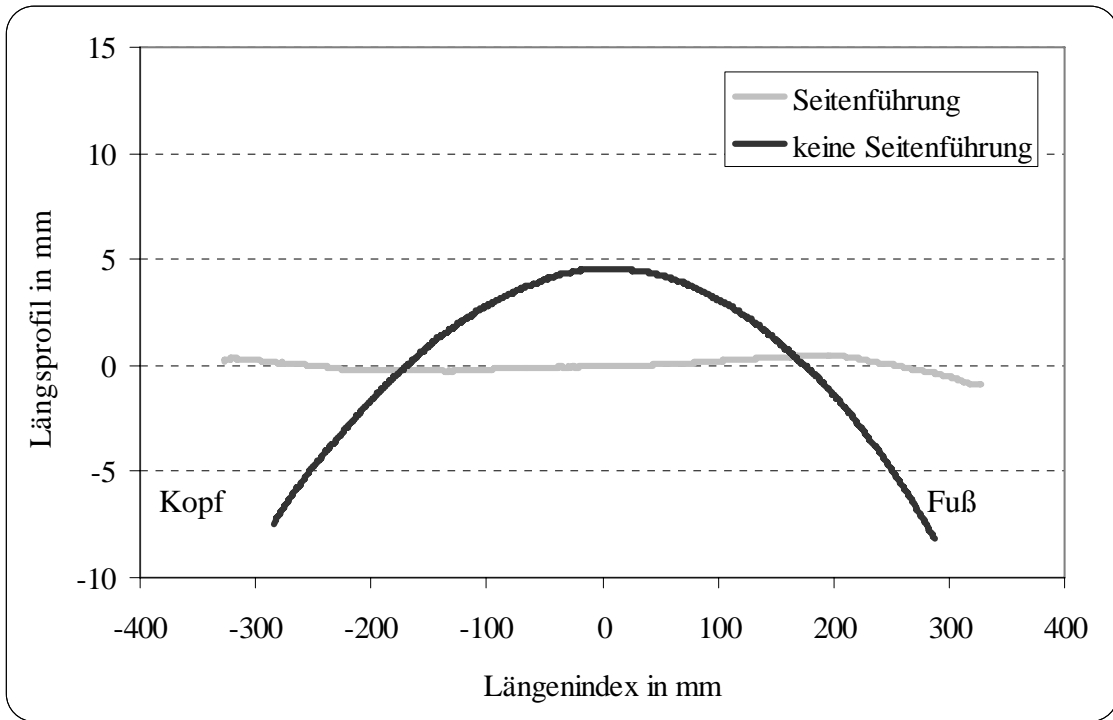


Bild 45: Längsprofile von Versuchsproben, ohne und mit Seitenführung gewalzt
2.3, V 7.3)

(V

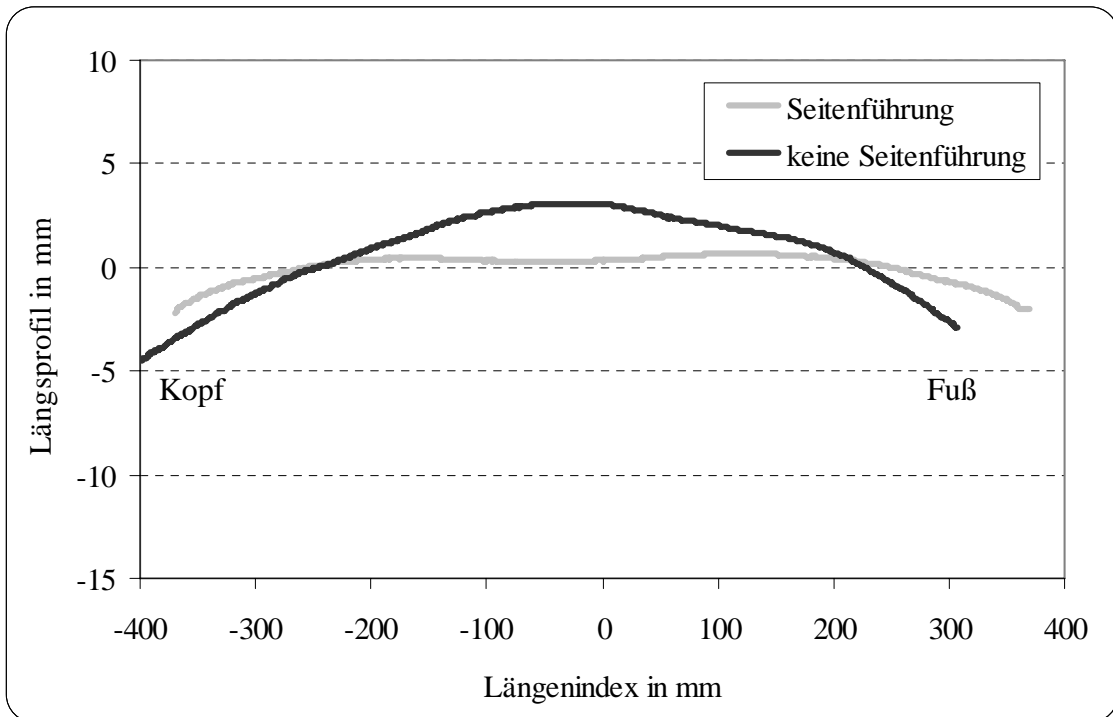


Bild 46: Längsprofile von Versuchsproben, ohne und mit Seitenführung gewalzt
6.1, V 7.1)

(V

In folgenden Bildern **Bild 47-Bild 49** sind die relativen Dickenprofiländerungen der entsprechenden Proben dargestellt. Diese Darstellungsvariante wurde gewählt, um die Unterschiede der mit und ohne Seitenführung gewalzten Proben stärker hervorzuheben. Die Entstehung des Säbels ist, wie oben bereits mehrfach erwähnt, direkt mit der unterschiedlichen Dickenabnahme verbunden. Durch den Einfluss der Seitenführungen ändert sich nicht nur zwangsweise das entstandene Längsprofil einer Probe sondern auch die Verteilung der Dickenabnahme entlang der Probenbreite, das Dickenprofil.

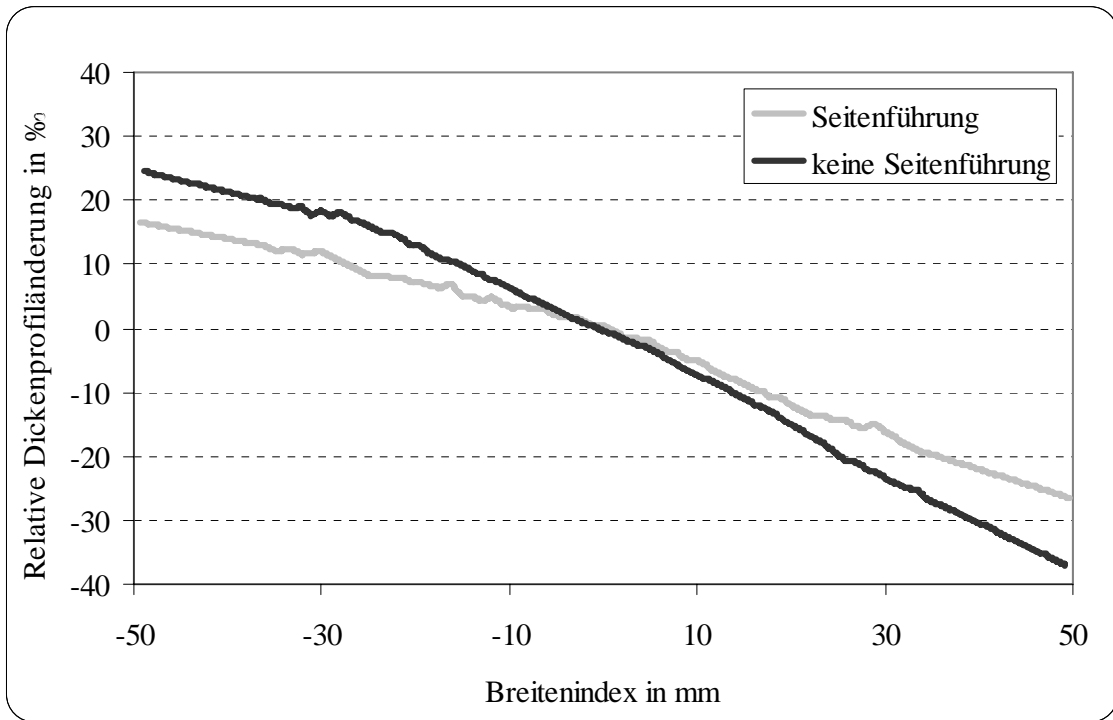


Bild 47: Relative Dickenprofiländerung von Versuchsproben, ohne und mit Seitenführung gewalzt (V 2.2, V 7.2)

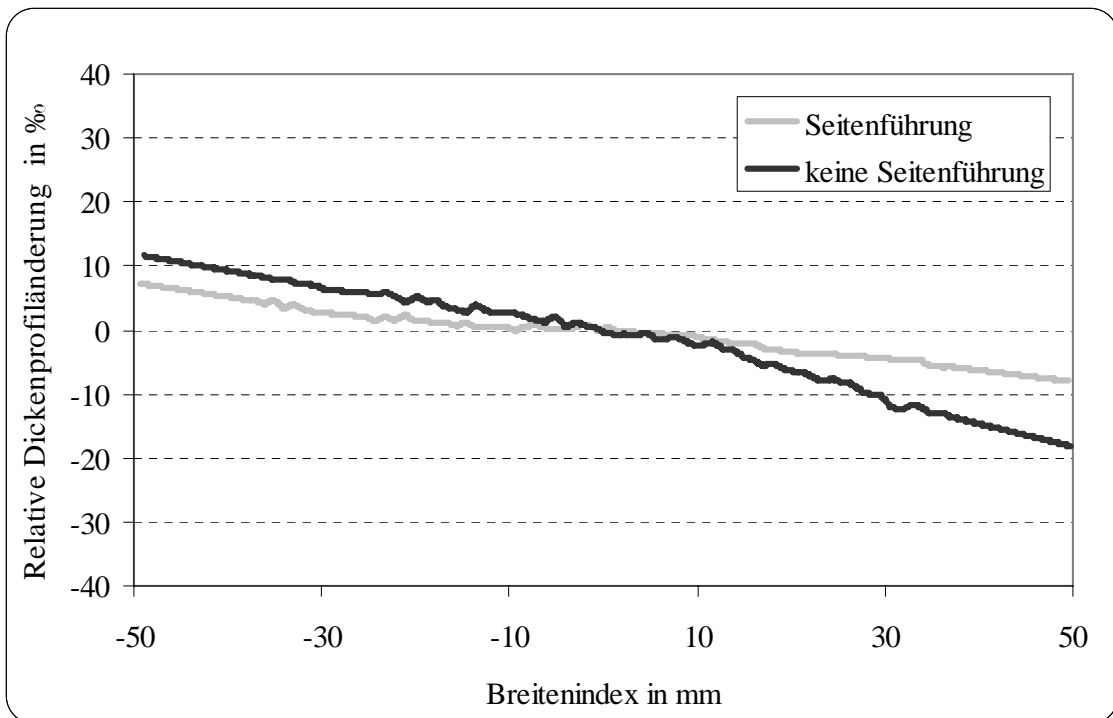


Bild 48: Relative Dickenprofiländerung von Versuchsproben, ohne und mit Seitenführung gewalzt (V 2.3, V 7.3)

Sei-

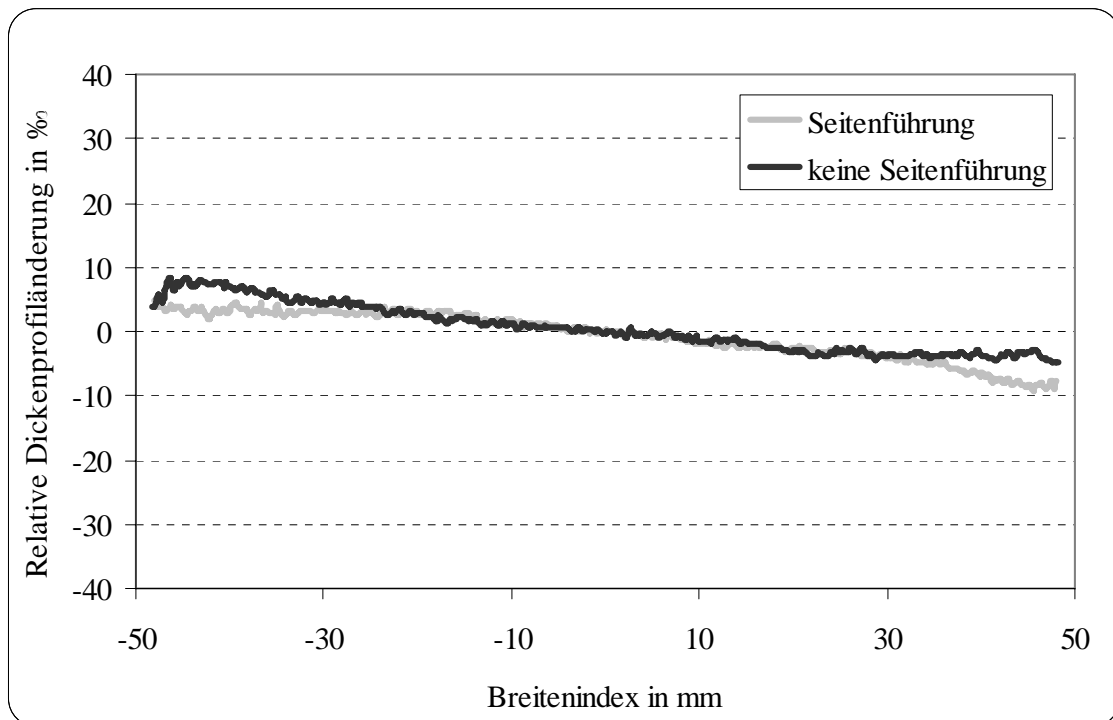


Bild 49: Relative Dickenprofiländerung von Versuchsproben, ohne und mit Seitenführung gewalzt (V 6.1, V 7.1)

Die mit und ohne Seitenführung gewalzten Proben zeigen einen deutlichen Unterschied in der Änderung des Dickenprofils. Die Proben, welche mit Hilfe der Seitenführungen gewalzt wurden, zeigen niedrigere Änderungswerte als die Proben, welche ohne Seitenführungen gewalzt wurden. Im Versuch V 6.1 und V 7.1 (**Bild 49**) ist dieser Unterschied jedoch nicht sichtbar. Auch der Unterschied der entstandenen Längsprofile (**Bild 46**) ist nicht so deutlich wie in den anderen Versuchen. Zu vermuten ist, dass hier andere Einflüsse den Seitenführungseinfluss überlagerten oder dass die Seitenführungen nicht während der gesamten Walzung effektiv wirken konnten.

Der Unterschied der Dickenprofiländerung bei mit und ohne Seitenführung gewalzten Proben erscheint sehr gering. Zu beachten ist hierbei dass, der Einfluss der Seitenführung auf das entstehende Dickenprofil entlang der gesamten Probenlänge (sobald die Probe während des gesamten Stiches in Kontakt mit den Seitenführungen war) wirkt. Eine Darstellung an Hand eines zweidimensionalen Diagramms kann diesen Sachverhalt nicht abbilden. Dieser scheinbar leichte Unterschied, aufsummiert über der gesamten Probenlänge, ergibt jedoch einen deutlichen Einfluss der Seitenführungen.

Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, dass es sehr gut möglich ist, die Entstehung des Säbels mit Hilfe von Seitenführungen zu unterbinden. Dabei ist ebenfalls ein Einfluss auf die Änderung des Dickenprofils erkennbar. Wie schon in den Plastilinversuchen beobachtet wurde, ist es wahrscheinlich, dass aufgrund der unterschiedlichen Spannungsverteilung entlang der Probenbreite eine zusätzliche Breitung der Probe an der Seite der höheren Abnahme und damit ein Abbau des Dicken-

keils stattfindet (siehe hierzu **Bild 23**). Des Weiteren führt der Materialstau an der Seite der Probe, an der im Walzspalt zu viel abgenommen wird (siehe **Bild 22**), zu einer zusätzlichen Auffederung, welche die Säbelentstehung reduziert.

Damit stellt die Seitenführung ein neben dem Walzenschwenken ebenfalls sehr effektives Stellglied zur Beeinflussung des Säbels und des Dickenprofils.

Um die oben beschriebenen Ergebnisse zu verifizieren, wurden Daten des Warmwalzwerkes der EKO-Stahl analysiert. In den folgenden Kapiteln wird zunächst das an der Warmwalzstrasse installierte Säbel-Messsystem vorgestellt, im Anschluss daran werden die Ergebnisse der statistischen Analysen beschrieben.

9 Betriebsuntersuchungen zur Säbelbildung an einer Warmbandvorstrasse

Das nachfolgend beschriebene Meßsystem wurde an der Warmwalzstrasse der EKO-Stahl installiert. Ein System wurde am Einlauf und ein am Auslauf des Reversiergerüsts befestigt. Dadurch kann der Bandsäbel nach jedem Stich bestimmt werden.

9.1 Messsystem zur Erfassung des Bandsäbels

Das installierte Meßsystem wurde in Zusammenarbeit zwischen der Graphikon GmbH und dem Betriebsforschungsinstitut, VDEh-Institut für angewandte Forschung GmbH, entwickelt. Es handelt sich um ein optisches Meßsystem, das aus vier Flächenkameras, welche über dem Rollgang paarweise angeordnet sind, besteht. Hierbei handelt es sich um CCD-Kameras (charge-coupled device). Prinzip der Messung beruht auf der Wärmestrahlung des Bandes, wodurch die Bandkontur ähnlich einer Lichtquelle eindeutig gegenüber dem kühlen und damit dunklen Untergrund bestimmt werden kann. Da es sich um Flächenkameras und keine Linienkameras handelt, wird ein zweidimensionales Abbild der Bandkante aufgenommen. Dadurch kann sowohl die Position als auch die Neigung der Bandkante bestimmt werden. Die Messgenauigkeit beträgt 1 mm. Folgende Darstellung (**Bild 50**) zeigt eine Skizze des Systems. Das obere Bild stellt die Seitensicht eines Gerüsts dar. Zur Vereinfachung ist nur ein System eingezeichnet, ein weiteres befindet sich, wie oben bereits beschrieben, am Auslauf des Gerüsts. Zwei Kamerapaare, parallel angeordnet, sind über dem Rollgang befestigt und in der Abbildung dunkelgrau gekennzeichnet. Das Band, hell grau gekennzeichnet, weist einen deutlichen Säbel auf. Die untere Abbildung zeigt die gemessenen Werte der Bandkantenform zu einem Zeitpunkt.

