Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20444 BR

Thema

Qualifizierung eines vereinfachten Ersatzmodells zur Prozesssteuerung beim Walzrunden großer Blechdicken für hohe Umformgrade

Zeitraum

01.01.2019 bis 31.12.2021

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM)

Forschungseinrichtung

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FSM-Bericht 3/2022

Qualifizierung eines vereinfachten Ersatzmodells zur Prozesssteuerung beim Walzrunden großer Blechdicken für hohe Umformgrade (Umformoptimierung)

von

M.Sc. Lukas Kappis, M.Sc. Pascal Froitzheim, Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP, Rostock

Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM)
Steinhöft 11
20459 Hamburg
Deutschland

Tel.: +49 40 69 20 876-12
Fax.: +49 40 69 20 876-66
E-Mail: info@fsm-net.org
Internet: www.fsm-net.org

© 2022
Alle Inhalte dieses Berichtes,
wie Text, Abbildungen und Tabellen,
sind urheberrechtlich geschützt

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben Nr. 20444 BR der Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM), ehemals Center of Maritime Technologies e.V. (CMT), wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Danksagung

Dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) wird an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit und die konstruktive Diskussion während der gesamten Projektlaufzeit gedankt. Weiterhin gebührt den Firmen des projektbegleitenden Ausschusses Dank für die Bereitstellung von Geräten und Materialien.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ... 6
Abbildungsverzeichnis ... 8
Tabellenverzeichnis ... 10
Abkürzungsverzeichnis ... 11
1 Einleitung ... 12
1.1 Problemstellung ... 12
1.2 Ziel des Forschungsvorhabens ... 13
1.3 Lösungsansatz ... 13
2 Stand der Forschung ... 14
2.1 Mechanische Wirkvorgänge beim Walzrunden ... 14
2.1.1 Biegepunkt und elastische Rückfederung ... 14
2.1.2 Einfluss des Blechgewichts ... 14
2.1.3 Einfluss der Reibung ... 16
2.2 Entwicklung einer rechnergestützten Steuerung für das Walzrunden ... 16
2.2.1 Entwicklung einer Steuerungsschleife für das Walzrunden ... 16
2.2.2 Steuerung des Walzrunden im Multi-Pass-Verfahren: ... 18
2.3 Fazit ... 18
3 Untersuchungskonzept ... 20
4 Experimentelle Charakterisierung von praxisrelevanten Blechen für das Walzrunden ... 21
4.1 Untersuchte Bleche ... 21
4.2 Zugversuche ... 21
4.3 Eigenspannungsmessungen mit der Bohrlochmethode ... 22
4.3.1 Probenentnahme ... 22
4.3.2 Messaufbau ... 22
4.3.3 Durchführung ... 23
4.3.4 Ergebnisse und Diskussion ... 23
5 Finite-Elemente-Analyse des Walzrundens ... 24
5.1 Entwicklung eines FE-Modells für das Walzrunden ... 24
5.1.1 Modellierte Rundbiegemaschine ... 24
5.1.2 Modellierung des Verfahrens als Prozesskette ... 24
5.1.3 Modellierung der Walzen und des Kontakts ... 25
5.1.4 Modellierung des Blechs ... 25
5.1.5 Implementierung von Eigenspannungen in das Blech ... 26
5.2 Sensitivitätsanalyse des Umformergebnisses beim Walzrunden ... 27
5.2.1 Untersuchungsumfang ... 27
5.2.2 Quantifizierung des Umformergebnisses ... 27
5.2.3 Ergebnisse und Diskussion ... 28
5.3 Validierung des FE-Modells mit experimentellen Daten ... 29
6 Entwicklung eines KNN-basierten Prognosemodells für das Walzrunden ... 31
6.1 Verwendete Trainingsdaten ... 31
6.2 Modellparameter ... 33
6.3 Verifizierung der Prognosefähigkeit ... 33
6.4 Berechnungsroutine zur geometrischen Visualisierung der Umformprognosen ... 34
7 Entwicklung einer Prozessüberwachung für das Walzrunden ... 37

7.1 Anforderungen an die Prozessüberwachung ... 37
7.2 Arbeitshypothesen ... 37
7.3 Entwickeltes Messkonzept ... 37
7.4 Verwendete Messtechnik ... 39
7.5 Erprobung an FE-Simulationen ... 40
7.5.1 Untersuchungsumfang und Methodik ... 40
7.5.2 Ergebnisse und Diskussion ... 41
8 Experimentelle Erprobung der Prozessüberwachung an einer realen 4-Walzen-Rundbiegemaschine ... 43
8.1 Messaufbau ... 43
8.2 Untersuchungsumfang und Methodik ... 43
8.3 Ergebnisse des Biegens mit auslassseitiger Seitenwalze ... 44
8.4 Ergebnisse des Biegens mit einlassseitiger Seitenwalze ... 48
8.5 Fehleranalyse ... 49
8.6 Fazit zur entwickelten Prozessüberwachung ... 52
9 Experimentelle Erprobung des Prognosemodells ... 53
9.1 Untersuchungsumfang und Methodik ... 53
9.2 Ergebnisse ... 53
9.3 Fazit ... 54
9.4 Integration von Prognosemodell und Prozessüberwachung in den Umformprozess mit einer 4-Walzen-Rundbiegemaschine ... 55
10 Zusammenfassung und Ausblick ... 57
11 Literatur ... 58
12 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU ... 59
12.1 Verwendung der Zuwendung ... 59
12.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten ... 59
12.3 Plan zum Ergebnistransfer ... 59
12.4 Förderhinweis ... 60

Zusammenfassung

Mit dem Walzrunden werden Bleche über ihre Länge rundgeformt. Das Verfahren umfasst insbesondere im Grobblechbereich mit Blechdicken von 3 bis über 200 mm ein großes Anwendungsspektrum. Hier wird es beispielsweise für die Herstellung von Rohrtürmen für Windenergieanlagen, Druckbehältern und Elementen für die Bauindustrie eingesetzt.

Für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist von großer Bedeutung, dass es effizient gesteuert werden kann. Eine Übersteuerung der Maschine führt zu einem Überbiegen des Blechs und damit häufig zu Materialausschuss, wohingegen zu geringes Biegen zusätzliche Walzdurchläufe erforderlich macht und mit einer Erhöhung der Produktionszeit einhergeht. Trotz der großen Bedeutung einer effizienten Prozesssteuerung wird das Verfahren zum derzeitigen Stand der Technik bei KMU, welche Bauteile im Grobblechbereich herstellen, überwiegend manuell gesteuert. Diese Methodik hat sich etabliert, da die von den KMU eingesetzten Rundbiegemaschinen über keine objektiven Prognose-Systeme verfügen, die den Anlagenbediener bei der Einstellung der Maschine unterstützen können. Sie führt jedoch dazu, dass die Wirtschaftlichkeit und Maßhaltigkeit des Verfahrens stark von der Erfahrung des Anlagenbedieners abhängen. Da insbesondere im Grobblechbereich materialaufwändige Bleche mit kleinen Losgrößen verarbeitet werden, hat ein Ausschuss durch Überbiegen hohe Kosten zur Folge. Aus diesem Grund wird die Rundbiegemaschine sehr konservativ gesteuert, was hohe Produktionszeiten und einen hohen psychischen Stress für den Anlagenbediener mit sich bringt. Aus diesen Gründen besteht die Forderung nach technischen Lösungen zur Objektivierung des Walzrundens durch eine rechnergestützte Prozessführung. Dabei sollen diese Lösungen kostengünstig und mit geringem Aufwand bei bestehenden Rundbiegemaschinen nachgerüstet werden können.

Hier setzt die vorliegende Forschungsarbeit an. Das Ziel der Arbeit war die Entwicklung und Qualifizierung eines Prognosemodells, mit dem ein Anlagenbediener bei der Steuerung des Umformprozesses unterstützt werden kann. Hierzu soll das Modell prognostizieren können, welches Umformergebnis aus einer gewählten Maschineneinstellung resultiert. Als Lösungsansatz wurde dafür ein empirisches Modell gewählt, das auf einem künstlichen neuronalen Netz (KNN) basiert. Dabei wird das KNN auf Prozessdaten trainiert, die mithilfe einer Prozessüberwachung aufgezeichnet werden. Somit kann die Umformprognose durch maschinelles Lernen stetig verbessert werden.

Im Rahmen der Entwicklungsarbeit wurde der Umformprozess zunächst eingehend analysiert. Hierzu wurden die mechanischen Eigenschaften von praxisrelevanten Blechen charakterisiert und darauf aufbauend ein detailliertes FE-Modell zum Walzrunden aufgebaut. Das FE-Modell wurde verwendet, um eine Sensitivitätsanalyse zum Umformergebnis beim Walzrunden durchzuführen und bedeutende und vernachlässigbaren Einflussgrößen zu identifizieren. Basierend auf den ermittelten Erkenntnissen wurden Konzepte für das Prognosemodell und die Prozessüberwachung entwickelt und umgesetzt. Deren Funktionstauglichkeit wurde zunächst theoretisch anhand von Simulationsdaten nachgewiesen und im Anschluss daran auch experimentell anhand von Praxisversuchen an einer realen 4-Walzen-Rundbiegemaschine erprobt. Es konnte gezeigt werden, dass die entwickelten Ansätze eine vielversprechende Lösung zur Nachrüstung von Rundbiegemaschinen im Sinne einer Objektivierung des Umformprozesses darstellen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Summary

With roll bending, plates are formed round over their length. The process has a wide range of applications, particularly in the heavy plate sector with plate thicknesses from 3 to over 200 mm. Here it is used, for example, for the production of tubular towers for wind turbines, pressure vessels and elements for the construction industry.

For the economic efficiency of the process, it is of great importance that it can be controlled efficiently. Overcontrol of the machine leads to overbending of the plate and thus often to material scrap, whereas underbending necessitates additional rolling passes and is associated with an increase in production time. Despite the great importance of efficient process control, SMEs producing components in the heavy plate range mainly control the process manually at the current state of the art. This methodology has established because the used roll bending machines do not have objective forecasting systems that can assist the machine operator in setting the machine. As a result, the economic efficiency and accuracy of the process are heavily dependent on the experience of the machine operator. Since, especially in the heavy plate sector, material-intensive plates with small batch sizes are processed, scrap caused by overbending results in high costs. For this reason, the roll bending machine is controlled very conservatively, which results in long production times and high psychological stress for the machine operator. For these reasons, there is a demand for technical solutions to objectify roll bending by means of computer-aided process control. These solutions are intended to be upgradeable to existing roll bending machines at low cost and with little effort.

This is where the present research work comes in. The aim of the work was the development and qualification of a prognosis model, with which a machine operator can be supported in the control of the forming process. For this purpose, the model should be able to predict which forming result will result from a selected machine setting. An empirical model based on an artificial neural network (ANN) was selected as the solution approach. The KNN is trained on process data that is recorded with the help of a process monitoring system. Thus, the forming prediction can be continuously improved by machine learning.

As a first step in the development work, the forming process was analyzed in detail. For this purpose, the mechanical properties of practically relevant plates were characterized and, based on this, a detailed FE model for roll bending was developed. The FE model was used to perform a sensitivity analysis on the forming result of roll bending and to identify significant and negligible influencing variables. Based on the findings, concepts for the prediction model and process monitoring system were developed and implemented. Their functional suitability was first demonstrated theoretically on the basis of simulation data and then also tested experimentally on the basis of practical trials on a real 4-roller plate bending machine. It was shown that the developed approaches represent a promising solution for upgrading roll bending machines in the sense of objectifying the forming process.

The aim of this research project was achieved.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typische Bauformen von Walzen-Rundbiegemaschinen. 12
Abbildung 2: Lichtspaltprüfung beim Walzrunden. 12
Abbildung 3: Ausbildung der Umformzone beim Walzrunden. 14
Abbildung 4: Einfluss des Blechgewichts auf das resultierende Biegemoment beim Walzrunden. 15
Abbildung 5: Effekt des Biegemoments aus dem Blechgewicht auf die Spannungsverteilung im Blechquerschnitt in der Umformzone. 15
Abbildung 6: Prinzip einer geschlossenen Steuerungsschleife für das Walzrunden. 16
Abbildung 7: Links: Messeinrichtung für das symmetrische 3-Walzen-Rundbiegen 17
Abbildung 8: Vermessung der Blechgeometrie mittels DMS-Stützrollen-System und CCD-Kamera 17
Abbildung 9: Multi-Pass-Verfahren nach Wang et al. 18
Abbildung 10: Exemplarischer Probenstreifen eines Blechs aus S690 mit einer Dicke von 10 mm. 21
Abbildung 11: Ermittelte Spannungs-Dehnungs-Kurven für S355 und S690 21
Abbildung 12: Exemplarischer Probenstreifen eines Blechs aus S690 mit einer Dicke von 10 mm. 22
Abbildung 13: Messaufbau zur Ermittlung der Eigenspannungen mit dem Messgerät PRISM. 22
Abbildung 14: Gemessene Eigenspannungen über dem Oberflächenabstand für S355 und S690 23
Abbildung 15: Modellierte 4-Walzen-Rundbiegemaschine mit Darstellung der Antriebsrichtungen. 24
Abbildung 16: Modellierung der Walzen mit starren Schalenelementen im Anbiege-Schritt und Kontaktentitäten im Walzen-Schritt 25
Abbildung 17: Fließkurven der untersuchten Werkstoffe. 26
Abbildung 18: Links: Adaptierte Eigenspannungskurve aus [18]. Rechts: Ausschnitt des FE-Modells eines Blechs mit implementierten X-Eigenspannungen 26
Abbildung 19: Beispiel einer simulierten Umformbehandlung bestehend aus einem einseitigen Anbiegen und anschließendem Walzen. 27
Abbildung 20: Quantifizierung des Umformergebnisses nach der Umformsimulation. 28
Abbildung 21: Korrelation des Umformergebnisses mit den untersuchten Einflussgrößen. 29
Abbildung 22: Zusammenhang zwischen dem Zustellwinkel der Seitenwalze und dem resultierenden Krümmungsradius. 30
Abbildung 23: Methodik zur Ermittlung der lokalen Blechkrümmung über der Blechlänge. 32
Abbildung 24: Ermittelte lokale Krümmung und reziproke lokale Krümmung über der normierten Blechlänge. 32
Abbildung 25: Topologie des erstellten KNN. 33
Abbildung 26: Links: Untersuchung der Prognosefähigkeit des KNN bei Variation des Zustellwinkels der Seitenwalze. Rechts: Prognosefähigkeit bei Variation der Blechdicke 34
Abbildung 27: Links: Untersuchung der Prognosefähigkeit des KNN bei Variation der Blechlänge. Rechts: Prognosefähigkeit bei Variation des Werkstoffs 34
Abbildung 28: Diskretisierung einer Radius-Blechlänge-Kurve zur Visualisierung der Blechkontur. 35
Abbildung 29: Visualisierung der Blechkontur aus einer diskretisierten Radius-Blechlänge-Kurve. 35
Abbildung 30: Links: 3D-Darstellung einer konstruierten Blechkontur. Rechts: Verifizierung der Genauigkeit des Visualisierungs-Algorithmus. 36
Abbildung 31: Vereinfachte Annahme zum Kontakt des Blechs mit den zentrischen Walzen. 37
Abbildung 32: Orientierung des initialen Taubin-Fits mithilfe eines provisorischen zusätzlichen Punktes. 38
Abbildung 33: Grafische Darstellung eines zu kleinen, zu großen und hinreichend genauen Kreisfits. 39
Abbildung 34: Verwendeter Laserdistanzsensor mit konstruierter Halte-Konstruktion. 40
Abbildung 35: Verwendeter Inkrementalgeber und zugehörige Halte-Konstruktion 40
Abbildung 36: Verwendete Messstellen zur theoretischen Erprobung der Berechnungsroutine 41
Abbildung 37: Ausprägung des Biegepunktes beim Biegen mit der Einlass- und Auslassseite bei einem Zustellwinkel von 40°. 42
Abbildung 38: Messaufbau der experimentellen Versuche. 43
Abbildung 39: Schematische Ausbildung der Verformungszone in Abhängigkeit von der Biegeseite. 44
Abbildung 40: Links: Mit der PÜ für die Probe Nr. 1 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan. 45
Abbildung 41: Probe Nr. 1 nach den Walzdurchläufen mit 53,0° und 59,3° 46
Abbildung 42: Links: Mit der PÜ für die Probe Nr. 2 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan. 46
Abbildung 43: Links: Mit der PÜ für die Probe Nr. 3 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan. 47
Abbildung 44: Mit der PÜ für die Probe Nr. 4 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan. 48
Abbildung 45: Links: Mit der PÜ für die Probe Nr. 5 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan. 49
Abbildung 46: Probe Nr. 5 mit angelegter Schablone nach dem finalen Walzdurchlauf. 49
Abbildung 47: Einfluss der Position des LDS auf die mittlere Messungenauigkeit bei den Messungen zu Probe Nr. 5. 51
Abbildung 48: Für die Probe Nr. 5 durch die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven bei Verwendung der angepassten LDS-Position und der angepassten Zustellwinkel. 51
Abbildung 49: Vergleich der KNN-Prognose mit dem 3D-Scan (S355, 2660 x 1400 x 30 mm, ZW 32,9°). 53
Abbildung 50: Vergleich der KNN-Prognose mit dem 3D-Scan (S355, 2660 x 1400 x 30 mm, ZW 42,8°). 54

Abbildung 51: Vergleich der KNN-Prognose mit dem 3D-Scan (S355, 2660 x 1400 x 30 mm, ZW 63,4°). 54
Abbildung 52: Schematische Darstellung der Umformstrategie über die Länge eines Blechs. 55
Abbildung 53: Skizze der kleinsten durch die Prozessüberwachung vermessbaren Blechlänge. 55
Abbildung 54: Umformstrategie bei der Verwendung des Prognosemodells und der Prozessüberwachung. 56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Stähle. ... 21
Tabelle 2: Untersuchte Einflussgrößen und zugehöriger Parameterbereich. ... 27
Tabelle 3: Simulationen zur Validierung des FE-Modells. ... 29
Tabelle 4: Parameterbereich der FE-Simulationen zum Training des KNN. ... 31
Tabelle 5: Untersuchungsumfang der theoretischen Erprobung der Prozessüberwachung. ... 41
Tabelle 6: Ergebnisse der Erprobung der Berechnungsroutine an Simulationsdaten. ... 42
Tabelle 7: Untersuchungsumfang der experimentellen Versuche. ... 43
Tabelle 8: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 1. ... 45
Tabelle 9: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 2. ... 46
Tabelle 10: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 3 ... 47
Tabelle 11: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 4. ... 48
Tabelle 12: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 5. ... 49
Tabelle 13: Verwendung der Zuwendung ... 59
Tabelle 14: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit ... 59
Tabelle 15: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens ... 60

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
DIN	*Deutsches Institut für Normung*
ES	*Eigenspannungen*
ESPI	*Elektronische Specklemuster-Interferometrie*
FE	*Finite-Elemente*
FEM	*Finite-Elemente-Methode*
KI	*Künstliche Intelligenz*
KMU	*Kleines oder mittleres Unternehmen*
KNN	*Künstliches neuronales Netz*
LDS	*Laserdistanzsensor*
PÜ	*Prozessüberwachung*

1 Einleitung

Das Walzrunden ist ein Umformverfahren, das nach der DIN 8586 zu den Biegeumformverfahren mit drehender Werkzeugbewegung gezählt wird. Die Formgebung erfolgt beim Walzrunden mithilfe von Walzen, deren Achsen senkrecht zur Biegeebene ausgerichtet sind. Dabei ist die Anzahl und Anordnung der Walzen abhängig von der Art der Rundbiegemaschine. Typischerweise werden Rundbiegemaschinen verwendet, die wie in der Abbildung 1 dargestellt, über zwei, drei oder auch vier Walzen verfügen.

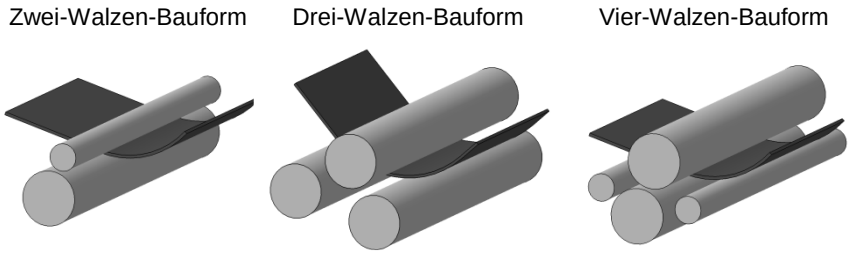

Abbildung 1: Typische Bauformen von Walzen-Rundbiegemaschinen.

Bei den Zwei-Walzen-Rundbiegemaschinen ist die untere Walze mit einem Elastomer beschichtet, dessen Verformung zur Einprägung eines Biegemoments ausgenutzt wird. Da das Biegemoment in der Höhe stark begrenzt ist, wird diese Bauform nur im Feinblechbereich eingesetzt [1]. Für den Grobblechbereich (Blechdicke > 3 mm) sind die Vier-Walzen-Rundbiegemaschinen am besten geeignet. Bei dieser Bauform wird das Blech durch die beiden zentrischen Walzen verspannt und durch die Zustellung der seitlichen Walzen gebogen. Durch einen rotatorischen Antrieb der zentrischen Walzen wird der Vorschub des Blechs erzeugt. Aufgrund des symmetrisches Aufbaus mit zwei möglichen Biegeseiten kann das Blech hiermit über die gesamte Länge umgeformt werden, ohne dass es umgespannt werden muss [1]. Angewendet wird das Walzrunden vor allem für die Fertigung von Rohren, Schalen und Druckbehältern. Im Grobblechbereich werden hiermit etwa die Rohrtürme von Windenergieanlagen und Schwerlastkranen, Pipelines, Druckbehälter und Elemente für die Bauindustrie hergestellt.

1.1 Problemstellung

Für die Wirtschaftlichkeit des Walzrundens ist von großer Bedeutung, dass das Verfahren präzise und effizient gesteuert werden kann. Eine Übersteuerung der Maschine führt zu einem Überbiegen des Blechs und damit häufig zu Materialausschuss, wohingegen zu geringes Biegen zusätzliche Walzdurchläufe erforderlich macht und mit einer Erhöhung der Produktionszeit einhergeht. Trotz der großen Bedeutung einer effizienten Prozesssteuerung wird das Verfahren zum derzeitigen Stand der Technik bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), welche Bauteile im Grobblechbereich herstellen, überwiegend manuell gesteuert.

Hierbei wird die Rundbiegemaschine nach der subjektiven Einschätzung des Anlagenbedieners eingestellt und das Blech iterativ in mehreren Durchläufen umgeformt. Zur Überprüfung des Ist-Zustands wird das Umformergebnis mit einer Schablone für den Soll-Krümmungsradius verglichen (vgl. Abbildung 2). Dieses Vorgehen hat sich etabliert, da die von den KMU eingesetzten Rundbiegemaschinen über keine objektiven Prognose-Systeme verfügen, die den Anlagenbediener bei der Einstellung der Maschine unterstützen können. Es führt jedoch dazu, dass die Wirtschaftlichkeit und Maßhaltigkeit des Verfahrens stark von der Erfahrung des Anlagenbedieners abhängen. Dies führt insbesondere im Grobblech zu hohen Produktionszeiten mit vielen Iterationen. Da hier oft materialaufwändige Bleche in kleinen Losgrößen verarbeitet werden, ist ein Ausschuss durch Überbiegen besonders kostspielig. Außerdem ergeben sich durch die Abhängigkeit vom Anlagenbediener erhebliche Risiken für die fertigenden Unternehmen. So kann der krankheitsbedingte Ausfall eines erfahrenen Mitarbeiters zu einem Produktionsausfall führen. Da das Anlernen neuer Mitarbeiter bis zur zuverlässigen Beherrschung des Verfahrens mehrere Jahre dauert, stellen auch der Aufbau und die Archivierung von Knowhow eine Herausforderung für die Unternehmen dar. Durch den zunehmenden Fachkräftemangel wird sich dieses Problem in der Zukunft noch weiter verstärken.

Abbildung 2: Lichtspaltprüfung beim Walzrunden.

Folglich kann die Wirtschaftlichkeit des Walzrundens durch eine Objektivierung des Umformprozesses erheblich verbessert werden. Aus wissenschaftlicher Sicht stellt dies aufgrund der Komplexität des Prozesses eine große Problemstellung dar. So gibt es mit der elastischen Rückfederung und dem Biegemoment, das aus dem Eigengewicht des Blechs resultiert, komplexe verfahrensseitige Mechanismen, die die eingeprägte Umformung überlagern und das Umformergebnis beeinträchtigen. Darüber hinaus wird das Umformergebnis signifikant durch die chargenspezifischen Schwankungen der Materialeigenschaften der Bleche beeinflusst. Da diese vor der Durchführung des Verfahrens nicht bekannt sind, können keine allgemeingültigen Maschineneinstellungen für ein gewünschtes Umformergebnis festgelegt werden. Bei der manuellen Steuerung des Prozesses wird der Einfluss dieser material- und verfahrensseitigen Größen durch den Anlagenbediener erkannt und durch eine adäquate Einstellung der Walzenpositionen kompensiert. Damit das Verfahren objektiviert und automatisiert werden kann, muss diese Aufgabe durch zu entwickelnde technische Systeme bewerkstelligt werden. Diese Systeme müssen für die Umsetzung bei KMU kostengünstig sein und einfach an bereits bestehenden Rundbiegemaschinen nachgerüstet werden können.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Qualifizierung eines Prognosemodells für das Walzrunden von Grobblechen. Das Modell soll das Umformergebnis für eine gegebene Umformaufgabe prognostizieren können und den Anlagenbediener somit bei der Steuerung des Umformprozesses unterstützen. Dazu wird das Prognosemodell so konzipiert, dass es flexibel an bereits bestehenden Rundbiegemaschinen nachgerüstet werden kann. Es soll damit insbesondere für KMU attraktiv sein, indem es eine kostengünstige Möglichkeit zur Optimierung des Walzrundprozesses bietet. Hohe Investitionskosten zur Anschaffung einer modernen Rundbiegemaschine sollen damit vermieden werden.

1.3 Lösungsansatz

Zur Erreichung dieses Ziels werden in diesem Forschungsprojekt im Wesentlichen zwei Aufgabenbereiche bearbeitet.

Zum einen wird ein Prognosemodell für das Walzrunden entwickelt, mit dem berechnet werden kann, welches Umformergebnis aus einer bestimmten Maschineneinstellung resultiert. Hierzu wird ein empirisches Prognosemodell entwickelt. Dieses basiert auf einem künstlichen neuronalen Netz (KNN), welches auf aufgezeichneten Prozessdaten trainiert wird. Aus den Prozessdaten kann das Modell Informationen zu dem werkstoff- und maschinenabhängigen Umformverhalten eines Blechs extrahieren und diese Einflüsse bei der Umformprognose berücksichtigen.

Für die Aufzeichnung von Prozessdaten wird eine Prozessüberwachung verwendet, mit der das Umformergebnis kontinuierlich im Laufe des Umformvorgangs vermessen werden kann. In der Literatur finden sich bereits einige Konzepte für die Vermessung der Umformung beim Walzrunden. Diese sind jedoch hauptsächlich auf die Maßstäbe bei der Umformung von Feinblechen ausgelegt bzw. sie erfordern einen hohen Umrüstungsaufwand an der Rundbiegemaschine. Aus diesem Grund ist der zweite wesentliche Aufgabenbereich dieses Projekts die Entwicklung einer Prozessüberwachung, welche einfach und kostengünstig installiert werden kann und zudem auf das Walzrunden von Grobblechen ausgelegt ist.

2 Stand der Forschung

2.1 Mechanische Wirkvorgänge beim Walzrunden

2.1.1 Biegepunkt und elastische Rückfederung

Beim Walzrunden wird typischerweise mithilfe von drei Walzen ein Biegemoment in ein Blech eingeprägt. In der Abbildung 3 sind die wirkenden Kräfte beim einseitigen Biegen mit einer 4-Walzen-Rundbiegemaschine dargestellt. Hierbei werden durch die Ober-, Unter- und die Seitenwalze Kräfte aufgebracht. Die Kraftangriffspunkte der Walzen definieren die unterschiedlichen Bereiche der Umformzone.

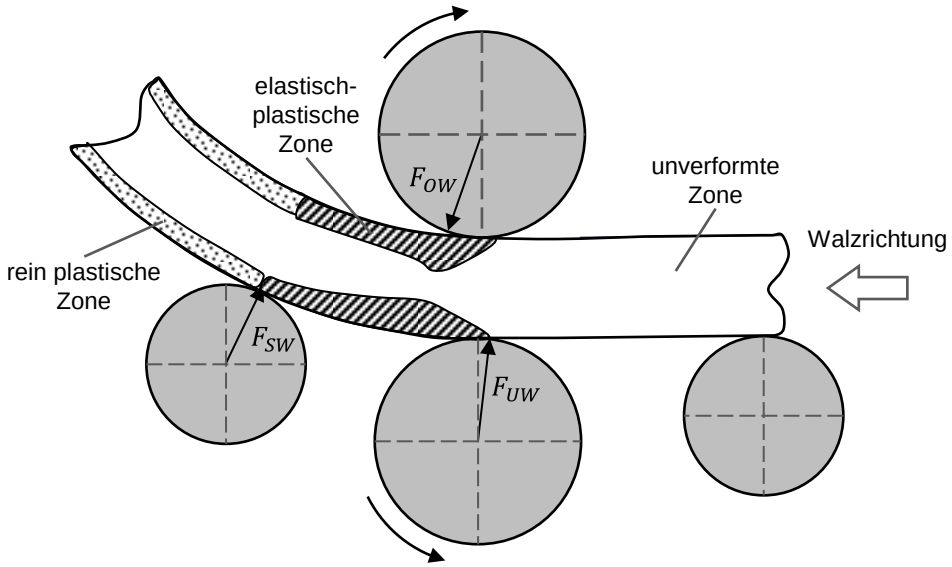

Abbildung 3: Ausbildung der Umformzone beim Walzrunden [nach 2].

Der Bereich elastisch-plastischer Dehnung beginnt beim Kontaktpunkt mit der Unterwalze. Hervorzuheben ist, dass dieser Punkt nicht exakt vertikal zum Walzenmittelpunkt liegt, sondern leicht seitlich verschoben ist. Dies ist auf die Nachgiebigkeit der Walzenlagerungen zurückzuführen, durch die das Blech nicht ideal steif im Walzspalt aus Ober- und Unterwalze eingespannt werden kann. Das Ausmaß der elastisch-plastischen Dehnung nimmt bis zum Kontaktpunkt mit der Oberwalze zu, bei welchem es seinen maximalen Wert erreicht. Dieser Punkt, bei dem das eingeprägte Biegemoment maximal groß ist, wird auch als Biegepunkt bezeichnet. In Richtung des Kontaktpunkts mit der Seitenwalze nimmt der Anteil elastischer Dehnung stetig ab, bis hinter der Seitenwalze nur noch plastische Dehnung vorliegt. [2]

Betrachtet man die Deformationshistorie eines Blechpunktes infolge des Walzrundens ist festzuhalten, dass die Umformung beim Einzug in den Walzspalt kontinuierlich zunimmt, bis sie beim Biegepunkt ihren maximalen Wert erreicht. Die elastische Rückfederung nimmt hinter dem Biegepunkt mit steigendem Vorschub zu und ist hinter dem Eingriffspunkt der Seitenwalze vollständig abgeschlossen.

2.1.2 Einfluss des Blechgewichts

Auch das Eigengewicht des Blechs hat einen großen Einfluss auf das Umformergebnis beim Walzrunden. In [2] sind hierzu vier Wechselwirkungen beschrieben:

1. Das Blechgewicht kann insbesondere bei langen Blechen ein Biegemoment hervorrufen, dass entgegengesetzt zur durch die Walzen eingeprägten Umformung wirkt. Der Verlauf dieses Moments und die Superposition mit dem maschinell eingeprägten Biegemoment ist in der Abbildung 4 für einen beispielhaften Blechzustand schematisch dargestellt.