Bild 51 zeigt beispielhaft die aufgenommenen Bilder aller Kamerapaare. Die oberen vier Bilder zeigen die Messungen der Kamerapaare am Auslauf der Strasse (Bediener- + Antriebsseite), die unteren stellen die Messungen am Einlauf der Strasse dar. Das Vorband ist als weiße Fläche sichtbar,

durch die starke Reflektion des heißen Vorbandes erscheint der Hintergrund schwarz. Unterschiedliche Positionen der Kameras führen zu unterschiedlichen Darstellungen in der Anzeige. Diese Unterschiede werden jedoch bei der Kalibrierung berücksichtigt, so dass eine Abstimmung der gemessenen Daten aufeinander gegeben ist.

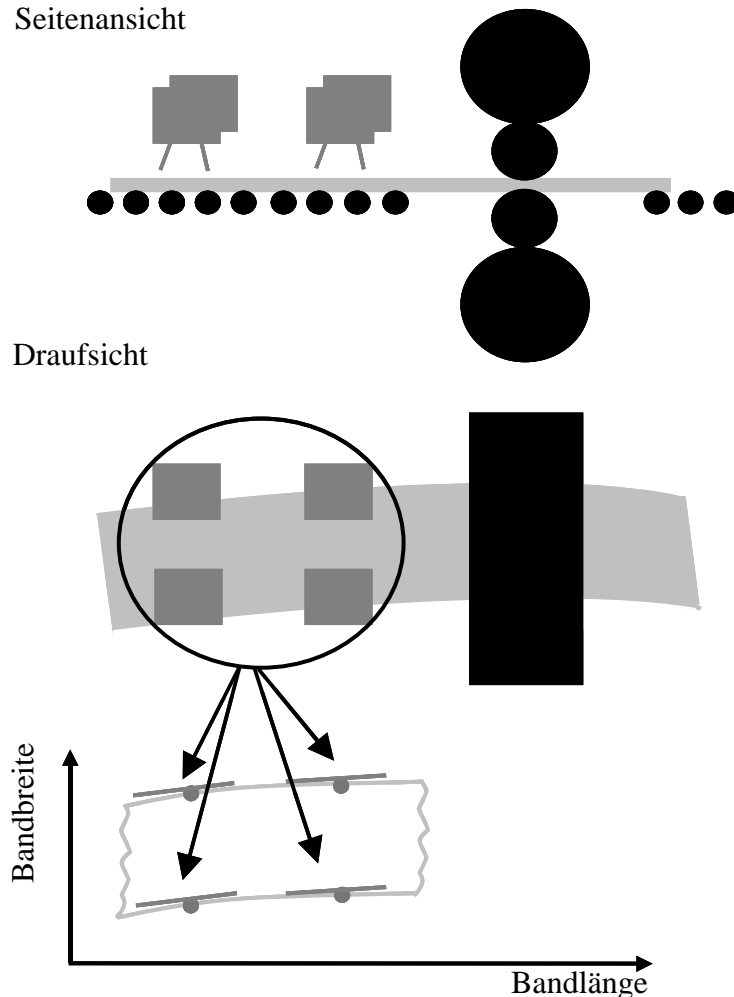


Bild 50: Schematische Darstellung der Bandsäbelmessung

Im Bild sind ebenfalls die bestimmten Kantenpositionen und Neigungswerte durch schwarze Striche und Rechtecke an den Bandkanten gekennzeichnet. Falls die Bandkante nicht erkannt wurde, werden diese optischen Signale nicht dargestellt.

Für weitere Erfassung und Analyse der Daten werden nicht die Daten beider Bandkanten sondern die daraus gemittelte Position der Bandmittenlinie, deren mittlerer Neigungswert sowie die gemessene Breite mit einer Abtastrate von 50 ms im zentralen Datensystem gespeichert. Auf Grund dessen kann die Speicherkapazität reduziert werden. Des weiteren wird ein Gültigkeitssignal der Kameradaten gespeichert. Das Gültigkeitssignal besteht aus einem 8-Bit-Signal, bei welchem jedem Bitpaar ein Kamerapaar zugeordnet ist. Auf diese Weise kann mit nur einem Wert angezeigt werden ob alle Kameras gültig messen und im Fall einer nicht gültigen Messung, welches Kamerapaar ausgefallen ist.

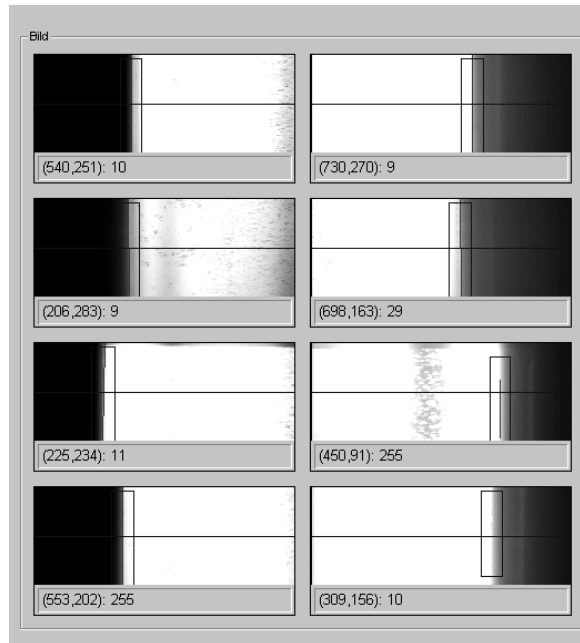


Bild 51: Bestimmung der Bandkantenposition und der Neigung mit CCD-Kameras

9.2 Bestimmung des Bandsäbels mit Hilfe der gemessenen Größen

Die gemessenen Größen wurden zu der Online-Bestimmung des Bandsäbels genutzt. Die hierfür nötigen Bearbeitungsschritte werden im folgenden dargestellt.

9.2.1 Umrechnung der zeitbezogenen Werte in ortsbezogene Werte

Die gemessenen Werte werden der Messzeit, nicht der Bandlänge zugeordnet. Für die Bestimmung des Bandsäbels sind jedoch bandlängenbezogene, das heißt ortsbezogene Größen nötig. Daher muss zunächst die Umrechnung der zeitbezogenen Werte, der Bahnen $f(t)$, in ortsbezogene Werte, die Kurven $f(x)$, erfolgen. Hierfür ist die Kenntnis der Bandgeschwindigkeit nötig. Eine Messung der Bandgeschwindigkeit ist am Gerüst nicht installiert. Daher wurde an dieser Stelle die Annahme getroffen, dass die Rollgangsgeschwindigkeit gleich der Bandgeschwindigkeit ist. Aufgrund des hohen Gewichtes der Bramme und der sich daraus ergebenden hohen Reibungskraft zwischen Rollgang und Bramme ist diese Annahme gerechtfertigt.

9.2.2 Berechnung der Bandkrümmung unter Verwendung der Bandkantenpositions- und Neigungswerte

Aus den umgerechneten bandlängenbezogenen Werten gilt es nun die Krümmung des Bandes zu bestimmen. Im Fall eines Bandsäbels oder eines Fuß- oder Kopfhakens haben die Bandkanten nicht mehr die Form einer Geraden, sondern die Form einer Kurve. Der entstandene Bandsäbel kann durch die Krümmung dieser Kurve beschrieben werden. Eine sinnvolle Beschreibung der Krüm-

mung einer Kurve ist die Bestimmung der ersten Gaußschen Krümmung $\kappa(x)$, welche nach folgender Formel berechnet wird:

$$\kappa(x) = \frac{f''(x)}{\sqrt{(1 + (f'(x))^2)^3}} \quad (6)$$

Hierbei stellt $f(x)$ die Kurvenfunktion der Bandmittenlinie (=Längsprofil) dar. Die Krümmung κ ist raumunabhängig, also koordinatenunabhängig, was ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Polynomfunktion einer Kurve ist. Die Koeffizienten der Polynomfunktion nehmen bei einer Drehung oder Verschiebung im Raum unterschiedliche Werte an, die Werte der Krümmung bleiben bei einer Drehung oder Verschiebung im Raum gleich, da sie sich explizit auf die Krümmung der Kurve jedoch nicht auf deren Lage beziehen. Dadurch ist es möglich, eventuelle Verschiebungen oder Verdrehungen des Bandes auf dem Rollgang zu berücksichtigen oder besser gesagt die Bestimmung des Bandsäbels dadurch nicht negativ zu beeinflussen.

Wie im unteren Teil von **Bild 50** dargestellt, werden zwei Punkte und zwei Neigungswerte an der antriebsseitigen Kante als auch der betriebsseitigen Kante des Bandes zu einem Zeitpunkt gemessen. Wie oben beschrieben, werden diese Werte zu einer Bandmittenkurve gemittelt, welche nahezu gleich den beiden Kantenkurven ist. Die vier Informationen erlauben es, eine Kurve mit Hilfe eines kubischen Polynoms oder Splines zu beschreiben. Dies ist vorteilhaft gegenüber einem quadratischen Polynom, da eine von der quadratischen Form abweichende Kurvenlinie genauer beschrieben werden kann.

Für ein kubisches Polynom leitet sich die Krümmung $\kappa(x)$ wie folgt ab:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (7)$$

$$f'(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 \quad (8)$$

$$f''(x) = 2a_2 + 6a_3x \quad (9)$$

$$\kappa(x) = \frac{2a_2 + 6a_3x}{\sqrt{[1 + (a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2)^2]^3}} \quad (10)$$

Mit den gemessenen Daten können die Koeffizienten a_0 bis a_3 bestimmt werden. Den vier Unbekannten stehen vier gemessene Größen gegenüber. Wie oben bereits beschrieben, sind dies die zwei Bandmittenpositionswerte, welche für $f(x)$ eingesetzt werden können, sowie zwei Bandneigungswerte, welche für $f'(x)$ eingesetzt werden können. Mit diesen vier Gleichungen sowie den vier Unbekannten a_0 bis a_3 ergibt sich ein lösbares Gleichungssystem. Hiermit kann die Kurvenfunktion $f(x)$, welche die Bandmittenkurve beschreibt, sowie die Krümmung der Kurve $\kappa(x)$ an jedem Punkt

x bestimmt werden. Für einen Zeitpunkt kann damit die Krümmung des Teils des Bandes, welcher sich zu diesem Zeitpunkt unter den beiden Kameras befindet, bestimmt werden. Wie oben bereits beschrieben, ist die Krümmungsfunktion koordinatenunabhängig. Damit können die einzelnen bestimmten Krümmungen der Abschnitte, ohne die mögliche Bewegung der Bramme auf dem Rollgang, wie die Drehung oder seitliche Verschiebung, berücksichtigen zu müssen, zusammengefügt werden. Es ergibt sich eine Funktion, welche an jedem Ort x der Bandmittenkurve eine Information über die Krümmung und damit den Bandsäbel angibt.

9.2.3 Berechnung der Bandkrümmung ohne Verwendung der Bandkantenneigungswerte

Die am Vorgerüst der EKO-Warmwalzstrasse mit Hilfe des oben beschriebenen Systems gemessenen Bandkantenneigungswerte haben sich für den Einsatz zur Bandkrümmungsbestimmung als nicht genau genug herausgestellt. Die Schwankung zwischen den einzelnen Werten ist sehr hoch. Die Bestimmung der Bandkantenposition ist zwar deutlich genauer, aber auch hier ist die Schwankung der Werte zu hoch, um nur mit einer sehr geringen Werteanzahl die Krümmung ausreichend genau zu bestimmen. Kann die Messgenauigkeit dieser Werte in Zukunft besser gewährleistet werden, so ist die oben beschriebene Methode sehr gut zur Bandkrümmungsbestimmung geeignet.

Im Rahmen der Arbeit wurden nur die Bandkantenpositionswerte zur Bandkrümmungsbestimmung herangezogen. Damit fehlen für einen Messzeitpunkt zwei Werte zur Bestimmung der Bandmittenkurve mit Hilfe eines kubischen Polynoms sowie deren Krümmung. In diesem Fall müssen die zu mehreren Zeitpunkten gemessenen Positionswerte den Wertepunkten der Kurvenfunktion $f(x)$ gleichgesetzt werden, wie in **Bild 52** dargestellt.

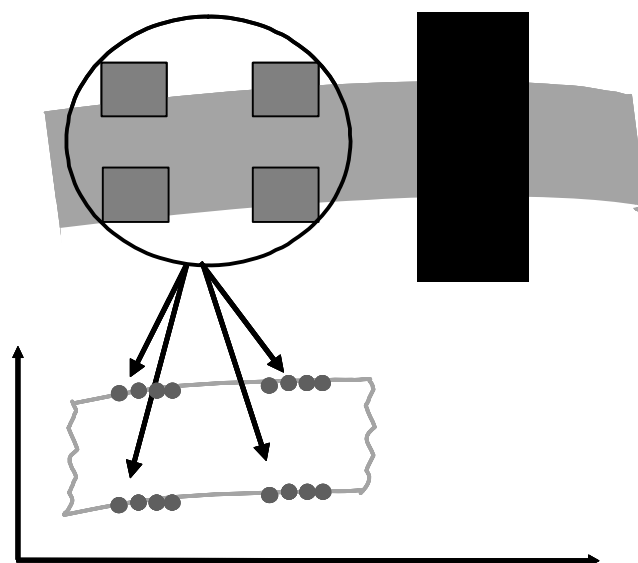


Bild 52: Schematische Darstellung der Bandkrümmungsbestimmung unter Nutzung der Bandpositionswerte

Zwischen den Zeitpunkten kann sich das Band jedoch bewegt haben, wodurch die Bandkrümmungsbestimmung verfälscht ist. Handelt es sich bei der Bewegung um eine gleichmäßige (keine Veränderung der Geschwindigkeit und Richtung) Bewegung, kann diese mit der Bestimmung der Krümmung $\kappa(x)$ gefiltert werden. Da jedoch angenommen werden kann, dass die Bewegung des Bandes nicht immer gleichmäßig verläuft, bleibt ein Teil der Bandbewegung unberücksichtigt und führt damit zu einer Verfälschung der Bandkrümmungsbestimmung.

Ein kürzlich abgeschlossenes EGKS-Projekt [7] beschäftigte sich mit der Bandsäbelmessung und speziell mit der Verfälschung der Bandkrümmungsbestimmung durch die Bewegung des Bandes, wie oben beschrieben. In Simulationen wurden mögliche Fehler dargestellt und bewertet. Auf Grund der Seitenführungen ist die Bandbewegung stark begrenzt, wodurch auch der maximal entstehende Fehler begrenzt ist. Die in den Simulationen erzielten Ergebnisse zeigten, dass abhängig von dem Seitenführungsoffsetwert (Differenz zwischen der Bandbreite und dem Abstand der Seitenführungen) der maximale Fehler zwischen 0.2 und 6 % liegt. Hierbei beträgt der maximale Seitenführungsoffsetwert 200 mm. Die Standardoffsetwerte bei der Warmwalzvorstrasse der EKO-Stahl betragen maximal 150 mm. Nur sehr selten werden die Seitenführungen zu einem Offsetwert von 200 mm ausgefahren. Aus diesem Grund und auf Basis der beschriebenen Simulationen kann angenommen werden, dass die Verfälschung durch die oben beschriebene Bandkrümmungsbestimmung nur unter Nutzung der Bandkantenpositionswerte maximal 6 % beträgt.

Um die Genauigkeit der Bandkrümmungsbestimmung zu erhöhen, erfolgt die Bestimmung der Bandmittenkurve segmentweise. Je nach Bandlänge betragen diese Segmente 3m-10m. Für diese Segmente werden zunächst mit Hilfe der Gleichung (7) die Koeffizienten a_0 - a_3 eines Polynoms 3. Grades bestimmt, welches am besten diesen Abschnitt beschreibt. Diese Koeffizienten werden genutzt um nach der Formel (10) die Krümmung $\kappa(x_m)$ in der Mitte dieses Abschnittes (x_m) zu bestimmen. Diese Vorgehensweise wird nun gleitend für die gesamte gemessene Bandlänge vollzogen (1.Segment $=x_0 \dots x_n$; 2.Segment $x_1 \dots x_{n+1}$; 3.Segment $x_2 \dots x_{n+2}$ usw.).

Mit dem bei der EKO-Stahl installierten System erfolgt die Bandkantenbestimmung, wie oben beschrieben, mit Hilfe von jeweils zwei Kamera paaren vor und hinter dem Vorwalzgerüst. Die ortsbezogene Krümmungsbestimmung erfolgt zunächst separat mit Hilfe der von beiden Kamera paaren gemessenen Werte. Die am gleichen Ort der Bandkante von beiden Kamera paaren bestimmten Krümmungswerte werden daraufhin verglichen. Der absolut kleinere Wert wird für die weitere Vorgehensweise genutzt.

Die Wahl des kleineren Wertes begründet sich zum einen in den Beobachtungen während der oben dargestellten Laborversuche. Wie im Kapitel 8.1.2 beschrieben, findet bei einer Bandsäbelentstehung eine Drehung des Bandes statt, welche die Messung verfälscht. Diese Drehung erfolgt synchron zum Krümmungsverlauf des entstehenden Bandsäbels und verstärkt damit die berechnete Krümmung. Die Bandsäbelentstehung erfolgt jedoch vielfältig, so dass nicht immer dieses Verhalten des Bandes angenommen werden kann, wie zum Beispiel bei der Entstehung eines S-förmigen Bandes. Ein weiteres Argument für die Wahl des kleineren Wertes liegt in der Steuerung des Vorwolzprozesses mit Hilfe der bestimmten Krümmungswerte. Wird die Krümmung größer als die tatsächliche Krümmung berechnet, so folgen daraus auch zu hohe Gegenmaßnahmen zur Reduzierung des Bandsäbels, welche zum erneuten Bandsäbel führen können. Wird ein zu klein bestimmter Krümmungswert verwendet, so führen die eingeleiteten Maßnahmen trotzdem zu einer Bandsäbelreduzierung, wenn auch diese nicht voll ausgeschöpft werden.

Für die berechneten und ausgewählten Krümmungswerte wird das sie am besten beschreibende Polynom gesucht, welches eine Funktion der Krümmung entlang der Bandlänge darstellt. Für die Stiche 1-6 wird die Krümmung mit einem Polynom 4. Ordnung beschrieben, für die nachfolgenden Stiche (in den meisten Fällen nur Stich 7) wird die Krümmung mit einem Polynom 5. Ordnung beschrieben, da hier ein Polynom 4. Ordnung die Krümmungswerte vor allem im langen Filetteil des Bandes unzureichend abbildet. Mit der so erhaltenen Krümmungsfunktion ist es möglich, eine Aussage über den Bandsäbel an jedem Ort entlang der Bandlänge anzugeben.