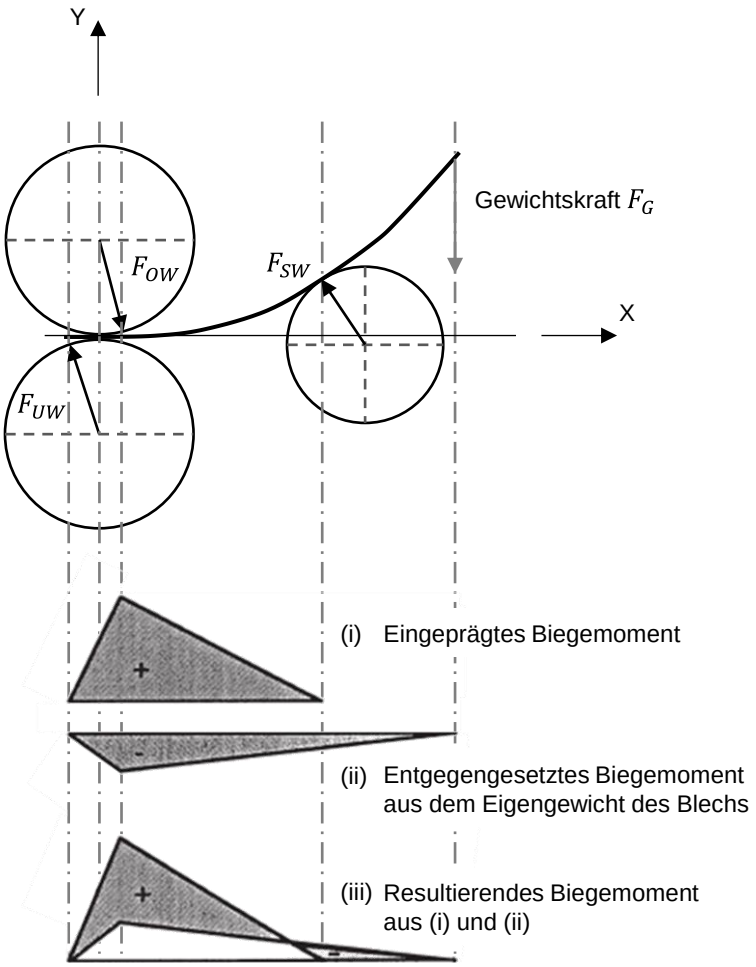

Abbildung 4: Einfluss des Blechgewichts auf das resultierende Biegemoment beim Walzrunden [nach 2].

2. Weiterhin kann das Eigengewicht die Ausbildung der Kontaktzone mit der Seitenwalze beeinflussen. Diese kann durch die zusätzliche Aufbiegung des Blechs vergrößert werden. Dadurch wird der Reibwiderstand gegen den Vorschub des Blechs erhöht, wodurch ein höheres Antriebsmoment durch die zentrischen Walzen aufgebracht werden muss.
3. Das entgegengesetzt gerichtete Biegemoment aus dem Blechgewicht führt zu einer Streckung des Blechs im Bereich der Umformzone. Wie in der Abbildung 5 dargestellt, führt dies zu einer Zugspannung (b), die den durch die maschinelle Biegung eingeprägten Spannungsverlauf (a) überlagert. An dem resultierenden Spannungs- und Dehnungsverlauf (c) wird deutlich, dass sich hierdurch die neutrale spannungsfreie Faser verschiebt und der unter Zug stehende Anteil überwiegt. Dies bewirkt tendenziell ein Ausdünnen des Blechs.

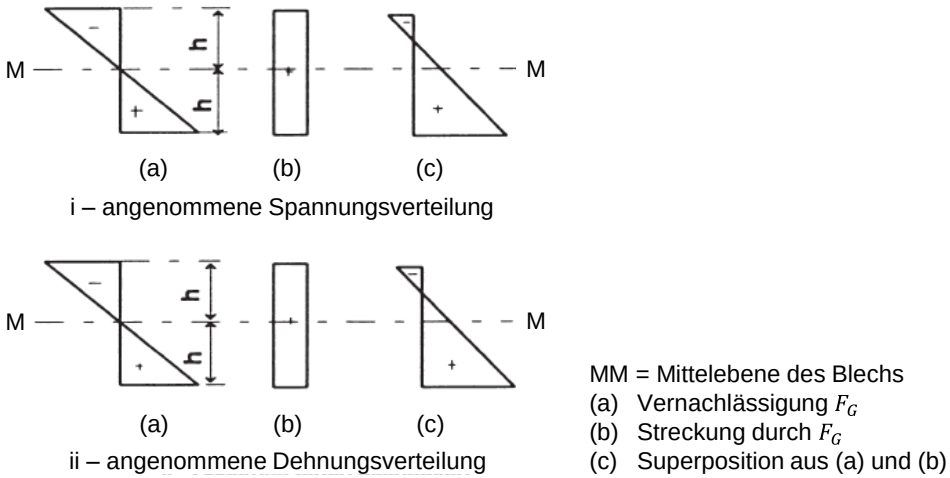

Abbildung 5: Effekt des Biegemoments aus dem Blechgewicht auf die Spannungsverteilung im Blechquerschnitt in der Umformzone [nach 2].

4. Zuletzt kann das Biegemoment aus dem Eigengewicht des Blechs erhöhte Einspannkräfte im Walzspalt hervorrufen.

Das Ausmaß des Einflusses des Blechgewichts auf den Umformvorgang hängt in erster Linie von den Abmessungen des Blechs und dessen Dichte ab. Zudem ist der Einfluss zeitabhängig und verändert sich im Zuge des Walzrundens durch die Verschiebung des Blechschwerpunkts.

2.1.3 Einfluss der Reibung

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Faktor ist die Reibung. Ihr Einfluss kommt insbesondere beim Walzrunden von Grobblechen zum Tragen und beeinträchtigt die fertigungstechnische Machbarkeit [3]. Hier kann bei hohen Umformgraden ein sehr hoher Reibwiderstand an der Seitenwalze gegen den Vorschub des Blechs entstehen. Wenn dieser so groß wird, dass er die Reibkraft zwischen den angetriebenen zentrischen Walzen und dem Blech übersteigt, kann das Blech nicht mehr ordnungsgemäß eingezogen werden. Aus diesem Grund können bestimmte Umformaufgaben nicht in einem Walzdurchlauf realisiert werden. Stattdessen werden diese mehrstufig durchgeführt, wobei der Umformgrad sukzessive erhöht wird.

2.2 Entwicklung einer rechnergestützten Steuerung für das Walzrunden

2.2.1 Entwicklung einer Steuerungsschleife für das Walzrunden

In der Vergangenheit wurde bereits viel Forschungsarbeit zur Objektivierung von Biegeprozessen geleistet. Bereits im Jahr 1983 wurden von Hardt [4] mögliche Steuerungsansätze diskutiert und kategorisiert. Dabei wurde die in der Abbildung 6 gezeigte Steuerungsschleife entwickelt. Grundsätzlich basiert dieser Ansatz auf einem Prognosemodell, mit dem berechnet werden kann, welche Maschineneinstellung für ein gewünschtes Umformergebnis gewählt werden muss. Problematisch ist hierbei jedoch, dass ein Modell den realen Umformprozess nicht exakt abbilden kann, sodass Unsicherheiten bei den Modellprognosen zu erwarten sind [5]. Insbesondere die unbekannten chargenspezifischen Schwankungen der Materialeigenschaften der Bleche und die Nachgiebigkeit der Biegemaschine beeinträchtigen die Prognosegenauigkeit signifikant. Aus diesem Grund wird das Prognosemodell mit einer Messeinrichtung gekoppelt, mit der das Umformergebnis bereits während des Umformprozesses gemessen werden kann. Anhand des Soll-Ist-Vergleichs kann das Prognosemodell in Echtzeit korrigiert werden. Auf diese Weise entsteht eine geschlossene Steuerungsschleife, mit der eine objektive Steuerung des Umformprozesses möglich ist. Dieser Ansatz hat den großen Vorteil, dass er einen hohen Automatisierungsgrad ermöglicht, da die Arbeitsschritte der Ist-Zustands-Ermittlung und Justierung automatisiert ablaufen können. Außerdem ist hervorzuheben, dass bei diesem Ansatz ein vergleichsweise einfaches Prognosemodell verwendet werden kann, da dieses mithilfe der Messeinrichtung unmittelbar korrigiert werden kann.

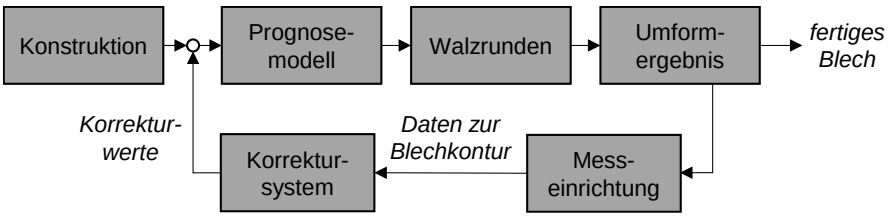

Abbildung 6: Prinzip einer geschlossenen Steuerungsschleife für das Walzrunden.

Der Ansatz einer Steuerungsschleife wurde in einigen Arbeiten für das Walzrunden umgesetzt, wobei sich diese Arbeiten jedoch ausschließlich mit der Umformung von Feinblechen beschäftigt haben [1, 6–8]. Als Prognosemodelle wurden dabei numerische Modelle verwendet. In [8] und [1] wurden beispielsweise Modelle entwickelt, mit denen die Biegelinie eines Blechs in Abhängigkeit von der Maschineneinstellung berechnet werden kann. Dazu wird das Blech über die Länge in ideal biegesteife Elemente diskretisiert, welche zueinander drehbar „gelagert“ sind. Der Drehwinkel zwischen den einzelnen Elementen wird aus einer Momenten-Winkel-Beziehung berechnet, die dem elastoplastischen Verhalten des Blechwerkstoffs nach der elementaren Biegetheorie nach Ludwik [9] entspricht. Nachteilig an diesen Modellen ist ihr relativ hoher Detailgrad, welcher experimentelle Untersuchungen zur Kalibrierung der Maschinen- und Werkstoffmodellierung erforderlich macht. Dabei ermöglicht die Kopplung des Modells mit einer Messeinrichtung, mit der eine Prognose unmittelbar korrigiert werden kann, nach [4] die Verwendung von einfacheren Modellierungsansätzen. In einigen Arbeiten wurden einfache analytische Modelle für das Walzrunden entwickelt. Beispielsweise stellen die Modelle aus [10] und [11] einen Zusammenhang zwischen der Zustellung der seitlichen Biegewalze und dem resultierenden Blechradius über algebraische Gleichungen her. Als Eingabegrößen werden dabei lediglich die geometrischen Abmessungen der Rundbiegemaschine, die Abmessungen des Blechs und Standard-Materialkennwerte für den Blechwerkstoff (E-Modul und Dehngrenze) benötigt.

Wie in [12, 13] am Beispiel des freien Biegens gezeigt wird, können Umformprozesse auch mithilfe von empirischen KI-basierten Modellen gesteuert werden. In dieser Arbeit wurde als Prognosemodell eine Kombination aus einem geometrischen Modell, mit dem das charakteristische Biegeverhalten eines Blechs abgebildet werden kann, und einem künstlichen neuronalen Netz (KNN) verwendet. Dabei erhält das KNN als Eingabegrößen die wesentlichen Umformparameter (Schlagtiefe, Standard-Fließkurve für den Werkstoff, Blechdicke etc.) und berechnet hieraus anhand von bestehenden Versuchsdaten eine Parametrierung für das geometrische Modell, wodurch das zu erwartende Umformergebnis modelliert werden kann. Nach dem Umformvorgang wird das tatsächlich erreichte Umformergebnis mit 3D-

Scannern vermessen und zur Korrektur des KNN an dieses zurückgeführt. Anhand von experimentellen Versuchen konnte gezeigt werden, dass das freie Biegen mit dieser Methodik sehr zuverlässig gesteuert werden kann.

Neben der Entwicklung eines Prognosemodells ist die Entwicklung einer echtzeitfähigen Messeinrichtung eine große Herausforderung bei der Umsetzung einer Steuerungsschleife für das Walzrunden. Hierbei stellt sich das Problem, dass das maximale Biegemoment beim Kontaktpunkt mit der Oberwalze eingeprägt wird (Biegepunkt), wohingegen sich das rückgefederte Umformergebnis erst hinter dem Kontakt mit der seitlichen Biegewalze einstellt [2]. Somit ergibt sich ein sogenannter Schleppabstand, um den das Blech vorgeschoben werden muss, bis das aus einer Maschineneinstellung resultierende Umformergebnis gemessen werden kann [1]. Für die echtzeitfähige Vermessung des Umformergebnisses beim Walzrunden wurden bisher unterschiedliche Konzepte verfolgt.

Hardt entwickelte [6] eine spezielle Messeinrichtung für das Walzrunden mit einer symmetrischen 3-Walzen-Rundbiegemaschine. Hierbei wird die Kontur des Blechs in der belasteten Umformzone gemessen. Dazu wird, wie in der Abbildung 7 dargestellt, eine Andruck-Rolle benötigt, die auf der Gegenseite der zentrischen Oberwalze mitläuft und mit der der Kontaktpunkt des Blechs mit dieser Walze bestimmt werden kann. Dieser Ansatz ist jedoch auf die spezielle Bauform einer symmetrischen 3-Walzen-Rundbiegemaschine beschränkt. Viele Bauformen, welche zudem insbesondere im Grobblechbereich eingesetzt werden, verwenden jedoch zur Erreichung hoher Einspannkräfte eine Unterwalze, mit der die Oberwalze gekontert wird. Bei diesen Bauformen ist die Implementierung einer solchen Andruckrolle entsprechend nicht möglich.

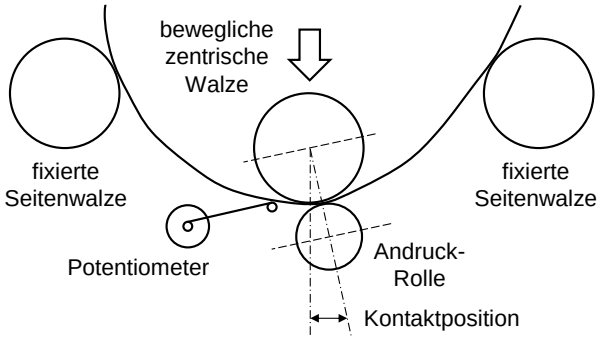

Abbildung 7: Links: Messeinrichtung für das symmetrische 3-Walzen-Rundbiegen nach [6].

Liewald [8] entwickelte eine Konstruktion aus DMS-Folien und Stützrollen, die zur Krümmungsmessung am Walzenaustritt auf dem Blech appliziert wird (vgl. Abbildung 8, links). Anhand der Längenänderung der DMS kann die Krümmung des Blechs berechnet werden. Hierbei handelte es sich jedoch um einen eher akademischen Aufbau, der bei großen Blechabmessungen nicht praktikabel ist.

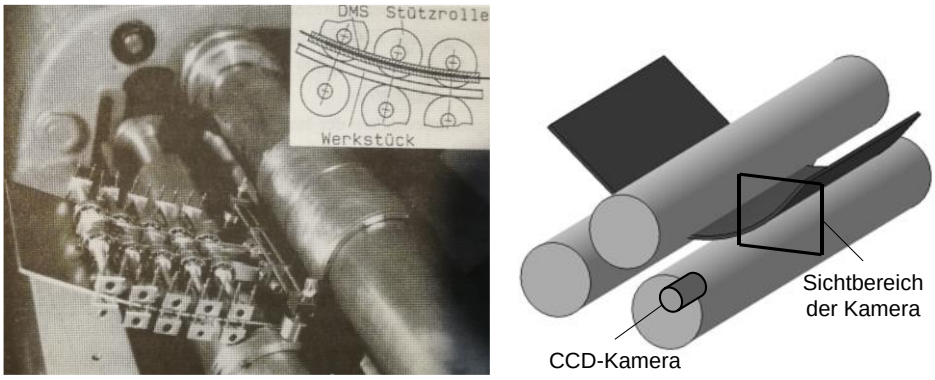

Abbildung 8: Vermessung der Blechgeometrie mittels DMS-Stützrollen-System (links) [8] und CCD-Kamera (rechts).

Egelkamp [7] wählte den Ansatz einer berührungslosen optischen Vermessung der Blechkontur. Dazu wurde eine CCD-Kamera vor dem Auslass einer Rundbiegemaschine positioniert, vgl. Abbildung 8 rechts. Aus den aufgenommenen Kamerabildern wird mithilfe eines Kantenfindungsalgorithmus die Blechkontur ermittelt. Mit dieser Messeinrichtung konnte eine gute Messgenauigkeit in einem großen Bereich des Krümmungsradius erzielt werden. Das Messsystem erfordert jedoch einen hohen Einrichtungsaufwand hinsichtlich einer geeigneten Ausleuchtung und der Referenzierung der Kamerabilder auf einen Referenzmaßstab.

Ein gänzlicher anderer Ansatz zur Ermittlung der Blechkontur wurde von Straßmann gewählt [1]. Hierbei wurde ausgenutzt, dass das Umformergebnis grundsätzlich mit der Einspannkraft des Blechs im Walzspalt und der Biegekraft durch die Seitenwalze korreliert. Um diese Kräfte messen zu können, wurden DMS und Kraftmessdosen in den Lagerungen der Unter- und Seitenwalze einer asymmetrischen 3-Walzen-Rundbiegemaschine verbaut. Um aus den Kraftwerten auf die Blechkrümmung schließen zu können, wurde ein Fuzzy-Modell anhand von Referenzdaten entwickelt.

Mit dieser Methodik konnte eine gute Messgenauigkeit für Erzeugnisse mit einem Radius von weniger als 1000 mm erzielt werden. Der große Nachteil bei dieser Methodik ist der hohe Aufwand, der für die technische Umrüstung der Rundbiegemaschinen und für die Kalibrierung des Fuzzy-Modells betrieben werden muss. Für die Nachrüstung der Rundbiegemaschinen von KMU erscheint er daher nicht praktikabel genug.

2.2.2 Steuerung des Walzrunden im Multi-Pass-Verfahren:

Alternativ zur Entwicklung eines Steuerungskreislaufs für das Walzrunden wurde auch an Steuerungsansätzen ohne integrierte Messeinrichtung geforscht. Bei diesen Ansätzen wird der Umformprozess in einem sogenannten Multi-Pass-Verfahren in mehreren Durchläufen durchgeführt, sodass der Einfluss von Störgrößen auf das Umformergebnis iterativ kompensiert werden kann. Damit die Anzahl der nötigen Durchläufe hierbei möglichst klein bleibt, wird ein Prognosemodell verwendet, um eine möglichst effiziente Sequenz von Maschineneinstellungen zu berechnen. Um das Prognosemodell kalibrieren zu können, wird das Umformergebnis nach jedem Walzdurchlauf manuell vermessen. Der Ansatz hat den Vorteil, dass er ohne die Integration einer Messeinrichtung auskommt. Im Vergleich zu einem Steuerungskreislauf mit integrierter Messeinrichtung ergeben sich jedoch die Nachteile, dass tendenziell mehr Walzdurchläufe zur Erreichung des Soll-Ergebnisses nötig sind. Zudem besteht aufgrund der nötigen manuellen Vermessung des Umformergebnisses nicht die Möglichkeit zur Automatisierung des Umformprozesses.

Ein Steuerungsverfahren nach diesem Prinzip, das auch für die Grobblechverarbeitung bei kleinen Losgrößen geeignet ist, wurde von der Firma HAEUSLER entwickelt und im Jahr 2018 patentiert [14, 15]. Hierbei wird mithilfe einer iterativen Finite-Elemente-Analyse ein Startwert für die Einstellung der Rundbiegemaschine im Multi-Pass-Verfahren berechnet. Nach dem Walzdurchlauf wird das tatsächlich erzielte Umformergebnis vom Anlagenbediener vermessen und in die Steuerungssoftware eingegeben. Die Software berechnet daraus einen Korrekturanteil für die Walzenzustellung, der Blech- und chargenspezifisch in einer Datenbank gespeichert und bei Prognosen zukünftiger Walzdurchläufe berücksichtigt wird. Somit kann die Genauigkeit der Prognosen mit steigender Anzahl von Walzdurchläufen verbessert werden, was eine zuverlässige iterative Umformung eines Blechs ermöglicht. Als Hersteller von Rundbiegemaschinen implementiert die Firma HAEUSLER diese Steuerungslösung in ihre neueren Produktserien. Für KMU hat die Neuanschaffung einer solchen Maschine den großen Nachteil von hohen Investitionskosten. Dabei wird die Amortisierung dadurch erschwert, dass die Unternehmen entsprechend ihrer Stellplatzkapazitäten bereits über funktionierende und sehr langlebige Rundbiegemaschinen verfügen, die hierfür entsorgt werden müssen.

Ein weiterer effizienter Steuerungs-Algorithmus für das Walzrunden nach dem Multi-Pass-Verfahren wurde von Wang et al. [10] vorgestellt. Die Autoren nutzen aus, dass das Verhältnis zwischen der Zustellung der Biegewalze und der resultierenden Blechkrümmung in einem kleinen Wertebereich der Walzenzustellung nahezu linear ist (vgl. Abbildung 9). Hierdurch ist es möglich, das Umformverhalten eines Blechs in der Nähe der Sollkrümmung mithilfe von zwei Walzdurchläufen bei unterschiedlicher Walzenzustellung zu ermitteln und aus der festgestellten Linearität die erforderliche Walzenzustellung für das Sollergebnis zu berechnen, sodass dieses in einem dritten Walzdurchlauf erreicht werden kann. Um zu gewährleisten, dass die ersten beiden Walzdurchläufe in der Nähe der Sollkrümmung liegen, wird der Startwert mithilfe eines analytischen Modells berechnet. Hierbei ergibt sich der Vorteil, dass das analytische Modell aufgrund von Vereinfachungen stets zu konservative Berechnungen liefert, sodass keine Gefahr des Überbiegens besteht. Dieser Ansatz ermöglicht eine zuverlässige Steuerung des Walzrundens. Bei Umformaufgaben, bei denen das chargenspezifische Umformverhalten eines Blechs bekannt ist, ist das Verfahren mit drei erforderlichen Walzdurchläufen jedoch ineffizient.

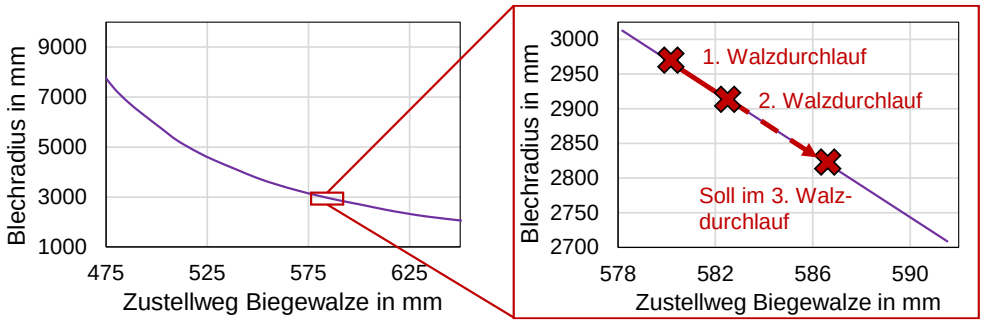

Abbildung 9: Multi-Pass-Verfahren nach Wang et al. [10].

2.3 Fazit

Hinsichtlich der Entwicklung einer rechnergestützten Prozesssteuerung zur Objektivierung des Walzrundens wurde in der Vergangenheit bereits viel Forschungsarbeit geleistet. Dabei haben sich vor allem zwei Ansätze zur Steuerung des Verfahrens hervorgetan: die Entwicklung einer Steuerungsschleife sowie die Steuerung im Multi-Pass-Verfahren. Unter diesen Ansätzen birgt die Steuerungsschleife das größere Optimierungspotenzial, da hiermit eine größere Teilautomatisierung des Prozesses erreicht werden kann. So können die Teilschritte der Ist-Zustands-Ermittlung und der Justierung automatisiert ablaufen. Nachteilig ist hierbei jedoch der Bedarf einer technischen Messeinrichtung. Aus diesem Grund stellt die Steuerung in einem effizienten Multi-Pass-Verfahren eine vielversprechende Übergangstechnologie dar, bis eine zuverlässige automatisierte Vermessung des Umformprozesses möglich ist.

Die bisherigen Arbeiten zur Entwicklung einer Steuerungsschleife für das Walzrunden haben sich bisher vor allem mit der Verarbeitung von Feinblechen beschäftigt. Aufgrund der größeren Abmessungen und der höheren wirkenden Kräfte können die hierbei entwickelten Lösungen jedoch nur bedingt für den Grobblechbereich adaptiert werden. Insbesondere durch die Forderung nach einer kostengünstigen und flexiblen Nachrüstbarkeit bei bestehenden Rundbiegemaschinen ergibt sich der Bedarf nach neuen technischen Lösungen. Dabei zeigen die Arbeiten aus der Literatur, dass berührungslose Messeinrichtungen gut für die Nachrüstung von Rundbiegemaschinen geeignet sind, da sie keinen Umbau der Maschinen erfordern. Durch die Aufzeichnung von Prozessdaten wird es möglich, empirische Modelle für die Prognose des Umformprozesses zu verwenden. Der hohe Rechenaufwand von numerischen Modellen kann somit vermieden werden.

3 Untersuchungskonzept

In dieser Arbeit sollen ein empirisches Prognosemodell und eine Prozessüberwachung für das Walzrunden entwickelt werden. Damit das Modell und die Prozessüberwachung praxistauglich konzipiert werden können, ist ein hohes Prozessverständnis erforderlich. Aus diesem Grund werden im ersten Schritt der Umformprozess sowie die verwendeten Materialien analysiert.

Hierzu werden die wesentlichen mechanischen Eigenschaften von praxisrelevanten Blechen des Walzrundens charakterisiert und quantifiziert (Kapitel 4). Darauf aufbauend wird ein detailliertes FE-Modell des Walzrundens entwickelt, mit dem der Prozess eingehend analysiert werden kann (Kapitel 5). Aus den ermittelten Erkenntnissen werden Konzepte für das Prognosemodell und die Prozessüberwachung abgeleitet und umgesetzt. Im Anschluss daran wird mithilfe der Daten der FE-Simulation ein theoretischer Funktionsnachweis für die Umsetzungen erbracht (Kapitel 6 und 7).

Nach dem erfolgreichen theoretischen Funktionsnachweis werden das Prognosemodell und die Prozessüberwachung experimentell anhand von Praxisversuchen mit einer realen 4-Walzenrundbiegemaschine erprobt (Kapitel 8 und 9). Basierend auf den ermittelten Erkenntnissen wird eine Methodik abgleitet, nach der das Prognosemodell und die Prozessüberwachung in den Umformprozess des Walzrundens integriert werden können (Kapitel 9.4).

4 Experimentelle Charakterisierung von praxisrelevanten Blechen für das Walzrunden

Im Rahmen des Projekts wurden mithilfe von Zugversuchen und Eigenspannungsmessungen die wesentlichen mechanischen Eigenschaften von praxisrelevanten Blechen charakterisiert. In Kapitel 5 wurden die hierdurch ermittelten Informationen für die Modellierung des Walzrundens mithilfe der FEM verwendet.

4.1 Untersuchte Bleche

Als Untersuchungsmaterial wurden Bleche aus den Stählen S355 und S690 mit den Dicken 10 mm und 30 mm verwendet. Die chemische Zusammensetzung der Stähle ist in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Stähle.

Stahl	Anteil in Ma.-%								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	N	Cr	Al
S355	0,07	0,23	1,38	0,014	0,001	0,02	0,006	0,04	0,05
S690	0,16	0,25	1,8	0,012	0,001	0,01	0,005	0,34	0,08

Die Bleche wurden vom Hersteller auf die Abmessungen 1000 x 300 mm vorkonfektioniert und im thermomechanischen gewalzten Zustand ausgeliefert. Mit einer wassergekühlten Bandsäge wurden aus den Blechen Probenstreifen mit den Abmessungen 300 x 50 x 30 mm entnommen (vgl. Abbildung 10).

Abbildung 10: Exemplarischer Probenstreifen eines Blechs aus S690 mit einer Dicke von 10 mm.

4.2 Zugversuche

Zur Ermittlung der Festigkeit wurden quasistatische Zugversuche nach der DIN EN ISO 6892-1 durchgeführt. Hierfür wurden aus dem Versuchsmaterial Flachzugproben nach der DIN 50125-E mit einem Querschnitt von 7 x 22 mm entnommen. Als Prüfmaschine wurde eine Universalprüfmaschine der Firma Zwick/ Roell verwendet, die über eine maximale Prüfkraft von 400 kN verfügt (Z400).

Die für die beiden Werkstoffe ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven sind in der Abbildung 11 dargestellt. Für beide Werkstoffe liegt die Dehngrenze oberhalb der genormten Mindestanforderung von 355 bzw. 690 N/mm². Auffällig ist, dass der Werkstoff S355 ein deutlich ausgeprägteres Verfestigungsverhalten und eine größere Bruchdehnung besitzt. Dagegen zeigt der Werkstoff S690 nur eine geringe Verfestigung. Die ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven wurden in Kapitel 5.1.4 für die Modellierung der Materialeigenschaften der Werkstoffe mithilfe der FEM verwendet.

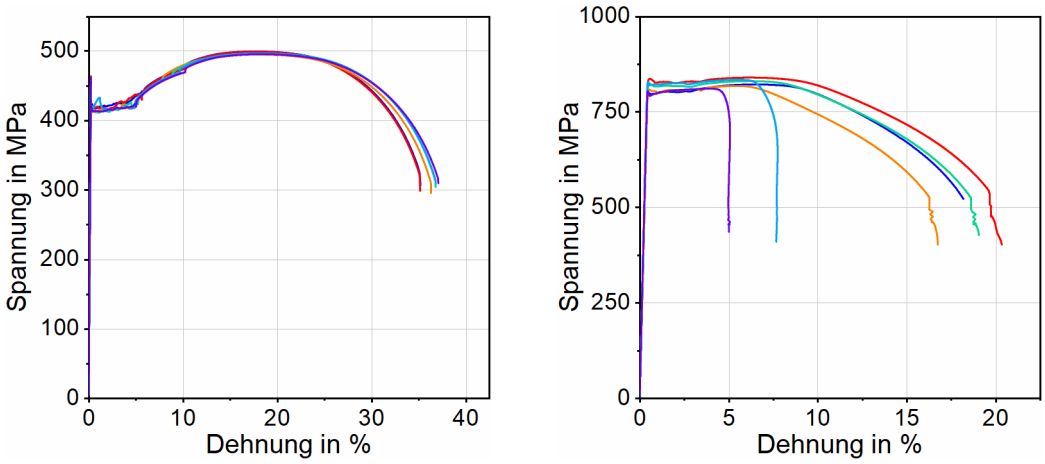

Abbildung 11: Ermittelte Spannungs-Dehnungs-Kurven für S355 (links) und S690 (rechts).

4.3 Eigenspannungsmessungen mit der Bohrlochmethode

Im Rahmen des Projekts wurde experimentell untersucht, inwiefern in praxisrelevanten Grobblechen, die beim Walzrunden verwendet werden, Eigenspannungen vorliegen. Es wurden Bleche im thermomechanisch gewalzten Zustand untersucht, da diese beim Walzrunden häufig verwendet werden. Als Messmethode wurde die Bohrlochmethode verwendet.

Bei der Bohrlochmethode wird in eine Probe schrittweise ein Loch gebohrt. Durch die Materialentfernung werden Eigenspannungen in der Probe abgebaut, wodurch sich diese verformt. Zur Quantifizierung der Eigenspannungen werden die Verformungen der Probenoberfläche in der Umgebung des Bohrlochs gemessen und aus diesen die Eigenspannungen im Bohrlochgrund berechnet. Durch die schrittweise Erhöhung der Bohrlochtiefe kann die Entwicklung der Eigenspannungen über den Abstand zur Probenoberfläche ermittelt werden.

Der ermittelte charakteristische Eigenspannungszustand wurde in das FE-Modell implementiert, um den Einfluss auf das Umformergebnis beim Walzrunden numerisch untersuchen zu können (vgl. Kapitel 5).

4.3.1 Probenentnahme

Als den untersuchten Blechen wurden mit einer wassergekühlten Bandsäge wurden Probenstreifen mit den Abmessungen 300 x 50 x 30 mm entnommen (vgl. Abbildung 12).

Abbildung 12: Exemplarischer Probenstreifen eines Blechs aus S690 mit einer Dicke von 10 mm.

4.3.2 Messaufbau

Für die Untersuchung wurde das Messgerät PRISM der Firma Stresstech verwendet. Mit diesem können Eigenspannungsmessungen nach der Bohrlochmethode durchgeführt werden. Dabei werden die Oberflächenverzerrungen, aus denen die Eigenspannungen berechnet werden, durch elektronische Specklemuster-Interferometrie (ESPI) sichtbar gemacht. Der Messaufbau des PRISM-Geräts ist in Abbildung 13 dargestellt. In einem Schraubblock werden die Proben mechanisch verspannt. Mithilfe einer Präzisionsbohrmaschine wird ein Loch mit definierten Tiefenschritten in die Proben gebohrt. Für jeden Tiefenschritt wird ein Laserstrahl auf die Bohrlochumgebung gerichtet, der aufgrund der Rauigkeit der Probenoberfläche an dieser gestreut wird und somit ein Specklemuster erzeugt. Aus diesem Muster können Informationen über den momentanen Verformungszustand abgeleitet werden. Mit einer Kamera wird das Specklemuster eines jeden Tiefenschritts festgehalten und an einen Computer geleitet, welcher mithilfe einer speziellen Software die Änderung der Verformungszustände analysiert und hieraus die ebenen Eigenspannungen im Bohrlochgrund berechnet.

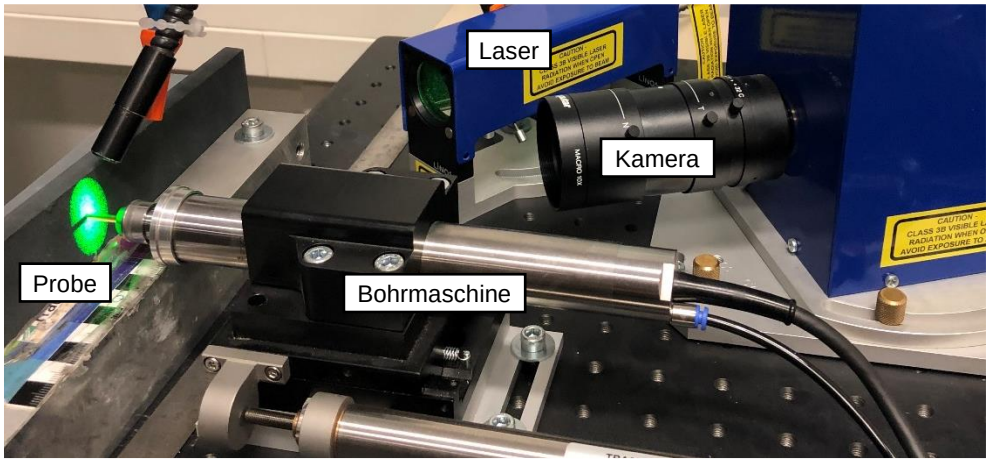

Abbildung 13: Messaufbau zur Ermittlung der Eigenspannungen mit dem Messgerät PRISM.

4.3.3 Durchführung

In die flache Seite der Proben wurde schrittweise ein zentrisches Loch von 1 mm Tiefe gebohrt, wobei Tiefenschritte von 0,1 mm verwendet wurden. Hierzu wurden ein Bohreinsatz mit einem Durchmesser von 1,8 mm und eine Bohrgeschwindigkeit von 5 kU/min verwendet.

Um die Messunsicherheit von Messungen mit diesen Prüfparametern bestimmen zu können, wurden in Anlehnung an [16] Messungen an eigenspannungsfreien Proben durchgeführt. Da bei diesen Messungen der Erwartungswert als Null bekannt ist, kann die Standardabweichung der Messergebnisse berechnet werden. Um eine hierfür erforderliche Probe zu erhalten, in der nahezu keine Eigenspannungen vorliegen, wurde ein Probenstreifen des S355-Blechs für 4 h bei 950 °C austenitisiert und anschließend im geschlossenen Ofen sehr langsam abgekühlt.

4.3.4 Ergebnisse und Diskussion

In der Abbildung 14 sind exemplarische Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen dargestellt. Dabei zeigt das linke Diagramm die Ergebnisse für eine Probe aus dem Werkstoff S355 und das rechte die Ergebnisse für den Werkstoff S690. Die Probendicke betrug jeweils 30 mm. Die als X-Eigenspannungen bezeichneten Spannungen verlaufen längs und die Z-Eigenspannungen quer zur Walzrichtung des Ausgangsblechs.

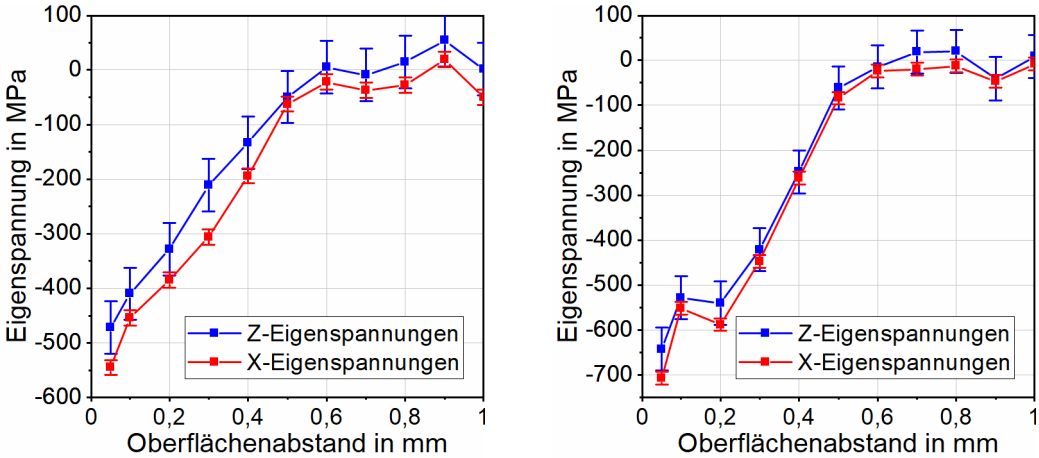

Abbildung 14:Gemessene Eigenspannungen über dem Oberflächenabstand für S355 (links) und S690 (rechts). Probendicke jeweils 30 mm.

Bei der Betrachtung des Eigenspannungsverlaufs fällt auf, dass dieser für alle Kurven einen einheitlichen Trend von hohen Druckspannungen im Randbereich aufweist, die mit steigendem Oberflächenabstand abnehmen. Dieser Verlauf ist charakteristisch für rasch abgekühlte Bauteile, bei denen der Rand- und der Kernbereich durch die Trägheit der Wärmeleitung unterschiedlich schnell abkühlen [17]. Der festgestellte Verlauf deckt sich mit vergleichbaren Arbeiten aus der Literatur an thermomechanisch gewalzten bzw. abgeschreckten Platten [18] und wurde aus diesem Grund in das FE-Modell implementiert (vgl. Kapitel 5.1.5).

Anzumerken ist, dass die gemessenen Eigenspannungen quantitativ vermutlich zu hoch ausfallen, da die Proben über eine zu geringe Breite verfügten. Da für das PRISM-System keine Mindestbreite für die Proben angegeben wurde, wurde die Breite nach der ASTM E837 bemessen, in der die Bohrlochmethode für die Messung mit DMS-Rosetten genormt ist. Diese Breite war für das PRISM-Gerät aufgrund der Höhe der Eigenspannungen jedoch vermutlich zu gering. Für die weiteren Untersuchungen ist dies jedoch nicht von Bedeutung, da der Eigenspannungszustand im Zuge der FE-Untersuchung ohnehin skaliert und in unterschiedlichen Ausprägungsstufen untersucht wurden.

5 Finite-Elemente-Analyse des Walzrundens

Im Rahmen des Projekts wurde ein FE-Modell für das Walzrunden entwickelt, mit dem der Prozess numerisch analysiert wurde. Das FE-Modell wurde für die folgenden Untersuchungen verwendet:

- Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung maßgeblichen Einflussgrößen auf das Umformergebnis
- Training und Verifizierung eines KI-basierten Prognosemodells
- Validierung einer Prozessüberwachung für das Walzrunden

5.1 Entwicklung eines FE-Modells für das Walzrunden

In der Software LS-DYNA wurde ein dreidimensionales FE-Modell für das Walzrunden entwickelt. Grundsätzlich ist die Modellierung des Walzrundens aus der Sicht der Finite-Elemente-Analyse eine komplexe Aufgabenstellung. Wegen der großen Bewegungen von Walzen und Blech sowie der plastischen Verformung des Blechs treten sowohl geometrische als auch materielle Nichtlinearitäten auf. Zudem besteht Nichtlinearität durch den reibungsbehafteten Kontakt zwischen Walzen und Blech, über welchen der Vorschub des Blechs generiert wird. Aufgrund dieser Nichtlinearitäten sind sehr kleine Zeitschritte bei der Berechnung erforderlich, was einen hohen Rechenaufwand zur Folge hat. Damit das Verfahren dennoch möglichst recheneffizient simuliert werden konnte, wurde es in dieser Arbeit in einzelne Prozess-Schritte unterteilt und für jeden ein Teilmodell mit angepassten Modellparametern erstellt (vgl. Kapitel 5.1.2).

Im Folgenden werden die wesentlichen Eigenschaften des entwickelten FE-Modells detailliert beschrieben.

5.1.1 Modellierte Rundbiegemaschine

Als Rundbiegemaschine wurde eine 4-Walzen-Rundbiegemaschine des Typs W12-60*4000 des chinesischen Herstellers Nantong Shengli Heavy Machine Manufacturing modelliert (vgl. Abbildung 15). Bei dieser Maschine werden die Seitenwalzen zur Einprägung einer Biegung entlang einer Kreisbahn zugestellt. Für die Erzeugung des Blechvorschubs können die zentrischen Walzen rotatorisch angetrieben werden. Die Abmessungen der Rundbiegemaschine wurden mithilfe eines 3D-Scanners ermittelt.

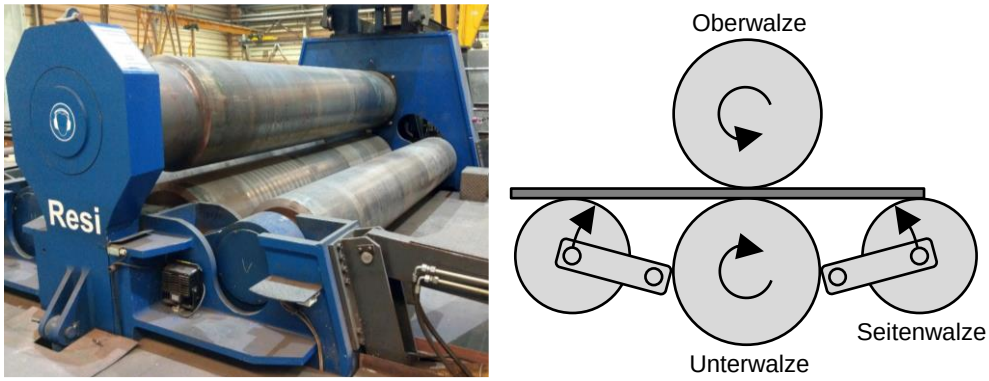

Abbildung 15: Modellierte 4-Walzen-Rundbiegemaschine mit Darstellung der Antriebsrichtungen.

5.1.2 Modellierung des Verfahrens als Prozesskette

Damit mit dem in dieser Arbeit entwickelten FE-Modell flexible Prozessabfolgen des Walzrundens möglichst recheneffizient simuliert werden können, wurde das Verfahren in einzelne Prozess-Schritte unterteilt und für jeden ein gesondertes Modell erstellt. Dabei wurden unterschieden in die Prozess-Schritte:

- **Anbiegen:** Bei diesem Prozess-Schritt werden eine oder beide Seitenwalzen zugestellt, wodurch das Blech lokal umgeformt wird. Die Ober- und die Unterwalze stehen dabei still.
- **Walzen:** Hierbei haben alle Walzen eine feste Position. Die Ober- und Unterwalze werden rotatorisch angetrieben, um den Vorschub des Blechs zu erzeugen.
- **Elastische Rückfederung:** Dieser Prozess-Schritt findet im Anschluss an den Umformprozess statt, nachdem die Seitenwalzen zurückgestellt wurden. Er beinhaltet die (teilweise) Entspannung von elastisch gespeicherter Formänderungsenergie. Bei diesem Prozess-Schritt liegt das Blech frei im Raum, wobei als Randbedingungen die Freiheitsgrade der Blechknoten an einer langen Kante eines Endes gesperrt und die Gravitationswirkung auf das Blech deaktiviert werden.

Bei der Modellierung dieser Prozess-Schritte wurden unterschiedliche Zeitintegrationsverfahren verwendet. Das Walzen wurde aufgrund der vorhanden Nichtlinearitäten und der damit verbundenen Erfordernis von kleinen Zeitschritten mit expliziter Zeitintegration berechnet. Dabei wurde die Umfangsgeschwindigkeit der Walzen zur Reduzierung der Simulationszeit künstlich auf 2000 mm/s erhöht. Beim Anbiegen führte die Verwendung von expliziter Zeitintegration mit erhöhter Zustellgeschwindigkeit der Seitenwalzen zu erheblichen dynamischen Effekten in Form eines Abhebens des Blechs. Aus diesem Grund wurde das Anbiegen ebenso wie die elastische Rückfederung statisch implizit berechnet und somit dynamische Effekte vernachlässigt.

Nach der Simulation eines Teilschritts wird eine Dynain-Datei ausgegeben, welche die relevanten Informationen des Blechzustands wie etwa den Spannungs- und Verformungszustand enthält und als Eingabe für den nächsten Prozessschritt dient. Damit mithilfe des Modells verschiedene Prozessabfolgen praktikabel simuliert werden können, wurden die Modelle der einzelnen Prozess-Schritte parametrisch aufgebaut. Es wurde ein Python-Programm geschrieben, über welches die Parametrierung der Modelle anhand eines vorgegebenen Umformplans automatisch vorgenommen werden kann. Hierdurch wird gleichzeitig gewährleistet, dass zwischen den einzelnen Simulationen einer Prozesskette konsistente Randbedingungen bestehen und beispielsweise die Position der Walzen aufeinander abgestimmt ist.

5.1.3 Modellierung der Walzen und des Kontakts

Die Walzen wurden als starre zylindrische Körper idealisiert und dabei ihre Elastizität und Balligkeit vernachlässigt. Unter Ausnutzung ihrer Symmetrie zur Längsachse wurde nur eine Hälfte ihrer Geometrie modelliert, wobei die Modellierung an das verwendete Zeitintegrationsverfahren angepasst wurde.

Bei der expliziten Zeitintegration im Prozess-Schritt Walzen wurden die Walzen durch Kontaktentitäten modelliert, welche auf einer recheneffizienten analytischen Beschreibung der Geometrie eines Zylinders basieren. Hierbei wurde für den Kontakt zwischen Walzen und Blech ein konstanter Haftreibungskoeffizient von 0.15 angenommen. Die Rotation der Ober- und Unterwalze wurde über Geschwindigkeitsrandbedingungen realisiert.

Da Kontaktentitäten in LS-DYNA nur bei expliziter Zeitintegration verwendet werden können, wurden die Walzen bei der impliziten Zeitintegration im Anbiege-Schritt durch starre Schalenelemente modelliert. Hierbei wurde als Kontaktmodell das Modell *FORMING_SURFACE_TO_SURFACE_MORTAR verwendet. Um den Rechenaufwand in diesem Prozess-Schritt reduzieren zu können, wurde die Rotation der Seitenwalzen gesperrt und der Haftreibungskoeffizient in ihrem Kontaktmodell auf 0 gesetzt. Hierdurch konnte die Kontaktausbildung mit dem Blech auf einen kleinen Bereich reduziert werden, sodass die Seitenwalzen nicht über ihren gesamten Umfang vernetzt werden mussten, sondern nur ein Abschnitt auf der dem Blech zugewandten Seite (vgl. Abbildung 16). Die kreisbahnförmigen Zustellbewegungen wurden über Verschiebungsrandbedingungen realisiert. Wie in Abbildung 16 zu sehen, wurde auch von der Ober- und Unterwalze nur ein Abschnitt modelliert. Für diese Walzen wurden Rotation und Haftreibung jedoch nicht vernachlässigt.

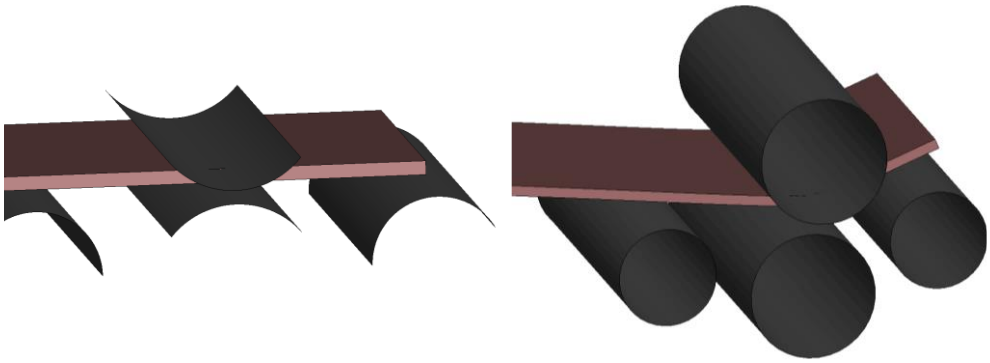

Abbildung 16:Modellierung der Walzen mit starren Schalenelementen im Anbiege-Schritt (links) und Kontaktentitäten im Walzen-Schritt (rechts).

Unabhängig vom Prozess-Schritt wurde die Lagerung aller Walzen als starr idealisiert. Eine Ausnahme stellte hierbei die vertikale Lagerung der Unterwalze dar. In diese Richtung wurde die Unterwalze über eine Feder gelagert, um die Nachgiebigkeit der realen Rundbiegemaschine modellieren zu können. Die Steifigkeit dieser Feder wurde näherungsweise aus den Herstellerangaben zum Umformvermögen der Maschine abgeschätzt.

5.1.4 Modellierung des Blechs

Für die Modellierung des Blechs wurden lineare Hexaederelemente verwendet, da diese eine effiziente Berechnung bei expliziter Zeitintegration ermöglichen [19]. Die Kantenlänge der Elemente wurde anhand einer Konvergenzstudie ausgewählt und betrug in die Längs- und Breitenrichtung 10 mm. In die Dickenrichtung wurde die Elementkantenlänge an die Blechdicke angepasst, sodass über diese stets mit fünf Elementen diskretisiert wurde. Somit konnte das Vorhandensein eines Integrationspunktes in der neutralen Faser gewährleistet werden. Analog zu den Walzen wurde für das Blech in die Breitenrichtung eine Symmetrierandbedingung angenommen, wodurch nur eine Hälfte der Blechgeometrie modelliert werden musste.

Als Blechwerkstoffe wurden die Stähle S355 und S690 betrachtet. Für diese wurde einheitlich ein E-Modul von 207 GPa, eine Querkontraktionszahl von 0,3 und eine Dichte von 7850 kg/m³ angenommen. Als Materialmodell wurde das Modell **`*024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY ("*MAT_024")`** verwendet, welches für die Darstellung von einfachem elastoplastischem Verhalten von Metallen geeignet ist. In diesem wurden für die betrachteten Werkstoffe die in Abbildung 17 dargestellten Fließkurven angenommen. Diese basieren auf den experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven (vgl. Kapitel 4.2), welche in Fließkurven umgerechnet und mithilfe des Ansatzes von HOCKETT-SHERBY [20] für große Dehnungen extrapoliert wurden.

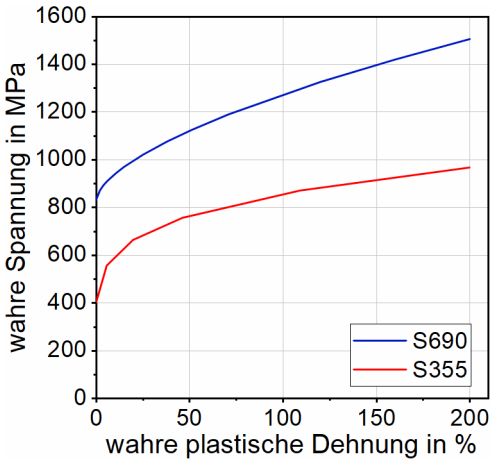

Abbildung 17:Fließkurven der untersuchten Werkstoffe.

5.1.5 Implementierung von Eigenspannungen in das Blech

Um den Einfluss von Eigenspannungen untersuchen zu können, wurde jedem Element beim ersten Anbiege-Schritt einer simulierten Umformsequenz ein initialer Spannungszustand zugewiesen. Hierbei wurde der charakteristische Eigenspannungszustand berücksichtigt, der in der experimentellen Untersuchung für thermomechanisch gewalzte Bleche ermittelt wurde. Dieser ist gekennzeichnet durch hohe Drukspannungen in Oberflächennähe, die sich mit steigendem Oberflächenabstand in Zugspannungen umwandeln (vgl. Kapitel 4). Jedoch war die experimentelle Untersuchung räumlich begrenzt, da die Eigenspannungen mit der Bohrlochmehtode nur punktuell über eine geringe Bohrtiefe ermittelt werden konnten. Außerdem konnten die Eigenspannungen nicht in die Dickenrichtung, sondern nur in die longitudinale und transversale Richtung des Bechs untersucht werden. Um im Modell im Gegensatz zum Experiment einen dreidimensionalen Eigenspannungszustand über das gesamte Werkstückvolumen abbilden zu können, wurden Arbeiten aus der Literatur zu thermomechanisch gewalzten Blechen hinzugezogen.

In [18] wurde mithilfe der Konturmethode ein Mapping der longitudinalen Eigenspannungen über den Querschnitt eines thermomechanisch gewalzten Blechs aus einem HSLA-100-Stahl ermittelt. Anhand des Mappings wurden die Spannungen über die Breite gemittelt, wodurch der Spannungsverlauf der mittleren longitudinalen Eigenspannungen in Abhängigkeit vom Oberflächenabstand erhalten wurde. Zur Umsetzung in das FE-Modell wurde diese Kurve in der vorliegenden Arbeit adaptiert (vgl. Abbildung 18, links). Die Kurve wurde anhand der Elastizitätsgrenzen der eigenen untersuchten Werkstoffe neu skaliert. Über die Abszissenachse wurde sie in fünf äquidistante Abschnitte unterteilt und in diesen jeweils gemittelt, um diskrete Eigenspannungswerte entsprechend der Elementanzahl über die Dicke zu erhalten. Bei der Implementierung in das Modell wurde die für einen bestimmten Dickenabschnitt ermittelte Eigenspannung vereinfachend auf alle Elemente der zugehörigen X-Z-Ebene angewendet, da der Verlauf der longitudinalen Eigenspannungen über die Blechlänge und -breite nach [18] nahezu konstant ist (vgl. Abbildung 18, rechts).

In [21] wurde der dreidimensionale Eigenspannungszustand von abgeschreckten Platten untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass die transversalen und die longitudinalen Eigenspannungen einen nahezu identischen Verlauf besitzen und dass die Eigenspannungen in die Dickenrichtung demgegenüber vernachlässigbar klein sind. Darauf aufbauend wurden die in das Modell implementierten longitudinalen Eigenspannungen auch für die transversale Richtung übernommen. Die Eigenspannungen in die Dickenrichtung wurden in Anlehnung an [21] vernachlässigt.

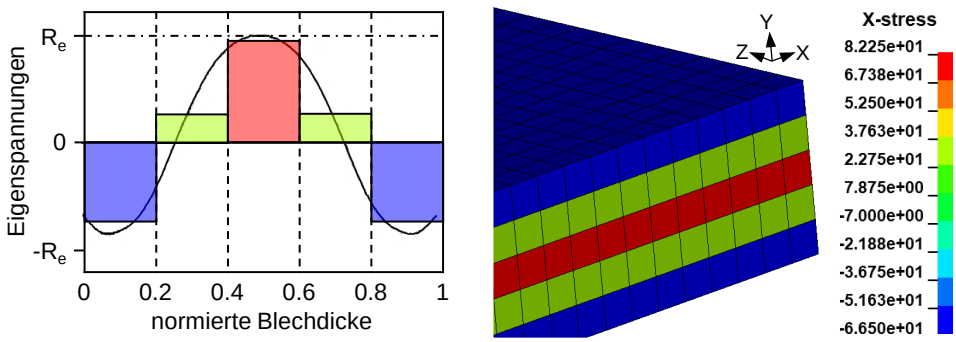

Abbildung 18:Links: Adaptierte Eigenspannungskurve aus [18]. Rechts: Ausschnitt des FE-Modells eines Blechs mit implementierten X-Eigenspannungen (S355, Skalierungsfaktor der ES = 0,25).

Der somit definierte dreidimensionale Eigenspannungszustand ist aufgrund der großen Höhe der Eigenspannungen technisch unrealistisch. Er wurde im Rahmen der Untersuchungen mit einem Skalierungsfaktor versehen und

niedrigskaliert, um die Auswirkungen der Eigenspannungen bei unterschiedlich starker Ausprägung betrachten zu können.

5.2 Sensitivitätsanalyse des Umformergebnisses beim Walzrunden

Mithilfe des entwickelten FE-Modells wurde eine Sensitivitätsanalyse zum Walzrunden durchgeführt. Hierbei wurde untersucht, wie sensitiv das Umformergebnis gegenüber Änderungen von werkstück- und maschinenseitigen Einflussgrößen reagiert. Anhand der Untersuchungsergebnisse kann zwischen maßgeblichen und vernachlässigbaren Einflussgrößen unterschieden werden. Die Untersuchung leistet somit einen Beitrag zur Steigerung des Prozessverständnisses.

5.2.1 Untersuchungsumfang

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde eine einfache Umformbehandlung simuliert, die zwei Prozess-Schritte umfasste. Als erstes wurde ein Anbiege-Schritt simuliert, bei dem das Blech durch das Zustellen der auslassseitigen Seitenwalze angebogen wurde (vgl. Abbildung 19, links). Im Anschluss daran folgte ein Walzen-Schritt, bei dem das Blech durch die Rotation der zentrischen Walzen bis zu einem vollständigen Durchlauf vorgeschoben wurde (vgl. Abbildung 19, rechts).

Abbildung 19: Beispiel einer simulierten Umformbehandlung bestehend aus einem einseitigen Anbiegen (links) und anschließendem Walzen (rechts).

Die untersuchten Parameter waren werkstückseitig die Abmessungen des Blechs, die Werkstofffestigkeit sowie die Ausgeprägtheit von Eigenspannungen, wofür ein Skalierungsfaktor auf den implementierten Eigenspannungszustand angewendet wurde. Von der Maschinenseite wurden der Zustellwinkel der Seitenwalze und die Steifigkeit der Lagerung der Unterwalze untersucht. Der Parameterbereich für die Untersuchung ist in Tabelle 2 aufgeführt. Er wurde praxisnah gewählt. Um den Einfluss der Größen in dem festgelegten Parameterbereich effizient untersuchen zu können, wurde ein D-optimaler statistischer Versuchsplan mit quadratischen Wechselwirkungen verwendet, der 95 Simulationen umfasste.

Tabelle 2: Untersuchte Einflussgrößen und zugehöriger Parameterbereich.

Untersuchte Einflussgröße	Parameterbereich
Blechlänge in mm	3750 … 5250
Blechbreite in mm	1400 … 4000
Blechdicke mm	50 … 100
Werkstoff	S355, S690
Skalierung der ES	0 … 1
Zustellwinkel der Seitenwalze in Grad	16 … 49,84
Steifigkeit der Unterwalzenlagerung in MN/m	2,5 … 7,5

5.2.2 Quantifizierung des Umformergebnisses

Zur Quantifizierung des Umformergebnisses wurde zu jeder Simulation der Radius des umgeformten Blechs bestimmt. Hierzu wurden die Koordinaten der an der Außenseite eines Blechs liegenden Knoten ausgelesen und als Punktewolke in Matlab importiert (Abbildung 20). Von der Punktewolke wurden die Enden entfernt, um die Auswertung auf den kontinuierlich umgeformten Bereich zu beschränken. Anschließend wurden durch die verbleibenden Punkte der beiden mittleren Reihen Kreisbahnen gefittet. Als Messgröße für das Umformergebnis wurde der Mittelwert der Radien dieser beiden Kreisbahnen verwendet.

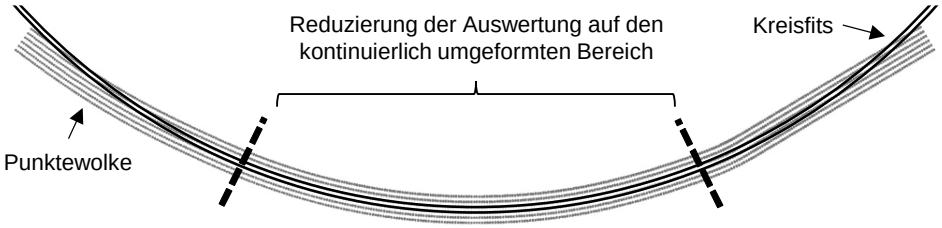

Abbildung 20: Quantifizierung des Umformergebnisses nach der Umformsimulation.

5.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Daten aus der FE-Simulation wurden mit der Software Visual XSel analysiert. Unter der Verwendung von quadratischen Funktionsansätzen wurde ein multiples Regressionsmodell erstellt, das einen Bestimmtheitswert von R^2 = 0,995 erreichte und die Simulationsdaten somit mit hoher Genauigkeit abbilden kann. Das Modell kann dazu verwendet werden, die Korrelation zwischen dem Umformergebnis und den Einflussgrößen im untersuchten Parameterbereich darzustellen. In der Abbildung 21 ist dieser Zusammenhang für einen exemplarischen Arbeitspunkt, welcher durch die roten Linien markiert ist, dargestellt. Die Abbildung zeigt, wie sich ausgehend von diesem Arbeitspunkt die Änderung einer Einflussgröße auf das Umformergebnis auswirkt. Aus den Wertebereichen der einzelnen Korrelationskurven lässt sich die Relevanz der Einflussgrößen abschätzen.

Wie zu erwarten war, hat der Zustellwinkel der Seitenwalze den mit Abstand größten Einfluss auf das Umformergebnis. Hierbei zeigt sich ein nichtlinearer Zusammenhang, wobei der Anstieg mit steigendem Zustellwinkel flacher wird. Ebenfalls groß ist der Einfluss der Blechdicke. Hierzu ist anzumerken, dass ein geometrischer Zusammenhang zwischen der Blechdicke und dem Zustellwinkel besteht. Je dicker das Blech ist, umso kleiner ist der Startwinkel, bei dem die Seitenwalze vor dem Anbiege-Schritt am unverformten Blech anliegt. Dementsprechend bedeutet eine Erhöhung der Blechdicke bei einem konstanten Zustellwinkel, dass die Seitenwalze einen größeren Zustellweg zurücklegt und dass somit eine größere Umformung eingeprägt wird. Außerdem ist der Einfluss des Werkstoffs auf das Umformergebnis signifikant. Hier zeigt sich, dass der Krümmungsradius des Blechs mit steigender Festigkeit zunimmt, folglich also eine kleinere Umformung eingeprägt wird. Dies ist vermutlich auf die elastische Rückfederung zurückzuführen, die beim Walzrunden kontinuierlich stattfindet. Da mit steigender Fließgrenze des Werkstoffs die im Blech gespeicherte elastische Formänderungsenergie steigt, findet eine größere Rückverformung statt.