Um die Berechnung der Krümmung und vor allem die Bestimmung des sie beschreibenden Polynoms zu verifizieren, wurden mit Hilfe dieses die Krümmung beschreibenden Polynoms die Koeffizienten des die Bandmittenlinie (=Längsprofil des Bandes) beschreibenden Polynoms bestimmt und mit den gemessenen Bandmittenkurven verglichen. Im folgenden Kapitel wird dies näher beschrieben.

9.2.4 Berechnung der Koeffizienten des die Bandmittenlinie beschreibenden Polynoms

Wie oben erläutert, wurde die Krümmung des Bandes mit Hilfe eines Polynoms 4. oder 5. Ordnung abgebildet. Die Krümmung einer Funktion wird nach der Formel (10) berechnet, welche im Zähler die zweite Ableitung der Funktion hat. Das die Bandmittenlinie beschreibende Polynom $F(x)$ muss damit zwei Ordnungen höher sein, als das die Krümmung beschreibende Polynom $\kappa(x)$. In diesem Fall sind es die Ordnung 6 für die Stiche 1-6 und die Ordnung 7 für die nachfolgenden Stiche.

Mit Hilfe der Software „Mathematica“ wurden die Formeln abgeleitet, mit welchen man die Koeffizienten einer Funktion $F(x)$ bei Kenntnis des die Krümmung dieser Funktion beschreibenden Poly-

noms, $\kappa(x, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$, berechnet. Hierbei wurden die Koeffizienten für den Fall berechnet, bei welchem das Koordinatensystem im Schwerpunkt der Funktion liegt und die Steigung der Funktion bei $x = 0$ ebenfalls 0 ist. Damit sind die ersten beiden Koeffizienten, a_0 und a_1 , gleich Null und müssen nicht berechnet werden. Im folgenden werden die Formeln zur Berechnung der weiteren Koeffizienten angegeben:

$$a_2 = \frac{b_0}{2} \quad (11)$$

$$a_3 = \frac{b_1}{6} \quad (12)$$

$$a_4 = \frac{1}{24}(3b_0^3 + 2b_2) \quad (13)$$

$$a_5 = \frac{1}{20}(3b_1b_0^2 + b_3) \quad (14)$$

$$a_6 = \frac{1}{240}(15b_0^5 + 20b_2b_0^2 + 15b_1^2b_0 + 8b_4) \quad (15)$$

$$a_7 = \frac{1}{336}(45b_1b_0^4 + 18b_3b_0^2 + 24b_0b_1b_2 + 3b_1^3 + 8b_5) \quad (16)$$

Die Koeffizienten wurden genutzt, um das die Bandmittenlinie beschreibende Polynom zu berechnen. Die auf diese Weise bei Kenntnis der Krümmung bestimmte Bandmittenlinie wurde mit den gemessenen Bandmittenkurven verglichen. Die Kurven sollten nicht vollständig übereinstimmen, denn bei der Berechnung der Krümmung werden die gleichmäßigen Bewegungen des Bandes herausgefiltert. Diese Bewegungen sind in der Darstellung der Bandmittenkurve nicht berücksichtigt. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, sollten diese Unterschiede nur wenige Prozent betragen, so dass durch einen Vergleich der Kurven eine Verifizierung der Krümmungsberechnung erfolgen kann.

9.2.5 Zusammenfassende Vorgehensweise bei der Bandkrümmungsbestimmung

Zusammengefasst lassen sich die Berechnungen zur Bandkrümmungsbestimmung folgend darstellen:

- Messung der Bandkantenposition an beiden Kanten des Bandes (zwei Kameras) sowie an zwei unterschiedlichen Positionen entlang der Bandlänge (zwei Kamerapaare)
- Mittelung der Bandkantenpositionskurven zur einer Bandmittenkurve (pro Kamerapaar eine Kurve = zwei Bandmittenkurven)
- Umrechnung der zeitlich bezogenen gemessenen Werte in bandortsbezogene Werte
- Segmentweise gleitende Bestimmung der Koeffizienten eines Polynoms 3. Grades, das am besten den jeweiligen Abschnitt der Bandmittenkurve beschreibt, durchgeführt für beide Bandmittenkurven (Formel 7)
- Bestimmung der Krümmung in der Mitte des jeweiligen Abschnittes, durchgeführt für beide Bandmittenkurven (Formel 10)
- Vergleich der bandortsgleichen, aus den Messdaten der beiden Kamerapaare bestimmten Krümmungswerte und Wahl des absolut kleineren Wertes
- Zusammenfassung aller ausgewählten Krümmungswerte und Bestimmung des sie am besten beschreibenden Polynoms 4. oder 5. Grades; damit Erhaltung einer Funktion, welche an jedem Ort entlang der Bandlänge eine Aussage über die Krümmung des Bandes und damit den Bandsäbel angibt
- Bestimmung des die Bandmittenlinie beschreibenden Polynoms (6. oder 7. Grad) aus den Krümmungsdaten (Formeln 11-16)
- Verifizierung der Krümmungsberechnung durch Vergleich des berechneten, die Bandmittenlinie beschreibenden Polynoms mit den gemessenen Bandmittenkurven

Folgendes **Bild 53** zeigt ein Beispiel für die von den Kamerapaaren gemessenen, gemittelten Bandmittenkurven sowie die berechnete Krümmung und die daraus bestimmte Bandmittenlinie. Es ist deutlich sichtbar, dass die Krümmung an den Wendepunkten der Bandmittenlinie den Wert Null annimmt. Um den Verlauf der Kurven deutlich darzustellen, ist die Abbildung stark verzerrt, die y-Achse bildet einen Bereich von nur 60 mm bei der Bandmittenliniendarstellung oder 0.8 μm bei der Krümmungsdarstellung ab, während die x-Achse einen Bereich von 110 000 mm abbildet. Aufgrund dessen erscheint die Bandmittenlinie an den Bandenden nahezu gerade, was jedoch nicht den wahren Gegebenheiten entspricht. Ein Ausschnitt des Bandendenbereiches ist weniger verzerrt im

Bild 54 dargestellt. Obwohl die x-Achse immer noch ein Vielfaches der y-Achse darstellt, ist deutlich erkennbar, dass ein Anstieg der Krümmung an den Bandenden gemessen wurde.

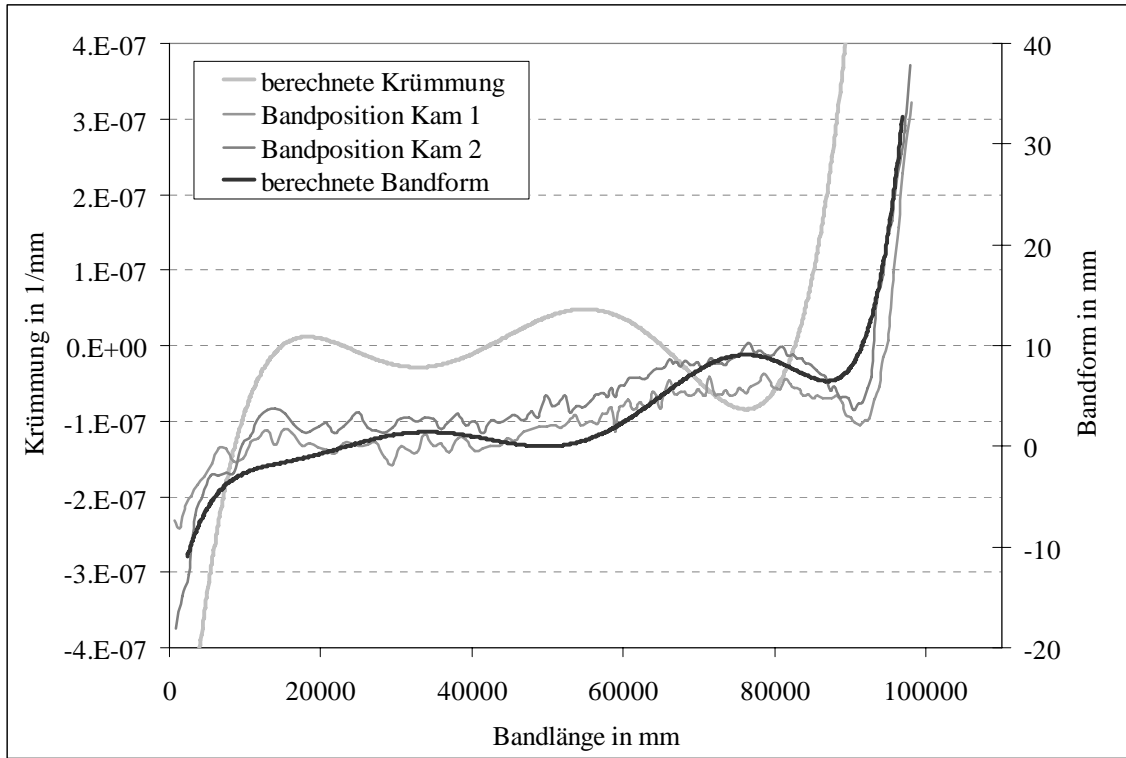


Bild 53: Gemessene Bandkantenpositionsdaten, deren Krümmung sowie die daraus bestimmte Bandmittellinie

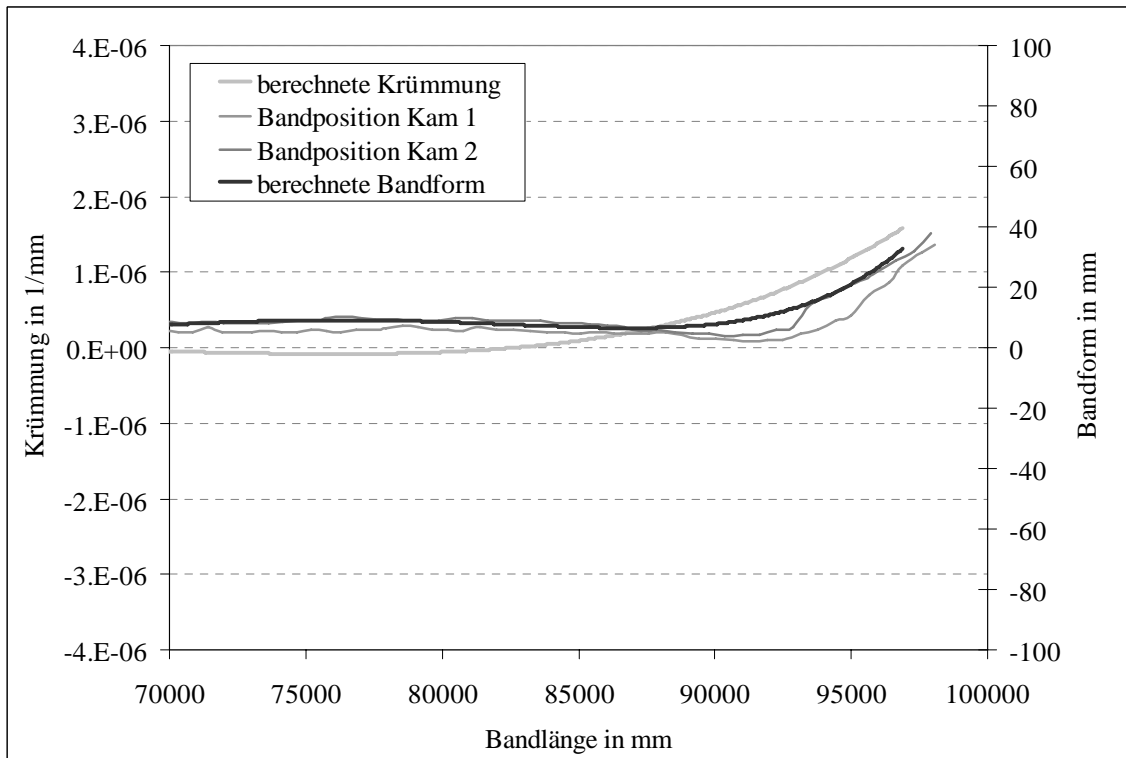


Bild 54: Gemessene Bandkantenpositionsdaten, deren Krümmung sowie die daraus bestimmte Bandmittellinie – Ausschnitt am Bandende

9.3 Datenbasierte Modellierung der Bildung des Bandsäbels

Die oben beschriebenen neu gewonnenen Bandkrümmungsdaten wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Laborversuche und aller anderen relevanten Prozessdaten zu einer datenbasierten Modellierung genutzt. Eine analytische Modellierung der Bandsäbelentstehung wurde hauptsächlich aus zwei Gründen nicht verfolgt. Zum einen erlaubt die dreidimensionale Umformung beim Warmvorwalzen keine Vereinfachung der plastomechanischen Grundgleichungen. Zum anderen ist die Kenntnis des Dickenprofils für die analytische Beschreibung der Bandsäbelentstehung notwendig. Das Dickenprofil kann jedoch an einer Vorstrasse bisher nicht gemessen werden.

9.3.1 Datenerfassung

Zwecks Datenanalyse wurde zunächst eine Datenbank, bestehend aus allen für die Bandsäbelentstehung relevanten und zur Verfügung stehenden Prozessparametern der Vorstraße der EKO GmbH sowie der oben beschriebenen Bandkrümmungsdaten, erstellt.

Das gewalzte Produkt trägt den Namen Bramme vor Beginn des Vorwalzens und den Namen Band, sobald ein Walzstich erfolgt ist. Daher wurden nachfolgend beide Bezeichnungen verwendet.

9.3.1.1 Prozessparameter-Vorwalzen

Die verfügbaren geometrischen Größen wie die Länge und Breite der gewalzten Bramme/ des Bandes wurden in die Datenbank aufgenommen. Diese Größen werden am Gerüst kontinuierlich gemessen, während sowohl die Walzgutdicke als auch das Dickenprofil am Vorgerüst nicht erfasst werden, so dass diese Daten nicht zur Verfügung standen. Wie vorher bereits beschrieben, stellen diese Daten eine wichtige Information zur Bandsäbelentwicklung dar. Das Messen des Dickenprofils am Vorgerüst ist jedoch, hauptsächlich aufgrund der großen Dicke der Bramme und der hohen Temperaturen noch nicht industriell möglich. Eine Information über die Dicke und das Dickenprofil des Bandes geben die Walzspaltposition sowie der Schwenkbetrag, welche ebenfalls kontinuierlich gemessen werden und in der Datenbank gespeichert wurden. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Walzspalteinstellung aufgrund der Gerüstauffederung und der elastischen Rückverformung des Bandes nicht gleich der Bandauslaufdicke ist und aus gleichen Gründen der Schwenkbetrag nicht gleich dem Dickenprofil ist.

Weitere aufgenommene Prozessdaten sind Daten bezüglich der Kräfte und Momente an beiden Gerüsten, dem vertikalen und dem anschließenden horizontalem Gerüst (die Konfiguration der Anlagen an der Warmwalzstrasse der EKO-Stahl wurde im Kapitel 6.3 beschrieben). Hierbei wurden auch die Differenzen dieser Parameter zwischen der Antriebs- und der Bedienseite des Gerüstes aufgenommen, da insbesondere die Asymmetrie dieser Größen entlang der Gerüstbreite eine wichtige Einflussgröße der Bandsäbelentwicklung oder ein Indiz für den Bandsäbel sein könnte. Ein Zusammenhang zwischen der Abweichung der Bandmittenkurve (Indiz für den Bandverlauf und den

Bandsäbel) und der Walzkraftdifferenz am Vertikalgerüst wurde bei Beobachtungen an der Vorstrasse der EKO festgestellt. Ein Beispiel hierfür ist im **Bild 55** dargestellt.

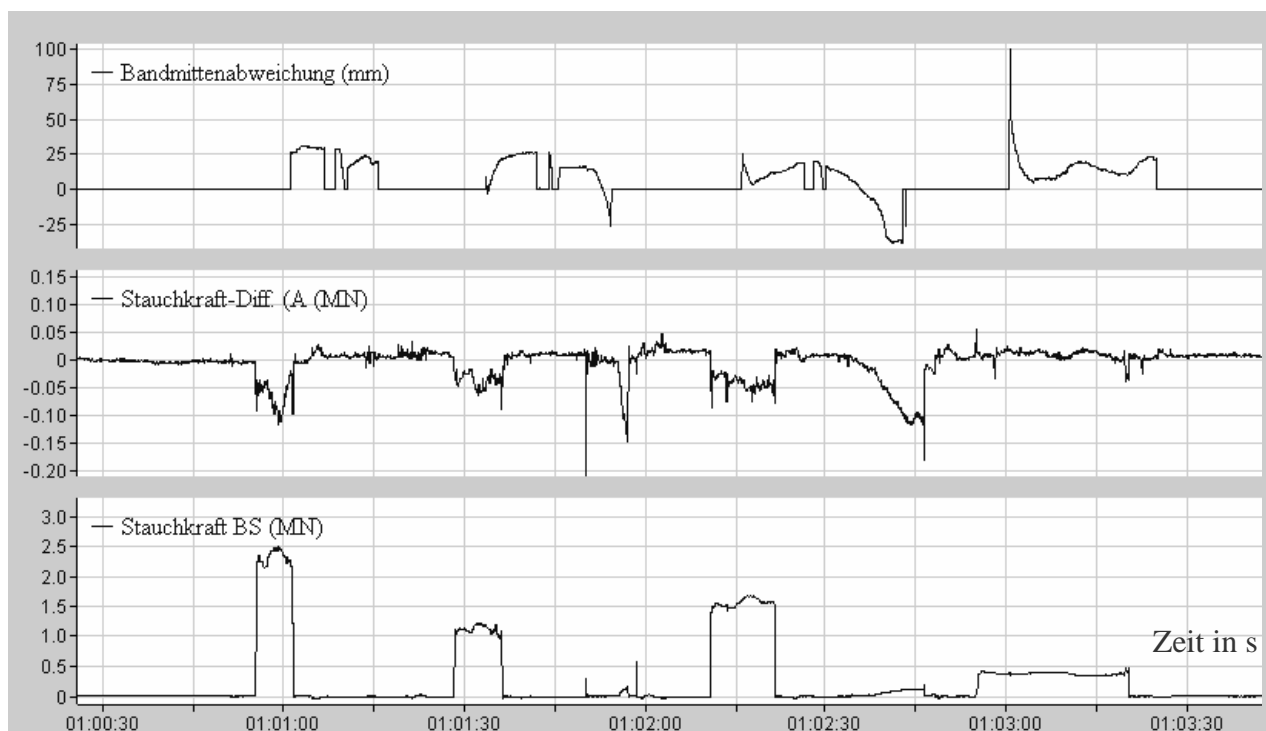


Bild 55: Zusammenhang zwischen Bandsäbelentwicklung und Walzkraftdifferenz am Vertikalgerüst

Im oberen Bild ist die am Auslauf der Vorstrasse gemessene Bandmittenkurve (hier als Zeit- und nicht als Ortsfunktion dargestellt) im Verlauf der 7 Stiche angegeben. Im unteren Teil des Bildes sind die Stauchkraftdifferenz sowie die an der Bedienseite des Gerüsts gemessene Stauchkraft aufgetragen. Alle 7 Stiche sind hintereinander gegen die Zeit aufgetragen. Da an den Anlagen der EKO-Stahl nur bei ungeraden Stichen (1, 3, 5, 7) gestaucht wird, beträgt die Stauchkraft zwischen den ungeraden Stichen in den meisten Fällen nahezu Null. Abweichungen davon sind zum Beispiel im Stich 6. zu sehen. Die Stauchkraftdifferenz fällt kontinuierlich im Stichverlauf ab, die Stauchkraft an der Bedienseite nimmt kontinuierlich zu. Dies ist ein Zeichen für den verhinderten Bandmittenverlauf des Bandes, welches anscheinend mit der bedienseitigen Kante gegen die bedienseitige Stauchwalze drückt. Im Einlauf des sechsten Stiches (auf Grund des Reversierprozesses ist der Auslauf der Vorstrasse für die geraden Stiche der Einlauf des jeweiligen Walzprozesses) ist eine deutliche Abweichung des Bandmittenverlaufs zur Bedienseite des Gerüsts, welche synchron zum Verlauf des Stauchkraftdifferenzsignals ist, gemessen worden. Wie bereits oben im Kapitel 8.1.2 beschrieben, findet bei der Bandsäbelentstehung eine Drehung des Bandes sowohl am Auslauf als auch am Einlauf des Prozesses statt (siehe **Bild 20**). Ein Kontakt mit der bedienseitigen Stauchwalze am Auslauf des Prozesses und ein Bandmittenverlauf zur Bedienseite am Einlauf des Prozesses sind ein deutliches Indiz für die Bandsäbelentstehung. Beim Verlauf eines geraden Bandes befindet sich das Band einlauf- und auslaufseitig an entgegengesetzten Gerüstseiten. Auch im vierten Stich ist ein Abfall der Stauchkraftdifferenz zu der Bedienseite zu beobachten, auch wenn auf Grund der geringeren Bandlänge dieser Effekt hier nicht so deutlich erkennbar ist. Die Abweichung der Band-

mittenkurve ist im vierten Stich ebenfalls synchron zum Verlauf der Stauchkraftdifferenz an der bedienseitigen Walze.

Um den Einfluss der Walzgeschwindigkeit zu definieren, wurde die Umfangsgeschwindigkeit der Arbeitswalzen des Horizontalgerüsts in der Analyse berücksichtigt. Alle Umfangsgeschwindigkeiten der am Prozess beteiligten Walzen korrelieren sehr stark, daher ist es ausreichend nur ein Signal dieser Gruppe aufzunehmen.

Bezüglich der Bandkrümmungsdaten wurden die aus den kontinuierlich gemessenen Bandkantenpositionsdaten bestimmten Bandmittenkurve und die berechnete Krümmung des Bandes als ein Maß des Bandsäbels aufgenommen.

Der kontinuierliche Bandlängenwert als auch der Längenindex wurden gespeichert, um den Verlauf der Bandsäbelentwicklung entlang der Bandlänge zu bestimmen. Hierbei sollte insbesondere festgestellt werden, ob am Anfang und Ende des Bandes die Kopf- und Fußhakenentstehung ausgeprägt ist. In diesem Fall würden die ersten und letzten Längenindexe eine hohe Korrelation mit der Bandkrümmung aufweisen.

Um den in den Versuchen untersuchten wichtigen Einfluss der Seitenführungen zu analysieren, wurden die Positionen der Seitenführungen am Einlauf und Auslauf des Gerüsts in der Datenbank gespeichert. Diese Daten stellen jedoch keine vollständige Information über den Seitenführungseinfluss dar, da weder bekannt ist, ob das Band in Kontakt mit der Seitenführung war noch wie lang dieser Kontakt stattfand. Es existieren bisher keine Möglichkeiten, den Seitenführungseinfluss zu messen oder zu quantifizieren.

Um einen möglichen Einfluss des Werkstoffes zu untersuchen wurde die Stahlidentifikation in der Datenbank gespeichert.

Der Vorwalzprozess der EKO-Stahl findet reversierend in mehreren Stichen statt. Der Einfluss des jeweiligen Stiches ist denkbar. Es ist zu vermuten, dass in den letzten Stichen die Krümmung des Bandes auf Grund der geringeren Dicke und größeren Länge größer ist. Daher wurde die Stichnummer ebenfalls in der Analyse berücksichtigt.

Die unten genannten Prozessparameter werden zu jedem Stich gemessen. Durch einen Index (n) wird die Stichnummer angegeben und damit eine Unterscheidung der Daten eines Parameters zwischen den einzelnen Stichen gegeben. Die Stichanzahl variiert zwischen 5 und 9, beträgt jedoch in den meisten Fällen 7. In der Analyse wurden nur Daten von Bändern, welche in 7 Stichen gewalzt wurden, berücksichtigt.

Um die sehr große Anzahl der Daten zu reduzieren, wurden die Daten eines Bandes in 10 Segmente unterteilt und im jeweiligen Segment gemittelt. Bei einigen Parametern wurde weiterhin die Differenz zwischen Anfang und Ende des jeweiligen Segmentes bestimmt, um damit eine weitere Information über den Verlauf dieses Parametersignals zu erhalten.

Die gemessenen Prozessdaten liegen zeitbezogen vor. Für die Analyse der Bandsäbelentstehung ist eine ortsbezogene, der Bandgeometrie entsprechende Einteilung, nötig. Mit Hilfe der Rollgangs-

geschwindigkeitswerte wurden daher, wie schon bei der Bandkrümmungsbestimmung im Kapitel 9.2.1 beschrieben, die zeitbezogenen Prozessdaten in ortsbezogene, der Brammenlänge zugeordnete, Daten umgerechnet.

Im Folgenden sind die Namen und die Bedeutung der einzelnen in der Datenbank gespeicherten Parameter angegeben.

• **Vorwalzprozessdaten ($n = \text{Stichindex}$):**

Wkr_VG_n	Walzkraft im Vertikalgerüst (VG)
WkrDiff_VG_n	Walzkraftdifferenz Antrieb-/Bedienseite, VG
Trend WkrDiff_VG_n	Signalverlauf, Walzkraftdifferenz, VG, (Anfang-Ende des Signals)
Mo_VG_n	Drehmoment, VG
MoDiff_VG_n	Drehmomentdifferenz, Antrieb-/Bedienseite, VG
Trend MoDiff_VG_n	Signalverlauf, Drehmomentdifferenz, VG, (Anfang-Ende des Signals)
Pos_VG_n	Walzspaltposition, VG
Wkr_HG_n	Walzkraft im Horizontalgerüst (HG)
WkrDiff_HG_n	Walzkraftdifferenz Antrieb-/Bedienseite, HG
Trend WkrDiff_HG_n	Signalverlauf, Walzkraftdifferenz, HG, (Anfang-Ende des Signals)
Pos_HG_n	Walzspaltposition, HG
Schwenkwert_n	Schwenkbetrag, HG
v_AW_n	Umfangsgeschwindigkeit der Arbeitswalzen, HG
Bandmittenabw_n	Brammen-/Bandmittenabweichung
Kappa_n	Krümmung
Länge_n	Kontinuierlicher Brammen-/Bandlängenwert
Index_n	Längenindex des Brammensegmentes (0-9)
Breite_n	Brammen-/Bandbreite
SF_Einlauf_n	Position der Seitenführungen, Einlauf
SF_Auslauf_n	Position der Seitenführungen, Auslauf
Stahlmarke_n	Stahl Identifikation
ID_n	Brammen/Band Identifikation

Tabelle 20: Name und Bedeutung in der Datenbank gespeicherter Parameter

9.3.1.2 *Prozessparameter-Ofen*

In Gesprächen mit dem Walzwerkpersonal der EKO-Stahl wurde oft der Einfluss der Brammentemperatur als sehr bedeutend auf die Bandsäbelentstehung genannt. Sind die Brammen gut durch-

wärmt und weisen eine allgemein hohe Temperatur auf, ist die Tendenz zur Säbelbildung nach Auskunft des Personals deutlich reduziert. Besonders hervorzuheben ist hierbei der Direkteinsatz, bei welchem die heiß gegossenen Brammen direkt zum Walzwerk gelangen und nur eine kurze Aufwärmzeit im Ofen benötigen. Diese Brammen sind auch im Inneren gut durchwärmt, weisen eine höhere Temperatur auf und führen tendenziell zu wenig gekrümmten Bändern.

Die Ursache hierfür kann die mögliche Asymmetrie der Aufwärmung (Temperaturkeil entlang der Brammenbreite) im Ofen sein. Sind die Brammen bereits gut durchwärmt kann sich diese Asymmetrie nicht so stark ausbilden. Der entstandene Temperaturkeil führt im Walzprozess zu unterschiedlichen Bedingungen an der Antriebs- und der Bedienseite, damit zu unterschiedlichen Dickenabnahmen an den beiden Gerüstseiten und damit zum Bandsäbel.

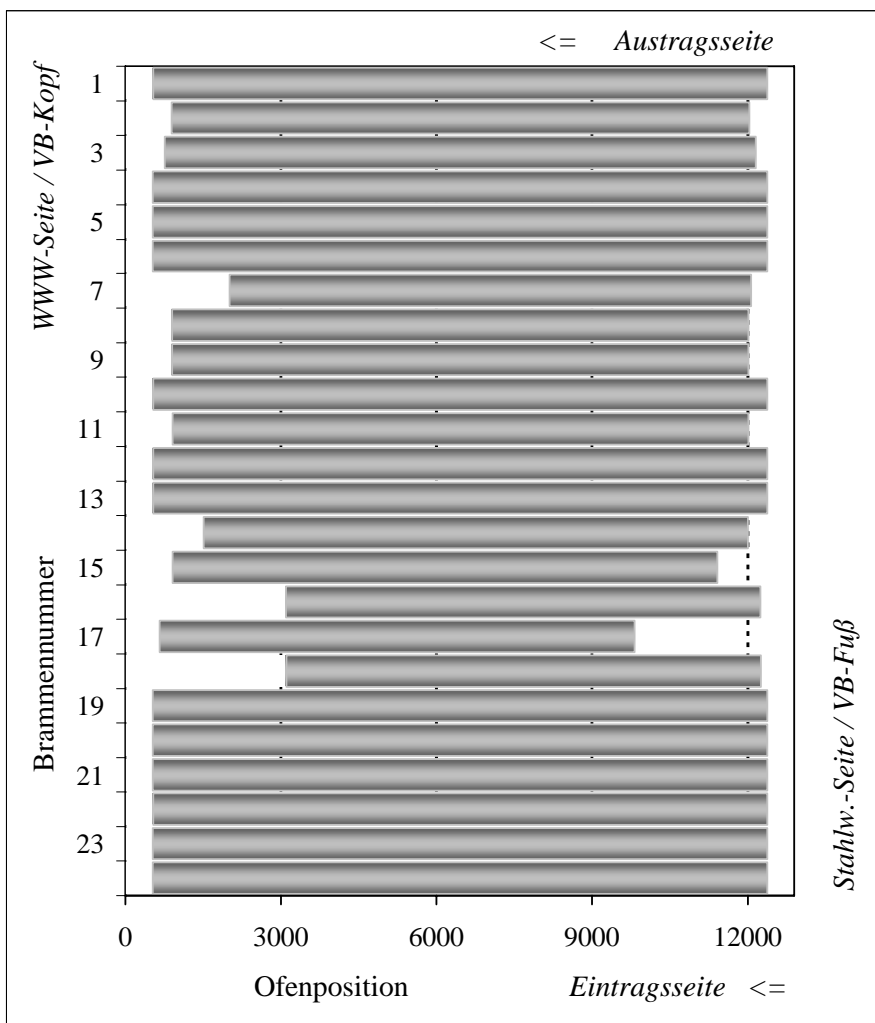


Bild 56: Ofenbelegung mit unterschiedlich langen Brammen (VB=Vorband, WWW=Warmwalzwerk)

Zum einen kann ein Temperaturkeil bei einem Runter- oder Hochfahren der Ofentemperatur entstehen. Zum anderen sind die eingesetzten Brammen nicht alle gleich lang. Bei besonders kurzen Brammen werden diese alternierend eingesetzt. Dadurch ergeben sich Bereiche an Nachbarsbrammen, welche einen deutlich größeren Abstand zu nächsten Bramme als die gegenüber liegenden Seiten haben. Die Aufwärmung ist an den „offenen“ Seiten begünstigt, wodurch die Temperatur in

diesen Bereichen höher ist als in der übrigen Bramme. Hierdurch ist besonders die Entstehung der Bandhaken begünstigt. Folgendes **Bild 56** zeigt schematisch ein Beispiel für eine Ofenbelegung mit unterschiedlich langen Brammen, wodurch die gleichmäßige Aufwärmung in der gesamten Bramme nicht gewährleistet ist. Als Beispiel kann die im Bild dargestellte Bramme Nr. 19 hervorgehoben werden. Am Vorbandkopf entstehen durch die kurze Nachbarsbramme unterschiedliche Aufwärmbedingungen an beiden Seiten der Bramme, was zum Temperaturkeil entlang der Brammenbreite führt.

Im

Bild 57 und **Bild 58** sind beispielhaft Bandmittenverläufe während des Vorwalzens (7 Stiche) von ansonsten gleichen Beispielbrammen ohne und mit „offenen Seiten“ dargestellt. Alle sieben Stiche sind hinter einander gegen die Zeit aufgetragen. Mehrere Brammen sind in einem Bild zusammengefügt, so dass ein Vergleich stattfinden kann. Die langen, gleich aufgewärmten Brammen zeigen alle einen sehr ähnlichen Verlauf, der nur wenige Abweichungen aufweist. Die kurzen alternierend eingesetzten Brammen zeigen sehr unterschiedliche Bandmittenverläufe, welche stark voneinander abweichen und zudem größere Auslenkungen der Bandmittenlage aufweisen. Diese Abweichungen sind höchstwahrscheinlich auf die unterschiedliche Aufwärmung im Ofen zurückzuführen. In Zusammenhang mit anderen Bandsäbeleinflussfaktoren verstärken oder kompensieren die Temperaturunterschiede die Bandsäbelentstehung.

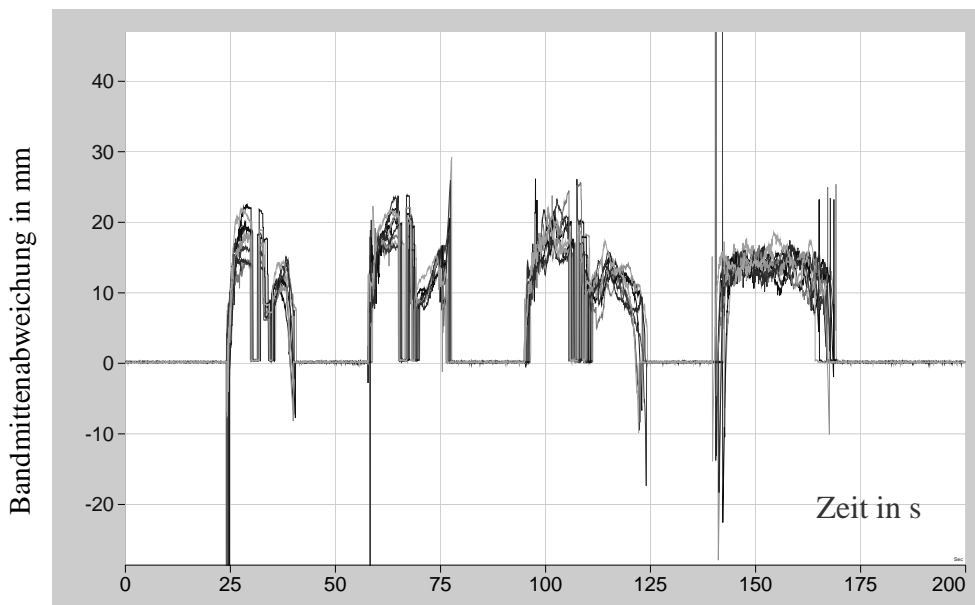


Bild 57: Bandmittenverläufe von Brammen ohne „offene Seiten“

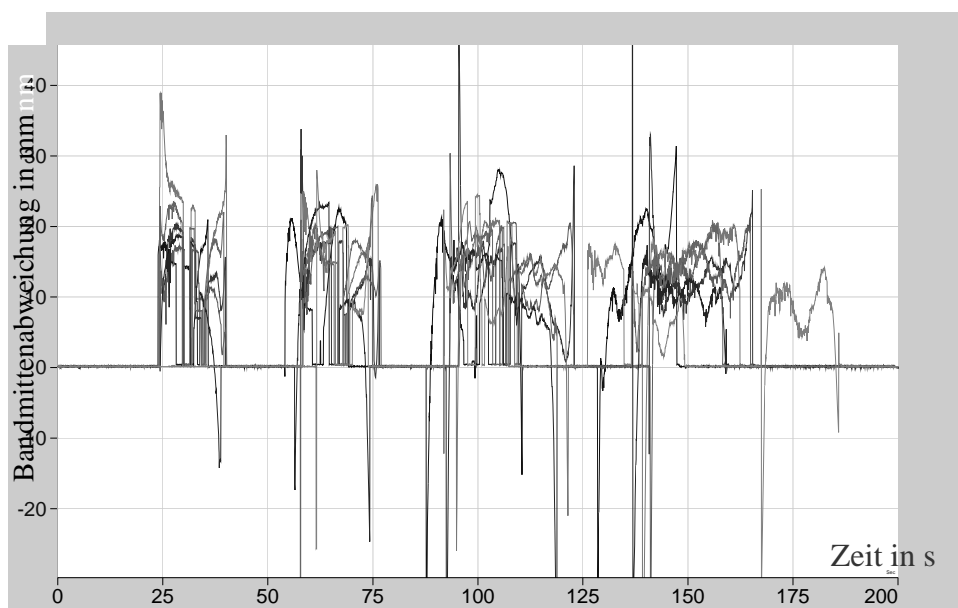


Bild 58: Bandmittenverläufe von Brammen mit „offenen Seiten“

Auf Grund dieser Erkenntnisse ist anzunehmen, dass neben den Prozessdaten die Ofendaten bedeutend für die Datenanalyse hinsichtlich des Bandsäbels sind. Daher wurden die nachfolgend aufgelisteten Daten in die Datenbank einbezogen.