Bei den weiteren untersuchten Parametern ist der Einfluss auf das Umformergebnis vergleichsweise gering. Der geringe Einfluss der Steifigkeit der Lagerung der Unterwalze kann als Hinweis darauf gedeutet werden, dass die Steifigkeit einer Rundbiegemaschine nicht genau bekannt sein muss, um das Umformergebnis beim Walzrunden mithilfe von Prognose-Modellen zuverlässig vorhersagen zu können. Anzumerken ist hierbei jedoch, dass die Lagerungen der Seitenwalzen im Modell als starr angenommen wurden, womit die Steifigkeit der Rundbiegemaschine im FE-Modell folglich tendenziell als zu steif angenommen wurde. Schlussfolgerungen zum Einfluss der Nachgiebigkeit der Rundbiegemaschine sind dementsprechend mit einer großen Unsicherheit behaftet.

Aus der Sicht der Autoren ist der geringe Einfluss der Blechlänge und der Blechbreite überraschend. Die Blechlänge bewirkt eine Änderung der Lage des Schwerpunkts des Blechs hinter dem Walzenaustritt und somit eine Beeinflussung des Aufbiegemoments durch das Eigengewicht des Blechs. In dem betrachteten Parameterbereich ist dieser Einfluss jedoch offenbar gering. Durch die Blechbreite steigt die Masse des Blechs, wodurch das der Umformung entgegengesetzt wirkende Aufbiegemoment aus dem Eigengewicht ansteigt. Dieser Effekt scheint jedoch durch die gleichzeitig steigende Biegesteifigkeit des Blechs kompensiert zu werden. Hervorzuheben ist, dass die Blechbreite in der Praxis eine große Bedeutung für das Walzrunden hat, da das Umformvermögen einer Rundbiegemaschine beim Anbiegen durch die Biegesteifigkeit des Blechs begrenzt wird. Dieser Umstand wird im Modell jedoch nicht berücksichtigt, da die starren Seitenwalzen verschiebungsgesteuert zugestellt wurden, wodurch die Prozesskräfte unendlich groß werden können.

Mit den hohen Prozesskräften lässt sich auch der geringe Einfluss der Eigenspannungen erklären. Da die Prozesskräfte unendlich groß werden können, spielt die Erhöhung oder Reduzierung des Umformwiderstandes durch die Eigenspannungen nur eine untergeordnete Rolle. Die Übertragbarkeit dieses festgestellten Zusammenhangs in die Praxis ist demnach anhängig von der Steuerung der Rundbiegemaschine. Bei einer verschiebungsgesteuerten Zustellung der Seitenwalzen kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss von Eigenspannungen auf das Umformergebnis vernachlässigbar ist.

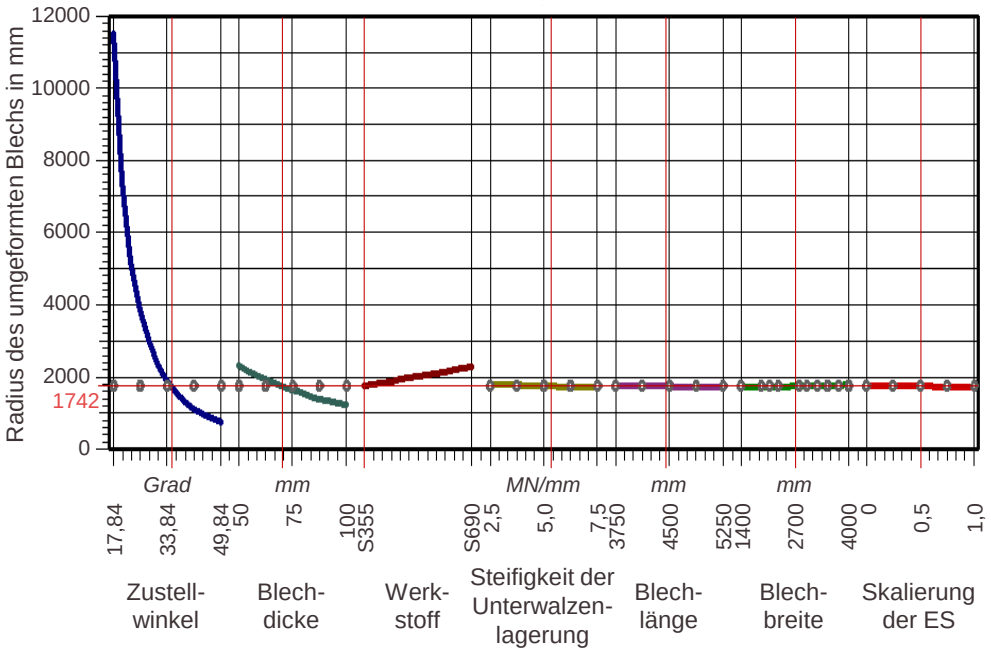

Abbildung 21:Korrelation des Umformergebnisses mit den untersuchten Einflussgrößen.

Als Fazit für die Entwicklung eines Prognosemodells kann festgehalten werden, dass die Zustellung der Seitenwalze, die Blechdicke sowie die Werkstofffestigkeit zwingend berücksichtigt werden müssen, um das Umformergebnis beim Walzrunden zuverlässig prognostizieren zu können. Der Einfluss von Blechlänge und -breite auf die eingeprägte Krümmung ist zwar gering, da diese Daten jedoch einfach zu beschaffen sind, sollten auch diese in das Prognosemodell einfließen. Im Gegensatz dazu können die Eigenspannungen nur sehr schwierig ermittelt werden. Da ihr Einfluss auf das Umformergebnis gering ist, können diese im Prognosemodell vernachlässigt werden. Die Steifigkeit der Walzenlagerung bzw. der gesamten Rundbiegemaschine sollte in einem Prognosemodell berücksichtigt werden, da hier von einem relevanten Einfluss ausgegangen werden muss. Hierbei ist der Vorteil an datenbasierten empirischen Modellen wie etwa einem KNN, dass die Informationen über maschinenseitige Einflüsse in den Daten des Umformergebnisses enthalten sind, sodass diese Einflüsse nicht zusätzlich quantifiziert werden müssen.

5.3 Validierung des FE-Modells mit experimentellen Daten

Das entwickelte FE-Modell wurde mithilfe der experimentellen Daten validiert. Hierzu wurden die experimentellen Messungen mit einer Berechnung des FE-Modells verglichen. Dabei wurde der Versuch betrachtet, bei dem ein Blech aus S355 mit den Abmessungen 2660 x 1400 30 mm mit der auslassseitigen Seitenwalze mit dem Zustellwinkel von 63,4° umgeformt wurde. Als Umformergebnis wurde für diesen Versuch mithilfe des 3D-Scanners ein Krümmungsradius von ca. 622 mm ermittelt.

Mit dem FE-Modell wurde dieser Versuch nachsimuliert und es wurde versucht, das gleiche Umformergebnis mithilfe der FE-Simulation zu erreichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Simulationen zur Validierung des FE-Modells.

Nr.	Zustell- winkel in °	Walzengeschwindigkeit in mm/s	Zeitschrittweite in s	Massenskalierung in %	Blechradius in mm
1	63,4	2000	1,4E-6	109	580,3
2	63,4	1000	1,4E-6	109	582,0
3	63,4	2000	0,9E-6	0	579,7
4	63,0	2000	0,9E-6	0	591,2
5	62,5	2000	0,9E-6	0	605,0
6	61,9	2000	0,9E-6	0	623,5

Zunächst ist festzustellen, dass die Umformung im Modell bei einem gleichen Zustellwinkel mit nur 580,3 mm unterschätzt wurde. Daraufhin wurden Simulationen mit einer reduzierten Walzengeschwindigkeit (welche im Rahmen der Simulationen künstlich erhöht wurde) und einer reduzierten Zeitschrittweite durchgeführt, um einen den Einfluss von numerischen Parametern auf das Umformergebnis ausschließen zu können. Bei einer Änderung dieser Parameter zeigte sich jedoch kein signifikanter Einfluss auf das Umformergebnis, sodass diese als Ursache für die Abweichung ausgeschlossen werden konnten. In den weiteren Versuchen wurde der Zustellwinkel der Seitenwalze erhöht. Hierbei

zeigte sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen dem Zustellwinkel und dem resultierenden Krümmungsradius (vgl. Abbildung 22). Dies entspricht vergleichbaren Ergebnissen aus der Literatur [10]. Bei einem Zustellwinkel von 61,9° konnte das experimentelle Umformergebnis in guter Näherung erzielt werden.

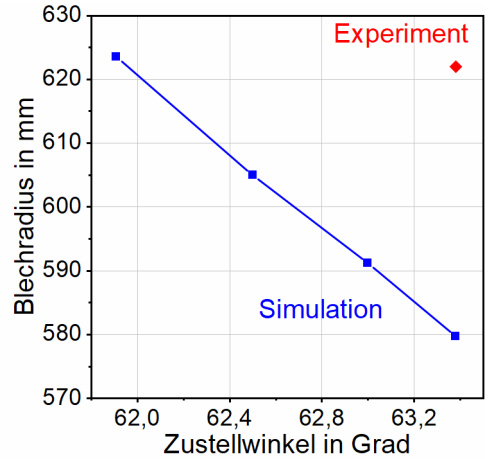

Abbildung 22:Zusammenhang zwischen dem Zustellwinkel der Seitenwalze und dem resultierenden Krümmungsradius.

Somit liegt die Abweichung der für ein gleiches Ergebnis erforderlichen Seitenwalzenzustellung zwischen Simulation und Experiment bei etwa 1,5°. Hervorzuheben ist, dass diese Abweichung eine Verschiebung der Seitenwalze um nur wenige Millimeter bedeutet. Neben der FEM-bedingten Idealisierung kann die Abweichung mit den Messunsicherheiten bei der Vermessung der Rundbiegemaschine erklärt werden, die zu unterschiedlichen geometrischen Annahmen zwischen Modell realer Anlage geführt haben. Aufgrund der guten Näherung der Ergebnisse und der durch die Literatur gedeckten Korrelation wird das Modell als valide erachtet.

6 Entwicklung eines KNN-basierten Prognosemodells für das Walzrunden

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein Prognosemodell entwickelt, dass das Umformergebnis beim Walzrunden anhand von vorgegebenen Umformparametern prognostizieren kann. Das Modell basiert auf einem künstlichen neuronalen Netz (KNN). Bei einem solchen besteht der Grundgedanke der Modellierung darin, einer vordefinierten Modellstruktur eine Menge von Daten zur Verfügung zu stellen, deren Informationsgehalt selbständig mithilfe eines komplexen Netzes aus Signalverarbeitungseinheiten (künstliche Neuronen) extrahiert wird. [1] Ein KNN kann somit „selbstständig“ lernen, sich einer Lösung für ein gestelltes Problem anzunähern. Der Ansatz steht damit in einem starken Gegensatz zur analytischen Modellierung, bei der versucht wird, ein technisches System vollständig formalisiert zu beschreiben. Prinzipbedingt hängt die Qualität der Umformprognosen eines KNN-basierten Prognosemodells maßgeblich von der Menge und der Qualität der Trainingsdaten ab.

6.1 Verwendete Trainingsdaten

Mithilfe des Prognosemodells soll ein Anwender vorhersagen können, welche Krümmung in ein definiertes Blech eingeprägt wird, wenn das Walzrunden mit einer definierten Maschineneinstellung durchgeführt wird. Um derartige Prognosen anstellen zu können, benötigt das KNN Daten zu mehreren Umformversuchen, wobei der Datensatz eines jeden Versuchs die relevanten Umformparameter sowie das Umformergebnis umfassen muss. Da die Ermittlung von Trainingsdaten mit realen Umformversuchen hinsichtlich des Zeit- und Kostenaufwands den Rahmen dieses Projekts überstiegen hätte, wurden für das Training des KNN die synthetischen Versuchsdaten verwendet, die mithilfe der FE-Simulationen aus Kapitel 5 generiert wurden.

Insgesamt wurden Daten von 100 Umformversuchen für das Training des KNN verwendet. Dies waren zum einen die Daten der 95 Umformsimulationen, die für die Sensitivitätsanalyse in Kapitel 5.2 verwendet wurden, vgl. Tabelle 2. Um den Parameterraum zu erweitern, wurden zusätzlich 5 weitere Simulationen durchgeführt, die an das Experiment aus Kapitel 8 angelehnt waren. Bei diesen wurde die Umformung eines Blechs aus S355 mit den Abmessungen 2660 x 1400 x 30 mm mit den Zustellwinkeln 20°, 30°, 40°, 50° bzw. 61,9° simuliert. Die Eigenspannungen wurden hierbei vernachlässigt und die Steifigkeit der Lagerung der Unterwalze als 2,5 MN/m angenommen. Somit wurde das KNN mit Daten trainiert, die den in Tabelle 4 aufgelisteten Parameterbereich umfassten.

Tabelle 4: Parameterbereich der FE-Simulationen zum Training des KNN.

Umformparameter	Parameterbereich
Blechlänge in mm	2660 … 5250
Blechbreite in mm	1400 … 4000
Blechdicke mm	30 … 100
Werkstoff	S355, S690
Skalierung der ES	0 … 1
Zustellwinkel der auslassseitigen Seitenwalze in Grad	16 … 61,9
Steifigkeit der Unterwalzenlagerung in MN/m	2,5 … 7,5

Neben den in der Tabelle 4 aufgeführten Umformparametern umfasste jeder Datensatz Informationen zum Umformergebnis des jeweiligen Versuchs. Diese Informationen wurden in Form der lokalen Krümmung des Blechs über dessen Länge bereitgestellt. Um diese zu ermitteln, wurden die durchgeführten FE-Simulationen nach einer Methodik aus [22] ausgewertet.

Die Methodik beruht darauf, dass der Radius eines gekrümmten Blechabschnitts mit der Ausgangslänge dL anhand der Dehnungen der gestauchten Innenseite ε_i und der gestreckten Außenseite ε_a berechnet werden kann. Dies ist geometrisch auf der linken Seite von Abbildung 23 dargestellt. Hiernach ergibt sich der Innenradius r_i eines Blechabschnitts mit der Dicke t aus der folgenden Formel:

$$r_i = t \cdot \frac{1 + \varepsilon_i}{\varepsilon_a - \varepsilon_i} \qquad \text{(Gleichung 6.1.1)}$$

Im Fall des diskretisierten Blechs einer FE-Simulation kann die Gleichung 6.1.1, wie in der Abbildung 23 in der Mitte dargestellt, an die Diskretisierung angepasst werden. Bei einer Elementkantenlänge des unverformten Zustands L_0 ergibt sich der Innenradius r_i mit der Summe der Dehnungen der Elementkanten auf der Innenseite $\sum_{j=1}^{n} \varepsilon_{i_j}$ und der Außenseite $\sum_{j=1}^{n} \varepsilon_{a_j}$ aus:

$$r_i = t \cdot \frac{1 + \sum_{j=1}^{n} \varepsilon_{i_j}}{\sum_{j=1}^{n} \varepsilon_{a_j} - \sum_{j=1}^{n} \varepsilon_{i_j}} \qquad \text{(Gleichung 6.1.2)}$$

Die Gleichung 6.1.2 wurde in dieser Arbeit verwendet, um den lokalen Krümmungsradius eines umgeformten Blechs über dessen Länge auszuwerten. Dabei wurde die lokale Krümmung, wie in der Abbildung 23 auf der rechten Seite zu sehen, für jeden Knoten x_j über der Blechlänge ausgewertet. An jeder ausgewerteten Stelle wurde die Längenänderung der Außenkanten von vier benachbarten Elementen (rot markierte Knotenpfade) berücksichtigt. Mit dieser Methodik konnte der lokale Krümmungsradius mit einer feinen Auflösung für die simulierten Umformversuche ermittelt werden.

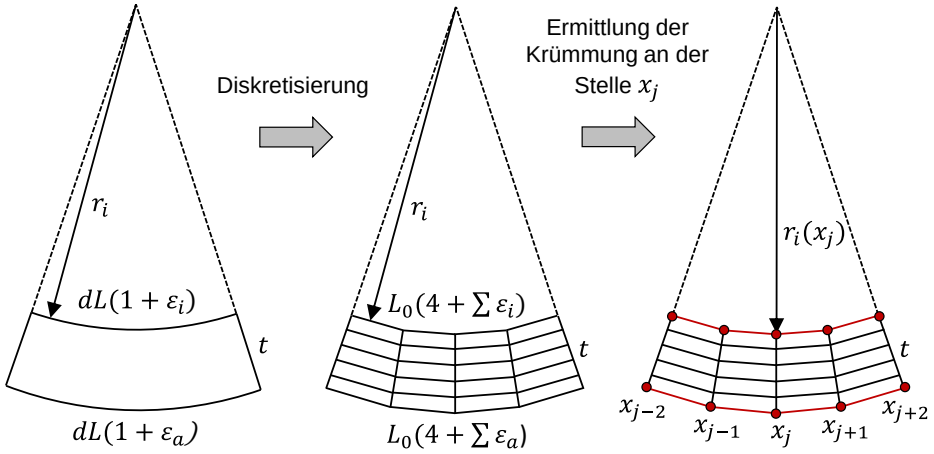

Abbildung 23: Methodik zur Ermittlung der lokalen Blechkrümmung über der Blechlänge.

Ein beispielhaftes Diagramm für den derart ermittelten Zusammenhang zwischen der lokalen Blechkrümmung und der Blechlänge ist in der Abbildung 24 auf der linken Seite dargestellt. Hervorzuheben ist, dass die Blechlänge normiert werden musste, damit das KNN Informationen aus dem Umformverhalten von Blechen unterschiedlicher Länge ableiten kann. Auffällig an dem Kurvenverlauf ist, dass es sehr große Ausschläge des lokalen Krümmungsradius an den Blechenden gibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Blech in diesen Bereichen nur gering bis gar nicht umgeformt wurde. In dem umgeformten Bereich ist der Krümmungsradius dagegen über eine große Länge sehr einheitlich.

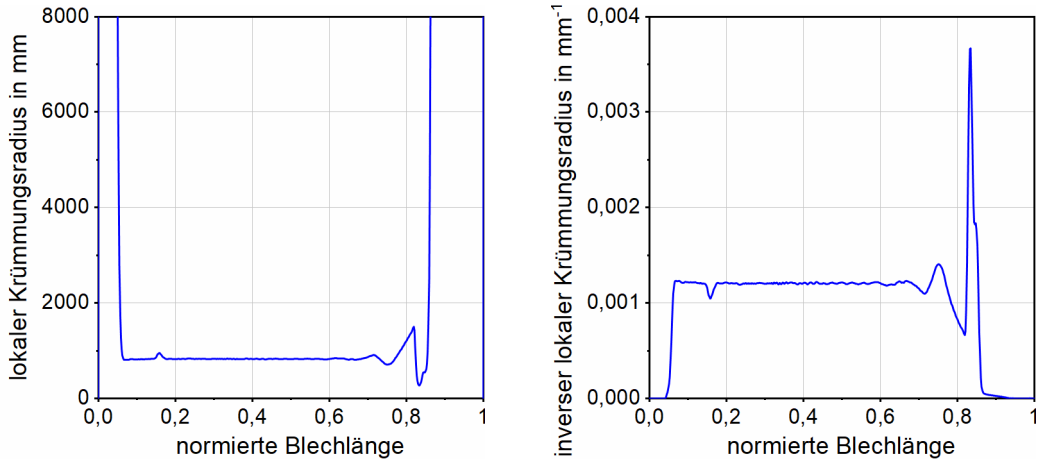

Abbildung 24:Ermittelte lokale Krümmung (links) und reziproke lokale Krümmung (rechts) über der normierten Blechlänge.

Die in dem Kurvenverlauf enthaltenen Ausreißerwerte stellen ein Problem für das Training des KNN dar. Sie sind für das Umformergebnis zwar nur von nachrangiger Bedeutung, nehmen aber einen großen Teil des durch das KNN abzubildenden Wertebereichs ein. Dadurch würde der Fokus bei der Informationsverarbeitung durch das KNN auf einem unvorteilhaften Datenbereich liegen. Um dieses Problem zu umgehen, wurden die Diagramme vor der Übergabe an das KNN, wie auf der rechten Seite von Abbildung 24 zu sehen, angepasst. Es wurde das Reziproke des Krümmungsradius gebildet, sodass die Ausreißerwerte gegen Null tendieren und nur noch einen kleinen Teil des Wertebereichs einnehmen.

Insgesamt wurde das KNN somit mit den Daten aus 100 Umformsimulationen trainiert, wobei jeder Datensatz die in der Tabelle 4 aufgeführten Umformparameter sowie die Wertepaare des reziproken Krümmungsradius über der normierten Blechlänge umfasste.

6.2 Modellparameter

Das künstliche neuronale Netz wurde mit der Software Matlab R2020 unter der Verwendung der Neural-Network-Fitting-App erstellt. Für das Training des KNN wurde der Datenbestand in Eingangs- und Ausgangsdaten separiert. Als Eingangsdaten wurden die Umformparameter und die Werte der normierten Blechlänge verwendet. Als Ausgangsdaten wurden die zu der normierten Blechlänge zugehörigen Werte des reziproken lokalen Krümmungsradius verwendet.

Für das zu entwickelnde KNN wurde grundsätzlich die in der Abbildung 25 dargestellte Topologie festgelegt. Bei dieser handelt es sich um ein vorwärtsgerichtetes Netzwerk mit zwei Schichten, wobei die erste Schicht (verdeckte Schicht) aus Neuronen mit sigmoidalen Aktivierungsfunktionen und die zweite Schicht (Ausgangsschicht) aus einem Neuron mit einer linearen Aktivierungsfunktion besteht. Bei der Ermittlung der Neuronenanzahl für die verdeckte Schicht besteht die Herausforderung darin, eine gute Anpassung der vorgegeben Trainingsdaten durch das KNN zu erreichen und gleichzeitig zu gewährleisten, dass es zu keiner Überanpassung der Trainingsdaten durch zu viele Neuronen kommt. Durch eine solche Überanpassung würde die Generalisierungsfähigkeit des KNN verloren gehen. Für das Prognosemodell konnte ermittelt werden, dass mit 20 Neuronen in der verdeckten Schicht sowohl eine gute Anpassung an die Trainingsdaten als auch eine gute Generalisierungsfähigkeit erreicht werden kann (vgl. Kapitel 6.3).

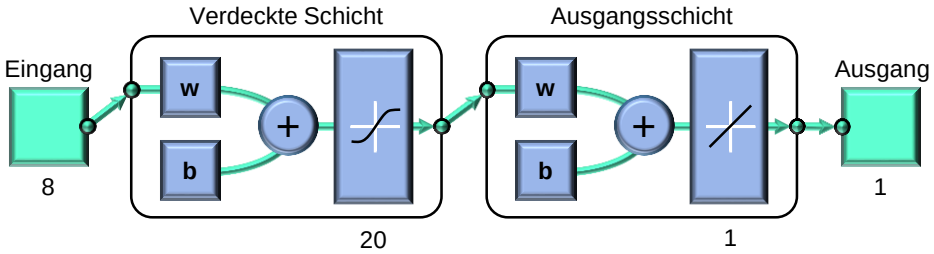

Abbildung 25: Topologie des erstellten KNN.

Für das Training des KNN wurde der Datenbestand randomisiert und zu 70% in Trainingsdaten sowie zu jeweils 15% in Validierungs- und Testdaten aufgeteilt. Als Trainings-Algorithmus wurde der Bayesian-Regularization-Algorithmus verwendet. Mit diesem konnte das KNN mit einem R-Wert von 0,98 an die Testdaten angepasst werden, was eine sehr gute Abbildung der Daten bedeutet.

6.3 Verifizierung der Prognosefähigkeit

Die Prognose- oder auch Generalisierungsfähigkeit des KNN beschreibt dessen Fähigkeit, innerhalb des trainierten Parameterbereichs die mathematische Abhängigkeit der Zielgröße von den Eingangsgrößen in guter Näherung zu beschreiben.

Um die Prognosefähigkeit des KNN zu untersuchen, wurden verschiedene Parameterkonfigurationen der Umformparameter ausgewählt. Ausgehend von diesen wurden einzelne Parameter variiert, um neue Konfigurationen zu erhalten, die nicht im Datenbestand der Trainingsdaten des KNN enthalten waren. Für diese neu erstellten Konfigurationen von Umformparametern wurden mit dem KNN Berechnungen für das Umformergebnis angestellt. Zur Verifizierung der Prognosen des KNN wurden die Berechnungen mit zusätzlich durchgeführten FE-Simulationen verglichen.

Auf der linken Seite von Abbildung 26 sind die Berechnungsergebnisse des KNN für die Variation des Zustellwinkels der Seitenwalze zu sehen. Hierbei wurden mit den Zustellwinkeln von 30° und 40° zwei dem KNN unbekannte Ausprägungsstufen untersucht. Die Referenzergebnisse der FE-Simulation sind durch die gestrichelten Linien dargestellt.

Anhand der Kurvenverläufe wird deutlich, dass das KNN die Berechnungen der FE-Simulation mit sehr guter Genauigkeit vorhersagen konnte. Insbesondere der nahezu konstante Bereich im mittleren Abschnitt der Blechlänge, welcher maßgeblich die durch den Umformprozess eingeprägte Krümmung repräsentiert, konnte durch das KNN sehr gut vorhergesagt werden. Darüber hinaus wurden die Lage und Höhe von Peaks in guter Näherung ermittelt.

Auf der rechten Seite von Abbildung 26 sind die Ergebnisse für die Variation der Blechdicke zu sehen, wobei Dicken von 70 und 80 mm untersucht wurden. Auch hier zeigt sich, dass das KNN die Ergebnisse der FE-Simulation in sehr guter Näherung vorhersagen konnte. Insgesamt erkennt das KNN den Zusammenhang, dass eine steigende Blechdicke bei einem konstantem Zustellwinkel der Seitenwalze zu einer größeren Blechkrümmung führt.

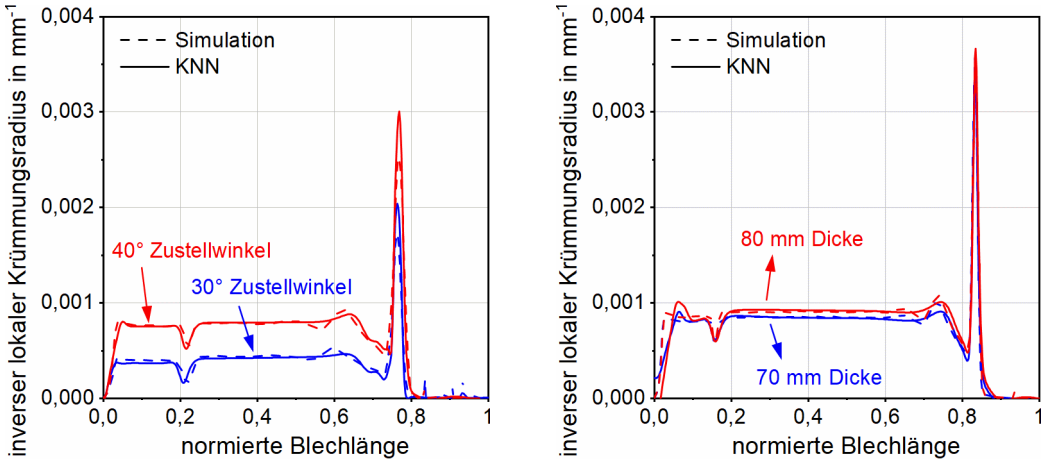

Abbildung 26: Links: Untersuchung der Prognosefähigkeit des KNN bei Variation des Zustellwinkels der Seitenwalze (Blechabmessungen: 3750x1400x75 mm, Werkstoff: S355). Rechts: Prognosefähigkeit bei Variation der Blechdicke (Blechabmessungen: 5250x1400xDicke mm, Werkstoff: S355, Zustellwinkel: 41,84°).

In der Abbildung 27 sind auf der linken Seite die Ergebnisse für die Variation der Blechlänge zu sehen. Auch hier kann das KNN die im mittleren Abschnitt erreichte Krümmung in sehr guter Näherung vorhersagen. Bemerkenswert ist weiterhin, dass auch die Lage der Peaks, wie etwa die erhöhte Krümmung an der Stelle des Anbiegeknicks, sehr zuverlässig erkannt wird. Das KNN erkennt hier, dass der Anbiegeknick mit steigender Blechlänge relativ zur Gesamtlänge an das Blechende verschoben wird, da die Länge des unverformten Blechabschnitts konstant bleibt.

Als letztes Beispiel sind auf der rechten Seite von Abbildung 27 die Ergebnisse für die Variation der Werkstofffestigkeit dargestellt. Hier zeigt sich ebenfalls die gute Prognosefähigkeit des trainierten KNN. Das KNN kann die Berechnungen des FE-Modells in sehr guter Näherung abbilden. Der Zusammenhang einer kleineren erreichten Krümmung mit steigender Werkstofffestigkeit wird richtig erkannt.

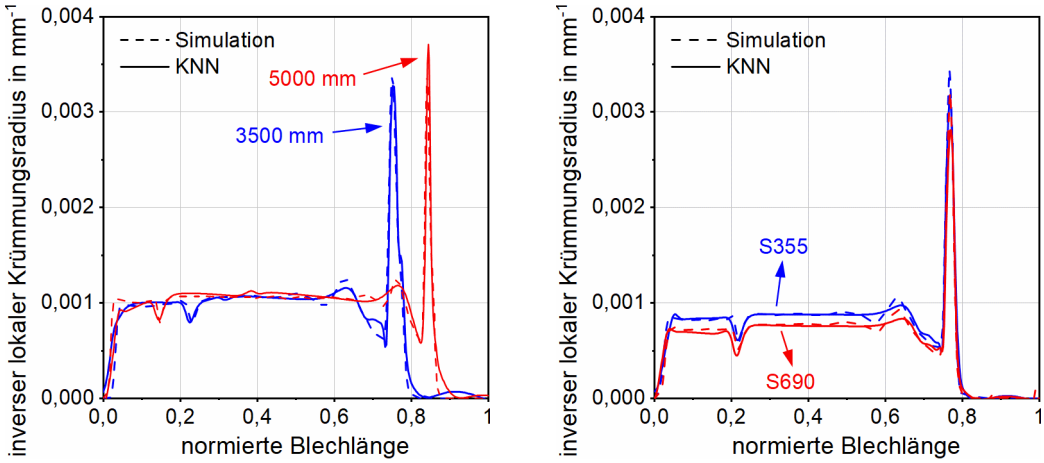

Abbildung 27: Links: Untersuchung der Prognosefähigkeit des KNN bei Variation der Blechlänge (Blechabmessungen: Längex1150x62,5 mm, Werkstoff: S690, Zustellwinkel 49,84°). Rechts: Prognosefähigkeit bei Variation des Werkstoffs (Blechabmessungen: 3750x1400x75 mm, Zustellwinkel: 41,84°).

Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass das KNN die Berechnungen des FE-Modells und damit den Zusammenhang zwischen den Umformparametern und dem Umformergebnis beim Walzrunden sehr zuverlässig vorhersagen kann. Dabei benötigt es für die Berechnung des Umformergebnisses auf einer herkömmlichen Workstation nur wenige Sekunden, was einen erheblichen Vorteil gegenüber der rechenaufwändigen FE-Simulation darstellt.

6.4 Berechnungsroutine zur geometrischen Visualisierung der Umformprognosen

Damit die durch das KNN erstellten Umformprognosen für einen Anwender auch geometrisch visualisiert werden können, wurde eine Berechnungsroutine erstellt, die aus dem Verlauf des Krümmungsradius über der Blechlänge die zugehörige Blechkontur erzeugen kann. Dazu wird die Blechkontur im Wesentlichen aus einzelnen Stabelementen aufgebaut, die in einem Winkel zueinanderstehen, der der Blechkrümmung entspricht.

Um dies zu erreichen, wird die Kurve des Blechradius über der Blechlänge, wie in der Abbildung 29 dargestellt, in einem ersten Arbeitsschritt in einzelne Abschnitte der Länge L_0 diskretisert. Durch die hierbei gewählte Diskretisierungsfeinheit wird die Genauigkeit der Konturerzeugung bestimmt, wobei die maximale Feinheit von der Auflösung der

Ausgangsdaten abhängt. Da in der FE-Simulation mit einer Elementkantenlänge von 10 mm gearbeitet wurde, wurde diese Länge auch für die Diskretisierungslänge verwendet. Für jeden der i diskretisierten Abschnitte wird der Mittelwert des Krümmungsradius r_i ermittelt.

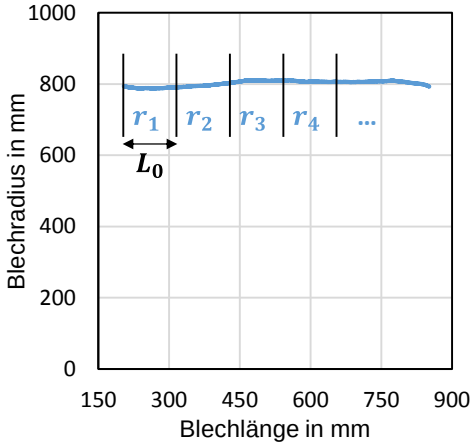

Abbildung 28: Diskretisierung einer Radius-Blechlänge-Kurve zur Visualisierung der Blechkontur.

Darauf aufbauend kann die Blechkontur nach der in der Abbildung 29 gezeigten Methodik konstruiert werden. Hierzu wird zunächst ein gleichschenkliges Dreieck erstellt. Dessen Schenkellängen entsprechen dem mittleren Radius r_1 im ersten Diskretisierungsabschnitt und die Länge der dritten Seite entspricht der Diskretisierungslänge L_0. Im zweiten Schritt wird das erste Dreieck um ein weiteres zu ihm kongruentes Dreieck ergänzt. Dies ist eindeutig möglich, da alle Innenwinkel und alle Seitenlängen des Dreiecks bekannt sind. Die in der Abbildung 29 dargestellte breite, schwarze Linie, die dadurch schrittweise aufgebaut wird, entspricht der Außenkontur des Blechs.

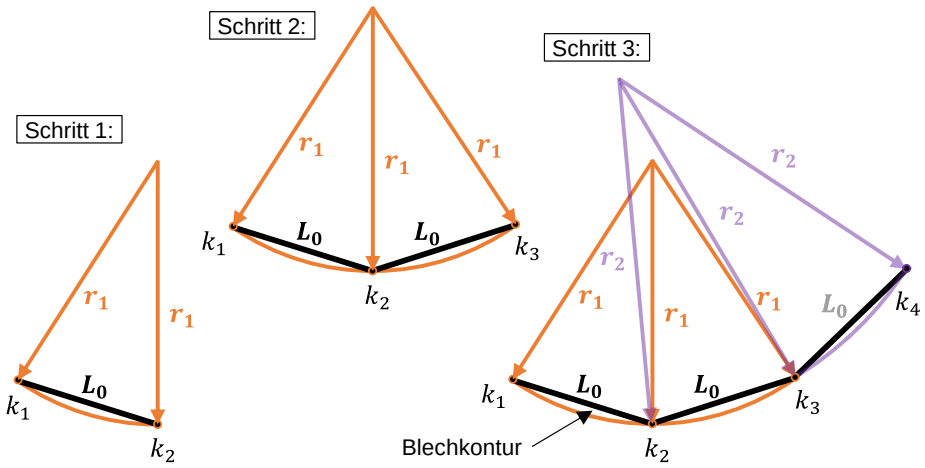

Abbildung 29: Visualisierung der Blechkontur aus einer diskretisierten Radius-Blechlänge-Kurve.

Im dritten Schritt und in allen weiteren Schritten bis zum letzten Diskretisierungsabschnitt wird die bereits erzeugte Blechkontur um ein weiteres gleichschenkliges Dreieck erweitert. Hierzu wird ein weiteres Paar zueinander kongruenter gleichschenkliger Dreiecke erzeugt, wobei die Schenkellänge dem mittleren Krümmungsradius in dem zugehörigen Diskretisierungsabschnitt entspricht. In der Abbildung 29 ist dies für den zweiten Diskretisierungsabschnitt mit dem Radius r_2 dargestellt. Für die Fortsetzung der Konstruktion der Blechkontur wird das neu erzeugte Dreieckspaar wie in der Abbildung 29 dargestellt, in die bereits bestehende Konstruktion eingepasst. Mathematisch kann dies einfach gelöst werden, da die Innenwinkel der gleichschenkligen Dreiecke aufgrund der bekannten Seitenlängen bekannt sind.

In diesem Projekt wurde eine Berechnungsroutine in Matlab programmiert, mit der die Kontur eines Blechs nach der beschriebenen Methodik konstruiert werden kann. Somit können die Umformprognosen des KNN auch geometrisch visualisiert werden. In der Abbildung 30 ist auf der linken Seite eine beispielhafte geometrische Visualisierung der Kontur eines Blechs nach dieser Methodik dargestellt.

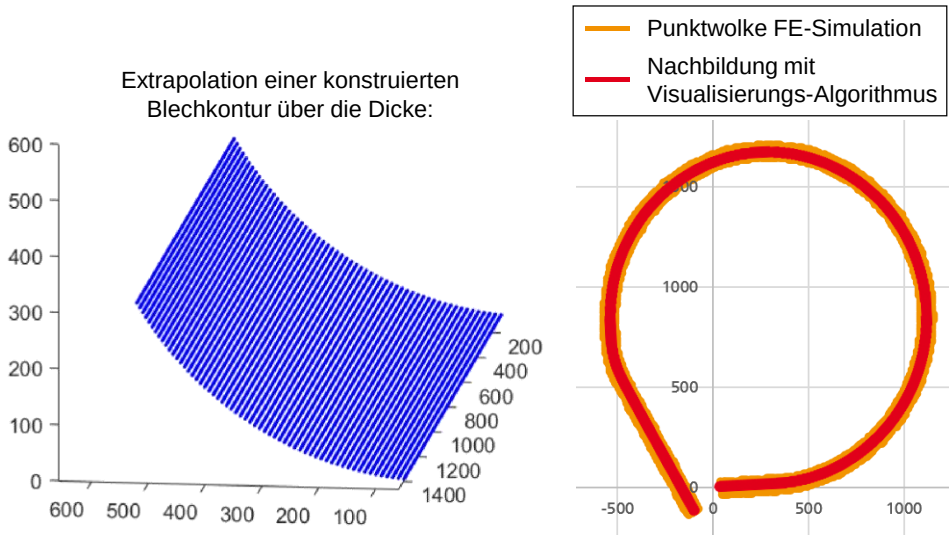

Abbildung 30: Links: 3D-Darstellung einer konstruierten Blechkontur. Rechts: Verifizierung der Genauigkeit des Visualisierungs-Algorithmus.

Dabei wurde die ursprüngliche 2D-Kontur zur räumlichen Darstellung über die Tiefe extrapoliert. Auf der rechten Seite von Abbildung 30 wurde die Genauigkeit der Visualisierungs-Algorithmus am Beispiel einer FE-Simulation untersucht. Dazu wurde die Lage der FE-Knoten eines umgeformten Blechs als Punktewolke in Matlab eingelesen und mit der aus der zugehörigen Krümmungsradius-Blechlänge-Kurve konstruierten Kontur verglichen. Hieran wird deutlich, dass der entwickelte Berechnungsalgorithmus gut dazu geeignet ist, die Kontur eines umgeformten Blechs nachzubilden.

7 Entwicklung einer Prozessüberwachung für das Walzrunden

Im Rahmen des Projekts wurde eine Prozessüberwachung (PÜ) entwickelt, mit der das Umformergebnis beim Walzrunden vermessen werden kann. Die Prozessüberwachung stellt damit eine wichtige Grundlage für das entwickelte KI-basierte Prognosemodell dar, welches mithilfe der aufgenommenen Messergebnisse adaptiv verbessert werden kann.

7.1 Anforderungen an die Prozessüberwachung

Die zu entwickelnde Prozessüberwachung soll insbesondere von KMU wirtschaftlich eingesetzt werden können. Aus diesem Grund wurden bei der Entwicklung die folgenden Anforderungen an die Prozessüberwachung gestellt:

- kostengünstig
- einfache Nachrüstbarkeit bei bereits bestehenden Rundbiegemaschinen
- flexible Einsatzfähigkeit unabhängig von der Baugröße der Rundbiegemaschine
- Bereitstellung von Messergebnissen in Echtzeit
- schnelle Verarbeitung und Archivierung der Messergebnisse zum Training eines KI-basierten Prognosemodells

7.2 Arbeitshypothesen

Die Entwicklung der Prozessüberwachung folgt den nachfolgenden Arbeitshypothesen:

- Das Umformergebnis kann über den Krümmungsradius des umgeformten Blechs quantifiziert werden.
- In einem Abschnitt, der mit einer einheitlichen Maschineneinstellung rundgebogen wurde, hat das Blech die Form einer idealen Kreiskontur.
- Es werden drei Punkte auf dem Blech benötigt, um den Radius der Kreiskontur eindeutig bestimmen zu können:
  1. Die Lage eines ersten Blechpunkts kann durch vereinfachte Annahmen zur Kontaktausbildung mit den zentrischen Walzen erhalten werden. Dabei wird, wie in der Abbildung 31 dargestellt, angenommen, dass das Blech horizontal im Walzspalt liegt und der Kontaktpunkt zu den Walzen in deren Symmetrieachse liegt.
  2. Der zweite Blechpunkt wird aus dem Kontakt mit der Seitenwalze erhalten.
  3. Der dritte Blechpunkt kann durch ein Messsystem ermittelt werden.

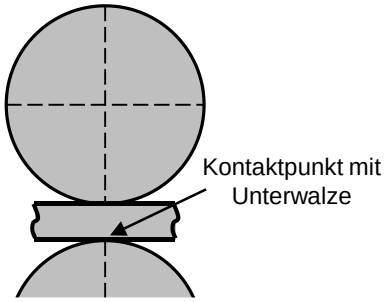

Abbildung 31: Vereinfachte Annahme zum Kontakt des Blechs mit den zentrischen Walzen.

7.3 Entwickeltes Messkonzept

Basierend auf den formulierten Anforderungen und Arbeitshypothesen wurde ein Messkonzept entwickelt, mit dem die Kreiskontur des umgeformten Blechs ermittelt werden kann. Dieses Messkonzept beruht auf einer numerischen Berechnungsroutine, die den gesuchten Kreisfit anhand von zwei bekannten Blechpunkten und einer geometrischen Nebenbedingung berechnen kann. Die Berechnungsroutine wurde in der Software Matlab programmiert.

Der Bezugspunkt der Berechnungsroutine ist der Mittelpunkt der Oberwalze. Als Eingangsgrößen werden neben zwei Blechpunkten die Radien der Seiten- und Oberwalze sowie die Position der Seitenwalze benötigt. Wie in Kapitel 7.2 beschrieben ist der erste Blechpunkt der Kontaktpunkt des Blechs mit der Unterwalze. Seine Koordinaten x_{P1} und y_{P1} ergeben sich mit den beschriebenen vereinfachten Annahmen eindeutig aus dem Radius der Oberwalze und der Blechdicke:

$$x_{P1} = 0 \qquad \text{(Gleichung 7.3.1)}$$

$$y_{P1} = -Radius_{Oberwalze} - Dicke_{Blech} \qquad \text{(Gleichung 7.3.2)}$$

Die Koordinaten des zweiten Blechpunktes werden mithilfe eines Messsystems ermittelt. Hierzu wird der im nachfolgenden Kapitel beschriebene Laserdistanzsensor (LDS) verwendet. Dieser wird mit einem definierten Abstand neben

der Seitenwalze positioniert und in einem Winkel von 45° zum Boden ausgerichtet. Anhand der Position und der Abstandsmessung des Sensors ergeben sich die Koordinaten des zweiten Blechpunkts x_{P2} und y_{P2} wie folgt:

$$x_{P2} = x_{Position_{LDS}} - cos(45°) \cdot L_{Abstandsmessung} \quad \text{(Gleichung 7.3.3)}$$

$$y_{P2} = y_{Position_{LDS}} + sin(45°) \cdot L_{Abstandsmessung} \quad \text{(Gleichung 7.3.4)}$$

Die entwickelte Berechnungsroutine arbeitet mit mehreren Iterationsschleifen und einem Abbruchkriterium. Im Wesentlichen wird ein Kreisfit-Algorithmus nach Levenberg-Marquardt verwendet, um einen Kreis durch die beiden Blechpunkte zu fitten. Jedoch benötigt dieser Algorithmus abgeschätzte Anfangswerte für den Mittelpunkt und den Radius des Kreisfits. Um hierfür Werte zu ermitteln, wird vor der Durchführung der Iterationsschleifen ein weiterer Kreisfit-Algorithmus angewendet, der keine Anfangswerte benötigt. Hierfür wird der Kreisfit-Algorithmus nach Taubin verwendet.

Die Besonderheit bei der Durchführung dieses ersten Kreisfits ist, dass es zwei Möglichkeiten gibt, mit denen ein Kreis durch die beiden gegebenen Punkte gefittet werden kann. Wie in der Abbildung 32 dargestellt, kann der Kreis von zwei Seiten durch die beiden Punkte gelegt werden. Um den Kreisfit auf die richtige Seite zu orientieren, wird in diesem ersten Schritt ein provisorischer dritter Punkt zwischen den beiden Blechpunkten erzeugt und in die Menge der zu fittenden Punkte mit aufgenommen. Als Ergebnis aus dem Taubin-Fit werden ein Mittelpunkt und ein Kreisradius erhalten, die als Anfangswerte für den Algorithmus nach Levenberg-Marquardt verwendet werden können.

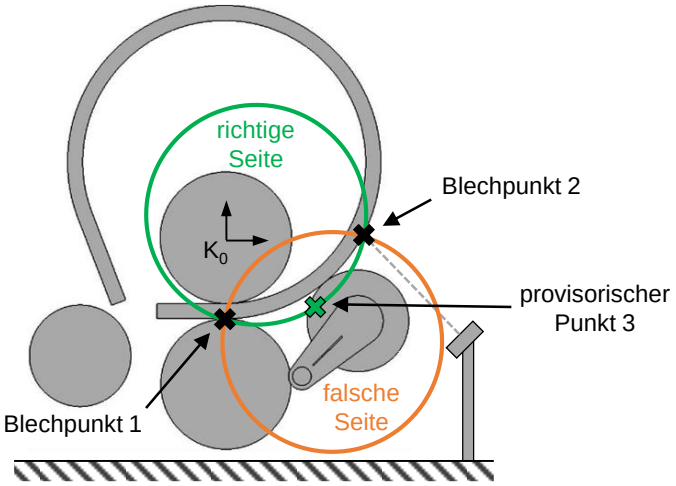

Abbildung 32:Orientierung des initialen Taubin-Fits mithilfe eines provisorischen zusätzlichen Punktes.

Mit den ermittelten Anfangswerten wird der Kreisfit nach Levenberg-Marquardt durchgeführt. Dieser wird iterativ verbessert, indem über eine geometrische Nebenbedingung überprüft wird, ob der Kreisfit der derzeitigen Iteration – ebenso wie das Blech – die Seitenwalze tangiert. Aus mathematischer Sicht ist das Tangieren der Seitenwalze erfüllt, wenn der Abstand der Mittelpunkte der Seitenwalze und des Kreisfits gleich der Summe ihrer Radien ist. Die Berechnungsroutine bildet nach jeder Iteration die Differenz aus der Summe der Radien und dem Abstand der Mittelpunkte und vergleicht diese mit einem definierten Schwellwert, der als Abbruchkriterium dient. Dabei sind, wie in der Abbildung 33 dargestellt, drei Ergebnisse möglich:

1. Die Differenz ist positiv und ihr Betrag ist größer als der Schwellwert. In diesem Fall ist der gefittete Kreis zu klein und schneidet die Seitenwalze. Als Konsequenz wird eine weitere Iteration durchgeführt. Dabei wird der Radius, der dem Levenberg-Marquardt Algorithmus als Anfangswert übergeben wird, um den Betrag der Differenz erhöht. Somit wird in der nächsten Iteration ein größerer Kreis erzeugt.
2. Die Differenz ist negativ und ihr Betrag ist größer als der Schwellwert. In diesem Fall ist der gefittete Kreis zu groß und berührt die Seitenwalze nicht. Als Konsequenz wird eine weitere Iteration durchgeführt. Dabei wird der Radius, der dem Levenberg-Marquardt Algorithmus als Anfangswert übergeben wird, um den Betrag der Differenz reduziert. Somit wird in der nächsten Iteration ein kleinerer Kreis erzeugt.
3. Der Betrag der Differenz ist kleiner als der Schwellwert. In diesem Fall ist das Ergebnis hinreichend genau. Der Kreisfit tangiert die Seitenwalze in guter Näherung. Wenn dieses Ergebnis erreicht wird, wird die Iterationsschleife verlassen und der ermittelte Radius als Zielgröße ausgegeben. Diese Zielgröße repräsentiert die Krümmung des Blechs an seiner Außenseite.

Mit dem entwickelten numerischen Verfahren kann ermittelt werden, welche Krümmung mit einer eingestellten Seitenwalzenposition am Biegepunkt in der Nähe des Walzspalts in das Blech eingeprägt wird. Die Voraussetzung hierfür ist, dass das Blech im Messbereich zwischen den beiden eingegebenen Blechpunkten einheitlich umgeformt wurde. Aus diesem Grund muss das Blech nach dem Anbiegen erst so weit vorgeschoben werden, dass die angebogene Stelle

die Messstelle des LDS passiert hat, bevor die PÜ zuverlässige Ergebnisse liefern kann. Der erforderliche Rechenaufwand ist gering, sodass die PÜ in Echtzeit Messergebnisse bereitstellen kann.

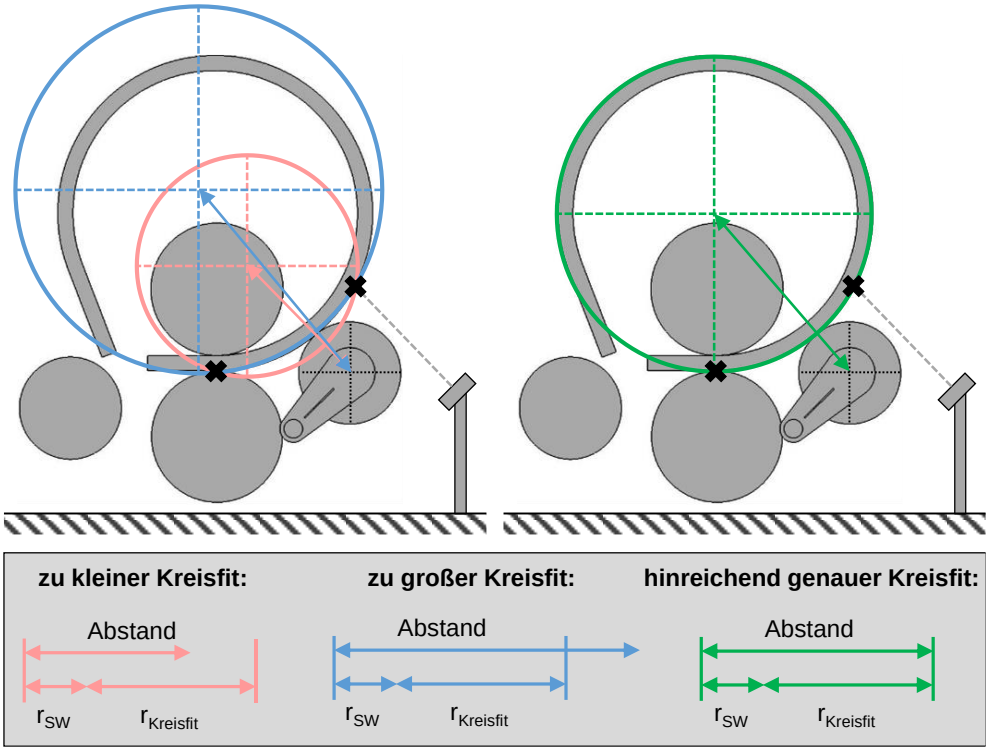

Abbildung 33: Grafische Darstellung eines zu kleinen, zu großen und hinreichend genauen Kreisfits.

Damit die durch die Berechnungsroutine ermittelte Krümmung einer Position auf dem Blech zugewiesen werden kann, wird das Messsystem durch einen Drehgeber komplettiert, der an der Seitenwalze angelegt wird und mit dem der Vorschub des Blechs gemessen wird. Insgesamt kann die Umformung eines Blechs somit kontinuierlich in Echtzeit vermessen werden.

7.4 Verwendete Messtechnik

Für die Prozessüberwachung wird ein Laserdistanzsensor vom Typ OM70-L1500.HH1500.VI von der Firma Baumer verwendet, vgl. Abbildung 34. Dieser arbeitet nach dem Triangulationsprinzip. Hierbei wird ein Laserstrahl unter einem bekannten Winkel auf die Oberfläche des Messobjekts projiziert. Der Laser wird von der Oberfläche des Messobjekts reflektiert und von einer Empfängerzelle des Sensors detektiert. Anhand des Winkels des einfallenden Lasers kann der Abstand zum Messobjekt berechnet werden. Störende Reflexionen und streuendes Licht werden von dem Sensor herausgefiltert. So sind sehr präzise Messungen möglich. Laut Herstellerangaben arbeitet der LDS in einem Messbereich von 150 bis 1500 mm bei einer Messauflösung von 13 bis 125 µm, einer Wiederholgenauigkeit von 3 bis 63 µm und einer Linearitätsabweichung von ±0,32 %.

Für die Halterung des LDS wurde ein Stativ bestehend aus Strebenprofilen und einer Fußplatte konstruiert. Das Stativ besitzt ein Drehgelenk, sodass der Sensor in einem definierten Winkel zum Boden ausgerichtet werden kann. Für die im Rahmen des Projekts durchgeführten Messungen wurde ein Winkel von ca. 45° verwendet, der mithilfe eines digitalen Winkelmessers eingestellt wurde.

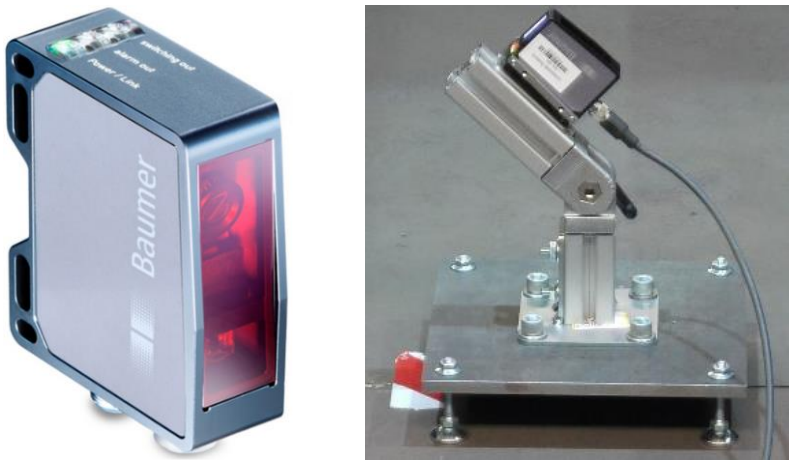

Abbildung 34: Verwendeter Laserdistanzsensor mit konstruierter Halte-Konstruktion.

Als Drehgeber wird ein Inkrementalgeber vom Typ RV3100 von der Firma ifm electronic verwendet, vgl. Abbildung 35. Dieser erzeugt bei der Drehung seiner Welle eine Anzahl von Impulsen, die nach einem magnetischen Prinzip abgetastet werden, sodass die Drehrichtung und die zurückgelegte Strecke gemessen werden können. Die Messauflösung des Sensors kann im Bereich von 1 bis 10.000 Inkrementen pro Umdrehung eingestellt und somit hinsichtlich Genauigkeit und Drehgeschwindigkeit an die Messaufgabe angepasst werden. Für die Verwendung in der Prozessüberwachung wurde der Drehgeber auf 512 Inkremente pro Umdrehung eingestellt. Auf die Welle des Drehgebers wurde ein Messrad mit einem Umfang von 500 mm montiert. Die Montage des Drehgebers an der Rundbiegemaschine ist in der Abbildung 35 auf der rechten Seite dargestellt. Mit einer Halte-Konstruktion bestehend aus Magnetfuß und Gelenkarm wird der Drehgeber an dem Gehäuse der Seitenwalzenlagerung befestigt. Zur Messung des Vorschubs wird das Messrad an die Seitenwalze angelegt. Laut Herstellerangaben besitzt der Drehgeber eine Genauigkeit von 0,1°, was bei dem verwendeten Messrad einem Vorschubweg von 0,45 mm entspricht.

Abbildung 35: Verwendeter Inkrementalgeber (links) und zugehörige Halte-Konstruktion (rechts).

Für die Signalverarbeitung wird ein Echtzeitcontroller vom Typ CompactRio von der Firma National Instruments verwendet. Dieser wird über das analoge Eingangsmodul NI-9219 mit dem LDS und über das Digitalmodul NI-9375 mit dem Drehgeber verbunden. Der Echtzeitcontroller selbst wird über ein LAN-Kabel mit einem Laptop verbunden, mit dem die Messdaten in der Software LabVIEW archiviert werden. Die Berechnung der Blechkrümmung erfolgt über ein Matlab-Programm.

7.5 Erprobung an FE-Simulationen

Die Funktionstauglichkeit der Berechnungsroutine der Prozessüberwachung wurde als erstes theoretisch anhand von FE-Simulationen erprobt. In Kapitel 8.6 werden die Ergebnisse der theoretischen Erprobung mit den Ergebnissen aus einer experimentellen Untersuchung verglichen und diskutiert.

7.5.1 Untersuchungsumfang und Methodik

Der Untersuchungsumfang der theoretischen Erprobung ist an das Experiment aus Kapitel 8 angelehnt. Es wurde das Walzrunden eines Blechs aus dem Werkstoff S355 mit den Abmessungen 2660 x 1400 x 30 mm simuliert. Zur Untersuchung des Einflusses der verwendeten Biegeseite auf die Genauigkeit der Messungen der Prozessüberwachung

(vgl. Kapitel 8.2) wurde sowohl das Biegen mit der einlassseitigen Seitenwalze als auch das Biegen mit der auslassseitigen Seitenwalze untersucht. Für jede Biegeseite wurde eine Umformung mit einem niedrigen, einem mittleren und einem hohen Umformgrad simuliert (Zustellwinkel von 30°, 40° bzw. 50°).

Tabelle 5: Untersuchungsumfang der theoretischen Erprobung der Prozessüberwachung.

Untersuchte Zustellwinkel der aktiven Seitenwalze in Grad	
Einlassseitiges Biegen	Auslassseitiges Biegen
30,0°	30,0°
40,0°	40,0°
50,0°	50,0°

Für die Erprobung der Berechnungsroutine der PÜ wurden, wie in der Abbildung 36 dargestellt, bei jedem Versuch die Koordinaten eines Knotens oberhalb der auslassseitigen Seitenwalze gemessen. Diese repräsentierten den mit der PÜ gemessenen Blechpunkt. Weiterhin wurde ein Blechpunkt nach den Annahmen aus Kapitel 7.3 mithilfe des Radius der Oberwalze und der Blechdicke berechnet. Für die geometrische Nebenbedingung wurde der Zustellwinkel der auslassseitigen Seitenwalze verwendet. Der Grenzwert für das Verlassen der Iterationsschleife wurde auf 0,0001 mm gesetzt.

Zur Verifizierung der Messungen der PÜ wurden Vergleichsmessungen angestellt. Dazu wurden die Koordinaten von fünf Knoten hinter der auslassseitigen Seitenwalze ausgewählt, vgl. Abbildung 36. Durch die ausgewählten Knoten wurde ein Kreisfit nach dem Algorithmus von Taubin berechnet, dessen Radius als Referenzwert diente.

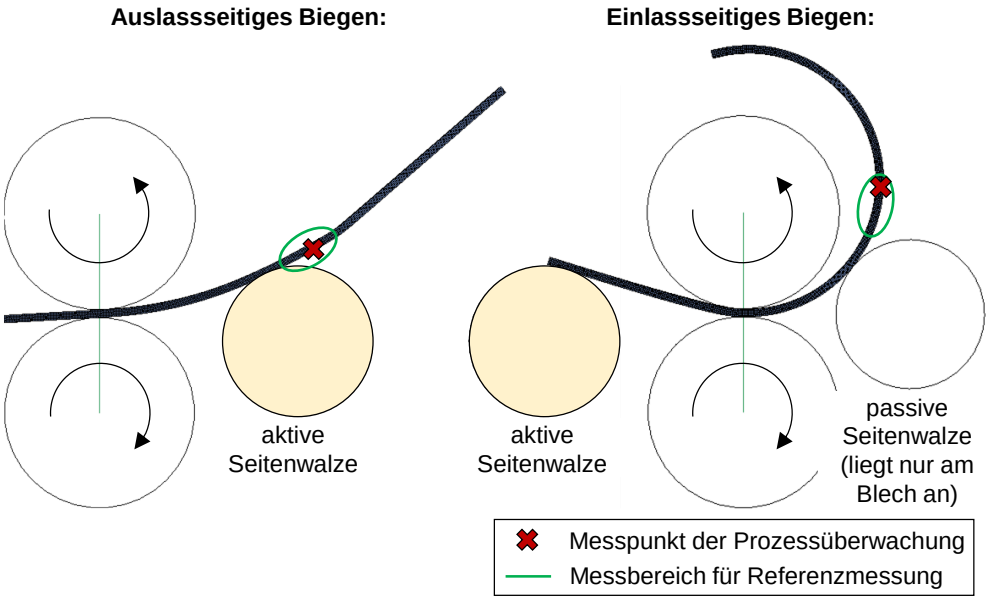

Abbildung 36: Verwendete Messstellen zur theoretischen Erprobung der Berechnungsroutine (Zustellwinkel von 40°).

7.5.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in der Tabelle 6 aufgeführt. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass die relative Messungenauigkeit der Berechnungsroutine beim auslassseitigen Biegen vergleichsweise größer ist. Hier ist sie insbesondere bei dem niedrigen Zustellwinkel von 30° mit 39,1% groß. Bei einem größeren Umformgrad ist die relative Messungenauigkeit mit 3,3 bzw. 6,7% deutlich kleiner. Dies ist vor allem auf den elastischen Verformungsanteil zurückzuführen, der wie in Kapitel 8.2 beschrieben, beim auslassseitigen Biegen mit der Prozessüberwachung mitgemessen wird und somit zu einer Überschätzung der tatsächlich erreichten Umformung führt. Da die elastische Rückfederung mit steigendem Umformgrad abnimmt, nimmt hiermit auch die relative Messungenauigkeit der PÜ ab.