• **Ofendaten:**

Asym_Ofenlage	Asymmetrie der Brammenposition in Bezug zu der vorherigen und der nachfolgenden Bramme
BrammenAbstNach	Abstand der Bramme zu der nachfolgenden Bramme
BrammenAbstVor	Abstand der Bramme zu der vorherigen Bramme
dt Ofenentnahme	Zeitdifferenz zwischen zwei aus dem Ofen entnommenen Brammen
Verweilzeit	Verweilzeit im Ofen
Verweil_H1	Verweilzeit Heizzone 1
Verweil_H2	Verweilzeit Heizzone 2
Verweil_Ausgl.	Verweilzeit Ausgleichzone
Erwärmung	Kennziffer Erwärmung
Brammenlänge	Brammenlänge
Max_Liegezeit	maximale Liegezeit im Ofen
B_TempOfen_Ein	Brammentemperatur Ofen_Ein
B_TempOfen_Aus	Brammentemperatur Ofen_Aus

Tabelle 21: Ofendaten

9.3.2 Bestimmung der relevanten Einflussgrößen

Die oben beschriebene Datenbank wurde der Abteilung „Qualitäts- und Informationstechniken“ des BFI zur Verfügung gestellt, um statistische Analysen zwecks Bestimmung der relevanten Einflussgrößen der Bandsäbelentstehung durchzuführen und anschließend die Bandkrümmung mit Hilfe der am wichtigsten zu erscheinenden Einflussgrößen zu modellieren.

Verschiedene datenbasierte Methoden, welche im folgenden aufgelistet werden, wurden zur Analyse der Einflussgrößen verwendet. Die hierzu verwendete Software ist eine BFI-hauseigene Software mit dem Namen „DataTools“.

- Kategorisierte Histogramme (CH)
- Diskriminanz Analyse (DA)
 - *standard* verwendet alle verfügbaren Eingangsgrößen
 - *backward* verwendet zunächst alle Eingangsgrößen und eliminiert nach und nach alle für die Klassifikation nicht genügend relevanten Größen
 - *forward* verwendet zunächst nur eine Eingangsgröße und addiert alle anderen nur, wenn sie genügend Relevanz für die Klassifikation aufzeigen
- Entscheidungsbäume (DT), zwei unterschiedliche Algorithmen C45 und OC1
- Komponentenweise Darstellung der selbstorganisierten Merkmalskarte (SOM)
- Genetischer Algorithmus (GA)

Als Eingangsgrößen (mögliche Einflussgrößen) wurden die Ofendaten sowie die Prozessdaten der Stiche 1-6, als Ausgangsgröße die Krümmung des Bandes nach dem 7. Stich verwendet. Diese Vorgehensweise wurde im Hinblick auf eine industrielle Nutzung des datenbasierten Modells gewählt. Hier sind die Eigenschaften des Produktes des Vorwalzprozesses, also des Vorbandes nach dem 7. Stich, entscheidend für die Weiterverarbeitung und damit die Endqualität des Stahlbandes. Daher sollte der Vorwalzprozess mit dem Ziel, die Krümmung des Bandes nach dem 7. Stich möglichst gering und damit die Qualität des Vorwalzendproduktes möglichst hoch zu halten, gefahren werden. Hierfür ist eine Vorausberechnung dieser Größe nötig, um mit Hilfe von Stellgliedern der Entstehung der Bandkrümmung entgegenzuwirken. Für die Vorausberechnung wurden die vor dem 7. Stich zur Verfügung stehenden Größen, die Ofendaten und die Prozessgrößen der Stiche 1-6, auf ihren Einfluss untersucht. Damit kann eine Bewertung der einzelnen Parameter hinsichtlich des Einflusses auf die Ausgangsgröße, Bandkrümmung nach dem 7-Stich, erfolgen.

Hierbei muss beachtet werden, dass einige wichtige bereits bekannte Einflussgrößen, wie das Dickenprofil, das Temperaturprofil oder die genauen Seitenführungsdaten nicht gemessen werden können und damit für die Analyse nicht zur Verfügung stehen.

Auch die Ausgangsgröße, Bandkrümmung, stellt einen unvollständigen Sachverhalt dar. Zur vollständigen Beschreibung der geometrischen Qualität des Vorbandes wäre die Messung des Dickenprofils nach dem 7. Stich nötig. Bei einer geraden, symmetrischen Eingangsbramme stellt die Bandkrümmung bereits eine Beschreibung des Dickenprofils dar, da der Bandsäbel aufgrund unterschiedlicher Abnahme im Horizontalgerüst entsteht und dies bei einer symmetrischen (bezogen auf das Dickenprofil) Bramme zu einem Dickenkeil führt. Eine Auswertung von Messdaten der Dickenprofile der Eingangsbrammen des Vorgerüsts stand im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung. In dieser Auswertung wurden keine signifikanten Unsymmetrien des Dickenprofils bei den im EKO-Werk eingesetzten Brammen festgestellt. Aufgrund dessen kann für den Fall der EKO-Stahl angenommen werden, dass die Bandkrümmung auch ein Indiz für den Dickenkeil und somit zur Beschreibung der geometrischen Qualität des Bandes ausreichend ist.

In ersten Analysen der Daten wurde der Verlauf der Krümmungsdaten genauer untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass die Bandkrümmung an den Enden des Bandes deutlich größer als im Filetteil des Bandes ist. Zudem sind der Betrag und die Variation der Bandkrümmung im Filetteil extrem klein, wodurch die Analyse der Einflussgrößen erschwert ist. Aus diesem Grund wurden nur die Daten der Bandenden in der Analyse berücksichtigt. Diese Daten wurden mit Hilfe der oben beschriebenen Indexe ausgewählt: Die Indexe 0-2 für den Bandkopf und die Indexe 7-9 für den Fuß wurden herangezogen, was jeweils ca. 1/3 der gesamten Bandlänge darstellt.

In der folgenden Tabelle 21 sind die Ergebnisse der Analyse angegeben. In der obersten Zeile sind die oben erläuterten verwandten Methoden, in der linken Spalte die einzelnen untersuchten Parameter aufgelistet. In den jeweiligen Zellen sind die Wertungen des jeweiligen Parameters nach der jeweiligen Methode angegeben. Die Absolutbeträge der Wertungszahlen haben keine Aussagekraft, nur das Verhältnis der Zahlen zueinander ist wichtig im Hinblick auf die Beurteilung des Einflusses. Die im Vergleich hohen Werte wurden markiert. Ein Strich bedeutet, dass dieser Parameter nach der entsprechenden Methode nicht berücksichtigt wurde. Dies kann mehrere Ursachen haben. Zum Beispiel werden untereinander hochkorrelierte Parameter nicht alle analysiert. Im Fall der Diskriminanzanalyse werden die Parameter, welche eine lineare Kombination der anderen Parameter darstellen, ebenfalls nicht analysiert. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden sind teilweise sehr hoch, was ein Indiz für die Komplexität der Säbeleinflüsse sein kann.

In der Tabelle 21 sind die nach einer oder mehreren Methoden als signifikant erachteten Einflussparameter der Wertung nach aufgelistet. Hierbei wurden zueinander hochkorrelierte Größen nicht alle, sondern nur einer der Größen als „Vertreter“ der hochkorrelierten Gruppe angegeben. Hierzu zählen zum Beispiel die Bandlängen nach den einzelnen Stichen oder auch die Breiten, Einstellungen des Stauchspaltes und Offsetwerte der Seitenführungen.

Parameter / Methode	CH	DA_s	DA_b	DA_f	DT_C45	DT_OC1	SOM	GA	Mittelwert
Laenge_6	0.16	-	-	-	-	-	-	-	0.16
v_AW_6	0.13	0.00	0.10	0.07	0.02	0.06	0.08	0.15	0.08
v_AW_5	0.14	0.00	0.10	0.09	0.03	0.06	0.05	0.12	0.07
Mo_VG_1	-	0.06	0.21	-	0.00	0.00	0.03	-	0.06
Kappa_5	0.11	-	-	-	0.01	0.06	0.05	-	0.06
Bandmittenabw_3	-	0.00	0.13	0.13	0.00	0.05	0.00	0.10	0.06
WkrDiff_VG_3	0.02	0.00	0.13	0.11	0.06	0.00	0.05	-	0.05
Trend_WkrDiff_VG_5	0.04	0.00	0.12	0.10	0.00	0.00	0.09	0.06	0.05
v_AW_1	0.07	0.00	0.13	0.14	0.00	0.00	0.00	-	0.05
Kappa_4	-	-	-	-	0.06	0.00	0.07	-	0.04
Bandmittenabw_5	-	0.00	-	-	0.06	0.06	0.04	-	0.04
Breite_1	-	0.06	-	-	0.06	0.06	0.00	-	0.04
Trend_WkrDiff_VG_3	-	0.00	-	-	0.00	0.00	0.06	0.12	0.04
Wkr_HG_1	-	0.06	-	-	0.05	0.06	0.00	-	0.03
Asym_Ofenlage	-	-	-	-	0.06	0.00	0.00	0.08	0.03
Brammenlaenge	-	0.13	-	-	0.06	0.04	0.00	-	0.03
Bandmittenabw_1	-	0.06	-	-	0.06	0.04	0.00	-	0.03
Bandmittenabw_4	-	0.00	-	-	0.05	0.05	0.00	0.06	0.03
Wkr_VG_5	-	0.00	-	-	0.06	0.00	0.07	-	0.03
Pos_HG_6	-	0.00	0.08	0.06	0.00	0.04	0.00	-	0.03
v_AW_2	0.06	0.00	-	-	0.05	0.04	0.00	0.04	0.03
Wkr_HG_4	-	0.00	-	-	0.06	0.06	0.00	-	0.03
WkrDiff_HG_5	-	0.00	-	0.10	0.00	0.04	0.00	0.02	0.03
v_AW_3	0.09	0.00	-	-	0.00	0.04	0.00	-	0.03
Wkr_HG_2	-	0.00	-	-	0.06	0.04	0.00	-	0.03
Mo_VG_3	-	0.00	-	-	0.06	0.00	0.04	-	0.02
BrammenAbstVor	-	0.13	-	-	0.07	0.00	0.00	-	0.02
B_TempOfen_Ein	-	0.13	-	-	0.07	0.00	0.00	-	0.02
Trend_WkrDiff_HG_6	-	0.00	-	-	0.00	0.04	0.04	-	0.02
WkrDiff_HG_1	-	0.06	-	-	0.00	0.00	0.00	0.08	0.02
Trend_MoDiff_VG_2	-	-	-	-	-	-	0.00	0.04	0.02
Kappa_6	-	-	-	-	0.00	0.00	0.06	-	0.02
WkrDiff_VG_5	-	0.00	-	-	0.00	0.00	0.07	0.02	0.02
B_TempOfen_Aus	-	0.08	-	-	0.00	0.04	0.00	-	0.01
Trend_WkrDiff_VG_1	-	0.05	-	-	0.00	0.00	0.04	-	0.01
WkrDiff_VG_1	-	0.05	-	-	0.00	0.00	0.03	-	0.01
Kappa_1	-	-	-	-	0.00	0.00	0.03	-	0.01
Bandmittenabw_6	-	0.00	-	-	0.00	0.04	0.00	-	0.01
Mo_VG_5	-	0.00	-	-	0.00	0.00	0.04	-	0.01
Trend_WkrDiff_HG_4	-	0.00	-	-	0.00	0.00	0.04	-	0.01
Kappa_3	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01

Tabelle 22: Ergebnisse der statistischen Analyse der Einflussparameter

Die Ergebnisse können und sollen nicht alle im Detail erklärt werden, da sie nur tendenziell die Abhängigkeiten zwischen untersuchten Prozessparametern und dem Krümmungsverhalten aufzeigen. Trotzdem können durch eine Diskussion der Ergebnisse Hinweise und Gedanken gegeben werden, was im folgenden geschieht.

Einen der Analyse nach sehr wichtigen Parameter stellt die Bandlänge dar. In der Analyse wurde nur die Bandlänge nach dem 6. Stich sowie die Brammenlänge verwendet, da alle Längenangaben untereinander stark korrelieren. Das Ergebnis ist nicht überraschend. Eine zunehmende Bandlänge nach einem Stich ist mit einer höheren Dickenabnahme im Walzstich verbunden. Dünnere, längere Bänder wiesen auch in den durchgeführten Versuchen höhere Krümmungen auf.

Die Walzengeschwindigkeiten wurden ebenfalls als korrelierend bezeichnet. Hierfür ist wahrscheinlich der Verlauf der Walzengeschwindigkeit im Walzstich verantwortlich. Die Geschwindigkeit steigt zu Beginn des Prozesses, bleibt auf einem konstant hohen Niveau in der Mitte und fällt zum Ende des Prozesses. Die Bandkrümmung folgt einem ähnlichen, wenn auch umgekehrten Verlauf. Zu Beginn und Ende des Prozesses sind die Krümmungswerte hoch, in der Mitte gibt es einen langen konstanten Bereich. Demnach stellt die Geschwindigkeit wahrscheinlich keinen Einfluss, sondern einen zufällig der Bandkrümmung sehr ähnlich verlaufenden und damit korrelierenden Parameter dar.

Die Stauchparameter, wie die Momente, die Kräfte und die Asymmetrie der Kräfte zeigen wie vermutet werden konnte, einen Einfluss. Tendenziell sind die Stauchparameter höher einsortiert als die Parameter der Dickenreduktion. Hierzu kann zum einen ein Einfluss des Stauchens auf den Prozess, wie in den Plastilinversuchen teilweise gezeigt werden konnte, beitragen. Zum anderen kann vor allem die Stauchkraftdifferenz, wie oben im **Bild 55** dargestellt, ein Indiz oder ein zusätzliches Maß für den entstandenen Bandsäbel sein. Je höher die Stauchkraftdifferenz, desto stärker ist die Tendenz des Bandes zu der jeweiligen Gerüstseite zu drehen, was ein Maß für die Bandsäbelentwicklung sein kann. Denkbar ist ebenfalls, dass durch einen Kontakt des Bandes mit der Stauchwalze der Bandsäbelentstehung, ähnlich wie beim Kontakt mit der Seitenführung (siehe **Bild 20** und **Bild 22**), entgegengewirkt wird und sich somit ein positiver Effekt auf die Bandformausbildung einstellt.

Eine vergleichsweise hohe Korrelation stellen nicht überraschend die Bandkrümmungswerte sowie die Bandmittenverläufe der vorherigen Stiche dar.

Die Breite wurde auch als einflussreich gekennzeichnet. Hierbei ist zu beachten, dass die Breitenwerte untereinander (Breitenwerte der einzelnen Stiche) sowie mit anderen Parametern, wie der Stauchspalteinstellung oder der Offseteinstellung der Seitenführung, hochkorreliert sind. Aus diesem Grund sind diese anderen Parameter nicht aufgelistet, da deren Einfluss extrem ähnlich dem Einfluss der Breitenwerte ist. Die relativ hohe Stellung des Breitenwertes kann zum einen die, bereits in der Literatur genannte Tatsache, der erleichterten Säbelentwicklung bei schmalen Bändern widerspiegeln. Zum anderen kann es ein Indiz für den bereits bekannten und in dieser Arbeit untersuchten Einfluss der Seitenführungen sein. Der Offsetwert stellt jedoch nur eine wache Beschreibung

des Seitenführungseinflusses dar, weil es keine Auskunft über den tatsächlichen Kontakt mit dem Band gibt.

Die Parameter der Dickenreduzierung im Horizontalgerüst, wie die Walzkräfte, deren gerüstseitigen Differenzen sowie die Walzspalteinstellung korrelieren, wie angenommen, mit den Bandkrümmungswerten. Die Walzkraftdifferenz ist ein Zeichen für die unterschiedliche Dickenabnahme und damit die Entstehung des Bandsäbels. Diese Asymmetrie wird bei hohen Kräften verstärkt.

Nicht zuletzt tauchen auch die Ofenparameter, wie die asymmetrische Brammenlage sowie die Ofeneingangstemperatur der Brammen in der Liste auf. Wie oben (Kapitel 0) bereits beschrieben, können asymmetrische Aufheizbedingungen im Ofen zu einem Temperaturkeil entlang der Breite einer Bramme führen, was beim Vorwalzprozess zu unterschiedlichen Bedingungen an den beiden Gerüstseiten führt. Denkbar ist sowohl die aufgrund dessen bedingte unterschiedliche Dickenabnahme an den beiden Gerüstseiten im Horizontalgerüst als auch eine unterschiedliche Stauchung an den beiden Gerüstseiten. Dadurch verursacht ist es denkbar, dass ein asymmetrisches Hundeknochenprofil entsteht, wie bei den Walzungen mit Plastilin im Fall unterschiedlich großer Stauchwalzen beobachtet (siehe **Bild 17**). Dies würde wiederum zu einer Verstärkung der unterschiedlichen Dickenabnahme und damit zum Säbel führen. In diesem Zusammenhang sollten die als sehr hoch betrachteten Einflüsse des Stauchmomentes und der Stauchkraft noch einmal genannt werden. Es ist denkbar, dass mit Zunahme dieser Parameter der Temperaturkeil und damit die asymmetrischen Bedingungen an den beiden Gerüstseiten an Bedeutung für den Stauchprozess gewinnen.

Ein Einfluss der Stahlmarke, also des Werkstoffs, konnte nach keiner der Methoden gefunden werden. Wahrscheinlich sind die Einflüsse des Prozesses bedeutender als die Unterschiede in den Materialeigenschaften der gewalzten Stähle.

Überraschend ist, dass der Einfluss des Schwenkens ebenfalls nicht gefunden werden konnte. Keiner der Schwenkbeträge der vorangegangenen Stiche wurde in den statistischen Analysen als einflussreich erachtet. Ein Grund für dieses Ergebnis könnte die zu geringe Variation der Schwenkbeträge sein. In den meisten Fällen wird der Schwenkbetrag weder während eines Stiches noch vom Stich zu Stich verändert. Auch unterschiedliche Brammen werden häufig mit dem gleichen Schwenkbetrag gefahren. Die Größe und Richtung des Schwenkens wird im EKO-Werk von der Fertigstrasse vorgegeben und beruht einzig auf Beobachtungen des Fachpersonals an der Fertigstrasse. Ebenfalls denkbar ist, dass das Schwenken zunächst nur anlagenbedingte Unsymmetrien, wie unsymmetrischen Verschleiß oder unsymmetrische Auffederung des Gerüsts, erfolgreich kompensiert.

Die analysierten und als wichtig erachteten Parameter wurden als Basis für die Wahl der Eingangsgrößen für die unten beschriebene datenbasierte Modellierung genutzt.