Im Gegensatz dazu ist die Messungenauigkeit beim einlassseitigen Biegen unabhängig vom Zustellwinkel sehr gering. Die relative Messunsicherheit beträgt hier maximal 2,0% bei einem Zustellwinkel von 30°. Dieser Unterschied ist vor allem darauf zurückzuführen, dass beim einlassseitigen Biegen, wie in Kapitel 8.2 beschrieben, mithilfe der Prozessüberwachung nahezu kein elastischer Verformungsanteil mitgemessen wird. Dass trotz der Vermeidung der Erfassung von elastischer Verformung noch eine geringe Restunsicherheit besteht, ist vermutlich auf die vereinfachten Annahmen bei der Berechnung der Blechkrümmung zurückzuführen. So wird für die Berechnung des Kontaktpunkts des Blechs mit der Unterwalze angenommen, dass die Unterwalze ideal starr gelagert ist, wobei die Nachgiebigkeit der Lagerung im FE-Modell berücksichtigt wird. Eine weitere Rolle spielt die vereinfachte Annahme einer ideal kreisrunden Biegung des Blechs, was einem einheitlich über die Vorschublänge eingeprägten Biegemoment entspricht. Diese Idealisierung

trifft jedoch nur in guter Näherung zu, da aus dem Eigengewicht des Blechs ein zusätzliches Biegemoment resultiert, dass sich mit dem eingeprägten Moment überlagert, und dass sich zudem im Laufe des Vorschubs durch die Verschiebung des Blechschwerpunkts verändert. Da diese Faktoren jedoch nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Messergebnis haben, kann das Walzrunden mithilfe der PÜ beim einlassseitigen Biegen mit sehr guter Genauigkeit vermessen werden. Die erreichte Messungenauigkeit entspricht einer in der Literatur definierten Zielgröße von maximal ±3% für die Vermessung des Umformergebnisses beim Walzrunden [1].

Tabelle 6: Ergebnisse der Erprobung der Berechnungsroutine an Simulationsdaten.

Zustellwinkel in Grad	Berechneter Krümmungsradius in mm					
	Auslassseitiges Biegen			Einlassseitiges Biegen		
	PÜ	Referenz	rel. Fehler	PÜ	Referenz	rel. Fehler
30,0	7157,0	11761,4	39,1%	2618,5	2672,5	2,0%
40,0	4092,4	3959,8	3,3%	1089,0	1093,7	0,4%
50,0	2161,5	2317,6	6,7%	912,1	929,5	1,9%

Unabhängig von der Prozessüberwachung fällt bei der Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 6 auf, dass beim einlassseitigen Biegen bei gleichem Zustellwinkel ein deutlich größerer Umformgrad erreicht wird als beim auslassseitigen Biegen – obwohl die modellierte Rundbiegemaschine symmetrisch aufgebaut ist. Dieser Umstand kann damit erklärt werden, dass der Punkt der maximalen Krafteinleitung (Biegepunkt) beim einlassseitigen Biegen vor dem Walzspalt liegt und dass sich hierdurch eine größere Kontaktfläche mit den zentrischen Walzen ausbildet. Dagegen liegt der Biegepunkt beim auslassseitigen Biegen hinter dem Walzspalt, wodurch sich nur eine kleinere Kontaktfläche ausbilden kann. In der Abbildung 37 ist die simulierte Ausbildung des Biegepunkts für das aus- und einlassseitige Biegen bei einem Zustellwinkel der aktiven Seitenwalze von 40° gegenübergestellt.

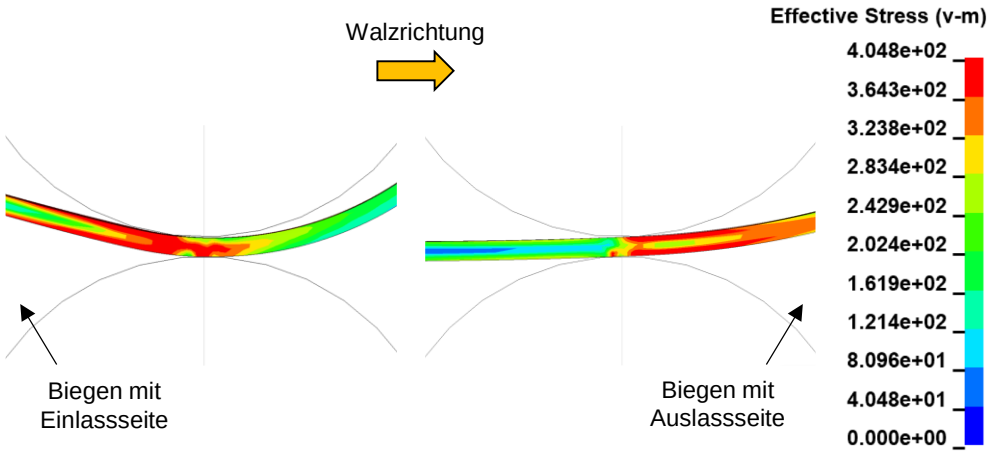

Abbildung 37:Ausprägung des Biegepunktes beim Biegen mit der Einlass- (links) und Auslassseite (rechts) bei einem Zustellwinkel von 40°.

8 Experimentelle Erprobung der Prozessüberwachung an einer realen 4-Walzen-Rundbiegemaschine

In diesem Kapitel wird beschrieben, wir die im Rahmen des Projekts entwickelte Prozessüberwachung (vgl. Kapitel 7) mithilfe von Praxisversuchen experimentell erprobt wurde.

8.1 Messaufbau

Für die Versuche wurde die in Kapitel 5.1.1 beschriebene 4-Walzen-Rundbiegemaschine verwendet. Bei dieser Maschine werden die Seitenwalzen mithilfe von Hebelführungen entlang von Kreisbahnen zugestellt. Der Messaufbau der Versuche ist in der Abbildung 38 dargestellt.

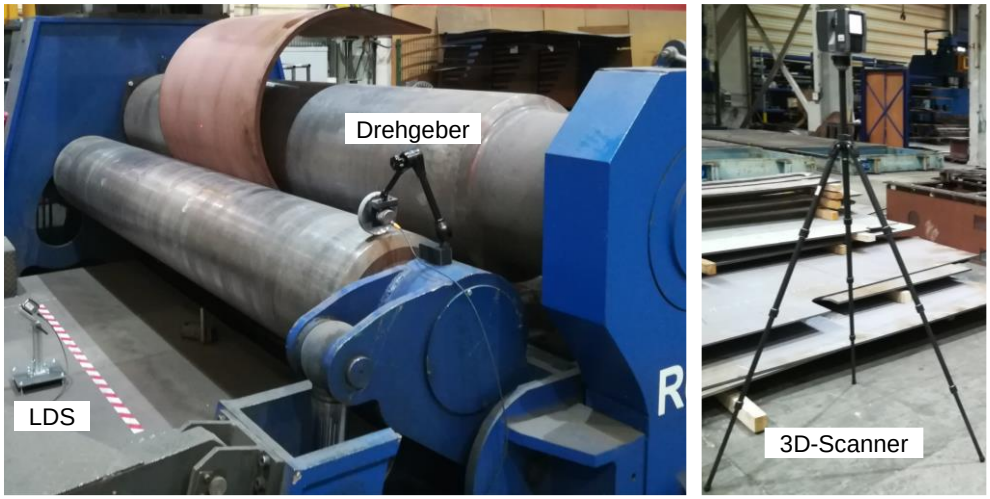

Abbildung 38: Messaufbau der experimentellen Versuche.

Für die Versuche wurde eine einheitliche Walzrichtung verwendet. Die Prozessüberwachung, bestehend aus Laserdistanzsensor (LDS) und Drehgeber, wurde auf der Auslassseite der Rundbiegemaschine installiert. Dazu wurde der LDS mit einem Messwinkel von 45° zum Hallenboden in einem definierten Abstand vor der Maschine positioniert. Für die Einstellung des Messwinkels wurde ein digitaler Winkelmesser verwendet. Der Drehgeber wurde mithilfe eines Magnetfußes und eines Gelenkarms auf der auslassseitigen Seitenwalze befestigt. Zur Bewertung der Messergebnisse der Prozessüberwachung wurden Referenzmessungen mit einem 3D-Laserscanner der Firma Faro vom Typ Focus 3D X 330 durchgeführt. Hierzu wurde der 3D-Scanner mit guter Einsicht in der Nähe der Rundbiegemaschine positioniert.

8.2 Untersuchungsumfang und Methodik

Der Untersuchungsumfang der experimentellen Erprobung ist in der Tabelle 7 aufgelistet. Im Rahmen der Versuche wurden fünf Bleche mit unterschiedlichen Abmessungen umgeformt. Dabei wurden für jedes Blech mehrere Walzdurchläufe durchgeführt. Zwischen den einzelnen Walzdurchläufen wurde die zum Biegen verwendete Seitenwalze weiter zugestellt und somit mit jedem zusätzlichen Durchlauf eine größere Umformung in das Blech eingeprägt. Der verwendete Zustellwinkel der Seitenwalze wurde dabei mithilfe des 3D-Scanners vermessen, da dieser nicht durch die Steuerung der Rundbiegemaschine ausgeben werden konnte.

Die Umformung der Bleche wurde mithilfe der Prozessüberwachung kontinuierlich vermessen. Um Referenzmessungen mit dem 3D-Scanner aufnehmen zu können, wurde das Walzen zu verschiedenen Zeitpunkten unterbrochen. Somit konnte mithilfe des 3D-Scanners der sichtbare Blechabschnitt hinter dem Maschinenauslass vermessen werden.

Tabelle 7: Untersuchungsumfang der experimentellen Versuche.

Proben-Nr.	Werkstoff	Abmessungen in mm	Anzahl Walzdurchläufe	Biegeseite
1	S355	3750 x 2200 x 10	2	Auslass
2	S355	3750 x 2200 x 10	2	Auslass
3	S355	2660 x 1400 x 30	3	Auslass
4	S355	2660 x 1400 x 30	2	Auslass
5	S355	2660 x 1400 x 30	3	Einlass

Bei den Versuchen wurde das Blech nur mit einer Seitenwalze gebogen – die andere Seitenwalze lag lediglich unterstützend am Blech an. Dabei wurde variiert, ob mit der Seitenwalze auf der Auslass- oder der Einlassseite der Rundbiegemaschine gebogen wurde. Dies wirkt sich, wie in der Abbildung 39 dargestellt, auf die Ausbildung der Verformungszone im Blech aus.

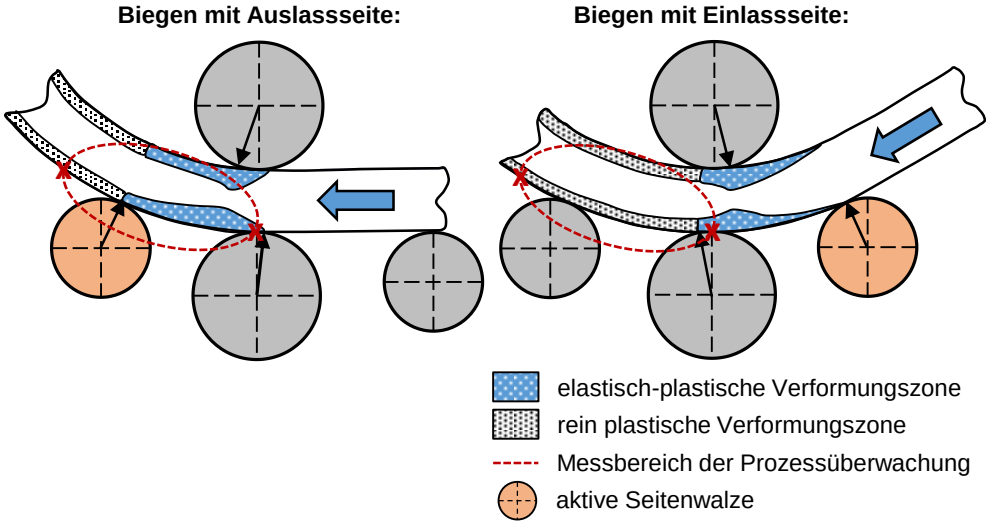

Abbildung 39: Schematische Ausbildung der Verformungszone in Abhängigkeit von der Biegeseite.

Wie in der Abbildung 39 zu sehen, beginnt die rein plastische Verformungszone beim auslassseitigen Biegen erst hinter der Seitenwalze. Die elastische Rückfederung findet zwischen den Kontaktpunkten mit der Oberwalze und der Seitenwalze statt, wobei dies zu einem großen Teil der Bereich ist, der mit der Prozessüberwachung vermessen wird. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass beim auslassseitigen Biegen mit der Prozessüberwachung elastischer Verformungsanteil mitgemessen wird, sodass die in einem Walzdurchlauf tatsächlich eingeprägte Umformung überschätzt wird.

Beim einlassseitigen Biegen dagegen ist die elastische Rückfederung bereits unmittelbar hinter dem Walzspalt abgeschlossen. In dem für die Prozessüberwachung relevanten Bereich zwischen dem Walzspalt und der auslassseitigen Seitenwalze besitzt das Blech hierbei nahezu keinen elastischen Verformungsanteil mehr. Die Voraussetzung dafür ist, dass die auslassseitige Seitenwalze nur an das vorgeschobene umgeformte Blech angelegt wird, ohne eine neue Umformkraft in dieses einzuprägen. Es ist davon auszugehen, dass sich das Fehlen von elastischer Verformung im Messbereich positiv auf die Messgenauigkeit der Prozessüberwachung auswirkt, da somit das tatsächliche Endergebnis der Umformung vermessen werden kann.

Mithilfe der Versuchsreihe wurde untersucht, wie sich die Wahl der Biegeseite auf die Genauigkeit der Prozessüberwachung auswirkt.

8.3 Ergebnisse des Biegens mit auslassseitiger Seitenwalze

Probe Nr. 1 (S355, 3750 x 2200 x 10 mm):

In der Abbildung 40 sind die Ergebnisse für die Umformung der Probe Nr.1 dargestellt. Dieses Blech wurde in zwei Walzdurchläufen umgeformt, wobei bei den Durchläufen Zustellwinkel von ca. 53,0° bzw. 59,3° verwendet wurden. In dem Diagramm auf der linken Seite sind die ursprünglichen Messergebnisse der Prozessüberwachung zu sehen. Diese zeigen den vom LDS gemessenen Abstand zum Blech über dem vom Drehgeber gemessenen Vorschub. Anzumerken ist, dass das Blech nach dem Anbiegen erst vorgewalzt werden muss, damit der Laserstrahl des LDS das Blech erfassen und mit der PÜ ein Umformergebnis ermittelt werden kann. Aus diesem Grund beginnt die Skala der Vorschubachse erst bei einem Wert von 250 mm.

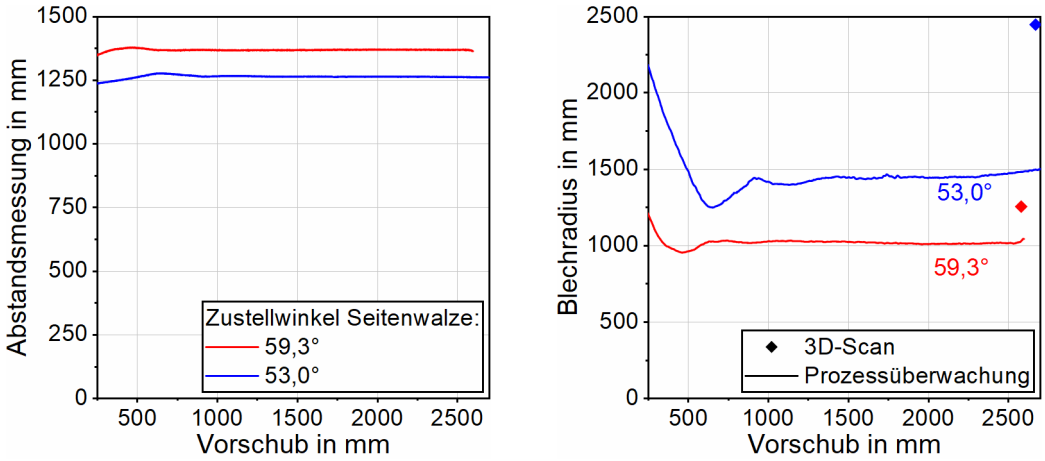

Abbildung 40:Links: Mit der PÜ für die Probe Nr. 1 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan.

Der Verlauf der Abstands-Vorschub-Kurven ist für die beiden Zustellwinkel ähnlich. Bei beiden Kurven ergibt sich für das vordere Blechende, das bei einem geringen Vorschub vermessen wird, ein kleiner Peak in der Abstandsmessung. Dieser resultiert aus der Vermessung des „Knicks“ im Blech, der beim Anbiegen entsteht. Im weiteren Verlauf ist der zum Blech gemessene Abstand nahezu konstant. Insgesamt ist der Abstand bei dem Zustellwinkel von 59,3° durch die stärkere Umformung vergleichsweise größer.

Das Diagramm auf der rechten Seite zeigt den Krümmungsradius der Bleche, der mithilfe der PÜ aus den Abstandsmessungen berechnet wurde. Außerdem sind die Referenzmessungen mit dem 3D-Scanner als Punkte abgetragen. Dabei wurden die Punkte bei dem Vorschubwert abgetragen, bei dem das Walzen für die Messungen unterbrochen wurde. Bei der Interpretation dieser Messergebnisse muss berücksichtigt werden, dass sich die Messungen der Prozessüberwachung und des 3D-Scanners auf unterschiedliche Blechabschnitte beziehen. Mit der Prozessüberwachung wird gemessen, welche Krümmung mit der derzeitigen Maschineneinstellung ab dem Walzspalt in das Blech eingeprägt wird. Mit dem 3D-Scanner wird dagegen der sichtbare Blechbereich vermessen, der bereits über den Auslass der Rundbiegemaschine hinaus vorgeschoben wurde. Aus diesem Grund müssen die in den Diagrammen abgetragenen Punktmessungen des 3D-Scanners mit den Messungen der PÜ zu einem um etwa 500 mm geringeren Vorschub verglichen werden.

Bei der Betrachtung der Blechradius-Vorschub-Kurven wird deutlich, dass die beiden Kurven eine ähnliche Charakteristik besitzen. Bei einem geringen Vorschub wird der Moment erreicht, bei dem der Anbiegeknick im Blech durch den Messpunkt des LDS geschoben wird. Daraus resultiert ein Peak in der berechneten Blechradius-Kurve. Nachdem diese Unstetigkeit im Blech durch den LDS vermessen wurde, folgt der kontinuierlich rundgeformte Abschnitt des Blechs. Für diesen ergibt sich bei dem größeren Zustellwinkel von 59,3° ein annähernd konstanter Verlauf, was auf eine einheitliche eingeprägte Biegung schließen lässt. Bei dem geringeren Zustellwinkel von 53,0° dagegen, stellt sich kein konstanter Verlauf ein. Stattdessen nimmt der ermittelte Radius hierbei mit einem geringen Anstieg zu, was darauf schließen lässt, dass eine kleinere Umformung erzielt wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Blech bei diesem geringen Zustellwinkel nur leicht umgeformt wird und somit weit über die Seitenwalze hinaushängt. Dadurch ergibt sich aus dem Eigengewicht des Blechs ein stetig steigendes Biegemoment, dass dem durch die Walzen eingeprägten Biegemoment entgegenwirkt und dieses abschwächt. Das große Überhängen dieses Blech wird auch an dem Schwingverhalten deutlich, dass in der Kurve bei einem Vorschub von etwa 1750 mm sichtbar wird. Bei dem höheren Zustellwinkel von 59,3° kann dagegen kein ausgeprägtes Schwingen des Blechs beobachtet werden.

Der Vergleich der Messergebnisse von Prozessüberwachung und 3D-Scanner zeigt, dass die Prozessüberwachung die tatsächlich erzielte Umformung bei beiden Walzdurchläufen deutlich überschätzt hat. Dabei nimmt der relative Fehler der Messungen der PÜ im Vergleich zur Referenzmessung des 3D-Scanners mit steigendem Zustellwinkel ab, vgl. Tabelle 8. Für eine detaillierte Diskussion der Fehlerursachen siehe Kapitel 8.5.

Tabelle 8: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 1.

Walzdurchlauf	Zustellwinkel	PÜ	3D-Scan	rel. Messfehler
1	53,0°	ca. 1450 mm	2447 mm	40,4 %
2	59,3°	ca. 1369 mm	2142 mm	36,1 %

In der Abbildung 41 ist der umgeformte Zustand des Blechs nach den durchgeführten Walzdurchläufen zu sehen. Hervorzuheben ist das gerade nicht-umgeformte vordere Ende, dass beim Biegen mit der auslassseitigen Seitenwalze zwangsläufig entsteht.

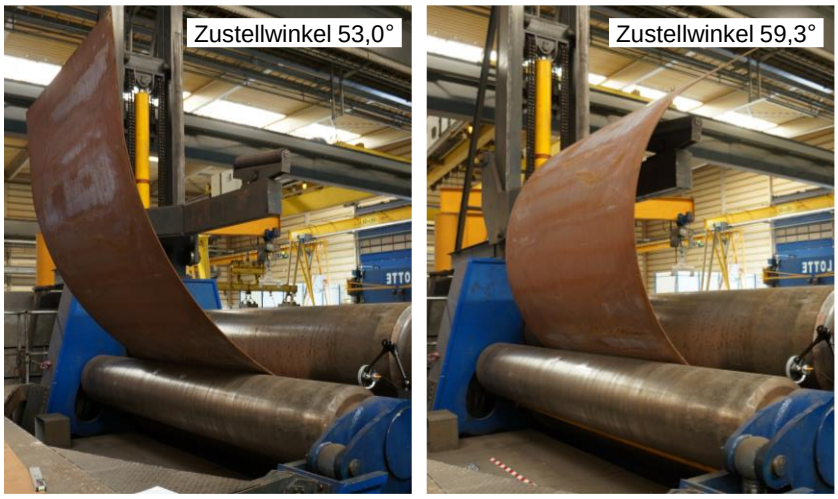

Abbildung 41:Probe Nr. 1 nach den Walzdurchläufen mit 53,0° (links) und 59,3° (rechts).

Probe Nr. 2 (S355, 3750 x 2200 x 10 mm):

In der Abbildung 42 sind die Messergebnisse für die beiden Walzdurchläufe mit der Probe Nr. 2 zu sehen. Bei dieser Probe handelte es sich ebenfalls um ein Blech mit einer Dicke von 10 mm. Es wurde mit den Zustellwinkeln 51,6° und 58,8° umgeformt.

Die Verläufe der Abstands-Vorschub-Kurven ähneln denen der Probe Nr. 1. Bei der Blechradius-Vorschub-Kurve für den Zustellwinkel von 51,6° fällt der leichte Anstieg des Radius mit steigendem Vorschub auf. Dieser ist wiederum auf das entgegengesetzt wirkende Biegemoment durch das Eigengewicht des überhängenden Blechs zurückzuführen. Bei dem höheren Zustellwinkel von 58,8° zeigt sich nur eine geringere Änderung des Blechradius über die Vorschublänge. Die Artefakte in den Kurven sind auf das Stoppen des Walzvorgangs zurückzuführen, das für die Messungen mit dem 3D-Scanner erforderlich war.

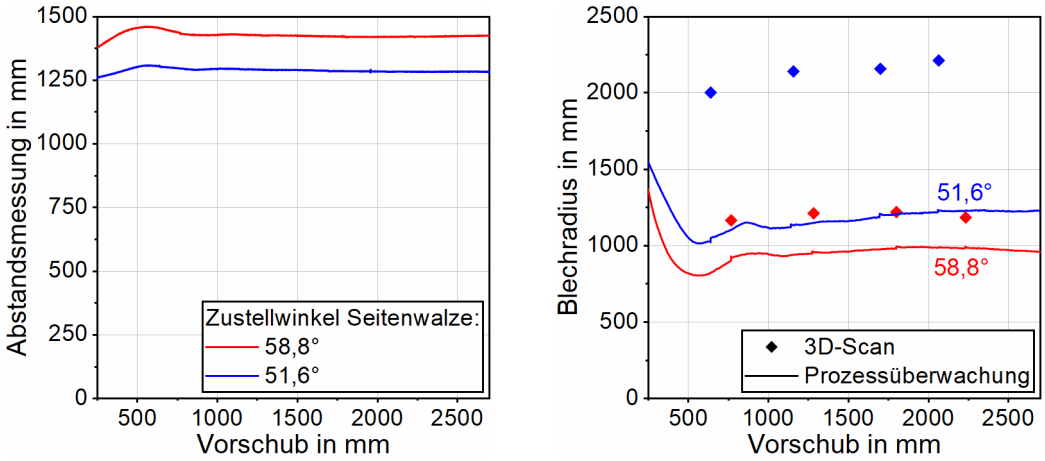

Abbildung 42:Links: Mit der PÜ für die Probe Nr. 2 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan.

Der Vergleich der Blechradius-Messungen der PÜ mit denen des 3D-Scans zeigt, dass die PÜ die Umformung bei beiden Walzdurchläufen deutlich überschätzt hat. Wie in Tabelle 9 zu sehen, nimmt der relative Fehler der Messungen mit steigendem Zustellwinkel ab.

Tabelle 9: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 2.

Walzdurchlauf	Zustellwinkel	PÜ	3D-Scan	rel. Messfehler
1	51,6°	ca. 1231 mm	2213 mm	44,4 %
2	58,8°	ca. 992 mm	1185 mm	16,3 %

Probe Nr. 3 (S355, 2660 x 1400 x 30 mm):

Die Probe Nr. 3 hatte andere Abmessungen als die Proben Nr. 1 und 2. Sie war deutlich kürzer und schmaler, besaß dafür aber eine größere Dicke. Es handelte sich insgesamt also um ein deutlich biegesteiferes Blech. Dieses Blech

wurde in 3 Walzdurchläufen mit Zustellwinkeln von 32,9°, 42,8° und 63,4° umgeformt. Hervorzuheben ist, dass bei dieser Probe und bei den folgenden Proben ein höheres Stativ für den LDS verwendet wurde, da die maximal zulässige Messdistanz des LDS von 1500 mm ansonsten aufgrund der hohen verwendeten Zustellwinkel überschritten worden wäre.

In der Abbildung 43 sind die Messergebnisse für die Versuche mit der Probe Nr. 3 dargestellt. Hinsichtlich der Abstands-Vorschub-Kurven fällt auf, dass diese trotz der höheren Zustellwinkel betragsmäßig unter den Messkurven der vorherigen Versuche liegen. Dies ist auf das höhere Stativ des LDS zurückzuführen. Darüber hinaus besitzen die Kurve die bereits beobachtete Charakteristik.

Bei den berechneten Blechradius-Vorschub-Kurven fällt vor allem der große Anstieg des Radius bei dem geringen Zustellwinkel von 32,9° auf. Außerdem ist der annähernd lineare Verlauf der Kurve des Zustellwinkels von 63,3° markant. Das annähernd konstante Niveau dieser Kurve, welche ca. 10^3 Messwerte umfasst, deutet auf die gute Reproduzierbarkeit der Messungen hin.

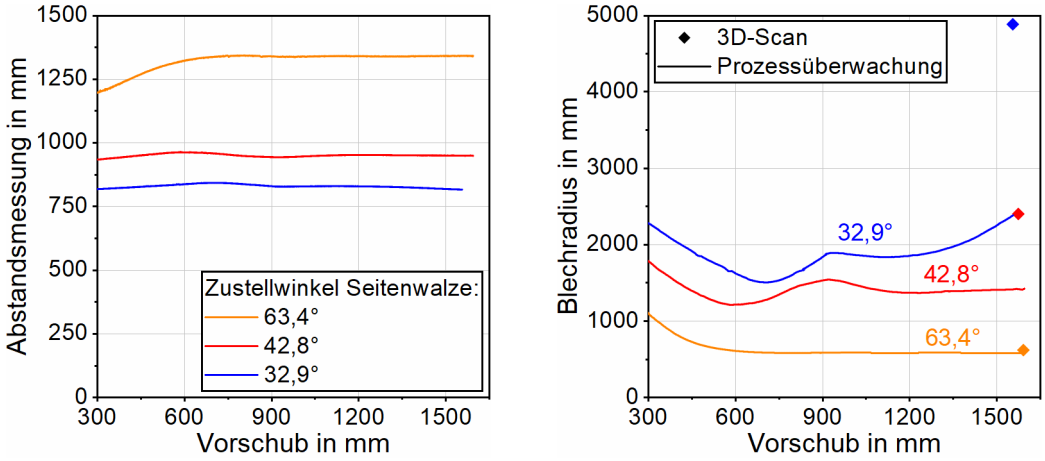

Abbildung 43:Links: Mit der PÜ für die Probe Nr. 3 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan.

Bezüglich des Vergleichs mit den Referenzmessungen zeigt sich, dass die PÜ die Umformung insbesondere bei dem geringen Zustellwinkel von 32,9° deutlich überschätzt hat. Mit steigendem Zustellwinkel nimmt der Messfehler erneut ab, vgl. Tabelle 10. Insbesondere bei dem hohen Zustellwinkel von 63,4° ist der relative Messfehler mit 6,4 % vergleichsweise klein.

Tabelle 10: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 3

Walzdurchlauf	Zustellwinkel	PÜ	3D-Scan	rel. Messfehler
1	32,9°	ca. 1984 mm	4885 mm	59,4 %
2	42,8°	ca. 1401 mm	2403 mm	41,7 %
3	63,4°	ca. 582 mm	622 mm	6,4 %

Probe Nr. 4 (S355, 2660 x 1400 x 30 mm):

Bei der Probe Nr. 4 handelte es sich ebenfalls um ein biegesteiferes Blech. Dieses wurde in zwei Walzdurchläufen mit den Zustellwinkeln 42,4° und 51,9° umgeformt. Die Ergebnisse der Versuche sind in der Abbildung 44 dargestellt.

Die aufgezeichneten Abstand-Vorschubs-Kurven besitzen die erwartete Charakteristik. Bei den berechneten Blechradius-Vorschub-Kurven fällt zunächst die große Ausprägung der Peaks bei der Kurve für den Zustellwinkel von 42,4° auf. Sowohl die Vermessung des Anbiegeknicks als auch der Radiusanstieg im Bereich eines großen Vorschubs sind hier sehr stark ausgeprägt. Die Kurve für 51,9° hat dagegen relativ schwach ausgeprägte Peaks und mit steigendem Vorschub wird der Blechradius annähernd konstant.

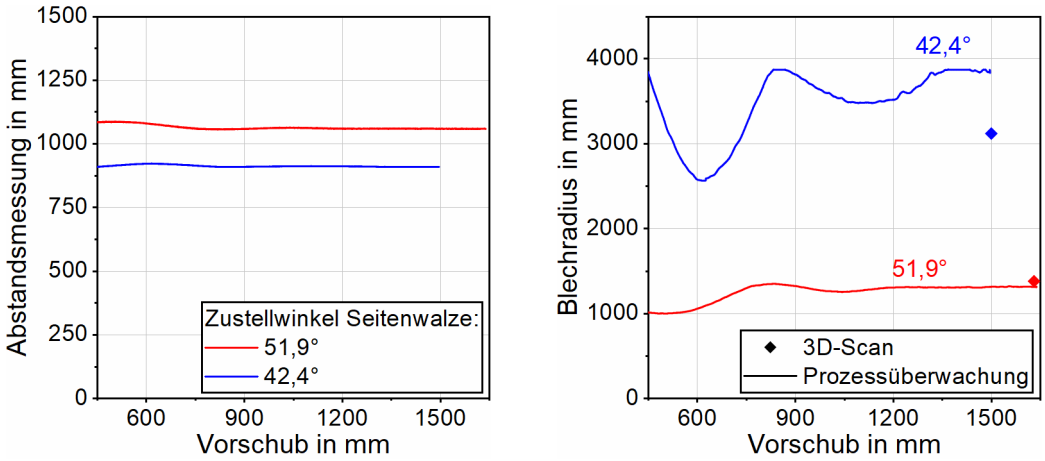

Abbildung 44: Mit der PÜ für die Probe Nr. 4 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan.

Beim Vergleich der Messergebnisse von PÜ und 3D-Scanner für den Blechradius zeigt sich wie bei den vorherigen Versuchen, dass der relative Fehler der PÜ mit steigendem Zustellwinkel abnimmt. Bei dem Zustellwinkel von 51,9° ist er mit 4,7 % vergleichsweise gering.