9.3.3 Anwendung der neuronalen Netze für die datenbasierte Modellierung

Aufgrund der Komplexität der Einflüsse der Bandsäbelentstehung wurde die Technik der neuronalen Netze unter Anwendung des MLP (multi layer perceptron), für die datenbasierte Modellierung genutzt. Daneben wurden lineare Regressionsmethoden getestet. Die erzielten Ergebnisse waren jedoch schlechter als die mit der neuronalen-Netz-Technik erhaltenen Resultate. Die besten erreichten Korrelationsfaktoren zwischen den gemessenen und mit dem erstellten linearen Modell berechneten Werten lagen bei 0.66. Aus diesem Grund wurde die lineare Regression nicht weiter verfolgt.

Die zu modellierende Ausgangsgröße war die Bandkrümmung nach dem letzten, dem 7. Stich. Die Eingangsgrößen wurden variiert. Zum einen um den Einfluss der einzelnen Parameter zu überprüfen, zum anderen um die optimale Anzahl und Kombination der Eingangsgrößen zu bestimmen.

Die Anzahl von ca. 15 Eingangsgrößen hat sich in mehreren Trainings als am besten geeignet erwiesen. Zu viele Eingangsgrößen können das Ergebnis verschlechtern, da die Einflüsse der wichtigsten Größen nicht mehr ausreichend abgebildet werden können.

Ein Teil der zur Verfügung stehenden Prozessdaten wurde zum Training des jeweiligen Netzes benutzt, ein weiterer Teil zur Validierung des trainierten Netzes. Auf diese Weise konnte geprüft werden, wie gut das erstellte Modell unter Verwendung neuer Daten die Ausgangsgröße berechnet. Damit wurde der industrielle Einsatz des jeweiligen Modells simuliert.

Im Folgenden werden Beispiele für einige trainierte Netze angegeben.

- **Ausgangsgröße: Kappa_7, Eingangsgrößen: Parameter Stich 1-6**

Folgende Eingangsgrößen wurden verwendet:

- Asym_Ofenlage,
- Länge_6,
- v_AW_1, v_AW_5, v_AW_6,
- Mo_VG_1, WkrDiff_VG_3, Trend_WkrDiff_VG_3, Trend_WkrDiff_VG_5,
- Wkr_HG_1, WkrDiff_HG_5,
- Bandmittenabw_3, Bandmittenabw_5, Kappa_5

Es sind im Wesentlichen die in der Datenanalyse am wichtigsten zu erachteten Parameter (siehe Tabelle 22). Das trainierte Netz erreichte im Training einen Korrelationsfaktor der gemessenen zu den mit dem Netz berechneten Krümmungsgrößen von 0.768 und in der Validierung von 0.720. **Bild 59** zeigt die mit dem Modell berechneten Krümmungswerte aufgetragen gegen die im Werk gemessenen Daten. Sowohl die Trainings- als auch die Validierungsergebnisse sind angegeben.

Um den Ofeneinfluss genauer zu untersuchen, wurde ein weiteres Netz mit Verwendung der gleichen Eingangsgrößen, jedoch ohne die asymmetrische Ofenlage trainiert. Die Trainingsergebnisse

waren ähnlich gut (Korrelationsfaktor: 0.766). In der Validierung war das Ergebnis jedoch deutlich schlechter und erreichte einen Korrelationsfaktor von nur 0.563. Dies zeigt wie wichtig die Verwendung der Ofendaten für die Modellierung der Bandkrümmung ist.

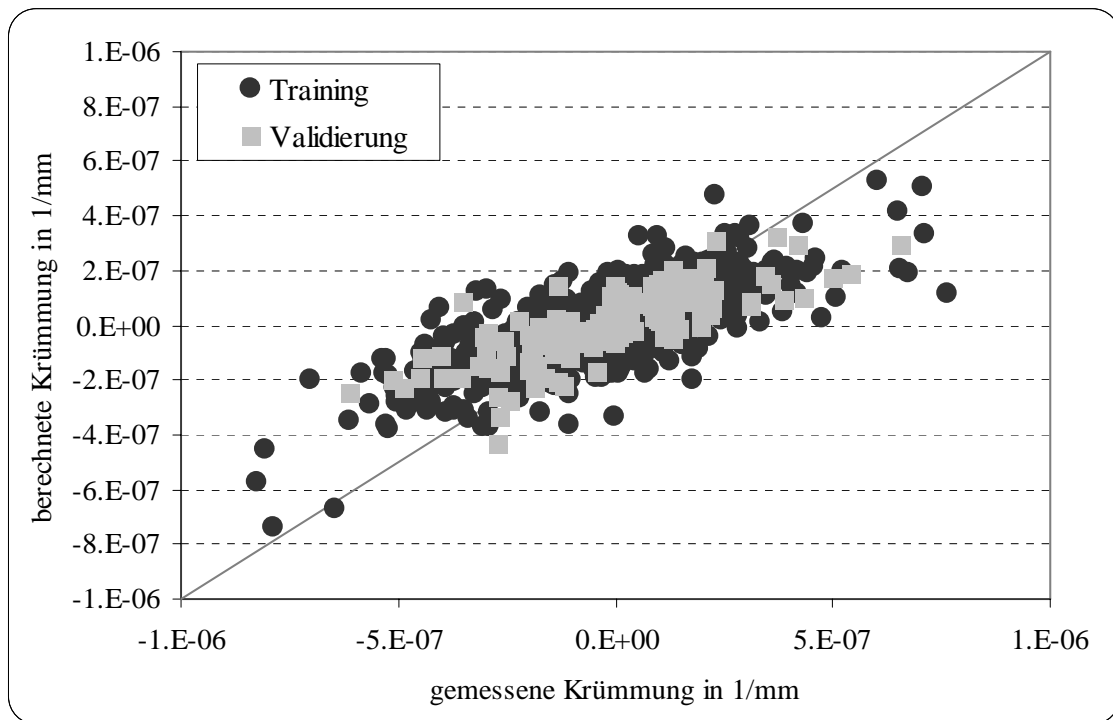


Bild 59: Gemessene und berechnete Krümmungsdaten (Eingangsgrößen: Parameter Stich 1-6)

- **Ausgangsgröße: Kappa_7, Eingangsgrößen: Parameter Stich 1-7**

In weiteren Schritten wurden neben den oben angeführten Eingangsgrößen auch Parameter des 7. Stiches verwendet. Damit sollte untersucht werden, ob und um wie viel die Modellierung erfolgreicher ist, wenn man neben der Historie des Bandes, also den Parametern der vorhergehenden Stiche sowie der Ofendaten, auch Parameter des aktuellen 7. Stiches verwendet. Die meisten dieser Größen sind im Vorfeld nicht bekannt, einige können jedoch abgeschätzt werden.

Bild 60 zeigt als Beispiel den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Größen für ein Modell, das neben den oben aufgeführten Eingangsgrößen zwei weitere Parameter des 7. Stiches verwendet hat. Dies waren die Walzengeschwindigkeit sowie die Stauchkraftdifferenz im 7. Stich. Die Walzengeschwindigkeit stellt hierbei eine im Vorfeld gut abschätzbare Größe und wurde in der statistischen Analyse sehr hoch bewertet. Die Stauchkraftdifferenz wurde aufgrund der in Kapitel 9.4 beschriebenen Idee gewählt.

Der Korrelationsfaktor zwischen den gemessenen und berechneten Größen beträgt für die Trainingsphase 0.805 und für die Validierungsdaten 0.732.

Des weiteren wurde ein Netz trainiert, das neben den oben genannten Größen den Schwenkbetrag im 7. Stich als Eingangsgröße verwendet. Damit wurde noch einmal der Einfluss des Schwenkens

überprüft. Das Ergebnis ändert sich jedoch nicht bei Verwendung der Schwenkparameter. Damit zeigt sich noch einmal, dass die im EKO-Werk bisher benutzten Schwenkbeträge anscheinend keinen Einfluss auf die Ausbildung des Bandsäbels haben (siehe Kapitel 9.3.2).

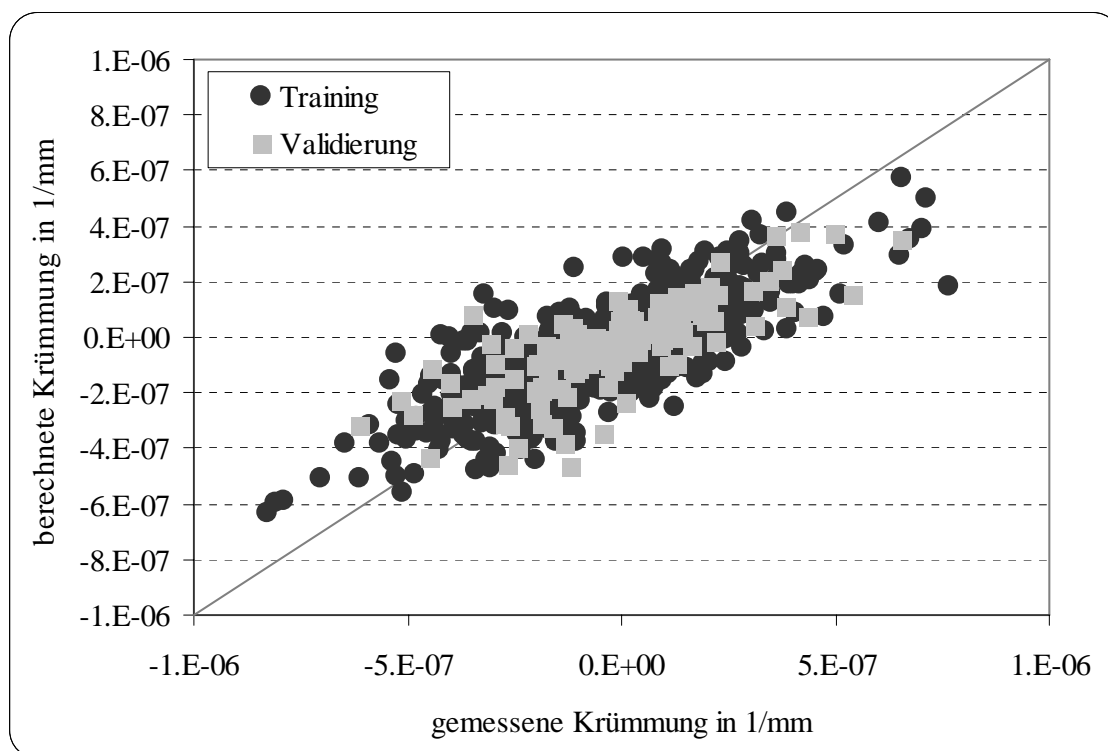


Bild 60: Gemessene und berechnete Krümmungsdaten (Eingangsgrößen: Parameter Stich 1-7)

- **Ausgangsgröße: Kappa_7, Eingangsgrößen: Parameter Stich 7+Asym_Ofenlage**

Ein weiteres Netz wurde trainiert, um gesondert den Einfluss des 7.Stiches auf die Bandkrümmung zu prüfen. Aus den vorhergehenden Daten wurde lediglich die asymmetrische Ofenlage ebenfalls verwendet. Folgend werden die verwendeten Eingangsgrößen aufgelistet:

- Asym_Ofenlage,
- Länge_7,
- v_AW_7,
- Mo_VG_7, MoDiff_VG_7, Trend_MoDiff_VG_7,
- Wkr_VG_7, WkrDiff_VG_7, Trend_WkrDiff_VG_7,
- WkrDiff_HG_7, Trend_WkrDiff_HG_7,
- Pos_HG_7
- Bandmittenabw_7

Die erzielten Korrelationen sind deutlich höher als die bisher erzielten Werte. Im Training wurde eine Korrelation von 0.791, in der Validierung ein Faktor von 0.785 erzielt (Bezug zu **Bild 61**).

Diesem Ergebnis nach ist der Einfluss des aktuellen in diesem Fall 7.Stiches bedeutender für die Bandkrümmung nach diesem Stich als die Prozessparameter der vorherigen Stiche.

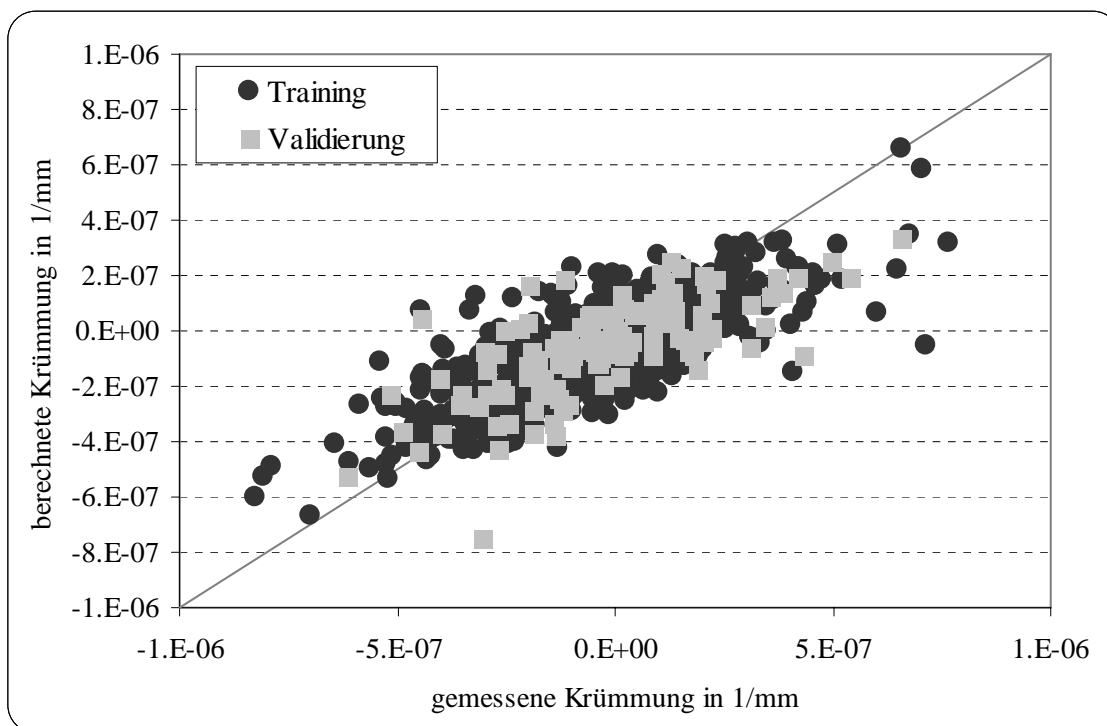


Bild 61: Gemessene und berechnete Krümmungsdaten (Eingangsgrößen: Parameter Stich 7)

- **Ausgangsgröße: Bandmittenabweichung_7, Eingangsgrößen: Parameter Stich 1-6**

Im industriellen Gebrauch wird oft die Bandmittenabweichung dem Bandsäbel gleichgesetzt. Die Berechnung der den Bandsäbel genauer beschreibenden Bandkrümmungswerte, wie zusammenfassend im Kapitel 9.2.5 beschrieben, wird bisher nicht verwendet. Um die Unterschiede dieser beiden Größen im Hinblick auf die Beschreibung des Bandsäbels und mögliche Modellierung zu untersuchen wurde ein weiteres Netz trainiert, für das als Ausgangsgröße die Bandmittenabweichung_7 und als Eingangsgrößen alle oben angegebenen, im ersten Beispiel verwendeten Größen benutzt wurden.

Die erzielten Korrelationsfaktoren betragen 0.650 im Training und 0.562 in der Validierung (Bezug zu **Bild 62**). Diese Werte sind deutlich schlechter als die oben dargestellten mit Hilfe der Krümmungswerte erzielten Ergebnisse. Der bedeutende Unterschied zwischen den mit den Krümmungsdaten und mit den Bandmittenabweichungen trainierten Netzen ist ein Zeichen für die mangelnde Beschreibung des Säbels durch die Bandmittenabweichung. Aufgrund dessen ist es gefährlich, auf Basis der Bandmittenabweichung mögliche Steuerung oder Regelung des Walzprozesses aufzubauen. Die Berechnung der Bandkrümmung ist hilfreich und sinnvoll.

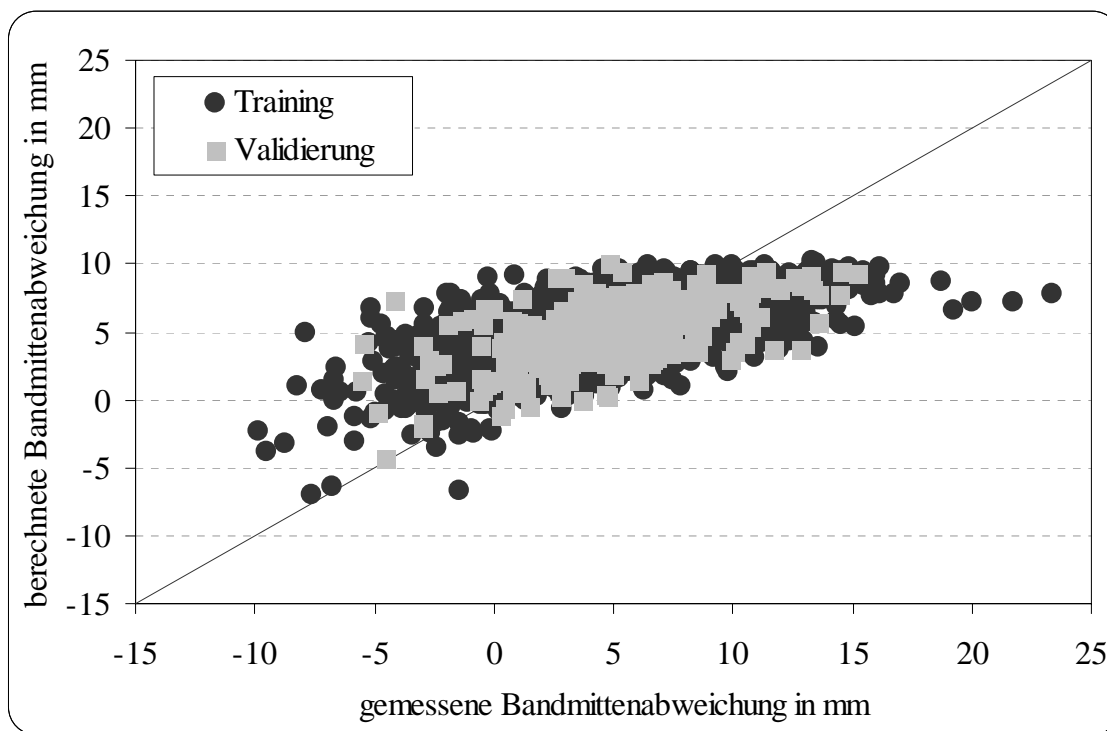


Bild 62: Gemessene und berechnete Krümmungsdaten (Ausgangsgröße: Bandmittenabweichung_7)

9.4 Bewertung der datenbasierten Modellierung

Die unter Verwendung verschiedener Analysewerkzeuge zur Bewertung der Einflussparameter und unter Verwendung neuronaler Netze zur Modellierung erzielten Ergebnisse sind bereits zufriedenstellend. Der Verlauf der Krümmungsdaten wurde durch das Modell gut wieder gegeben, die Korrelationen zwischen den gemessenen und den berechneten Werten liegen bei 0.7 – 0.8.