Tabelle 11: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 4.

Walzdurchlauf	Zustellwinkel	PÜ	3D-Scan	rel. Messfehler
1	42,4°	ca. 3692 mm	3123 mm	18,2 %
2	51,9°	ca. 1316 mm	1381 mm	4,7 %

8.4 Ergebnisse des Biegens mit einlassseitiger Seitenwalze

Probe Nr. 5 (S355, 2660 x 1400 x 30 mm):

Die Probe Nr. 5 wurde im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen mit der einlassseitigen Seitenwalze angebogen. Nach dem Anbiegen wurde das Blech vorgewalzt, bis es hinreichend weit aus dem Walzspalt hervorstand, sodass die auslassseitige Seitenwalze an das Blech angelegt werden konnte, ohne eine neue Umformkraft in dieses einzuprägen. Dies war erforderlich, da die Prozessüberwachung für die Berechnungen des Blechradius die Position der auslassseitigen Seitenwalze benötigt. Die Probe Nr. 5 wurde in drei Walzdurchläufen umgeformt. Bei diesen betrug der Zustellwinkel der inaktiven auslassseitigen Seitenwalze 42,6°, 45,9° und 47,0°. Beim Vergleich mit den Umformergebnissen der bisherigen Versuche muss berücksichtigt werden, dass der Zustellwinkel der aktiven einlassseitigen Seitenwalze noch größer war.

In der Abbildung Nr. 19 sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Die Vorschubachse beginnt erst bei einem Wert von 300 mm, da das Blech nach dem Anbiege-Vorgang erst vorgewalzt werden muss, bevor mit der PÜ gemessen werden kann. Bei den gemessenen Abstand-Vorschub-Kurven fällt als erstes ins Auge, dass diese Kurve im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen keinen Peak besitzen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es beim einlassseitigen Biegen verfahrensbedingt kein gerades Ende und keinen „Anbiegeknick“ gibt. Stattdessen kann das Blech nahezu ab dem vorderen Ende kontinuierlich rundgebogen werden. Dies ist auch an dem Kurvenverlauf ersichtlich, der für alle Zustellwinkel einer nahezu konstanten Gerade entspricht.

Auch die Kurven des Blechradius über dem Vorschub zeigen keine Peaks und besitzen für alle Zustellwinkel einen nahezu konstanten Verlauf. Eine Ausnahme bildet die Kurve für den Zustellwinkel von 42,6°. Hier ist im Bereich eines größeren Vorschubs eine geringfüge Zunahme des Blechradius festzustellen. Dies ist vermutlich auf das Eigengewicht des Blechs und das daraus resultierende entgegengesetzt gerichtete Biegemoment zurückzuführen. Der nahezu konstante Verlauf der Kurven deutet auf eine über die Blechlänge einheitlich eingeprägte Biegung hin.

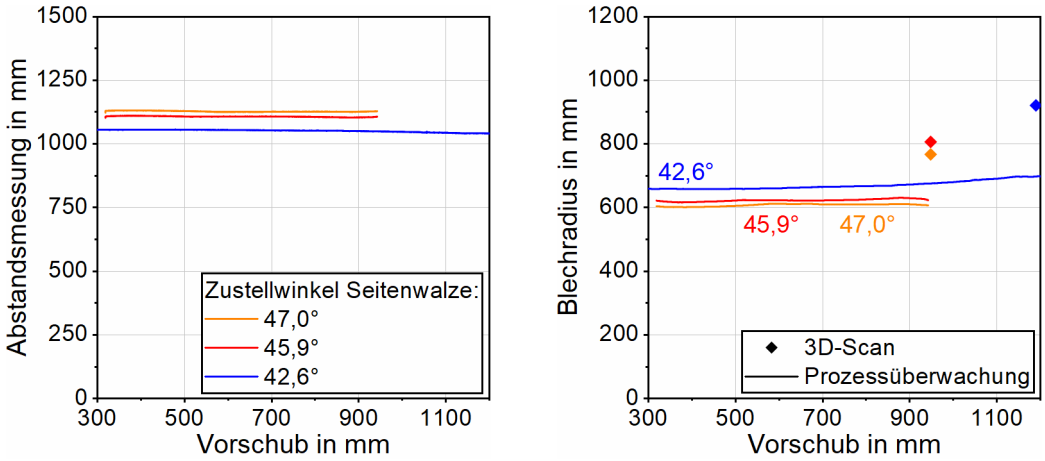

Abbildung 45: Links: Mit der PÜ für die Probe Nr. 5 gemessene Abstands-Vorschubs-Kurven. Rechts: Über die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven und Referenzmessung durch 3D-Scan.

Wie bereits beim auslassseitigen Biegen zeigt der Vergleich der Blechradius-Messungen von PÜ und 3D-Scan, dass die PÜ die Umformung auch beim einlassseitigen Biegen überschätzt hat. Wie in Tabelle 12 zu sehen, nimmt der relative Fehler dabei mit steigendem Zustellwinkel geringfügig ab. Die möglichen Ursachen für die Abweichungen werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

Tabelle 12: Messungenauigkeit der PÜ bei den Versuchen mit der Probe Nr. 5.

Walzdurchlauf	Zustellwinkel	PÜ	3D-Scan	rel. Messfehler
1	42,6°	ca. 675 mm	921 mm	26,7 %
2	45,9°	ca. 625 mm	806 mm	22,5 %
3	47,0°	ca. 609 mm	767 mm	20,6 %

In der Abbildung 46 ist die Probe Nr. 5 nach dem Biegen mit dem Zustellwinkel von 47,0° zu sehen. Dabei wurde an das Blech eine Schablone angelegt, um die Messung des 3D-Scanners zu verifizieren. Die Schablone ist für einen Radius von 750 mm ausgelegt, wobei dieser an der Blechinnenseite gemessen werden muss. Anhand des Lichtspalts zwischen Schablone und Blech wird deutlich, dass das Blech geringfügig stärker gekrümmt ist. Mit der Blechdicke von 30 mm kann folglich davon ausgegangen werden, dass der Außendurchmesser des Blechs etwas weniger als 780 mm beträgt. Dies deckt sich sehr gut mit der Messung des 3D-Scanners von 767 mm.

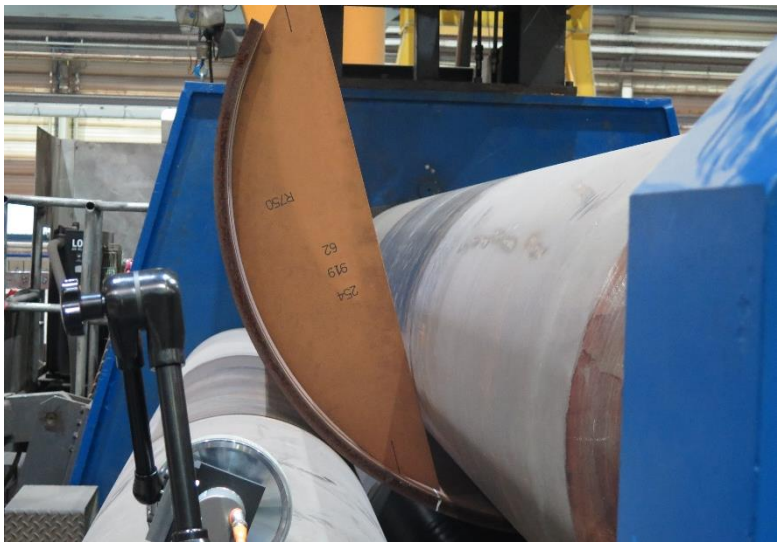

Abbildung 46: Probe Nr. 5 mit angelegter Schablone nach dem finalen Walzdurchlauf.

8.5 Fehleranalyse

Wie in den Kapiteln 8.3 und 8.4 beschrieben, wurden bei der experimentellen Erprobung der Prozessüberwachung deutliche Abweichungen der Messergebnisse im Vergleich zu den Referenzmessungen des 3D-Scanners festgestellt.

Im Folgenden werden die möglichen Ursachen hierfür diskutiert. Dazu werden zunächst die potenziellen Fehlerquellen aufgelistet, wobei zwischen prozessbedingten und messtechnischen Fehlern unterschieden wird.

Prozessbedingt sind die folgenden potenziellen Fehlerquellen zu berücksichtigen:

- Die anfängliche am Kontaktpunkt mit der Oberwalze eingeprägte Umformung nimmt im Zuge des Vorschubs durch die **elastische Rückfederung** wieder ab. In Abhängigkeit von der verwendeten Biegeseite (vgl. Abbildung 39) wird durch die PÜ elastische Umformung mitgemessen, was zu einer Überschätzung der tatsächlichen Umformung führen kann.
- Innerhalb der Berechnungsroutine der PÜ wird die **Lage des Kontaktpunkts des Blechs mit der Unterwalze** als bekannt angenommen. Hierzu werden die Walzen sowie ihre Lagerungen als starr idealisiert. Da diese Idealisierung in der Realität nicht zutrifft, kann diese vereinfachte Annahme in der praktischen Umsetzung zu Fehlern führen.

Neben den prozessbedingten Fehlerquellen sind weiterhin messtechnische Fehlerquellen von großer Bedeutung. Hervorzuheben ist hierbei, dass die PÜ auf einer Berechnungsroutine basiert, die den Blechradius anhand von geometrischen Zusammenhängen berechnet. Damit hiermit genaue Messergebnisse erzielt werden können, ist von großer Bedeutung, dass die Eingangsgrößen der Berechnungsroutine mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden. Zu den potenziellen messtechnischen Fehlerquellen sind zu nennen:

- Die angenommene **Position des Laserdistanzsensors** relativ zur Rundbiegemaschine. Der Bezugspunkt der Berechnungsroutine liegt im Mittelpunkt der Oberwalze. Die hierzu relative Position des LDS wurde anhand von mehreren Abstandsmessungen mithilfe eines Maßbands ermittelt, die jeweils mit einer Messunsicherheit behaftet sind.
- Der angenommene **Messwinkel des LDS** relativ zum Boden, der mithilfe eines digitalen Winkelmessers auf ca. 45,0° eingestellt wurde.
- Die angenommenen **Abmessungen der Rundbiegemaschine**. Da für die Rundbiegemaschine kein Datenblatt vorhanden war, mussten die Abmessungen mithilfe des 3D-Scanners ermittelt werden. Die auf diese Weise ermittelten Abmessungen waren die Durchmesser der Walzen, der Abstand der Walzen zueinander, die Lage der Drehachse der Hebelführung der Seitenwalzen und die Länge des Hebels der Führung der Seitenwalzen.
- Der angenommene **Zustellwinkel der Seitenwalze**. Dieser wurde ebenfalls mithilfe des 3D-Scanners ermittelt, da die Steuerung der Rundbiegemaschine hierzu keine Informationen lieferte.
- Die **Vernachlässigung der Balligkeit der Walzen**. Die Walzen der verwendeten Rundbiegemaschine sind ballig. Mit dem 3D-Scanner wurden ihre Konturen als Punktwolken vermessen. Zur Ermittlung des Walzendurchmessers wurden mit der Software *GOM Inspect* Zylinder durch die Punktwolken gefittet. Dies kann lokal zu falschen Durchmesserannahmen geführt haben, welche die Genauigkeit der Berechnungsroutine beeinträchtigt haben.
- Im Vergleich zu den vorherigen messtechnischen Fehlerquellen kann die Messunsicherheit der Abstandsmessungen des LDS vernachlässigt werden, da diese im Mikrometerbereich liegt und somit vergleichsweise gering ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die geometrische Vermessung des Umformproblems eine große Bedeutung für die Zuverlässigkeit der Messungen der PÜ hat. Wichtige Eingangsgrößen der PÜ, wie etwa die Abmessungen der Rundbiegemaschine und der Zustellwinkel der Seitenwalze, wurden im Experiment mithilfe des 3D-Scanners ermittelt. Der 3D-Scanner besitzt laut Herstellerangaben auf die verwendete Messdistanz eine Messgenauigkeit von ±2.3 mm. Dies ist hinreichend genau, um Referenzmessungen für das Umformergebnis nach dem Walzrunden anzustellen (vgl. Abbildung 46). Für die Ermittlung der geometrischen Eingangsdaten der PÜ scheint dies jedoch nicht genau genug zu sein. Erschwerend kommt der Umstand hinzu, dass wichtige Komponenten wie etwa die Drehachsen der Hebelführungen der Seitenwalzen durch andere Maschinenkomponenten abgeschattet werden und somit nur schwierig für den 3D-Scanner zugänglich sind.

Dass die ungenauen Eingangsgrößen der Berechnungsroutine die maßgebliche Ursache für die festgestellten Abweichungen sind, wird auch durch die Beobachtungen bei der Erprobung der PÜ an den Simulationsdaten gestützt (vgl. Kapitel 7.5). Hier konnte die PÜ insbesondere beim einlassseitigen Biegen genaue Messergebnisse für das Umformergebnis liefern, obwohl die genannten prozessbedingten Fehlerquellen (elastische Rückfederung und Nachgiebigkeit der Unterwalzenlagerung) in das Modell implementiert wurden. Diese können somit als maßgebliche Ursache ausgeschlossen werden. Die messtechnischen Fehlerquellen wurden im Modell jedoch nicht berücksichtigt, da die Abmessungen der Rundbiegemaschine und der Messpunkt des LDS selbst definiert wurden.

Um den Einfluss falscher geometrischer Annahmen auf die Messgenauigkeit der Prozessüberwachung zu untersuchen, wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Dazu wurden die Messungen zu den drei Umformversuchen mit der Probe Nr. 5 betrachtet. Bei diesen kann eine Beeinträchtigung der Messgenauigkeit durch die elastische Rückfederung vernachlässigt werden, da mit der Einlassseite gebogen wurde. Somit kann die festgestellte Abweichung maßgeblich auf die Eingangsgrößen der PÜ zurückgeführt werden. Als Eingangsgrößen wurde bei der Berechnung der Blechradien angenommen, dass der LDS einen horizontalen und vertikalen Abstand zum Mittelpunkt der Oberwalze von 1525 mm bzw. -762 mm hatte. Für den Zustellwinkel der Seitenwalze wurden bei den Versuchen Winkel von 42,6°, 45,9° bzw. 47,0° angenommen. Im Mittel betrug die relative Messungenauigkeit der PÜ bei den drei Versuchen rund 23,3 % (vgl. Tabelle 12).

Für die Untersuchung des Einflusses der geometrischen Eingangsgrößen auf die Messgenauigkeit der PÜ wurden die Position des LDS sowie die Zustellwinkel schrittweise variiert und der Einfluss auf die mittlere relative Messungenauigkeit untersucht. Dazu wurden die Sensorposition in 5 mm-Schritten und die Zustellwinkel in 0,1°-Schritten in Matlab variiert. Auf diese Weise wurden zahlreiche Kombinationen von Eingangsgrößen „abgetastet“.

Ein Beispiel ist in der Abbildung 47 zu sehen. In diesem Beispiel wurden die Zustellwinkel der Seitenwalzen im Vergleich zu den im Experiment angenommen Werten für jeden Walzdurchlauf um 0,6° erhöht. Somit wurden in dem Beispiel Zustellwinkel von 43,2°, 46,5° und 47,6° angenommen. Hervorzuheben ist, dass diese Winkeländerungen Verschiebungen der Seitenwalze von wenigen Millimetern bedeuten und somit im Bereich der Messunsicherheit der Vermessung der Walzenposition liegen. In dem Diagramm ist zu sehen, welche mittlere relative Messunsicherheit sich unter der Annahme dieser angepassten Zustellwinkel einstellt, wenn man zusätzlich die Position des LDS in die x- und y-Richtung variiert. Durch das rote Kreuz ist die im Experiment angenommene Sensorposition markiert. Es zeigt sich, dass der mittlere Messfehler durch eine Anpassung der LDS-Position auf 1,9 % gesenkt werden kann (grünes Kreuz). Dafür sind Korrekturen der horizontalen und der vertikalen Position um 50 mm bzw. 30 mm erforderlich. Hervorzuheben ist hierbei, dass in der Untersuchung nur zwei geometrische Eingangsgrößen angepasst wurden, die Übrigen aber unangetastet blieben. Es wird daher als wahrscheinlich erachtet, dass bei einer Korrektur aller geometrischer Eingangsgrößen jeweils nur vergleichsweise kleine Anpassungen nötig wären, um sehr gute Messergebnisse zu erreichen.

Für die experimentelle Untersuchung kann daher geschlussfolgert werden, dass die wahren Werte der geometrischen Eingangsgrößen im Messunsicherheitsbereich der angenommenen Werte liegen. Weiterhin kann angenommen werden, dass bei einer Verwendung der wahren Werte für die geometrischen Eingangsgrößen mithilfe der PÜ sehr viel genauere Messergebnisse erreicht worden wären.

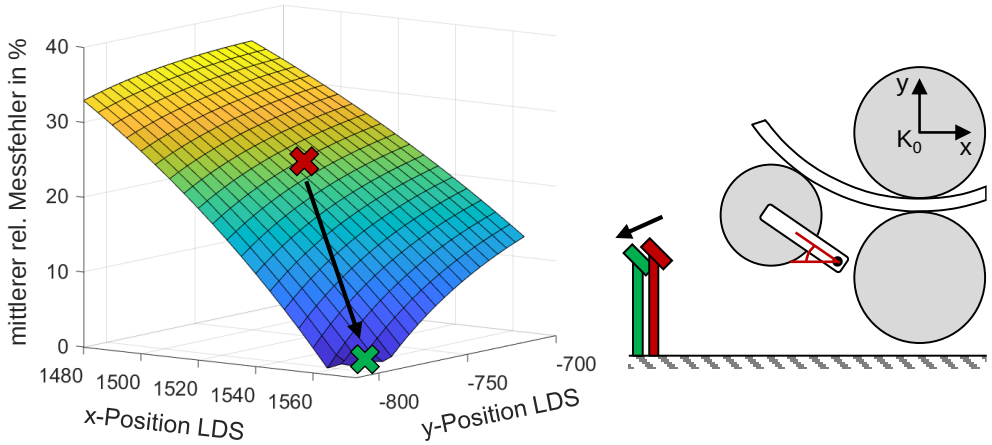

Abbildung 47: Einfluss der Position des LDS auf die mittlere Messungenauigkeit bei den Messungen zu Probe Nr. 5.

In der Abbildung 48 sind die Blechradius-Vorschub-Kurven abgebildet, die sich bei der Verwendung der angepassten LDS-Position und der angepassten Zustellwinkel ergeben. Es wird deutlich, dass die PÜ die Messungen des 3D-Scanners in diesem Fall in guter Näherung nachbilden kann. Anzumerken ist, dass die Messungen des 3D-Scans in der Abbildung auf einen Vorschub von 400 mm gesetzt wurden, da die Minimierung der relativen Messunsicherheit für die zu diesem Vorschub getätigte Abstandsmessung durchgeführt wurde.

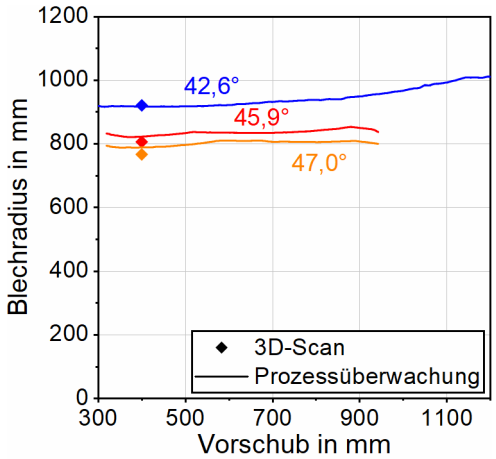

Abbildung 48: Für die Probe Nr. 5 durch die PÜ berechnete Blechradius-Vorschub-Kurven bei Verwendung der angepassten LDS-Position und der angepassten Zustellwinkel.

8.6 Fazit zur entwickelten Prozessüberwachung

Anhand der Daten aus der FE-Simulation konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Prozessüberwachung für die Vermessung des Umformergebnisses beim Walzrunden grundsätzlich gut geeignet ist (vgl. Kapitel 7.5). Insbesondere beim Biegen mit der einlassseitigen Seitenwalze konnten genaue Messergebnisse mit einer relativen Messungenauigkeit von maximal 2% erzielt werden. Beim Biegen mit der auslassseitigen Seitenwalze führte dagegen die Erfassung von elastischer Verformung zu einer Überschätzung der tatsächlich erzielten Umformung.

Diese vielversprechenden Ergebnisse konnten im Rahmen der experimentellen Erprobung nicht bestätigt werden. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass zu große Messunsicherheiten bei der Vermessung der verwendeten Rundbiegemaschine und der Bestimmung der Position des Laserdistanzsensors bestanden, wodurch die Eingangsgrößen der Berechnungsroutine der PÜ nicht hinreichend genau bestimmt werden konnten.

Aus diesen Beobachtungen lassen sich Anforderungen formulieren, die bei einer Verwendung der PÜ in der Praxis erfüllt sein müssen:

- Die Abmessungen der Rundbiegemaschine müssen mit guter Genauigkeit bekannt sein.
- Die Steuerung der Rundbiegemaschine muss die Position der Seitenwalzen mit guter Genauigkeit ausgeben können.
- Es muss eine Vorrichtung für den LDS konstruiert werden, mit deren Hilfe dessen Position relativ zur Oberwalze genauer bestimmt werden kann.
- Trotz der im Vorigen genannten Vorrichtung wird eine Restunsicherheit bei der Ermittlung der Position des LDS relativ zu Oberwalze nicht vermeidbar sein. Um diese auszugleichen, müssen vor dem eigentlichen praktischen Gebrauch Testversuche zur Kalibrierung der PÜ durchgeführt werden.

Bei Erfüllung dieser Anforderungen scheint die entwickelte PÜ eine sehr vielversprechende Möglichkeit zu sein, um das Umformergebnis beim Walzrunden zu vermessen. Im Vergleich zu dem derzeitigen Stand der Technik, der auf der Verwendung von Schablonen mit einer Lichtspaltprüfung basiert, bietet sie viele Vorteile:

- Mit der PÜ kann das Umformergebnis in Echtzeit gemessen werden. Der Handwerksschritt des Anlegens einer Schablone an das Blech, der zudem eine Unterbrechung des Walzvorgangs erforderlich macht, kann entfallen.
- Die digitalen Messungen der PÜ können direkt archiviert und zum Training von KI-basierten Prognosemodellen verwendet werden.
- Im Gegensatz zur Schablone liefert die PÜ in einem stetigen Wertebereich Messergebnisse. Eine Schablone liefert dagegen nur ein konkretes Ergebnis, wenn sie exakt an den Innenradius des Blechs passt. Anderenfalls muss die tatsächliche Blechkrümmung abgeschätzt werden.
- Außerdem hat die PÜ die positiven Eigenschaften, dass sie relativ kostengünstig ist und flexibel an bestehenden Rundbiegemaschinen nachgerüstet werden kann.

Ein Nachteil der PÜ ist, dass sie nur bei dem Biegen mit der einlassseitigen Seitenwalze zuverlässige Messergebnisse unabhängig von dem eingeprägten Umformgrad liefern kann. Im Gegensatz dazu kann eine Schablone auch beim Biegen mit der Auslassseite an das zurückgefederte Blech oberhalb der Seitenwalze gehalten werden, um das Umformergebnis zu prüfen. Wie in dem Kapitel 9.4 beschrieben wird, kann dieser Nachteil jedoch durch eine Anpassung der Prozessabfolge kompensiert werden. Eine Beeinträchtigung der Fertigungsmöglichkeiten oder der Wirtschaftlichkeit sind dabei nicht zu erwarten.

9 Experimentelle Erprobung des Prognosemodells

9.1 Untersuchungsumfang und Methodik

Das Prognosemodell wurde mit Daten zum auslassseitigen Biegen trainiert, wobei die Blechdicke bei den verwendeten Datensätzen mindestens 30 mm betrug. Da das Prognosemodell nur innerhalb des trainierten Parameterbereichs generalisieren kann, können zu dessen Erprobung nur experimentelle Versuche aus diesem Parameterbereich verwendet werden. Dies sind die Versuche mit den Proben Nr. 3 und 4 (vgl. Tabelle 7), bei denen ein Blech mit den Abmessungen 2660 x 1400 x 30 mm mit der auslassseitigen Seitenwalze umgeformt wurde.

Für die Erprobung des Prognosemodells wurde eine Prognose für die experimentell durchgeführten Versuche erstellt und mit den Messungen des 3D-Scanners gegenübergestellt. Außerdem wurden aus den Prognosen mithilfe des in Kapitel 6.4 entwickelten Visualisierungs-Algorithmus 3D-Konturen erzeugt. Diese wurden zusammen mit den zugehörigen Punktewolken der 3D-Scans in Matlab eingelesen, sodass die Prognose und das tatsächliche Ergebnis auch grafisch gegenübergestellt werden konnten.

9.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden exemplarische Ergebnisse für die Umformung mit einem geringen, einem mittleren und einem großen Zustellwinkel der Seitenwalze in der Höhe von 32,9°; 42,8° bzw. 63,4° gezeigt. Das KNN prognostiziert das Umformergebnis in Form des reziproken lokalen Krümmungsradius über der normierten Blechlänge. Für eine bessere Anschaulichkeit wurde hieraus der lokale Krümmungsradius über der Blechlänge berechnet. Dabei entspricht die Stelle bei einer Blechlänge von 2660 mm dem relativ zur Walzrichtung vorderen Blechende und die Stelle bei 0 mm dem hinteren Blechende.

In der Abbildung 49 sind die Ergebnisse für den geringen Zustellwinkel von 32,9° zu sehen. Das Diagramm zeigt den erwarteten charakteristischen Verlauf des lokalen Krümmungsradius nach dem auslassseitigen Anbiegen. Im Bereich der Blechenden ist der Krümmungsradius sehr groß, da das Blech hier nur gering bis gar nicht umgeformt wurde. Im Bereich bei etwa 1750 mm ist der Krümmungsradius sehr klein, was auf eine große Umformung hinweist. Dies ist die Stelle, die beim Anbiegen im Walzspalt lag und somit stärker umgeformt wurde. Unterhalb von etwa 1500 mm beginnt der Bereich, der einheitlich umgeformt wurde. Hier beträgt der prognostizierte Krümmungsradius etwa 3600 mm. Zum hinteren Blechende zeigt sich ein wechselhaftes Verhalten im Krümmungsradius. Die ist auf die Änderung der eingeprägten Umformung durch den Verlust des Kontakts mit der einlassseitigen Seitenwalze zurückzuführen. Der Vergleich mit der Messung des 3D-Scanners zeigt, dass das KNN eine zu hohe Umformung prognostiziert hat. Dieser hat für den kontinuierlich umgeformten Bereich einen Krümmungsradius von 4885 mm gemessen.

Bei der Betrachtung der 3D-Konturen auf der rechten Seite von Abbildung 49 fällt auf, dass die KNN-Prognose die Messung des 3D-Scanners augenscheinlich in guter Näherung getroffen hat. Anzumerken ist hierbei jedoch, dass der für den 3D-Scanner sichtbare und somit vermessbare umgeformte Bereich bei diesem geringen Zustellwinkel relativ kurz war, sodass der geometrische Vergleich in diesem Fall eine begrenzte Aussagekraft hat.

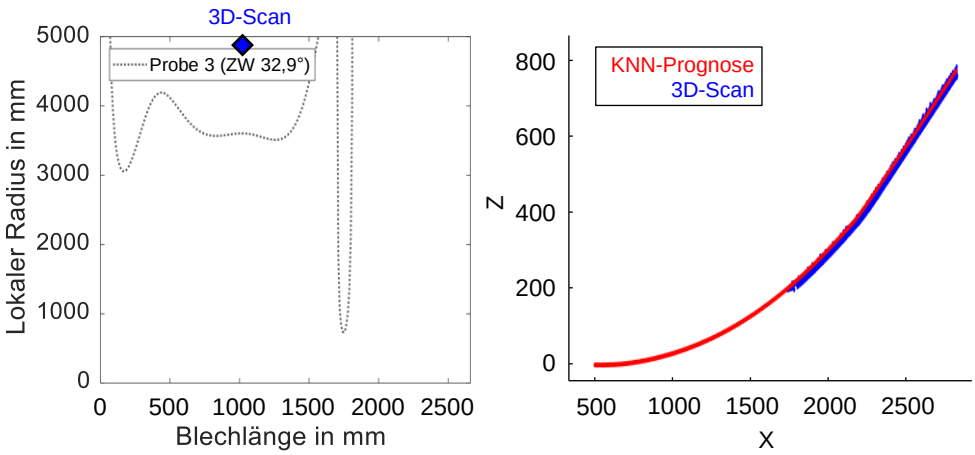

Abbildung 49: Vergleich der KNN-Prognose mit dem 3D-Scan (S355, 2660 x 1400 x 30 mm, ZW 32,9°).

Die Abbildung 50 zeigt die Ergebnisse für den mittleren Zustellwinkel von 42,8°. Auch hier folgt der prognostizierte lokale Krümmungsradius dem erwarteten charakteristischen Verlauf. Im Bereich der kontinuierlichen Umformung beträgt der prognostizierte Krümmungsradius etwa 1850 mm. Die Messung des 3D-Scans ergab dagegen einen Wert von 2403 mm. Es wird deutlich, dass die KNN-Prognose die erreichte Krümmung auch hier überschätzt hat. Dies zeigt sich auch am geometrischen Vergleich auf der rechten Seite von Abbildung 50.

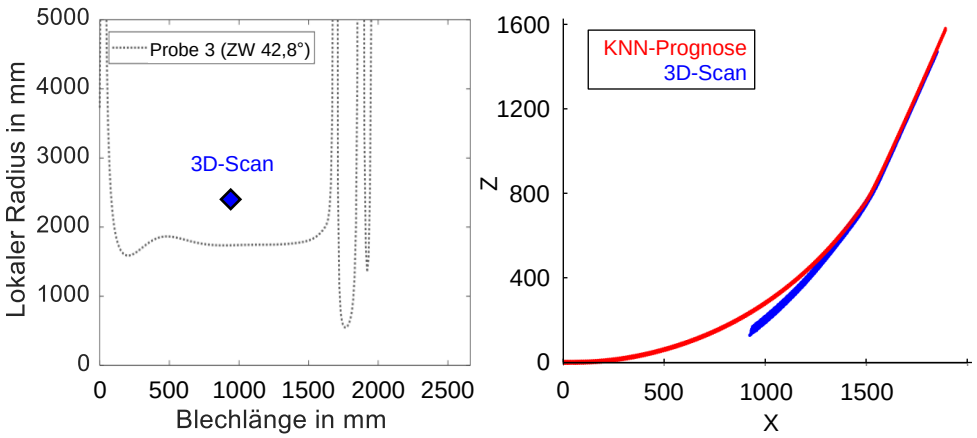

Abbildung 50: Vergleich der KNN-Prognose mit dem 3D-Scan (S355, 2660 x 1400 x 30 mm, ZW 42,8°).

In der Abbildung 51 sind die Ergebnisse für den großen Zustellwinkel von 63,4° zu sehen. Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass das KNN die tatsächlich erzielte Umformung in guter Näherung prognostizieren konnte. In dem kontinuierlich umgeformten Bereich wurde eine Krümmung von ca. 550 mm prognostiziert, wohingegen der 3D-Scan eine Krümmung von 622 mm gemessen hat. Auch an dem geometrischen Vergleich auf der rechten Seite der Abbildung wird die gute Annäherung der Prognose deutlich. Hierzu ist anzumerken, dass das gerade Ende des Blechs in diesem Fall durch den 3D-Scanner nicht erfasst wurde, da sich dieses nicht mehr in dessen Sichtbereich befand.

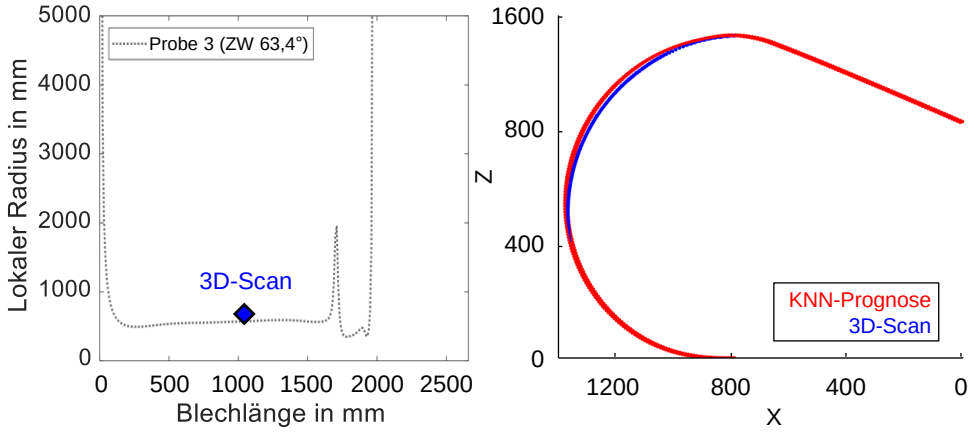

Abbildung 51: Vergleich der KNN-Prognose mit dem 3D-Scan (S355, 2660 x 1400 x 30 mm, ZW 63,4°).

9.3 Fazit

Die experimentelle Erprobung des Prognosemodells hat gezeigt, dass dieses die im Experiment tatsächlich erreichte Umformung grundsätzlich überschätzt hat. Dabei wurde die Abweichung mit steigendem Umformgrad kleiner, bis sie bei einem Zustellwinkel von 63,4° relativ klein war, wodurch eine Prognose mit guter Näherung erzielt werden konnte. Hervorzuheben ist, dass das KNN nicht auf experimentellen Daten trainiert wurde, sondern auf synthetischen Daten, die mithilfe des FE-Modells generiert wurden. Dabei hat sich bereits bei der Validierung des FE-Modells gezeigt, dass dieses die erzielte Umformung tendenziell überschätzt (vgl. Kapitel 5.3). Dementsprechend war auch eine Überschätzung der Umformung durch das KNN zu erwarten.

Im Gegensatz zur experimentellen Erprobung konnte bei der Erprobung an synthetischen Daten (vgl. Kapitel 6.3) gezeigt werden, dass das KNN bei der Verwendung einer konsistenten Datenquelle für das Training und die Erprobung sehr genaue Umformprognosen anstellen kann. Es ist daher zu erwarten, dass die KNN-Prognosen für die experimentellen Versuche bei einem Training auf experimentellen Daten wesentlich genauer gewesen wären. Außerdem ist anzumerken, dass das KNN auch in seinem derzeitigen Trainingszustand für die Praxis verwendet werden kann, da es konservative Prognosen tätigt und somit Startwerte für die Steuerung des Umformprozesses bereitstellen kann. Insgesamt kann daher geschlussfolgert werden, dass das entwickelte Prognosemodell eine sehr vielversprechende Lösung darstellt, um die Steuerung des Walzrundens zu objektivieren. Durch die Kombination mit der entwickelten Prozessüberwachung können kontinuierlich Prozessdaten aufgezeichnet werden, sodass die KNN-Prognosen bis zum Erreichen einer sehr guten Genauigkeit stetig verbessert werden können.

Im Folgenden Kapitel wird ein Ansatz beschrieben, nach dem das Prognosemodell und die Prozessüberwachung in den Fertigungsprozess des Walzrundens integriert werden können.

9.4 Integration von Prognosemodell und Prozessüberwachung in den Umformprozess mit einer 4-Walzen-Rundbiegemaschine

Damit das Prognosemodell und die Prozessüberwachung in den Fertigungsprozess mit einer 4-Walzen-Rundbiegemaschine integriert werden können, muss der Umformprozess geringfügig angepasst werden:

1. Ein Blech wird nur mit der Seitenwalze auf der Einlassseite gebogen, da nur in diesem Fall eine zuverlässige Vermessung des Umformergebnisses durch die PÜ gewährleistet werden kann. Jedoch kann ein Blech nicht über seine gesamte Länge in einem Walzdurchlauf mit einer Seitenwalze umgeformt werden. Wie in der Abbildung 52 dargestellt, kann das Blech nur über den vorderen Längenabschnitt mit der einlassseitigen Seitenwalze umgeformt werden. Bei dem hinteren Abschnitt kann mit dieser Seitenwalze kein Biegemoment mehr eingeprägt werden, da durch den Vorschub der Kontakt zum Blech verloren geht. Aus fertigungstechnischer Sicht ist der Verzicht auf das Biegen mit der Auslassseite nicht schwerwiegend, da mit dieser Seite nur ein vergleichsweise geringes Biegemoment eingeprägt werden kann (vgl. Kapitel 7.5.2).

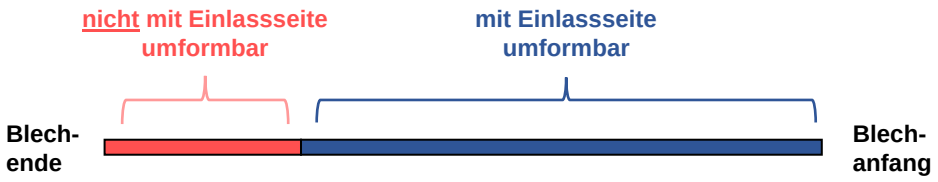

Abbildung 52: Schematische Darstellung der Umformstrategie über die Länge eines Blechs.

2. Das hintere Blechende kann damit erst mit der Umkehr der Walzrichtung im zweiten Walzdurchlauf umgeformt werden. Dann wird die bis dahin passive Seitenwalze zur neuen aktiven Seitenwalze. Somit kann wieder mit der Einlassseite umgeformt werden. Damit das Umformergebnis bei beiden Walzrichtungen mithilfe der PÜ vermessen werden kann, muss ein LDS auf jeder Seite der Rundbiegemaschine positioniert werden. Damit der Vorschub mit dem Drehgeber unabhängig von der Walzrichtung gemessen werden kann, wird dieser an der Oberwalze montiert.
3. Bei der Vermessung des Umformergebnisses mithilfe der PÜ ergibt sich eine Verzögerung. Diese ist dadurch bedingt, dass das maximale Biegemoment am Kontaktpunkt mit der Oberwalze eingeprägt wird (Biegepunkt), das Umformergebnis jedoch erst hinter der auslassseitigen Seitenwalze vermessen werden kann. Hierdurch ergibt sich die in der Abbildung 53 dargestellte Schleppdistanz. Um diese muss das Blech vorgeschoben werden, damit ermittelt werden kann, welches Umformergebnis aus der gewählten Maschineneinstellung resultiert. Diese Schleppdistanz definiert somit die kleinste Auflösung für Messungen, die zur Anpassung der Maschineneinstellung verwendet werden können. Die Schleppdistanz hängt von den Abmessungen der Rundbiegemaschine, der Blechdicke und der Zustellung der Seitenwalze ab. Im Rahmen der im Projekt durchgeführten Experimente betrug sie etwa 600 bis 900 mm. Da praxisrelevante Bleche aus dem Grobblechbereich meist deutlich länger sind, kann die Position der Seitenwalze somit bereits im ersten Walzdurchlauf mehrmals angepasst werden. Dabei kann durch das Prognosemodell gewährleistet werden, dass möglichst wenige Einstellungen erprobt werden müssen, bis die für das Sollergebnis erforderliche Maschineneinstellung gefunden wurde.

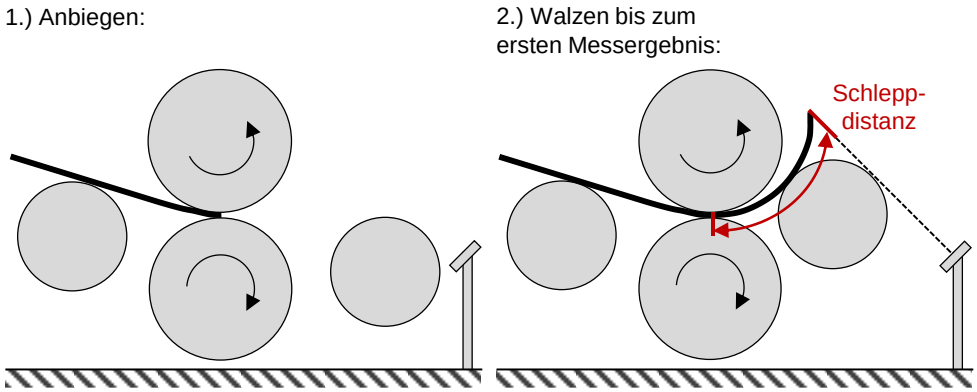

Abbildung 53: Skizze der kleinsten durch die Prozessüberwachung vermessbaren Blechlänge.

4. Das Prognosemodell muss für den praktischen Gebrauch um weitere Eingabegrößen ergänzt werden. Damit die Umformung eines bestimmten Blechs zur Qualitätskontrolle zurückverfolgt werden kann, wird für jedes Blech eine eigene ID hinterlegt. Zudem wird für einzelne Blechchargen eine ID hinterlegt, damit das Umformverhalten chargenspezifisch erkannt werden kann. Weiterhin muss die Ausgangskrümmung eines Blechs eingegeben werden, da diese einen Einfluss auf das Biegemoment hat, das bei einer bestimmten Maschinen-

einstellung eingeprägt wird. Diese sollte in der Form der lokalen Blechkrümmung über der Blechlänge eingegeben werden. Somit kann das Umformergebnis, das in einem Walzdurchlauf gemessen wurde, direkt als Ausgangskrümmung für den nachfolgenden Walzdurchlauf verwendet werden.

In der Abbildung 54 ist der Ablauf des Walzrundens nach der beschriebenen Methodik schematisch dargestellt. Im ersten Schritt (A) wird die einlassseitige Seitenwalze entsprechend der Prognose des Prognosemodells zugestellt und das Blech angebogen. Währenddessen gibt der LDS eine Fehlermeldung aus, da sich kein Objekt in seinem Messbereich befindet. Im nächsten Schritt (B) wird das Blech vorgewalzt, bis der Laserpunkt des LDS auf das Blech fällt. Daraufhin wird die auslassseitige Seitenwalze so zugestellt (C), dass sie am Blech anliegt, ohne dieses umzuformen. Mit der bekannten Position der auslassseitigen Seitenwalze kann die Vermessung der Umformung durch die PÜ erfolgen. Das Blech wird nun weiter vorgewalzt und dabei mit der einlassseitigen Seitenwalze gebogen. Sobald das Blech auf der Einlassseite den Kontakt zur Seitenwalze verliert, kann es nicht mehr mit der Einlassseite gebogen werden. Es wird daher ab dem Zeitpunkt (D) mit der auslassseitigen Seitenwalze gebogen. Dazu verbleibt diese unverändert auf der Position, die im Schritt (C) eingestellt wurde. Infolge dieses auslassseitigen Biegens wird das Blech weniger stark umgeformt als beim vorherigen einlassseitigen Biegen. Durch die elastische Rückfederung, welche zwischen dem Biegepunkt und dem Kontakt mit der Seitenwalze stattfindet, wird das Umformergebnis zudem weniger zuverlässig vermessen. Die geringere Umformung des hinteren Blechabschnitts wird in einem nachfolgenden Walzdurchlauf korrigiert. Dazu wird die Walzrichtung umgekehrt, wodurch die bisherige Auslassseite zur neuen Einlassseite wird (F). Mit dem Prognosemodell wird die Position der Seitenwalze für den zweiten Walzdurchlauf berechnet und der Ablauf beginnt von vorn.

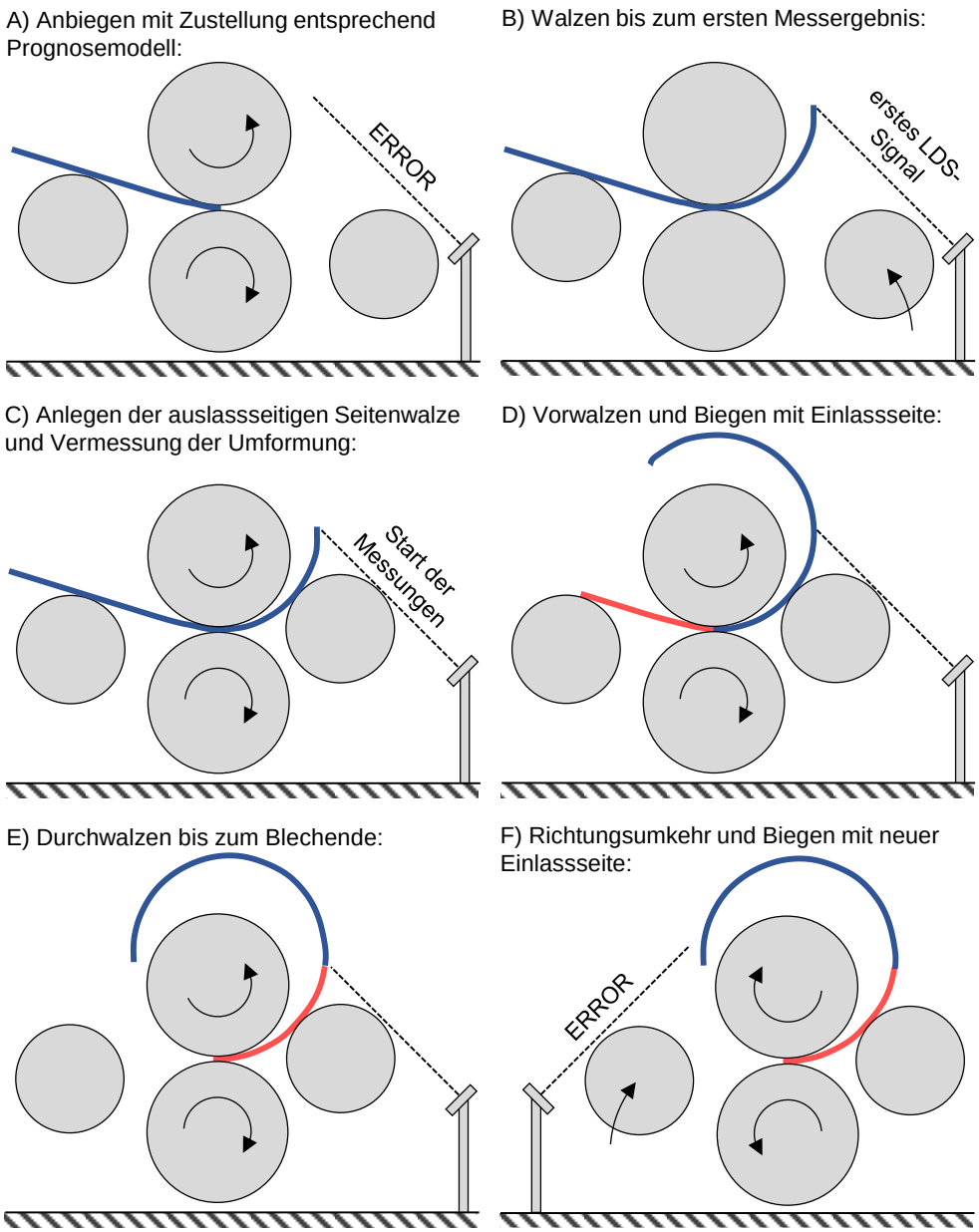

Abbildung 54: Umformstrategie bei der Verwendung des Prognosemodells und der Prozessüberwachung.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Das Walzrunden ist ein Umformverfahren, das zur Herstellung von Rohren und Schalen verwendet wird. Für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist die Prozesssteuerung von großer Bedeutung. Diese erfolgt in der Praxis überwiegend manuell, da die in der Industrie bestehenden Rundbiegemaschinen zu einem Großteil über keine objektiven Prognose-Systeme verfügen, mit denen das aus einer Maschineneinstellung resultierende Umformergebnis vorhergesagt werden kann. Folglich bietet sich das Potenzial, die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens durch eine technische Objektivierung des Prozesses zu steigern. Ein weiterer Vorteil der Objektivierung ist, dass die fertigenden Unternehmen hierdurch Risiken für die Produktivität reduzieren können. So kann eine objektive Umformprognose ermöglichen, dass ein unerfahrener Mitarbeiter die Steuerung der Rundbiegemaschine übernehmen kann, falls der eigentlich zuständige Mitarbeiter krankheitsbedingt ausfällt.

Um einen Beitrag zur Objektivierung des Walzrundens zu leisten, war das Ziel des vorliegenden Projekts, ein KI-basiertes Prognosemodell sowie eine messtechnische Prozessüberwachung zu entwickeln. Diese technischen Module sollen den Unternehmen die Möglichkeit geben, ihre Rundbiegemaschinen nachzurüsten, um den Anlagenbediener bei der Steuerung des Prozesses zu unterstützen. Wesentliche Anforderungen an die zu entwickelnden Module waren hierbei, dass diese kostengünstig sind, mit verschiedenen Baugrößen von Rundbiegemaschinen funktionieren und einfach nachgerüstet werden können.

Um dieses Ziel zu erreichen wurde der Umformprozess zunächst eingehend analysiert. Hierzu wurden die wesentlichen mechanischen Eigenschaften von praxisrelevanten Blechen charakterisiert und mit dem erarbeiteten Wissen ein detailliertes FE-Modell für den Umformprozess aufgebaut. Das FE-Modell wurde verwendet, um eine Sensitivitätsanalyse zum Umformergebnis beim Walzrunden durchzuführen und bedeutende und vernachlässigbaren Einflussgrößen zu identifizieren.

Basierend auf den ermittelten Erkenntnissen wurden Konzepte für das Prognosemodell und die Prozessüberwachung entwickelt und umgesetzt. Das entwickelte Prognosemodell basiert auf einem künstlichen neuronalen Netz, dass das Umformergebnis in Form der lokalen Krümmung des Blechs über der Blechlänge anhand der wesentlichen Umformparameter prognostizieren kann. Die entwickelte Prozessüberwachung verwendet als Sensoren einen Laserdistanzsensor und einen Drehgeber und basiert auf einer numerischen Berechnungsroutine. Mithilfe der Prozessüberwachung kann die Umformung beim Walzrunden kontinuierlich vermessen werden, sodass die für das Prognosemodell erforderlichen Daten ermittelt werden können.

Die Funktionsnachweise für das Prognosemodell und die Prozessüberwachung wurden zunächst theoretisch mithilfe von FE-Simulationen erbracht. Hierbei hat sich gezeigt, dass das Prognosemodell bei einem Training auf Daten zu 100 Walzdurchläufen sehr genaue Umformprognosen anstellen kann. Der Einfluss von einzelnen Umformparametern auf das Umformergebnis konnte richtig erkannt werden. Für die Prozessüberwachung hat sich gezeigt, dass diese das Umformergebnis insbesondere beim einlassseitigen Biegen mit einer sehr guten Genauigkeit vermessen kann. Hier konnte das Umformergebnis mit einer relativen Messungenauigkeit von maximal 2% vermessen werden. Beim Biegen mit der auslassseitigen Seitenwalze kam es dagegen zu einer Überschätzung der tatsächlich erreichten Umformung, da hierbei elastische Verformung mitgemessen wurde. Diese Beeinträchtigung ist für die Praxis jedoch von geringer Bedeutung, da für das Biegen eines Blechs beim Walzrunden typischerweise die einlassseitige Seitenwalze verwendet wird. Der Einsatz der auslassseitigen Seitenwalze erfolgt erst nach einem abgeschlossenen Walzdurchlauf durch den Wechsel der Walzrichtung. Aufgrund der geänderten Einzugsrichtung wird die bisherige Auslassseite dann zur neuen Einlassseite.

Nachdem der theoretische Funktionsnachweis erbracht wurde, wurden die entwickelten Module auch praktisch mithilfe von Umformversuchen an einer realen 4-Walzen-Rundbiegemaschine erprobt. Im Vergleich zu der theoretischen Erprobung an den Simulationsdaten wurde hierbei sowohl mit dem Prognosemodell als auch mit der Prozessüberwachung eine geringere Genauigkeit erreicht. Die Abweichungen des Prognosemodells können im Wesentlichen darauf zurückgeführt werden, dass dieses auf synthetischen Simulationsdaten trainiert wurde. Da ein FE-Modell die Realität nie exakt nachbilden kann, sind die Prognosen bei einem Training auf synthetischen Daten stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Die Abweichungen der Messungen der Prozessüberwachung können vor allem damit erklärt werden, dass die Eingangsgrößen der Berechnungsroutine nicht mit einer ausreichend hohen Genauigkeit bestimmt wurden. Dazu wurden in Kapitel 8.6 Maßnahmen definiert, die bei weiteren Versuchen mit der Prozessüberwachung umgesetzt werden müssen.

Trotz der Schwierigkeiten bei der experimentellen Erprobung kann zusammenfassend festgehalten werden, dass das entwickelte Prognosemodell und die entwickelte Prozessüberwachung sich als eine vielversprechende Möglichkeit erwiesen haben, um das Walzrunden zu objektivieren. Die Ursachen der im praktischen Gebrauch aufgetretenen Probleme konnten eindeutig identifiziert werden und können mit relativ wenig Aufwand behoben werden. Dazu konnte in Kapitel 9.4 bereits eine konkrete Methodik beschrieben werden, nach der das Prognosemodell und die Prozessüberwachung in den Umformprozess integriert werden können.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

11 Literatur

[1] STRASSMANN, T. *Prozessführung für das Walzrunden auf der Basis neuronaler Netze.* Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 1995. Berichte aus der Fertigungstechnik. Als Ms. gedr. Aachen, 1996.

[2] HUA, M., K. BAINES und I.M. COLE. Continuous four-roll plate bending: a production process for the manufacture of single seamed tubes of large and medium diameters. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, **39**(6), 905-935.

[3] BLUM, J. *Ein Prozeßführungsmodul zum Walzrunden von Grobblechen, dargestellt am Beispiel einer Dreiwalzenbiegemaschine.* Schriftenreihe. Lehrstuhl für Produktionssysteme, Institut für Automatisierungstechnik, Ruhr-Universität Bochum. 90,6. Bochum, 1990.

[4] HARDT, D.E. SHAPE CONTROL IN METAL BENDING PROCESSES: THE MODEL MEASUREMENT TRADEOFF. In: *Information Control Problems in Manufacturing Technology 1982:* Elsevier, 1983, S. 35-40.

[5] HOFFMANN, H., R. NEUGEBAUER und G. SPUR. *Handbuch Umformen.* Edition Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser, 2012.

[6] HARDT, D.E., M.A. ROBERTS und K.A. STELSON. Closed-Loop Shape Control of a Roll-Bending Process. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1982, **104**(4), 317-322.

[7] EGELKAMP, B. *Prozessadaptierte Geometrievermessung mit visuellen Sensorsystemen, dargestellt am Beispiel des Walzrundens.* Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 1989. Schriftenreihe / Lehrstuhl für Produktionssysteme. H. 89,1. Bochum, 1989.

[8] LIEWALD, M. *Prozessführung numerisch gesteuerter Umformprozesse mittels algorithmischer und wissensbasierter Regler.* Zugl.: @Dortmund, Univ., Diss., 1990. Fortschritt-Berichte / VDI Reihe 2, Fertigungstechnik. Nr. 211. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl., 1991.

[9] LUDWIK, P. Technologische Studie über Blechbiegung. Ein Beitrag zur Mechanik der Formänderungen. *technische Blätter*, 1903, 133-159.

[10] WANG, Y., X. ZHU, Q. WANG und X. CUI. Research on multi-roll roll forming process of thick plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, **102**(1-4), 17-26.

[11] KULIKOV, E.A., Y.I. BERLINER und G.I. SHEVYAKOV. Bending thick-walled conical vessel sections on roll-bending machines. *Chemical and Petroleum Engineering*, 1969, **5**(12), 977-979. ISSN 0009-2355.

[12] FROITZHEIM, P., M. STOLTMANN, N. FUCHS, C. WOERNLE und W. FLÜGGE. Prediction of metal sheet forming based on a geometrical model approach. *International Journal of Material Forming*, 2019, **21**(3), 117.

[13] HANDREG, T., P. FROITZHEIM, N. FUCHS, W. FLÜGGE, M. STOLTMANN und C. WOERNLE. Concept of an automated framework for sheet metal cold forming. In: T. SCHÜPPSTUHL, K. TRACHT und J. ROßMANN, Hg. *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter.* Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019, S. 117-127.

[14] HAEUSLER AG DUGGINGEN [CH]. Verfahren und Steuerung einer Biegemaschine. Erfinder: T. SCHNELL UND A. ZWAHLEN. Anmeldung: 22. September 2017. DE DE102017122073 (A1).

[15] HAEUSLER HOLDING AG [CH]. Biegemaschine und Verfahren zur Steuerung der Biegemaschine. Erfinder: A. ZWAHLEN. Anmeldung: 23. Oktober 2018. DE DE102018126336 (A1).

[16] FLAMAN, M. und J. HERRING. SEM/ASTM round-robin residual stress-measurement study-phase I. *Experimental Techniques*, 2008, **10**, 23-25.

[17] SCHULZE, V., O. VÖHRINGER und E. MACHERAUCH. Residual Stresses After Quenching. In: , 2010, S. 229-288.

[18] PRIME, M. *Residual Stresses Measured In Quenched HSLA-100 Steel Plate*, 2005.

[19] WAGNER, M. *Lineare und nichtlineare FEM. Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA®.* Wiesbade: Springer Vieweg, 2017.

[20] HOCKETT, J.E. und O.D. SHERBY. Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1975, **23**(2), 87-98. Journal of the Mechanics and Physics of Solids.

[21] ARBAB CHIRANI, S., D. RETRAINT und J. LU. Study of through-thickness residual stress by numerical and experimental techniques. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1998, **33**, 449-458. Journal of Strain Analysis for Engineering Design.

[22] ZHAO, W., T. WARREN LIAO und L. KOMPOTIATIS. Stress and Springback Analyses of API X70 Pipeline Steel Under 3-Roller Bending via Finite Element Method. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, **30**(5), 470-482.

12 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU

In dem Projekt konnte ein empirisches KI-basiertes Prognosemodell entwickelt werden, dass den Anlagenbediener anhand von vorhandenen Prozessdaten bei der Prozesssteuerung unterstützen kann. Für die Generierung der Prozessdaten wurde eine Prozessüberwachung entwickelt, mit der das Umformergebnis in Echtzeit vermessen werden kann. Dabei erfüllen beide Module die Anforderungen von geringen Kosten und einer einfachen Nachrüstbarkeit an bestehenden Rundbiegemaschinen. Hierdurch wird fertigenden KMU die Möglichkeit gegeben, ihre Rundbiegemaschinen mit relativ geringen Investitionskosten nachzurüsten. Die Unternehmen können den Umformprozess damit objektivieren und die Effizienz des Verfahrens steigern. Um die Integration in den Fertigungsprozess zu unterstützen, wurde eine Methodik zur Steuerung des Walzrundens unter Verwendung des Prognosemodells und der Prozessüberwachung entwickelt.

12.1 Verwendung der Zuwendung

Tabelle 13: Verwendung der Zuwendung

Forschungsstelle	wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)	Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)	Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
Fraunhofer Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik	25,38 PM (HPA Gr. A)	-	-

12.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die geleistete Arbeit der beteiligten Forschungsstellen war für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Die Fördermittel sowie das Personal sind zielorientiert und den Aufgaben angemessen eingesetzt worden.

Für die Entwicklung und Qualifizierung eines vereinfachten Ersatzmodells, mit dem das Umformergebnis beim Walzrunden prognostiziert und somit der Anlagenbediener unterstützt werden kann, war ein detailliertes Prozessverständnis erforderlich. Hierzu wurden der Umformprozess und die praxisrelevanten Materialien zunächst eingehend analysiert. Dazu waren experimentelle versuche zur Charakterisierung der Materialeigenschaften der Bleche erforderlich. Darauf aufbauend wurde ein detailliertes FE-Modell des Walzrundprozesses aufgebaut, mit dem der Umformprozess untersucht werden konnte. Hierbei konnten maßgebliche und vernachlässigbare Einflussgrößen identifiziert werden. Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Konzipierung des Prognosemodells und die zugehörige Prozessüberwachung. Anhand der generierten Simulationsdaten konnte der Funktionsnachweis für die entwickelten Konzepte erbracht werden. Nach der theoretischen Validierung wurde ein Demonstrator entwickelt, der an Praxisversuchen an realen 4-Walzen-Rundbiegemaschinen erprobt wurde. Anhand der Ergebnisse konnte eine Methodik für die Integration des Prognosemodells und der Prozessüberwachung in den Work-Flow bei KMU entwickelt werden.

Zusätzliche Ressourcen zur Durchführung des Forschungsvorhabens waren nicht notwendig.

12.3 Plan zum Ergebnistransfer

Tabelle 14: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
A: Sitzung projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortlaufende Präsentation und Diskussion der Forschungsergebnisse sowie Sicherstellung eines praxisrelevanten Projektverlaufs.	Rostock / Sitzung PA	02.07.2019 (Statusbericht) 19.12.2019 (Statusbericht) 16.06.2020 (Statusbericht) 14.01.2021 (Statusbericht) 13.07.2021 (Statusbericht) 01.12.2021 (Schlussbericht)
B: Abschlussbericht	Darstellung der Ergebnisse für den Anwender einem öffentlich erhältlichen Dokument	Abschlussbericht	zum Projektende (31.03.2022)
C: Ausstellung auf Fachmessen	Vorstellung der laufenden Forschungstätigkeiten und	C1: Symposium Materialtechnik /Clausthal	C1: 25. & 26.02.2021 C2: 05. – 07.10.2021

	Ergebnisse	C2: 13th European LS-DYNA Conference /Ulm	
D: Studentische Arbeiten	Ergänzung und Erweiterung der Projektinhalte durch eine wissenschaftliche Belegarbeit.	Universität Rostock Lehrstuhl für Fertigungstechnik	WS 19/20 SS 21 WS 21/22
E: Darstellung im Instituts-Jahresbericht (Lehrstuhl Fertigungstechnik)	Präsentation der Forschungsergebnisse im Jahresbericht des Fraunhofer IGP.	Darstellung in bebilderten und erklärenden Folien	2020 2021
F: Transfer in die Industrie durch Absolventen der Universität	Lehrveranstaltungen zur Umformtechnik	Vorlesungsreihe „ausgewählte Fertigungsverfahren“	WS 2021

Tabelle 15: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
G: Veröffentlichungen	Veröffentlichung von Forschungsergebnissen in elektronischer- und Papierform.	UTFscience / Meisenbach GmbH Verlag	2022
H: Softwarebereitstellung mit Kennwert-Katalog	Einbindung des Berechnungsmodells in den Work-Flow von KMU	Rostock / Downloadmöglichkeit über OwnCloud-Server	2022/ 2 Jahre verfügbar

Aus der Tabelle 14 ist zu entnehmen, dass bereits während der Projektlaufzeit ein Großteil der geplanten Maßnahmen für den Transfer der Projektergebnisse in die Industrie erfolgte.

Weitere Transfermaßnahmen werden nach Abschluss des Forschungsvorhabens fortgeführt. Hierzu zählt vor allem die Bereitstellung der Software mit einem Kennwert-Katalog auf der Fraunhofer-Cloud. Die Beratung interessierter Unternehmen und Auskunft über die Projektergebnisse ist selbstverständlich. Dazu zählt auch die Hilfestellung bei der Umsetzung der entwickelten Prozessüberwachung. Darüber hinaus sind weitere Veröffentlichungen der Projektergebnisse in internationalen Fachzeitschriften geplant.

Die Ergebnisse des Projekts zur Charakterisierung des Umformverhaltens beim Walzrunden können dem Bericht entnommen werden. Die Erstellung eines separaten Merkblatts ist somit nicht notwendig.

12.4 Förderhinweis

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben Umformoptimierung der Forschungsvereinigung FSM e.V. wurde unter der Fördernummer 20444BR über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.