In der recherchierten Literatur wurde nur ein Modell zur Säbelberechnung gefunden. Es ist ein nach dem Schrankenverfahren erstelltes Modell [12] und erreicht eine ähnliche Genauigkeit, wurde jedoch nur mit Hilfe von sehr wenigen, im Labor gemessenen Versuchsdaten getestet.

Zum Training der oben dargestellten neuronalen Netze wurden knapp 1100 Datensätze verwendet, was ca. 180 Bändern entspricht. Für die Validierung wurden knapp 160 Datensätze verwendet. Eine weitere Datenaufnahme und damit Erhöhung der Datensatzmenge wird das Ergebnis weiter verbessern.

Wie oben bereits angesprochen, konnten einige wichtige Parameter in der Analyse nicht berücksichtigt werden, da sie zurzeit noch nicht gemessen werden können. Hierzu zählen vor allem das Dickenprofil, das Temperaturprofil sowie genaue Daten über den Seitenführungseinfluss. Sobald eine Aussage auch über diese Daten möglich werden sollte und sie in den Analysen und bei der Modellierung berücksichtigt werden, können sich die Ergebnisse ebenfalls verbessern.

Eine gewisse Möglichkeit, den positiven Einfluss der Seitenführungen zu verstärken und zu messen besteht bereits. Wie bereits oben beschrieben, wird nur in den ungeraden Stichen im Warmwalzwerk der EKO gestaucht. Während der geraden Stiche werden die Stauchwalzen aufgefahren und

nehmen nicht am Prozess teil. Beim besonders starken Bandmittenverlauf kann es vorkommen, dass das auslaufende Band (aufgrund des reversierenden Prozesses befindet sich der Staucher in geraden Stichen im Auslauf) in Kontakt mit einer der Stauchwalzen tritt und dadurch ähnlich wie durch die Seitenführung die weitere Drehung des Bandes verhindert wird (siehe **Bild 20** und **Bild 22**). Zusätzlich kann eine Kraft an der Stauchwalze gemessen werden, welche ein Indiz für das Bestreben der Bramme zu drehen oder zu verlaufen und damit auch den Bandsäbel sein kann (**Bild 55**). Werden die Stauchwalzen bei den geraden Stichen auf Kontakt mit dem Band gefahren, so kann zum einen die Drehung des Bandes (und damit die Bandsäbelentstehung) reduziert und zum anderen die Kraft an der Stauchwalze gemessen werden. Diese Kraft kann als Maß für den auf diese Weise zusätzlich erreichten positiven Einfluss des Stauchers, in diesem Fall als Seitenführung arbeitend, gelten. Das Kraftsignal kann für die Modellierung benutzt werden. Damit würde eins der oben genannten wichtigen, bisher nicht messbaren Parameter zumindest teilweise erfasst werden können.

In den oben beschriebenen Analysen und der Modellierung wurde die Bandkrümmung nach dem letzten Stich als Ausgangsgröße verwendet. Analog zu diesem Vorgehen können die jeweiligen Krümmungswerte nach jedem der gefahrenen Stiche als Ausgangsgröße der datenbasierten Modellierung benutzt werden. Die Ofen- und Prozessdaten der zuvor gefahrenen Stiche würden in dem jeweiligen Fall als Eingangsgrößen dienen. Damit kann für jeden Stich die Krümmung vorausberechnet und damit für eine Steuerung genutzt werden.

9.5 Installation und Verwendung des datenbasierten Modells zur Vorsteuerung des Horizontalgerüsts

Für die Vorausberechnung der Bandkrümmung und der erforderlichen Stellmaßnahmen zur Minimierung des Bandsäbels benötigt das datenbasierte Modell Informationen aus dem laufenden Prozess. Es wurde daher ein Programm erstellt, das on-line die benötigten Prozessdaten erfasst, analysiert und für die Übergabe an das datenbasierte Berechnungsmodell vorverarbeitet. Die für 10 Bandsegmente aufbereiteten Daten werden dem datenbasierten Modell als Eingangsgrößen übergeben. Daraufhin startet das Modell die Vorausberechnung der Bandkrümmung für den 7. Stich. Ausgehend von der berechneten Bandkrümmung wird daraufhin der erforderliche Schwenkbetrag des Walzensatzes im Horizontalgerüst errechnet, der zur Kompensation der erwarteten Bandkrümmung einzustellen ist. Der Schwenkbetrag wird dann in Abhängigkeit von dem aktuellen Bandsegment als Schwenkwert ausgegeben.

Im Rahmen einer Erprobungsphase wurden nach der betrieblichen Modellinstallation die errechneten Werte für die Bandkrümmung sowie die vorausberechneten Schwenkwerte zunächst in der mitlaufenden Datenerfassung aufgezeichnet ohne die Steuerung zu aktivieren. Diese Betriebsphase diente dazu, gemeinsam mit den Prozessverantwortlichen eine Analyse hinsichtlich Güte und Zuverlässigkeit der Vorausberechnung vorzunehmen, um Störungen an der Anlage zu vermeiden.

Nach einigen Anpassungen des Programms wurden für eine Testserie die berechneten Schwenkwerte an der Anlage umgesetzt. Im nachfolgenden **Bild 63** sind exemplarisch die vorausberechnete

Bandform und der sich daraus ergebende Schwenkbetrag für das Horizontalgerüst über der Bandlänge dargestellt.

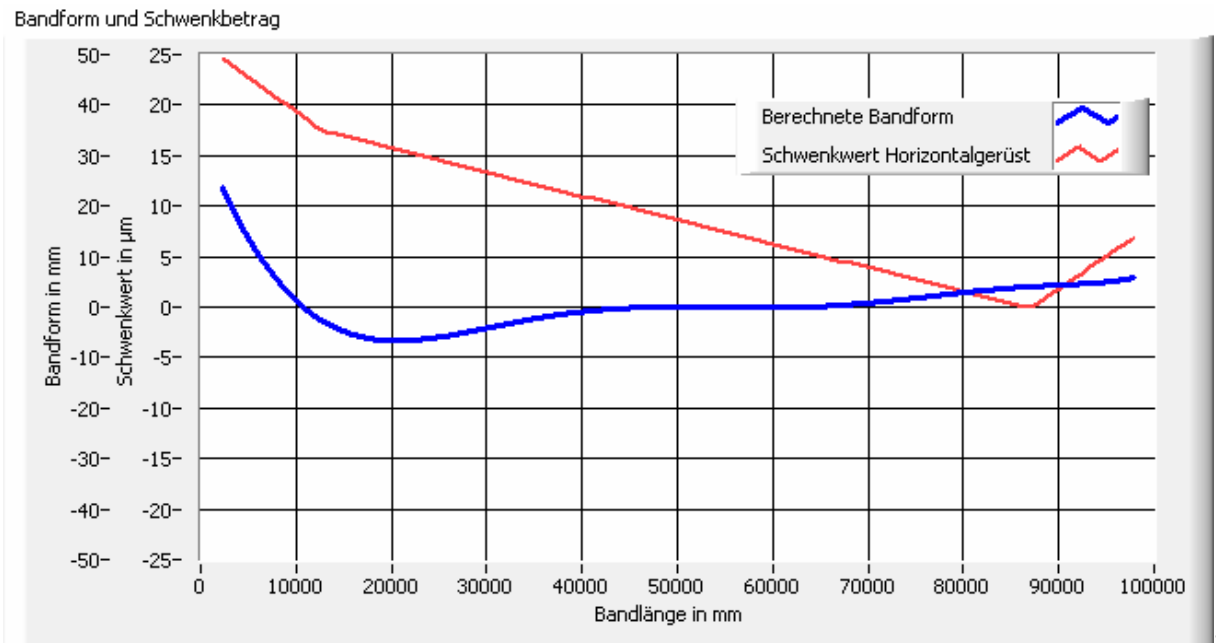


Bild 63: Vorausberechnete Bandform und Walzen-Schwenkbetrag für das Horizontalgerüst

Eine statistische Auswertung der Versuchsreihe ergab folgendes Ergebnis (**Bild 64**):

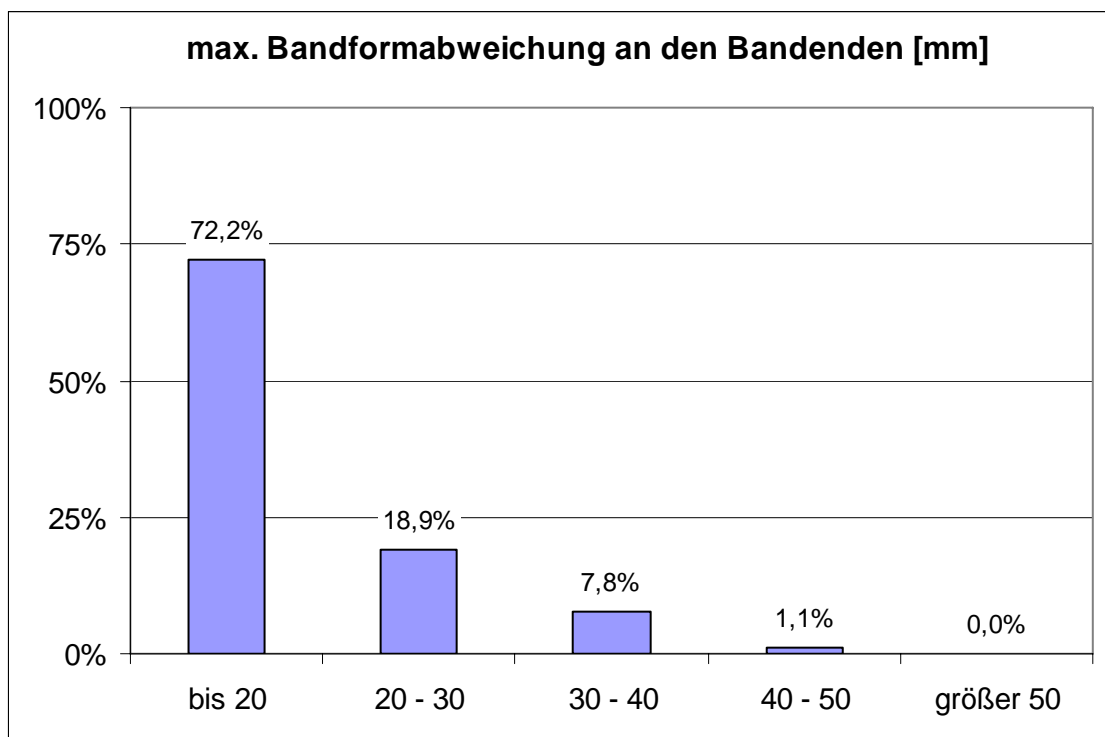


Bild 64: Maximale Bandformabweichung an den Bandenden für 90 Bänder

Die Grafik zeigt die maximale Bandformabweichung an den Bandenden von Bändern, die mit Steuerung des Horizontalgerüsts gewalzt worden sind. Gegenüber den Ergebnissen aus den anderen Zeiträumen (siehe **Bilder 65 bis 67**) ergab sich keine signifikante Änderung. Ursache hierfür ist eine zu geringe Vorhersagegenauigkeit insbesondere bei relativ kleinen (vorausgerechneten) Bandformabweichungen. Als hervorzuhebendes Ergebnis kann jedoch gewertet werden, dass sich die relative Zahl der großen Formabweichungen verringert hat.

10 Weitere Maßnahmen zur Vermeidung des Bandsäbels

Neben der Vorsteuerung des Horizontalgerüsts mit Hilfe des datenbasierten Modells wurden schon sehr frühzeitig Ergebnisse aus den Laborversuchen in Form einer geänderten Vorgehensweise beim Walzen umgesetzt. Dies betraf eine engere seitliche Führung des Bandes beim Walzen mit Hilfe der installierten Seitenführungen bzw. den Stauchwalzen. Die Laborversuche hatten gezeigt, dass das seitliche Führen des Bandes die Bandsäbelentstehung deutlich verringert. Als Maßnahmen an der Anlage wurde daher versucht, die Seitenführungen während des Walzens so eng wie möglich an der Bramme zu belassen. Ein vollständiges Zufahren der Seitenführungen ist prozessbedingt nicht zulässig, da im Falle von Breitenschwankungen am Walzgut diese Betriebsweise erhebliche Anlagenstörungen durch ein Einklemmen der Bramme hervorrufen würde.

Im Hinblick auf die Bandformausbildung war laut Aussage des Betreibers diese Maßnahme sehr wirkungsvoll, hatte allerdings einen hohen Verschleißrate bis hin zu Beschädigungen der Seitenführungen zur Folge. Daher wurde nach relativ kurzer Zeit wieder zur alten Verfahrensweise übergegangen.

	Tag der Änderung	Offset [mm]	Bemerkung
--	---	+ 180	Ehemals betriebsüblicher Zustand
1.	11.04.03	+ 120	
2.	07.05.03	+ 100	
3.	12.06.03	+ 80	
4.	24.07.03	+ 70	
5.	29.09.03	+ 50	
6.	11.03.04	+ 40	
7.	07.05.04	+ 30	
8.	02.08.04	+ 24	
9.	10.08.04	+ 16	

Tabelle 22: Zeitliche Entwicklung der Positionierung der Stauchwalzen

Beim Walzen im Vorgerüst werden die Stauchwalzen in den Reversierstichen, dies sind in der Regel alle Stiche mit gerader Stichzahl, aufgefahren, so dass nur die Horizontalwalzen im Eingriff sind. Als alternative Maßnahme zum Einsatz der Seitenführungen wurden in diesen Stichen die zwei Stauchwalzen wie zwei Führungsrollen im Auslauf genutzt.

Hierzu wurde der Offsetwert für alle Stiche einheitlich verkleinert. (Der Offsetwert gibt den Abstand zwischen Ballenoberfläche der aufgefahrenen Stauchwalzen und den Brammenkanten an.) Der genaue Verlauf der Veränderungen der Positionierung der Stauchwalzen in der Walzpraxis bezüglich des eingestellten Offset ist der Tabelle 22 zu entnehmen:

Anfang 2005 wurde die Ansteuerung so geändert, dass der Offset-Wert stichweise vorgegeben wird.

	Tag der Änderung	Offset 2. Stich	Offset 4. Stich	Offset 6. Stich
10.	14.01.05	+ 20	+ 6	+ 20
11.	27.05.05	+ 180	+ 20	+ 60

Tabelle 23: Stichweise Vorgabe des Offsetbetrags für die Stauchwalzen

In der industriellen Walzpraxis führten die verringerten Offsetbeträge der Vertikalwalzen bei den Reversierstichen zu häufigem Kontakt zwischen Bandkante und unterem Stauchwalzenkragen. In einzelnen Fällen wurden im 2. Stich die Führungskappen an den Stauchwalzen durch die Brammen abgeschert. Mit Blick auf den Anlagenschutz waren diese Havarien letztlich die Ursache für eine Rückführung der Stauchwalzenposition zu wiederum größeren Offsetbeträgen.

Die teilweise Rücknahme der Maßnahme ergab jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die sich ergebenden Bandformen, da die Änderung in erster Linie den Stich 2 betraf. Die folgenden **Bild 65 - Bild 67** zeigen die maximale Bandformabweichung des fertigen Bandes an den Bandenden für verschiedene Zeiträume. Insgesamt wird der momentane Zustand in Hinblick auf die sich ergebenden Bandsäbel vom Anlagenbetreiber als zufriedenstellend betrachtet.

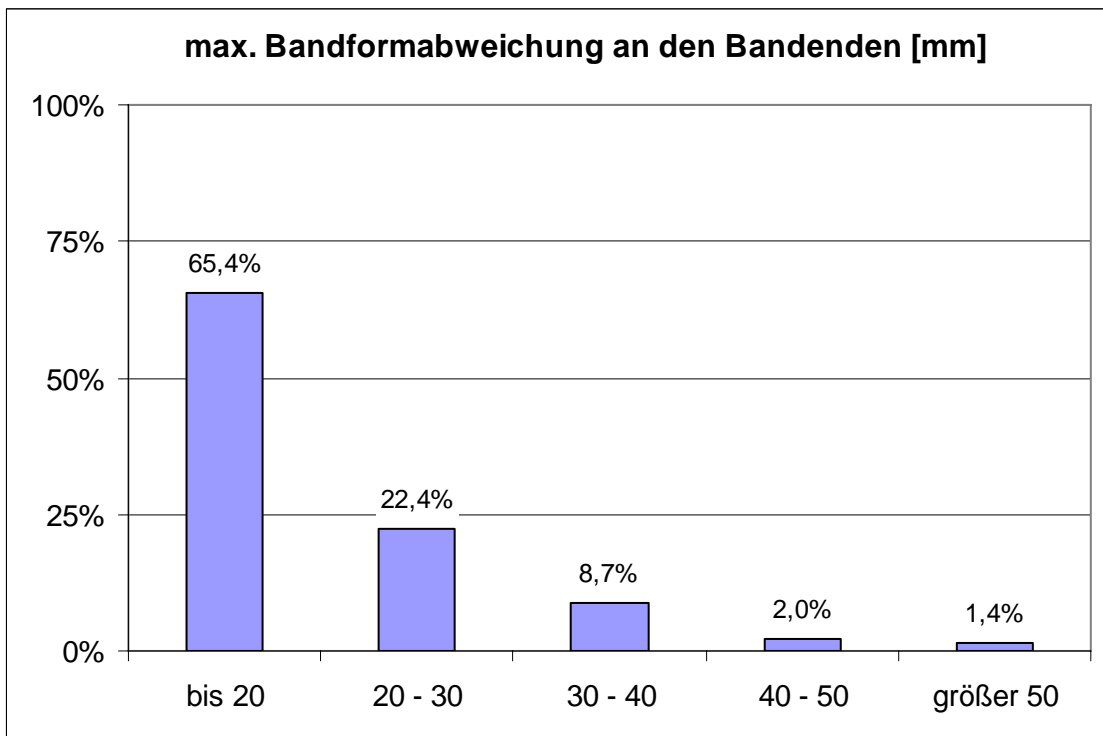


Bild 65: Maximale Bandformabweichung an den Bandenden für 90 Bänder (Juni 2004; 1064 Bänder)

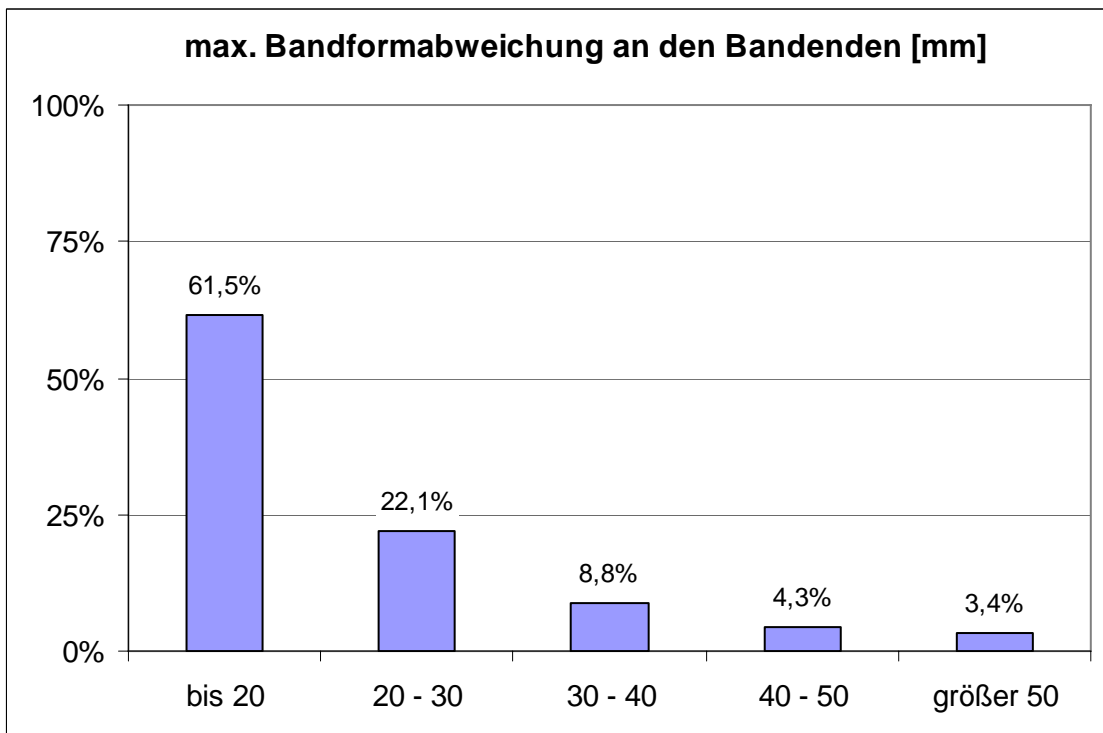


Bild 66: Maximale Bandformabweichung an den Bandenden (Januar 2005; 467 Bänder)

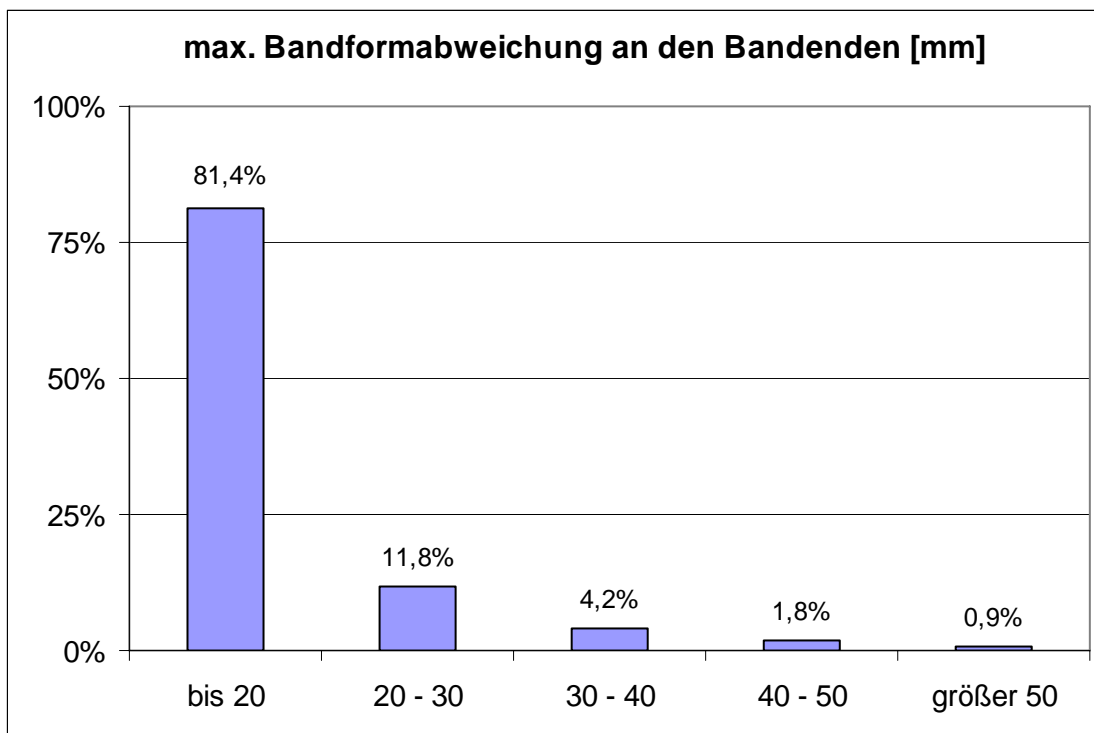


Bild 67: Maximale Bandformabweichung an den Bandenden (Juni 2006; 789 Bänder)

10.1 Vermeidung von Bandsäbeln durch verbesserte Seitenführungen

Die industriellen Walzversuche mit konventionellen, zwar in ihrer Position verstellbaren jedoch während des Walzens starr eingestellten Seitenführungen haben gezeigt, dass deren Einsatz unter Produktionsbedingungen wegen der Gefahr von Anlagenbeschädigungen nur eingeschränkt möglich ist. Andererseits konnte in den Laborversuchen nachgewiesen werden, dass das seitliche Führen des Bandes zu einer deutlichen Minimierung der Säbelausbildung führt. Es wird daher ein Führungssystem vorgeschlagen, dessen prinzipieller Aufbau in **Bild 68** dargestellt ist. Das wesentliche konstruktive Merkmal dieser Anordnung besteht darin, dass im Gegensatz zu den konventionellen starren Führungsleisten ein in Bandbreitenrichtung flexibel positionierbares System bestehend aus Führungsrollen eingesetzt wird. Die Ansteuerung bzw. Positionierung der Führungsrollen erfolgt einzeln über Hydraulikzylinder. Während z.B. die Rollen auf der Bedienseite positionsgeregelt betrieben werden, unterliegen die antriebseitigen Führungsrollen einer Kraftregelung, bzw. einer Regelung des Druckes der hydraulischen Anstellzylinder, der definiert auf die aktuellen Walzbedingungen eingestellt werden kann. Überschreitet die von der Bramme auf die Führungsrolle ausgeübte Kraft einen voreingestellten Kraftgrenzwert des Hydraulikzylinders, so führt dies zu einer Positionsänderung der Führungsrolle, die ihrerseits eine Verminderung des Anpressdrucks zwischen Rolle und Bramme zur Folge hat. Auf diese Weise würden sich die jeweiligen Rollenpaare an Breiten-schwankungen bzw. Formabweichungen automatisch anpassen.

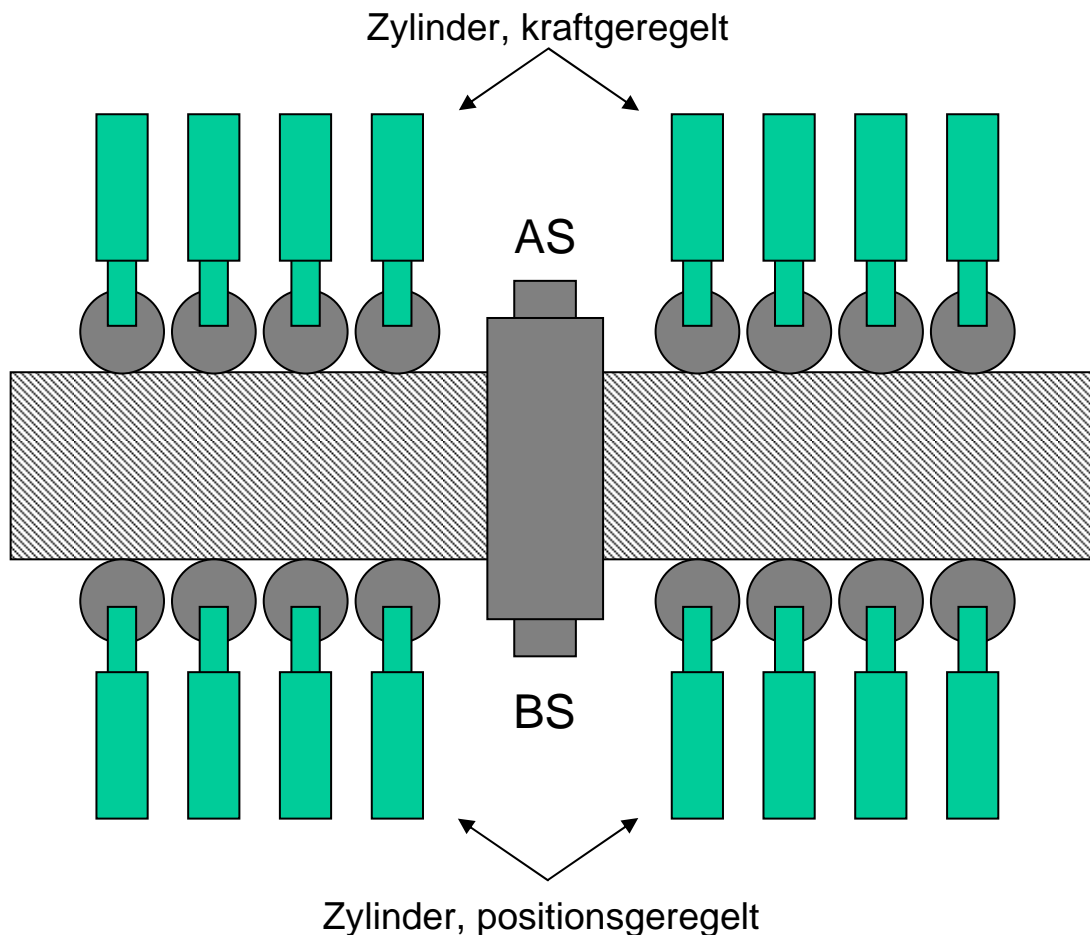


Bild 68: Prinzipskizze eines neuen Systems von Seitenführungen für Vorbänder

11 Voraussichtlicher Nutzen und Ergebnisauswertung

11.1 Wirtschaftlichkeit und umweltentlastende Effekte am Beispiel der EKO-Stahl

Die Generierung des Bandsäbels führt zu Schrott und damit zum ungenutzt entstandenen Material, das ohne jegliche Funktion zu erfüllen, wieder eingeschmolzen wird. Bis zu diesem Stadium sind bereits erhebliche Mengen an Energie verbraucht worden, welche bei Reduzierung der Bandsäbelentstehung und damit der Abfallmenge, ebenfalls reduziert werden können.

Nach Auswertung des Ausschusses „Energiewirtschaft europäischer Hüttenwerke“ des Stahlinstitutes VDEh beträgt der Energieverbrauch zur Herstellung einer Tonne Warmbreitband im EKO-Stahlwerk in Eisenhüttenstadt ca. 18 GJ. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die EKO-Werke keine eigene Kokerei besitzen, sondern fertigen Koks von auswärtigen Kokereien einkaufen. Ein durchschnittlicher Wert für den Energieverbrauch einer Kokerei wurde addiert. Der Kokstransport, welcher im Falle der EKO-Werke ebenfalls benötigt wird, wurde nicht berücksichtigt.

- **Energie- und Ressourceneinsparung**

Die Ausbringung der Warmwalzanlage beträgt zur Zeit 98,3 %. Bei einer Reduzierung der Bandsäbelfehler um 50 % sowie einer Verminderung der Breitenzuschläge um 1 mm ergibt sich eine Erhö-

hung der Ausbringung von ca. 0,1% bis 0,2%. Die jährliche Warmbandproduktion der EKO-Stahl beträgt 1,8 - 2 Mio. t. Am Beispiel der EKO-Werke werden bei einer Ausbringungsverbesserung von 0,1% 1800-2000 t Warmband pro Jahr eingespart. Daraus ergibt sich eine jährliche Energieeinsparung von 32 400-36 000 GJ.

Addiert werden kann der zusätzliche Energieverbrauch für das Aufheizen der sogenannten „Rückläufe“. Dies sind Brammen, welche aufgrund von Bandlaufproblemen in der Fertigstrasse nicht zeitplanmäßig verarbeitet werden können und erneut erhitzt werden. Eine Reduzierung der Rücklaufbrammen um die Hälfte führt bei EKO-Stahl zu einer Einsparung von 38 000 m³ Erdgas. Hierbei ist zu beachten, dass das EKO-Warmwalzwerk über einen modernen Ofen verfügt, welcher vergleichsweise sehr wenig Gas verbraucht.

- **Reduzierung der CO₂-Emission**

Nach Auswertung des Ausschusses „Energiewirtschaft europäischer Hüttenwerke“ des VDEh beträgt die CO₂-Emission bei Herstellung einer Tonne Warmbreitband im EKO-Stahlwerk in Eisenhüttenstadt 1,8 t. Mit Zugrundelegung dieser Daten ergibt sich durch die Vermeidung von 50 % der Bandsäbelfehler eine jährliche Vermeidung der CO₂-Emission um 3200-3600 t.

12 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Die Verfolgung der einschlägigen Literatur und der Veröffentlichungen auf Konferenzen ließen auf keine Entwicklungen an anderen Stellen schließen, die mit der Zielsetzung dieses Vorhabens übereinstimmen.

13 Geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse sollen in den für die Stahlbranche relevanten Fachzeitschriften wie „Stahl und Eisen“ und „MPT“ veröffentlicht werden. Ebenso werden Präsentationen der Ergebnisse für die Fachkonferenzen der Stahlindustrie in Düsseldorf „Stahl“ und den in Paris stattfindenden „International Steelmaking Days“ vorbereitet.

14 Literaturverzeichnis

- [1] Bernsmann G.P.: „Lateral material flow during cold rolling of strip“, Bänder Bleche Rohre, Band 13, S. 67-71, 1972
- [2] Biggs D. L., Hardy S.J., Brown K.J.: „Influence of process variables on development of camber during hot rolling of strip steel“, Ironmaking and Steelmaking, Band 27, Heft 1, S. 55-62, 2000
- [3] Degner M., Neuschütz E.: „Walzen von gleichmäßigem (keilfreiem) Warmbanddickenprofil“, EUR 18400 DE, 1994
- [4] Degner M., Tappe W.: „Untersuchungen zur geometrischen Toleranzeinhaltung beim Warmwalzen von Flachprodukten“, Stahl und Eisen 116, Heft 8, S. 113-118, 1996
- [5] Doege E., Meyer-Nolkemper H., Saeed I.: „Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe“, Hanser Verlag, München, Wien, 1986
- [6] Döring K., Kahle K.-P., Hagmann R.: „Die neue Kompakt-Warmbreitbandstrasse der EKO-Stahl GmbH und ihre Automatisierungsphilosophie“, Stahl und Eisen 118, Seite 37 – 45, 1998
- [7] Dowdey B., Piot J.P., Tonnon E.: „Hot strip roughing mill: camber measurement“, ECSC Final report, EUR 20644 EN, 2003
- [8] EKO-Stahl GmbH: „Einblicke. 50 Jahre EKO-Stahl“, 1. Auflage, Eisenhüttenstadt, 2000
- [9] Fraga Bobis C., Cancelas Caso J.A., Corsino R., Diez González A., Rodríguez Loredó L.A.: „SABLE a new non contact camber measuring system based on matrix CCD cameras.“, 23rd Meeting of the European Plant Engineering Committee, Corus Ijmuiden, 2004
- [10] Harris Instrument Corporation: “Continuous on line camber measuring system”, <http://www.harris-instrument.com/camber.htm>
- [11] Hartley P., Sturgess C.E.N., Rowe G.W.: „Experimental and theoretical studies of work piece deformation, stress, and strain during flat rolling“, Internatioanl Material Reviews, Band 34, S. 19-34, 1989
- [12] Kocar S. L., Varsavskij E. A.: “Primenenie variacionnogo principa pri analize processa prokatki s gorizontalnoj asimmetriei”, Izvestija Vuz, Cernaja Metallurgija, Heft 9, S. 36-40, 1997
- [13] Lathe R., Neuschütz E.: “Optimisation of the use of the strip geometry control system”, BFI, ESCS-Final Report, Contract No: 7210-EA/149, 2000
- [14] Morel M., Bentayeb A., Steeper M.S., Clark M., Stanley N.N., Reed G.R.: “Improved

control of temperature, width and gauge in hot strip mills”, Metallurgical Plant and Technology-MPT, Heft 4, S. 126-128, 130, 132, 1997

- [15] Neuschütz E., Lathe R., Thies H.: „Beeinflussung des Dickenprofils beim Warmbandwalzen“, EGKS-Abschlußbericht, EUR 15517 DE, 1996
- [16] Okado M., Ariizumi T., Nakauchi I., Takei H.: “A new width enlargement concept of slabs in hot strip mills”, Proc. 1st ICTO, Tokyo 1984, S. 1242-1247, 1984
- [17] Mauk P. J., Kopp R.: „Breitung beim Warmwalzen“, Der Kalibreur, Heft 37, S.3-68, 1982
- [18] Pawelski O., Piber V.: “Möglichkeiten und Grenzen der Umformung in Breitenrichtung beim Warm-Flachwalzen”, Stahl und Eisen 100, Heft 17, S. 937-949, 1980
- [19] Tellmann J.G.M., Heesen G.J.: „Improving crown performance of a hot strip mill“, Iron and Steel Engineer, Band 72 Heft 12, S. 21-26, 1995
- [20] Unbehauen H.: „Regelungstechnik I“, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1994
- [21] W. Tappe, Ihlefeldt J., Degner M., Tamler H., Neuschütz E.: „Verbesserung der Maßhaltigkeit von Warmbandenden“, EGKS-Abschlußbericht, EUR 17804 DE, 1997
- [22] Wladika H., Neuschütz E., Thies H., Mücke G.: „Beeinflussung von Breite und Endenform beim Walzen von Vorbändern in Warmbandstraßen“, Stahl und Eisen 108, Heft 16, S. 31-38, 1988
- [23] Wladika H., Neuschütz E., Thies H.: „Untersuchung zur Verringerung von Breiten-schwankungen bei der Herstellung von Warmbreitband“, Stahl und Eisen 100, Heft 12, S. 631-640, 1980
- [24] Sugiyama M., Hamaguchi M.: „A Camber-Profile Gauge Using a Laser Scanning and Light-Guide Detection Edge Sensor“, Mitsubishi Electric Advance, S. 34-37, 2000